

Cours Techniques de Fabrication Mécanique Conventionnelles et Avancée,
M1 Construction mécanique, Université de M'sila
Dr: Debih Ali

Contenu de la matière :

Partie I

1. Introduction
2. Fonderie
3. Mise en forme par déformation plastique
4. Formage des produits plats
5. Usinage

Partie II

1. l'électroérosion
2. Le frittage.
3. L'usinage photochimique.
4. L'usinage par Laser.
5. Formage par explosion,
6. Formage électro-hydraulique.
7. Formage électromagnétique.

**Matière : Techniques de fabrication
conventionnelles et avancées**

**Dr: Ali Debih
Faculté de Technologie de M'sila
Département Génie Mécanique**

2018 -2019

I- Présentation générale des procédés de mise en forme par déformation plastique

I-1. Introduction:

Ce premier chapitre présente l'ensemble des procédés conventionnels de fabrication des pièces métalliques, puis décrit de manière détaillée les opérations de mise en forme par déformation plastique avec et sans enlèvement de matière. Après avoir précisé la géométrie et la cinématique des différents procédés, le chapitre présente les phénomènes physiques fondamentaux, puis les modalités de la mise en œuvre pratique des procédés selon la température et la nature des principaux alliages (base fer, aluminium et cuivre). [1].

I.2. Aspects généraux

I.2.1. Principales opérations de fabrication des pièces métalliques

La figure I.1 récapitule les principales classes de procédés utilisés. Elle montre qu'il existe trois voies principales de fabrication de pièces métalliques selon l'état de départ du matériau métallique :

- Le moulage à partir de l'état liquide.
- Le façonnage à partir d'une ou plusieurs pièces à l'état solide. Cette voie peut, elle-même, se scinder en formage, ou mise en forme sans enlèvement de matière par déformation plastique, usinage, ou mise en forme avec enlèvement de matière, et l'assemblage, où l'on solidarise deux ou plusieurs pièces selon les procédés.
- Le frittage à partir de poudres par disparition des vides intergranulaire à haute température et éventuellement sous pression hydrostatique (compaction isostatique) ou un état de contrainte plus général par forgeage, filage... En raison, entre autres causes, de la classification socio-économique des secteurs industriels correspondants, on distingue dans le formage :
 - Le travail des métaux à l'état massif, pratiqué essentiellement dans les industries métallurgiques : laminage, forgeage, filage, étirage, tréfilage.
 - Le travail des métaux en feuilles, pratiqué comme l'usinage dans les industries mécaniques et dont le principal procédé est l'emboutissage des tôles.

Bien que le volume de pièces concernées soit nettement plus modeste, il ne faut pas oublier diverses autres voies permettant de modifier la forme d'un solide et très utiles dans diverses situations, notamment pour la réalisation ou la réparation d'outillages de mise en forme :

- Addition d'un matériau métallique solide à une pièce en le transformant temporairement en ions par électrolyse (électroformage), en liquide (rechargement par les techniques de soudage) ou en gaz (pulvérisation et condensation).
- Passage temporaire d'un alliage métallique par l'état semi-solide entre liquidus et solidus et injection dans un moule. [1].

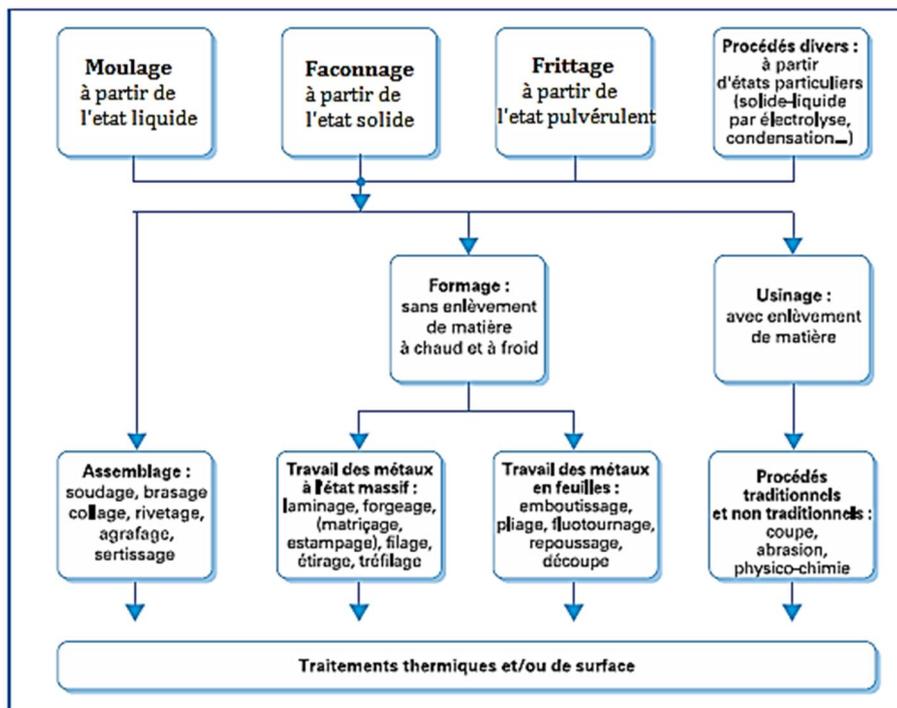


Figure I.1 : Principaux procédés de fabrication des matériaux métalliques, [1].

I.2.2. Evolution de la mise en forme des métaux

L'objectif premier de la mise en forme des métaux est de conférer à une pièce métallique des dimensions situées dans une fourchette de tolérance donnée. Les principaux procédés de mise en forme des métaux sont apparus progressivement, donnant naissance par la suite à diverses variantes, parfois très nombreuses. Les formes modernes des divers procédés sont le plus souvent apparues récemment pour assurer la production en grande série de pièces à faible coût. On note dans le tableau I.1 quatre stades principaux d'émergence des divers procédés.

- Dès les débuts de l'élaboration des métaux et alliages métalliques à partir de minerais sont pratiqués, semble-t-il, le moulage à partir de l'état liquide, le forgeage libre à chaud de pièces massives brutes de coulée ou réchauffées et le formage à froid de feuilles métalliques. Il s'agit en effet d'une extension assez naturelle du processus d'élaboration mettant en jeu des moyens assez simples : des fours, des moules, un outil de frappe et un support. Pour les pièces minces, les artisans pratiquaient sans doute le travail à froid par frappes successives entrecoupées de réchauffages pour adoucir le métal et restaurer sa capacité de déformation. Par la suite, il a fallu attendre 1940 pour que les Allemands inventent la forge à froid (extrusion) des aciers pour fabriquer des pièces d'armement durcis par écrouissage en économisant des éléments d'alliage. Cette innovation majeure a été rendue possible par l'introduction de la lubrification par la phosphatation et le savonnage. En 1970 dans le cadre des politiques d'économie d'énergie imposées par le premier choc pétrolier, la coulée continue des demi-produits en acier prend son véritable essor industriel et a depuis supplanté totalement la coulée traditionnelle en lingots pour la fabrication des

Cours Techniques de Fabrication Mécanique Conventionnelles et Avancée,
M1 Construction mécanique, Université de M'sila
Dr: Debih Ali

produits courants en aciers. Depuis 1990 environ, l'hydroformage constitue une opération intéressante de certaines gammes industrielles de travail des métaux en feuille.

- Vers les premiers siècles de l'ère chrétienne, apparaissent les procédés d'étirage de fils à travers des plaques percées et d'usinage de pièces à l'aide de burins, forets, limes et scies. Petit à petit, ces procédés mécaniques d'usinage (dits traditionnels) se sont diversifiés en tournage, fraisage, perçage, brochage, taraudage..., procédés pratiqués sur diverses machines-outils spécialisées. Leur mise en œuvre et leurs performances ont considérablement évolué à partir de 1960 avec l'introduction de la commande numérique qui donne naissance, entre autres machines-outils polyvalentes, aux centres d'usinage. Malgré les progrès des procédés de formage sans enlèvement de matière, les procédés mécaniques d'usinage restent les procédés de mise en forme des métaux les plus importants d'un point de vue économique.
- À la Renaissance, apparaissent le laminage, devenu depuis, du fait de sa très haute productivité et de sa grande polyvalence, le procédé de mise en forme sans enlèvement de matière le plus important, et le procédé de gravure par eau forte, devenu à l'ère moderne l'usinage chimique. Ce dernier procédé reste toutefois le procédé d'usinage non traditionnel le plus confidentiel (si l'on excepte l'usinage des circuits imprimés dans l'industrie électronique), à côté des autres procédés développés à partir de 1945 : procédés d'usinage par abrasion (meulage, rectification, polissage, rodage, jet d'eau abrasif, ultra-sons), électroérosion, usinages électrochimique, au jet d'eau, oxycoupage, avec un faisceau de lumière laser ou d'électrons. Ces procédés ont permis, entre autres applications, de résoudre les problèmes d'usinage et/ou polissage des matériaux de faible usinabilité mécanique, comme les outils de mise en forme.
- Au XIXe siècle, apparaît le filage à chaud des alliages cuivreux rendu possible par la réalisation de presses hydrauliques de fortes capacités. C'est au Français Séjournet que revient le mérite de l'invention, vers 1945, de la lubrification au verre qui rend possible le filage à chaud des aciers et d'autres alliages de haute dureté (alliages de titane...).

La plupart des objets métalliques d'utilisation courante ont subi plusieurs opérations de mise en forme à l'état massif ou/et à l'état de feuilles. Traditionnellement, la mise en forme d'une pièce métallique est suivie d'un traitement thermique permettant de conférer à la pièce la microstructure et les propriétés mécaniques requises par son utilisation, et, le plus souvent, d'un traitement de surface pour maîtriser ses propriétés superficielles : rugosité (aspect esthétique, adhésion à un autre matériau), propriétés mécaniques (résistance à la fatigue), chimiques (résistance à la corrosion, adhésion à un autre matériau) et tribologiques (diminuer le frottement, augmenter la résistance à l'usure). Si la nature des opérations de mise en forme n'a pas fondamentalement changé durant les cinquante dernières années, leurs conditions de mise en œuvre ont très fortement évolué dans le sens d'une productivité de plus en plus élevée. Quatre grandes tendances se sont ainsi développées.

