

**STP02-SIND**

# **SCIENCES INDUSTRIELLES**

Cours 3 & 4 – Comment fabriquer le produit ?

# COMMENT FABRIQUER LE PRODUIT ?

## 0 – Introduction

## 1 – Matériaux et métallurgie

## 2 – Forge

## 3 – Fonderie

## 4 – Métaux en feuille

## 5 – Usinage

## 6 – Procédés matière plastique

## 7 – Prototypage rapide

## 8 – Traitements thermiques et de surfaces

# 0 – INTRODUCTION

Comment fabriquer le produit ?

Dans l'industrie :

- Plus de 50 000 matériaux ;
- Et plus 3 000 procédés pour les transformer.



## 1 – PRINCIPE PHYSIQUE

Un ensemble de 5 grands principes physique de transformation de la matière sont définis :

- Enlèvement de matière (soustractif) :  
Arrachement de partie de matière sous forme de copeaux
- Changement de phase de la matière :  
Phase liquide => Moule => Phase solide
- Mise en forme de la matière :  
Déformation permanente en phase solide
- Ajout de matière (additif) :  
Apport de partie de matière ou assemblage
- Transformation structurelle :  
Modification des propriétés physico-chimique

**REMARQUE** : un procédé est défini par un ou plusieurs de ces principes physique

## 2 – CRITÈRES DE CARACTÉRISATION

Un ensemble de critères permet de caractériser et de choisir les procédés de transformation :

- **Matière** : métaux, matières plastiques, composites...
- **Énergie de transformation** : mécanique, thermique, électrique, chimique...
- **Taille de la série** : prototype, unitaire, petite, moyenne et grande ;
- **Cadence** : manuel, automatique, nombre produits par unité temps...
- **Aspect de surface** : rugueux, lisse, peint...
- **Propriétés mécanique ou chimique** ;
- **Géométrie** : forme, taille, dimension, qualité des détails
- **Masse**...

# 1 – MATÉRIAUX ET MÉTALLURGIE

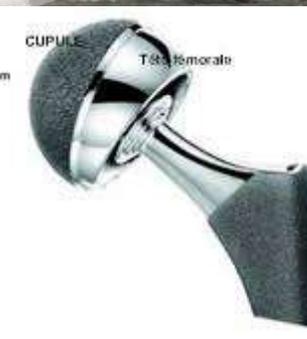
Comment fabriquer le produit ?

## 1 – INTRODUCTION

La science des matériaux a pris son essor vers la fin du XIX siècle avec la découverte de la structure de l'acier. Elle constitue l'une des **sciences fondamentales de la technologie moderne**.

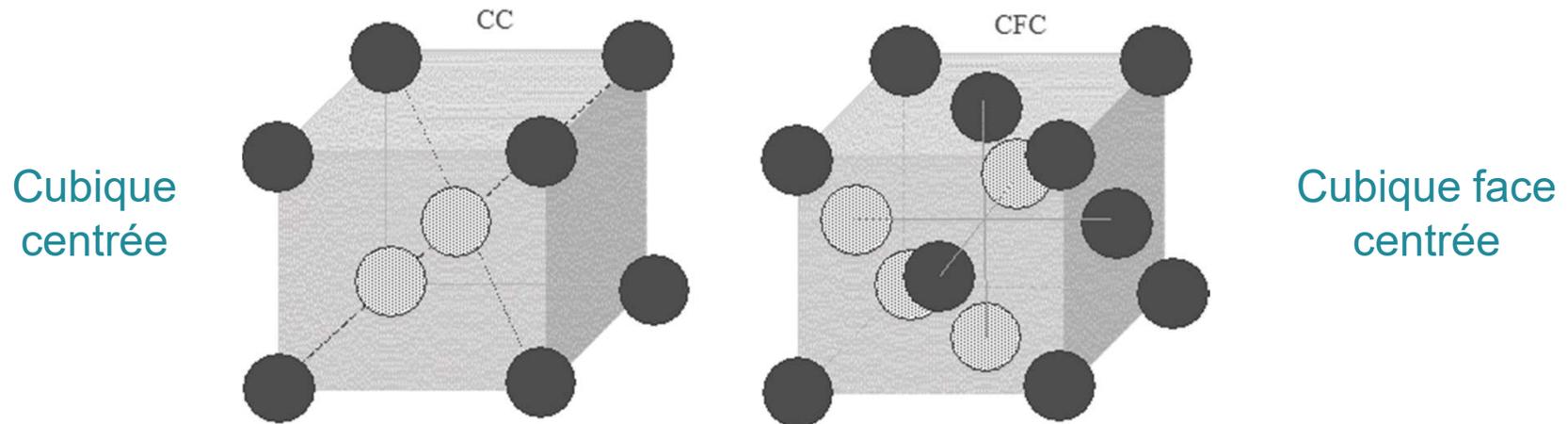
Le terme « matériau » désigne la substance dont sont faits les produits industriels.

C'est une science pluridisciplinaire (physique , chimie, mécanique...) qui est au cœur de beaucoup de grande révolution : électronique, nanotechnologie....



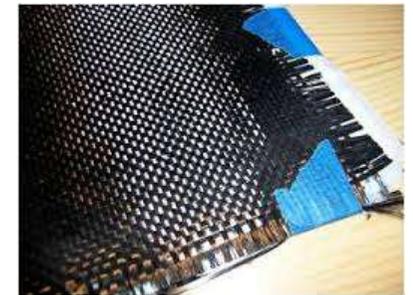
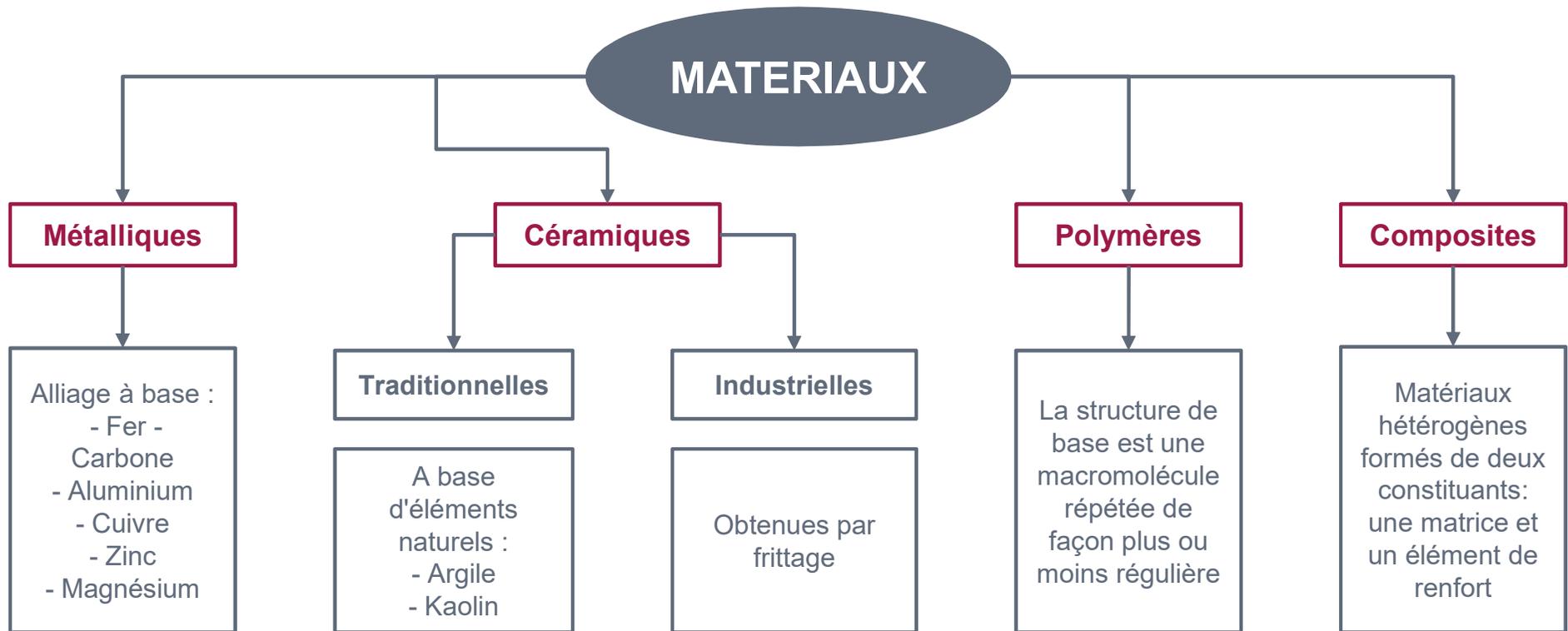
## 2 – STRUCTURES DES MATÉRIAUX

**Les matériaux cristallins** : structure fondée sur la répétition régulière des atomes suivant un réseau ordonné. Un même matériau peut se trouver sous différentes formes de structure cristalline.



