



LMECA1451 Fabrication mécanique

SIMON DESMIDT

Année académique 2023-2024 - Q2



Table des matières

1 Technologies d'usinage	2
1.1 Modes de coupes	2
2 Usinage	7
2.1 Mécanique de la coupe orthogonale	7
2.2 Conditions de coupe	11
3 Physique de la déformation plastique et du durcissement des métaux	13
3.1 Structure des métaux	13
4 Assemblage	15
4.1 Types d'assemblage	15
4.2 Classement des procédés de soudage par fusion	16
5 Forgeage	22
5.1 Fibrage	22
5.2 Ecrasement	22
6 Moulage des métaux	24
6.1 Avantages	24
6.2 Solidification d'un alliage	25
6.3 Fabrication des moules	28
6.4 Modèle perdu	28
6.5 Moule à usage multiple	29
6.6 Moulage par injection	29
6.7 Moulage par centrifugation	31
7 Moulage et extrusion des polymères	32
7.1 Extrudeuse pour polymères	32
8 Extrusion et moulage des polymères	34
8.1 Polymérisation	34

Technologies d'usinage

L'usinage est un procédé de fabrication par transformation et mise en forme.

1.1 Modes de coupes

Il existe d'autres techniques d'usinage, comme la rectification, la découpe par jet d'eau, la découpe laser, ou encore la découpe par électro-érosion (i.e. coupe à fil).

1.1.1 Paramètres de la coupe

La vitesse de coupe (ou de rotation) s'exprime en [mm/min] ou [t/min]. La profondeur de passe est l'épaisseur enlevée à la pièce [mm] et l'avance est le déplacement de l'outil pour un tour de la pièce [mm/t].

1.1.2 Tournage

Il existe deux types de tournage : le tour parallèle et le tour vertical. On utilise en général un tour parallèle, le tour vertical étant plus adapté aux pièces volumineuses avec une vitesse de rotation plus faible. Le montage de la pièce sur le tour peut varier :

- En l'air : la pièce est fixée sur un mandrin (pour les pièces courtes).

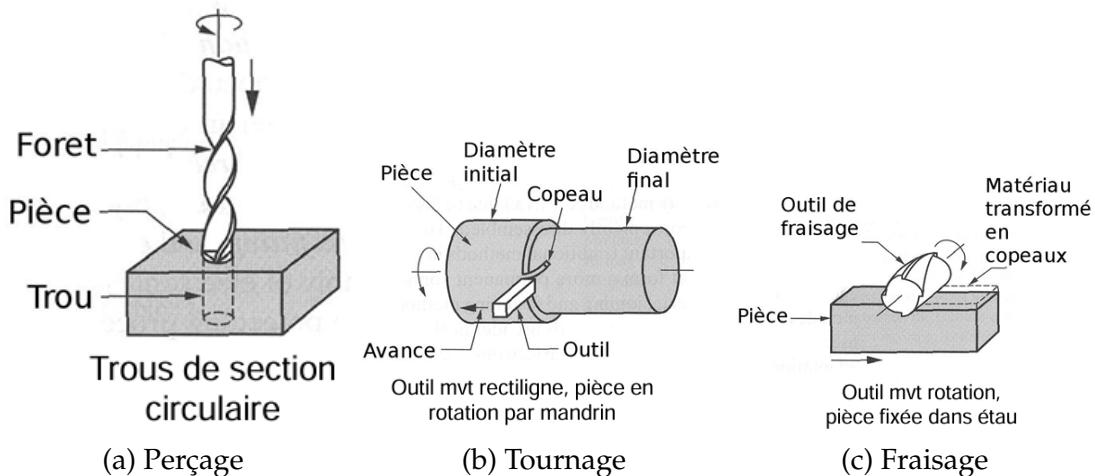


Figure 1.1: Modes de coupe

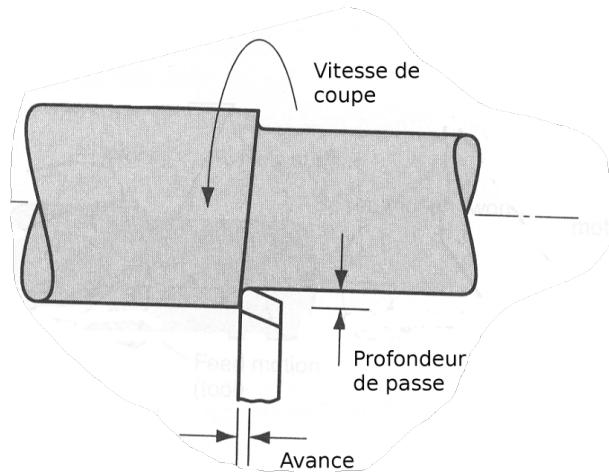
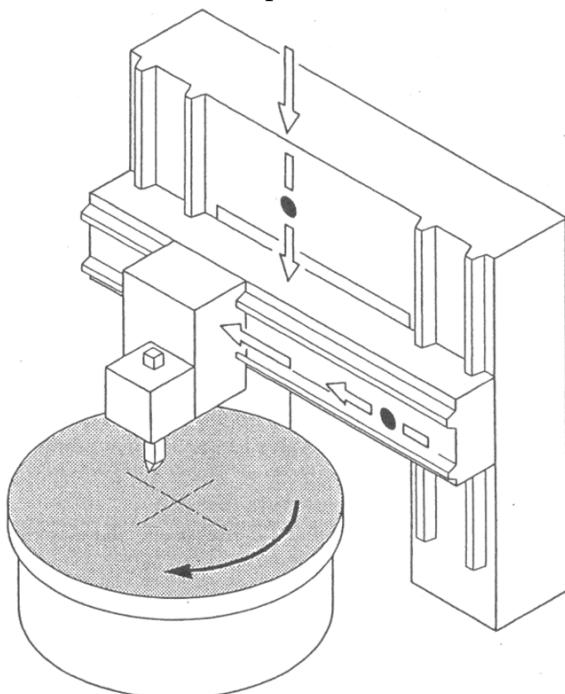
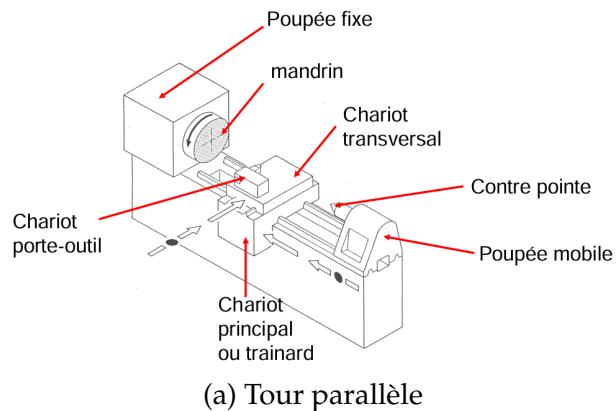


Figure 1.2: Paramètres de la coupe



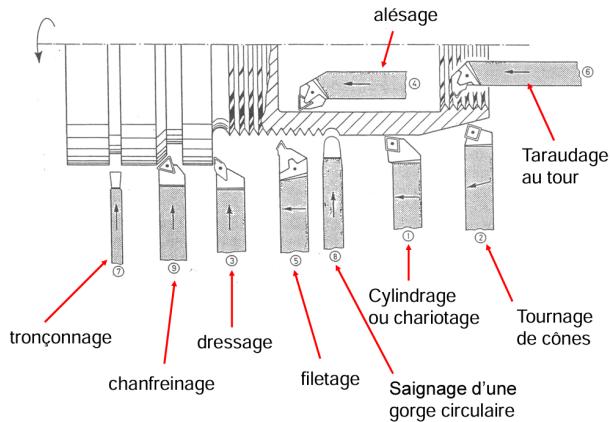


Figure 1.4: Opérations de tournage

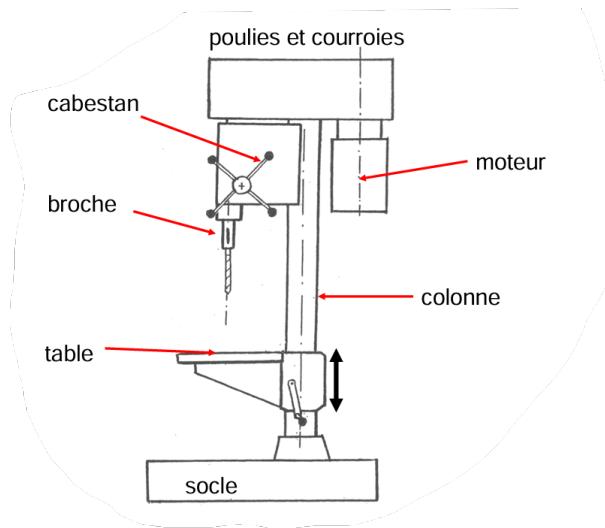


Figure 1.5: Perceuse

- Entre pointes : la pièce est fixée entre un entraîneur frontal et une pointe (pour les pièces longues).
- Mixte : la pièce est fixée dans le mandrin, mais maintenue par la pointe. Ce montage est hyperstatique, tandis que les deux autres sont isostatiques.