- **Substitution de procédés** Elle vise à remplacer diverses opérations d'usinage, peu économes en matière première et en énergie, par des opérations de mise en forme sans enlèvement de matière comme le forgeage à froid ou le frittage. Dans l'industrie automobile, par exemple, la forge à froid s'est développée au

détriment de l'usinage. La coulée continue directe des demi-produits a permis d'améliorer la qualité métallurgique tout en supprimant les opérations de laminage à chaud sur lingots et en économisant de la matière (suppression des têtes et pieds de lingots). Pour les matériaux dont le coût matière est très élevé, de telles substitutions sont très attractives : ainsi le frittage permet de réduire notablement la perte de matière dans la réalisation d'éléments de turbomachines en alliages réfractaires de l'industrie aéronautique. Même pour des matériaux moins onéreux comme les aciers, le forgeage-frittage se révèle d'un grand intérêt économique pour fabriquer des pièces comme les bielles des moteurs à explosions. Par ailleurs, le forgeage à chaud se soucie régulièrement des progrès de la fonderie et de sa volonté de conquérir le marché de certaines pièces mécaniques comme les arbres à cames. Néanmoins, plutôt que de tenter la substitution systématique de procédés, il importe plutôt d'essayer de tirer parti, au mieux et de manière complémentaire, des performances des divers procédés de mise en forme, avec et sans enlèvement de matière, à l'état massif comme à l'état de feuilles, pour bâtir la gamme de fabrication la plus économique possible. Le concepteur a donc intérêt, sinon à disposer de la panoplie la plus large possible de procédés de mise en forme, du moins à bien connaître l'état actuel de leurs possibilités techniques.

- **Suppression ou réduction des traitements de finition des pièces** Les praticiens de la mise en forme visent maintenant à produire directement et sans opérations supplémentaires la pièce avec toutes ses spécifications, tant dimensionnelles que mécaniques, à cœur comme en surface, tout en économisant au maximum l'énergie et la matière, notamment les éléments d'alliage rares et chers.

Des traitements thermomécaniques sont ainsi pratiqués en laminage, forgeage, filage et emboutissage à chaud. Moyennant un choix judicieux de la composition chimique de l'alliage mis en forme et des conditions thermiques durant, entre et après les opérations de formage, ces traitements permettent d'obtenir les structures et les propriétés adéquates pour l'utilisation. De tels traitements thermomécaniques ont souvent été mis au point en simulant expérimentalement la séquence des opérations à l'aide d'essais rhéologiques comme la torsion à chaud. Ainsi la baisse constante de la température de laminage à chaud des tôles d'acier et le bobinage à une vitesse adéquate permettent d'obtenir des tôles de structure bainitique, compromis intéressant entre dureté et fragilité. L'emboutissage à chaud de l'acier 22MnB5 permet d'obtenir par trempe après formage dans les outils refroidis d'obtenir une pièce de très haute résistance (1500 MPa). Par ailleurs, par le développement de procédures d'essais tribologiques, on peut maîtriser le régime de lubrification par optimisation du lubrifiant et de la nature et de l'état de surface des outils de mise en forme. On contrôle ainsi le frottement et l'état de surface du produit tout en augmentant la durée de vie des outils. Ainsi, des essais de bipoinçonnements répétés ont montré que l'utilisation d'aciers à cylindres présentant en surface des carbures durs, type carbure de vanadium, et le choix de bons additifs de lubrification permettent de former sur les outils un film de transfert fin. Ce film de transfert assure un bas

frottement et permet dans le laminage à froid sur cage Sendzimir d'obtenir des tôles d'acier inoxydable au fini miroir.

- **Enchaînement continu des diverses opérations** Il se développe de manière irrésistible, avec élimination progressive des temps morts et des stockages intermédiaires, donnant naissance à une chaîne de production aussi continue que possible. Le caractère continu des diverses opérations a en effet un double avantage : réduction des coûts de stockage ; amélioration de la qualité du produit, toute rupture dans la chaîne de fabrication amenant l'apparition de défauts ou une baisse de propriétés. On enfourne directement de plus en plus les demi-produits chauds en aciers élaborés par coulée continue dans les trains de laminage à chaud. On assiste au développement pour les tôles, d'installations réalisant sur une ligne continue les opérations de laminage à froid, de recuit, de déposition d'un revêtement...
- **Le recours aux logiciels de simulation numérique** La mise en forme des matériaux métalliques est devenue un secteur industriel de haute technicité et en progrès constant, avec une foule de problèmes dont la résolution nécessite le recours à des moyens très performants. Parmi ces outils, l'informatique occupe une place de choix. A côté d'applications classiques, type CAO, conduite de chaînes de fabrication, ou gestion de banques de données, les bureaux d'études utilisent de plus en plus les logiciels de simulation par des calculs par éléments finis des procédés. On sait en effet de mieux en mieux résoudre numériquement les équations décrivant les grandes déformations induites dans les procédés grâce notamment aux techniques de remaillage. Nous pouvons par exemple citer les principaux développements réalisés dans FORGE®, un code commercial de simulation tridimensionnelle implicite par éléments finis des procédés :
 - ❖ 1995 : Remaillage automatique (*automatic remeshing*) permettant la simulation de très grandes déformations.
 - ❖ 1996 : Contrôle automatique de la qualité des éléments (*element quality control*) et remaillage adaptatif.
 - ❖ 1997 : Développement du calcul parallèle (*parallel computing*) permettant de diminuer les temps de calcul.
 - ❖ 2002 : Simulation des traitements thermiques dont la trempe (*heat treatments, quenching*).
 - ❖ 2003 : Prise en compte de la déformation des outils (*deformable tools*).
 - ❖ 2005 : Calculs thermomécaniques de la mise en forme couplés à l'évolution métallurgique (*coupling with metallurgy*).
 - ❖ 2007 : Calcul du régime thermique des outils (*thermal regime in tools*), permettant de modéliser leur usure, et formage de multi-matériaux, (*multi body forming*).
 - ❖ 2009 : "Optimisation automatique de procédés avec multi-critères (*automatic process optimization*).
 - ❖ 2014 : Modélisation tridimensionnelle du chauffage par induction (*three-dimensional modeling of induction heating*).

Cours Techniques de Fabrication Mécanique Conventionnelles et Avancée,
M1 Construction mécanique, Université de M'sila
Dr: Debih Ali

Tableau I.1 : Évolution et formes diverses des procédés de mise en forme des métaux et alliages métalliques. [1].

Procédés primitifs	Date d'émergence	Formes modernes
Forgeage libre du produit chaud	5000 avant J.-C.	Matriçage, estampage entre matrices sur pilon, presses mécaniques, hydrauliques Forge à froid des aciers Forge à tiède, Forgeage sans bavure
Fonderie	5000 avant J.-C.	Fonderie sous pression En moules perdus ou permanents Coulée centrifuge de tubes Coulée continue de brames, blooms, billettes
Formage des métaux en feuille par martelage, repoussage	5000 avant J.-C.	Opérations d'emboutissage Cisailage, Cintrage, Profilage Chaudronnerie et travail des tôles fortes Fluotournage, Repassage des produits tubulaires, Hydroformage
Étirage de fils	Premiers siècles	Tréfilage multipasse Étirage de profilés
Usinage par burin, bédane, foret, lime, scie	Premiers siècles	Coupe par tournage, fraisage, perçage, brochage, taraudage, sciage Usinages par abrasion : meulage, rectification, polissage, rodage, jet d'eau abrasif, ultra-sons
Gravure par eau forte	XV ^e siècle	Usinages physico-chimique : par électroérosion, faisceaux laser ou d'électrons, par jet d'eau, oxycoupage, chalumeau plasma, électrochimique, chimique
Laminage	XVI ^e siècle	Laminages sur train tandem, cage réversible, cage universelle, cage Sendzimir, l Laminoirs de tubes à pas pélerin, Laminoirs Manesmann perceurs...
Filage à froid de Pb, métaux mous	XIX ^e siècle	Filage à chaud des alliages Al, Cu Filage à chaud (1200°C) au verre des aciers Extrusion (20 C) des aciers phosphatés savonnés

I.3. Industrie de la fonderie et Moulage

I.3.1. Généralités:

Le terme fonderie définit aussi bien les installations métallurgiques dans lesquelles on fond les métaux et où on les coule dans des moules pour leur donner la forme des objets à fabriquer, que l'ensemble des opérations nécessaires à leur production.

C'est, tout à la fois, un art et un métier dont les origines remontent à plusieurs millénaires avant notre ère, utilisant et mettant en œuvre des techniques aussi diverses que variées, comme le moulage, le noyautage, la métallurgie, la fusion et la coulée des

métaux et alliages métalliques, les traitements thermiques, la finition, le parachèvement des pièces, etc.

La fonderie, c'est aussi une industrie produisant des pièces de toutes natures, en toutes quantités, de la façon la plus économique à partir de matières premières brutes (ferrailles, déchets de tôles, bocages), contrairement à certaines techniques concurrentes (forgeage, mécano-soudage...) utilisant des produits semi-finis comme les tôles neuves, les barres et billettes en acier de toutes nuances, élaborés par la sidérurgie.

