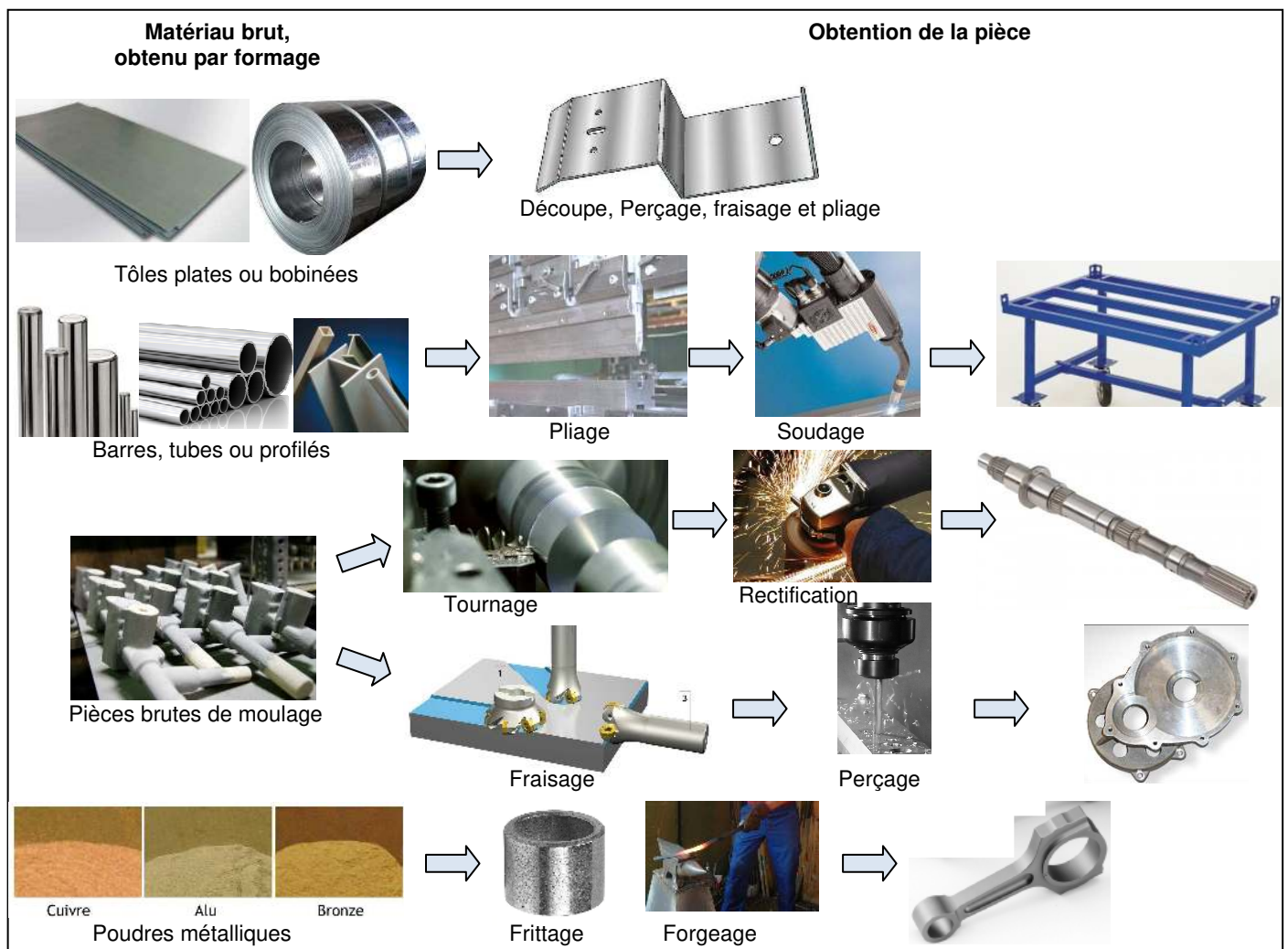


FABRICATION MÉCANIQUE

LES DIFFERENTS PROCEDES D'OBTENTION DES PIECES DONT L'USINAGE EN DETAILS

(COURS)



II Obtention par fusion (fonderie, ou moulage)

2

VI Obtention par prototypage rapide

15

VII Obtention par enlèvement de matière (usinage)

16

FABRICATION MÉCANIQUE

LES DIFFERENTS PROCEDES D'OBTENTION DES PIECES DONT L'USINAGE

Table des matières

I	Introduction	1
II	Obtention par fusion (fonderie, ou moulage)	2
2.1	Moulage en sable	2
2.2	Moulage métallique (ou moulage permanent)	3
III	Obtention par déformation	4
3.1	Extrusion (ou filage)	4
3.2	Laminage	4
3.3	Forgeage libre	5
3.4	Estampage et matriçage	5
3.5	Pliage	6
3.6	Cintrage	6
3.7	Profilage à froid	6
3.8	Emboutissage	7
IV	Frittage	8
V	Obtention par soudage	9
5.1	Généralités sur le soudage	9
5.2	Soudage à l'arc électrique (électrode enrobée, MIG-MAG, TIG...)	11
5.3	Brasage (soudage à la flamme)	13
5.4	Soudage par friction	13
5.5	Soudage par résistance électrique	14
VI	Obtention par prototypage rapide	15
6.1	UTGV (Usinage Grande Vitesse)	
6.2	Stéréolithographie	
6.3	Impression 3D (dépôt de fil fondu)	
VII	Obtention par enlèvement de matière (usinage)	16
7.1	Tournage	16
7.2	Fraisage	19
7.3	Perçage	23
7.4	Autres opérations d'usinage (brochage, rectification, électroérosion, découpage...)	24
7.5	Exemple d'application : gammes d'usinage	26

I) INTRODUCTION

Obtenir une pièce nécessite parfois l'utilisation successive de différents procédés de fabrication : obtention de la pièce brute, puis obtention de la pièce finale (par enlèvement de matière).

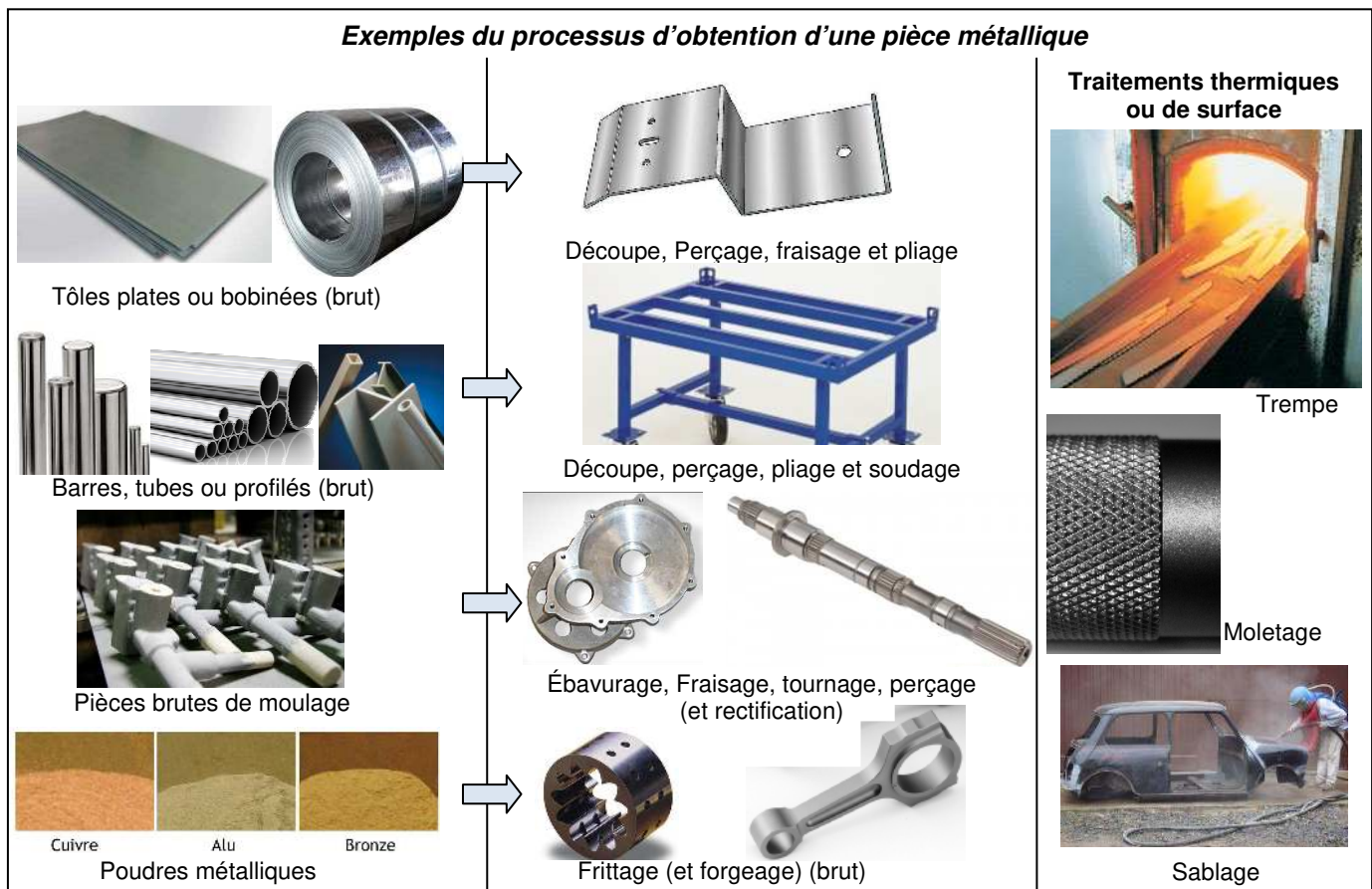
De plus, les pièces obtenues peuvent subir des traitements thermiques ou des traitements de surface afin de modifier leurs propriétés.

♦ Les principaux traitements thermiques :

- **Trempe** : consiste à chauffer un matériau jusqu'à transformation de sa structure interne puis de le refroidir suffisamment rapidement pour « figer » plus ou moins cette phase. La principale conséquence d'une trempe est le durcissement (superficiel) du matériau.
- **Revenu** (d'après trempe) : consiste à chauffer un matériau en dessous de la température de trempe, afin de supprimer les contraintes internes dues à la trempe. Ceci permet au matériau trempé d'être moins fragile, plus résistant à la fissuration.
- **Recuit** : consiste à chauffer un matériau à haute température puis de le refroidir très lentement. Ceci permet de supprimer les effets d'une trempe non désirée.

♦ Les principaux traitements de surface :

- **Sablage** : projection de sable afin de décaper ou d'écrouir la surface.
- **Moletage** : déformation superficielle en forme de stries afin de faciliter la prise en main.
- **Dépôts métalliques** : nickelage, cuivrage, cadmiage, galvanisation (inoxydables), chromage (aspect brillant ou anti-usure), étamage, argenture, dorure...
- **Diffusion chimique superficielle** : cémentation (carbone), nitruration (azote), boruration,... afin d'augmenter la dureté superficielle ; ou aluminisation afin de protéger contre l'oxydation.
- **Peinture** : sert à protéger (contre l'oxydation, la corrosion) et à améliorer l'aspect des pièces.



Le choix d'un procédé d'obtention dépend de nombreux facteurs, dont le matériau, les formes de la pièce (épaisseurs, angles...), les états de surface, la précision désirée, le coût.

Ce cours présente un descriptif succinct des principaux procédés d'obtention des pièces, avec une description plus détaillée par l'usinage (enlèvement de matière).

II) OBTENTION PAR FUSION (FONDERIE, OU MOULAGE)

Consiste à rendre liquide un matériau afin qu'il prenne la forme d'un moule.

Avantages : - Peu de gaspillage de matière première ;
- Permet d'obtenir des formes pouvant être très complexes.

Inconvénients : - Nécessite un outillage important et coûteux (surtout pour les moules métalliques) ;
- La pièce à obtenir doit posséder des épaisseurs approximativement constantes ou variant faiblement, ne pas posséder d'arêtes vives (congés et arrondis vivement conseillés), et avoir des surfaces de dépouilles ;
- L'état de surface (rugosité) obtenu est moyen ;
- La précision obtenue est moyenne (retraits de matière et déformation en refroidissant) ;
- Ces deux derniers inconvénients obligent souvent à ajouter des usinages au niveau des surfaces fonctionnelles de la pièce ;

Il existe principalement deux techniques de moulage : en sable ou métallique.

II.1) Moulage en sable

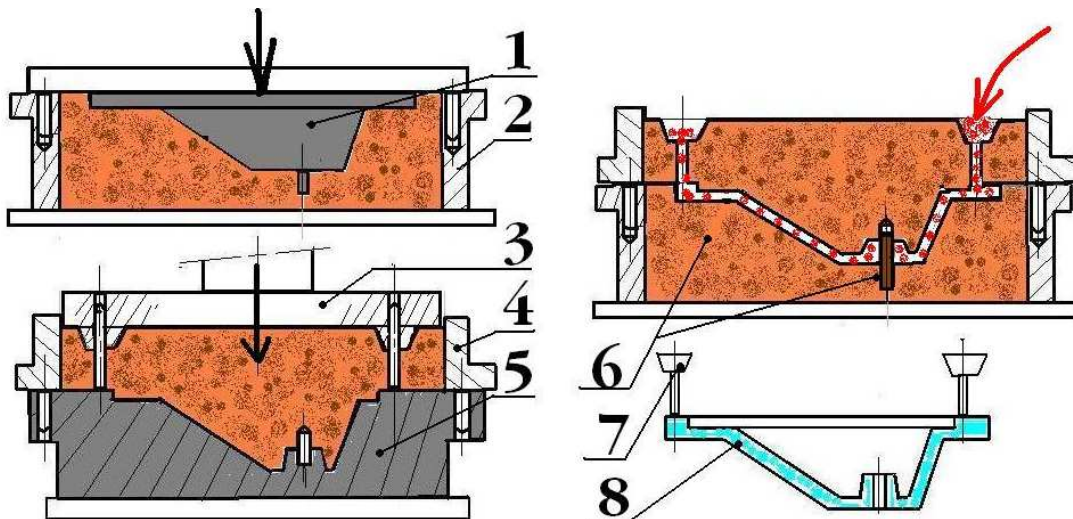
Le démoulage s'effectue par destruction du moule. On doit donc fabriquer autant de moules que de pièces à fabriquer. Il existe plusieurs techniques d'obtention du moule en sable (sable humide ; durcissement thermique, chimique ou physique). Le moule en sable est obtenu à partir d'un modèle permanent (généralement en bois, en résine ou en métal) ou unique (en cire ou en polystyrène) dans le cas du moulage à modèle perdu.

L'intérêt de cette technique est que le sable est réfractaire (il résiste à la chaleur), et que le moule ne coûte pas cher à fabriquer. Par contre, l'état de surface ($Ra \approx 3,2 \mu m$) et la précision obtenus sont assez mauvais.