1.1.3 Perçage

→ Remarque : à noter que les dents de la broche sont de plus en plus larges.

1.1.4 Fraiseuse

- Le fraisage en opposition est un mouvement de coupe opposé à l'avance de la pièce. Il écarte la pièce de la table et a une moins bonne précision dimensionnelle que le fraisage en avalant.
- Le fraisage en avalant augmente le mouvement d'avance. Il plaque la pièce sur la table et a une meilleure précision dimensionnelle.

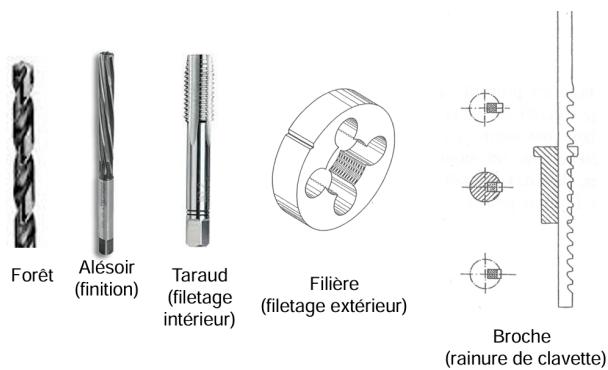


Figure 1.6: Outils pour perceuse

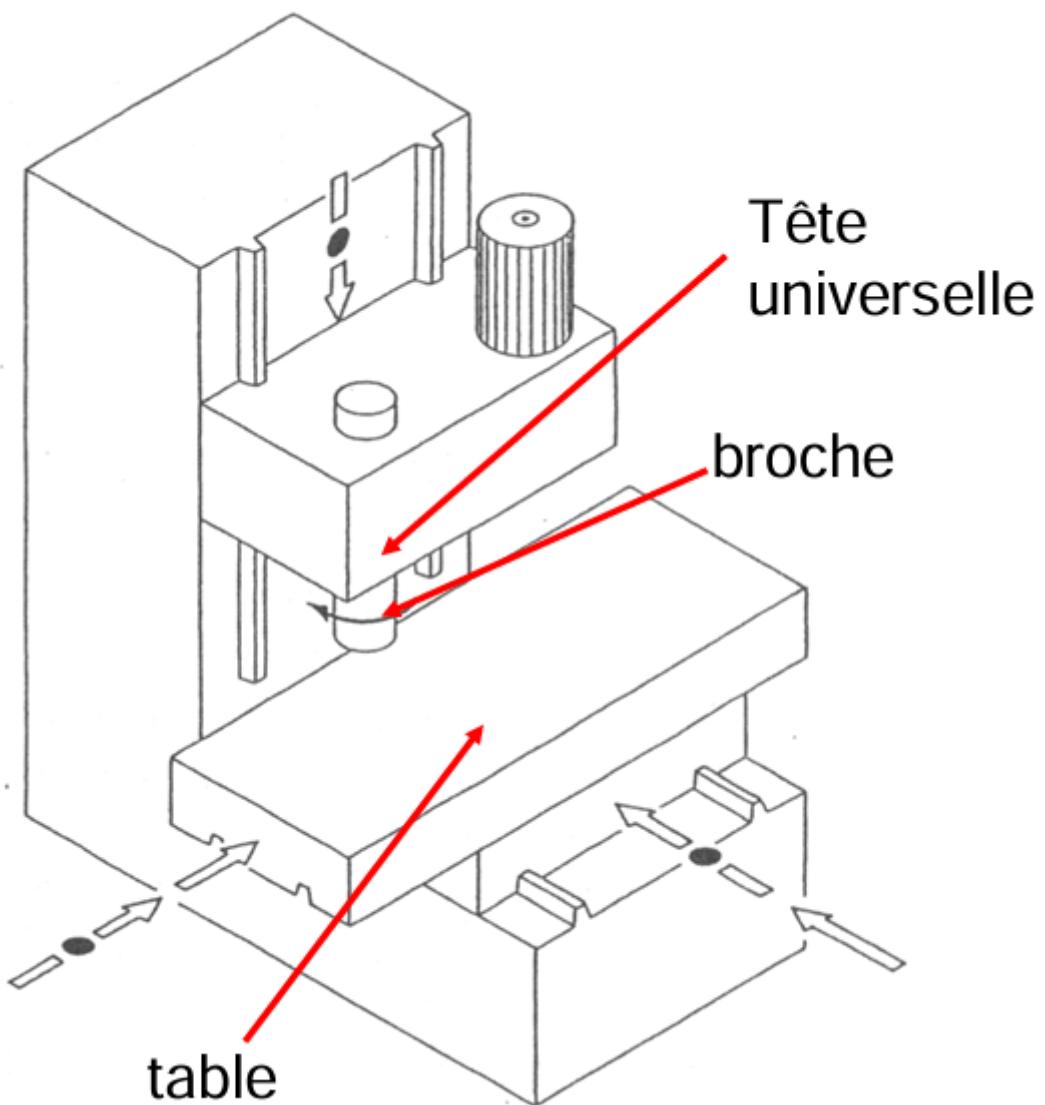


Figure 1.7: Fraiseuse verticale

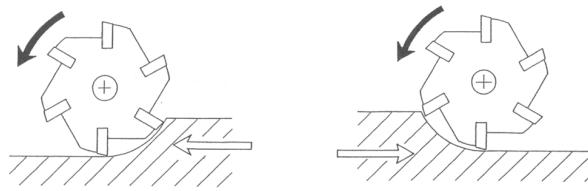
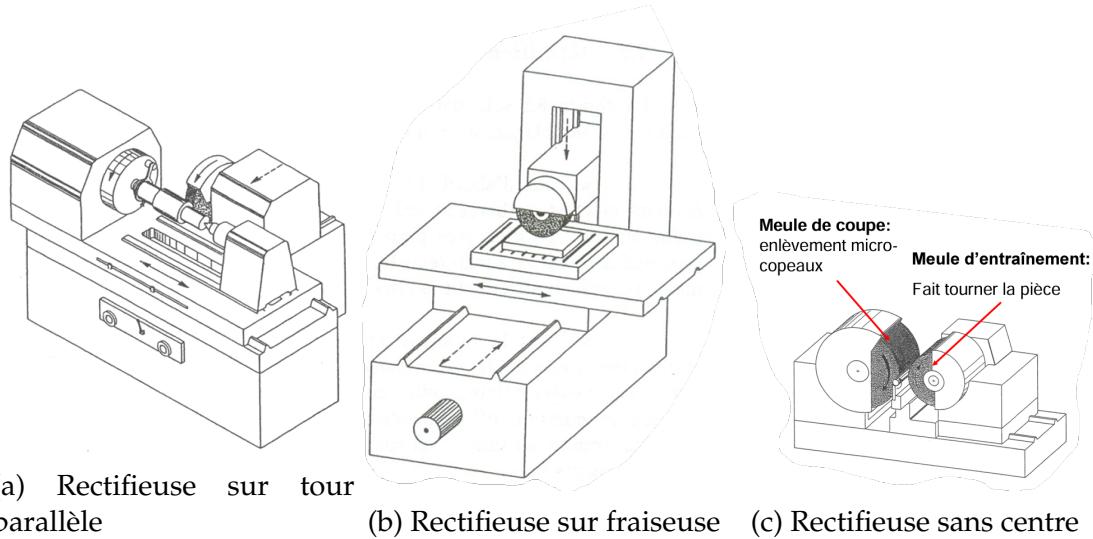


Figure 1.8: Fraisage en opposition (droite) et fraisage en avalant (gauche)