La fonderie a pu améliorer constamment ses performances grâce aux progrès de toutes ses composantes techniques, tant en précision, qu'en fiabilité, lui permettant de concurrencer, voire de remplacer, dans des emplois très sévères ou de sécurité, des pièces habituellement fabriquées par d'autres techniques (forgeage par exemple) comme des vilebrequins de moteurs ou des bras de suspension pour les véhicules automobiles. Toutes ces évolutions et tous ces avantages expliquent la très grande diffusion des pièces de fonderie dans toutes les branches de l'industrie, et les capacités de progrès de cette technique laissent entrevoir de plus larges applications dans l'avenir.

[2]

I.3. 2. Rôle et possibilités de la fonderie

L'industrie de la fonderie, utilisatrice de matières premières (fonte, ferraille, coke), fournit des pièces finies ou semi-finies à l'ensemble de l'industrie. Elle est à ce titre une industrie de base.

On s'adresse à elle soit pour la fabrication de pièces de formes compliquées qu'il serait difficile ou impossible de réaliser par tout autre procédé, soit pour la production à des prix de revient plus intéressants de pièces plus simples, soit encore pour profiter des propriétés physiques ou d'utilisation (dilatation, corrosion, frottement, usure, basses et hautes températures) et des propriétés mécaniques des divers métaux et alliages coulés, soit enfin pour couler des alliages non corroyables ou difficilement usinables. **[2]:**

I.3.3. Moulage

L'opération de moulage consiste à fabriquer un moule, généralement en matériaux réfractaires, qui porte l'empreinte en négatif de la pièce, cette empreinte étant obtenue à partir d'un modèle reproduisant la pièce à fabriquer. **[3]:**

I.3.3.1. Classement des procédés de moulage

L'opération de moulage est une des plus importantes du processus industriel de la fonderie. Elle détermine en effet, d'après le modèle, les formes de la pièce à couler, ses dimensions et leur précision, ses états de surface, son refroidissement, et joue un rôle prépondérant sur de très nombreux paramètres influant sur sa qualité. C'est aussi, avec le noyautage, l'opération qui entraîne les coûts les plus élevés dans les différentes opérations de fabrication. À titre d'exemple, dans des productions de grandes séries, les opérations de moulage-noyautage représentent fréquemment 40 % environ des prix de revient hors matière (moulage 30 %, noyautage 10 %).

Il convient donc que le choix d'un procédé de moulage soit fait avec le maximum de précaution pour ne pas pénaliser les productions futures, tant en qualité qu'en prix de revient.

De très nombreux **procédés de moulage** existent, **en châssis, en mottes, en fosse** pour les très grosses pièces, **au trousseau** pour des pièces circulaires par exemple, **en modèle perdu** (polystyrène), **en cire perdue** pour des pièces de précision ou des œuvres d'art, **en coquille métallique par gravité, sous-pression** pour les non ferreux, **en coquille centrifugée** pour des tuyaux notamment, etc., que nous présenterons dans les paragraphes suivants.

Cette très grande variété des procédés impose de les classer pour permettre leur présentation. Nous avons choisi de les classer en fonction des modes de moulage et de durcissement des matériaux utilisés au moment de la fabrication du moule ou des noyaux et de la nature des modèles qui doivent être compatibles avec les procédés employés :

- ❖ modèles permanents (bois, métal, résine, etc.);
- ❖ modèles perdus (polystyrène, cire, etc.);
- ❖ moules métalliques ;
- ❖ Procédés spéciaux. **[3]:**

I.3.3.2. Matériaux de moulage

Pour la fabrication des moules et des noyaux, la fonderie utilise de nombreux matériaux et produits dont les plus importants sont cités ci-après.

- **Sables de base:** Sables siliceux (grains de silice SiO_2) et Sables spéciaux (chromite, olivine, zircon, silico-alumineux).
- **Liants:** Ils doivent en effet donner :
 - ❖ la plasticité au sable pour épouser les formes du modèle et acquérir ensuite par durcissement une résistance mécanique permettant de conserver la forme jusqu'à la solidification du métal ;
 - ❖ le minimum de réactions moule/métal qui sont des risques de défauts sur pièce de types piqûres ou soufflures.

On peut classer les liants en deux grandes familles :

a) les liants minéraux comme les argiles, bentonite, silice colloïdale, silicate soluble, plâtre et ciment ;

b) les liants organiques comme les matières amylacées (dérivées de l'amidon), les huiles siccatives et les résines synthétiques durcissables à chaud ou à froid, avec catalyseurs solide, liquide ou gazeux.

- **Produits annexes et divers**

- ☒ Les **adjuvants** mélangés au sable pour obtenir des effets secondaires. On citera parmi les plus importants :

- 1) les générateurs d'atmosphère réductrice (noir minéral, brai de pétrole, huile minérale) destinés à prévenir la formation d'oxydes et à faciliter le décapage des pièces ;
- 2) les agents de débouillage facilitant la destruction des moules et noyaux après la coulée ;
- 3) et d'autres agents antipénétration, anticollage, etc.

- ☒ Les **enduits** déposés à l'interface moule-métal, pour limiter les réactions moule/métal. On utilise couramment la silice, la chamotte, le zircon, l'oxyde de fer, le talc, le graphite...

- ☒ Les **colles** à froid ou à chaud, pour assembler entre elles des parties de moule ou de noyaux.
- ☒ Les **mastics** pour réparation des moules.
- ☒ Les **agents de démoulage** pulvérisés sur le modèle avant le moulage, pour éviter le collage du sable (pétrole par exemple).
- **Matériaux pour moules permanents** Certains procédés de moulage-noyautage nécessitent l'exécution de moules permanents pour lesquels on utilise des matériaux métalliques comme les fontes, fonte GS, aciers, aciers spéciaux revêtus d'enduits réfractaires (graphite, lait de silice) destinés à protéger leur surface de l'érosion du métal liquide et des chocs thermiques trop brutaux. C'est le cas principalement :
 - 1) en fonderie de fonte, de la centrifugation et de la coulée en coquille ;
 - 2) et en fonderie de métaux non ferreux (aluminium, Zamac) des coulées en coquille par gravité, basse pression et sous-pression.
- **Produits spéciaux** Beaucoup de procédés de moulage particuliers font appel à des produits spéciaux, comme par exemple la fonderie de précision (dite aussi en **cire perdue**) qui utilise des modèles injectés en cire, ou en urée, puis éliminés par chauffage après dépôt et durcissement des couches réfractaires sur les modèles. Citons aussi les élastomères pour le moulage de certaines pièces difficiles à mouler (statues, bijoux, etc.). **[3]**

I.4. Moulage en moule non permanent. [5]

Un moule non permanent est une structure principalement réalisée en matériaux de moulage (généralement en sable), composée d'une ou de plusieurs parties et offrant après assemblage un évidement appelé empreinte finale. Cette empreinte correspond à la pièce brute (en tenant compte du retrait) et aux systèmes de remplissage et d'alimentation.

Après coulée de l'alliage, cette structure est désagrégée (décochage) pour extraire la pièce brute. Chaque partie du moule correspondant à une forme de la pièce constitue une empreinte partielle. Une empreinte donne généralement les formes extérieures de la pièce. Un noyau donne généralement les formes intérieures de la pièce.

I.4.1. Moulage avec modèle

a. technique de moulage. Figure I.2.

b. Le modèle

Le modèle de fonderie est comme son nom l'indique, l'outil qui permet de réaliser dans le sable la cavité qui, après coulée du métal et refroidissement, permettra d'obtenir la pièce brute.

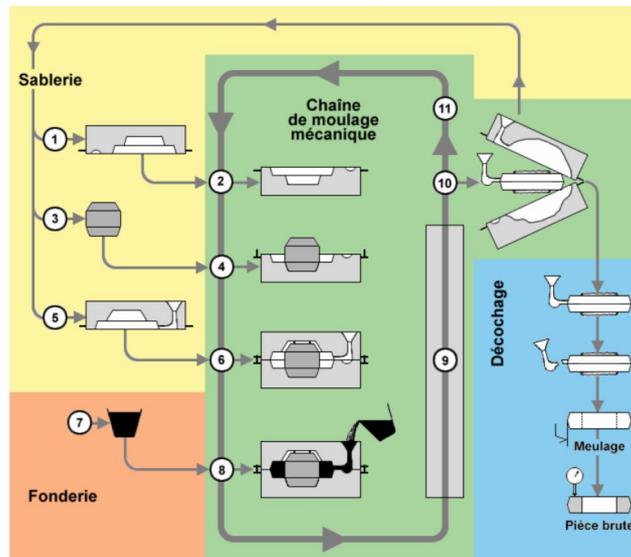
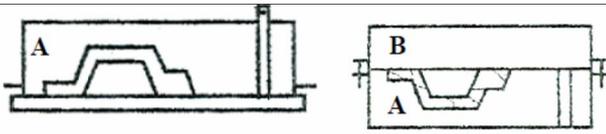
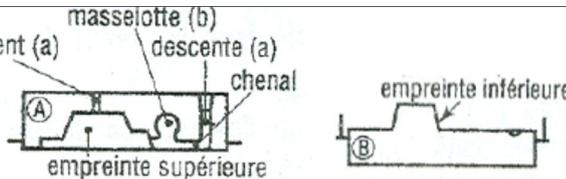
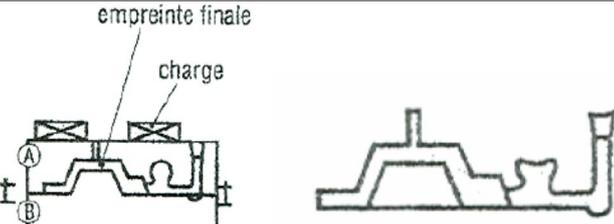


Figure I.2. Procédé de Moulage [5]

Le tableau I.2. Résume les différentes étapes de moulage [4]