Cette technique convient bien pour des petites séries.

Exemple d'obtention d'une pièce par moulage en sable, à joint horizontal

- Le châssis inférieur (2) est rempli de sable, puis compressé par la plaque modèle face externe (1) ;
- Le châssis supérieur (4), posé sur la plaque modèle face interne (5), est rempli de sable pressé par la plaque (3) ;
- La plaque (3) est retirée, un noyau (6') est déposé dans la partie inférieure du moule (6), puis le châssis (4) est positionné sur le châssis (2), centré par les goujons. Le moule ainsi formé peut recevoir le métal en fusion.
- Après décochage, la pièce (8) est débarrassée des masselottes (7) et peut rejoindre le parachèvement.



II.2) Moulage métallique (ou moulage permanent)

Le moule métallique est réutilisable plusieurs fois. Le démoulage est rendu possible par la différence de matière entre le moule et le métal coulé. Le moule subit toujours un poteyage avant introduction du métal en fusion (il est enduit d'un liquide protecteur qui facilitera son démoulage).

Le moulage métallique est classé en trois catégories selon la pression d'introduction du matériau liquide dans le moule :

♦ Moulage par gravité

La pression est nulle, le matériau liquide est introduit par le haut et remplit le moule par gravité.

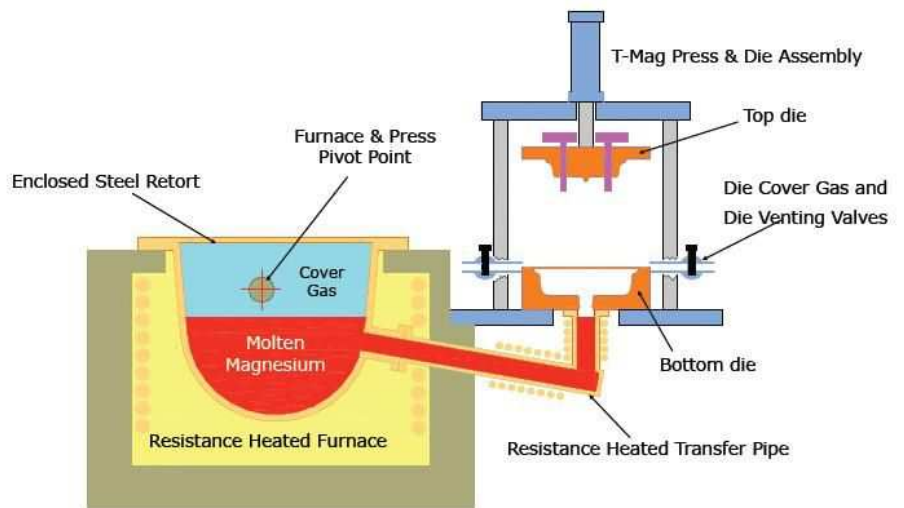
L'état de surface ($R_a \approx 1,6 \mu m$) et la précision obtenus sont moyens. Cette technique, dont l'outillage est moins coûteux que les suivantes, est adaptée pour les petites séries.



♦ Moulage à basse pression

La pression est faible (0,2 à 2 bars), le matériau liquide est introduit par le bas. Le procédé est semi-automatique, et souvent considéré comme une amélioration du moulage par gravité. Le coût de l'outillage est plus élevé, les cadences sont plus importantes, et l'état de surface et la précision sont meilleurs.

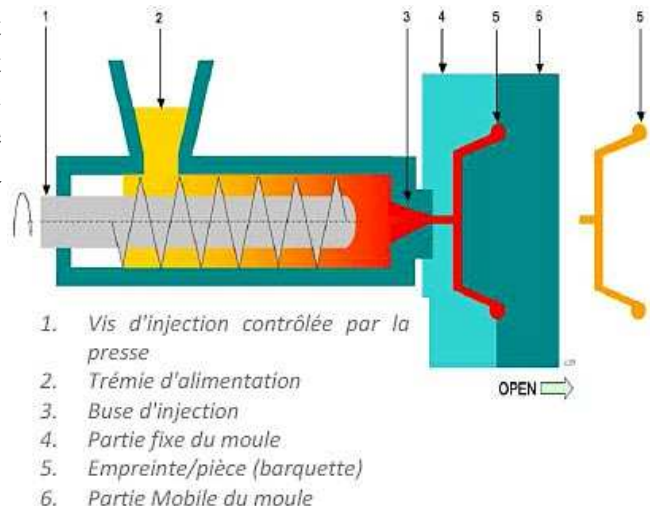
Cette technique est adaptée pour les petites ou grandes séries.



♦ Moulage sous pression (ou moulage par injection)

La pression d'injection du matériau liquide est importante (entre 50 et 200 bars). Ce procédé est souvent automatisé et permet de grandes cadences de production (jusqu'à 500 pièces / heure). Le coût de l'outillage est très élevé. L'état de surface et la précision des pièces obtenues sont bons.

Cette technique est adaptée pour les très grandes séries.



♦ Moulage par centrifugation

Le moule est entraîné en rotation rapide. Le matériau liquide versé à l'intérieur se colle à la paroi par la force centrifuge et se solidifie.

♦ Moulage par insert (ou surmoulage)

Cette technique consiste à mouler un matériau (souvent en plastique) par-dessus une pièce, appelée insert (souvent en métal), insérée dans le moule. Il faut pour cela que le matériau à surmouler possède une température de fusion plus faible que le matériau de l'insert.

III) OBTENTION PAR DEFORMATION

Consiste à déformer plastiquement le matériau jusqu'à obtention de la forme désirée. Une déformation plastique est une déformation permanente du matériau.

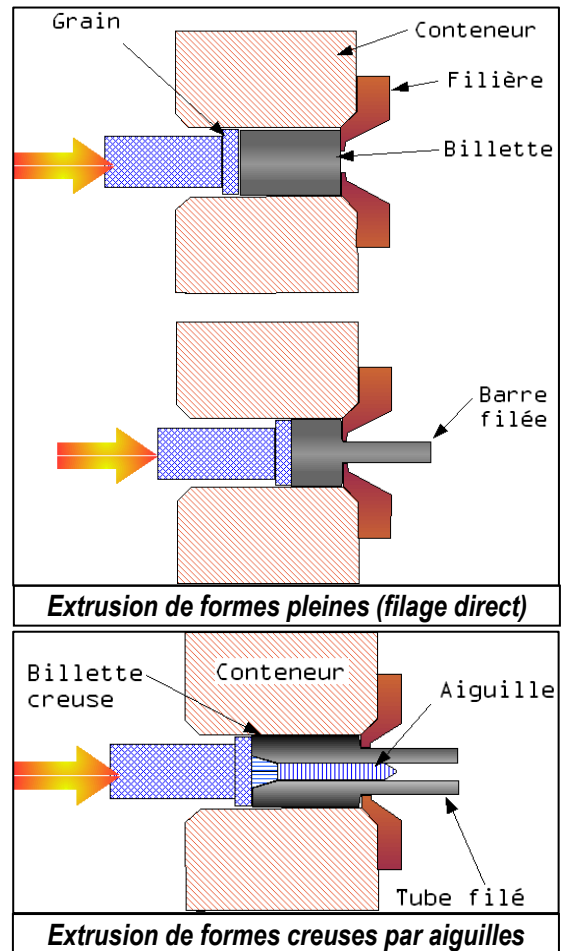
III.1) Extrusion (ou filage)

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

Un matériau chauffé et compressé est contraint de traverser une filière ayant la section de la pièce à obtenir.

Cette technique permet d'obtenir en continu un produit pouvant être très long (barre, tube, profilé, tôle...).

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



III.2) Laminage

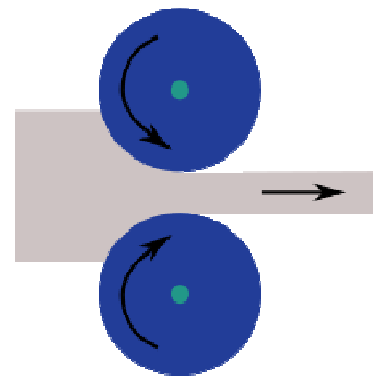
Principe :

Le matériau est déformé par compression continue au passage entre deux cylindres tournant dans des sens opposés appelés laminoirs.

Le laminage peut s'effectuer à froid ou à chaud.

Les laminoirs sont souvent utilisés les uns à la suite des autres afin de réduire progressivement l'épaisseur des profilés.

La plupart des tôles plates brutes sont obtenues par laminage.



III.3) Forgeage libre

Le forgeage est l'ensemble des techniques permettant d'obtenir une pièce mécanique en appliquant une force importante sur un matériau, à froid ou à chaud, afin de le contraindre à épouser la forme voulue.

Principe du forgeage libre :

Sous l'action d'une forte pression ou d'une succession de chocs, un bloc de métal chauffé (800 à 1200 °C) se déforme plastiquement vers les surfaces restées libres. Aucune matrice ne délimite la déformation du matériau, et la forme obtenue dépend fortement du savoir-faire de l'opérateur.

L'opération peut s'effectuer avec un outillage manuel ou à l'aide d'un marteau-pilon ou d'une presse hydraulique.

La forge libre permet d'obtenir des ébauches ou des pièces brutes, et n'est pas adapté au travail en série.

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

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



Forgeage libre au marteau manuel



Forgeage libre au marteau-pilon

III.4) Estampage et matriçage

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

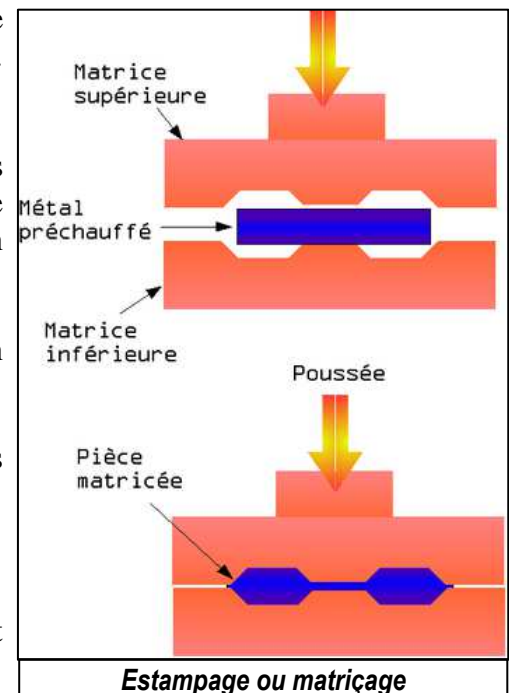
Principe :

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

L'estampage et le matriçage sont adaptés à une production en série.

Avantages : - Les mêmes que pour le forgeage libre, avec plus de rapidité et une meilleure précision.

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



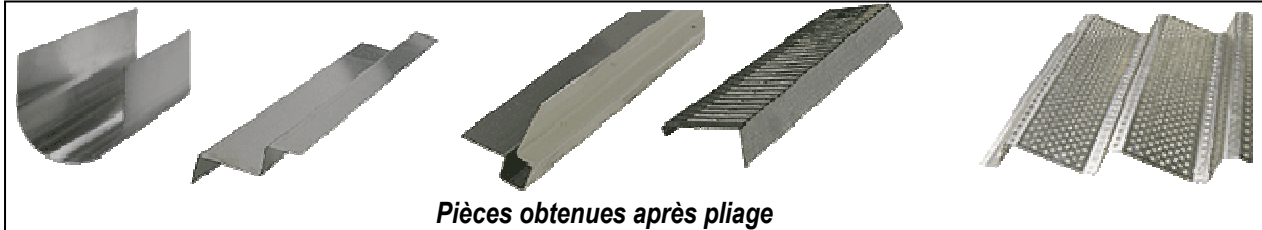
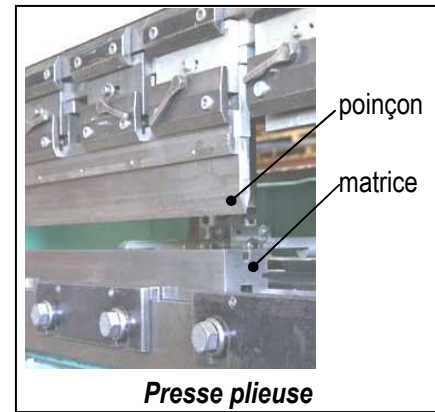
III.5) Pliage

Le pliage est une déformation permanente effectuée à froid sur une tôle plane.

La surface obtenue présente des plis rectilignes et est développable (c'est-à-dire applicable sur un plan par dépliage).

Avantages : - Outillage simple : presses hydrauliques avec différents poinçons et matrices.

Inconvénients : - Ressaut élastique résiduel difficile à prévoir ;
- Longueur de pliage limitée.



III.6) Cintrage

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

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



III.7) Profilage à froid

Principe :

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

Ce procédé est adapté aux grandes séries.



Avantages : - Longueur de profilé non limitée ;
- Procédé rapide et productif (possibilité de découpe en vol).

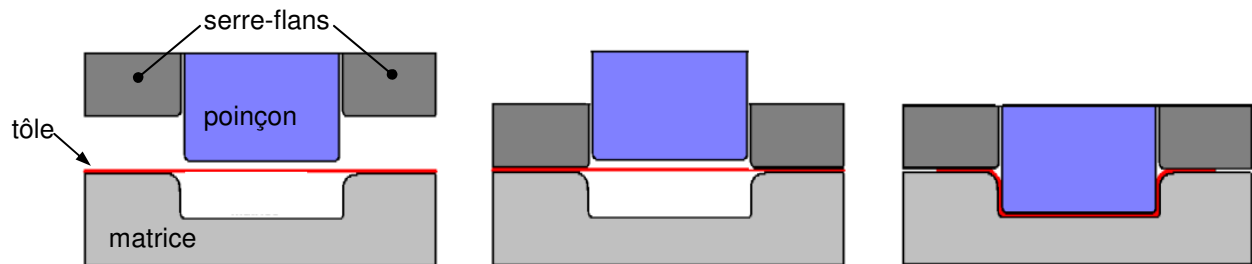
III.8) Emboutissage

Principe :

L'emboutissage est la déformation à froid d'une tôle plane en une forme creuse non développable (cf. pliage).

La tôle est déformée entre un poinçon mobile et une matrice fixe, le serre-flan évitant la formation des plis. L'opération ne doit pas entraîner de variation sensible de l'épaisseur de la tôle.

L'outillage est spécifique à la forme de la pièce à obtenir, et le seuil de rentabilité exige donc une production en série.



Principe de l'emboutissage

IV) FRITTAGE

Principe :

Une **poudre** (ou un mélange de poudre), généralement métallique, est **comprimée** dans un moule, puis **chauffée** dans un four à vide (ou à atmosphère contrôlée) à une température inférieure à la température de fusion du principal constituant.