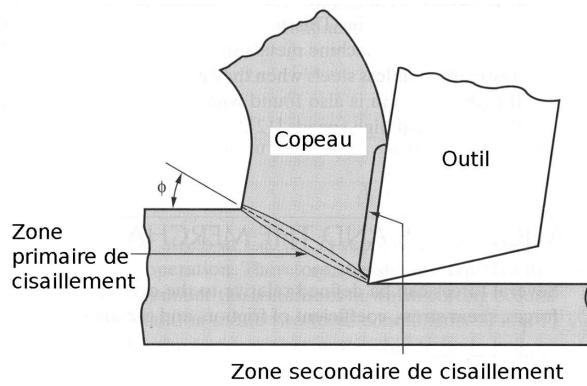
1.1.5 Meule de rectification

Les meules de rectification ont pour but d'améliorer l'état de surface des pièces. Une rectifieuse cylindrique est un tour parallèle ou une fraiseuse sur lequel l'outil est une meule de rectification

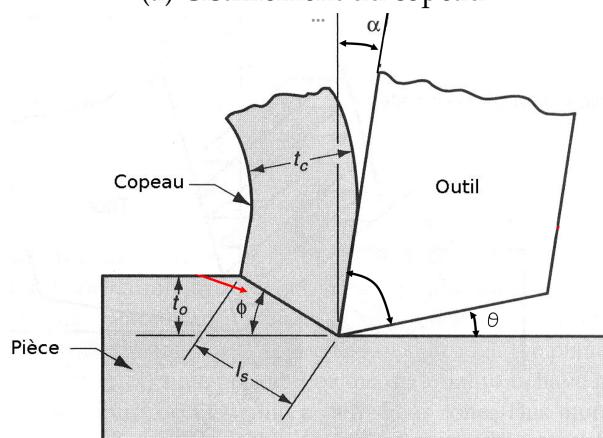
Usinage

2.1 Mécanique de la coupe orthogonale

La zone primaire de cisaillement est la zone où a lieu la déformation, et donc la formation du copeau, tandis que la zone secondaire de cisaillement est la zone de contact. C'est donc là qu'a lieu la production de chaleur due au frottement.



(a) Cisaillement du copeau



(b) Définition des angles

- φ : angle de cisaillement
- α : angle de coupe orthogonale
- θ : angle de dépouille
- Angle de l'outil : angle de taillant

- t_c : épaisseur du copeau (se mesure perpendiculairement aux surfaces)
- t_0 : épaisseur de passe

On définit également le rapport de coupe : $r = t_0/t_c$. S'il est inférieur à 1, il y a écrasement de la matière.

Par trigonométrie, on peut calculer des relations entre α , φ et r :

$$r = \frac{\sin \varphi}{\cos(\varphi - \alpha)} \quad \tan \varphi = \frac{r \cos \alpha}{1 - r \sin \alpha} \quad (2.1)$$

2.1.1 Déformation de cisaillement

La déformation est définie ici comme la longueur cisaillée par unité de longueur de copeau. On peut donc l'exprimer de la manière suivante :

$$\varepsilon_{12} = \tan(\varphi - \alpha) + \cot \varphi \quad \varphi = \arctan \left(\frac{r \cos \alpha}{1 - r \sin \alpha} \right) \quad (2.2)$$

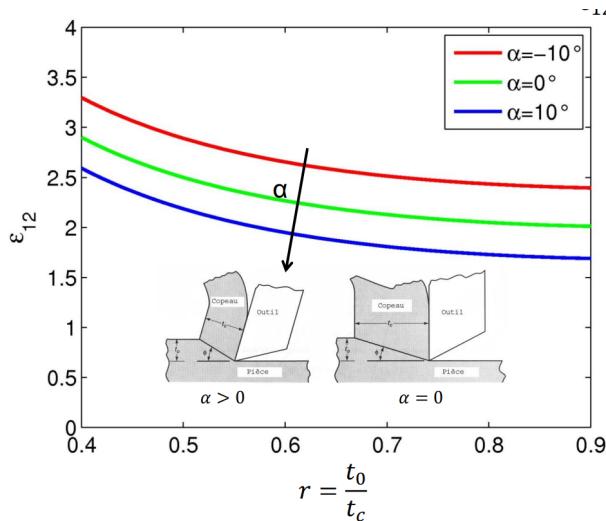


Figure 2.2: Déformation de cisaillement du copeau

2.1.2 Forces de coupe

On définit le coefficient de frottement comme suit : $\mu = F/N = \tan \beta$.

- F_s est la force de cisaillement
- F_n est la force normale à F_s
- F_c est la force de coupe appliquée par l'outil
- F_t est la force tangentielle
- F est la force de frottement
- N est la force normale

- β est l'angle entre la force appliquée par l'outil et sa normale

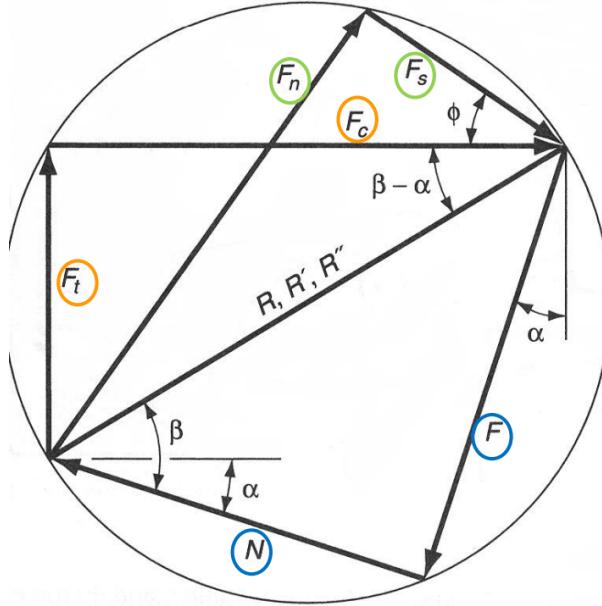


Figure 2.3: Ensemble des forces

On détermine cette valeur par trigonométrie, en mesurant la force de coupe F_c et F_t et l'angle α choisi préalablement.

2.1.3 Contrainte de cisaillement

On peut également déterminer la valeur de la contrainte de cisaillement $\sigma_{12} = F_s / A_s$.

Toujours par trigonométrie, on trouve la formule suivante :

$$\sigma_{12} = \left(\frac{F_c \cos \varphi - F_t \sin \varphi}{t_0 l_c} \right) \sin \varphi \sim [MPa] \quad (2.3)$$

A noter que cette valeur ne dépend que de paramètres mesurables ou prédéterminés.

2.1.4 Puissance de coupe

La puissance est le produit d'une force par une vitesse. La vitesse de coupe est donc

$$P_c = F_c \cdot v_c \quad (2.4)$$

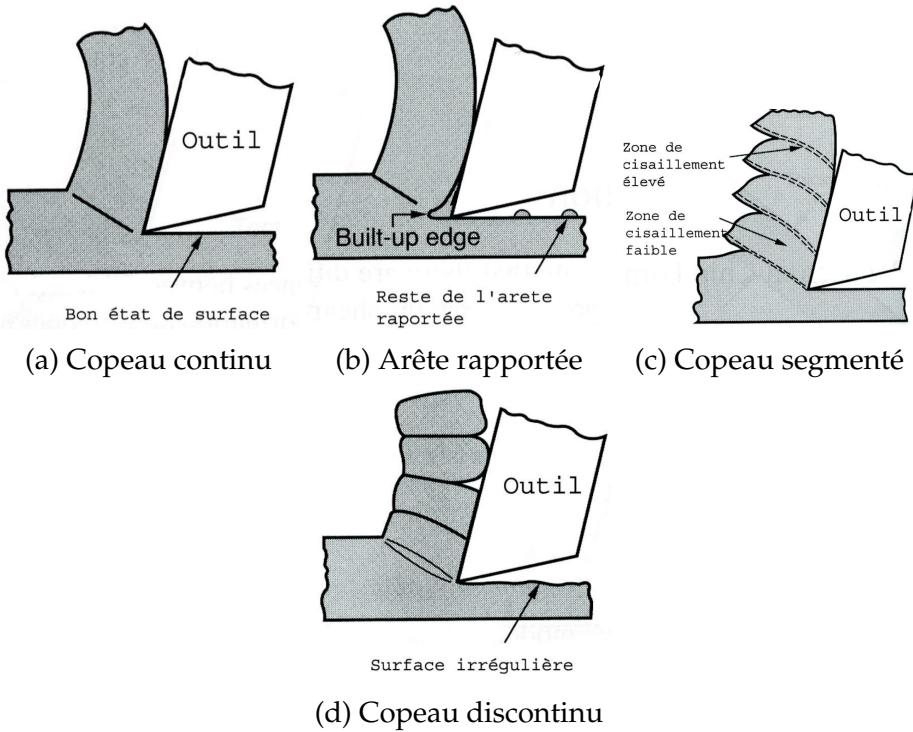
La puissance fournie par la machine est, avec η le coefficient de rendement,

$$P_f = P_c / \eta \quad (2.5)$$

Finalement, l'énergie de coupe par unité de volume de matière [J/m^3] est le rapport entre la puissance de coupe et le volume coupé par unité de temps :

$$E_c = \frac{P_c}{v_C t_0 l_c} = \frac{F_c}{t_0 l_c} \quad (2.6)$$

→ Remarque : elle dépend intrinsèquement de la matière.