Étape 1:	préparation du sable de moulage	 pièce à obtenir
Étape 2	préparation du modèle et des boîtes à noyaux	 modèle
Étape 3+4	confection de l'empreinte	 A: serrage châssis dessus B: serrage châssis dessous
Étape 5+6	Démoulage du modèle et fermeture des moules	 Taillage du système de remplissage et d'alimentation
Étape 7	Remplissage de l'empreinte	

- ☒ **la dépouille** Les formes du modèle doivent permettre son extraction du sable sans dégradation du moule. Dans ce but on donne une certaine inclinaison aux parois du modèle, prises dans la position du moulage et suivant le sens du démoulage (cette inclinaison prend le nom de dépouille).
- ☒ **Le retrait** Quel que soit le métal on constate une diminution de volume de la pièce, appelée retrait, au cour de passage de l'état liquide à l'état solide ou bien pendant le refroidissement avant et après solidification. Cette contraction ou variation de volume (donc de dimensions) doit être compensée, elle est généralement exprimée en millimètre par mètre.
- ☒ **La surépaisseur d'usinage « e »**_Le surépaisseur d'usinage est calculée en processus de fabrication après une simulation d'usinages et calcul du brut à partir d'une condition de fabrication il est fonction des spécifications géométriques, des tolérances dimensionnelles adoptées, du procédé d'usinage, des dimensions de la pièce et l'importance de la série.
- ☒ **Matériaux du modèle** Pour des pièces à exécuter en grandes séries et avec des tolérances dimensionnelles serrées, les modèles sont métalliques et comportent les dispositifs de moulage, des orifices de coulée, des masselottes, des événements. Bien entendu, ces modèles seront mis au point et retouchés à l'occasion de chaque nouvelle mise en fabrication. Dans le cas de petite et moyenne série et de faible précision on peut utiliser un modèle aussi peu onéreux habituellement réalisé en bois. On peut aussi, en moulage main, surmouler une pièce irréparable que l'on utilise comme modèle pour fabriquer une pièce de remplacement.
- ☒ **Sables de fonderie** Les sables utilisés pour réaliser les moules doivent réunir un certain nombre de propriétés
 - Reproduire les formes et les détails les plus fins du modèle.
 - Résister à la température du métal fondu.
 - Se désagréger facilement après le refroidissement de la pièce coulée pour permettre le décochage.

Pour répondre à ces impératifs, le sable de moulage doit satisfaire à deux exigences fondamentales qui sont:

- La mise en forme au contact d'un modèle en épousant tous les détails; cela signifie que son état initial doit être pulvérulent, soit liquide ou liquide plastique, soit plastique; suivant cet état, le compactage est effectué soit par simple gravité, soit par un effort mécanique de serrage (pression, secousse, vibration, projection mécanique ou pneumatique).
- La conservation de cette forme jusqu'à la solidification complète du métal
Les propriétés recherchées pour le sable de moulage sont alors:
 - **Réfractaire:** Le sable doit présenter une température de ramollissement supérieure à la température de fusion de l'alliage considéré.
 - **Perméable:** Le sable doit permettre l'évacuation des gaz contenus dans l'empreinte du moule lors du remplissage ou générés à la coulée par la réaction moule-alliage (indépendamment des événements et des tirages d'air réalisés dans le moule). La perméabilité dépend des dimensions des grains de sable, de la qualité du liant, du serrage...

- **Plastique:** Sous l'action de pressions exercées par l'outillage sur le sable, son état subsiste après suppression de l'action de l'outillage (conservation de l'empreinte après démoulage). La plasticité dépend de la finesse des grains de sable, du liant utilisé, de l'enrobage des grains.
- **Récupérable:** Une économie de matériaux est assurée par recyclage des sables, après régénération et contrôle des caractéristiques.

I.4.2. Moulage avec noyaux

Les parties intérieures d'une pièce sont souvent des parties en contre dépouille. Pour réaliser ces formes, on place des masses de sable aggloméré ou des broches métalliques coulissantes à l'intérieur de l'empreinte. Ces masses de sable sont obtenues dans des boîtes à noyaux. L'empreinte est complétée par des portées qui permettent de tenir le noyau dans le moule. [5]

Propriétés des noyaux

- Solide à fin de résister à la poussée que le liquide exerce sur lui.
- Perméable aux gaz produits au moment de la coulée
- Infusible pour éviter la pénétration à l'intérieur du métal.
- Pouvoir se désagréger facilement après la coulée, pour qu'on puisse aisément enlever le sable demeuré dans les parties creuses des pièces. **Figure I.3.**

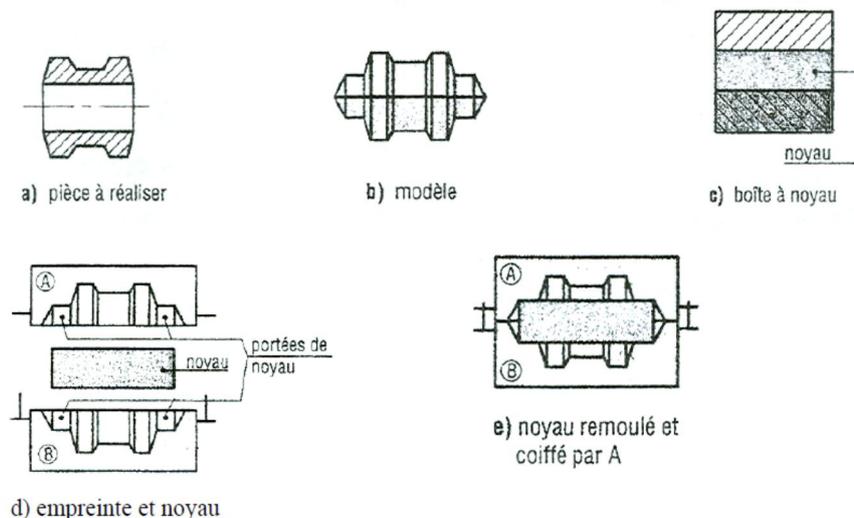


Figure I.3. Preparation du noyau [5]

I.4.3. Moulage sans modèle

Les empreintes et les noyaux sont obtenus par taillage du sable de moulage. On emploie des chapes s'il y a plus d'une surface de joint

a. Moulage à trousseau circulaire

Pour des pièces de révolution on peut éliminer l'utilisation du modèle en présence de la planche à trousser, taillée au profil extérieur ou intérieur de la pièce à mouler.

b. Moulage à trousseau rectiligne

La même technique que la précédente mais pour des profils constant dont les génératrices sont rectilignes.

I.4.4. Moulage en grappe

Plusieurs moules sont assemblés horizontalement ou verticalement (en presse) afin d'être coulés par le même système de remplissage. Cela permet la réduction de la mise au mille pour les petites pièces. (voir figure ci-dessous). **Figure I.4.**

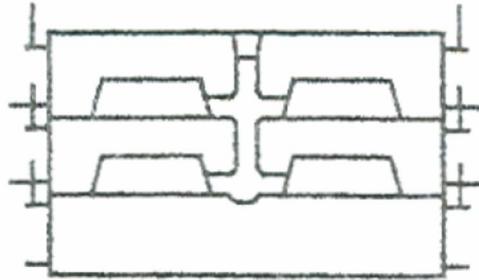


Figure I.4. Moulage en grappe

I.4.5. Moulage en carapace

Connu sous le nom de procédé Croning, il réalise des empreintes et des noyaux présentant la forme d'une carapace de 4 à 8mm d'épaisseur. Du sable siliceux préalablement enrobé de résines thermodurcissables est mis en contact d'un outillage chauffé à 300°C environ. L'agglomération du sable, par polymérisation, se propage dans l'épaisseur du sable. Il y a formation d'une croûte dont l'épaisseur dépend du temps de contact avec l'outillage (plaques modèles ou boîtes à noyaux). **Figure I.5. [4]**

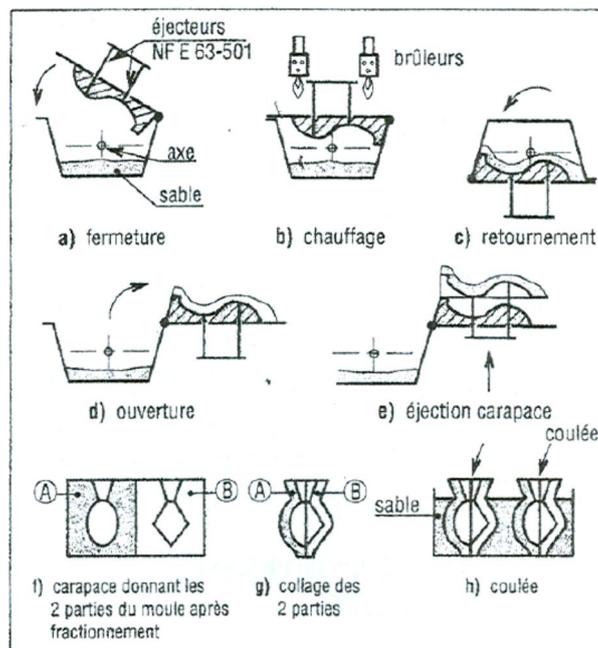


Figure I.5. Moulage en Carapace

I.4.6. Moulage avec modèle perdu

Il s'agit de faire un modèle dans un matériau facile à mettre en forme et dont il est facile de se débarrasser avant ou pendant la coulée. Typiquement ce matériau est du polystyrène qui brûle au fur et au mesure de la montée du métal liquide, ou bien de la cire qui ont des bas points de fusion qu'on peut fondre et évacuer avant la coulée (procédé à cire perdue). Une fois le modèle réalisé, on l'enrobe de sable, de plâtre réfractaire ou

d'une carapace céramique. On se débarrasse du modèle en le fondant ou en le brûlant. Enfin, le moule est rempli de métal liquide.

Le moule est alors réalisé en une seule partie autour d'un modèle sans possibilité de démoulage. Le modèle comporte la forme de la pièce ainsi du système de remplissage et d'alimentation.

