

CHAPITRE II

PROCÉDÉS D'OBTENTION DES PIÈCES BRUTES

OBJECTIFS

L'étudiant doit être capable de :

- Différencier les procédés d'obtention des bruts des procédés d'obtention de pièces finies
 - Connaître, pour chacun des procédés étudiés
 - les principes
 - les possibilités
 - les domaines d'application
 - les principales variantes
 - Choisir un parmi plusieurs procédés d'obtention pour une pièce de caractéristiques et de matériau donné.
-

CONTENU

II.1- CLASSIFICATION ET CHOIX DES DIFFERENTS PROCEDES
II.2- MOULAGE
II.3- FORGEAGE
II.4- METALLURGIE DE POUDRES
II.5- SOUDAGE
II.6- DECOUPAGE ET POINÇONNAGE
II.7- EMBOUTISSAGE
II.8- PLIAGE, CINTRAGE ET FLUOTOURNAGE
II.9- MISE EN OEUVRE DES PLASTIQUES
II.10- MISE EN OEUVRE DES CERAMIQUES

RÉFÉRENCES PRINCIPALES

- Réf. 1- Chevalier A. « Guide du dessinateur technique », Hachette, 2004.
Réf. 2- Fanchon, J.L., « Guide des Sciences et Technologies Industrielles », 1994
Réf. 3- Trotignon, J.P. et al., « Productique », Éditions Nathan, 2002

📖 CLASSIFICATION ET CHOIX DES DIFFERENTS PROCEDES

➤ Éléments du choix d'un procédé de fabrication

- *Nature du matériau* : Puisque chaque procédé fait intervenir un ou plusieurs modes de déformation et/ou de transformation, les propriétés mécaniques et métallurgiques du matériau à transformer influencent grandement le choix du procédé de fabrication.

Exemples :

- *Aspects économiques* : Certains procédés sont plus adaptés aux grandes séries et deviennent très peu économiques en cas de production unitaire et ce, à cause du coût élevé de l'outillage spécifique qu'ils utilisent.

Exemples :

- *Aspects technologiques* : Certaines opérations de fabrication peuvent être réalisées par plus qu'un procédé, le facteur tranchant devient alors les caractéristiques finales désirées comme la précision ou l'état de surface.

Exemples :

➤ Classification sommaire des procédés de fabrication

			Procédés de fabrication		
			des pièces brutes		des pièces finies
			façonnage / déformation	assemblage	
Matériau	métallique	en barre	FORGEAGE, MOULAGE,	SOUDAGE	USINAGE
		en feuille	DECOUPAGE, EMBOUTISSAGE, PLIAGE, ...		
		en poudre	PRESSAGE/FRITTAGE,		
	non métallique	céramiques			
		plastiques	INJECTION, SOUFFLAGE, ...	SOUDAGE	

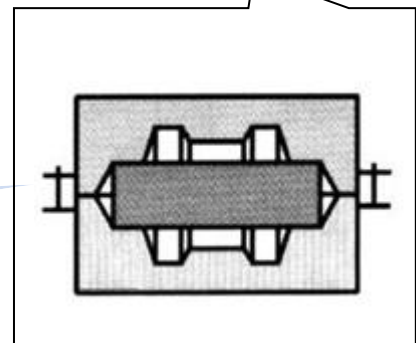
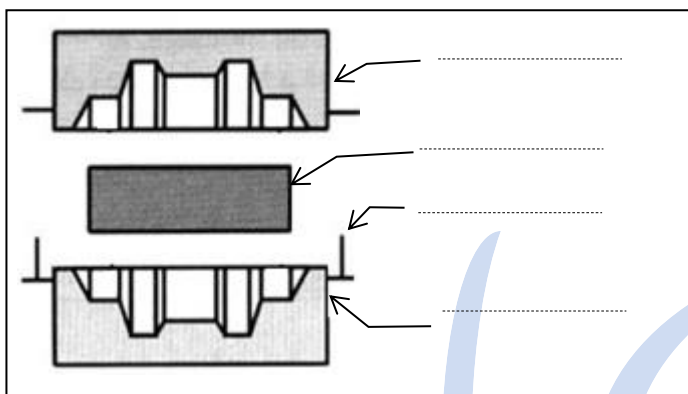
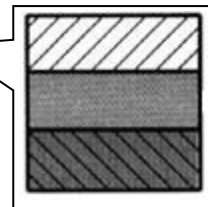
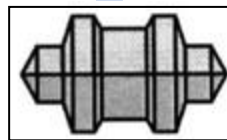
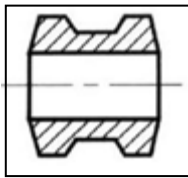
MOULAGE

Description générale

- **Principe** : Consiste à faire le métal pour ensuite le dans des moules où il se pour constituer une pièce reproduisant le contour de l'empreinte du moule.
- **Types** : Selon la nature du moule on distingue :
 - **Le moulage en moule permanent** : On l'appelle également moulage en coquille (moule en acier). Il est utilisable pour des matériaux et volume de production.
 - **Le moulage en moule non permanent** : Utilisable quand il est impossible d'utiliser le premier type soit à cause de la nature du matériau (.....) ou à cause du volume de production (.....) ou aussi à cause du volume de la pièce (.....).
- **Choix du matériau approprié** : Un métal approprié à la fonderie devrait posséder de bonnes et ainsi qu'un faible Parmi ces matériaux on peut citer: les fontes grises et malléables, les aciers, le cuivre ainsi que les alliages d'aluminium et de magnésium.
- **Avantages et limitations** :
 - ☞ Possibilité d'obtention de formes particulièrement compliquées.
 - ☞ Défauts (retassures) et inclusions.
 - ☞ Nécessité d'un pour éliminer les conduits d'alimentation et de coulée et pour améliorer

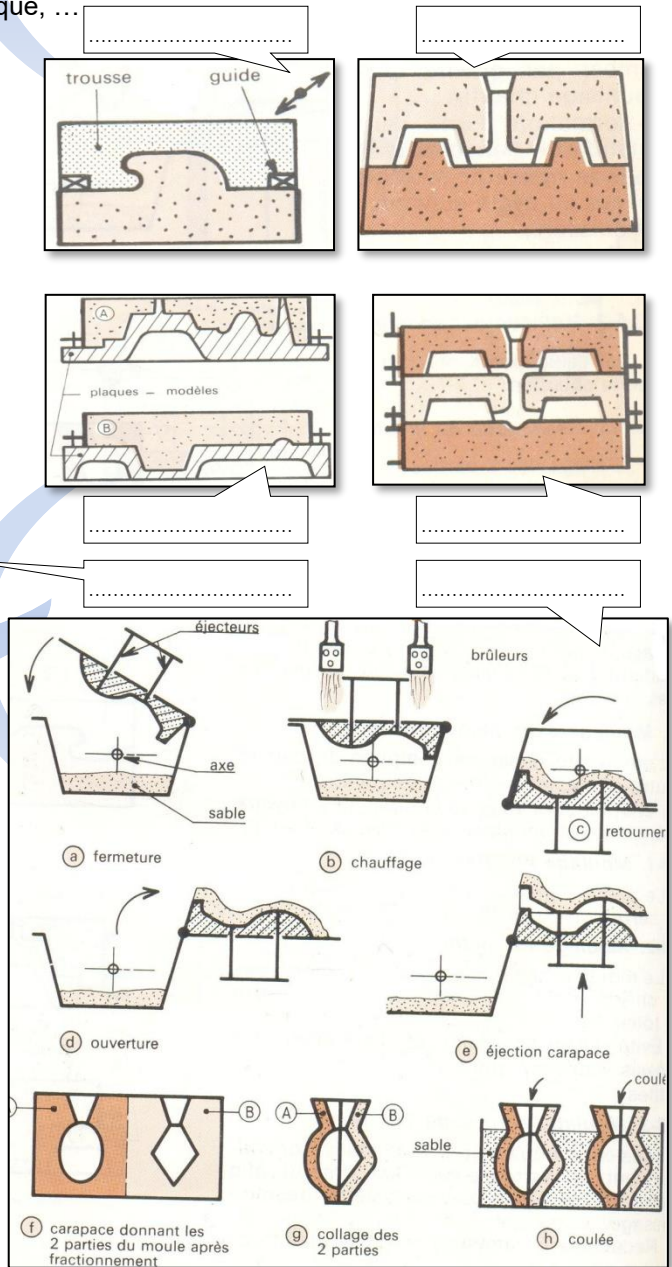
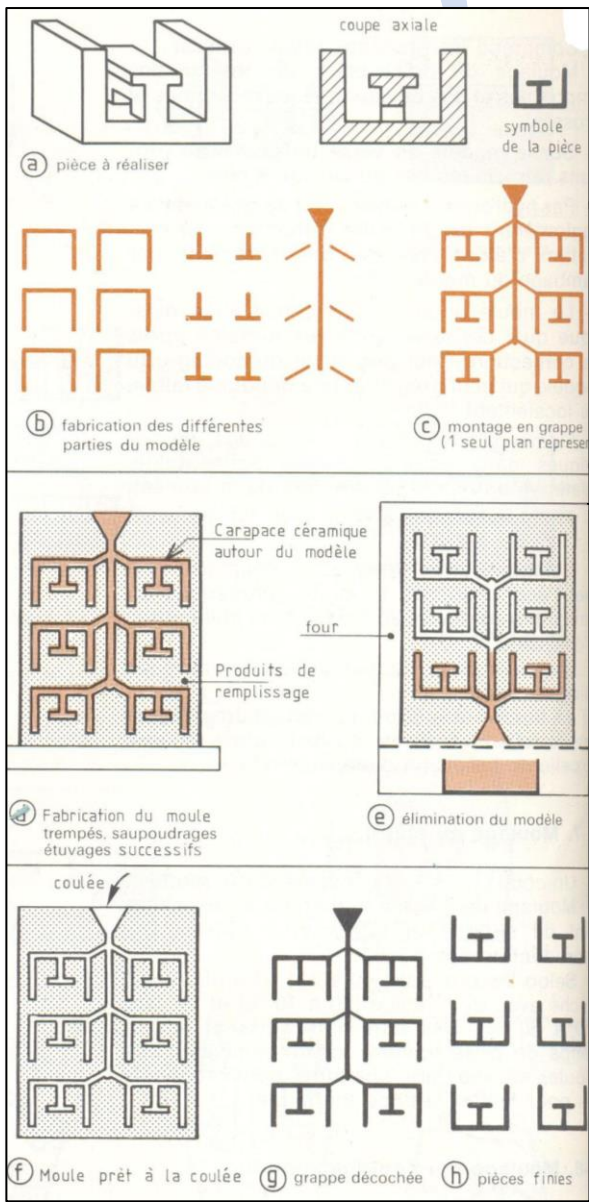
Moulage en moule non permanent Généralités

- **Moulage en sable (en châssis et avec modèle)**
 - **Moule** : Le moule est constitué d'un mélange de grains de silice (agent réfractaire), d'argile (servant de), de poudre de charbon (assurant la porosité du moule en se brûlant lors de la coulée) et d'eau.
 - **Modèle** : Le modèle a une forme similaire à la forme de la pièce finale désirée à l'exception de certains détails qui seront présentés plus loin dans cette section.
 - **Châssis** : Une pièce à une seule surface de joint est généralement réalisée par le biais de deux châssis. Le cas échéant, des chapes (châssis supplémentaires) peuvent être utilisés.
 - **Noyau** : La forme nécessite l'utilisation de noyaux placés dans le moule avant la coulée. Ces noyaux sont moulés en sable silico-argileux dans des boîtes à noyaux.
 - **État de surface / Précision** : Dépend surtout de la composition et de la granulométrie des sables de moulage alors que la précision dimensionnelle dépend de plusieurs facteurs dont l'ajustement des parties du moule, le positionnement des noyaux, ...



- **Autres variantes du procédé de moulage en moule non permanent**
 - **En grappe** : Plusieurs moules sont assemblés horizontalement pour être coulés par le même système de remplissage.
 - **En motte** : Pour des pièces de petite taille, ce genre de procédé n'utilisant pas de châssis peut être envisagé.
 - **Moulage avec trousseau** : Similaire au premier sauf que l'empreinte est taillée dans le sable avec un trousseau sans avoir recours à un modèle (pièce de formes simples et petite série)
 - **Moulage avec plaque modèle** : Utilise un modèle sur une plaque facilitant sa manipulation automatique et ce dans le cas de la production sérielle.

- Moulage en carapace (procédé Croning) :
 - Une carapace de 4 à 8 mm d'épaisseur, formée par agglomération de sable et de polymères thermodurcissables, est produite et ensuite introduite dans un moule soit comme empreinte ou soit comme noyau.
 - Ce procédé est envisagé quand une bonne précision est nécessaire.
- Moulage avec modèle non permanent (cire perdue) :
 - Le moule réfractaire est constitué en une seule partie autour du modèle.
 - Ce dernier est ensuite éliminé par fusion ou par combustion soit avant ou lors de la coulée.
 - Ce procédé est utilisé quand la fabrication d'un modèle n'est pas économiquement justifiée ou quand la procédure de moulage est trop compliquée.
- Autres: par centrifugation, en céramique, ...

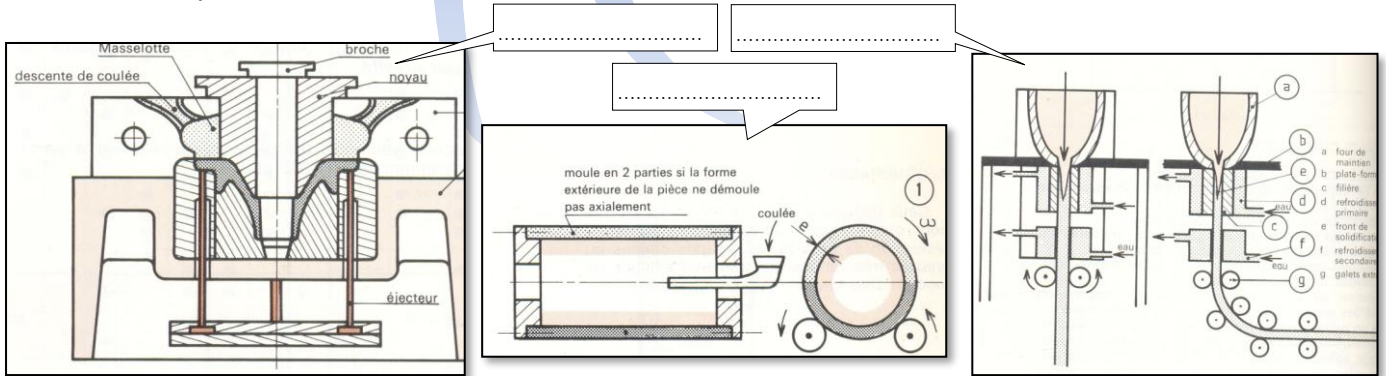


➤ Moulage en moule permanent (en coquille) Généralités

- **Moule** : La production de grandes séries de pièces en matériaux justifie la fabrication et l'utilisation de moules métalliques permanents (appelés coquilles) ayant de grandes durées de vies. Ces durées de vies sont toutefois inversement proportionnelles à la du métal coulé.
- **Procédure** : Les opérations fondamentales : moulage, remplissage, coulée et refroidissement, démoulage et éjection, sont généralement assurées par le moule qui devrait être pour assurer une cadence industrielle.
- Principales variantes
 - **Moulage par gravité** : L'alliage liquide est tout simplement versé dans le moule métallique. Les noyaux utilisés peuvent être soit métalliques soit (.....).
 - **Moulage sous pression** : L'alliage liquide est injecté sous pression (jusqu'à 1000 bars dans un

laps de temps extrêmement court (0,1 seconde). La surpression a le même effet que les masselottes. Les noyaux utilisés ne peuvent être que

- **Moulage par centrifugation:** Le moule métallique ou en graphite est entraîné en rotation sur la machine à mouler avec une accélération de quelques dizaines de g. Cette technique permet d'éviter les et d'augmenter la de l'alliage. Elle permet aussi la réalisation de pièces en alliages composites centrifugés (par couches). Cependant la surface moulante doit être préparée avant chaque coulée.
- **Moulage en continu:** Le métal fondu coule et se solidifie dans une filière refroidie. Ce procédé est utilisé en sidérurgie pour la production de produits à sections pleines ou creuses.