Avantages : - Faible prix de revient pour de grandes séries de pièces complexes, précises et saines, qui peuvent être utilisées à l'état brut ;
- La porosité naturelle des pièces frittées permet la fabrication de filtres et de coussinets autolubrifiants ;
- Autorise l'obtention de nouveaux alliages (encore appelés dans ce cas « pseudo-alliages »).

Inconvénients : - La porosité naturelle peut devenir un inconvénient dans le cas de problèmes d'étanchéité par exemple ;
- Le principe de la compression conduit à des pièces non homogènes (porosité plus élevée au milieu), et dont les qualités de résistance mécanique sont faibles pour les métaux frittés.



Cuivre

Alu

Bronze

Laiton

Poudres métalliques**Coussinets frittés****Diverses pièces frittées**

V) OBTENTION PAR SOUDAGE

Nous avons déjà cité (dans le cours de technologie des liaisons) les principales solutions technologiques pour réaliser des liaisons complètes permanentes et non-démontables : soudage ; rivetage ; collage ; emmanchement ou fretage ; sertissage...

Nous ne développerons ici que le soudage, et seulement de façon partielle.

V.1) Généralités sur le soudage

On appelle soudage les procédés d'assemblages permanents et non-démontables qui créent une continuité de matière entre les pièces assemblées.

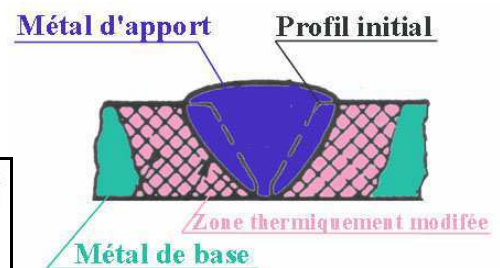
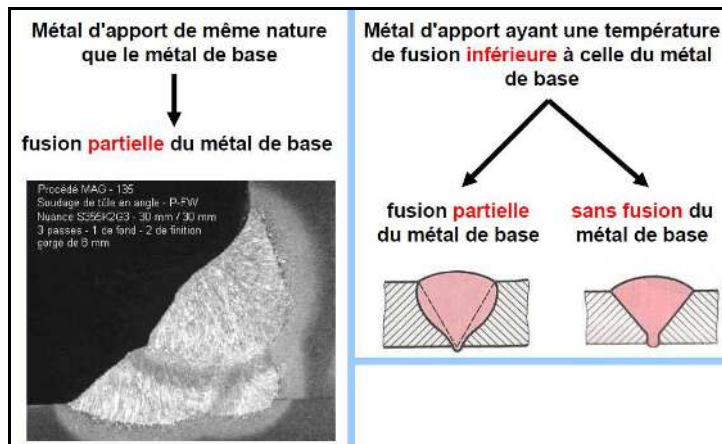
Exemples d'application :

- Mécano-soudage : assemblage de formes simples soudées entre elles pour réaliser une pièce de forme complexe ;
- Assemblage avec continuité électrique, ou étanchéité...

♦ Z.A.T (Zone Affectée Thermiquement) :

La continuité est obtenue par un échauffement de la zone interface entre les pièces avec ou sans apport de matière.

Classification des soudages en fonction de la Z.A.T :



La zone affectée thermiquement (Z.A.T) est modifiée dans sa structure cristalline suite au refroidissement de la pièce après le chauffage nécessaire au soudage.

Cette modification est voisine du processus observé lors d'un traitement thermique à l'air (la pièce est chauffée puis refroidit à l'air libre).

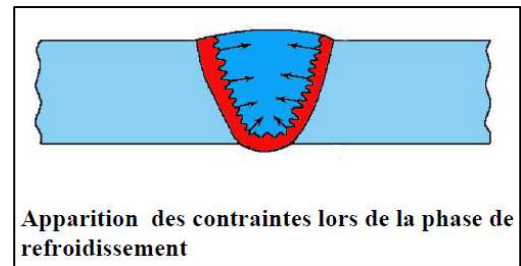
Les dimensions de la Z.A.T (le plus souvent indésirable) varient suivant le procédé de soudage utilisé. C'est ce qui fait l'intérêt ou les limites de certains procédés.

Le procédé idéal de soudage est celui qui fournit la plus grande puissance le plus localement possible (jusqu'à 108W/cm²).

♦ Défauts, contraintes et déformations :

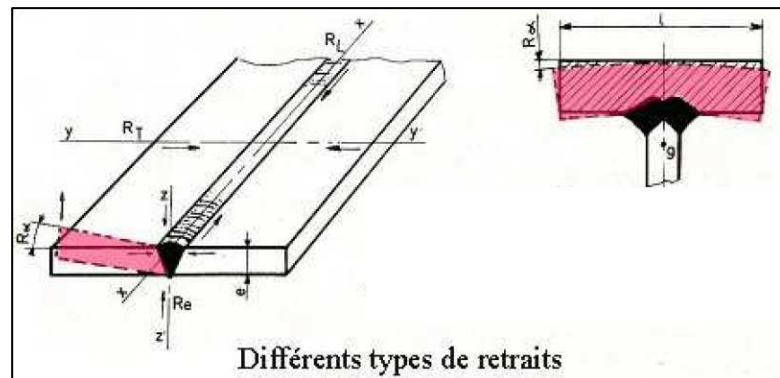
La Z.A.T est le siège de déformations et de contraintes internes résiduelles.

Contraintes et déformations sont liées : les déformations provoquent des contraintes et réciproquement de manière à atteindre un nouvel équilibre dans la pièce lors de son refroidissement.



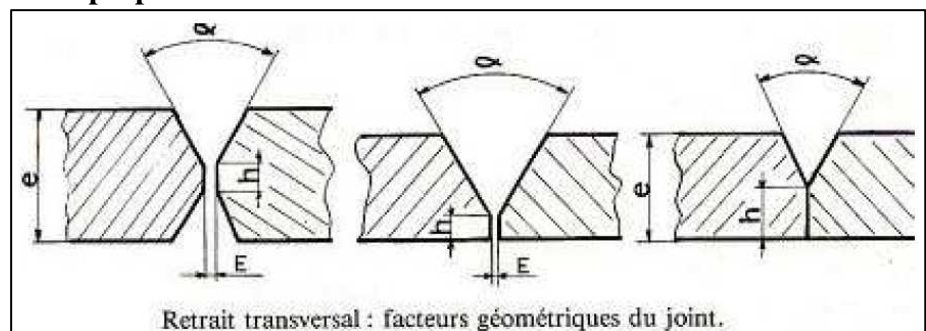
Les déformations dues au soudage s'appellent des **retraits**.

Ils impliquent que la forme de la pièce finie ne sera pas simplement la juxtaposition des formes des éléments assemblés.

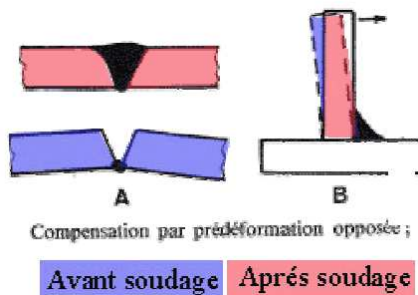


♦ Limitation des déformations et préparation des bords :

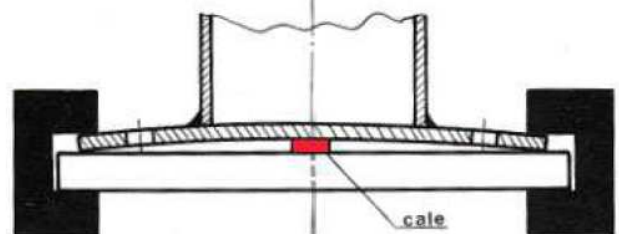
Pour des bords de tôles préparés avec des chanfreins, la forme de la préparation des bords aura une influence sur le retrait. De plus on limitera celui-ci s'il est possible de faire un cordon des deux cotés.



Lorsque la valeur de la déformation est prévisible, on peut pré-positionner les pièces à assembler par un point de soudage ou un montage spécifique avec une déformation inverse.



Le bridage avec pré-déformation élastique revient à créer une précontrainte inverse en plus de la déformation inverse ce qui permet de réduire déformations et contraintes résiduelles.



♦ Les différentes techniques de soudage :

Soudure avec métal d'apport :

- Arc électrique
 - électrode enrobée
 - MIG – MAG
 - TIG
 - sous flux solide
- Brasage

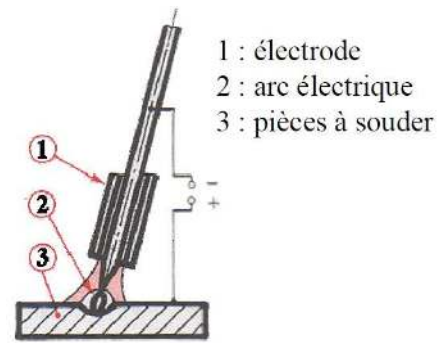
Soudure sans métal d'apport :

- Par friction
- Par résistance
- Laser
- Bombardement d'électrons
- Ultra-son

V.2) Soudage à l'arc électrique

Principe :

En soudage à l'arc, l'énergie calorifique est produite par un arc jaillissant entre une électrode et les pièces à assembler. Le métal d'apport est constitué de l'électrode elle-même ou par une baguette indépendante (dans ce cas, l'électrode est en matériau réfractaire)



Oxydation et protection :

A haute température, l'oxygène de l'air vient oxyder les matériaux soudés. Il faut donc protéger le cordon de soudure en l'isolant soit par un flux solide soit par une barrière gazeuse.

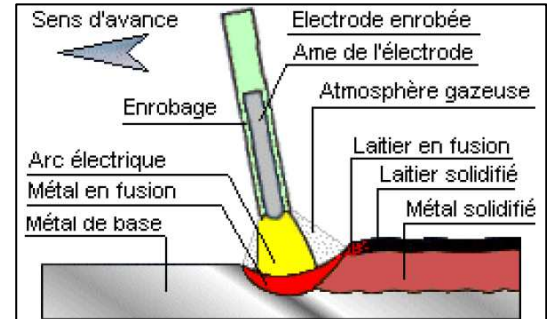
Modes de protection contre l'air ambiant :

	Electrode fusible c'est l'électrode qui compose le métal d'apport en fondant	Electrode réfractaire le métal est amené par une baguette différente de l'électrode
Protection par atmosphère (gaz)	MIG : metal inert gas MAG : metal actif gas	TIG : tungsten inert gas
Protection par flux solide	Electrode enrobée Sous flux solide	

◆ Soudage à l'électrode enrobée

L'arc jaillit entre une électrode fusible et les pièces à souder, assurant le transfert de chaleur et l'apport du métal. L'enrobage forme un laitier qui recouvre le cordon de soudure en fin d'opération et le protège ainsi de l'oxydation.

- Épaisseur de 2 à 20 mm ou plus ;
- Aciers, base nickel, mais ni le cuivre ni l'aluminium ;
- Procédé très courant mais en régression ;
- Coût d'un équipement : 300 à 3 000 € (coût 1) ;



◆ Soudage MIG - MAG

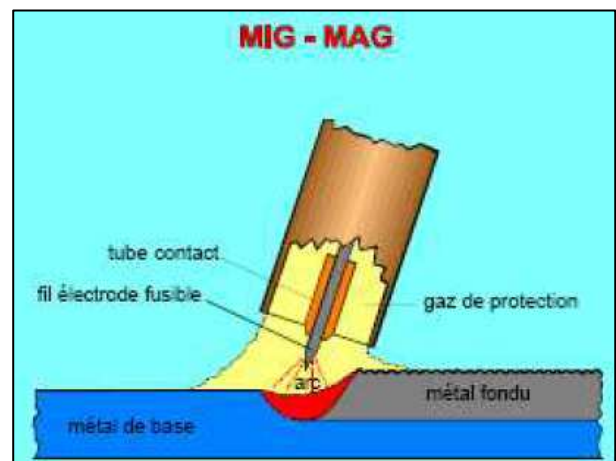
Un arc électrique est établi entre l'extrémité d'une électrode consommable et le substrat, sous protection gazeuse. L'électrode se présente sous la forme d'un fil massif ou fourré, de diamètre 0,6 à 1,6 mm ; le choix du gaz protecteur est déterminé par la nature du ou des matériaux à souder.

MIG : Metal Inert Gas

le gaz inerte protecteur est de l'argon

MAG : Metal Actif Gas

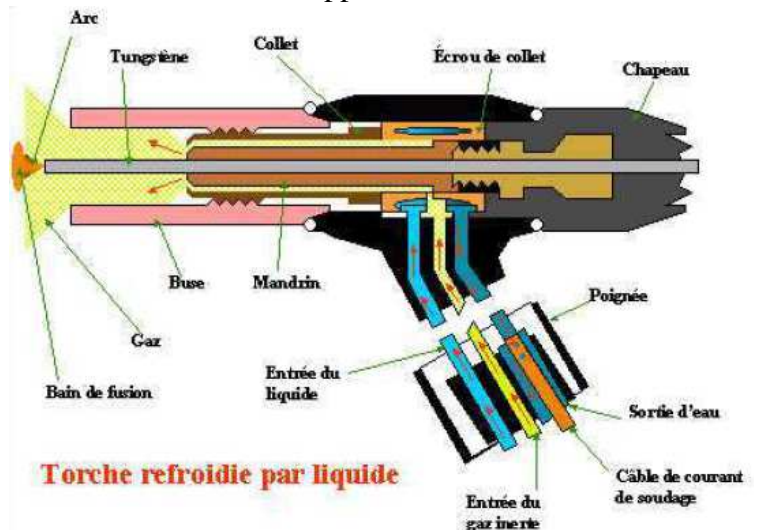
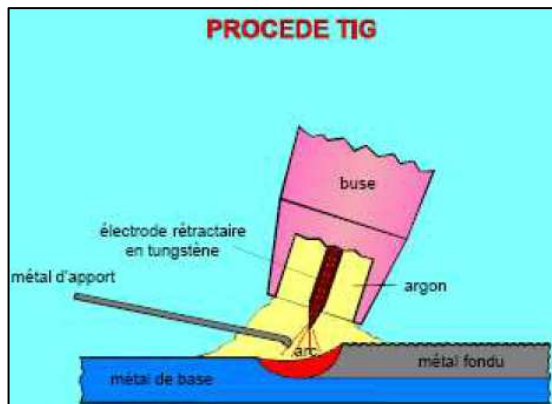
le gaz protecteur est du CO₂



- Épaisseur de 0,5 à 20 mm ou plus ;
- Toutes les bases cuivre ou aluminium en MIG / Tous les aciers en MAG ;
- Procédé très courant mais plus coûteux que l'électrode enrobée (coût relatif de 2 à 5).