I.4.7 Coulée en coquille par gravité

Le moule permanent peut supporter plusieurs coulées successives avant sa mise hors service. Les opérations fondamentales que sont le moulage (obtention des formes), le remplissage en alliage liquide, l'alimentation de la pièce pendant la solidification et enfin le démoulage de cette pièce sont assurés par le moule qui devra être mécanisé presque totalement. La répétition de ces opérations amène à parler de cycle de moulage et de cadence de production, qui sont spécifiques à chaque moule.

Le remplissage et l'alimentation sont déterminés par la pesanteur, le moule étant appelé coquille, d'où la désignation courante de ce procédé de moulage : coulée en coquille, par gravité. Ce procédé peut être utilisé avantageusement à partir d'une série minimale de 2000 pièces.

II.4.8. Coulée sous pression

Ou injecte, par l'intermédiaire d'un piston, en un temps très court (0,1 s en moyenne) un alliage en fusion dans un moule métallique.

Une surpression pouvant atteindre une valeur de 100 MPa est alors appliquée au métal pour compenser le retrait de solidification. Les moules sont composés de deux parties principales fixées sur des machines spéciales qui fonctionnent suivant un cycle réglable. Ce procédé est rentable à partir de 10 000 à 20 000 pièces fabriquées.

I.4.9. Coulée continue

Cette technique, déjà utilisée en sidérurgie pour obtenir des produits longs, permet la réalisation de profilés de sections pleines ou creuses très variées par coulée d'alliages de fonderie.

I.4.10. Moulage par centrifugation [5]

La même surface moulante permet la réalisation d'une centaine à plusieurs milliers de pièces. La centrifugation en moules non permanents nécessite au contraire la réfection de la surface moulante avant chaque coulée. La machine de centrifugation est d'axe horizontal, vertical ou oblique. Le moule est directement entraîné en rotation. Les moules (appelés aussi coquilles) sont métalliques (fonte, acier, cuivre) ou en graphite. Les accélérations appliquées à l'alliage coulé sont de plusieurs dizaines de fois l'accélération de la pesanteur (g). **Figure I.6.**

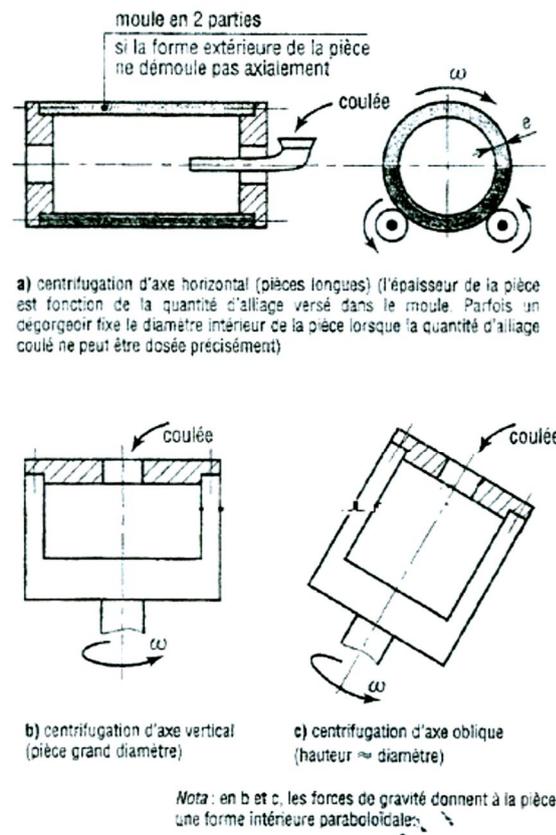


Figure I.6. Moulage par centrifugation

I.4.10.1. Intérêts

Ce procédé présente les caractéristiques suivantes:

- ☒ éviter l'emploi de noyaux axiaux pour les pièces creuses de révolution
- ☒ augmentation de la compacité de l'alliage
- ☒ structure de l'alliage affinée grâce aux gradients de température importants au voisinage du moule
- ☒ ségrégation centrale d'éléments de faible masse volumique (oxydes, impuretés)
- ☒ diminution de la mise au mille par la suppression fréquente des systèmes de remplissage et d'alimentation
- ☒ dans un même moule, réalisation de pièces en alliages composites centrifugés en couches successives, la couche précédente solidifiée servant alors de moule pour la suivante (bimétal, multimétaux), chaque alliage étant employé spécifiquement en raison de ses caractéristiques
- ☒ le procédé offre peu d'intérêt pour les alliages à faible masse volumique, les vitesses de rotation du moule seraient nécessairement très élevées.

I.5. Mise en forme des métaux

Les procédés de mise ayant une incidence directe sur les caractéristiques morphologiques et mécaniques des pièces, il est nécessaire de connaître les principes physiques et technologiques de ceux-ci afin de concevoir efficacement nos produits. Le choix d'un procédé de mise en forme est fonction du matériau retenu et des caractéristiques produit. En effet, chaque procédé dépend d'une famille de matériaux et

impose ses règles de tracé. De la même manière, les caractéristiques pièces peuvent imposer un procédé.

I.5.1. Mise en forme par déformation plastique des métaux en feuille (pliage, emboutissage, cisailage et poinçonnage) [6]

I.5.1.1. Pliage: Le pliage permet l'obtention de pièces développables dont les plis sont obligatoirement rectilignes (**figure I.7**).

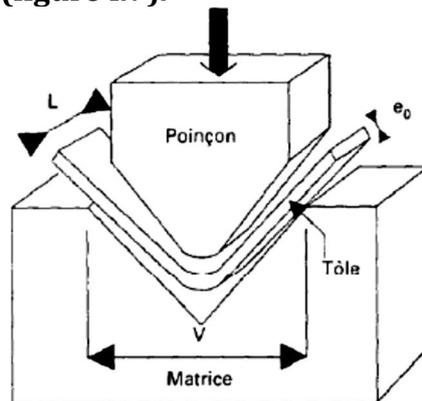


Figure .I.7 Principe de pliage

Deux techniques sont utilisées :

- ☒ **Pliage en l'air (figure. I. 8)** Poinçon et matrice en V dont l'angle est inférieur à celui du pli à réaliser. Ce dernier est donné par la profondeur de pénétration du poinçon dans la matrice.
- ☒ **Pliage en frappe** Poinçon et matrice en V dont l'angle est sensiblement égal à celui du pli à réaliser.

L'épaisseur de la tôle est réduite à l'endroit du pli. Cette réduction est fonction du rayon R de pliage et de l'épaisseur e du matériau.

F = effort vertical calculé

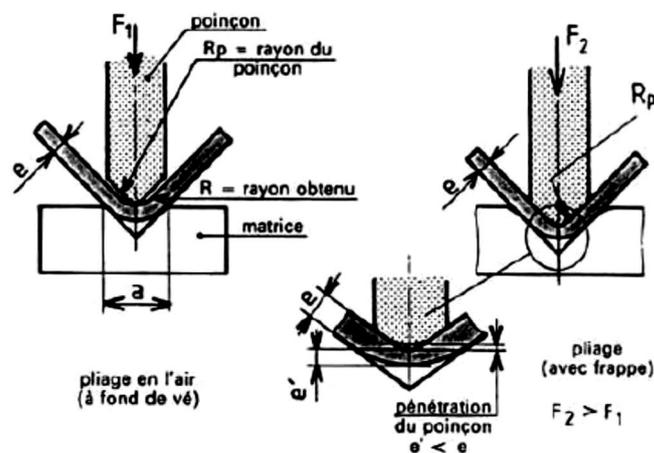


Figure. I. 8. Pliage en frappe [6]

I.5.1.2. Détermination de l'effort de pliage en V

Formule utilisée pour le calcul de l'effort vertical de pliage
Pliage en l'air

$$F_1 = k \frac{L e^2 R_m}{a} \quad \text{où :}$$

k = 1,40 pour a = 6e; e = épaisseur à plier (mm),

k = 1,33 pour a = 8e; L = longueur du pli (mm),

k = 1,24 pour a = 12e; a = ouverture du vé (mm),

k = 1,20 pour a = 16e; R_m = résistance à la rupture du métal à plier (daN/mm²).

- Le rayon R obtenu est voisin de a/6 à condition que R_p ≤ R.

Pliage en frappe

L'effort F₂ à fournir progresse avec l'épaisseur. Il peut atteindre

$$F_2 = 2 F_1$$

I.5.1.3. Retour élastique

Lorsque cesse l'effort de pliage, le produit garde une déformation permanente, qui est d'autant plus éloignée de celle obtenue par le fléchissement maximum que l'élasticité du métal est grande. Ce retour élastique est appelé «ressaut».

Ces formules s'appliquent dans le cas de pliage de tôle sans frappe à fond, dans le cas de pliage en frappe le retour élastique est quasiment supprimé.