➤ Sables de moulage

▪ Généralités

- Ils sont généralement constitués de sables siliceux ou de sables minéraux réfractaires additionnés de liants et d'adjuvants leur conférant des propriétés additionnelles.
- Des enduits (à base de minéraux) sont également employés pour limiter la réaction moule - alliage alors que des isolants (talc) sont utilisés pour séparer les différentes parties du moule.
- La masse des sables utilisés représente 5 à 30 fois la masse des pièces moulées d'où l'importance et la nécessité du

▪ Propriétés

- **Perméabilité :** Un sable de moulage devrait être perméable aux dissous dans le métal liquide coulé et qui s'en dissocient à la solidification. À ces gaz vient s'ajouter la vapeur d'eau se dégageant des sables eux-mêmes. À défaut de se dégager ces gaz restent emprisonnés dans le moule (donc dans le métal liquide et créent des soufflures).
- **Réfractarité :** C'est cette propriété qui empêche les sables de se dégrader sous l'effet de la La dégradation en question peut se manifester par une fusion, un frittage, un ramollissement et même un collage au métal.
- **Cohésion :** Cette propriété est indispensable pour éviter du moule lors du moulage, du montage, du transport et aussi lors de la coulée par effet d'érosion. C'est également grâce à la cohésion des sables que l'empreinte reste inchangée sous l'effet de la pression exercée par le métal coulé.
- **Plasticité:** Cette propriété fait en sorte que le modèle laisse une empreinte dans les sables, qui reste après l'enlèvement du modèle.
- **Granulométrie:** la forme des particules de sable doit être la plus sphérique possible est les grains doivent avoir des tailles très semblables. Cette propriété a une incidence directe sur la et sur l'

▪ Catégories

- **Sables de contact:** Ce sont les sables qui sont en contact direct avec la surface de la pièce (et préalablement le métal en fusion). Puisque c'est surtout la réfractarité de ces sables qui importe, ils sont constitués essentiellement de sables siliceux additionnés d'argile sans sables recyclés (vieux sables brûlés). On parle d'une couche de 20 à 30 mm représentant le 1/10 de la quantité totale des sables de moulage.
- **Sables de remplissage:** Ce sont des sables utilisés et qui ont des propriétés moindres que les sables de contact. Ils sont utilisés pour remplir le reste du moule au dessus du sable de contact.
- **Le sable unique:** C'est le genre de sable utilisé dans les fonderies mécanisées et qui est utilisé à la fois comme sable de contact et comme sable de remplissage. Ces propriétés sont meilleures que celles du sable de remplissage.

➤ Outils pour le moulage en sable

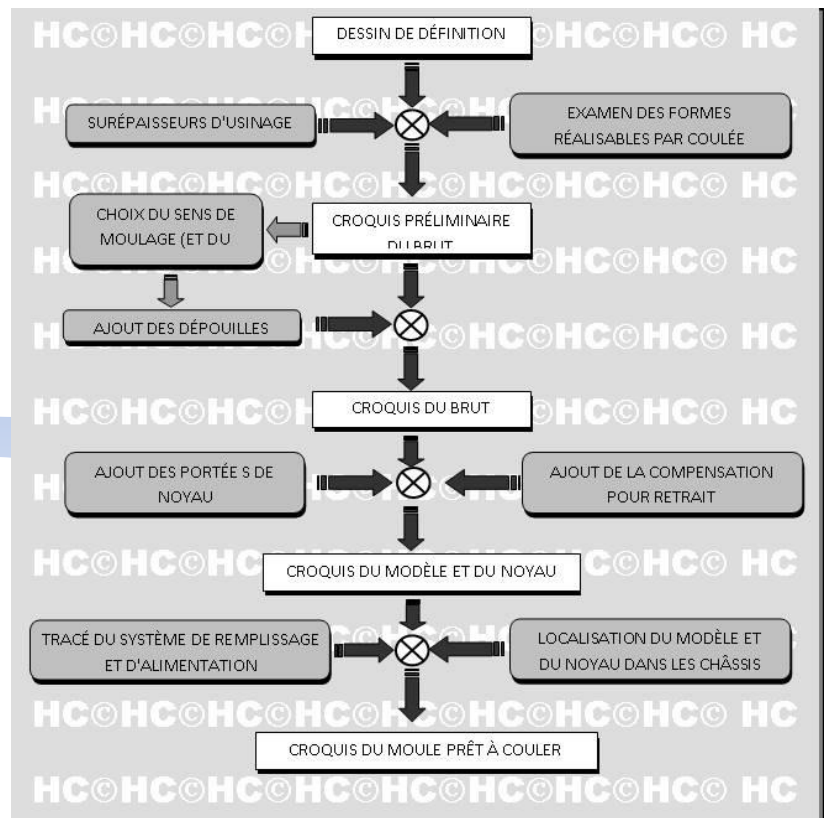
- **Châssis :** C'est un cadre rigide en fonte, en acier ou en alliage d'aluminium destiné à contenir le sable de moulage. Il peut avoir diverses formes: carré, polygone, ...

- **Machines à mouler et à démouler** : Elle permet d'effectuer mécaniquement le moulage par pression, par secousses, par la combinaison des deux ou également par projection de sable. Elle permet également le démoulage peut soit mécaniquement soit par retournement.
- **Modèles**
 - **Modèles en bois** : doivent être réalisés en bois très homogène, résistant, peu poreux et pouvant être poli.
 - **Modèles métalliques** : Ils sont utilisés pour les applications de grandes séries (résistance, durabilité), nécessitant une grande précision ou pouvant impliquer une difficulté de démoulage. Ils sont cependant plus que les modèles en bois.
 - **Modèles en résines plastiques** : Permettent une bonne qualité de production (pour certaines applications) avec un moindre
 - **Autres** : cire (cire perdue), plâtre (prototypes), polystyrène expansé (moulage unitaire)
- **Boîte à noyaux** : C'est un modèle permettant la réalisation de noyau en sable. Elle doit avoir une forme permettant l'introduction le serrage et le déboîtage du noyau sans le dégrader. Elle peut être en bois, en résines synthétiques ou métalliques (pour être utilisée sur une machine de noyautage).
- **Machine à noyauter** : Cette machine réalise mécaniquement toutes les opérations reliées au noyautage (remplissage serrage et chauffage dans certains cas)

➤ Conception du moule en sable

- Procédure générale

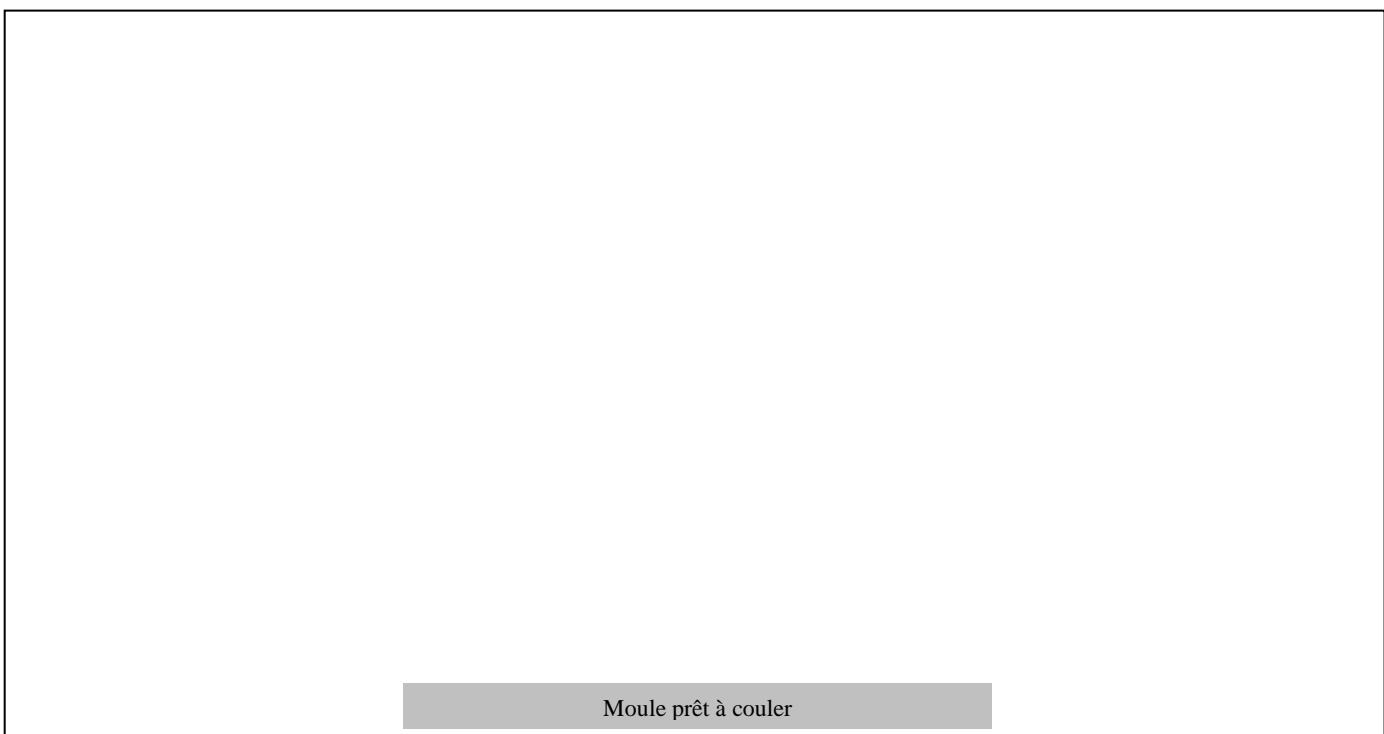
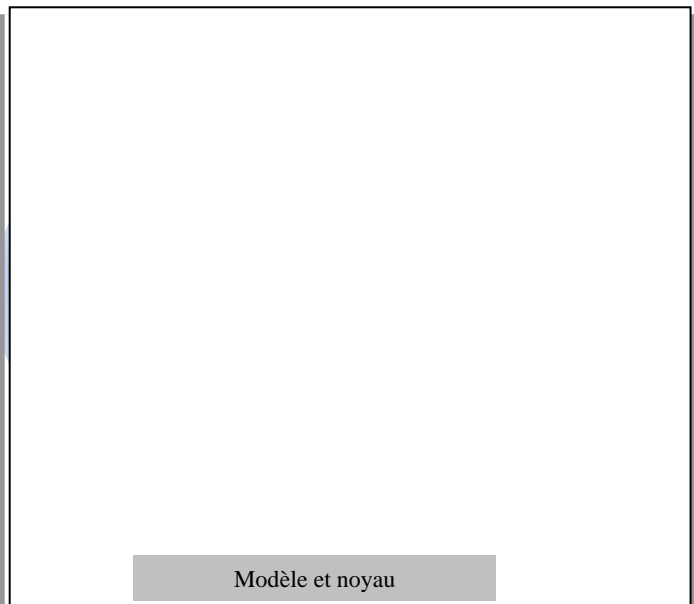
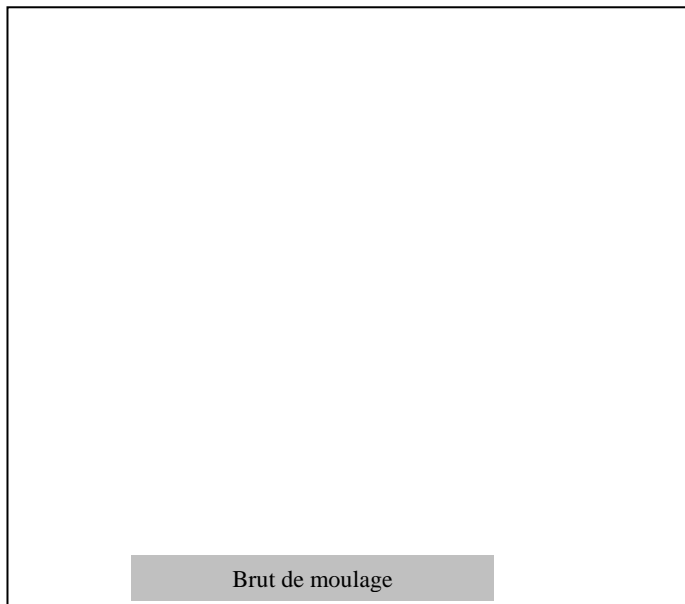
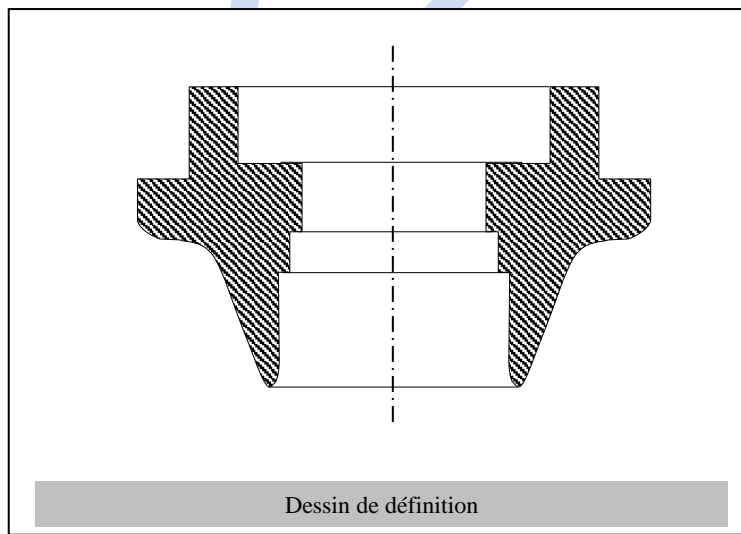
NOTE : Cette partie du chapitre est basée sur des applications réalisées en classe (au tableau et avec la participation des étudiants). Ces applications visent à concevoir le moule prêt à couler pour certaines pièces extraites directement d'un dessin d'ensemble. Les croquis relatifs à deux de ces applications sont montrés à la partie suivante à titre d'exemple.