♦ Soudage TIG

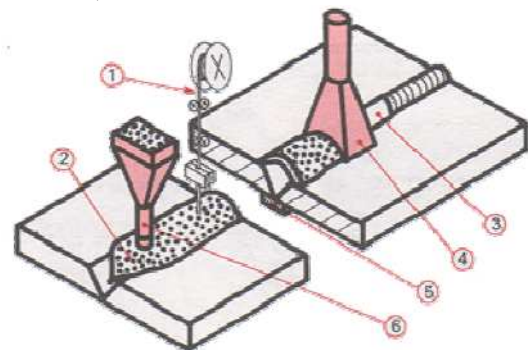
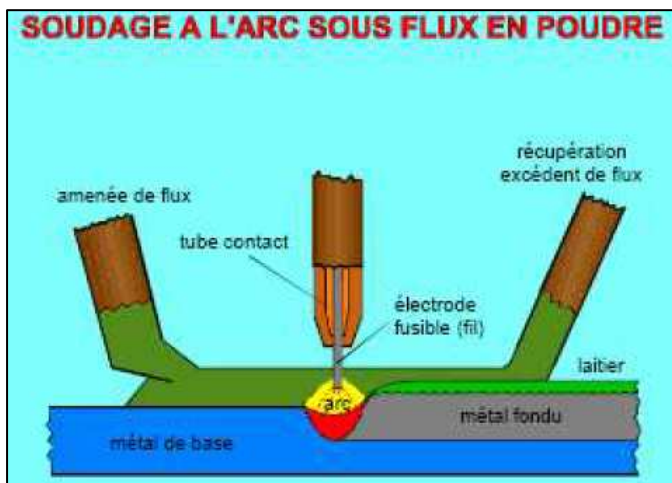
Un arc électrique est établi entre l'extrémité d'une électrode en tungstène et le substrat, sous protection gazeuse (argon) qui permet de protéger le cordon de soudure de l'oxydation. Les opérations d'assemblage peuvent être réalisées avec ou sans métal d'apport en manuel, ou dans le cadre d'un système automatisé.



- Utilisé pour les travaux soignés sous faible épaisseur – pour les épaisseurs supérieures à 5 mm il est utilisé conjointement à un autre procédé ;
- Aciers inoxydables, aluminium, cuivre, nickel, titane, zirconium, etc. ;
- Faible taux de dépôt – difficile à automatiser ;
- Coût relatif d'un équipement : de 3 à 10.

♦ Soudage à l'arc sous flux solide

Un arc électrique est établi entre une électrode continue et le substrat, sous une couche de flux qui permet de protéger ce dernier de l'oxydation. Généralement, le laitier se détache de lui-même et l'excédant de flux est récupéré pour être recyclé



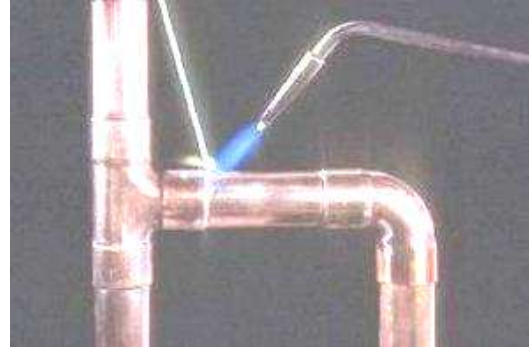
- | | |
|------------------|------------------|
| 1 : fil d'apport | 4 : récupération |
| 2 : flux solide | 5 : support |
| 3 : cordon | 6 : distribution |

- Utilisé pour le remplissage des chanfreins ou le travail à grande vitesse ;
- Dépose couramment plus de 15 kg à l'heure ;
- Très utilisé pour réaliser des revêtements déposés par soudage ;
- Coût relatif d'un équipement : de 50 à 100.

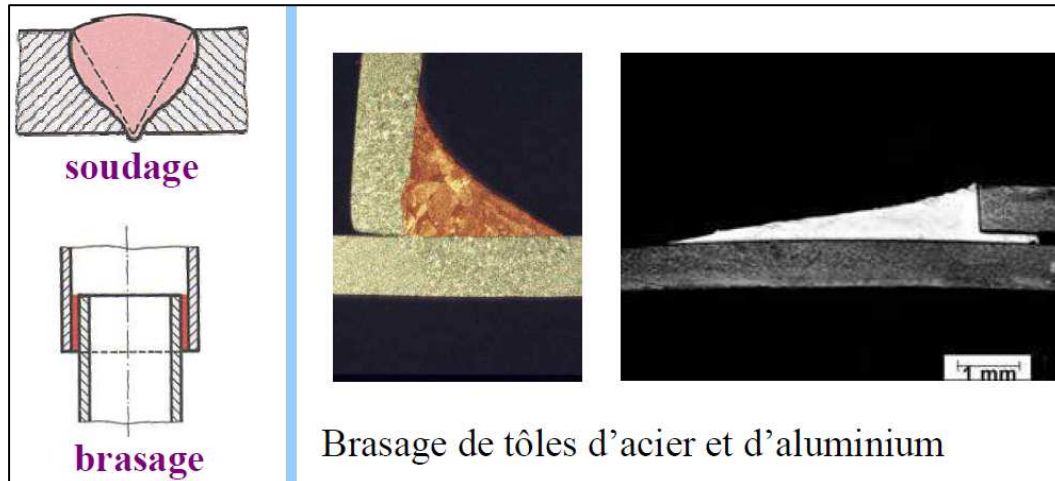
V.3) Brasage (soudage à la flamme)

Le brasage permet la jonction entre des alliages métalliques, à l'aide d'un métal d'apport dont le point de fusion est inférieur à celui (ou ceux) du (ou des) métal (aux) de base.

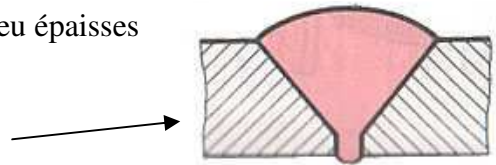
Le chauffage à une température suffisante pour fondre le métal d'apport provoque « l'accrochage » de celui-ci avec le métal de base grâce au phénomène de diffusion.



Les figures suivantes mettent en évidence la distinction entre le brasage et le soudage classique qui occasionne une forte dilution entre le métal de base et le métal d'apport.



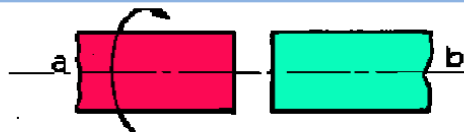
- Brasage : assemblage de chaudronnerie, tôles ou pièces peu épaisses
- Aciers, aluminium, cuivre, alliages....
- Coût relatif d'un équipement : 1 ;
- Pour les pièces épaisses, assemblage par soudo-brasage



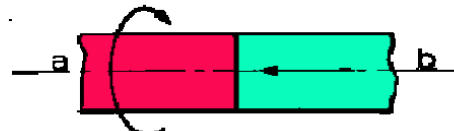
V.4) Soudage par friction

Principe :

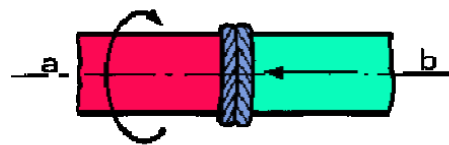
Phase 1 : entraînement de la pièce de révolution



Phase 2 : contact sous poussée axiale



Phase 3 → échauffement : maintien de la poussée axiale jusqu'à élévation de la température de surface de contact entre les pièces



Phase 4 → refoulement : brusque arrêt de la pièce tournante. Maintien de la poussée axiale et application d'un effort en plus.

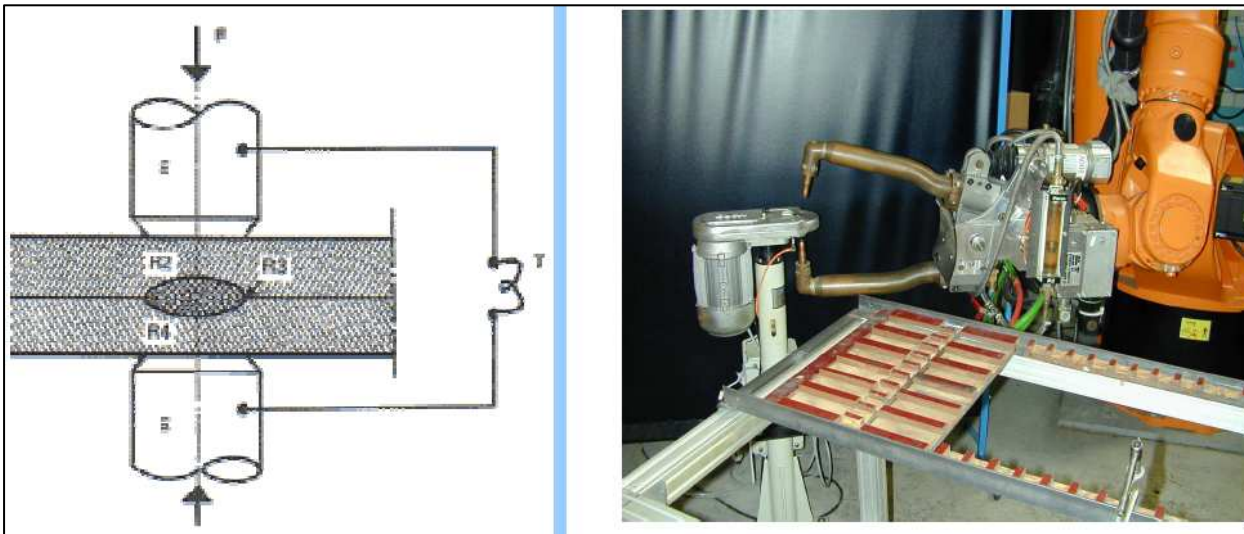


L'une des deux pièces doit être à section circulaire (pleine ou tubulaire).

V.5) Soudage par résistance électrique

♦ Résistance électrique par point :

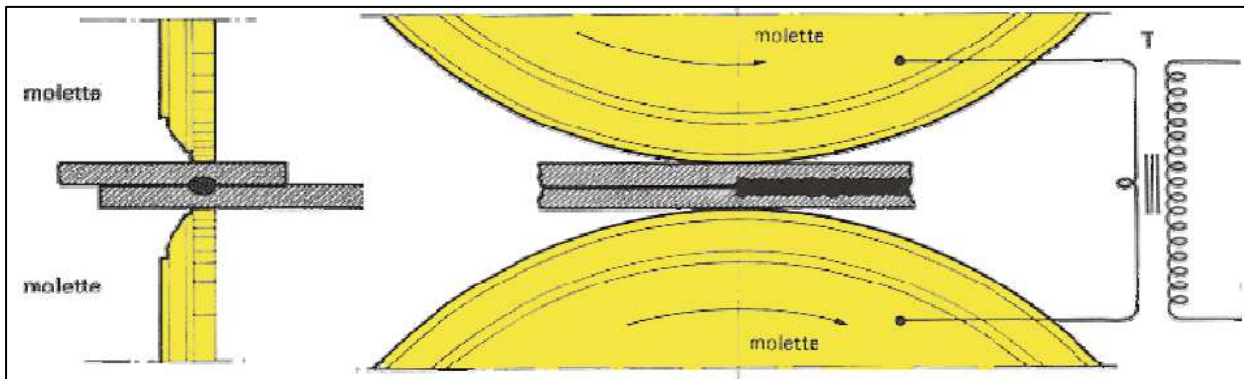
Dans ce procédé sans apport de métal, les pièces sont maintenues en contact sous un effort d'accostage entre deux électrodes en cuivre ou alliages de cuivre.



Soudage de deux tôles de 10 mm en acier et de 6 mm en alliages d'aluminium.

♦ Résistance électrique par molette :

Les électrodes sont des disques animés d'un mouvement de rotation.
Les points peuvent être espacés ou jointifs.



Epaisseur maximum de 3 mm.

VI) OBTENTION PAR PROTOTYPAGE RAPIDE

Le prototypage rapide est une méthode de fabrication qui regroupe un ensemble d'outils permettant d'aboutir à des projets de représentation intermédiaire de la conception de produits : les maquettes, les prototypes et les préséries, mais sont de plus en plus utilisées pour obtenir des produits finis grâce à l'amélioration rapide de ces technologies ces dernières années (amélioration du temps de fabrication, de la résistance des produits obtenus, de la diversité des matériaux utilisables, de la précision des cotes obtenues et des états de surface).

Le prototypage rapide possède 3 avantages : le temps, le coût et la complexité des formes.

- **Temps** : l'objectif du prototypage rapide est de réaliser rapidement les modèles, dans un but de réduction des temps de développement des produits.
- **Coût** : le prototypage rapide permet de réaliser des prototypes sans qu'il soit nécessaire de recourir à des outillages coûteux, tout en garantissant les performances du produit final. On est donc en mesure d'explorer différentes variantes du produit en cours d'élaboration afin de retenir la solution la plus appropriée.
- **Complexité des formes** : les machines procédant par ajout de matière sont capables de réaliser des formes extrêmement complexes (inclusion, cavité...), irréalisables par des procédés tels que l'usinage par exemple.

Voici les techniques de prototypage rapide les plus utilisées :

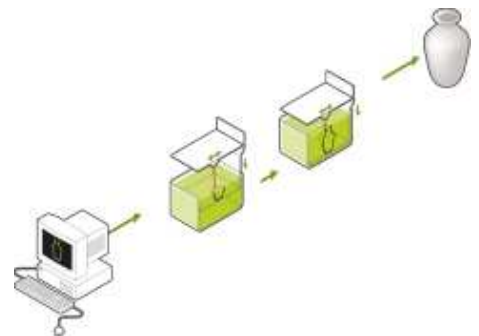
VI.1) UTGV (Usinage Très grande Vitesse)

Il s'effectue sur des centres d'usinage multiaxes à commande numérique. La forme finale est obtenue par enlèvement de matière (usinage) avec différents outils, et souvent plusieurs mises en position de la pièce.

VI.2) Stéréolithographie

L'objet est obtenu par superposition de tranches fines de matière.

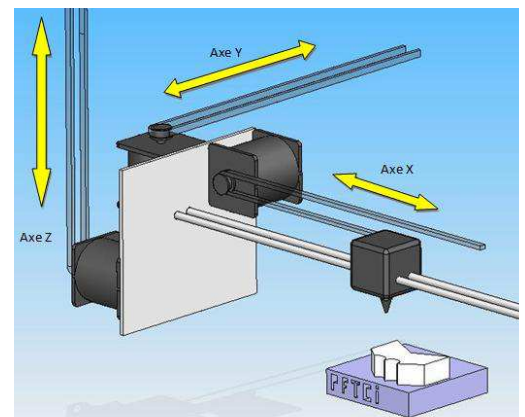
A partir d'un fichier 3D, une pièce est construite couche par couche du bas vers le haut, dans un bain de résine liquide (ou de poudre métallique) qui durcit au contact d'un faisceau laser.