**Les matériaux amorphes** : également appelés matériaux vitreux, ils sont constitués de molécules assemblées d'une façon peu ordonnée. Ils sont généralement transparents.

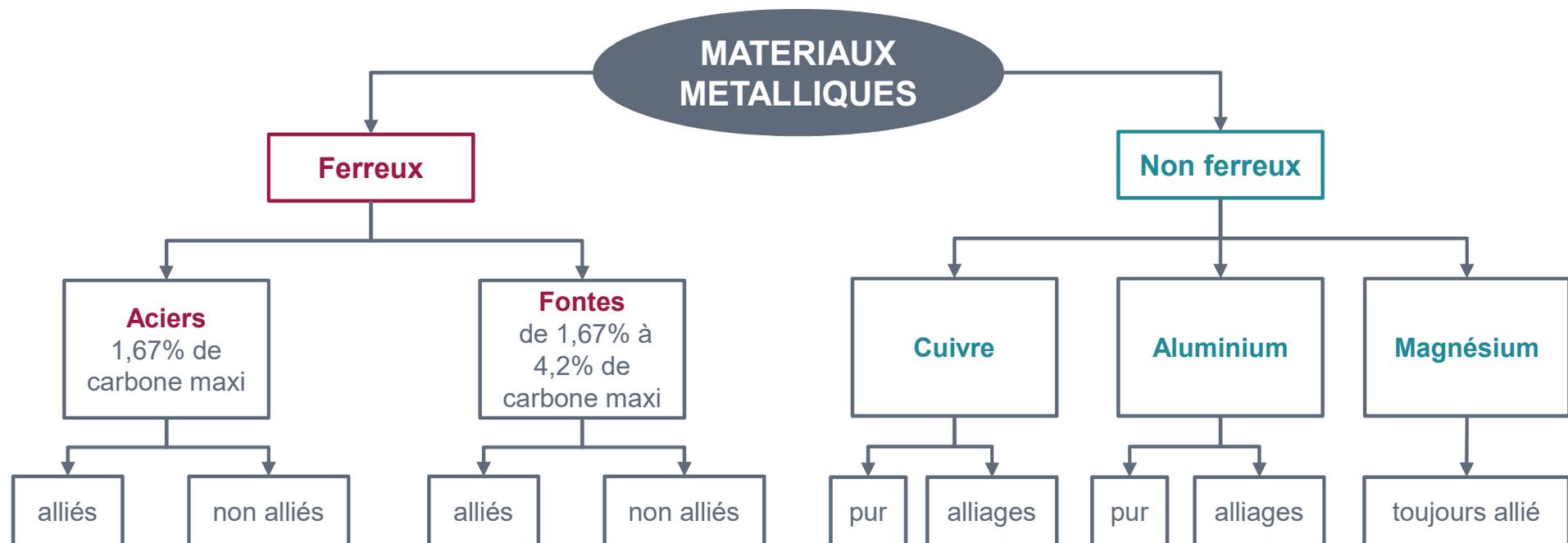
### 3 – FAMILLES DE MATÉRIAUX



## 4 – MATÉRIAUX MÉTALLIQUES

Ce sont des matériaux dont les éléments chimiques ont la particularité de pouvoir former des liaisons métalliques (mise en commun de un ou plusieurs électrons, appelés « électrons libres ») :

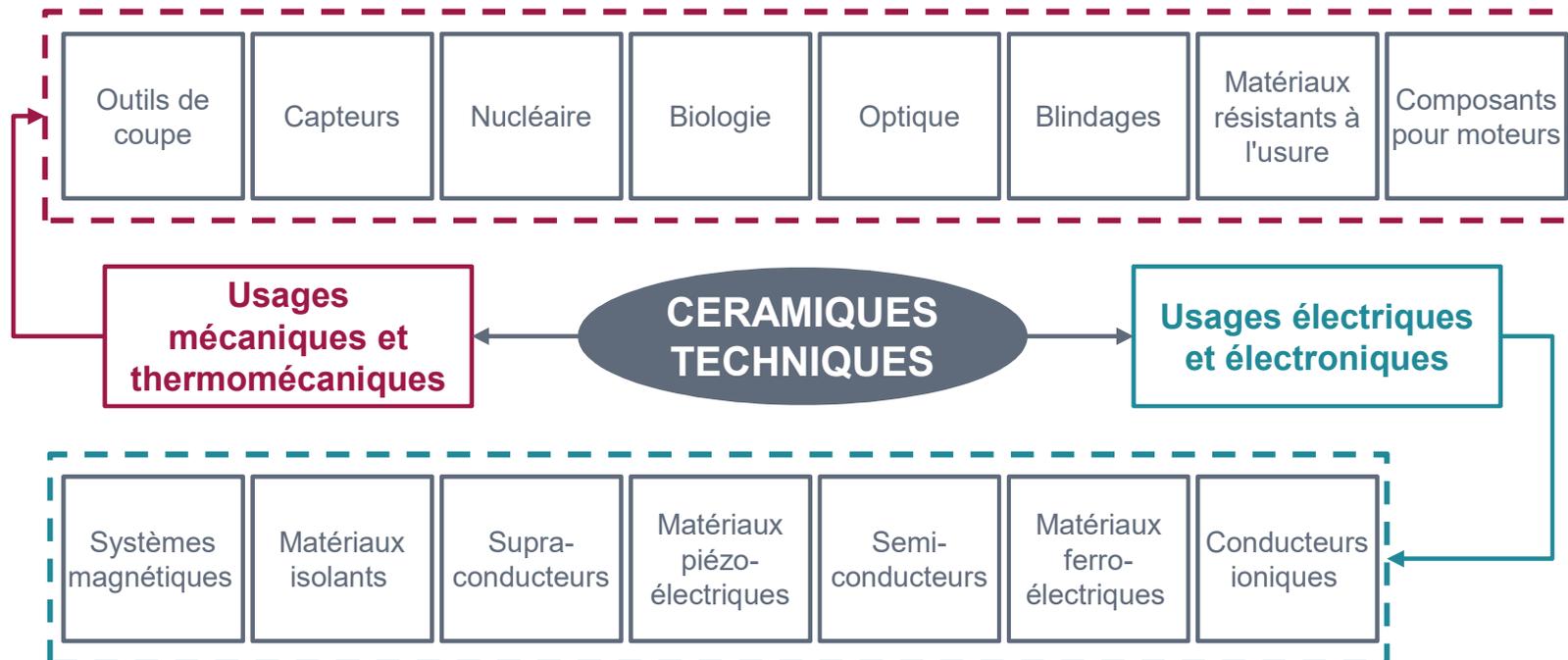
- Bonne résistance mécanique et facilité de mise en forme ;
- Bon conducteur électrique et/ou thermique.



## 5 – CÉRAMIQUES

Elles sont très dures, très rigides, résistent à la chaleur, à l'usure, aux agents chimiques et à la corrosion. Leur principal inconvénient est la fragilité. 2 familles existent :

- les traditionnelles : ciments, plâtres et produits à base d'argile ;
- les techniques : composée d'éléments métalliques et non métallique (des oxydes, des nitrures, des carbures), utilisées pour leur caractéristique mécanique, thermomécanique et électrique.