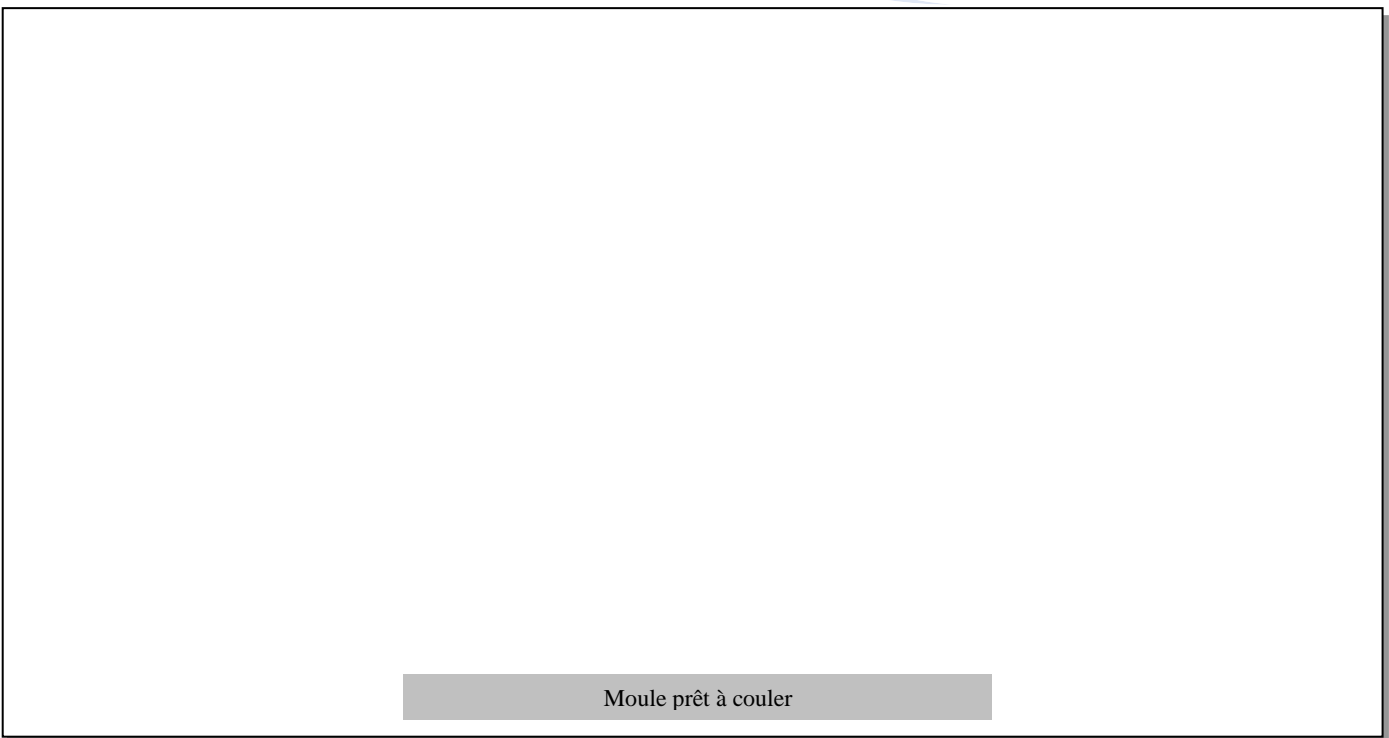
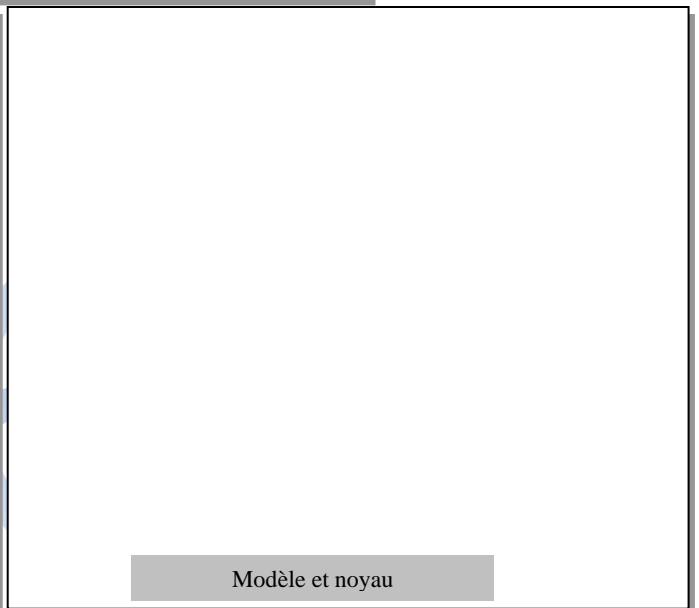
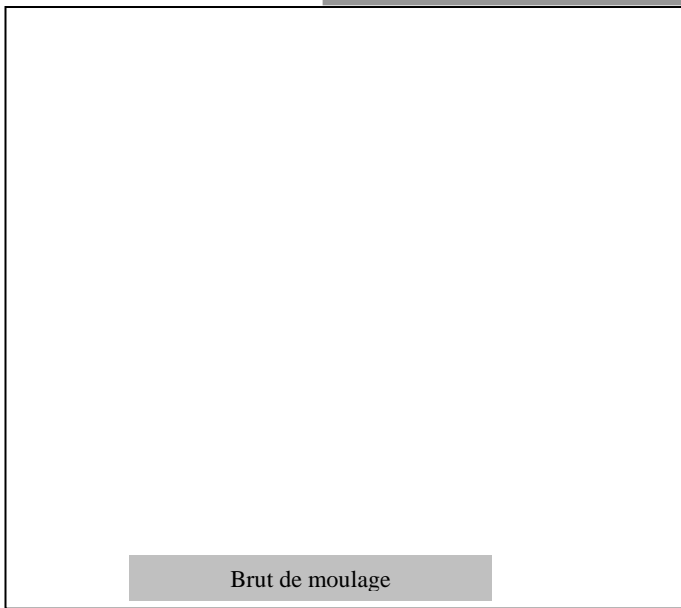
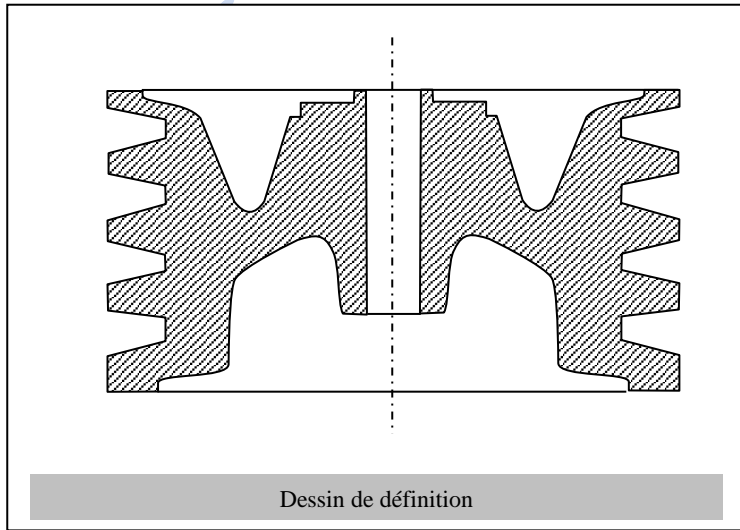
- **Obtention du brut de moulage**
 - **Surépaisseurs d'usinage**
 - Les surépaisseurs pour usinage ultérieur doivent être déterminés de la façon la plus précise possible afin d'éviter le gaspillage de métal (pièce d'un côté et l'impossibilité d'usinage (pièce de l'autre.
 - Pour une pièce destinée à être coulée il faudrait déterminer les régions sujettes à un usinage ultérieur et ce, en se basant soit sur les détails du dessin de définition (région à angle vif) soit sur la fonctionnalité de la pièce (surface d'appui, tolérance dimensionnelle, rugosité ...).
 - Typiquement, on ajoute de quelques dixièmes de millimètres à quelques millimètres comme surépaisseur d'usinage et ce, dépendamment du matériau.
 - **Formes réalisables.**
 - Sur le croquis préliminaire du brut obtenu par ajout des surépaisseurs (minimales) d'usinage, le concepteur doit examiner les formes non ou réalisables par coulée (contre dépouilles, détails géométriques fins dans des zones destinées à un usinage ultérieur, joints multiples ...).
 - Toutes ces formes doivent être réalisés par ultérieur ou par des techniques spéciales de moulage (en chape, moule démontable, ...).
 - Par conséquent et afin de simplifier la technique de moulage, le brut ces détails. Ainsi, le volume de ces détails est additionné au volume du brut préliminaire (voir illustration dans les applications)

- Choix du sens de moulage et du plan de joint
 - Le premier critère dans le choix du sens de moulage est l'évitement des
 - Le choix doit minimiser le nombre de composantes du moule (chape, noyau)
 - La partie sujette à un usinage ultérieur devrait se situer le plus possible pour éviter les crasses qui ont tendance à s'amasser dans le haut. Ces crasses nuisent énormément à toute opération d'usinage.
 - Il faut également considérer la facilité de remplissage, et la stabilité des noyaux.
- Dépouilles
 - C'est l'angle de la paroi du moule avec Pour faciliter cette extraction et éviter la détérioration du moule, le mouleur doit ajouter une dépouille aux zones qui n'en possèdent pas une naturelle.
 - Certaines techniques (modèles démontables,) permettent d'extraire les modèles à partir de cavités sans dépouille ou même en contre dépouille.
- Obtention du dessin du modèle
 - Compensation du retrait
 - Le retrait résultant de la du métal fondu (diminution de volume) doit être tenu en compte dans le dimensionnement du modèle à partir du brut et ce par une compensation (..... de volume) équivalente en valeur absolue.
 - Le retrait est un phénomène supposé homogène sur toute la pièce. Sa valeur moyenne est une propriété intrinsèque du matériau.
 - Ajout des portées des noyaux
 - Ces portées servent à la localisation précise et stable des dans
 - Elles devraient également permettre une fermeture facile du moule sans endommagement du noyau (si les portées ne sont pas assez profondes).
 - L'utilisation de noyaux entraîne la présence de bavures. Les portées doivent être conçues pour que ces bavures soient faciles à ébarber.
- Conception du système de coulée et d'alimentation
 - Système de remplissage
 - Ce système a comme fonction principale de remplir la cavité formée par l'empreinte et le système d'alimentation (point suivant).
 - Ce système est essentiellement constitué de:
 - » *Un entonnoir de coulée* : parfois remplacé par un bassin. Il doit être conçu pour minimiser l'effet tourbillon
 - » *Un jet de coulée* : Devrait être dimensionné pour assurer un engorgement continu (éviter la descente de crasses). En plus, il faudrait qu'il ait une forme minimisant la perte de charge
 - » *Des chenaux* : Liaisons horizontales entre le jet et les attaques.
 - » *Des attaques* : conduits débouchant directement dans l'empreinte. Elles doivent être conçues pour minimiser l'érosion et la dégradation de l'empreinte.
 - » *Évents* : leur fonction principale est de faciliter le dégagement des gaz de coulée. Ils doivent être correctement dimensionnés pour ne pas créer des effets secondaires néfastes (soufflures ou retassures). Ils peuvent également servir à surveiller le remplissage complet du moule.
 - Système d'alimentation
 - La fonction première de ce système est l'alimentation de la pièce, en cours de refroidissement, par de l'alliage liquide afin d'éviter la formation de retassures.
 - Les masselottes constituant ce système contiennent une réserve de métal liquide utilisé pour compenser le retrait de certaines zones de la pièce.
 - Les zones masselottées sont les zones les plus massives de la pièce et qui sont susceptibles de se refroidir en dernier lieu.

- **APPLICATIONS** : Dans les applications des pages suivantes, partir du dessin de définition pour obtenir les croquis demandés. Pour les 2 premiers croquis de chaque application, tâchez de faire apparaître le contour de la pièce finie et d'identifier les éléments que vous ajouteriez
- Application 1: Boîtier de roulement

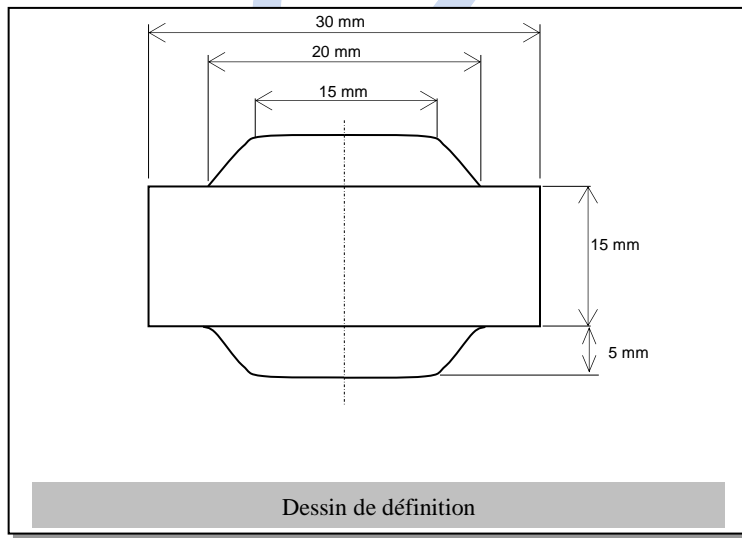


- Application 2: Poulie en acier



▪ Application 3: Calculs simples

On désire mouler en sable la pièce dont le dessin de définition est montré ci-dessous. Le matériau de cette pièce est caractérisé par un retrait post-solidification de 2%. De plus, la dépouille nécessaire est de 3%. Finalement, Les surépaisseurs nécessaires sont, quand applicables, de 2 mm sur les longueurs et de 3 mm sur les diamètres. On demande un croquis coté du brut de moulage ainsi que du modèle.



Croquis coté du brut

Calculs :

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Croquis coté du modèle

Calculs :

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

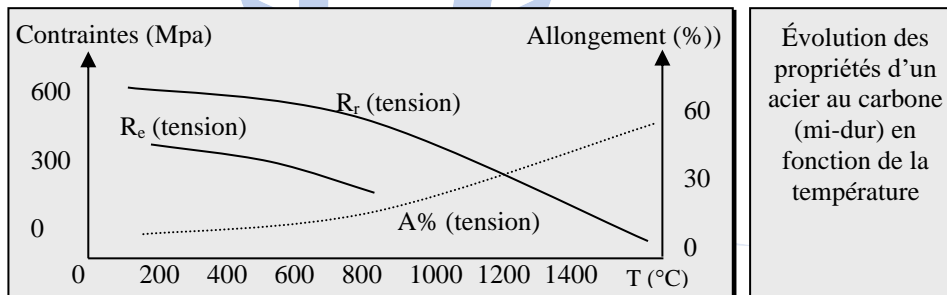
.....

.....

FORGEAGE MÉCANIQUE

Principe général

- Sous l'effet de la température et d'une force mécanique (..... ou), le procédé de forgeage exploite la des métaux pour modifier considérablement leurs formes sans pour autant nécessiter
- L'élévation de la température facilite le travail des métaux puisqu'elle augmente sensiblement la et abaisse ses limites et



Considérations pratiques et applications

- Matériau :** Le forgeage peut être appliqué à la quasi totalité des aciers de construction, au laiton, aux alliages d'Al et aux alliages Al-Cu.
- Type :** Le forgeage peut être :
 - libre : le métal subissant les efforts mécaniques se déplace librement; ex : *forgeage à la main ou au marteau pilon*
 - en matrices : le métal est contraint à se déplacer vers des zones gravées dans les matrices; ex: *estampage*.
- Type selon le volume de production:
 - Petites séries:
 - Moyennes séries:
 - Grandes séries:
- Effort mécanique :** Pression (.....) ou impact (.....). Le premier permet une déformation de la pièce, donc de meilleures propriétés mécaniques. Il est cependant plus
- Écrouissage :** Durcissement et fragilisation causée par l'effort mécanique subi. Nécessite un entre les passes.