VI.3) Impression 3D (dépôt de fil fondu)

Cette technique permet de produire un objet réel à partir d'un fichier CAO en le découpant en tranches puis en déposant de la matière couche par couche pour, en fin de compte, obtenir la pièce terminée. Le principe est donc assez proche de celui d'une imprimante 2D classique : les buses utilisées, qui déposent de la résine (ou du plastique, ou du métal), sont d'ailleurs identiques aux imprimantes de bureau. C'est l'empilement de ces couches qui crée un volume.

Un matériau support est aussi utilisé afin de pouvoir obtenir n'importe quelle forme volumique. Le matériau support est ensuite dissout dans un bain de dissolvant.



VII) OBTENTION PAR ENLEVEMENT DE MATIERE (USINAGE)

Consiste à obtenir la forme finale par arrachements de petits morceaux de matière (copeaux).

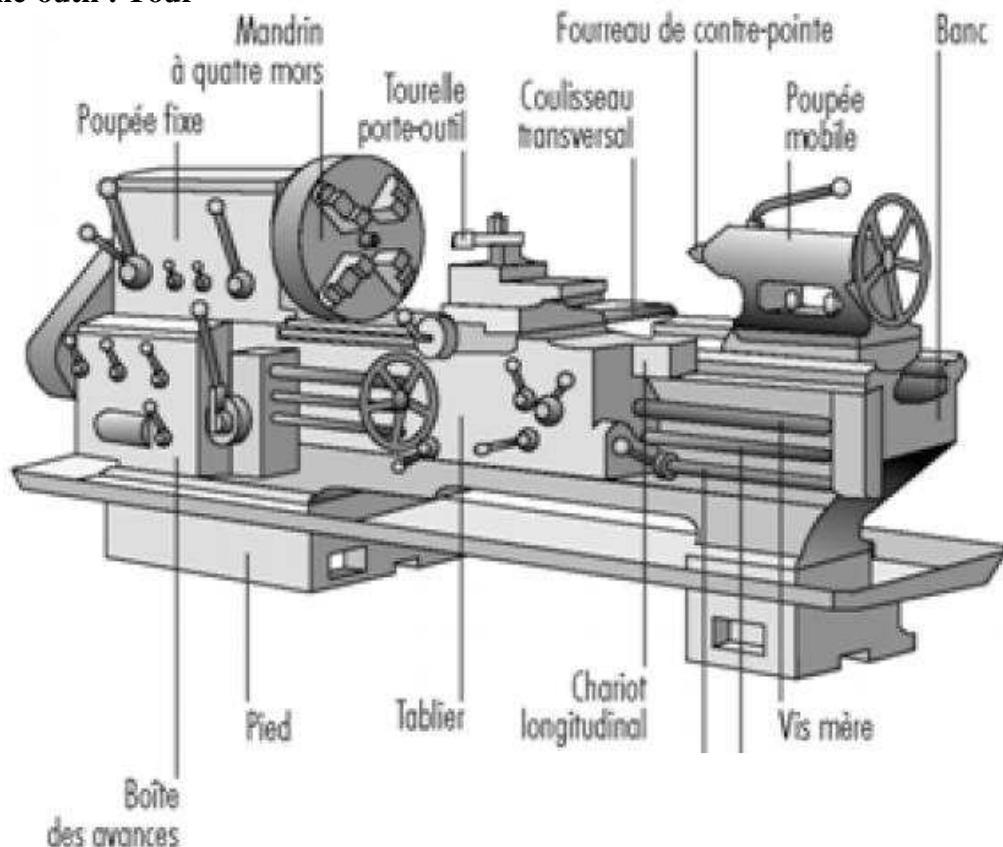
Les trois opérations les plus utilisées sont le tournage, le fraisage et le perçage, et elles seront vues en détail dans ce cours.

VII.1) Tournage (sur un tour)

En tournage, le mouvement de coupe est obtenu par rotation de la pièce serrée entre les mors d'un mandrin ou dans une pince spécifique, tandis que le mouvement d'avance est obtenu par le déplacement de l'outil coupant. Le tournage permet principalement d'obtenir des formes de révolution autour de l'axe de rotation de la pièce.



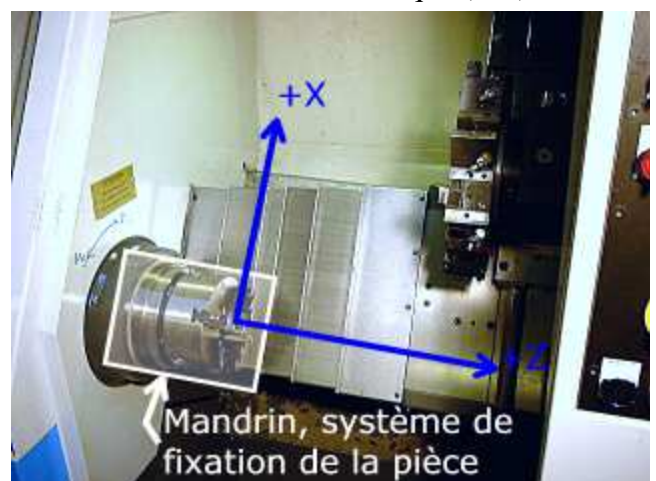
♦ Machine-outil : Tour



Il existe des tours **conventionnels** (à avance manuelle) et des tours à commande numérique (CN) dont l'avance de l'outil est entièrement programmable.

On associe au tour des axes :

- Z : translation suivant l'axe de broche, positif lorsque l'outil s'éloigne de la pièce ;
- X : autre direction principale de déplacement de l'outil, positif lorsque l'outil s'éloigne de la pièce.
- A, B, C : rotations respectivement autour des axes X, Y et Z.



Le nombre de mouvements possibles que peut faire la machine est compté en nombre d'axes - seule la rotation de la broche (forcément suivant l'axe C) qui entraîne le mandrin et la pièce n'est pas comptée.

Tour 2 axes (minimum) : seules les translations de l'outil suivant X et Z sont possibles.

Axes supplémentaires possibles (en CN) :

- axe Y (déplacement suivant Y, en plus de X et Z) ;
- axe C (outil motorisé, permettant de réaliser des opérations de perçage voire de fraisage) ;

A partir de 5 axes, on parle d'un centre d'usinage, mais plus d'un tour.

De plus, il est possible d'utiliser une **tourelle porte-outils** (cf. photo ci-contre), permettant de stocker plusieurs outils et d'en changer par rotation autour d'un axe (C ou B), évitant ainsi d'arrêter, changer l'outil, refaire le zéro et relancer la machine (très utile en CN).



♦ Mise en position isostatique sur un tour

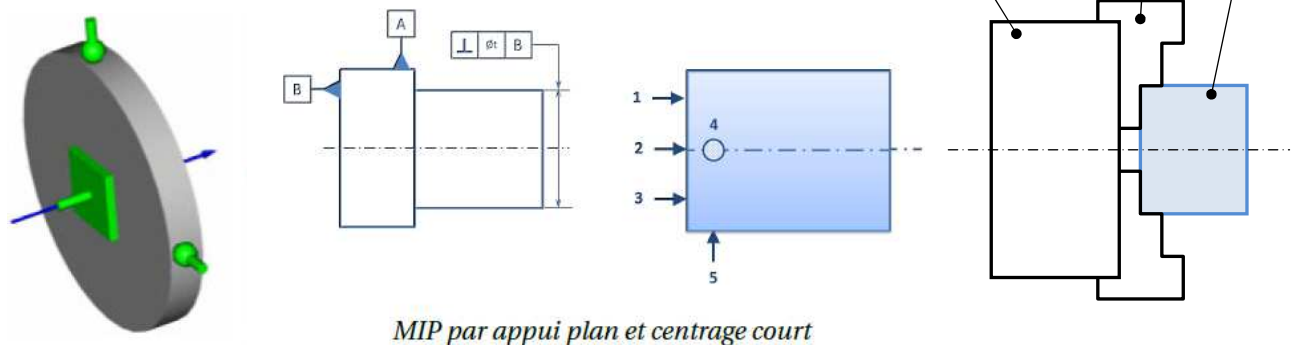
Sur un tour, la pièce est serrée sur le mandrin grâce à des mors (en général, 3 voire 4 mors) répartis autour de l'axe de rotation.

La représentation isostatique de la mise en position prend en général la forme de deux cas possibles :

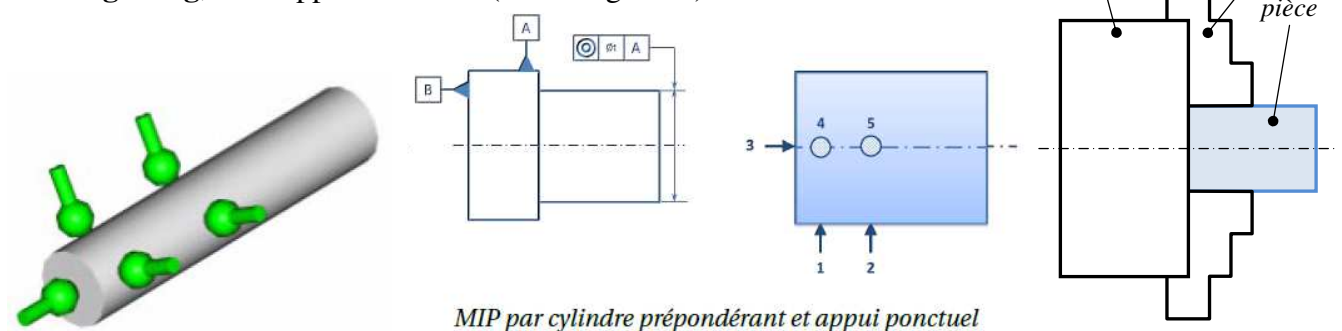
- Centrage court : la longueur de prise de la pièce (L) est inférieure à 0,8 fois le diamètre (D).
- Centrage long : $L > 1,5.D$.

De plus, la pièce peut être appuyée ou non sur le mandrin, dans la direction Z. Dans le cas d'un centrage court, on considère que cet appui est plan (3 appuis), tandis que dans le cas d'un centrage long, on considère que cet appui est ponctuel (un seul appui). Ainsi, la pièce est mise en position au maximum suivant 5 appuis, ce qui laisse un ddl avant serrage : la rotation autour de l'axe de broche Z.

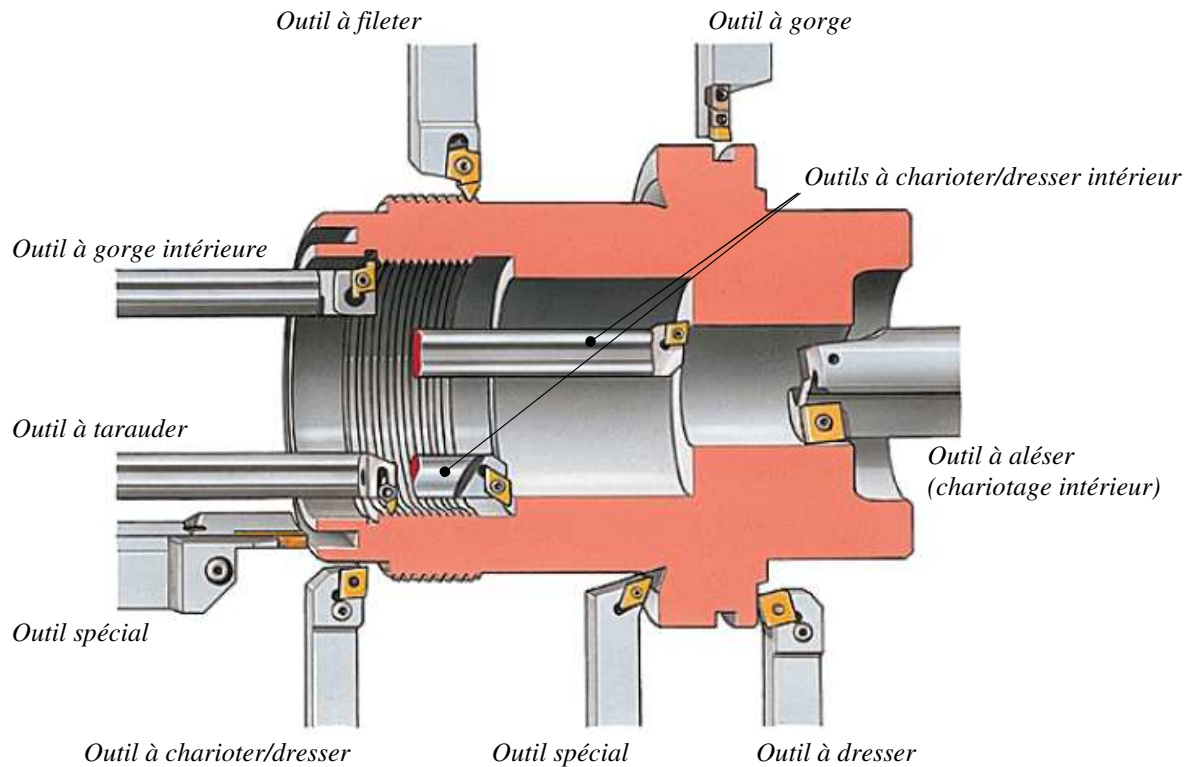
Centrage court, avec appui suivant Z (non obligatoire) :



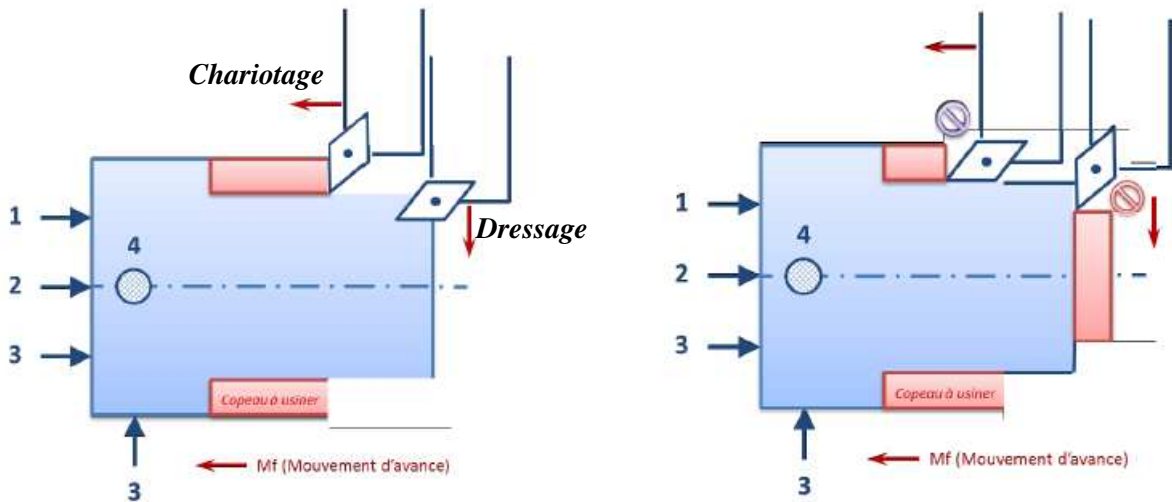
Centrage long, avec appui suivant Z (non obligatoire) :