## 6 – POLYMÈRES

- **Monomère** : petite molécule, dite simple, formée de quelques dizaines d'atomes au plus (obtenue à partir du pétrole) ;



- **Polymère** : macromolécule composée de plusieurs centaines d'atomes : c'est une suite ordonnée de monomères.



- **Réaction de polymérisation** : processus de passage d'un monomère à un polymère



## Polymères thermoplastiques

Les thermoplastiques deviennent malléables quand ils sont chauffés, ce qui permet leur mise en œuvre par des techniques d'extrusion, d'injection, de thermoformage

Exemple de thermoplastiques :

PVC



Polyéthylènes



Polypropylènes



Polystyrènes

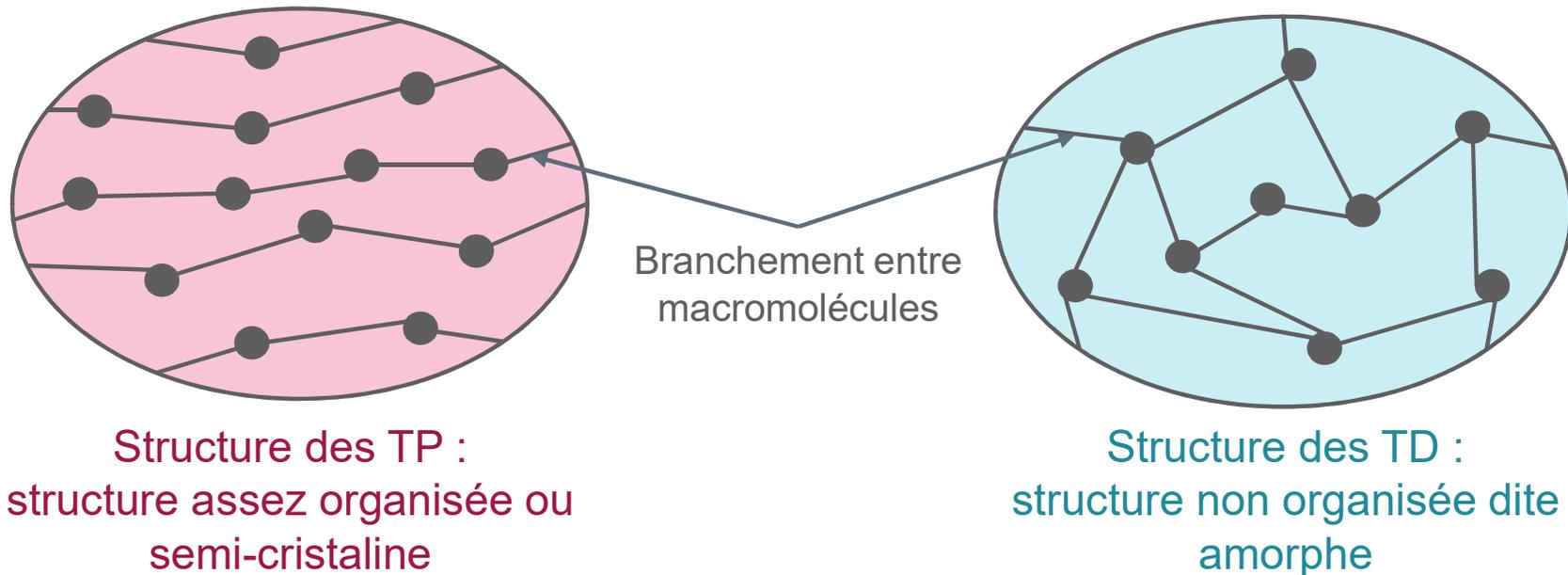


## Polymères thermodurcissables

Un thermodurcissable durcit quand il est chauffé. Une fois durci, sa forme ne peut être modifiée, il n'est pas recyclable.

Exemple de thermodurcissable : bakélite, formica...

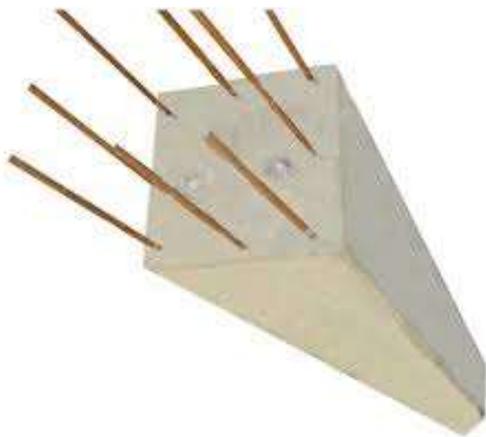
### Comparaison structurale thermoplastiques (TP)/ thermodurcissables (TD)



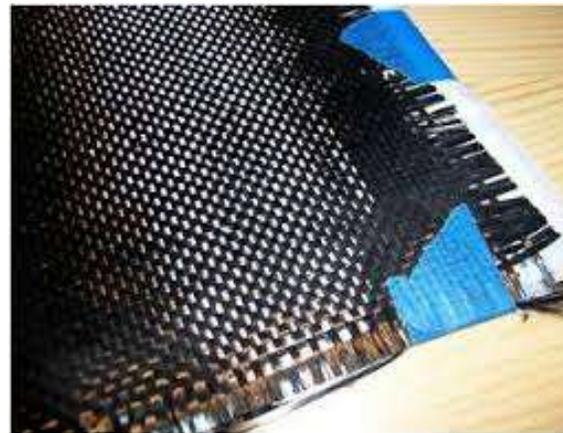
La structure amorphe des thermodurcissables explique qu'ils ont des caractéristiques mécaniques meilleures que les thermoplastiques.

## 7 – COMPOSITES

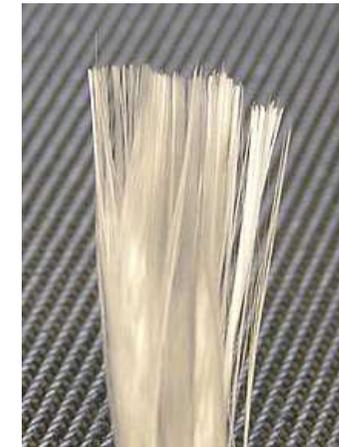
Un composite est constitué d'une ossature appelé renfort ou armature (généralement en fibre) qui assure la tenue mécanique et d'un liant appelé matrice (généralement en résine thermoplastique ou thermodurcissable) qui assure la cohésion et la transmission des efforts vers le renfort. **Un composite est un matériau hétérogène.**