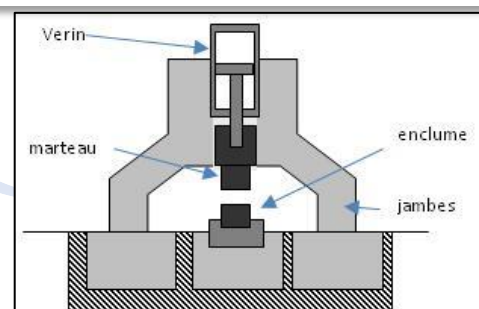
Avantages et limitations

- Une grande quant au choix de matériau pouvant être forgé.
- D'excellentes propriétés dues à l'affinement des grains par travail mécanique et leur orientation selon des lignes d'écoulement continues (fibres).
- Pas de
- Nécessite toujours une pour les surfaces fonctionnelles (précision et fini).
- Le forgeage est un procédé assez

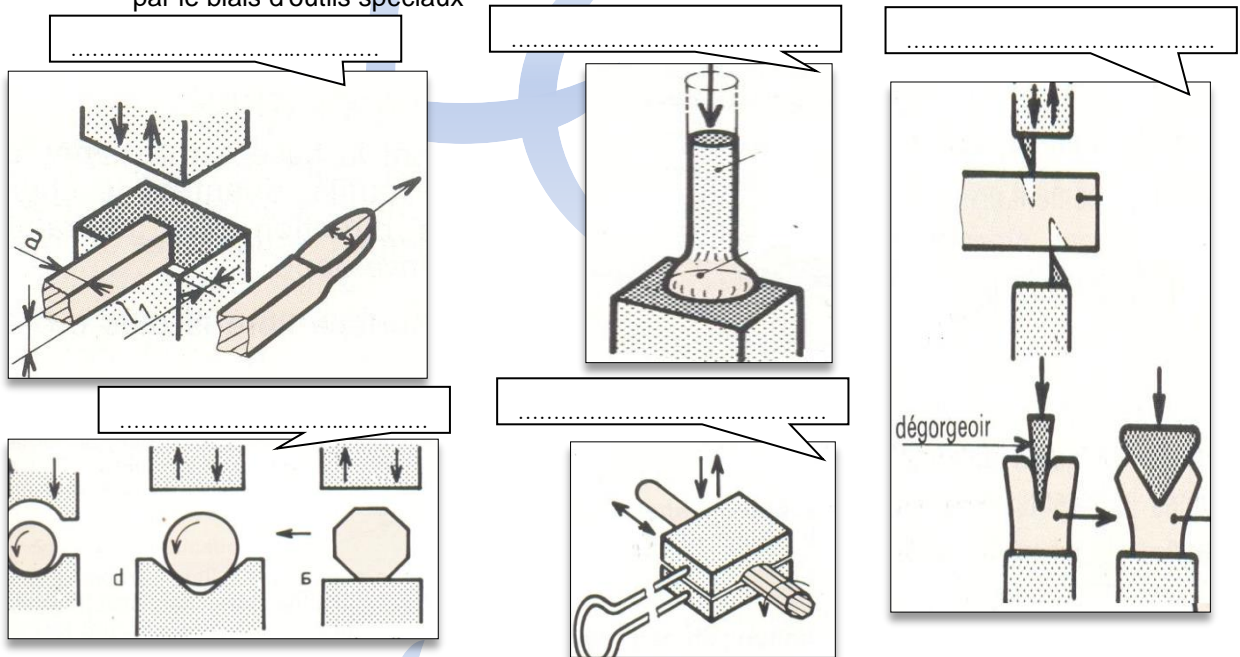


Forgeage libre au marteau pilon

- Principe :** Ce genre de forgeage est fondamentalement le même que celui exécuté par les forgerons traditionnels à l'exception du fait qu'il met en œuvre des équipements mécaniques (marteau pilon). Ce procédé est rarement utilisé pour l'obtention de produits finis: il est surtout utile pour la réalisation



- **Équipement :** Le marteau pilon est un marteau mécanique mû par la pression de l'air ou par la vapeur. Si ces sources d'énergie sont utilisées conjointement avec la gravité pour augmenter la force d'impact, le marteau est dit à Si par contre, cette énergie ne sert qu'à le marteau l'impact l'engin est dit à
- **Procédure :**
 - Le métal est d'abord
 - ensuite il est porté sur L'impact est alors donné par
 - Des outils spéciaux sont souvent utilisés entre la pièce et le marteau et/ou l'enclume.
 - Entre chaque 2 coups de marteau, la pièce est manipulée par l'opérateur, soit directement, soit en utilisant des manipulateurs mécaniques pour les pièces
- **Avantages (comparativement au forgeage manuel) :**
 - Grande
 - Meilleur contrôle de
 - Meilleur contrôle de
 - Possibilité de façonner des pièces
- **Opérations de base:**
 - **L'étirage :** C'est l'opération fondamentale du forgeage qui consiste à diminuer la section du lingot pour augmenter sa Cette opération a lieu directement sur l'enclume et se produit par une série de passes
 - **L'étampage :** Opération (terminale subséquente à) de mise au rond d'une section. Elle doit être précédée d'étapes intermédiaires utilisant des outils facilitant le passage d'une forme polygonale à une forme ronde.
 - **Le refoulement :** Opération inverse de Elle permet d'augmenter la section en diminuant la Combinée avec l'étirage cette opération permet une bonne orientation de l'écoulement des grains.
 - **Dégorgage :** Opération permettant d'obtenir des diminutions de section assez brusques, et ce par le biais d'outils spéciaux



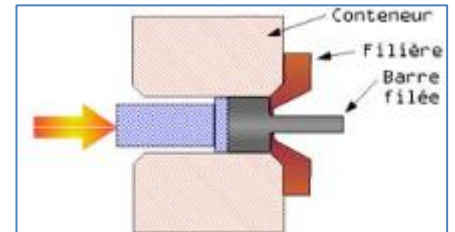
➤ Forgeage en matrice fermée

- **Appellation :** matriçage pour les non ferreux ou estampage pour les
- **Principe :**
 - Le lopin ou, généralement une ébauche, chauffé à la température convenable, est écrasé contre deux blocs matrices en acier (demi-dur ou dur).
 - Les blocs sont généralement montés sur un ou sur une
 - La bavure qui résulte de l'étape finale est ensuite éliminée par sur une presse auxiliaire en utilisant une matrice à ébavurer.
- **Équipement :**
 - Ces matrices comprennent généralement plusieurs gravures (empreintes) correspondant à des formes intermédiaires (ébauches) et à la forme finale, obtenue à partir du dessin de la pièce.
 - Certaines matrices sont prévues uniquement pour l'estampage final, assumant que l'ébauche se fait sur d'autres matrices ou simplement au marteau pilon. Par ailleurs, certaines matrices peuvent comporter des gravures pour plus qu'une pièce (pour une accrue).
 - On utilise généralement des matrices rapportées (gravure montée sur un socle) pour économie.

➤ Extrusion (filage)

▪ Principe:

- Le filage est une méthode de mise en forme des métaux par forgeage. Elle consiste à pousser un matériau ductile (éventuellement rendu ductile par) à travers un trou, ou filière.
- La poussée permettant la déformation est généralement fournie par des hydrauliques.
- Il ne faut pas confondre ce procédé avec le tréfilage qui consiste en la réduction de la section d'un fil en métal par traction, également en le faisant passer au travers d'une

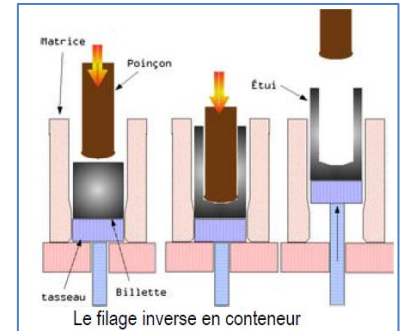


▪ Applications:

- formes simples (barres, tubes,)
- plus compliquées (profilés pour l'aéronautique ou le bâtiment).

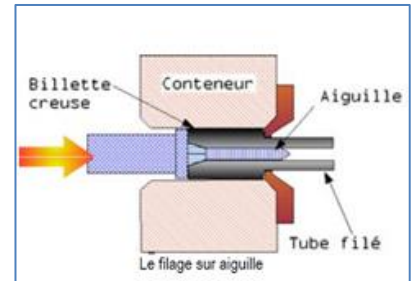
▪ Types:

- Filage direct: le métal s'écoule dans le sens du déplacement du poinçon (ci-haut). Il donne des produits
- Filage indirect : le métal s'écoule dans le sens opposé à celui du déplacement du poinçon (ci-contre). Il donne des produits
- Filage sur aiguille : le métal s'écoule dans le même sens que celui du déplacement du poinçon qui est doté d'un mandrin/ aiguille (ci-bas). Il donne des produits



▪ Avantages:

- L'extrusion donne des pièces aux formes encore plus précises que celles qui sont réalisées avec l'estampage ou le matriçage.
- De plus, les pièces présentent des états de surface excellents, ce qui permet souvent de les utiliser sans complémentaire.



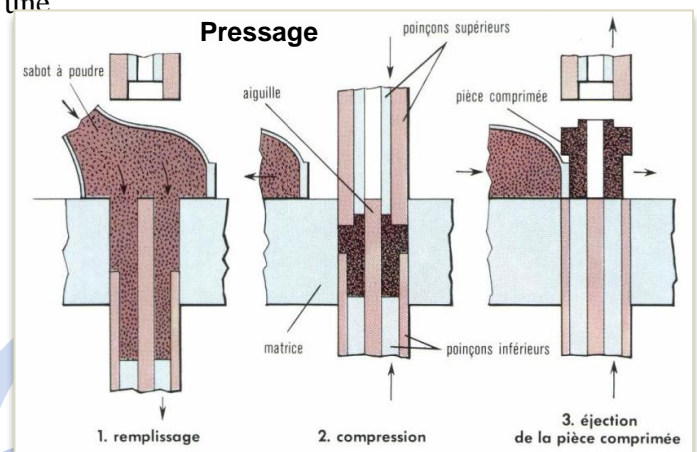
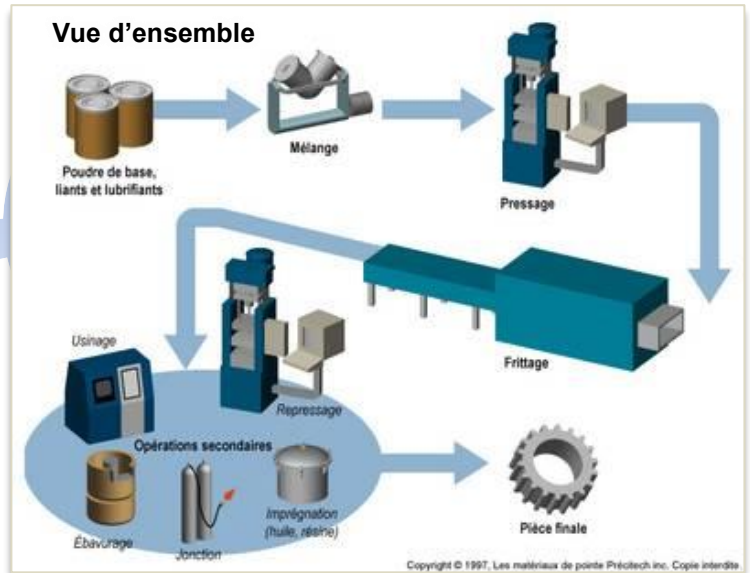
■ Métallurgie des poudres

➤ Généralités et principe

- La technologie de la métallurgie des poudres (M/P) est un procédé utilisant comme matière première des mélanges à base de poudres métalliques
- La technologie de la M/P consiste essentiellement à et à ensuite les poudres métalliques. De plus, certaines opérations secondaires sont souvent requises.
- L'industrie de la M/P tient ses origines d'époques aussi anciennes que celles des Incas et des Pharaons d'Égypte. Cependant, elle a connu son plus grand essor lors de la deuxième moitié du 20^e siècle

➤ Principales étapes

- **Mélange**
 - Cette étape consiste à mélanger les poudres métalliques de base aux lubrifiants, aux éléments d'alliage et aux additifs requis pour l'application.
 - Des mélangeurs spéciaux sont utilisés à cet effet pour éviter toute ségrégation dans le mélange qui sera ensuite comprimé.
- **Pressage**
 - L'opération de compression est généralement réalisée par l'intermédiaire d'un ensemble -, monté sur une mécanique ou hydraulique.
 - La capacité d'une telle presse peut varier de quelques tonnes à quelques centaines de tonnes.
 - Le produit semi-fini de cette opération est un comprimé, communément appelé "comprimé à vert", ayant la forme mais une très faible.
 - D'autres techniques de compression, moins utilisées en milieu industriel, sont utilisées dans certaines applications. Parmi celles-ci citons, la compression hydrostatique à froid et la compression hydrostatique à chaud.
- **Frittage**
 - C'est l'opération subséquente de frittage qui donne au comprimé la résistance mécanique recherchée et ce, grâce à un phénomène de diffusion qui se produit entre les différentes particules.
 - Cette opération est réalisée dans un four à haute et à contrôlée.
 - Les gaz de frittage les plus communément utilisés sont



l'hydrogène et l'azote ainsi que des mélanges à différentes proportions de ces deux gaz.

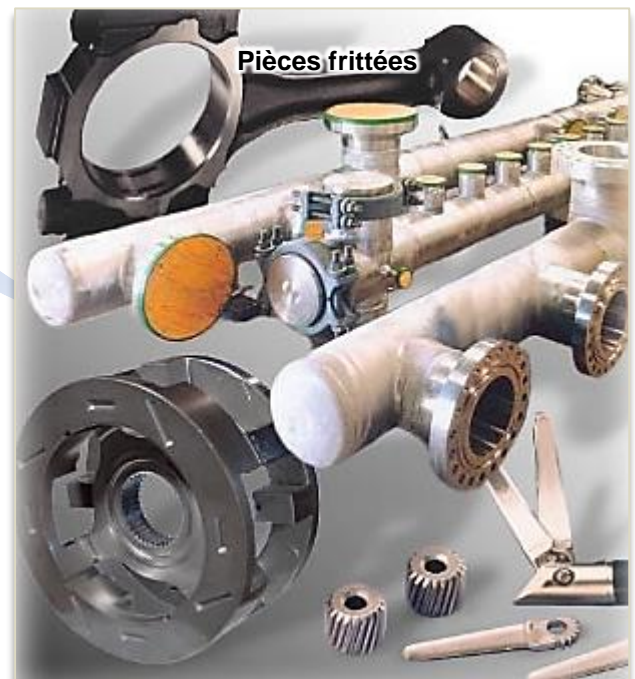
- Le type de frittage le plus communément utilisée est le frittage sans phase où la température dans le four est inférieure à la température de fusion de les composants métalliques du mélange. Ce type de frittage permet un meilleur contrôle du produit.
- Opérations secondaires
 - A cause de certaines limitations technologiques de la compression, l'obtention de la forme finale du comprimé fritté peut requérir une opération d'
 - Également, certaines applications exigent un fini de surface spécialement lisse, nécessitant un traitement post frittage.
 - L'infiltration métallique est souvent utilisée pour améliorer plusieurs propriétés des comprimés frittés telles que la, la, l'..... et aussi l'.....
 - L'imprégnation à l'huile permet d'obtenir des pièces auto-..... (..... par exemple). Par contre, l'imprégnation aux résines améliore l'usinabilité et aussi l'imperméabilité des comprimés frittés les préparant ainsi à un possible plaquage.
 - Un repressage est souvent utilisé pour augmenter la ou pour atteindre une accrue.

➤ Obtention des poudres

- Atomisation : Le métal est envoyé en jet qui est intercepté par un gaz à haute pression qui le disperse en gouttelettes qui, à leurs tours, se sous forme de
- Mécaniquement : Il s'agit principalement de la à l'état solide d'oxydes métalliques disponibles à l'état brut et à leur conditionnement mécanique par broyage
- Autres : électrolyse, chimiquement, ...

➤ Applications

- Le secteur utilisant le plus les pièces issues de la M/P est le secteur de l'industrie
- D'autres secteurs comme ceux des moteurs industriels, de l'électroménager ou des outillages font également souvent appel aux pièces frittées.



➤ Avantages et limitations

- ☞ Cette technologie permet de fabriquer une variété de pièces à des coûts moindres que ceux des technologies concurrentes. Cet avantage devient encore plus évident pour les pièces dont l'usinage est très difficile et donc très coûteux, soit à cause de leur complexité, soit à cause de la du matériau qui les constitue (ex: Tungstène, Carbure de Tungstène,...).
- ☞ A tous ces avantages, s'ajoute la possibilité de fabrication de pièces à partir de poudres de métaux impossibles à allier.
- ☞ L'aspect poreux des pièces de la M/P constitue dans beaucoup de cas un avantage certain puisqu'il permet de produire des articles comme des autolubrifiants ou aussi des

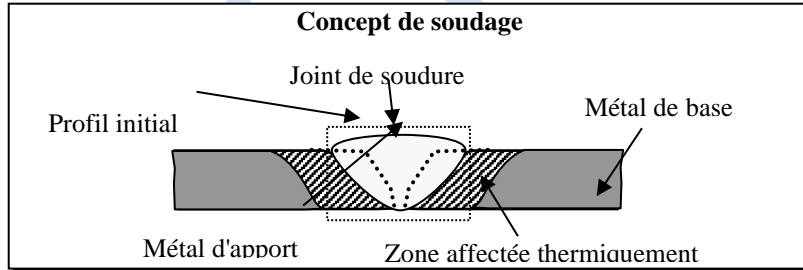
.....métalliques.