I.5.1.4. Détermination des rayons

$$\frac{r_0 + \frac{e_0}{2}}{r + \frac{e_0}{2}} = \frac{1}{1 + 3 \frac{r + \frac{e_0}{2}}{e_0} \frac{R_e}{E}}$$

Valable lorsque $r/e_0 \geq 10$

I.5.1.5. Détermination des angles. Figure. I. 9.

$$\frac{\pi - A}{\pi - A_0} = \frac{r_0 + \frac{e_0}{2}}{r + \frac{e_0}{2}}$$

Caractéristiques mécaniques de la tôle

R_e : limite d'élasticité

E : module d'élasticité (ou module d'Young)

r₀ : rayon initial

r : rayon intérieur après retour élastique

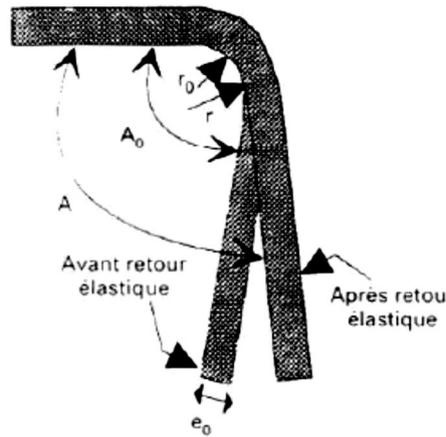


Figure. I. 9. Géométrie du pliage [6]

I.5.2. Emboutissage: [16]

I.5.2.1 Définition

L'emboutissage est un procédé de formage par déformation plastique d'une surface de métal entraînée par un poinçon dans une matrice. Cette déformation est difficilement réversible; de ce fait, on considère que la pièce obtenue n'est pas développable. **Figure. I. 10.**

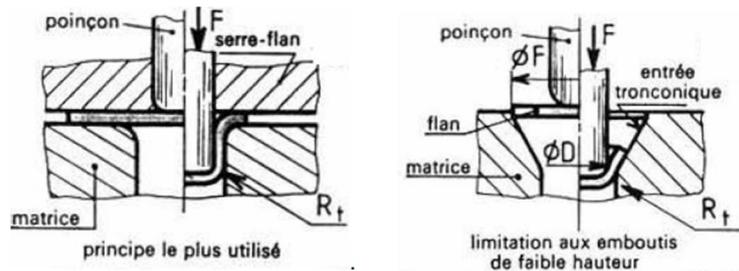


Figure. I. 10. Principe d'emboutissage [6]

I.5.2.2. Procèdes d'emboutissage

Il existe deux procédés d'emboutissage suivant la forme de pièce à obtenir.

A) Emboutissage en expansion

Si la pièce a une forme complexe mais de faible profondeur on peut bloquer le flanc entre serre flan et matrice, si besoin est avec des joncs. La tôle ne se déforme alors que sur le poinçon en s'allongeant dans une ou plusieurs directions et en s'amincissant, nous disons que nous travaillons en expansion **Figure. I. 11a.**

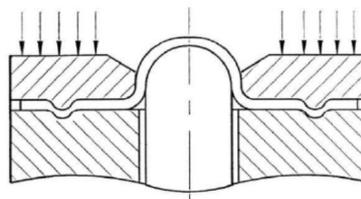


Figure. I. 11a. Emboutissage en expansion [6]

B) Emboutissage en rétreint

Si la pièce a une forme cylindrique droite (base circulaire ou quelconque) de forte profondeur on laisse glisser le flan entre serre flan et matrice, la déformation sur le poinçon est limitée aux rayons de poinçon, la majeure partie de la déformation se fait par rétrécissement sur la matrice, c'est l'emboutissage en rétreint (**Fig. I.11 b**).

Une opération d'emboutissage quelconque est la combinaison de ces deux modes Dans une opération mixte, un des gros problèmes est de régler le glissement sous serre flan suffisamment faible pour permettre les déformations et éviter les plis, suffisamment fort pour éviter un étirage trop important qui conduirait à la rupture.

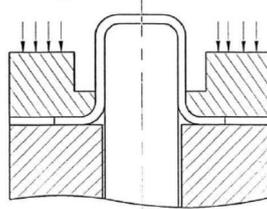


Figure. I. 11 b. Emboutissage en rétreint [6]

I.5.2.3. Effort d'emboutissage et analyse des déformations

Au cours de l'opération d'emboutissage la tôle est soumise à des contraintes très complexes : de compression de direction tangentielle et de traction de direction radiale **Figure. I. 12.**

Pour qu'il y ait emboutissage sans déchirure, il faut que le fond de l'emboutissage résiste à la pression du poinçon (fig.8), si on prend (F_d) comme effort nécessaire pour découper le fond, on peut admettre que l'effort d'emboutissage (F_e) ne doit pas dépasser la moitié de cet effort : $F_e < 1/2 F_d$

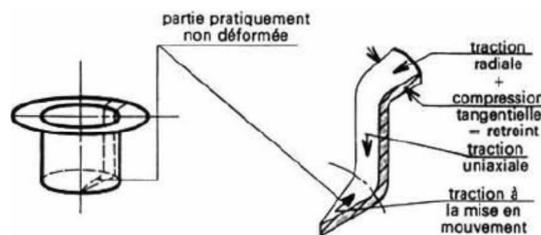


Figure. I. 12. Analyse des déformations [6]

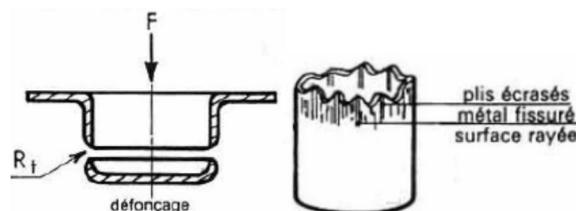


Figure. I.13. Calcul de l'effort

Pour la détermination de l'effort nécessaire à l'emboutissage on doit tenir compte

- De la forme de l'emboutis
- De la qualité et de l'épaisseur de la tôle
- De la vitesse d'emboutissage (de 0.2 à 0.75 mm/s selon la nature de la matière)
- De la géométrie de l'outil
- De la pression de la serre flan
- De la lubrification

I.5.2.4. Calcul des flans

La première étape avant de lancer la fabrication (série) consiste à déterminer les dimensions du flan, ceci pour des raisons économiques (calcul de la quantité de matière, détermination du nombre de passe) et pour des raisons techniques (forme la mieux adaptée à un bon écoulement du métal dans l'outil).

A) Méthode analytique par le Théorème de Guldin.

La surface engendrée par une ligne plane tournant autour d'un axe situé dans son plan et ne le traversant pas, est égale au produit de la longueur développée de cette ligne par la circonférence décrite par son centre de gravité.

Exemple : (cas des emboutis cylindriques à fond plat), **Figure. I. 14.**

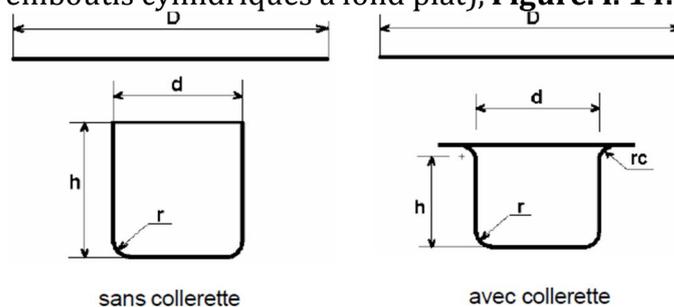
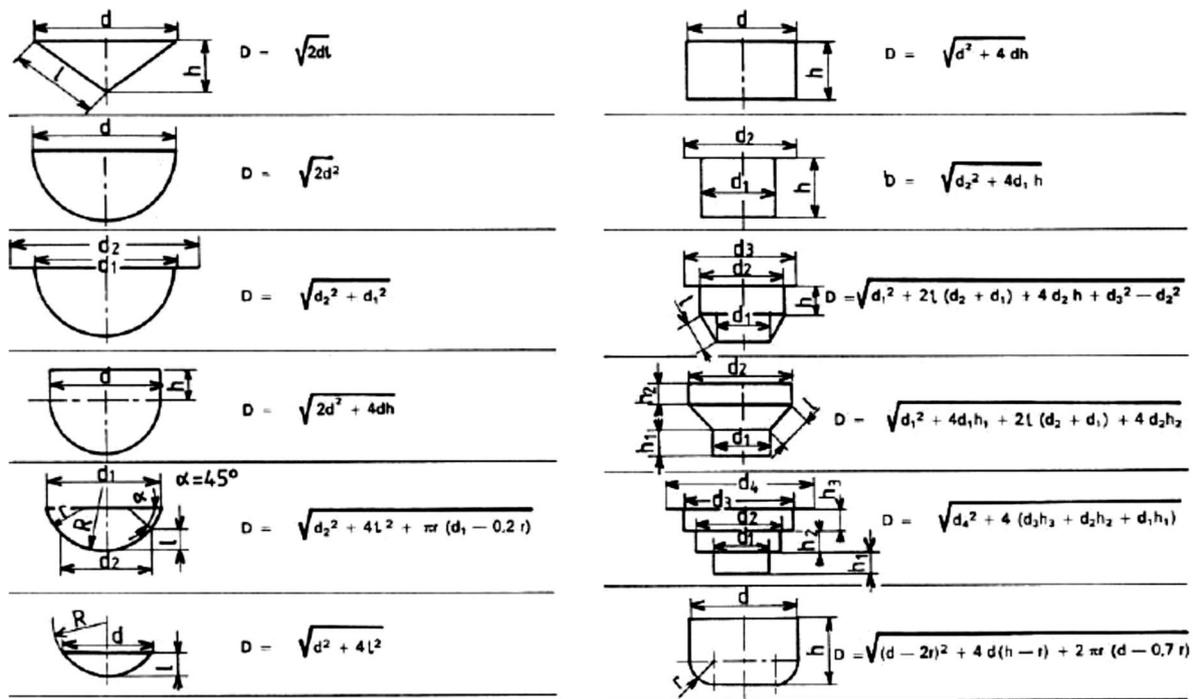


Figure. I. 14. Exemple de calcul du flan

En négligeant le rayon de raccordement de la paroi et du fond, si $r \leq d/10$

$$D = \sqrt{d^2 + 4dh} \quad \text{et} \quad h = \frac{D^2 - d^2}{4d} \quad D = \sqrt{d^2 + 4d(h + 0.57r + 0.57rc - 0.52(r^2 - rc^2))}$$

Pour d'autres formes, voir tableau suivant:



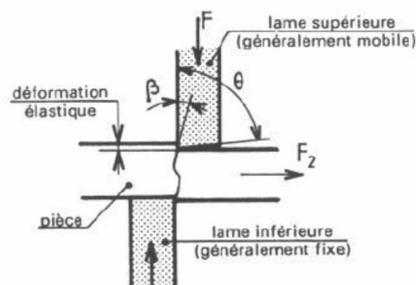
I.5.3. Cisailage- Poinçonnage

I.5.3.1. Cisailage

1. Principe

Sous l'action de la contrainte imposée par la partie active des lames, il se produit une déformation élastique, puis un glissement avec décohésion du métal suivant deux directions formant l'angle β (fig. 1.15).