Béton armé



Fibre de carbone +  
résine



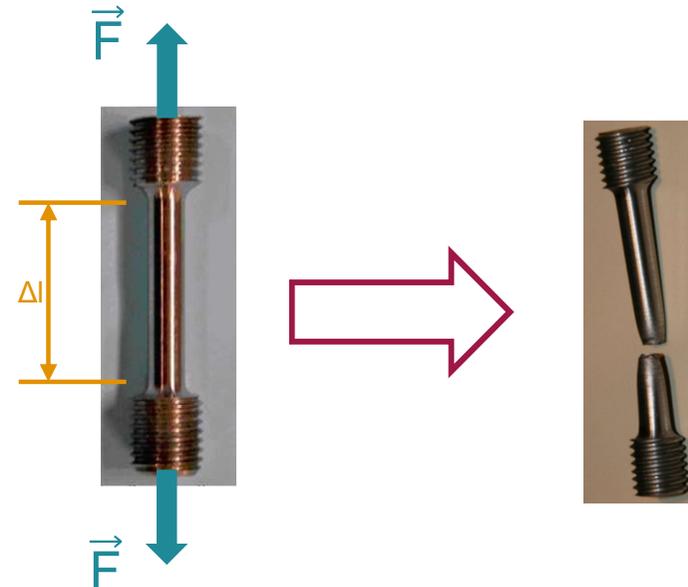
Fibre de  
verre +  
résine

## 8 – PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

### Essai de traction



Machine de traction



Éprouvette de  
traction avant essai

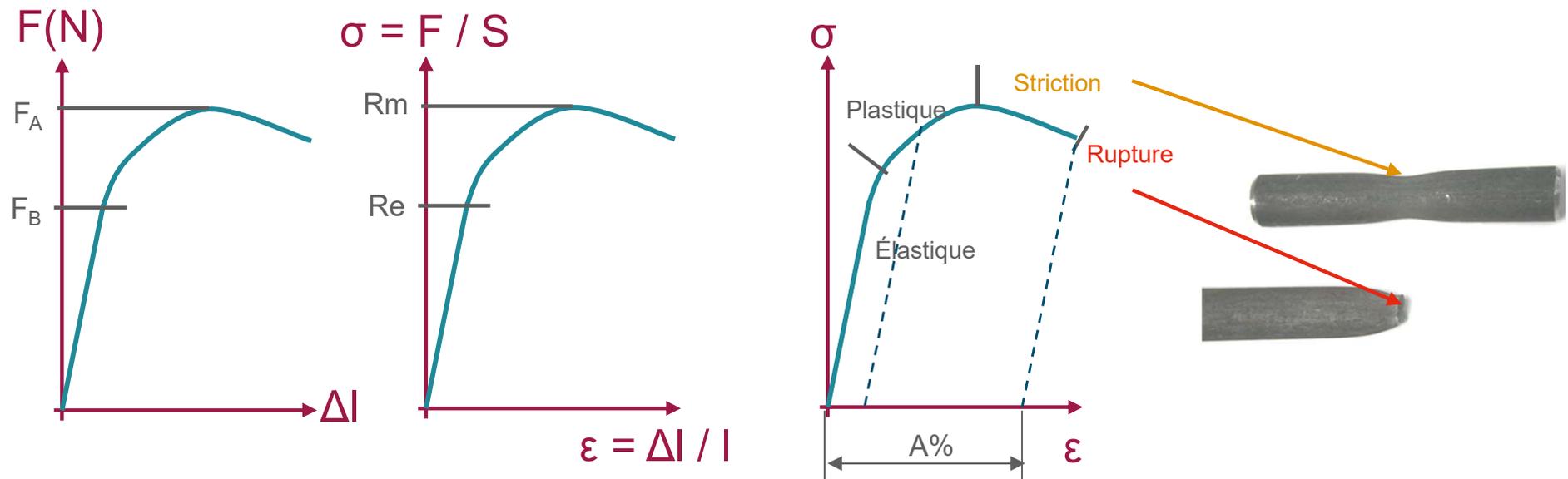
Éprouvette de  
traction après essai

L'éprouvette est mise en position dans la machine de traction, puis un effort est exercé jusqu'à la rupture de l'éprouvette. On enregistre l'allongement ( $\Delta l$ ) et la force appliquée ( $\vec{F}$ ), que l'on convertit ensuite en déformation et contrainte.

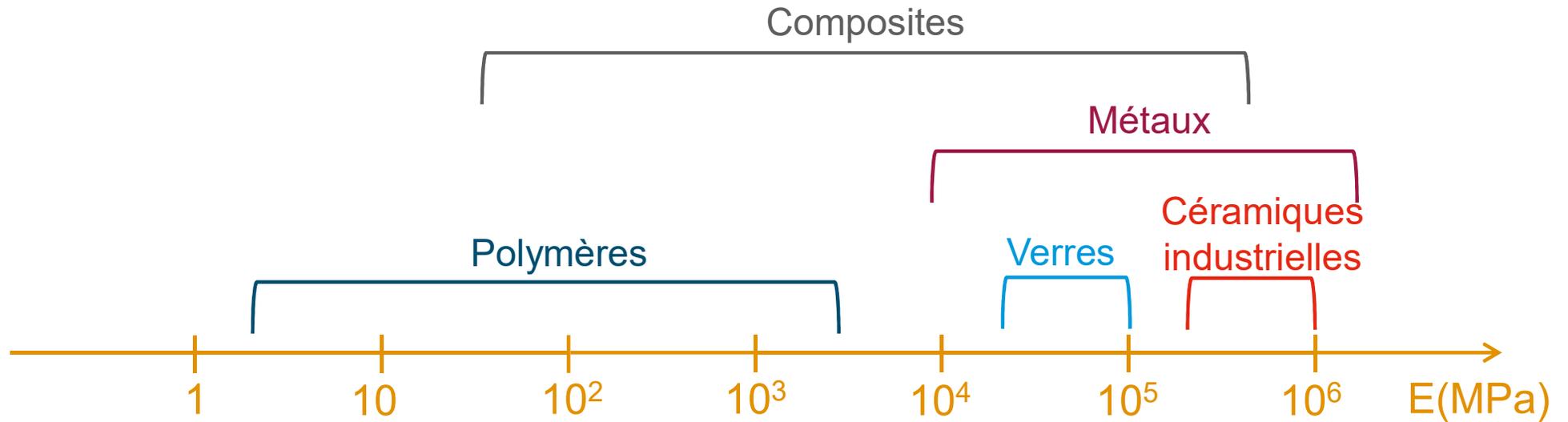
# ESSAI DE TRACTION

L'essai de traction permet de déterminer :

- Le **module de Young E**, en méga pascals (MPa) ;
- La **limite élastique Re**, qui caractérise le domaine élastique (en MPa) ;
- La **contrainte maximale Rm**, qui définit la limite à la rupture (en MPa) ;
- L'**allongement A%**, qui mesure la capacité du matériau à s'allonger sous charge avant la rupture.



## Module d'Young



Ordre de grandeur  $E$  :

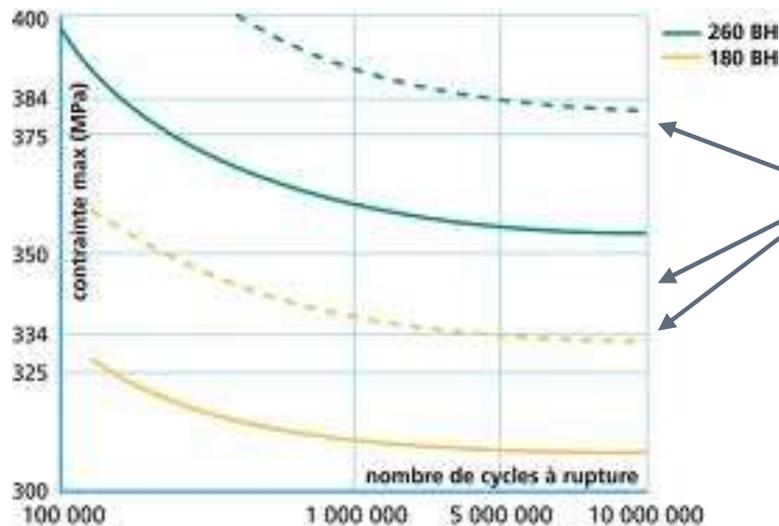
- acier de construction 210 GPa ;
- duralumin (alliage d'aluminium) 75 GPa ;
- carbure de tungstène 650 GPa ;
- bois (chêne) 12 GPa ;
- diamant 1000 GPa ;
- Verre 69 GPa.

## Essai de fatigue

Lorsqu'une pièce est sollicitée de manière répétitive, elle peut se rompre alors que les actions mécaniques ne permettent pas d'atteindre la limite de contrainte maximale.

La rupture résulte de la propagation lente de fissures.

Un essai de fatigue consiste à appliquer à un matériau une sollicitation cyclique proche de celle qu'il subira en service.