2.1.5 Relation de Merchant

Afin d'augmenter l'efficacité des machines, on veut minimiser la contrainte de cisaillement, et donc favoriser un grand angle φ . Pour cela,

$$\frac{\partial \sigma_{12}}{\partial \varphi} = 0 \implies \varphi = 45^\circ + \frac{\alpha - \beta}{2} \quad (2.7)$$

Cela se fait sous hypothèse que β est un angle constant dépendant uniquement du couple matériau/outil et donc indépendant de α .

2.2 Conditions de coupe

2.2.1 Types de copeaux

	Copeau continu	Copeau discontinu
Conditions	<ul style="list-style-type: none">• Matériau dutile• Vitesse de coupe élevée• Peu de frottement entre l'outil et le copeau• Angle de coupe élevé	<ul style="list-style-type: none">• Matériau moins ductile• Inclusions dures• Vibrations de la machine• Utilisation d'un fluide de coupe/brise copeau• Vitesse de coupe faible• Angle de coupe faible ou négatif
Avantages	Bon état de surface	
Problèmes	<ul style="list-style-type: none">• Enroulement du copeau autour de l'outil• Sécurité de l'opérateur• Arrêt fréquent de la machine	Surface irrégulière
Solution	<ul style="list-style-type: none">• Matière moins ductile• Brise copeau	

2.2.2 Elévation de température

Si la vitesse de coupe augmente, la température du copeau augmente (plus de frottement) et celle de la pièce diminue (temps de contact plus faible). Les conséquences d'une augmentation de la température sont les suivantes :

- La résistance thermique de l'outil diminue et donc sa longévité aussi.
- L'outil se dilate thermiquement et la précision dimensionnelle diminue.
- Il apparaît des changements au niveau des microstructures de la pièce, ce qui change les propriétés mécaniques.

2.2.3 Outils de coupe

La durée de vie des outils de coupe dépend de la vitesse de coupe, de la dureté de la pièce à usiner et de la présence de secondes phases. Voici les propriétés souhaitées

pour un bon outil :

- Dureté élevée, y compris à chaud.
- Résistance au fluage¹.
- Bonne ténacité et résistance à l'impact.
- Résistance aux chocs thermiques.
- Inerte pour la pièce.
- Résistance à l'usure.

2.2.4 Etats de surface

La rugosité est un facteur important à prendre en compte lors de la fabrication de pièces. En effet, une rugosité élevée diminue la résistance à la fatigue de la pièce et peut conduire au non-respect des tolérances. C'est pourquoi certaines pièces sont rectifiées après avoir été usinées.

2.2.5 Fluide de coupe

Les fluides de coupe sont utilisés dans les buts suivants :

- Réduire la friction entre l'outil et la pièce, et donc l'usure de l'outil.
- Refroidir la zone de coupe et donc augmenter la résistance de l'outil.
- Réduire les forces de coupes et donc diminuer l'énergie consommée.
- Evacuer les copeaux.
- Sectionner les copeaux afin qu'ils soient discontinus.
- Protéger la machine de la corrosion.

Un fluide de coupe pénètre par action capillaire dans le réseau d'aspérités de la pièce.

2.2.6 Usinabilité

L'usinabilité désigne la capacité d'un matériau à être usiné (catégories de 1 à 5). Elle dépend de la qualité des états de surface, de la durée de vie de l'outil et des forces et puissances nécessaires.

¹A haute température, les déformations augmentent, malgré que la charge ne change pas.

Physique de la déformation plastique et du durcissement des métaux

3.1 Structure des métaux

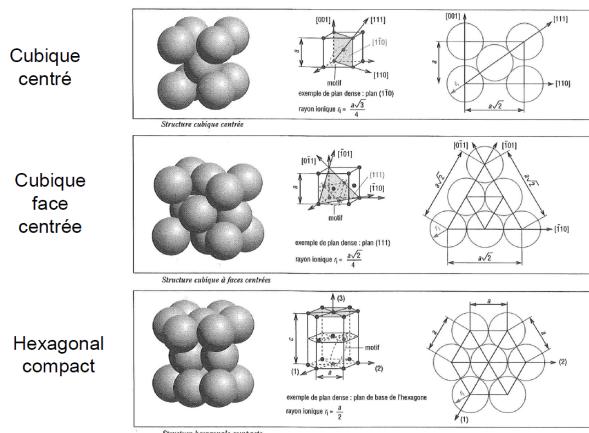
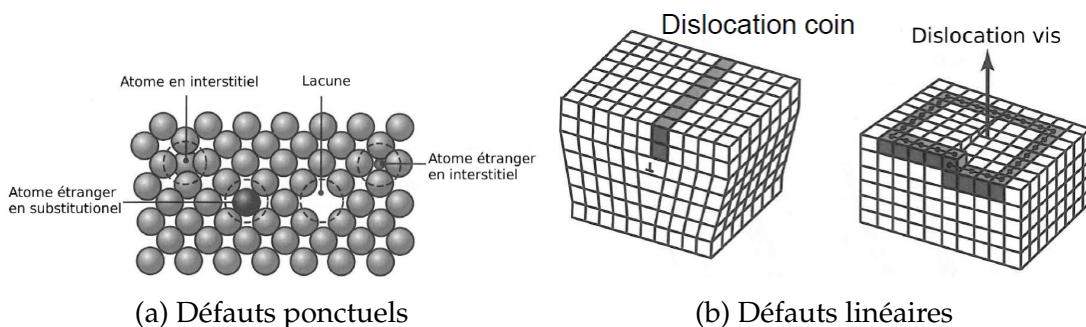


Figure 3.1: Structure des métaux

3.1.1 Défauts du réseau cristallin

Il existe différents types de défauts dans un réseau cristallin : ils peuvent être ponctuels ou linéaires.



On note ρ la densité de dislocation. Il s'agit de la longueur totale des lignes de dislocation. Les dislocations et défauts ponctuels aussi bien que linéaires peuvent se déplacer dans le solide.

La figure suivante illustre le phénomène d'annihilation de dislocation :

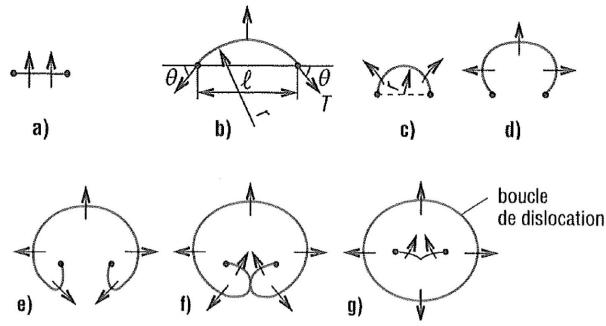
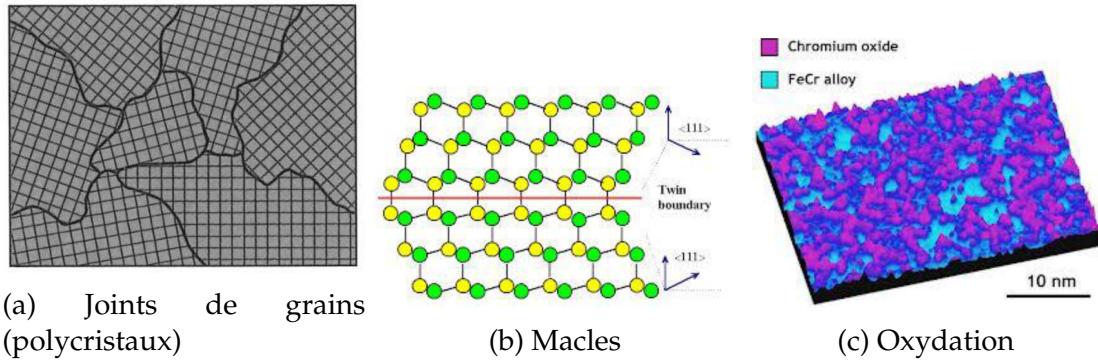