- ☒ L'angle β , ainsi que la profondeur de la décohésion, varient suivant la nuance du métal et son état.
- ☒ La lame poursuivant sa course provoque la rupture complète par celle du métal intercalaire.

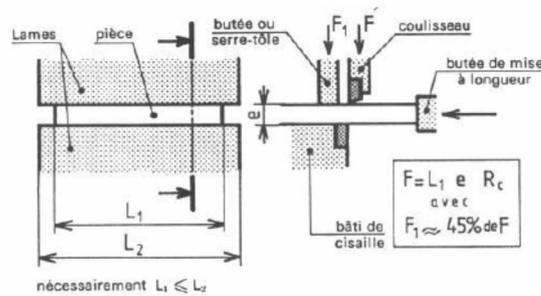


(fig. 1.15). Principe de cisailage [6]

2. Méthodes Classiques de cisailage

A. Cisailage avec lames parallèles (fig.1. 16).

Cisailage simultané de toute la longueur. Coupes généralement rectilignes. Effort important.



(fig.1. 16). Cisailage avec lames parallèles [6]

B. Cisailage avec lame oblique.

Intérêt à avoir un angle α important puisque F décroît. Si $\alpha > 15^\circ$: le métal peut se dérober (fig.1.17). Nécessité d'établir un compromis. La partie découpée est fortement fléchie, donc déformée .

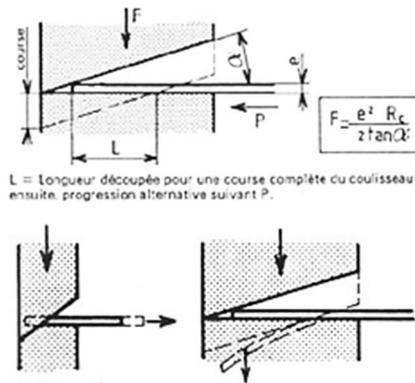


Fig.1.17. Cisailage avec lame oblique. [6]

I.5.3.2. Poinçonnage

1. Principe

Un poinçon et une matrice (fig. 1.18) remplacent les lames de cisaille. Même mécanisme de rupture.

Force à appliquer :

$$F = L.e.Rc ,$$

Avec en fabrication pour compenser frottements et usure des parties actives Rc remplacé par Rm . L = périmètre découpé.

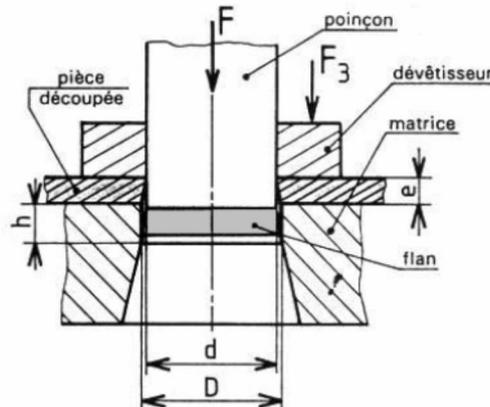


Fig.1.18. Principe de poinçonnage

I.5.2. Mise en forme par déformation plastique des pièces massives

(Forgeage, laminage, estampage...)

I.5.2.1.Introduction

La mise en forme par déformation plastique à chaud ou à froid est un procédé industriel d'obtention de pièces mécaniques qui est utilisé aussi bien en petites qu'en moyennes ou en très grandes séries de pièces, dont la masse peut varier de quelques grammes à plusieurs tonnes. Les pièces obtenues sont simples ou complexes ; on peut citer les bielles et vilebrequins des moteurs thermiques, les roues des véhicules sur rails, les axes de roue des véhicules automobiles, les engrenages cylindriques ou coniques des transmissions et des boîtes et vitesse, les vis, écrous et rivets, les arbres de turbines à vapeur et d'alternateurs les trains, d'atterrissage des avions les arbres et volants des moteurs d'aviation, les arbres du turbines, les pales des réacteurs d'avions et des turbines à gaz, les outils manuels (clefs, tournevis, etc.), les ressorts à lames, les crochets de levage, les lames de couteaux et de ciseaux, les billes, cylindres, tonneaux et chemins de roulement des roulements à billes et à rouleaux, les engrenages coniques, etc. Ces pièces ont en commun le fibrage des grains qui leur confère d'excellentes propriétés de tenue mécanique. Un autre avantage du procédé est la rapidité d'exécution des pièces (vilebrequin de 20kg à 100 pièces/heure sur presse automatique).

III.5.2.2. Formage à froid et formage à chaud

Le formage à chaud est effectué à une température supérieure à la moitié de la température absolue T_f (°K) de fusion de l'alliage. C'est le domaine thermique activé dans lequel on constate notamment une forte décroissance de la résistance à la déformation.

Le formage à froid est effectué à une température inférieure à la moitié de la température absolue de fusion de l'alliage. **Tableau I.3**

Tableau I.3. Avantages et inconvénients des procédés de formage en fonction de la température de formage

	Avantages	Inconvénients
Formage à froid	<ul style="list-style-type: none"> - Bon état de surface - Propriétés mécaniques élevées - Cadences élevées - Peu de reprises de finition 	<ul style="list-style-type: none"> - Efforts de formage élevés - Risques de fissuration en surface ou à cœur - Usure mécanique des outillages
Formage à chaud	<ul style="list-style-type: none"> - Faibles efforts de formage - Ductilité élevée y compris pour les matériaux non ductiles - Possibilités de pièces de grandes dimensions 	<ul style="list-style-type: none"> - Présence de calamine en surface - Propriétés mécaniques moyennes après formage (limite d'élasticité basse mais bonne ductilité)

III.5.2.3. Forgeage libre ou forgeage en matrice ouverte

Le forgeage libre ou forgeage en matrice ouverte s'apparente au martelage des forgerons. Ce procédé, effectué à haute température, est notamment utilisé pour forger des arbres de machines de grandes dimensions à partir d'un lingot coulé (arbre de turbine à vapeur de 300 tonnes, arbre d'alternateur, arbres pour la marine, vilebrequin de gros moteur diesel marin, etc.). C'est d'ailleurs le seul moyen possible pour ce type de

pièce à l'heure actuelle. C'est une technique économique (outillage peu coûteux) mais qui requiert une bonne habileté de la part des opérateurs. **Figures 1.19 et 1.20**

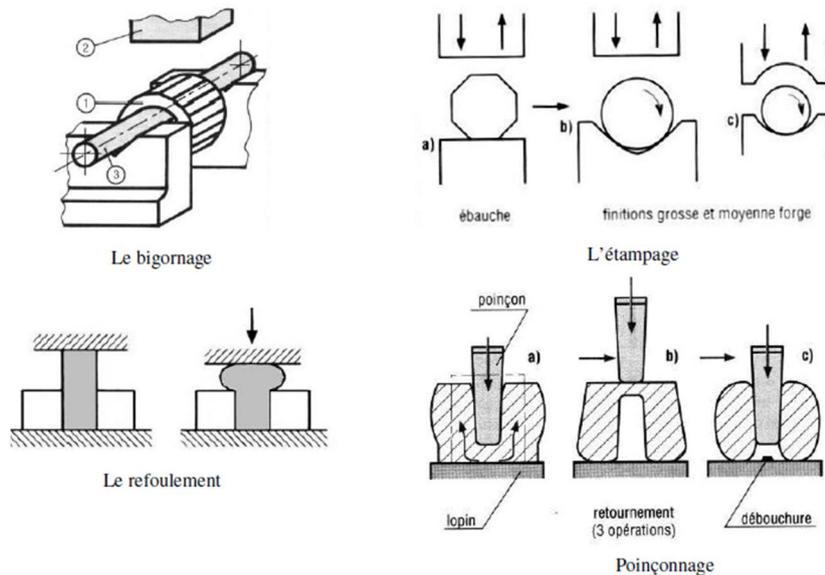


Figure. 1.19. Opérations de forgeage libre



Figure. 1.20. Exemples de pièces obtenues par forgeage libre

III.5.2.4. Forgeage en matrice fermée : estampage et matriçage

Les opérations de forgeage en matrice fermée consistent à chauffer à haute température un morceau de demi-produit d'une géométrie bien déterminée, appelé lopin, puis de le placer entre des outillages appelés matrices, dans lesquels est usinée en creux une gravure qui représente exactement la forme du produit brut à obtenir. Le produit brut de formage est souvent proche des cotes de la pièce finie. Après formage, seules des opérations de finissage sont nécessaires, telles que : perçage, alésage, traitement de surface, usinage à des cotes précises.