- ☞ Effectivement, certains détails géométriques, comme les trous transversaux et les filets, sont impossibles obtenir par compression. Leur réalisation implique des opérations secondaires d'.....
- ☞ Également, la pression disponible au niveau de la presse constitue un facteur limitatif pour les pièces de grande
- ☞ Par ailleurs, bien que des degrés de densité assez élevés soient généralement atteignables, il est difficile et peu économique de presser et fritter des pièces complètement
- ☞ De plus, l'uniformité de la distribution de la dans les comprimés est également difficile à atteindre malgré l'utilisation des lubrifiants.

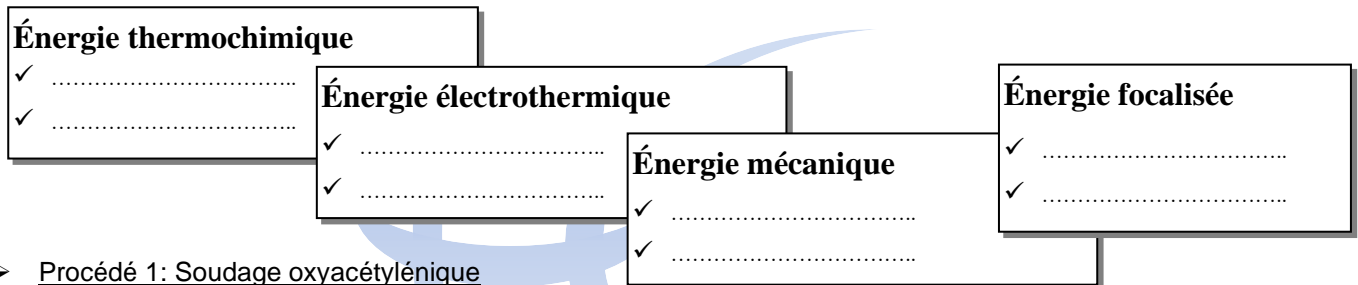
SOUDAGE

Principe

- Le soudage est un procédé visant l'assemblage de deux composants métalliques. L'assemblage se fait par la création d'un joint formé par le matériau des composants et éventuellement un métal d'apport.
- Si le métal d'apport est de constitution très similaire à celui des composants, le soudage est dit autogène. Le cas échéant, le procédé d'assemblage est appelé brasage ou soudo-brasage.
- Lors du soudage, le métal de base est localement et progressivement chauffé afin qu'il fonde et qu'il participe activement à la formation du joint.
- Par contre, lors du brasage, c'est uniquement qui fond (température de fusion plus basse que celle du métal de base). Le joint se forme ainsi par capillarité.
- De plus, si la technique opératoire ressemble à celle du soudage (chauffage et dépôt progressif du métal d'apport), le procédé est dit

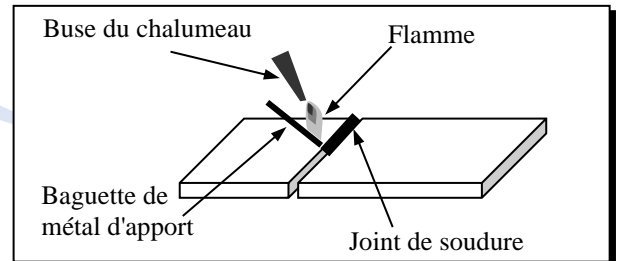


Classification des procédés de soudage selon la source d'énergie



Procédé 1: Soudage oxyacétylénique

- Principe** : Un chalumeau est utilisé pour générer une flamme hautement énergétique résultant de la combustion d'un mélange et
- La buse du chalumeau d'où jaillit la flamme est orientée vers le joint à souder sur lequel on pourrait déposer le métal d'apport sous forme de

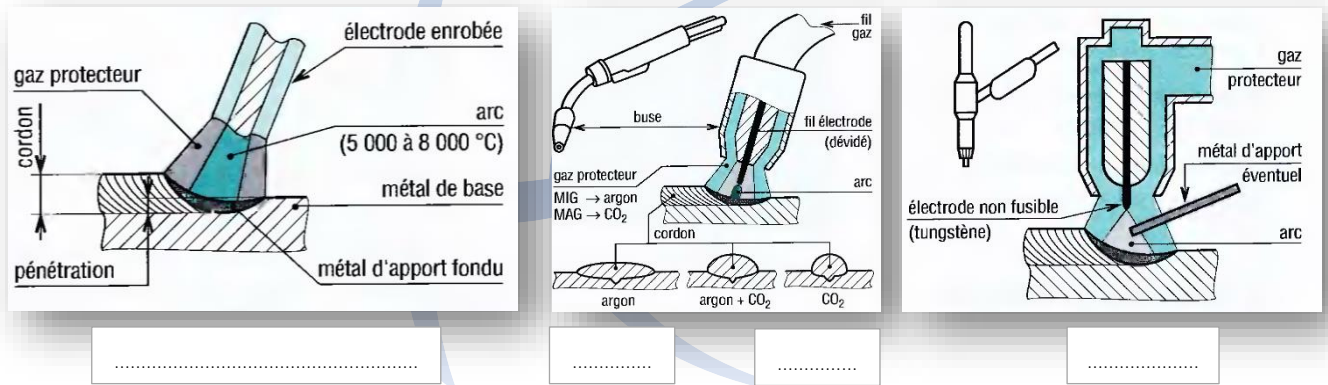


- Applications**:
 - Soudage de tôles minces
 - Raboutage de tubes.
 - Secondairement: soudo-brasage, oxycoupage,
- Considérations pratiques**:
 - À cause du fait qu'elle est surtout appliquée aux tôles minces, cette technique est souvent utilisée sans métal d'apport.
 - Le cordon est protégé par une poudre protectrice (flux)
- Avantages et limitations**
 - Préparation peu contraignante.
 - Ce procédé ne peut s'effectuer qu'en une seule passe à cause de
 - L'épaisseur soudable ne peut excéder 8 mm pour les aciers et 15 mm pour les métaux légers et ce à cause
 - Ce procédé entraîne des déformations importantes à cause de
 - Ce procédé est difficilement automatisable et est entrain d'être délaissé.

Procédé 2: Soudage à l'arc

- Principe** : L'arc électrique jaillissant entre l'électrode et une des est la source d'énergie nécessaire à la fusion des métaux et la constitution du bain de fusion. L'arc est établi en branchant un des pôles du poste de soudage à l'électrode et le deuxième à la pièce.
- Principales variantes**:
 - Variante 1: À l'électrode enrobée** : l'électrode fusible est du même matériau que Elle est enrobée par un produit qui, en fondant, constitue un laitier protecteur contre l'oxydation. Cette technique est plutôt manuelle à cause de la difficulté d'approvisionnement automatique en baguettes (fragiles non enroulables).
 - Variante 2: Sous gaz inerte et électrode fusible (MIG)** : l'électrode est du même que celui des pièces à souder. Elle passe à travers une torche par où provient un jet de gaz inerte

(hélium, argon, ...) servant à protéger le bain de fusion de toute Cette technique est utilisée pour des tôles de fortes épaisseurs et se prête très bien à l'automatisation.



- **Variante 3: Sous gaz inerte et électrode réfractaire (TIG):** contrairement au MIG, l'électrode est généralement en Le métal d'apport est donc indépendamment amené vers la position du joint. Cette technique se prête très bien à l'automatisation mais est plutôt réservée à des tôles d'au maximum 6 mm d'épaisseur.
- **Variante 4: Sous gaz actif et électrode fusible (MAG):** similaire au MIG, sauf que le gaz est du CO₂ (moins cher). Cette technique est adaptée uniquement aux
- **Variante 5: Au plasma :** La seule différence entre ce procédé et le TIG est le fait que l'arc est confiné dans un tuyère afin de le focaliser. Ceci permet d'atteindre une plus grande profondeur de soudure ainsi que de moindres

▪ Applications:

- Industries automobile, chimique, ...
- Charpentes et constructions métalliques, chaudronnerie, ...
- Constructions navales, ...

➤ Procédé 3 : Soudage à la résistance

- **Principe:** Ce procédé, ne faisant pas intervenir de métal d'apport, permet de souder des pièces métalliques, soit bout à bout ou par recouvrement. Les pièces sont mécaniquement maintenues en contact et un courant de forte intensité crée un chauffage par effet très localisé dans la zone par laquelle il passe. La fusion qui en résulte cause le soudage dit par résistance.
- **Principales variantes :** Soudage par points, soudage à la mollette, soudage par bossage.
- Applications:

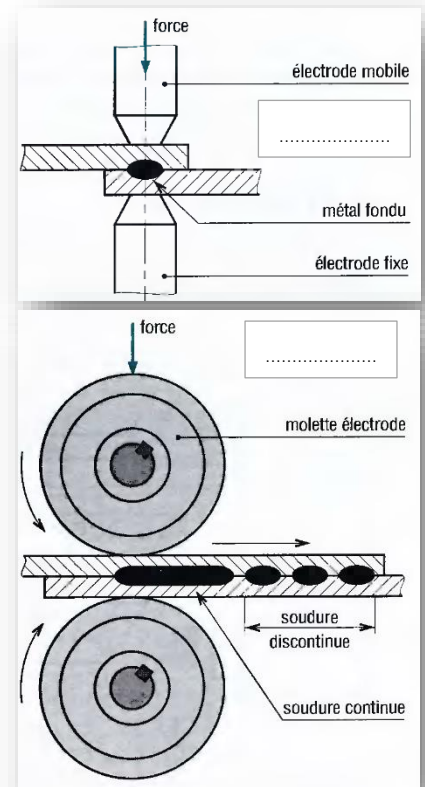
- Industries automobile, spatiale, nucléaire
- Électrique, électronique, électroménager, mobilier, ...
-

➤ Autres procédés:

- Soudage par friction
- Soudage par bombardement électronique

➤ Considérations pratiques

- **Préparation des pièces :** Plusieurs configurations de soudage peuvent être utilisées. On cite principalement, les configurations bout à bout, les soudures à angles, les soudures par recouvrement, etc. Pour chacune des configurations, les surfaces des pièces à assembler doivent, en plus d'être nettoyées, avoir une forme favorable au soudage.
- **Précautions et traitements**
 - Le retrait du joint de soudure au refroidissement est souvent la cause de déformations importantes
 - Pour éviter ce genre de problèmes, on a généralement recours à une déformation préalable inverse ou à un bridage des pièces lors du soudage. Le choix du procédé (grande vitesse d'avance, forte concentration de chaleur) peut également atténuer ce phénomène.
 - Les assemblages sont également traités, mécaniquement par martelage ou thermiquement par chauffage à 625-650 °C, afin de relaxer les contraintes résiduelles dues au soudage.
 - Les assemblages sont généralement traités, mécaniquement par redressage ou thermiquement par chauffage localisé, afin de corriger les déformations dues au soudage.



▪ Règles de conception : Afin d'obtenir des assemblages adéquats par soudage il faudrait :

– Mettre les cordons dans des plans neutres et favoriser les formes symétriques

– Éviter les concentrations de soudures (croisement de cordons).

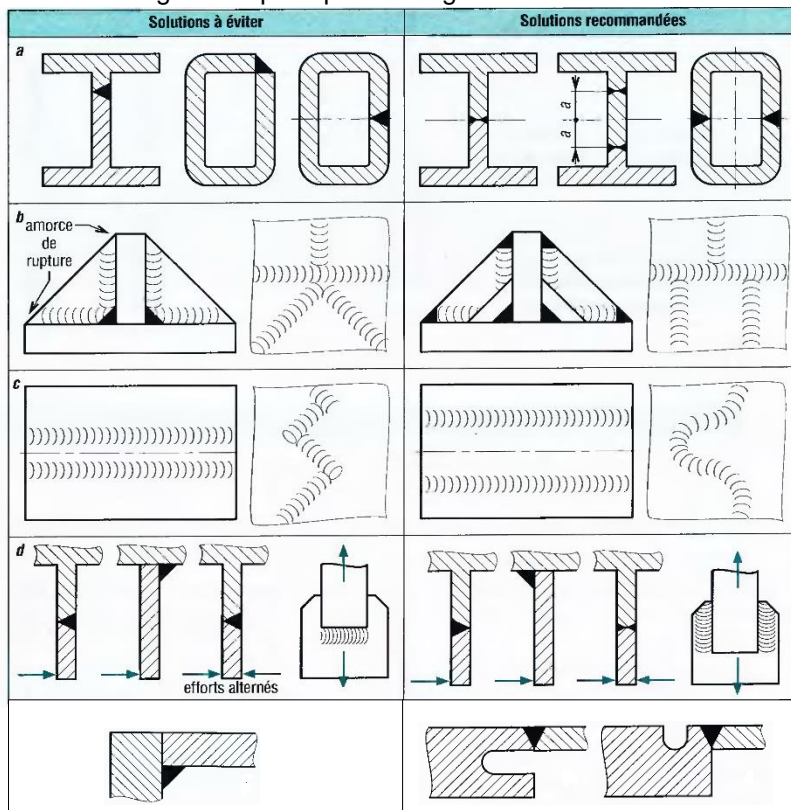
– Éviter les angles vifs et les cordons trop rapprochés

– Disposer les cordons en fonction des efforts exercés

– Éviter de souder des épaisseurs différentes

– Autres :

- Simplifier les formes à souder.
- Tenir comptes des déformations de retrait.
- Permettre une bonne et facile accessibilité du joint de soudure.
- Prévoir une surépaisseur d'usage.



▪ Calcul de la résistance du cordon de soudure en traction et en cisaillement

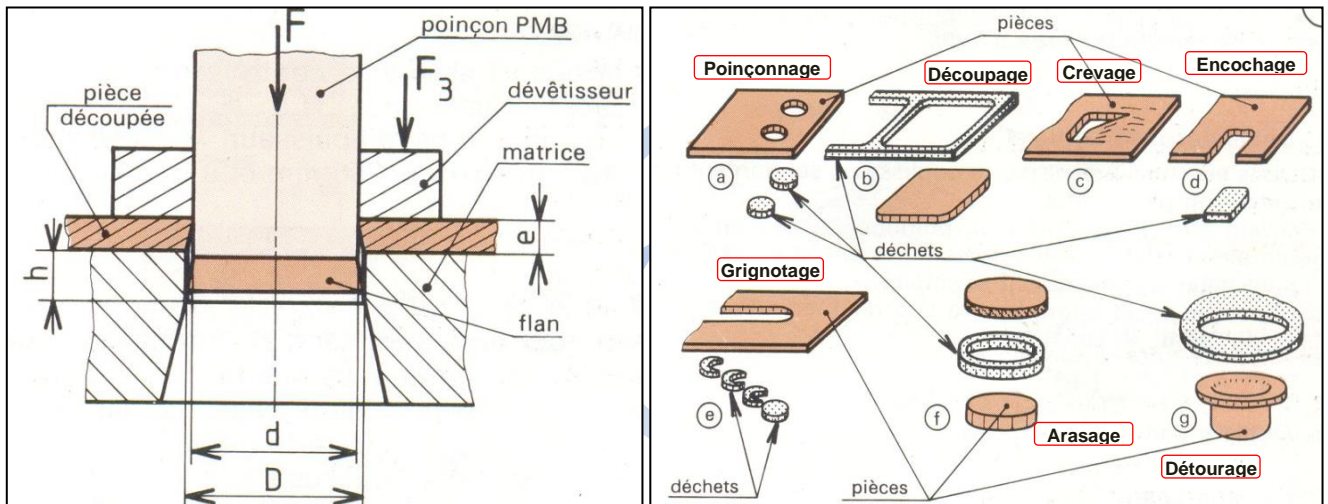
Cas	Exemple	Contraintes représentation	Formule
traction			$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{a.L}$
cisaillement			$\tau = \frac{F}{S} = \frac{F}{a.L}$ $= \frac{F}{0,707.h.L}$ $L = AB + CD$