♦ Outils et opérations de tournage

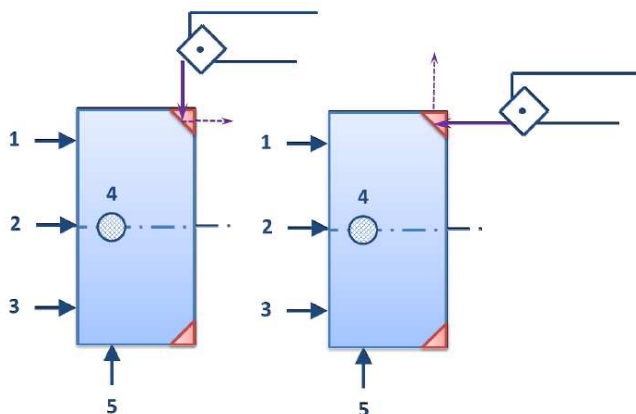


Chariotage (ou contournage), Dressage (ou surfaçage) :

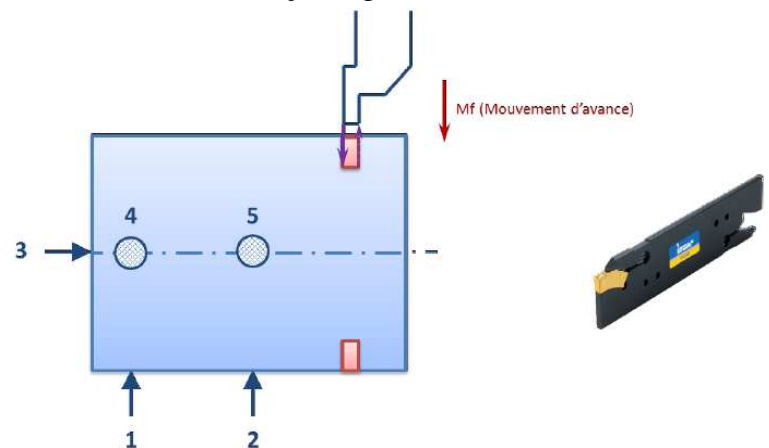


L'association d'un chariotage et d'un dressage s'appelle un « plan épaulé ».

Chanfreinage (réalisation d'un chanfrein) :

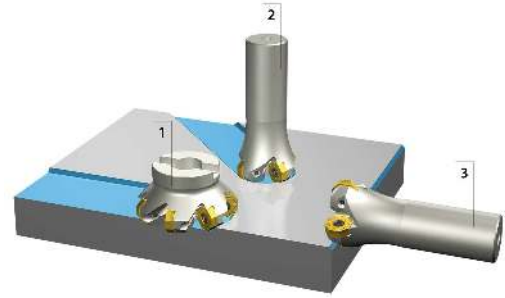


Tronçonnage :

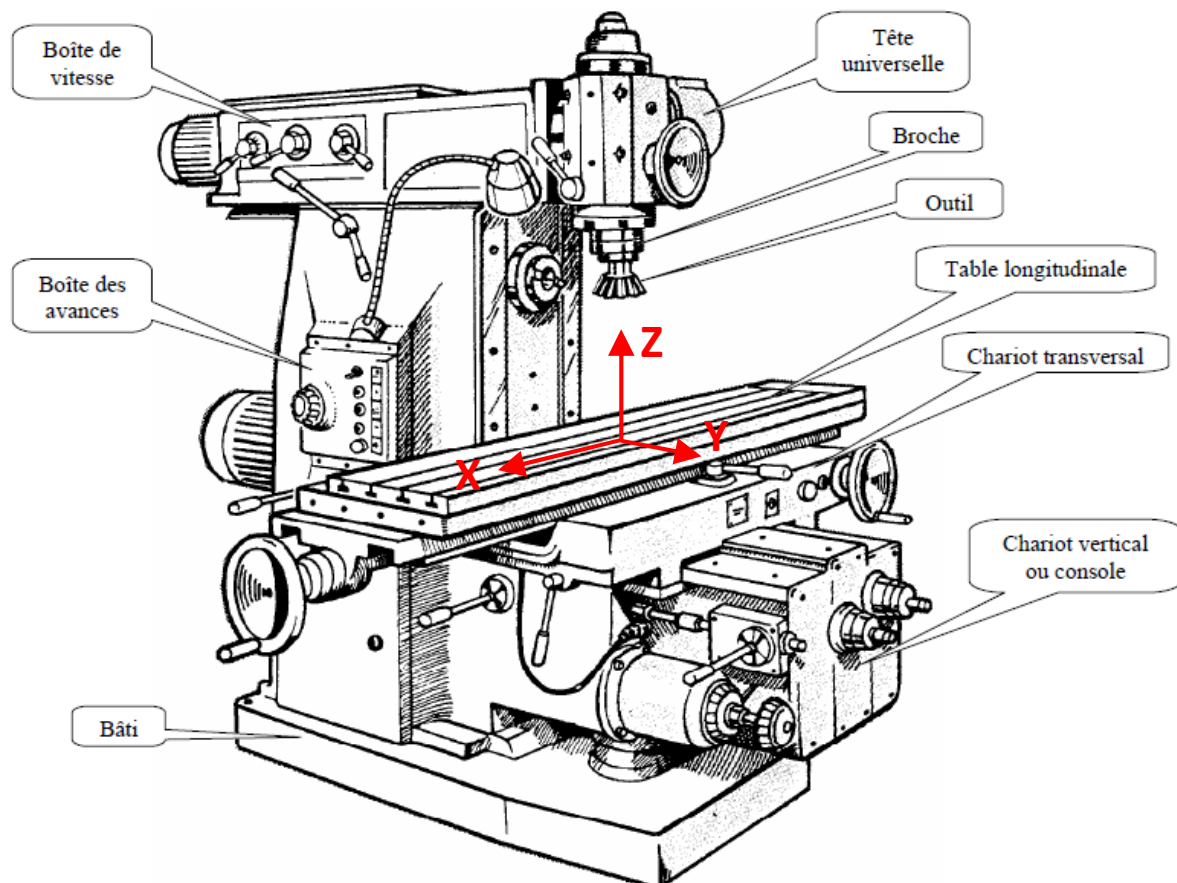


VII.2) Fraisage (sur une fraiseuse)

En fraisage, le mouvement de coupe est obtenu par rotation de l'outil (la fraise), tandis que le mouvement d'avance est obtenu par le déplacement de la pièce maintenue dans un étau (ou une pince ou encore des mors, selon la pièce à serrer). Le fraisage classique permet principalement d'obtenir des formes prismatiques, mais le fraisage par CN permet d'obtenir des formes pouvant être très complexes.



♦ Machine-outil : Fraiseuse



Il existe des fraiseuses **conventionnelles** (à avance manuelle) et des fraiseuses à commande numérique (CN) dont l'avance de l'outil est entièrement programmable.

Axes X, Y et Z (cf. schéma ci-dessus, avec Z : axe de broche, positif lorsque l'outil s'éloigne de la pièce), et A, B, C : rotations respectivement autour des axes X, Y et Z.

Le nombre de mouvements possibles que peut faire la machine est compté en nombre d'axes - seule la rotation de la broche (forcément suivant l'axe C) qui entraîne l'outil n'est pas comptée.

Fraiseuse 3 axes (minimum) : seules les 3 translations de la pièce sont possibles.

Axes supplémentaires possibles (en CN) : simple ou double inclinaison de l'axe de broche (axe B et A), arrêt de l'outil et rotation de la pièce (axe C)...

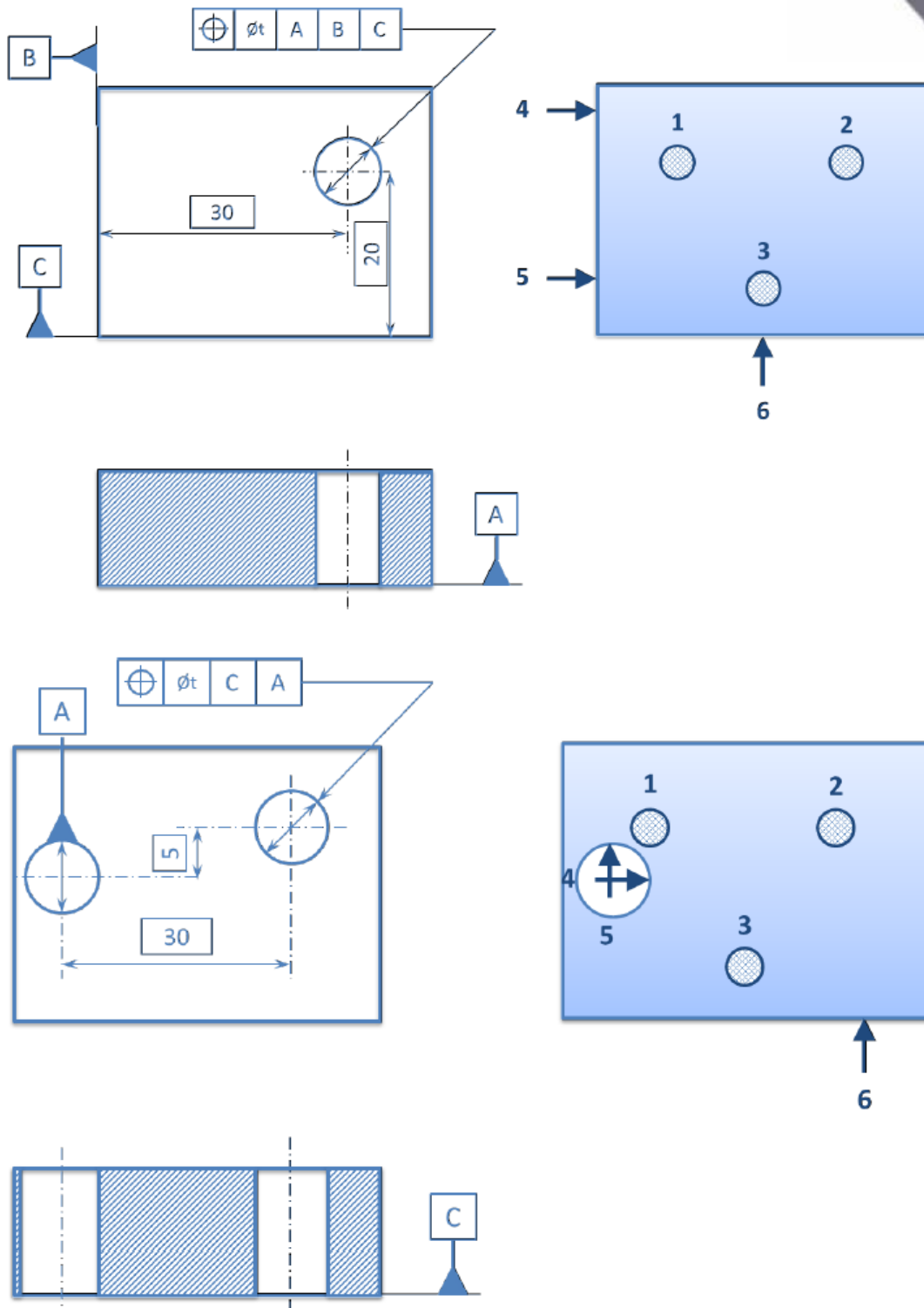
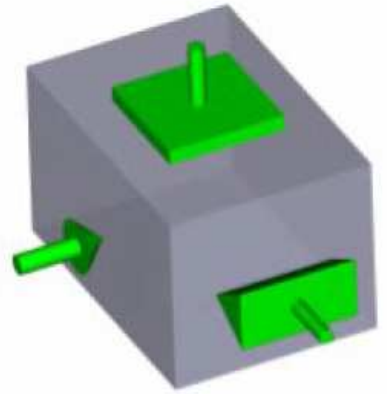
De plus, il est possible d'utiliser une **tourelle porte-outils** (cf. photo ci-contre), très utile en CN.



♦ Mise en position isostatique sur une fraiseuse

La mise en position pour les pièces de forme prismatique est très souvent effectuée grâce à :

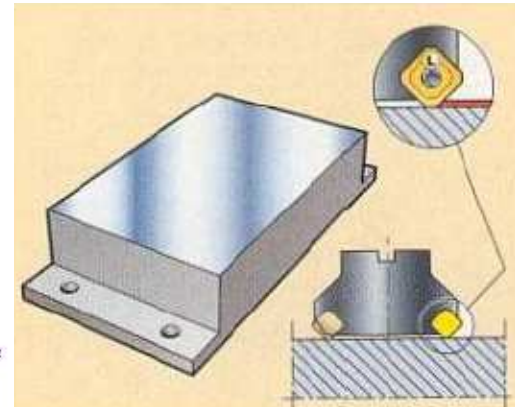
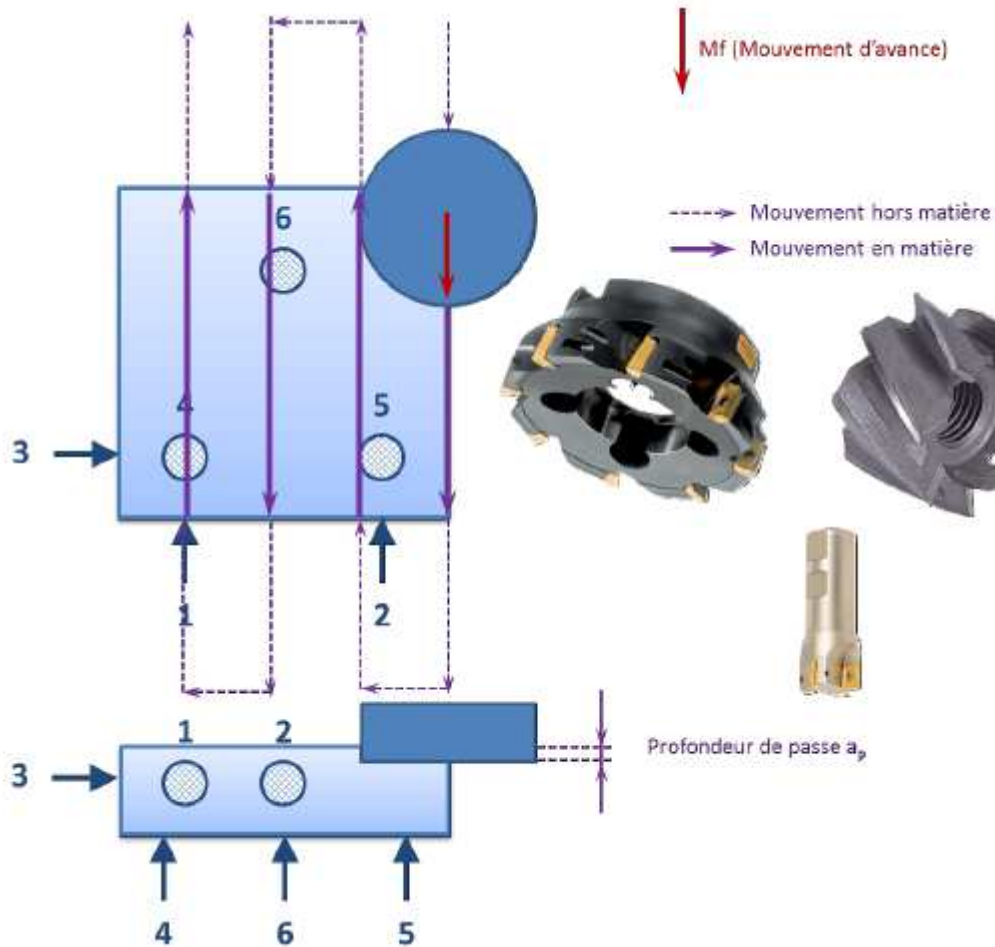
- un appui plan (surface prépondérante d'appui, de référence) modélisé de façon isostatique par 3 appuis ponctuels parallèles non alignés ;
- un appui rectiligne dont la normale est perpendiculaire à la normale de l'appui plan, modélisé de façon isostatique par deux appuis ponctuels parallèles ;
- un appui ponctuel dont la normale est perpendiculaire aux deux autres. Cela crée 6 degrés de liaisons (un par appui ponctuel) et met donc entièrement la pièce en position avant serrage.