Une machine d'estampage agit par choc ou par pression. Elle exerce une force telle que le lopin est contraint d'épouser les formes de la gravure. Les termes estampage et matriçage sont synonymes. La désignation estampage est généralement appliquée au forgeage mécanique aciers, alors que la désignation matriçage s'applique au forgeage mécanique des métaux non ferreux. **Figure I.21 et I.22.**

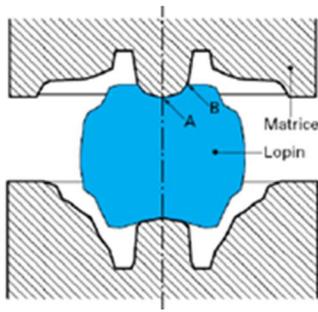


Figure I.21. Principe d'estampage

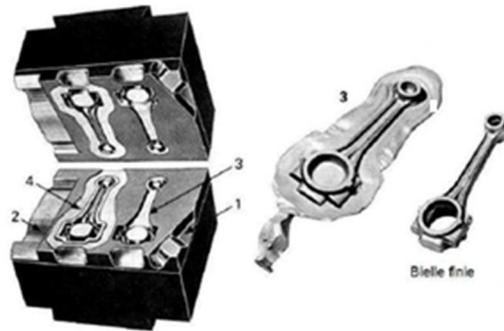


Figure. I.22. Estampage d'une bielle

III.5.2.5. Laminage conventionnel

Le laminage est un procédé de mise en forme par déformation plastique dans lequel les outils au contact du produit en cours de formation sont des solides de révolution animés d'un mouvement de rotation autour d'axes fixes entre lesquels le produit est entraîné par frottement. L'entraînement du produit s'accompagne d'une déformation imposée par l'espace laissé libre entre les cylindres. Le produit sort des cylindres perpendiculairement au plan contenant leurs axes sous la forme d'une barre de section constante. Les parties de chaque cylindre en contact avec le produit laminé constituent une sorte de filière. Ils sont appelés cannelures. **Figure I.23**

Le mot laminage évoque plus spécialement les produits plats ; le procédé permet cependant d'obtenir d'autres géométries comme : tôles, feuillard, fils, ronds, ronds à béton, barres, rails, poutrelles (IPN, IPE, H, H, etc.), profilés divers, tubes sans soudures, etc. **Figure. I.24.**

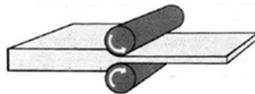


Figure. I.23. Principe de laminage

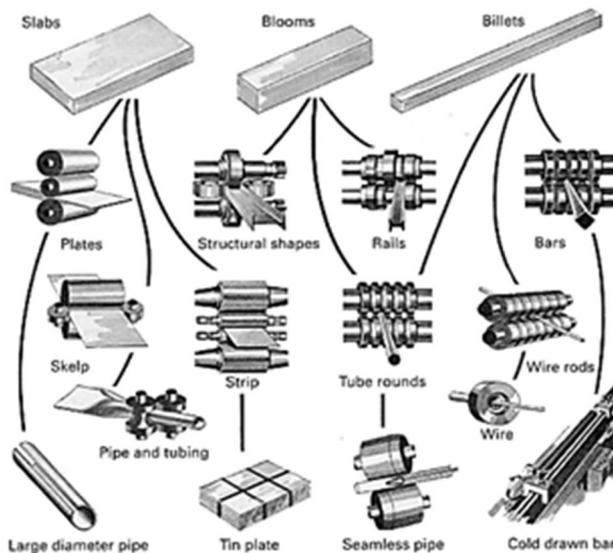


Figure. I.24. Laminage des produits plats et poutrelles.

I.5.2.6. Laminage circulaire

Ce procédé permet la transformation d'une ébauche annulaire de faible diamètre (obtenue à la presse) en une forme annulaire de grand diamètre dont la section axiale peut présenter un profil complexe. **Figure. I. 25, 26, 27.**

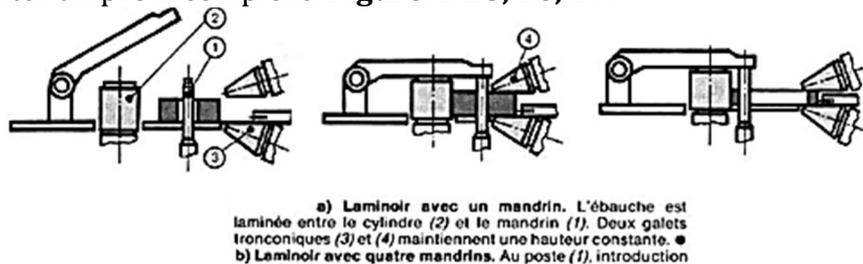


Figure. I.25 Principe du laminage circulaire

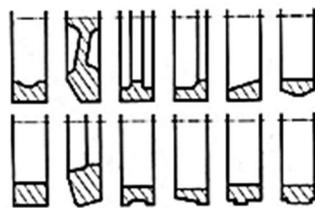


Figure. I.26 : Laminage circulaire des produits de forme annulaire présentant un profil complexe

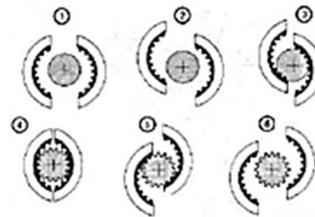


Figure. I.27 Laminage de denture. Les outils ont la forme de segments à denture intérieure

I.5.2.7. Filage

Le filage (*extrusion*) est un procédé de transformation à chaud ou à froid des métaux et alliages (aluminium, cuivre, acier, plomb). Pour exécuter une opération de filage, on utilise une enceinte de forme cylindrique en acier résistant aux pressions élevées de déformation appelée conteneur. Ce conteneur est fermé à une extrémité par une filière dont l'orifice est usiné selon une section droite similaire à l'extérieur du produit que l'on désire filer. La billette de forme adéquate, éventuellement chauffée à la température optimale de déformation, est introduite dans le conteneur puis poussée par un piston appelé poinçon sur lequel on applique l'effort de presse. Lorsque l'effort sur le piston dépasse une valeur, liée aux caractéristiques du matériau et à sa température, la pression régnant dans le conteneur provoque l'écoulement plastique du métal à travers la filière. On obtient ainsi une barre de grande longueur dont la section transversale correspond à celle de la filière (menuiserie métallique : montants de portes ou de fenêtre en aluminium, refroidisseurs à ailettes, tubes de sections diverses, etc.).

Figure. I.28 et 29



Figure. I. 28 : Exemple des pièces réalisées par filage

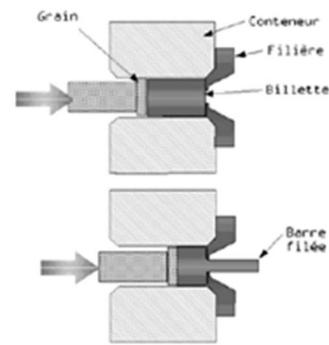


Figure. I.29 : Principe du filage

I.5.2.8. Etirage

Le procédé d'étirage est une déformation à froid par passage d'une ébauche au travers d'une filière de section plus petite et appropriée au profil et à la dimension à obtenir. La filière est constituée d'un noyau dur en acier à très haute résistance à l'usure ou en carbure de tungstène fritté, emmanché dans une monture en acier. Elle doit être polie à la pâte de diamant afin de diminuer le frottement et d'éviter la formation de rayures par collage de métal sur la filière. Pour les carrés, les hexagones et les plats, il existe des filières dites réglables constituées de quatre plots indépendants, en carbure, disposés en équerre et coulissant les uns par rapport aux autres dans une monture en acier.

Le procédé s'applique aux produits pleins et aux produits creux n'offrant pas la précision dimensionnelle suffisante ou l'aspect approprié à leur usage ; il s'applique particulièrement aux barres fils et tubes (ronds, hexagones, carrés, produits plats). On peut citer les exemples d'application suivants : ressorts, tubes pour injection de carburant, tubes pour échangeurs de chaleur, fils en cuivre pour câbles électriques, guides, supports, glissières, axes, etc. **Figure I.30**

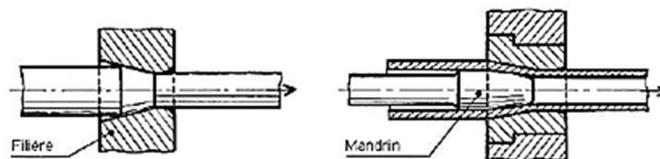


Figure. I.30. Principe de l'étirage

I.5.2.9. Corroyage

Les produits obtenus par formage sont dits produits corroyés par opposition aux produits coulés. Compte tenu des différences entre ces deux processus, les propriétés mécaniques des pièces sont différentes. Il est donc toujours nécessaire de faire la distinction lorsqu'on s'intéresse aux propriétés des matériaux. Ils se distinguent notamment par le fibrage que possèdent les produits corroyés suite aux déformations plastiques qu'ils ont subis (**figure I.31**). L'expérience montre que des éprouvettes prélevées au même endroit sur des pièces de même forme et fabriquées à partir du même semi-fini mais par des méthodes différentes donnent des résultats très différents (**fig. I.32**) ; les meilleurs résultats étant obtenus dans le sens du fibrage. Le fibrage améliore, donc, les caractéristiques mécaniques des produits finis :

meilleure résistance mécanique dans le sens des fibres qui sont souvent bien orientées par rapport aux tensions de service (notamment les contraintes de flexion); peu d'amorce de fissures superficielles.

Il leur confère cependant des propriétés anisotropes dont il faut tenir compte dans les semi-finis et notamment les tôles laminées appelées à être mise en forme par des procédés d'usinage ou de soudage.

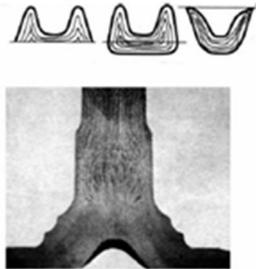


Figure. I.31. Fibrage sur une pièce obtenue par forgeage

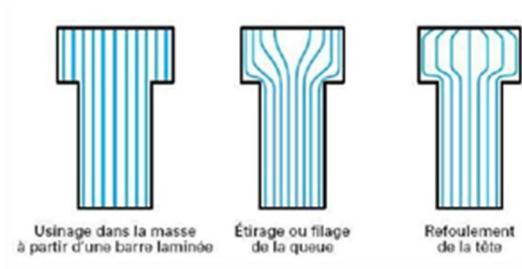


Figure. I.32. Sens de corroyage sur 3 boulons obtenus par 3 méthodes différentes