📖 Poinçonnage-découpage

➤ Procédé classique

▪ Principe

- Le poinçonnage-découpage est un sur un contour fermé par le biais d'un et d'une (en acier dur traité) dont la forme est celle de l'ajour à poinçonner ou de la pièce à découper.
- L'outillage (poinçon-matrice- dévêtisseur) est monté sur une presse hydraulique conventionnelle ou aussi sur des machines dédiées (poinçonneuse, grignoteuse, ...)
- Les principales opérations pouvant être réalisées sont :
 - Arasage : c'est le découpage en reprise (amélioration de la précision).
 - Cisailage : c'est une coupe totale d'une pièce en deux parties.
 - Crevage : c'est un découpage partiel.
 - Découpage : le produit obtenu est un flan (souvent récupéré pour une opération d'emboutissage ou de pliage).
 - Détourage : finition d'un contour déjà ébauché, modifié au cours d'une déformation.
 - Encochage : c'est un découpage débouchant sur un contour.
 - Grignotage : c'est le poinçonnage partiel par déplacement progressif de la pièce ou du poinçon.
 - Poinçonnage : le déchet est appelé débouchure, ce sont des trous de petit diamètre



▪ Considérations pratiques

- *Le poinçon* : Il est composé de plusieurs parties :
 - Le corps du poinçon qui possède une longueur variable pour monter et serrer l'outil
 - La tête qui porte les arêtes tranchantes
 - La mouche(ou téton) utile pour positionner l'outil dans les coups de pointeaux préalablement réalisés à cet effet. Ils ont été effectués dans l'axe du trou à réaliser.
 - Un angle de dépouille qui est de 2 à 3° pour limiter les frottements.
- *La matrice*: elle est le «support d'empreinte» du poinçon. A son axe elle comporte un trou aux formes et dimensions du poinçon, auquel on ajoute un jeu de quelques dixièmes de millimètres.
- *Le jeu*: il est nécessaire entre les arêtes des outils. Ce jeu diminue l'effort de poinçonnage et l'écrasement de la zone poinçonnée. Ce jeu de poinçonnage sera proportionnel à l'épaisseur poinçonnée et dépendra de la résistance du métal. En règle générale
 - pour les aciers de construction, pour l'aluminium et ses alliages, le cuivre et ses alliages, on choisit un jeu diamétral égal à épaisseur/10.
 - pour les métaux durs et mi-durs comme pour les aciers inoxydables on choisira un jeu diamétral d'épaisseur/8.
- Effort de poinçonnage et section minimale du poinçon:
 - L'effort de poinçonnage dépend de l'épaisseur, du périmètre de la section du trou, de la résistance du métal et des frottements qui sont généralement négligés.
 - Une lubrification est conseillée pour ne pas user prématurément les outils.
 - Par conséquent, la section minimale de poinçonnage dépend de l'effort de poinçonnage, de la

forme et de la surface de la section poinçonnée et aussi de la longueur de flambage de l'outil.

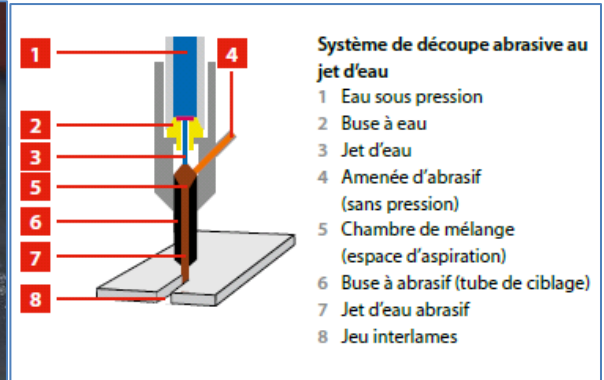
- Un dévêtisseur est généralement employé pour la plaque poinçonnée lors de la remontée du poinçon.

➤ Découpage au jet d'eau

▪ Principe

- Le fluide à base sous très haute pression (jusqu'à 6150 bars) sort de la buse de découpe à une vitesse de 1 200 m/s (environ 4 fois la vitesse du son)

- Le fluide à base d'eau peut contenir des additifs, notamment pour faciliter la coupe du matériau. La découpe au jet d'eau additionnée d'abrasifs (type grenat) permet la découpe de métaux, pierres, marbres, verre dans des épaisseurs allant jusqu'à 600 millimètres.



- On distingue deux techniques de découpe :

- la découpe à l'eau pure (tous les matériaux se coupant traditionnellement)
- la découpe à l'eau chargée d'..... comme le sable (tout matériaux sauf le verre trempé)

▪ Considérations pratiques

- Les machines de dernières générations intègrent une tête montée sur deux axes et un algorithme permettant de compenser le principal point faible du jet d'eau : la dépouille (causée par la déviation ou le retard du jet en grande vitesse).
- Le bruit d'une machine en fonctionnement peut monter jusqu'à 90 décibels. Mais pourrait être diminué en la coupe.
- Cette technique est très bonne en ligne droite car elle permet d'obtenir une vitesse de coupe supérieure mais montre des points faibles lors des changements de direction.
- La découpe au jet d'eau permet de découper à l'aide de plusieurs têtes, action pouvant même être effectuée à l'aide d'une seule pompe à multiplicateur. Toutefois, chaque tête de découpe supplémentaire exige un débit d'eau supplémentaire qui requiert soit une pompe plus grande, soit un orifice plus petit.

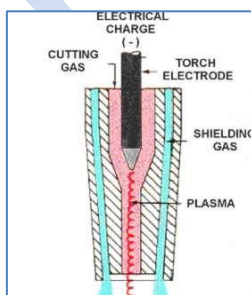
▪ Avantages et limitations

- ☞ Ce procédé permet d'obtenir une bonne découpe et de donner une découpe lisse et extrêmement précise. La précision de la découpe au jet d'eau peut dépasser celle de la découpe au laser car les bords sont plus lisses et ne sont pas déformés par la chaleur.
- ☞ Le jet d'eau n'implique pas de contrainte d'épaisseur contrairement à la découpe laser et plasma. La seule contrainte est liée au déplacement de l'axe Z
- ☞ L'inconvénient de la découpe au jet d'eau est son coût de fonctionnement à cause du coût de la pompe à multiplicateur et celui des grenats abrasifs.

➤ Découpage plasma

▪ Principe

- Ce mode de découpage utilise le même équipement que celui utilisé pour le soudage au plasma, lui-même très proche du procédé
- Le jet de plasma est généré par électrique qui s'établit entre une électrode réfractaire logée dans la torche de coupage et la pièce. Le mélange gazeux ionisé à la sortie de la tuyère forme le plasma.
- Le pouvoir calorifique du jet (température d'environ 18 000 °C) provoque une quasi instantanée qui se propage dans toute



l'épaisseur de la pièce.

- Sur une machine de découpe plasma, la température extrêmement élevée fait fondre instantanément le métal tandis que le gaz sous pression chasse au fur et à mesure les gouttelettes de métal en fusion.

▪ Considérations pratiques

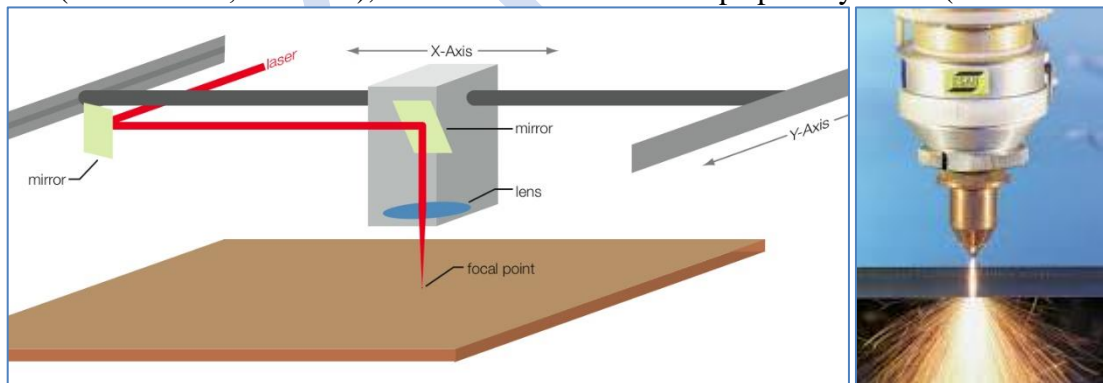
- L'usage de la torche de découpage au plasma doit se faire impérativement dans des locaux spécialement ventilés ou en plein air à cause de dégagement de gaz causé par les très hautes températures.
- Certains systèmes de découpe au plasma comprennent un apport d'eau permettant de le métal sitôt après sa découpe plasma, évitant également le dégagement de ces gaz toxiques.

▪ Avantages et limitations

- ☞ Ce procédé est réputé pour sa productivité
- ☞ L'équipement au plasma est relativement comparé à une torche d'oxycoupage classique.
- ☞ Comparé au jet d'eau et au laser, ce mode de découpage est relativement peu

➤ Découpage au laser

- Ce procédé utilisant l'énergie focalisée s'apparente au mode de soudage portant le même nom. En fait, la focalisation d'un rayon laser permet d'élever la température d'une zone réduite de matière, jusqu'à vaporisation. La puissance d'un laser varie en fonction du matériau à découper et de son épaisseur.
- La zone affectée par le rayon laser est relativement, ce qui explique le peu de subi par les pièces découpées. Néanmoins, la matière découpée change de nature chimique au point d'impact du laser et devient généralement plus rugueuse.
- Il est également possible d'utiliser un gaz additionnel dans la zone de découpage pour en améliorer l'efficacité : soit en repoussant les débris de découpe et en évitant la formation de flamme (.....), soit en favorisant la découpe par oxydation (.....).



▪ Considérations pratiques

- La découpe peut se faire sur des objets plats (plaques) ou des objets en volume.
- Toute matière peut être découpée par un laser : métal, textile, papier, carton, céramique, composite, cuir, verre, etc. Des spécifiques ont été développées pour obtenir un rendu optimisé sur chaque matière
- Le choix d'utilisation d'un laser prend en compte des critères de performance tels que la vitesse de découpe, l'intégration dans une chaîne de production et le rendu final sur matériaux.
- Les coûts d'utilisation de ce procédé sont devenus très faibles grâce à la forte augmentation de des machines

▪ Avantages et limitations

- ☞ Ce procédé permet une découpe précise et nette de nombreux matériaux
- ☞ Le laser n'est pas un procédé très rapide
- ☞ Le laser demeure le procédé de découpage le plus coûteux du point de vue de

➤ Comparaison

	Jet d'eau	Plasma	Laser
Matériaux	Tous les matériaux.	Principalement l'acier, l'acier inoxydable et l'aluminium et autres conducteurs	Tous les matériaux.
Épaisseur	Pas de limite (en pratique Jusqu'à 60 cm)	Jusqu'à 5 – 7,5 cm, selon les matériaux.	Généralement 2,5 cm ou moins
Précision	Jusqu'à 0,025 mm	Jusqu'à 0,25 mm	Jusqu'à 0,025 mm
Capital	60 K\$ à plus de 300 K\$	60 K\$ à plus de 300 K\$	200 K\$ à plus de 1 M \$
Réglage de la machine	Même réglage pour tous les matériaux	Réglages différents en fonction des tâches	Gaz et paramètres différents en fonction des tâches

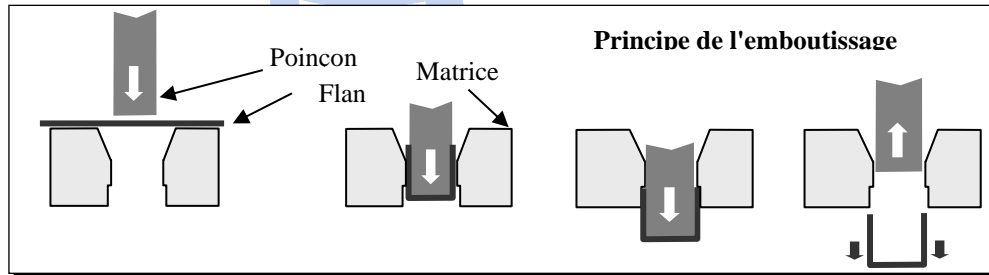
➤ Volume de production et adaptabilité à la commande numérique CNC

- Le procédé de base est pratiquement le seul qui à la commande numérique. En fait c'est le seul ou la forme obtenue ne dépend que de et non de leurs déplacements.
- Le procédé de base est pratiquement le seul qui exige la production car il met en œuvre des outillages et
- Le découpage au jet d'eau, au plasma et au laser sont utilisables avec commande manuelle mais plus souvent avec commande numérique

📖 Emboutissage

➤ Principe général

- Ce procédé vise la production de pièces à partir de la déformation d'un flan (tôle préalablement). Il met à profit la du métal utilisé qui subit d'importantes déformations plastiques sans que les contraintes n'atteignent la limite du matériau.
- L'équipement de base d'un tel procédé est composé d'une et d'un montés sur une (mécanique ou hydraulique). Ce dernier s'enfonce dans la cavité de la matrice entraînant avec lui le flan. La descente du poinçon se poursuit jusqu'à l'ouverture prévue pour l'évacuation de la pièce.

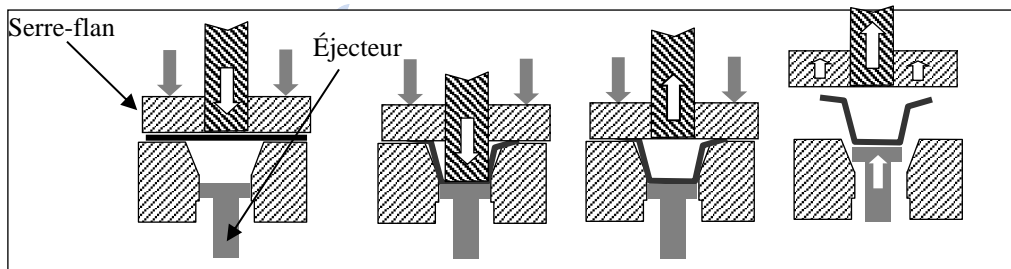
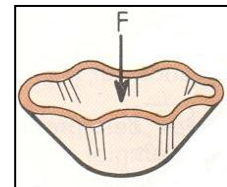


➤ Considérations pratiques

- **Matériaux**: Les métaux généralement employés en emboutissage sont les aciers (doux, spéciaux, ..), le laiton, le cuivre, ...etc. Tous ces matériaux doivent être utilisés à l'état pour un maximum de malléabilité.
- **Formes**: Les formes les plus faciles à emboutir sont les formes cylindriques. Les formes rectangulaires (assez proches du carré) ainsi que les formes tronconiques sont également réalisables. Des pièces galbées peuvent même être produites en forçant un fluide dans l'ébauche cylindrique et en utilisant une matrice en plusieurs morceaux (pour l'évacuation de l'embouti)
- **Précautions**: Afin de faciliter l'opération, on utilise souvent entre le flan (bien décapé) et la matrice. La cavité de celle-ci devrait également comporter un important arrondi (rayon 4 à 5 fois l'épaisseur de la tôle).
- **Détourage**: Les imperfections des outils et des tôles ainsi que les inégalités d'épaisseur de celles-ci sont responsables de l'inégalité de la hauteur de l'embouti. Ce problème est généralement arrangé en coupant le haut de l'embouti.
- **Paramètres**: Le bon déroulement de l'opération d'emboutissage implique le bon réglage de paramètres tels que : l'effort d'emboutissage, l'effort du serre flan (voir ci-dessous), la vitesse d'emboutissage, le jeu poinçon-matrice, la lubrification, le bon dimensionnement du flan, ...
- **Multi-passes**: Pour des emboutissages , plusieurs passes d'emboutissage sont nécessaires. Entre chacune de ces passes, un recuit de l'embouti doit être effectué afin de restaurer la malléabilité de la tôle. Sinon il y a risque de déchirure.