♦ Outils et opérations de fraisage

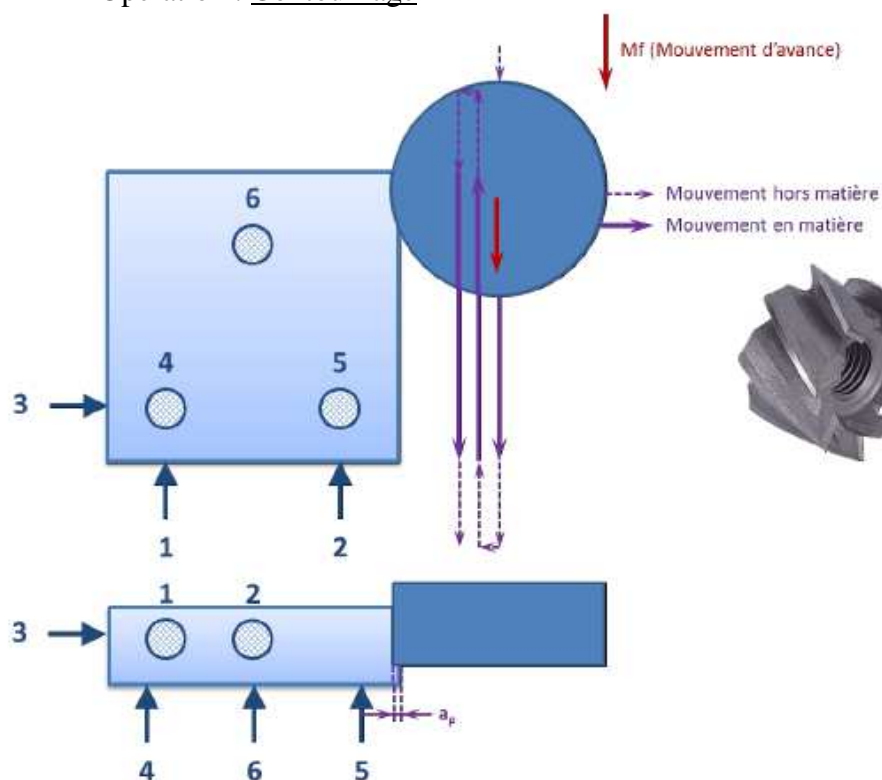
Fraise à surfacer (ou « une taille ») :

Opération : Surfaçage



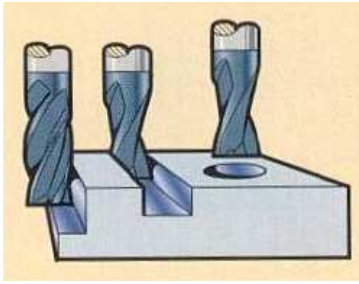
Fraise deux tailles :

Opération : Contournage

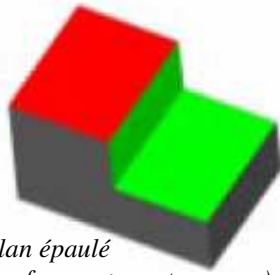


*Fraises deux tailles
En acier ARS À outil carbure*

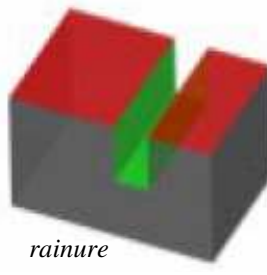
Autres opérations par fraise deux tailles : Rainurage, pochage



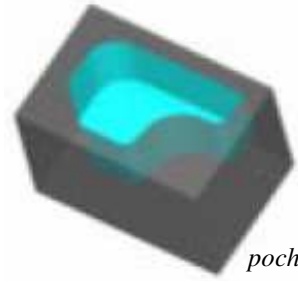
*Plan épaulé
(surfaçage + contournage)*



rainure

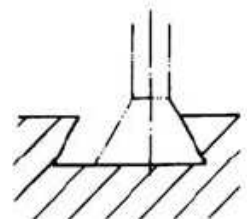
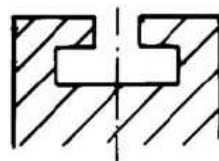
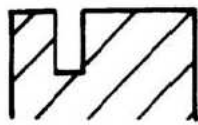


poche



Fraise trois tailles :

Opération : Rainurage (de formes diverses)



*Rainure en
queue d'aronde*

Fraise à chanfreiner (opération= réalisation d'un chanfrein) :



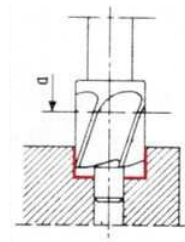
*Fraise conique
(pour réaliser le chanfrein d'un alésage ou une fraisure)*



*Fraise à chanfreiner
à outil carbure (pour
réaliser un chanfrein
extérieur)*

Fraise à fraisurer (opération = réalisation d'une fraisure) : cf. fraise conique ci-dessus.

Fraise à lamer (opération = réalisation d'un lamage ou « chambrage ») :

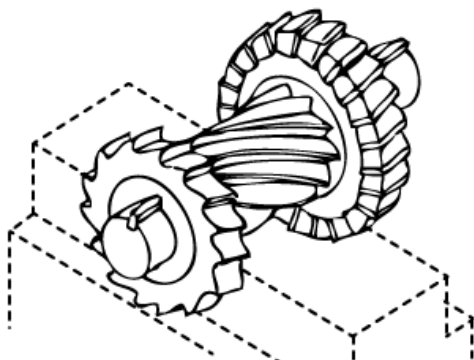


*Fraise
à lamer*



Train de fraises

Tous les types de fraises peuvent être assemblés les uns à la suite des autres pour réaliser des formes complexes en une seule passe.



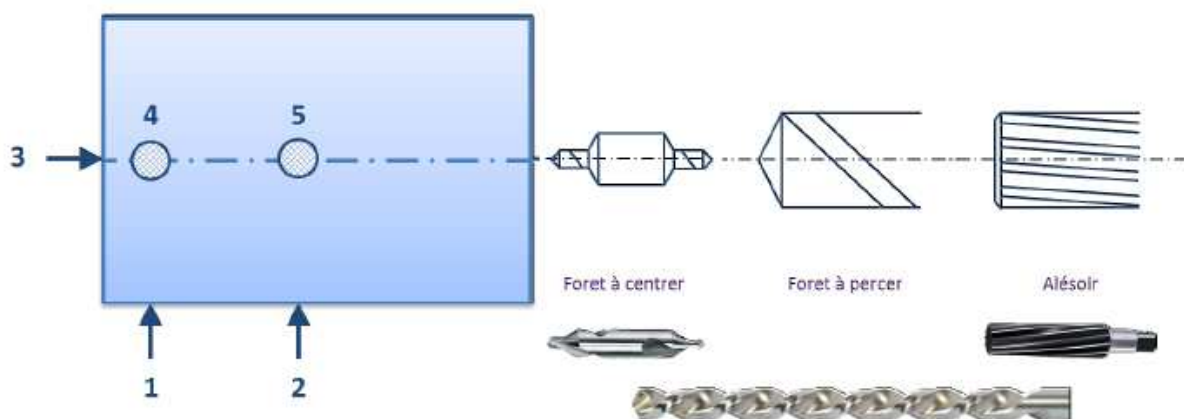
VII.3) Perçage (sur une perceuse, un tour ou une fraiseuse)

Le terme perçage signifie « obtention d'un trou (borgne ou débouchant) par usinage ». Ce trou peut être effectué par un foret (sur une perceuse, un tour, une fraiseuse...), par une mèche sur un vilebrequin (perceuse manuelle), par découpe, par électroérosion, etc.



Foret à centrer	Foret à pointer	Foret	Alésoir	Fraise à lamer
				
A utiliser pour situer l'axe d'une pièce en tournage	A utiliser pour positionner un perçage	Pour percer des trous (tolérance H10)	Pour la finition d'un trou de bonne qualité (tolérance H7)	Pour noyer une tête de vis Chc

Exemple sur un tour :



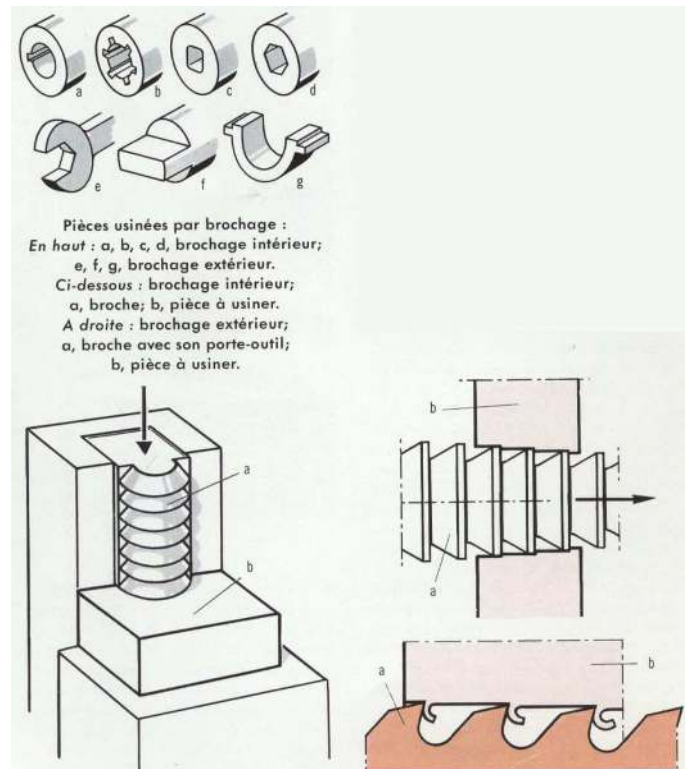
VII.4) Autres opérations d'usinage

♦ Brochage (sur une brocheuse)

Le brochage est un procédé d'usinage à l'aide d'un outil de forme à tranchants multiples appelé « broche ».

L'outil broche possède des dents qui augmentent de hauteur progressivement, de sorte que chacune entaille plus profondément la pièce que celle qui la précède.

Le brochage intérieur (formes *a, b, c, d* ci-contre) nécessite que la broche puisse traverser la pièce. Il est donc nécessaire de réaliser au préalable un trou débouchant.



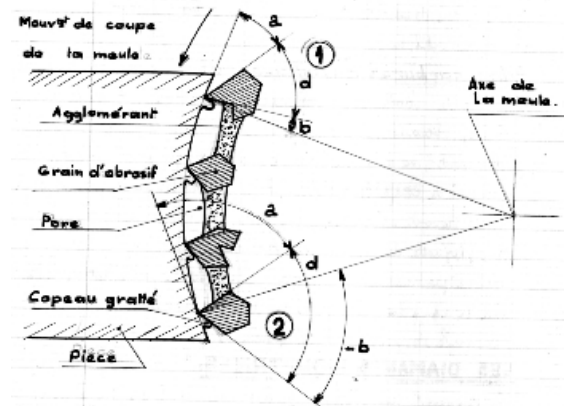
♦ Rectification, rodage, superfinition (sur une meule ou sur des bandes abrasives)

Ces trois techniques sont des techniques de finition des pièces, par **abrasion** (ou meulage), jusqu'à l'obtention de surfaces en « poli-miroir ».

Une meule (ainsi qu'une bande abrasive) est constituée de particules coupantes agglomérées par un liant : chaque particule enlève un petit copeau quand l'une de ses arêtes se présente sur la pièce, généralement à grande vitesse ; le copeau est de très petite section, il n'est pas tranché mais gratté.

L'amélioration de l'état de surface est obtenue en utilisant des abrasifs de plus en plus fins.

L'état de surface obtenu est excellent (rugosité de l'ordre de $Ra = 0,1 \mu m$) et la précision des cotes aussi (de l'ordre de $1 \mu m$).

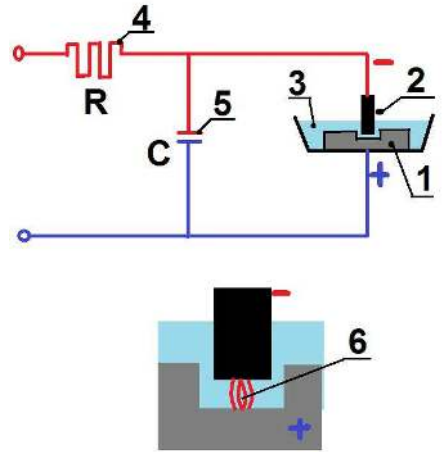


♦ Électroérosion

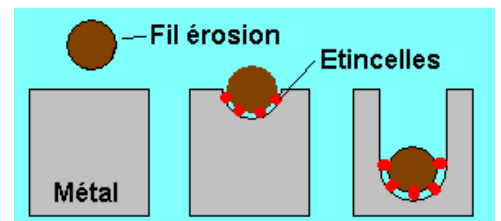
Principe :

L'enlèvement de matière est obtenu par des décharges électriques entre une électrode pièce et une électrode-outil.

- Avantages :
- Usinage possible de matériaux trempés et durs, impossibles à usiner avec les procédés par enlèvement de copeaux ;
 - Usinage de formes tridimensionnelles « démoulables » (l'outil pénètre dans la pièce et y laisse sa forme complémentaire) et hélicoïdales (en donnant à l'outil un mouvement de rotation conjuguée avec son mouvement de translation) ;
 - Bons états de surface ($Ra \approx 2 \mu m$) et précision ($\approx 20 \mu m$).