Figure 3.4: Annihilation des dislocations

3.1.2 Ecrouissage

Il y a mouvement des dislocations lorsque $\sigma_{ext} > \sigma_c$, avec σ_{ext} le cisaillement extérieur et σ_c la contrainte critique. L'écrouissage est le phénomène durant lequel le mouvement des dislocations est bloqué par des obstacles :

- Les autres dislocations
- Les joints de grains ou joints de phase
- Les macles
- Les précipités

3.1.3 Taille de grain

La taille des grains de polycristaux est donnée par la loi de Hall-Petch :

$$\sigma_Y = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (3.1)$$

Avec σ_Y la limite d'élasticité, σ_0 la limite d'élasticité pour un monocristal, d la taille de grain et k une constante.

3.1.4 Texture

La texture est l'orientation préférentielle des grains. Elle peut être aléatoire ou préférentielle, e.g. laminée.

Assemblage

4.1 Types d'assemblage

- Assemblage mécanique : non permanent.
- Soudage et brasage : continuité de la nature des éléments assemblés au niveau des liaisons inter-atomiques.
- collage : liaisons différentes que les matériaux de base.

Avantages	Inconvénients
Bonne résistance	Sécurité
Coût	Désassemblage
Etanchéité	Limitations pour certains métaux
Géométrie/structure s'y prêtant bien	Effets sur la microstructure et les propriétés mécaniques
Légèreté	Energivore
Sur le terrain (chantiers,...)	Main d'oeuvre qualifiée
	Distortions

4.1.1 Définitions

- Dilution : $MB/(MA + MB)$, avec MB le matériau de base et MA le matériau d'appport.
 - Les procédés de fusion ont une dilution non nulle, contrairement aux procédés de brasage.
- Le rapport de pénétration est le rapport entre la profondeur et la largeur du bain de fusion.
- L'intensité de puissance est la puissance transférée à la pièce par unité de surface [W/mm^2].
- L'apport calorifique H est l'énergie transférée à la pièce par unité de longueur. C'est le rapport entre une puissance et une vitesse ($[J/mm]$).

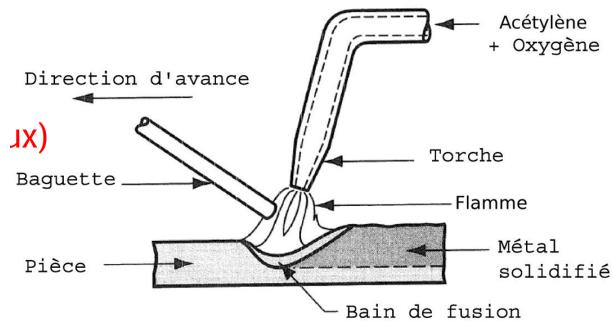
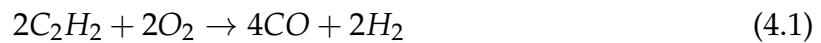


Figure 4.1: Soudage au gaz

4.2 Classement des procédés de soudage par fusion

4.2.1 Soudage au gaz

Deux combustions ont lieu lors du soudage au gaz :



(4.3)

La combustion primaire a lieu dans la torche, tandis que la seconde a lieu au niveau de la flamme extérieure.

4.2.2 Soudage à l'arc

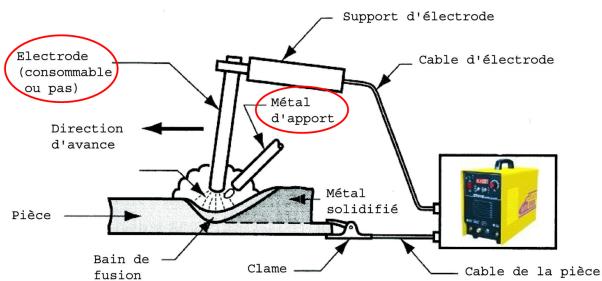


Figure 4.2: Soudage à l'arc

Le bain de fusion doit être protégé pour éviter des réactions chimiques inattendues.

Avec électrode enrobée

Avec fil fusible

Dans ce type de soudage, le fil se débobine automatiquement et un gaz de protection est nécessaire.

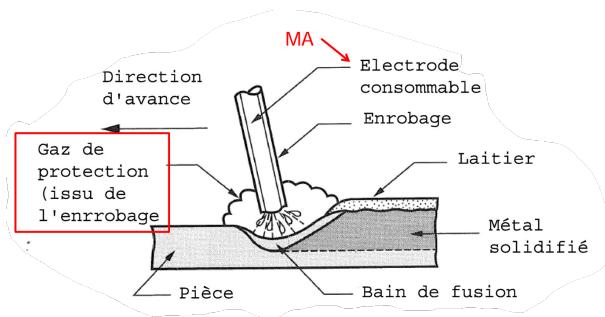


Figure 4.3: Soudage à l'arc avec électrode enrobée

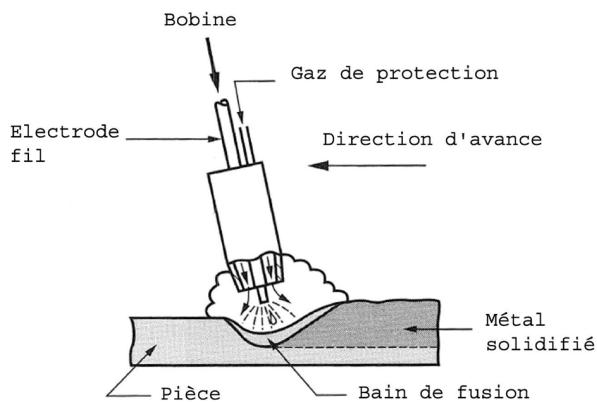


Figure 4.4: Soudage à l'arc avec fil fusible

4.2.3 Soudage à l'arc avec fil fourré de flux

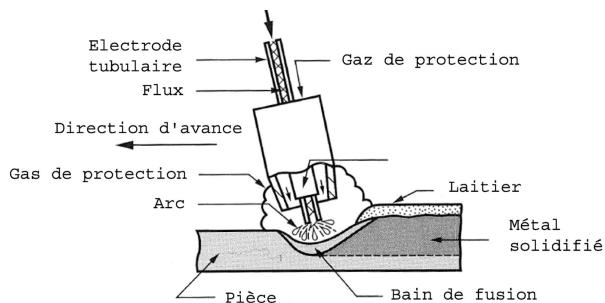


Figure 4.5: Soudage à l'arc avec fil fourré de flux

Ici, le flux est dans l'électrode et le gaz de protection est optionnel.

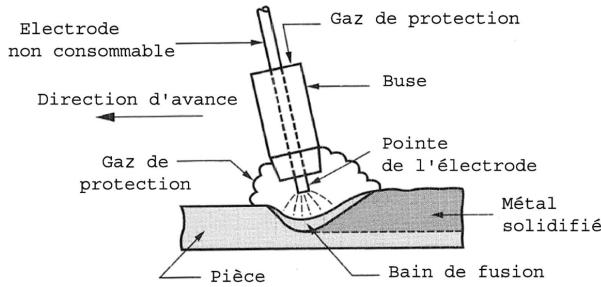


Figure 4.7: Soudage à l'arc sous protection gazeuse avec électrode réfractaire en tungstène

Arc submergé

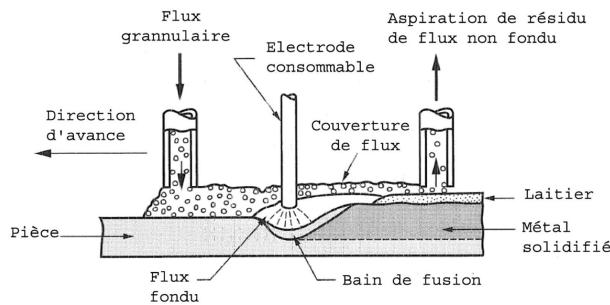


Figure 4.6: Soudage à l'arc submergé

Dans ce type de soudage, le fil se déroule automatiquement et il n'y a besoin daucune protection visuelle puisque l'arc est caché. Il faut cependant éliminer la croûte de laitier solidifié après la soudure.