➤ Plis et serre flan

- **Plis**: À la fin du procédé, la tôle emboutie conserve essentiellement son épaisseur. Cependant il peut y avoir formation de plis si l'épaisseur de la tôle n'est pas suffisante compte tenu de la hauteur de l'embouti. Ces plis résultent d'un phénomène de compression tangentielle (**démonstration pratique en classe**).
- **Serre-flan**: Dans le but d'éviter la formation de plis, un serre-flan est souvent utilisé pour appuyer le flan contre la matrice. La pression appliquée sur ce composant doit être suffisante pour éviter la formation de plis mais aussi pas trop élevée pour éviter l'étirement, voir la déchirure de la tôle. Ainsi, un éjecteur devient nécessaire pour évacuer la pièce par le haut de la matrice.



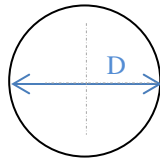
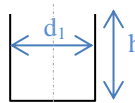
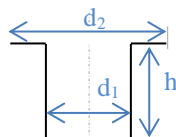
➤ Applications

- Industrie automobile : les pièces de carrosserie et autres
- Chaudronnerie : récipients, réservoirs ,
- autres

➤ Avantages et limitations

- 👉 Fabrication rapide et économique de formes creuses.
- 👉 Opérations de détourage généralement nécessaires.

- ☛ Nécessité de plusieurs passes (incluant des recuits) pour des formes nécessitant un emboutissage
- Étude du cas de pièces cylindriques
 - Détermination du flan de départ
 - La taille et la forme du flan sont importantes pour la consommation de matières (dimensionnement correct de réduire les déchets), pour la conception de l'outillage d'emboutissage et l'optimisation du rapport coût-efficacité du processus.
 - Lors de la détermination de la taille du flan circulaire, on suppose que :
 - l'épaisseur du matériau reste tout au long de l'emboutissage
 - le rayon de raccordement entre la paroi et le fond est
 - en cas d'utilisation de serre-flan, le rayon de raccordement entre la paroi et la est négligeable
 - Le principe de la conservation de la matière, avec les hypothèses énoncées ci-dessus, revient donc au principe de la conservation des surfaces :

<i>Flan de départ</i>	<i>Embouti cylindrique sans collerette</i>	<i>Embouti cylindrique avec collerette</i>
 <p>surface =</p>	 <p>surface =</p>	 <p>surface =</p>
<i>Diamètre du flan de départ :</i>	$D =$	$D =$

- Détermination de l'effort d'emboutissage :
 - Il n'existe pas de méthodes pour déterminer exactement cet effort. Dans de tels cas, des formules empiriques (formules approchées basée sur l'expérimentation)
 - Dans ce cas l'effort d'emboutissage est approximé par une formule faisant intervenir
 - d (mm) : diamètre du poinçon
 - D (mm) : diamètre du flan
 - R_m (da) : résistance à la rupture en traction du matériau de la tôle
 - e (mm) : épaisseur de la tôle
 - k : facteur empirique dépendant de d/D donné ci-dessous

d/D	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80
k	1	0.86	0.72	0.60	0.50	0.40

▫ L'effort d'emboutissage est donné par : $F_e = \pi \cdot d \cdot e \cdot R_m \cdot k$

- Détermination de l'effort du serre-flan
 - De même ici, Il n'existe pas une méthode pour déterminer exactement cet effort.
 - Ainsi, l'effort du serre-flan est approximé par une formule faisant intervenir
 - d_1 (mm) : diamètre de l'embouti
 - D (mm) : diamètre du flan
 - p (da) : pression spécifique sur le serre-flan, fonction du matériau

Matériau	<i>Acier doux</i>	<i>Acier inox</i>	<i>Aluminium</i>	<i>Laiton</i>	<i>Duralumin</i>
p	1	0.86	0.72	0.60	0.50

– L'effort du serre-flan est donné par : $F_s = \pi/4 \cdot (D^2 - d_1^2) \cdot p$

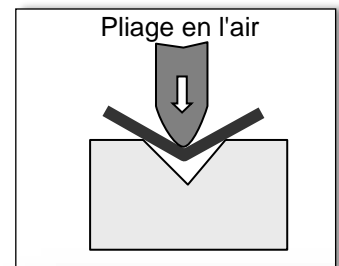
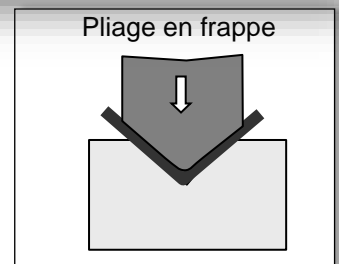
📖 Pliage

➤ Principe général

- Ce procédé permet d'obtenir des pièces par la déformation et d'une tôle métallique en utilisant un poinçon et une matrice de formes appropriées.
- Les outillages de base nécessaires à ce procédé sont une et un
- Ce procédé est généralement réalisé sur de presses plieuses hydrauliques à tablier supérieur mobile ou à tablier inférieur mobiles.



- Fondamentalement, deux principaux types de pliage existent:
 - *Pliage en frappe* : l'angle du pli est donné par avec une pénétration complète de ce dernier.
 - *Pliage en l'air* : l'angle du pli est donné par le toujours, partielle du poinçon dans la matrice.
- Les formes obtenues par pliage sont des formes développables



➤ Considérations pratiques et applications

- Ce procédé est utilisé dans plusieurs champs d'activité dont la tôlerie générale et la fabrication de meubles métalliques.
- L'équipement du procédé de pliage en l'air permet d'obtenir des pliages à plusieurs formes intermédiaires.
- L'angle obtenu par le pliage en frappe est celui du V de la matrice auquel il faut la valeur du
- Ce même procédé (en frappe) exige également une force supérieure (jusqu'à 4 fois plus que le pliage en l'air).
- Cependant, il présente un moindre retour élastique (0,5 à 2°) comparativement au pliage en l'air (2 à 3°).
- Plusieurs outils spéciaux existent pour le pliage des tôles selon des formes de V, U, Z,
- La taille des tôles pouvant être pliées est limitée par celle des
- Le rayon de pliage est limité par
- Les tôles épaisses sont généralement cintrées (cintrage à voir plus loin).



➤ Pliage avec commande numérique

- Les presses plieuses avec commande numérique (CNC) sont devenues très populaires. Ces machines offrent une assistance et même une optimisation du procédé de pliage.
- Le calculateur (ordinateur) de telles presses exploite des données telles que :
 - l'épaisseur de la tôle
 - le type de matériau
 - le type du poinçon et de la matrice
 - l'angle intérieur
 - la longueur de la pièce
 -
 pour réaliser certaines tâches telles que :
 - la création et visualisation de la gamme de pliage optimale
 - le calcul de la position des butées pour chacune des étapes
 - le calcul de l'effort appliqué pour chacune des étapes
 -

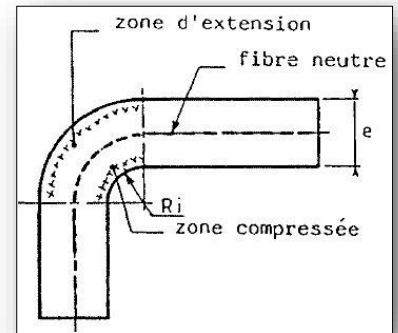
▪ Avantages et limitations

- 👉 L'outillage de ce procédé est relativement
- 👉 La possibilité de production de formes complexes.
- 👉 La difficulté de contrôler le

➤ Étude sommaire du pliage en l'air

▪ Développement du flan (détermination de la longueur du flan de départ)

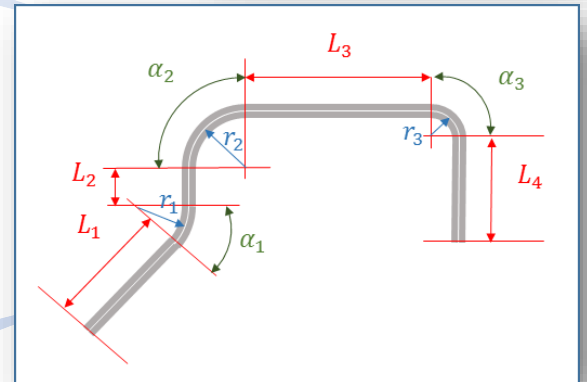
- Lors du pliage les fibres extérieures
- Les fibres intérieures
- Seule une fibre dite située au milieu de l'épaisseur ne pratiquement pas.
- Tous les calculs devront être faits à partir de cette fibre pour les tôles fines
- Ainsi il est commun d'utiliser la formule suivante, basée sur les rayons de pliage au niveau de la fibre neutre, pour trouver la longueur du flan de départ (L):



$$L = \sum \quad + \quad \sum$$

avec :

- n : nombre de segment droits
- m : nombre d'arcs (généralement $n=m-1$)
- L_i : longueur du segment droit i
- α_j : angle de l'arc j
- r_j : rayon de l'arc j



▪ Calcul de l'effort de pliage en V

- Plusieurs facteurs rendent difficile le calcul exact de l'effort nécessaire au pliage en V.
- Parmi ces facteurs citons : le pièce-outils, l'évolution des masses, l'évolution des propriétés de la tôle pliée (.....),
- Une formule empirique est néanmoins utilisée pour approximer cet effort :

$$F = \frac{k \cdot L \cdot e^2 \cdot R_m}{a}$$

avec :

- L (mm) : longueur du pli
- a (mm) : ouverture du V
- R_m (daN/mm²) : résistance à la rupture en traction du matériau de la tôle
- e (mm) : épaisseur de la tôle
- k : facteur empirique dépendant de a / e :

a/e	6	8	12	16
k	1.40	1.33	1.24	1.20

➤ Cintrage

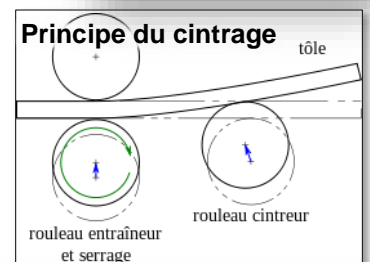
▪ Principe général

- Le cintrage est un procédé mécanique de déformation d'une tôle, d'un tube ou d'une barre, suivant un rayon (généralement grand) avec une cintrreuse.
- De point de vue principe, la différence entre cintrage et pliage est au niveau des grands rayons de courbure retrouvés en cintrage comparativement au pliage. La déformation plastique est plutôt « générale » alors qu'en pliage elle est plutôt « locale ».
- De point de vue pratique, la différence entre cintrage et pliage est au niveau des machines utilisées : presse plieuse ou cintrreuse (rouleuse).
- Sur une rouleuse, la tôle est entraînée par deux rouleaux (galets) et cintrée (déformée) par le troisième.



▪ Applications

- Les citernes et les cuves sont généralement obtenus par cintrage sur tôles.
- Les rails et les profilés courbés sont obtenus par cintrage sur barres.
- Les raccords de canalisations métalliques (coudes et autres) sont généralement obtenus par cintrage sur tubes.

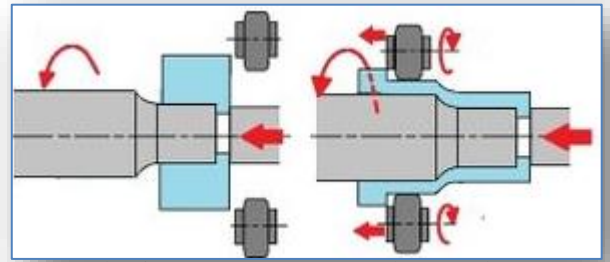


Fluotournage / repoussage

Fluotournage

Principe

- Le fluotournage consiste en la déformation plastique de métaux (fluage) entre un mandrin et une ou plusieurs molettes, entre lesquels la matière « s'écoule », d'où son nom.
- Ce principe, qui s'apparente à la technique du potier, est connu depuis longtemps, mais mécanisé seulement depuis les années 1950.
- Il se différencie du repoussage par le fait qu'il entraîne une réduction , alors que le repoussage se fait à constante.



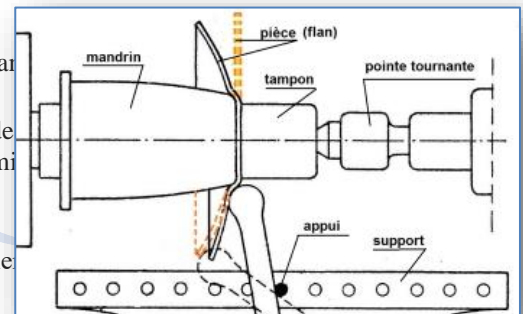
Considérations pratiques et applications

- Ce procédé est généralement réalisé à froid (pour des matériaux)
- Il résulte de ce procédé des pièces creuses ayant des formes non (s'apparentant donc à des pièces et non à des pièces) à résistance mécanique 20% à 80% supérieure à celle de la même matière à l'état recuit
- Ce procédé permet l'obtention d'épaisseurs pouvant être très faibles ainsi que d'excellentes précisions dimensionnelles et un très bon état de surface
- Ce procédé ne nécessite pas de lubrification et requière des efforts modérés, donc des machines de puissance moyenne

Repoussage

Principe

- Ce procédé consiste en la déformation plastique d'un flan sur un tour similaire à un tour à bois.
- Le flan, serré entre le mandrin (dont la forme est celle de la forme définitive de la pièce) et une contrepointe est mis en rotation.
- La pression d'un outil (brunissoir, molette, crochet, ...) permet de déformer le flan et de l'amener progressivement sur le mandrin



Considérations pratiques et applications

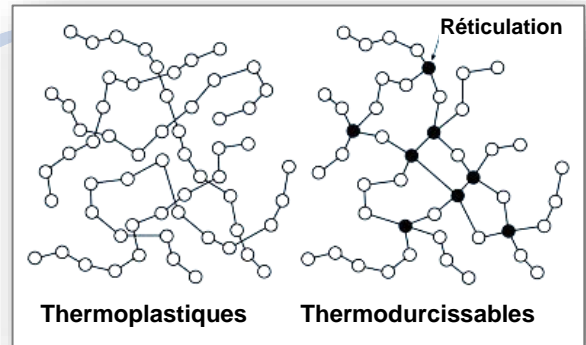
- Le travail des métaux au repoussage dépend de la malléabilité et de la sensibilité de ceux-ci à l'érouissage.
- Les métaux purs comme l'aluminium ou le cuivre sont très malléables et se travaillent facilement.
- Les alliages comme l'acier s'érouissent facilement et demandent plusieurs passes de travail et des intermédiaires.
- La lubrification est indispensable pour éviter le grippage de l'outil sur la pièce et pour faciliter la déformation.
- Parmi les pièces pouvant être obtenues par repoussage nous citons les : couvercles, fonds, réflecteurs, déflecteurs, ogives, viroles, collerettes, pavillons, cônes,
- Les mêmes formes peuvent être obtenues par fluotournage.
- Le repoussage, comme le fluotournage, permet la production de pièces de révolution en séries avec un faible coût d'investissement d'outillage.