Limite en fatigue, la résistance est théoriquement illimitée

Ordre de grandeur : pour un alliage d'aluminium, la limite à la fatigue est d'environ  $0,4 R_m$

Exemple de comportement à la fatigue de différents matériaux

## Rupture à la fatigue

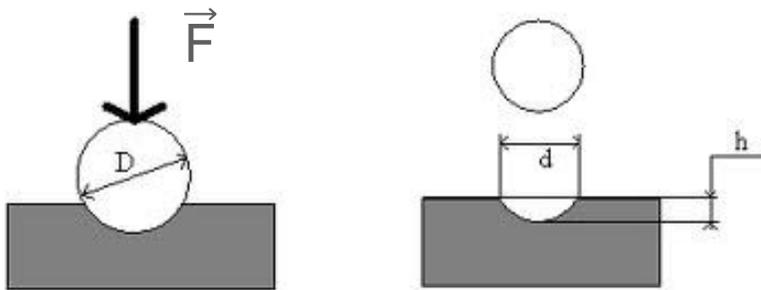
Le vol 243 d'Aloha Airlines du 28 avril 1988 a subi une décompression explosive en vol mais a réussi à atterrir. Une hôtesse de l'air, emportée par décompression fut portée disparue. Des fissures de fatigues le long des lignes de rivets sont à l'origine de l'accident.



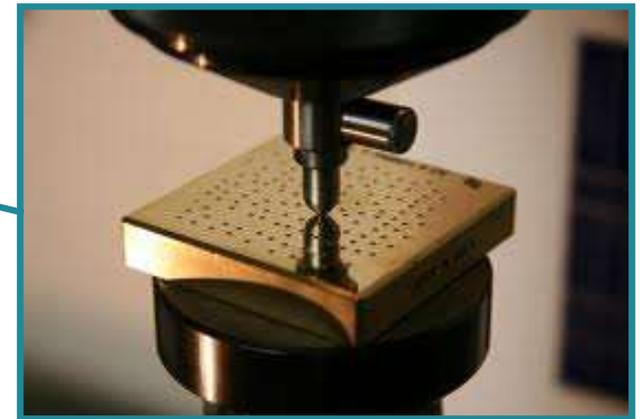
## Essai de dureté

L'essai de dureté consiste à déformer la surface d'une pièce par application d'un effort connu sur un pénétrateur :

- Sphérique pour la dureté Brinell (HB) ;
- Pyramidale pour la dureté Vickers (HV) ;
- Conique pour la dureté Rockwell (HRC).



Principe de l'essai de dureté Brinell



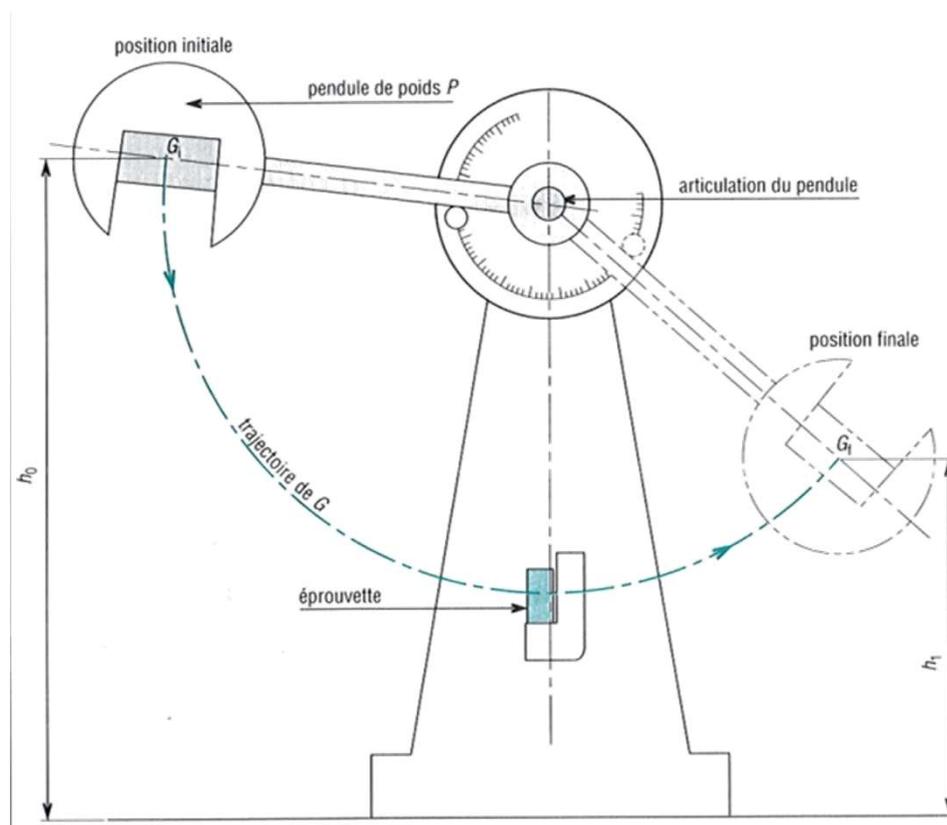
Machines d'essai de dureté

# ESSAI DE DURETE

## Essai au choc

Il y a « choc » lorsque la charge appliquée croît brutalement au cours d'un intervalle de temps très court.

La résistance au choc ou résilience  $K$  (en  $J/cm^2$ ) est caractérisé par le rapport entre l'énergie nécessaire pour rompre une éprouvette avec une seule application de la charge et l'aire de la section rompue.



Énergie nécessaire pour la rupture de l'éprouvette :

$$E = M.g.(h_0-h_1)$$

$$E = P.(h_0-h_1)$$

# ESSAI AU CHOC

## 9 – AUTRES PROPRIÉTÉS

### Masse volumique

La masse volumique est une caractéristique physique d'une grandeur importance pour certaines applications ou la légèreté est un critère déterminant : aéronautique, espace, automobile, ....

Ordre de grandeur de la masse volumique :

- Acier :  $7800 \text{ kg/m}^3$  ;
- Alliage d'aluminium :  $2700 \text{ kg/m}^3$  ;
- Fibre de verre :  $2500 \text{ kg/m}^3$  ;
- Fibre de carbone :  $1750 \text{ kg/m}^3$  ;
- Nylon massif :  $1100 \text{ kg/m}^3$  ;

## Propriétés électriques

Ces propriétés dépendent de la nature des matériaux que l'on classe généralement en conducteur, semi-conducteur et isolants en fonction de leur résistivité (capacité à s'opposer à la circulation du courant électrique en  $\Omega\text{m}$ ).

- isolant : polystyrène, nylon, verre ;
- semi-conducteur : silicium pur ;
- Conducteur : alliages ferreux, alliage d'aluminium, cuivre.

## Propriétés magnétiques

L'aimantation d'un matériau est soit créée temporairement par un courant électrique (électroaimants) soit de nature permanente (aimants permanents naturels ou artificiels).

## Propriétés thermiques

Les matériaux peuvent être classés en matériaux conducteurs et isolants d'un point de vue thermique en fonction de leur conductivité en  $\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ .

## FORMES COURANTES

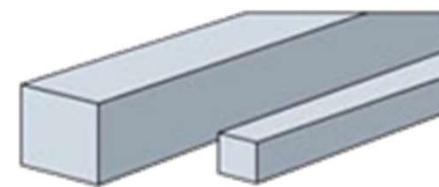
### Demi-produits

(issus de la coulée continue)



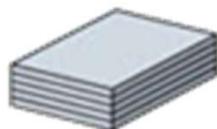
Brame

Bloom et billette



### Produits finis

(issus du laminage)



Plaques

Fil



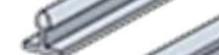
Tôle en bobine

Barres



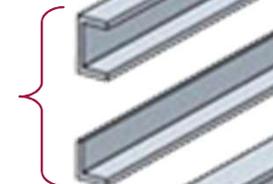
Feuilles

Rail



Feuillards

Profilés divers



Poutrelles



## 10 – OBTENTION DE LA FONTE ET DE L'ACIER

### Trois opérations fondamentales

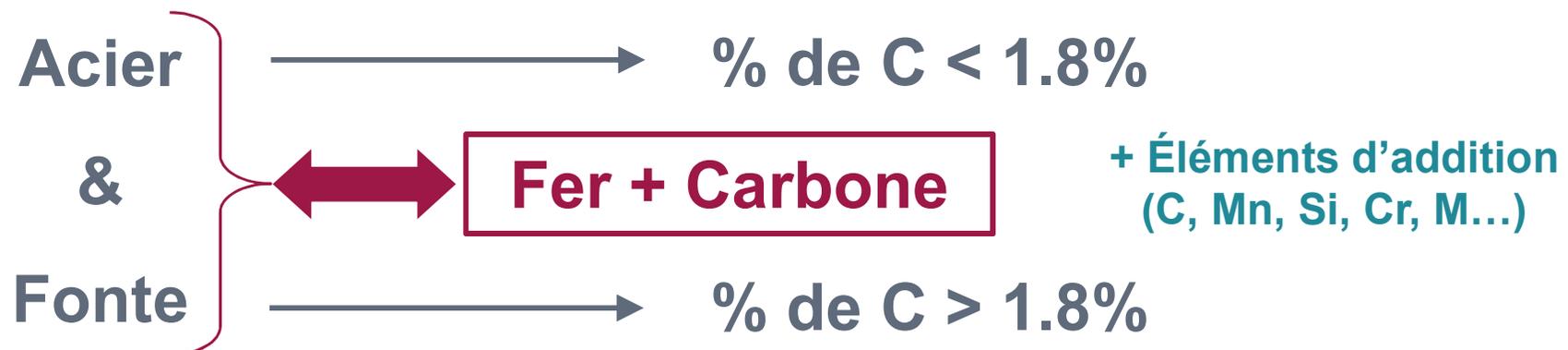
- élaboration de la fonte puis de la nuance de l'acier ;
- coulée de l'acier liquide suivie de sa solidification ;
- Mise en forme : recourt au laminage à chaud ou à froid.

### Composition du minerai

Oxyde ferritique ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ou magnétique ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) et gangue