Electrode réfractaire en tungstène

Dans ce type de soudage, l'électrode est non-consommable, la protection gazeuse en est indépendante, et il n'y a pas de masse d'apport.

Soudage au plasma

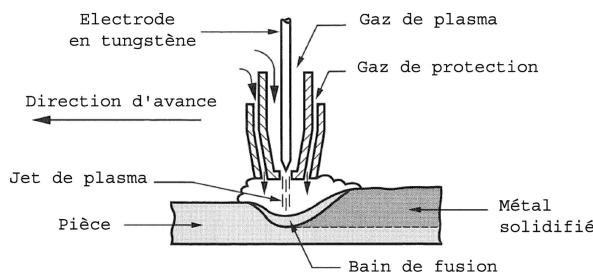


Figure 4.8: Soudage au plasma

Dans ce type de soudage, le gaz est ionisé pour créer du plasma. La température du gaz est d'environ 28000°C, l'intensité de puissance est donc élevée/

4.2.4 Soudage par résistance

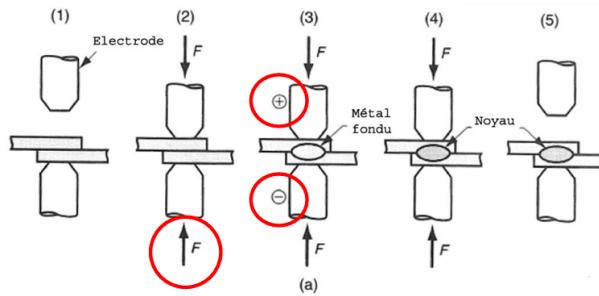


Figure 4.9: Soudage par résistance

En soudage par résistance, il y a une fusion à l'interface et c'est le noyau qui est soudé. Ce genre de soudage peut être facilement automatisé et donc organisé à des cadences élevées. De plus, aucun gaz de protection ou flux n'est nécessaire, bien que les électrodes non consommables s'usent. Cependant, les équipements sont relativement coûteux.

4.2.5 Soudage par fusion à haute intensité de puissance

Par faisceau d'électrons

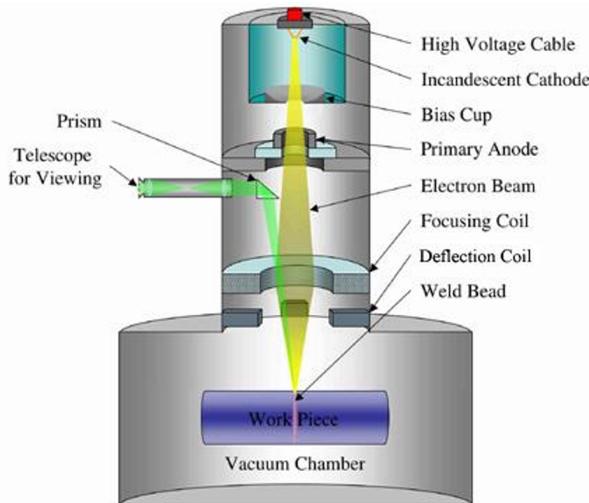


Figure 4.10: Soudage par faisceau d'électrons

La source d'énergie est le faisceau d'électrons finement focalisé et de haute énergie. Ce type de soudage a un excellent rapport de pénétration.

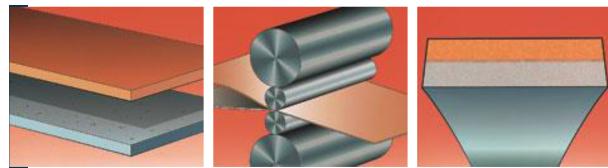


Figure 4.12: Enter Caption

Soudage laser

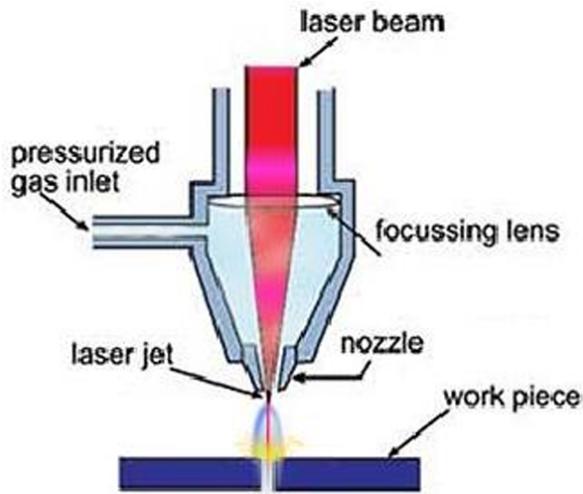


Figure 4.11: Soudage laser

Ici, la source d'énergie est le faisceau laser focalisé. Le rapport de pénétration est bon.

4.2.6 Soudage à l'état solide

Co-laminage

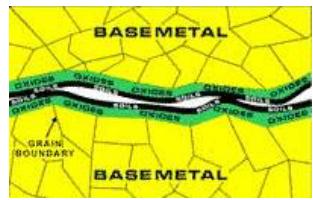
Le colaminage est un procédé de soudure deux plaques de métal par application de pression. Il s'agit simplement de laminage (voir ??) avec deux plaques plutôt qu'une, dans le but de les souder.

Soudage par ultrasons

Le soudage par ultrasons consiste à faire traverser les deux couches de métal par des ultrasons afin de casser la couche d'oxyde de surface. Les deux plaques sont en même temps compressées afin de les souder avec un minimum d'impuretés d'oxydes. Cette méthode permet de souder des matériaux ayant une grande différence de température de fusion, car il y a peu d'échauffement.

Soudage par explosion

Les deux plaques métalliques à souder sont posées l'une sur l'autre, avec un écart de 2-3cm. Elles sont ensuite recouvertes de poudre explosive, dont la composition varie selon les métaux à souder. Lors de l'explosion de la poudre, l'air entre les deux plaques est éjecté à forte vitesse de l'espace entre les plaques, ce qui les rapproche brusquement.



(a) Avant



(b) Après

La chaleur générée par l'explosion permet ensuite la soudure. Le mouvement rapide de l'air permet de nettoyer la surface de contact, de supprimer toutes les éventuelles impuretés.

Soudage par diffusion

slide 34

Forgeage

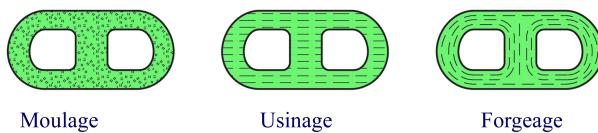
Le forgeage est caractérisé par une déformation (visco-)plastique à l'état solide. L'amplitude de déformation est limitée à froid, c'est pourquoi on utilise des métaux "malléables", i.e. peu résistants et ductiles, ainsi que du préchauffage¹. Les pièces produits par forgeage sont très résistantes et anisotropes.

5.1 Fibrage

Le fibrage est l'allongement des fibres dans le métal lors du forgeage. La déformation à chaud de la pièce de métal aligne les fibres avec l'écoulement de matière; elle est donc plus résistante dans la direction de l'écoulement.

5.2 Ecrasement

Le forgeage se fait toujours par écrasement, jamais par contraintes de traction. On utilise par exemple des marteaux ou des presses, mais jamais des pinces. De plus, l'écrasement se fait souvent de manière incrémentale :



¹Moins intéressant, car implique de l'oxydation, plus de rugosité et une usure plus forte des outils

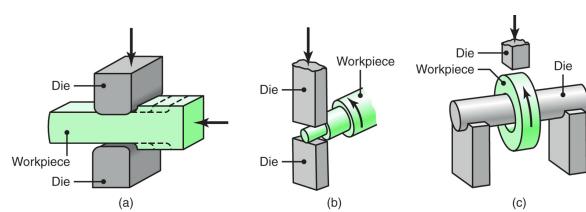


Figure 5.1: Forgeage libre incrémental

Moulage des métaux

Le moulage consiste à porter un métal à haute température pour le faire fondre, et à l'insérer dans un moule et le faire refroidir.