📖 MISE EN ŒUVRE DES PLASTIQUES

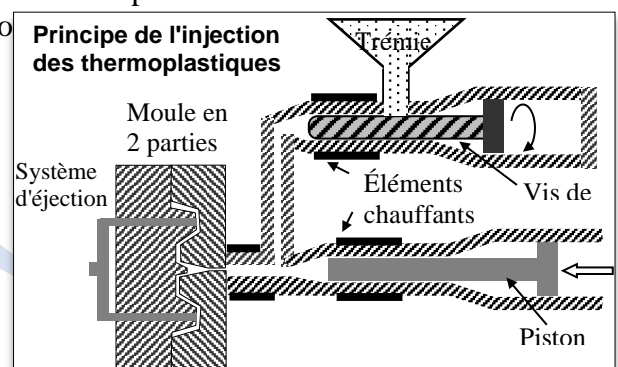
➤ Généralités sur les matières plastiques

- **Constitution** : Les constituants principaux de ces matériaux sont des molécules géantes appelées polymères. Ces derniers sont à leur tour constitués par un grand nombre d'unités fondamentales (ou motifs chimiques) dites monomères et qui sont des molécules organiques dont le noyau est l'atome de
- **Types** : On distingue principalement deux familles de matières plastiques: les et les Les différences entre les deux familles se répercutent sur leurs modes respectifs de mise en œuvre.
- Les thermoplastiques (TP)
 - **Nature** : Dans cette famille, les macromolécules sont enchevêtrées et ne sont liées que par des forces d'attraction électrostatiques. Ces forces s'annulent sous l'effet de l'élévation de la température et le matériau devient dans un état dit fondu (..... mais pas liquide) dans lequel les macromolécules peuvent se déplacer librement les unes par rapport aux autres. Au refroidissement, les liaisons électrostatiques reprennent leur force et le matériau Le cycle est réversible et théoriquement répétable un nombre infini de fois.
 - **Mise en œuvre** : Ainsi, pour mettre en œuvre des thermoplastiques, il faudrait tout d'abord les, ensuite les et finalement les De plus, ces matériaux se prêtent bien au et les déchets des procédés de mise en œuvre sont entièrement
- Les thermodurcissables (TD)
 - **Nature** : Dans cette famille, les macromolécules sont chimiquement liées par des molécules "lien". L'établissement de ce lien (réticulation) est un phénomène irréversible qui se passe à haute température. Un chauffage excessif entraînera la du matériau et non l'inversion de la réticulation.
 - **Mise en œuvre** : Pour mettre en œuvre des thermodurcissables, il faudrait donc combiner l'action et En fait, avant la réticulation les plastiques sont encore à l'état de monomères (très fluides). Un chauffage et un amorcent la réaction chimique qui entraîne le durcissement qui doit débiter au cours de la mise en forme et non avant. Les produits sont ni ni



➤ Procédé de mise en œuvre 1: **Injection**

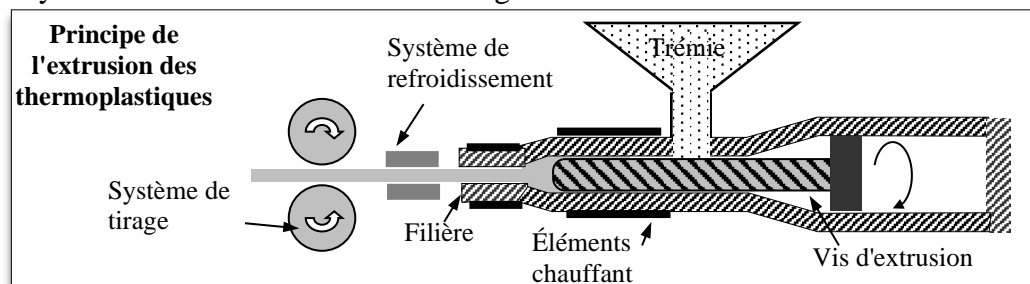
- Principe et applications
 - Ce mode de mise en œuvre est utilisé pour les
 - Il consiste à ramollir (plastifier) la matière plastique, originellement sous forme de poudre ou de granules, et à l'injecter dans un moule métallique.
 - Ce procédé est utilisé surtout pour des pièces de formes complexes et de parois minces, fabriquées en grande série (plus que 10 000 pièces). Il permet l'obtention de bonnes tolérances dimensionnelles avec des cadences de production de l'ordre de 200 pièces/heure. Cependant le coût des mo
- Équipement et procédure
 - La machine à injection comporte essentiellement:
 - Un système d'alimentation (trémie).
 - Un système de plastification (vis)-injection (piston) comprenant des éléments chauffants. Ce système est caractérisé par la pression qu'il peut appliquer par le biais du piston



- d'injection (jusqu'à 200 bars) ainsi que par la capacité d'injection (en kg ou en cm³)
 - Un moule métallique en 2 parties. Ce moule peut comporter plusieurs empreintes afin de produire plus qu'une pièce par la même injection. Les empreintes sont généralement fabriquées en acier spécial puis rapportées dans une carcasse en acier normal.
 - Un système de mise en mouvement, ouverture et fermeture du moule.
 - Un système d'éjection des pièces.
- La procédure d'injection se résume en ces points:
 - Alimentation du cylindre de malaxage.
 - Plastification de la matière plastique et fermeture du moule.
 - Injection des thermoplastiques fondus et refroidissement de la pièce.
 - Ouverture du moule et éjection de la pièce.
- Pour avoir de bonnes pièces à partir du procédé d'injection il faudrait:
 - Concevoir des pièces à épaisseur faible et constante et comportant des arrondis et des congés de raccordement.
 - Prévoir des nervures afin de renforcer les pièces et d'éviter leur déformation.
 - Prévoir des dépouilles afin de faciliter l'éjection.

➤ Procédé de mise en œuvre 2: **Extrusion**

- Principe et applications
 - Ce mode de mise en œuvre est utilisé uniquement pour les
 - On l'utilise surtout pour fabriquer des objets de formes variées mais de
 - (profilé, tubes, fils, films, ...)
 - Il consiste à ramollir (plastifier) la matière plastique, originellement sous forme de poudre ou de granules, et à la faire passer par une filière lui donnant la forme de section voulue.
- Équipement et procédure
 - L'extrudeuse comporte essentiellement:
 - Un système d'alimentation (trémie).
 - Un système de plastification- extrusion (vis) comprenant des éléments chauffants
 - Une filière par laquelle la matière plastique est extrudée.
 - Un système de refroidissement et de tirage.



- La procédure d'extrusion se produit en continu et se résume en ces points:
 - Alimentation du cylindre de malaxage.
 - Plastification de la matière plastique et fermeture du moule.
 - Extrusion de la matière à travers la filière.
 - Refroidissement et tirage des profilés extrudés.

➤ **Procédé de mise en œuvre 3: Soufflage**

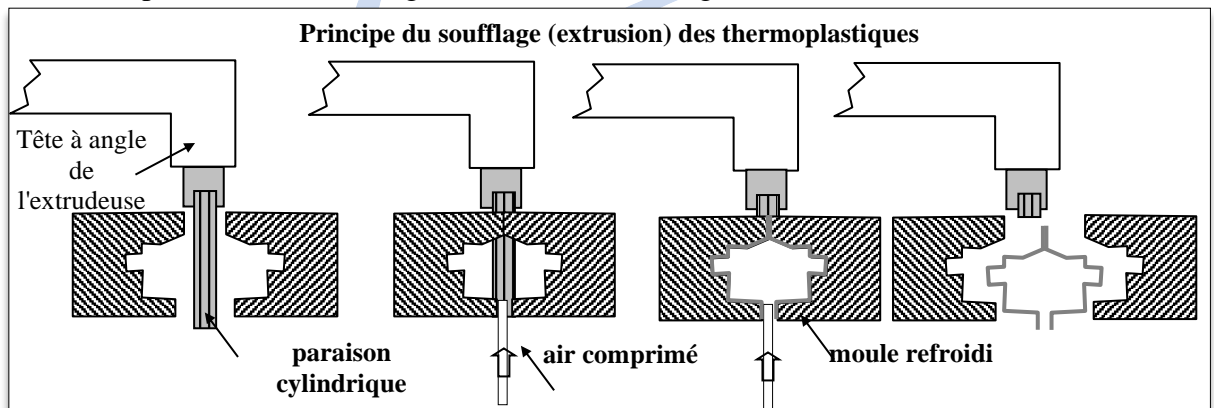
▪ Principe et applications

- Cette technique est réservée aux
- Elle est généralement utilisée après l'extrusion. Elle utilise donc comme matière des thermoplastiques appelés paraisons.
- Cette technique permet de fabriquer en grandes séries et à des cadences élevées (3000 à 5000 unités /heure) des produits de faible épaisseur (bidons, bouteilles, récipients de tout genre, ...)



▪ Équipement et procédure (en résumé pour l'étudiant):

- La machine utilisée est une extrudeuse à tête d'angle comportant, en plus de l'équipement standard d'une extrudeuse :
 - Un système d'injection d'air comprimé.
 - Un moule métallique en 2 parties.
 - Un système de mise en mouvement, ouverture et fermeture du moule.
- La procédure de soufflage est décrite dans la figure ci-dessous.



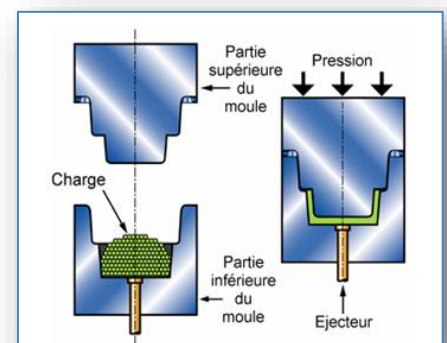
▪ Cas des pièces compliquées (à sections variables)

- Ces pièces peuvent présenter des épaisseurs très variables et même des déchirures et ce à cause de la grande différence entre la et celle de la extrudée.
- La solution d'un tel problème consiste à obtenir le produit semi fini par plutôt que par Ainsi la forme du produit semi fini sera proche de celle du produit fini.
- Le procédé est ainsi appelé soufflage - injection Alors que la procédure de base est appelée soufflage – extrusion
- Vu que le procédé soufflage – injection exige deux ensembles « moule » pour une seule pièce, le volume de production devrait être pour

➤ **Procédé de mise en œuvre 4: Compression/transfert**

▪ Principe et applications

- Les principales matières plastiques mises en forme par moulage par compression-transfert sont les thermodurcissables.
- Comme la réaction chimique de polymérisation doit être bien synchronisée avec le,, la matière première doit être dosée pour chaque opération et non livrée en continu comme pour les



-
- Parmi les pièces généralement obtenues par ce procédé nous citons : les boîtiers pour équipements électriques ou électroniques, les connecteurs, les supports de relai, les borniers pour l'aéronautique, le ferroviaire ou le naval,
 - La procédure de compression est comme suit :
 - chauffage du moule ;
 - mise des matières premières dans le moule ouvert ;
 - fermeture du moule ;
 - pressage pour obliger la matière à remplir le moule, l'excès de matière est évacué par des canalisations faites pour ce but ;
 - maintien de la chauffe et de la pression jusqu'à la fin de la cuisson (réticulation) ;
 - refroidissement du moule ;
 - ouverture du moule et récupération de la pièce.

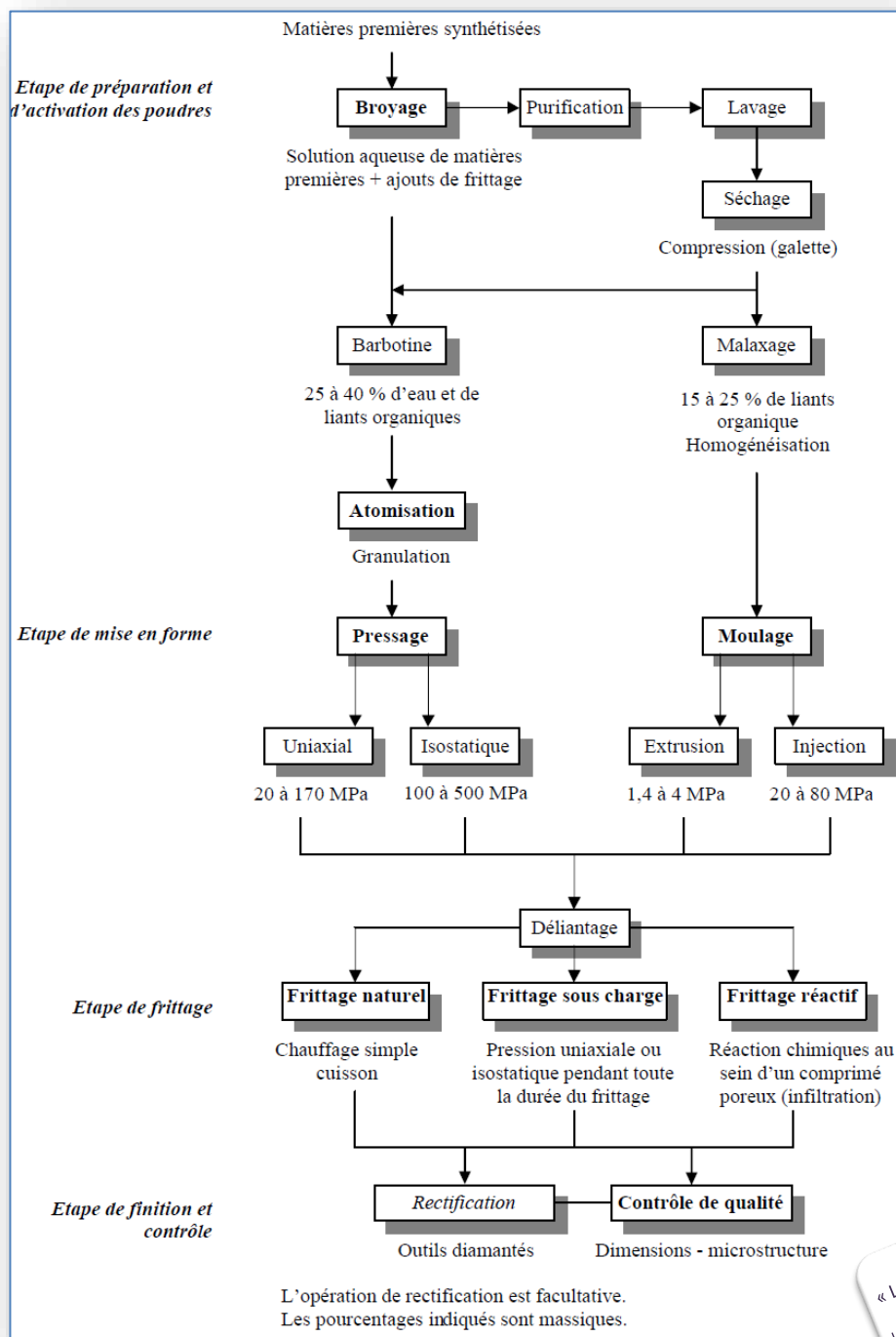


📖 MISE EN ŒUVRE DES CERAMIQUES

➤ Généralités sur les matières céramiques

- La céramique technique est une branche de la céramique qui traite des applications industrielles, par opposition aux créations artisanales (poterie), artistiques (céramique d'art) ou porcelaines.
- Il s'agit de matériaux ayant un corps vitrifié ou non, de structure cristalline ou partiellement cristalline, ou de verre, dont le corps est formé de substances essentiellement inorganiques et non métalliques et qui est formé par :
 - une masse en fusion qui se solidifie en se refroidissant,
 - ou qui est formé et porté à maturité,
 - » en même temps
 - » ou ultérieurement, par l'action de la chaleur.
- Les céramiques techniques entrent dans trois catégories différentes possédant chacune des propriétés particulières :
 - les oxydes : oxyde d'aluminium, oxyde de zirconium ;
 - les non-oxydes : carbures, borures, nitrures, céramiques composées de silicium et d'atomes tels que tungstène, magnésium, platine, ou encore titane ;
 - les céramiques composites : combinaison des oxydes et des non-oxydes.

➤ Étapes principales de la fabrication des céramiques (à usage thermomécanique)



EXTRAIT DU RAPPORT :
« LES CERAMIQUES INDUSTRIELLES »
PRODUIT PAR
LE CENTRE D'ANIMATION REGIONAL EN
MATERIAUX AVANCES
FRANCE 1999

➤ Intérêt et applications

- Faible conductivité thermique (isolants thermiques)
- Refractairité (moteur sans refroidissement, parois de fours, résistances chauffantes, ...)
- Propriétés optiques (lampes à vapeur métallique lasers, détecteurs infrarouge,).
- Inertie chimique et biocompatibilité (prothèses chirurgicales et dentaires, ...)
- Propriétés tribologiques (réduire les frottements entre pièces mécaniques : roulements à billes céramiques par exemple)
- Propriété diélectrique (isolateurs électriques,)
- Propriétés mécaniques : dureté (outils de coupe pour matériaux durs, outils de broyage, ...)
-