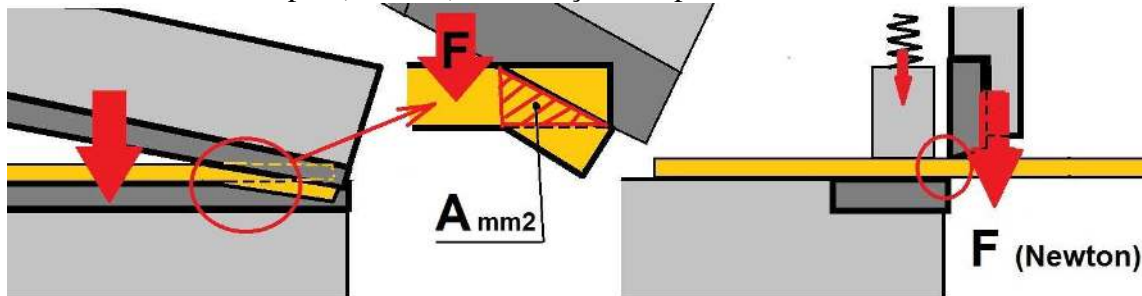


- Inconvénients :
- Ce procédé ne s'applique qu'aux matières conductrices de l'électricité ;
 - Coût du matériel (spécifique à chaque forme de pièce à obtenir) et usure de l'outil électrode.



♦ Cisaillage

Consiste à couper (cisailler) des tronçons de profilé ou de tôle.



♦ Poinçonnage

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

♦ Découpage (= cisaillage d'une tôle sur un contour fermé)

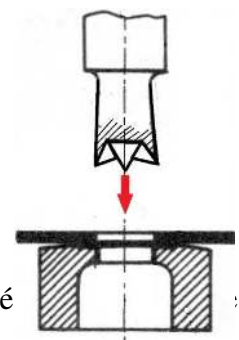
Découpage classique (mécanique, par un outil tranchant de profil fermé presse) ;

Oxycoupage (jet d'oxygène pur sur un métal préalablement localement chauffé à sa température de combustion) ;

Découpage laser ;

Découpage par jet d'eau (le jet d'eau doit posséder une finesse, une vitesse et une pression telles qu'il soit capable de couper la plupart des métaux sans les mouiller) ;

Découpage plasma (apparenté au soudage TIG, mais avec des mélanges gazeux différents – un arc électrique génère un jet de plasma qui provoque une fusion locale sur toute l'épaisseur du matériau à découper).

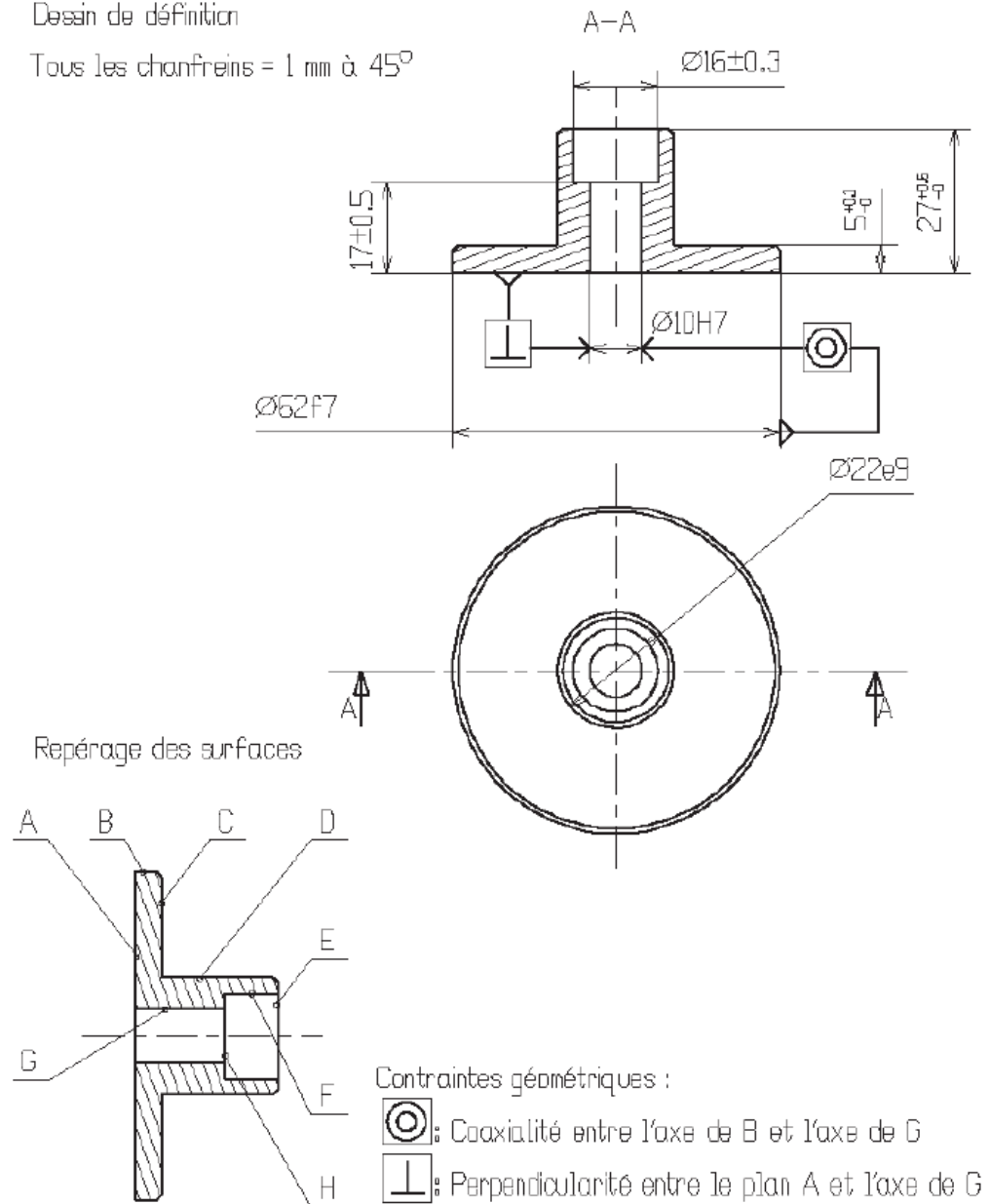


VII.5) Exemple d'application : gammes d'usinage

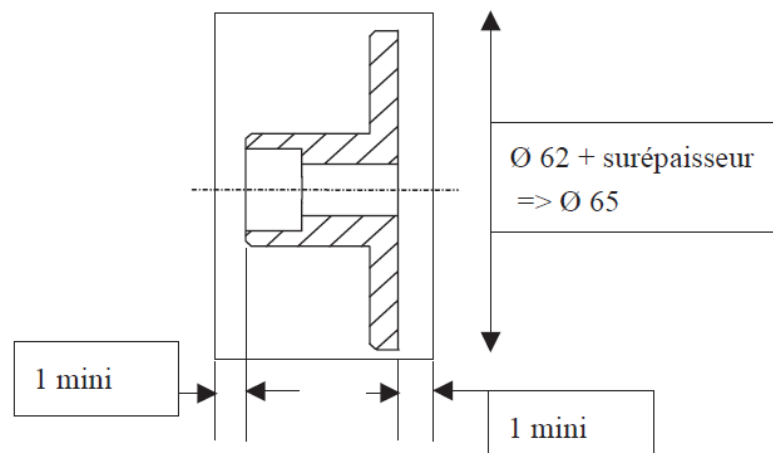
A partir du dessin de définition d'une pièce (ici un piston), on va écrire sa gamme d'usinage, c'est-à-dire l'ensemble des mises en position sur des machines-outils, des opérations effectuées et des outils utilisés (avec trajectoire d'outil).

Dessin de définition

Tous les chanfreins = 1 mm à 45°

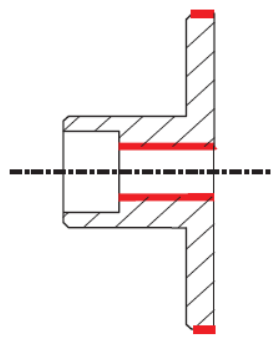
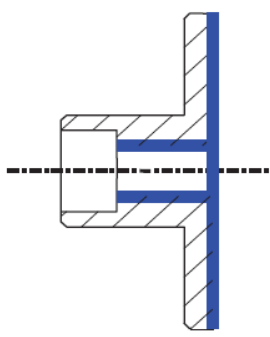
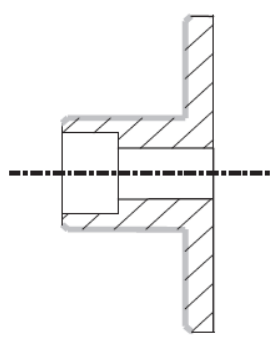
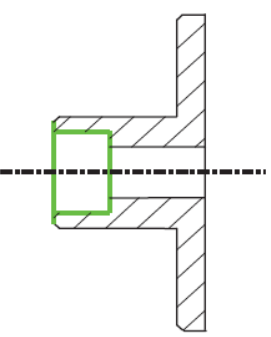
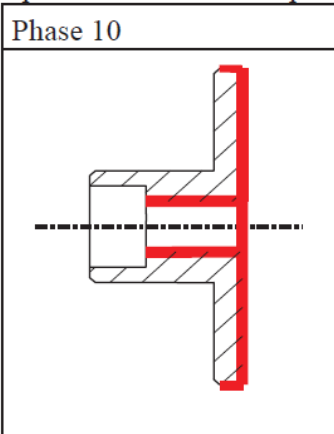
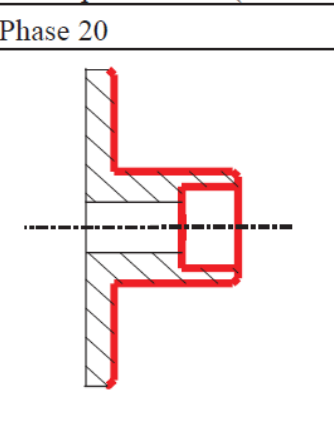


♦ Choix du brut :

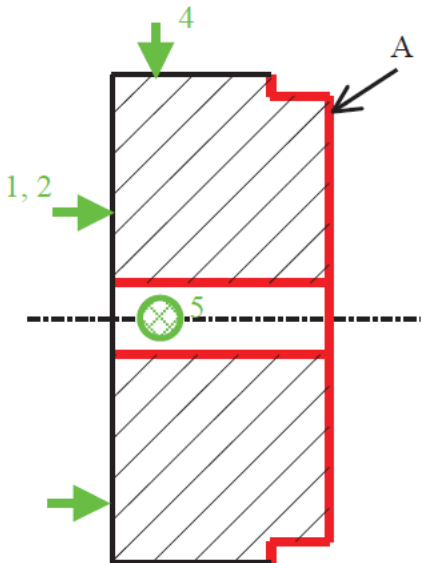


♦ **Association des surfaces, et création des phases :**

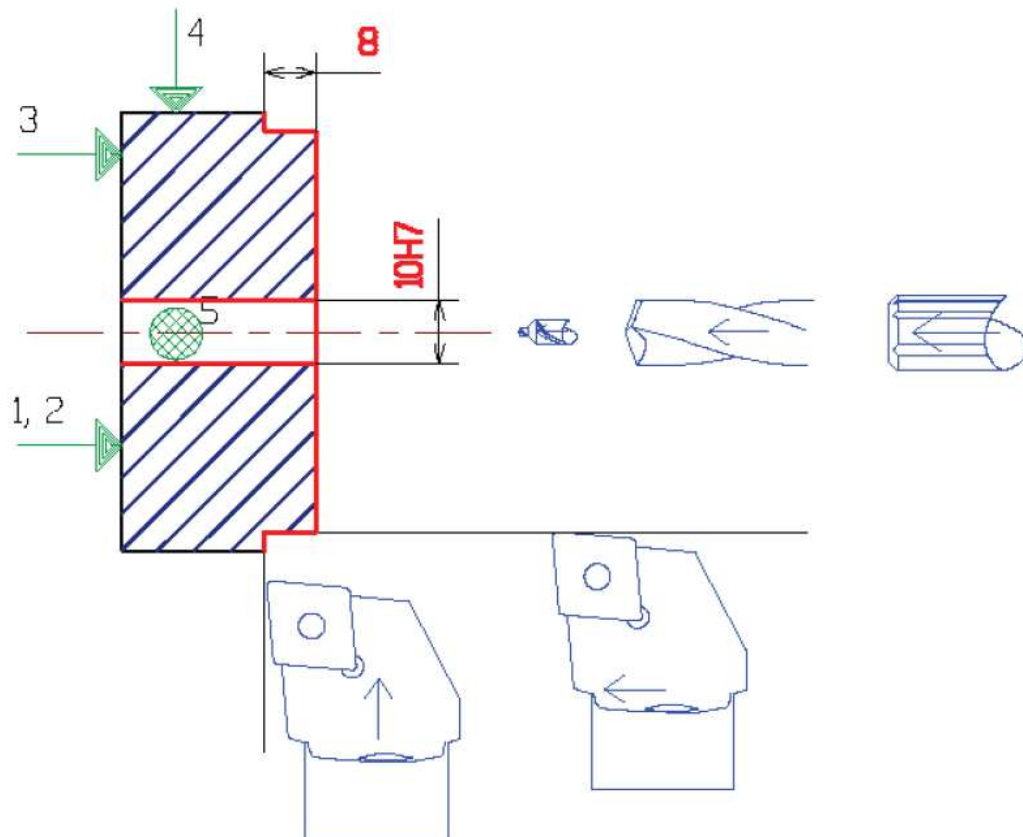
Les surfaces qui ont besoin d'être positionnées précisément les unes par rapport aux autres (spécifications géométriques) doivent soit être usinées dans la même phase (c'est-à-dire pendant la même mise en position de la pièce, sans desserrage) et si possible avec le même outil, soit encore en prenant appui sur une face pour en usiner une autre.

coaxialité	perpendicularité	ébauche extérieure	alésage
			
Phase 10		Phase 20	
			

♦ **Rédaction de la gamme d'usinage :**

Phase 10		
Machine : tour conventionnel		
Opérations	Outils	Dessin + mise en position
– Dressage de A en finition	Outil d'ébauche carbure Outil d'ébauche carbure	
– Chariotage de B en finition	Foret à pointer Foret ARS Alésoir	
– Perçage ébauche de G – perçage ½ finition de G – alésage de G		

Détail des outils et de leurs trajectoires pour la phase 10 :



Phase 20		
Machine : tour conventionnel		
Opérations	Outils	Dessin + mise en position
- Dressage chariotage de C, D, E en ébauche - Dressage de E en finition - Dressage de C en finition - Chariotage de D en finition - Alésage et dressage de F, H	Outil d'ébauche carbure " " " " " " outil à aléser dresser carbure	