La majorité du temps, le moule est constitué de sable, car il est très résistant à la chaleur, facilement modelable et de faible coût.

6.1 Avantages

- Adapté aux géométries complexes;
- Rapide, par rapport à l'usinage;
- Peu de pertes de matière première;
- Petites et/ou grandes séries et tailles de pièces;
- Coûts énergétique et économique par rapport à l'usinage : moins de main d'oeuvre qualifiée, mais plus de coût énergétique;
- Tenue mécanique (solidité,...), c'est l'argument principal du moulage.

La tenue mécanique est liée à une microstructure fine (i.e. grains de petite taille) et homogène. Il est nécessaire de limiter les défauts afin qu'elle soit de bonne qualité. Il faut également prendre en compte les contraintes résiduelles, i.e. à l'intérieur de la pièce lorsqu'il n'y a pas de sollicitation externe, qui peuvent être bénéfiques ou pas selon les besoins.

6.1.1 Microstructure de solidification

La microstructure de solidification commence par la germination. Il s'agit de la création de germes dans le métal liquide, suivie de la croissance de ces germes en polycristaux, formant le réseau cristallin lié à la solidification. Après croissance, les germes forment des agrégats polycristaux, i.e. des grains ayant une orientation différente dans le réseau.

La vitesse de refroidissement influence fortement la microstructure. En effet, en cas de vitesse de refroidissement élevée (en cas de trempe,...), les cristaux sont beaucoup plus petits, car on a plus de cristaux de germination.

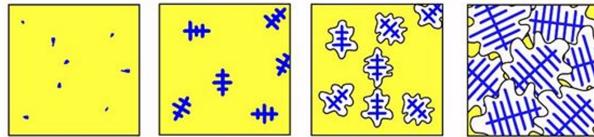


Figure 6.1: Germination et polycristaux

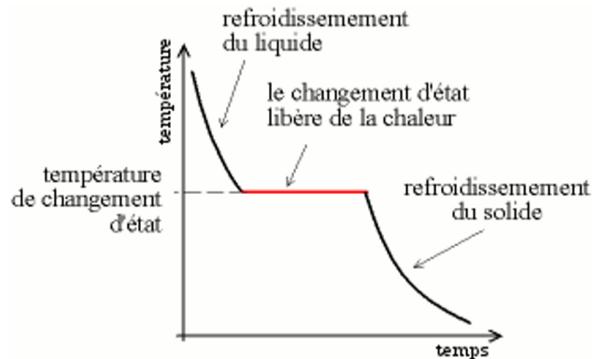


Figure 6.2: Front de solidification

6.1.2 Progression du front de solidification

La progression du front de solidification est ralentie par la chaleur latente de solidification.

- Remarque : il faut bien différencier les composites des alliages : les alliages sont des mélanges au niveau cristallin, tandis que les composites sont des mélanges à plus haut niveau de structure.

6.2 Solidification d'un alliage

Au-dessus de la ligne de liquidus, le métal est complètement liquide. Il est solide en-dessous du solidus, et sous forme pâteuse entre les deux. Les points de contact des deux courbes sont les températures de fusion des deux métaux de l'alliage. Due aux différences de températures de fusion, les premiers germes sont enrichis en élément ayant la température de fusion la plus haute, et inversement. L'objet final sera donc moins homogène, et cela diminue la tenue mécanique. Une solution est de rechauffer le solide pour homogénéiser la structure. On appelle cela un recuit d'homogénéisation.

6.2.1 Composition eutectique

Une composition est dite eutectique lorsque les courbes de solidus et liquidus sont confondues (e.g. fonte).

6.2.2 Calcul du délai de solidification

Le calcul du délai de solidification permet également de déterminer la longueur des dendrite, i.e. la longueur des éléments de solidification partant des parois. On sait que

$$Q = V \hat{\rho} H_m \quad Q = A \int_0^{t_s} q(t) dt \quad (6.1)$$

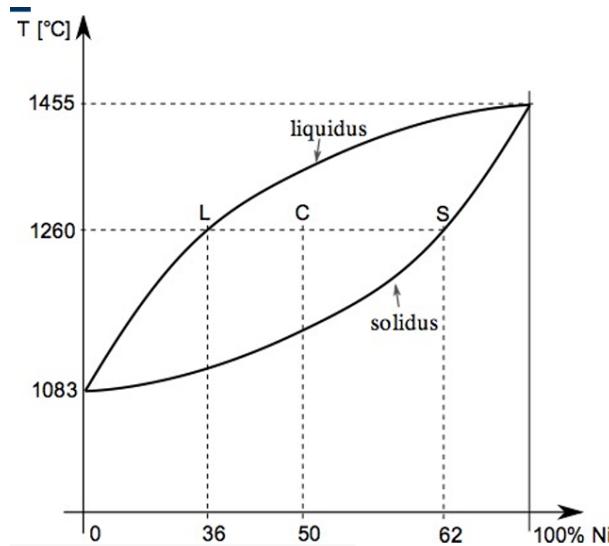


Figure 6.3: Solidification d'un alliage

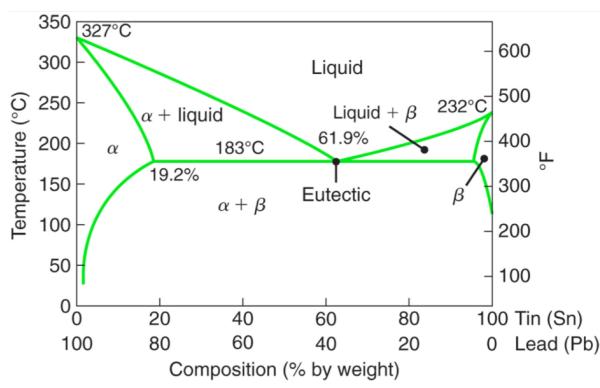


Figure 6.4: Composition eutectique

où Q est la chaleur, V le volume, $\hat{\rho}$ la densité du métal liquide, H_m la chaleur latente, A la surface du moule et $q(t)$ le flux de chaleur.

→ Remarque : on néglige ici la courbure du moule pour effectuer l'intégrale en une seule dimension.

La solution de l'équation de la chaleur dans notre cas est la suivante :

$$T(x, t) = T_0 + (T_M - T_0) \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\zeta/2}^0 e^{-s^2} ds \right) \quad \zeta = x / \sqrt{at} \quad (6.2)$$

Le flux de chaleur correspondant est donc

$$q(x, t) = (T_m - T_0) \sqrt{\frac{\rho c k}{\pi t}} \exp - \frac{x^2}{4at} \quad (6.3)$$

On trouve finalement le délai de solidification :

$$t_s \approx \frac{\pi}{4} \left(\frac{\hat{\rho} H_m}{T_m - T_0} \right)^2 \frac{1}{\rho c k} \left(\frac{V}{A} \right)^2 \quad (6.4)$$

Les paramètres avec $\hat{\cdot}$ font référence aux constantes du métal liquide, tandis que ceux sans font référence aux propriétés du moule en sable.

Le temps de solidification en un point du métal est proportionnel au rayon de la plus grande sphère qui rentre dans le moule centrée en ce point. La formule du délai de solidification pour déterminer le rapport entre les temps de solidification de différents points du solide, et on peut parfois modifier la géométrie de la pièce pour s'y accorder.

6.2.3 Retrait de solidification

Le retrait de solidification est la déformation du matériau lors de son refroidissement. Les points chauds se refroidissent plus lentement, la contraction du matériau lors de leur solidification peut entraîner une déformation des parties de la pièce déjà solidifiées. Il apparaît donc des contraintes résiduelles dans la pièce finale.

On définit une crique comme étant une fissure de solidification ayant lieu lorsque le retrait de solidification est empêché. Prenons comme exemple une poutre métallique.