### Constituant de l'acier et de la fonte

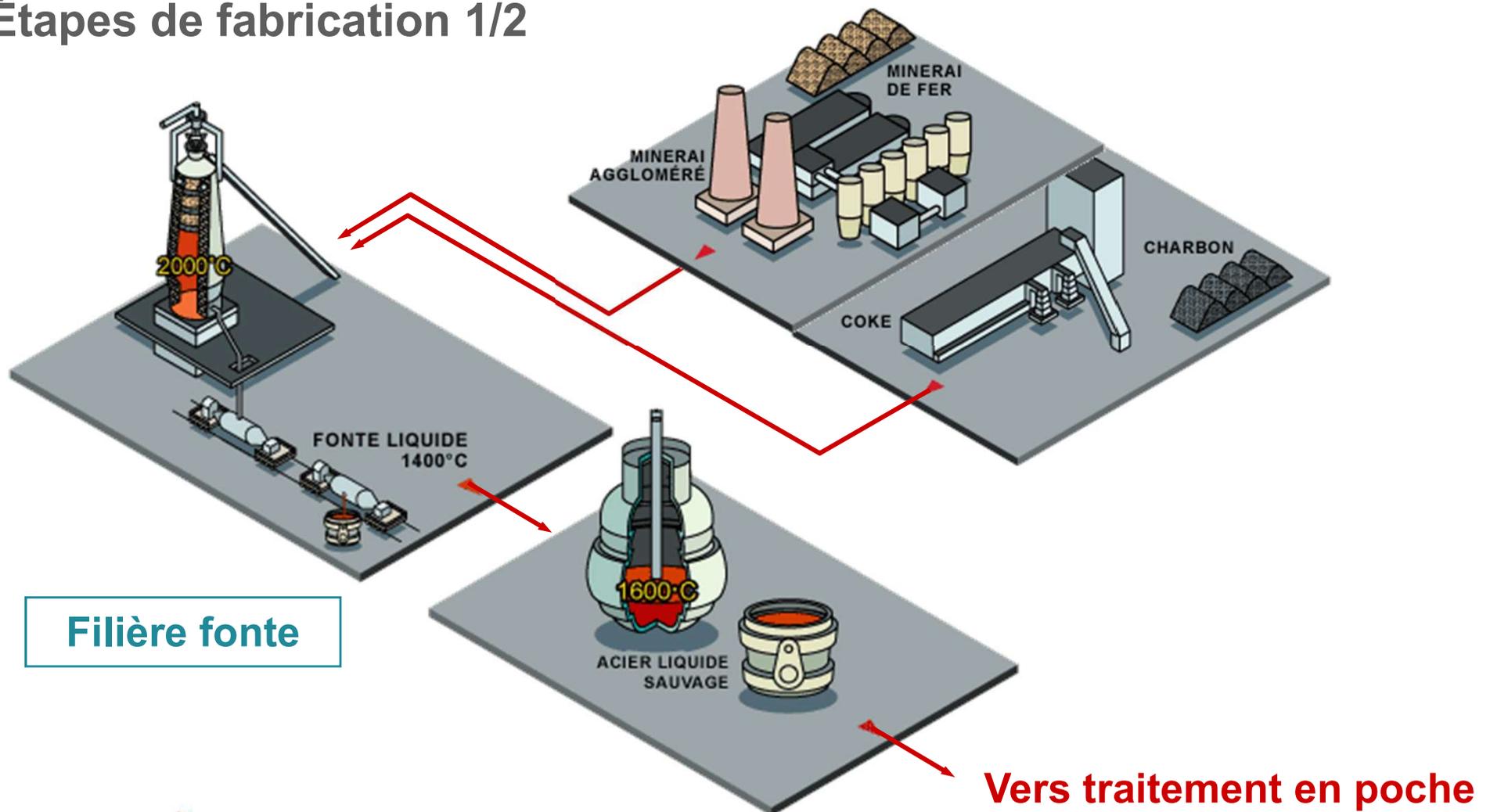


## Proportions

**1.6 t de minerai + 0.48 t de combustible**

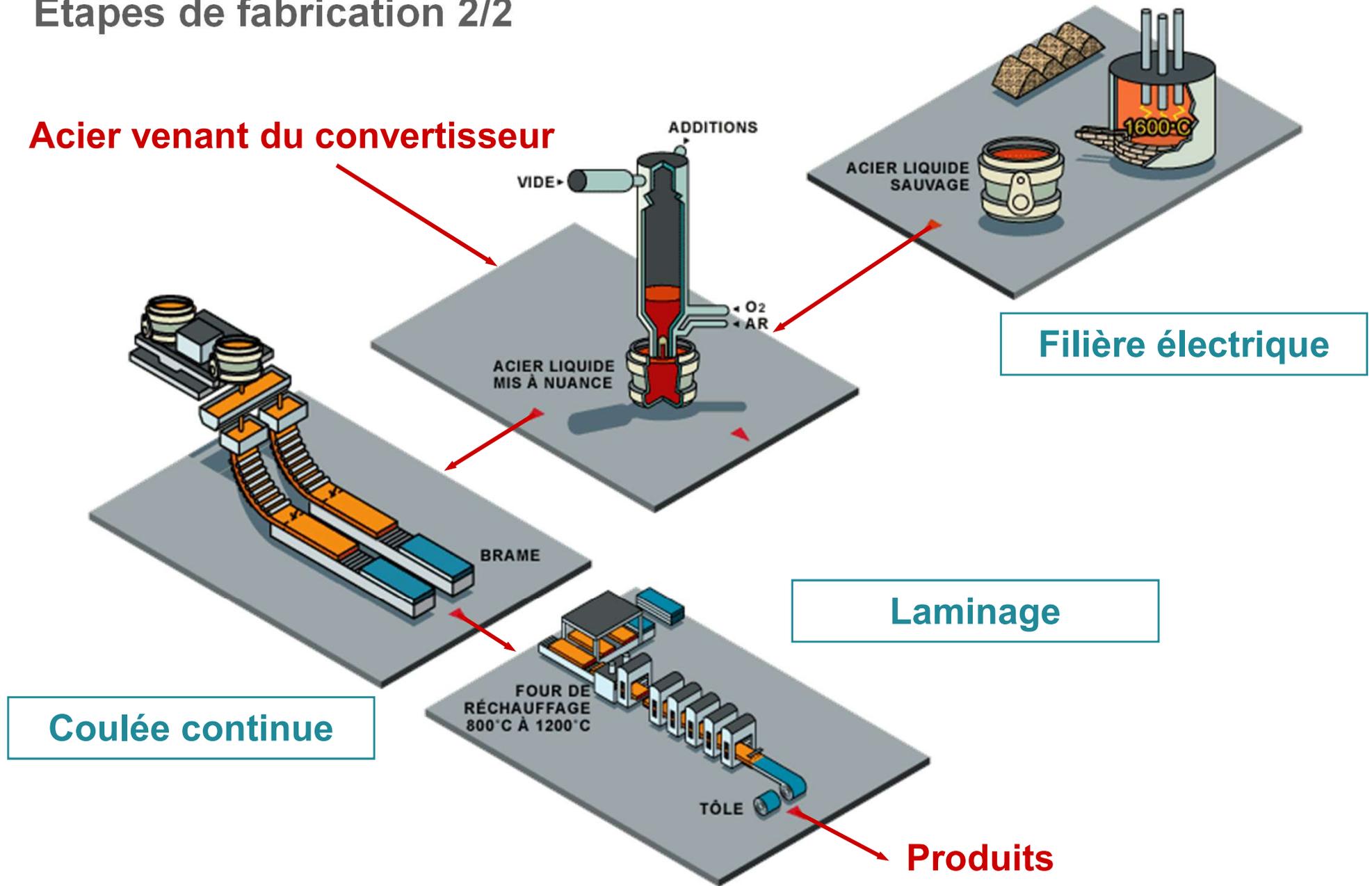
**➔ 1 t de fonte + 0.3 t de laitier**

## Étapes de fabrication 1/2



## Étapes de fabrication 2/2

Acier venant du convertisseur



Filière électrique

Laminage

Coulée continue

Produits

## 11 – OBTENTION DE L'ALUMINIUM

### Aluminium découverte du 20e siècle

- 3<sup>e</sup> élément de l'écorce terrestre après l'O<sub>2</sub> et le Si ;
- longtemps considéré comme métal précieux ;
- découverte de Heroult permet son développement.



### Composition du minerai

Alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), oxyde ferritique (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et silice, oxyde de titane, eau

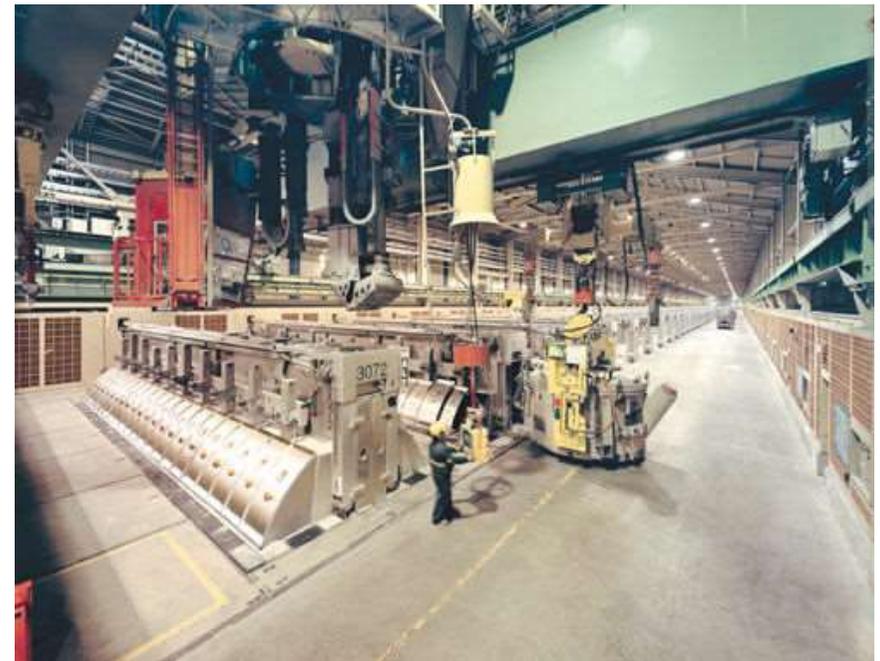
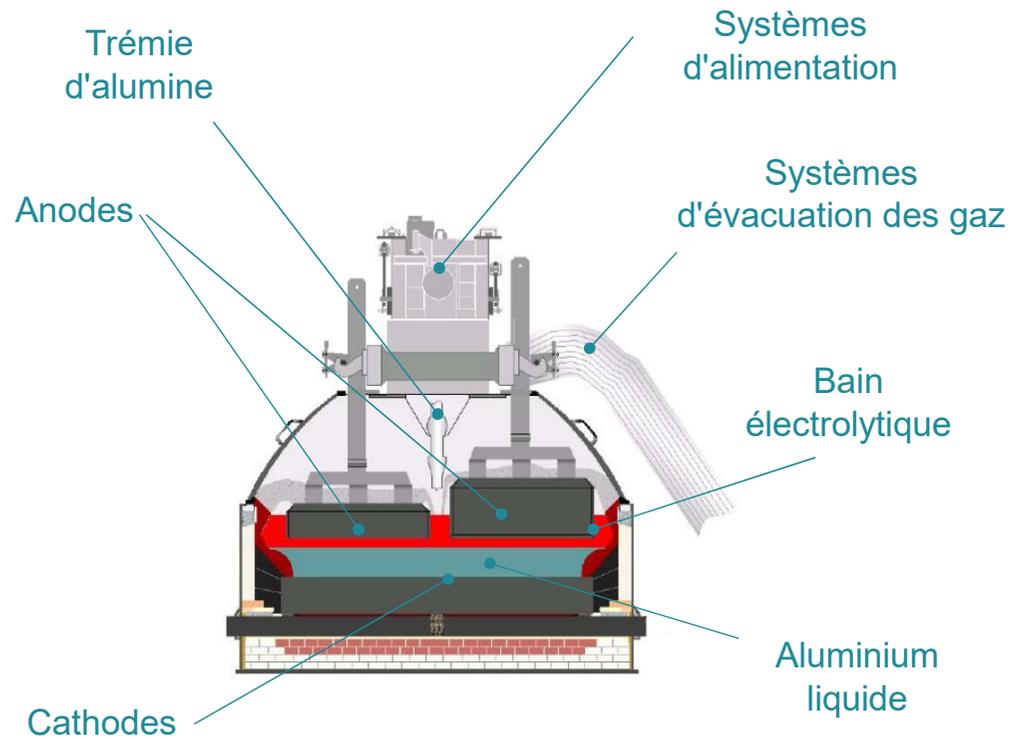


### Obtention de l'aluminium

- 5 étapes pour le procédé bayer afin d'extraire alumine du minerai (broyage, attaque, décantation, précipitation, calcination) ;
- fabrication de l'aluminium par électrolyse.