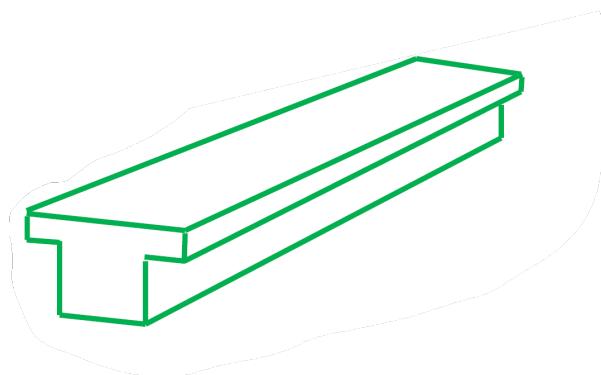


Figure 6.5: Illustration du retrait de solidification

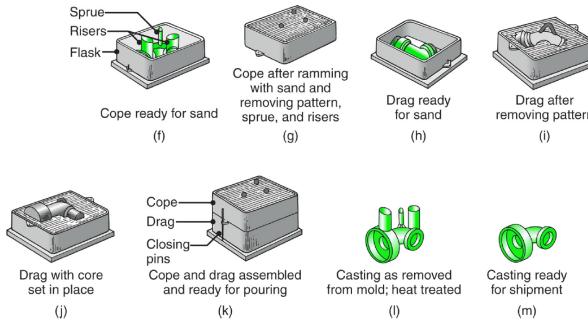


Figure 6.6: Fabrication d'un moule en sable

Les points chauds forment une droite dans l'axe de la poutre, tels qu'ils sont le centre du plus grand cercle entrant dans une section T de la poutre. Ils sont donc contenus dans la "base" de la poutre. Soit le repère tel que \hat{e}_z est aligné avec la plus grande dimension de la poutre.

Après refroidissement, il y a une contrainte résiduelle en \hat{e}_z impliquant le risque de fissure dans le plan de normale \hat{e}_z . En effet, la partie inférieure se contracte lors du refroidissement, et doit donc entraîner la partie supérieure qui s'est solidifiée plus tôt. Avant d'avoir une crique, il va y avoir du gauchissement lors de la sortie du moule : les contraintes résiduelles sont fortes, mais pas suffisamment pour entraîner des fissures.

Afin d'éviter ce phénomène de gauchissement, on ajoute une veine de métal liquide, appelée masselotte, qui fournit du métal liquide dans le moule lorsque le métal déjà présent se contracte pendant son refroidissement. Cela contre les effets néfastes de la contraction.

6.2.4 Défauts des pièces moulées

Voir syllabus

6.3 Fabrication des moules

→ Remarque : Lorsqu'une pièce est creuse, on utilise des noyaux fixés à l'intérieur du moule.

6.4 Modèle perdu

Le moulage à modèle perdu est une technique utilisée pour les pièces nécessitant beaucoup d'exemplaires et de faible volume. On crée d'abord un modèle en cire que l'on recouvre de céramique. Cette céramique sera le moule final. Lors de la cuisson du moule, ou lors du coulage du métal fondu, la cire contenue dans la céramique est évacuée. Lorsque le métal est finalement solidifié, le moule en céramique est cassé pour sortir les pièces finales.

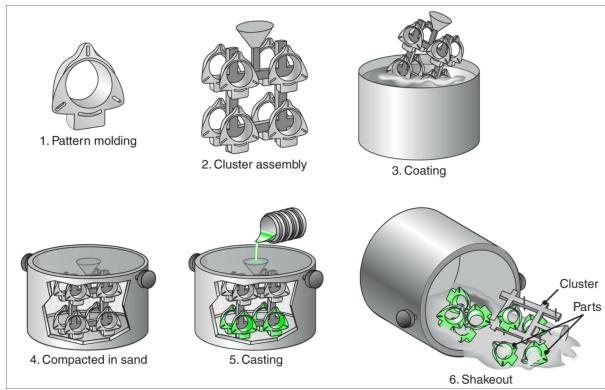


Figure 6.7: Moulage à modèle perdu

6.5 Moule à usage multiple

Les moules à usage multiple sont généralement fait à partir d'acier ou d'un matériau réfractaire, i.e. à très haute température de fusion.

- Généralement utilisés pour les très grandes séries de pièces;
- La géométrie doit permettre le démoulage;
- Le noyau doit se désagréger;
- Une pression additionnelle est parfois nécessaire pour augmenter la cadence de production ou améliorer le fini de surface.

6.6 Moulage par injection

Le moulage par injection est principalement utilisé pour les polymères.

Ejector die



6.7 Moulage par centrifugation

La centrifugation sert à s'assurer que les impuretés (moins denses que le polymère) restent proches du centre de rotation et peuvent être évacuées.

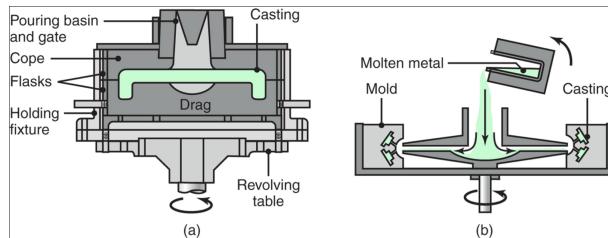


Figure 6.9: Moulage par centrifugation

Moulage et extrusion des polymères

7.1 Extrudeuse pour polymères

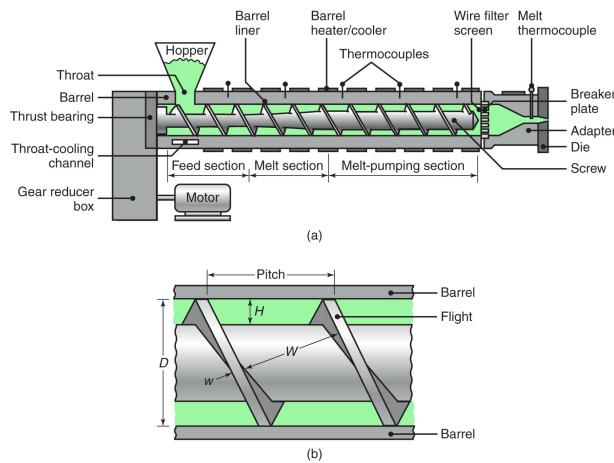


Figure 7.1: Extrudeuse pour polymères

La partie "Hopper" s'appelle la trémille d'alimentation. Elle contient le polymère sous forme de granules, qui sont fondues dans la suite de l'extrudeuse pour être ensuite utilisées sous forme de pâte visqueuse mise sous pression. L'écoulement du polymère fondu (fluide) est un écoulement de Poiseuille. Ce qui le fait avancer est donc le frottement sur le cylindre extérieur. Par la mécanique des fluides, on a l'équation suivante :

$$\dot{Q} = \frac{\pi R^4}{\eta L} \Delta p \quad (7.1)$$

avec R le rayon du conduit hélicoïdal et L sa longueur. Par calcul d'intégrale, on a également la formule suivante :

$$\dot{Q} = \int_{R_{vis}}^{R_{cyl}} v_z 2\pi r dr \quad (7.2)$$

Elle n'est correcte que si on suppose l'écoulement laminaire (sans frottement) et si le gradient de pression est constant.

7.1.1 Point de fonctionnement

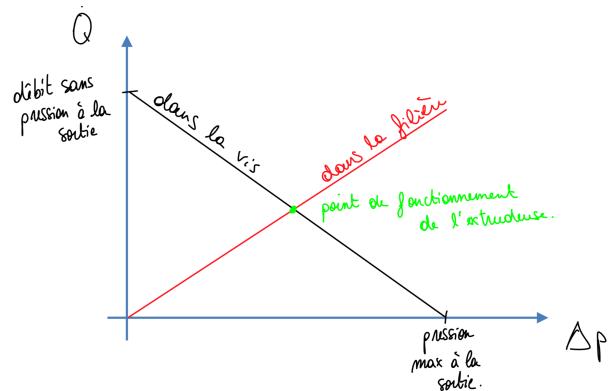


Figure 7.2: Point de fonctionnement

Le point de fonctionnement d'une extrudeuse est la valeur de débit et de variation de pression tels que le débit dans la filière est égal à celui dans la vis.

Extrusion et moulage des polymères

A FAIRE SUR BASE DU SYLLABUS

8.1 Polymérisation

Un polymère est un composé constitué de monomères (simples ou complexes), qui sont responsables des propriétés du matériau.

- La polymérisation est l'étape durant laquelle sont déterminées la longueur, la ramification et la composition de chaînes du polymères.
- Les polymères sont mélangés (avec des additifs) dans l'extrudeuse. Les additifs permettent de lutter contre les uv's et ont parfois une fonction de remplissage ou de renfort.
- Les polymères sont fondus dans l'extrudeuse.
- Etape de solidification.