## Proportions

4 t de minerai  $\Rightarrow$  2 t d'alumine  $\Rightarrow$  1 t d'aluminium  
+ 14 000 kW/h



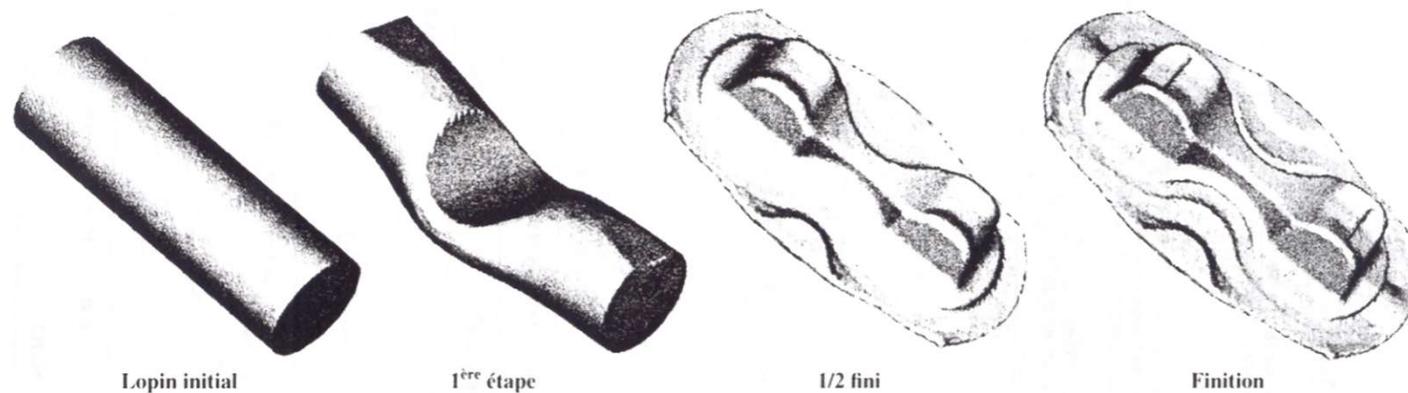
# 2 – FORGE

Comment fabriquer le produit ?

## 1 – DÉFINITION

Le forgeage est un procédé de **mise en forme par déformation plastique**. L'objectif est d'appliquer un effort permettant de dépasser la limite élastique du matériau :

- **sans outillage spécifique** ayant l'empreinte de la forme de la pièce ;
- **avec outillage spécifique** portant l'empreinte de la forme de la pièce.



Exemple : 3 étapes de forgeage

## 2 – PRINCIPES DE BASE

3 principes de bases pour le forgeage :

- Deux types de déformations :
  - Déformations élastique (non permanente);
  - Déformation plastique (permanente).
  
- **Déformation plastique par chocs ou pression** entre deux outils pour obtenir une forme souhaitée, tout en donnant au matériau une amélioration de ses propriétés dans certaines directions (fibrage);
  
- Les déformations sont réalisées à chaud (tableau) ou à froid (température ambiante).

Alliages Légers	Alliages de magnésium	Cuivre	Bronze	Acier
360 à 490 °C	350 à 430 °C	800 à 880°	680 à 870 °C	1050 à 1250 °C

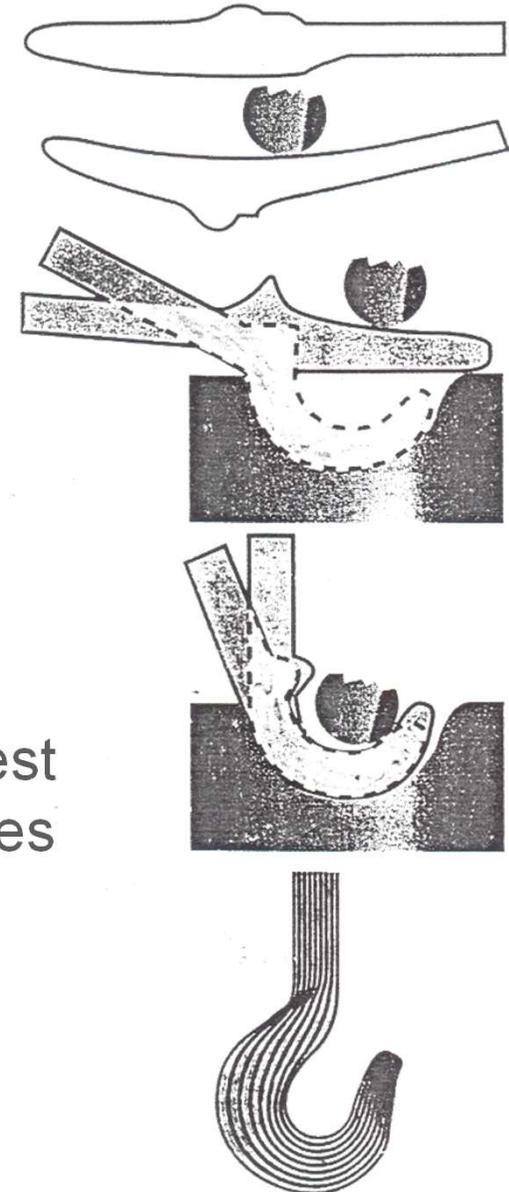
## Exemple de fibrage

Coupe transversale du  
crochet



L'orientation de la structure ou fibrage est généralement déterminée en fonction des contraintes de service de la pièce.

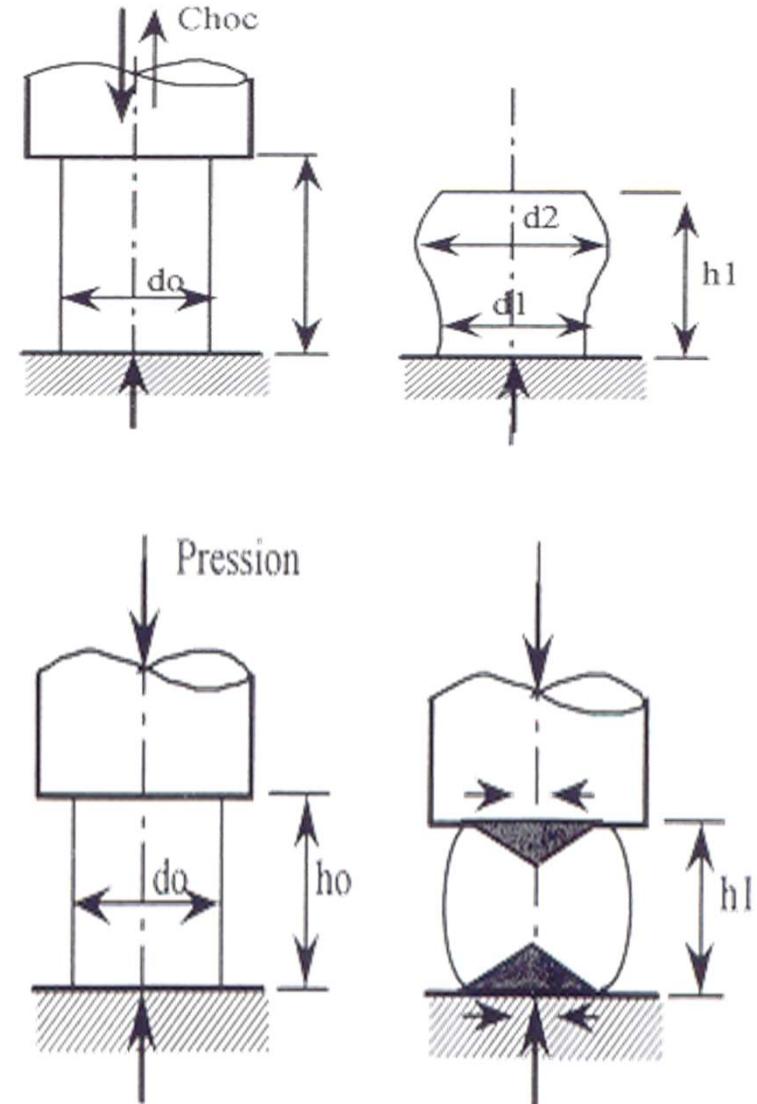
 **QUALITE de la pièce**



### 3 – MODE D'ACTION

2 modes de travail se distinguent :

- Travail par chocs (pilon) :
  - vitesse du tas : plusieurs m/s ;
  - la déformation se localise au voisinage de l'impact.
  
- Travail par pression (presse) :
  - vitesse du tas : 10 à 100 mm/s ;
  - symétrie de la déformation de part et d'autre du plan médian du lopin.



## 4 – FORGE LIBRE

La forge libre est définie par la déformation plastique à chaud de lingots, barres... à l'aide d'outils simples pour réaliser une pièce ou une ébauche de pièce.

Les intérêts sont multiples :

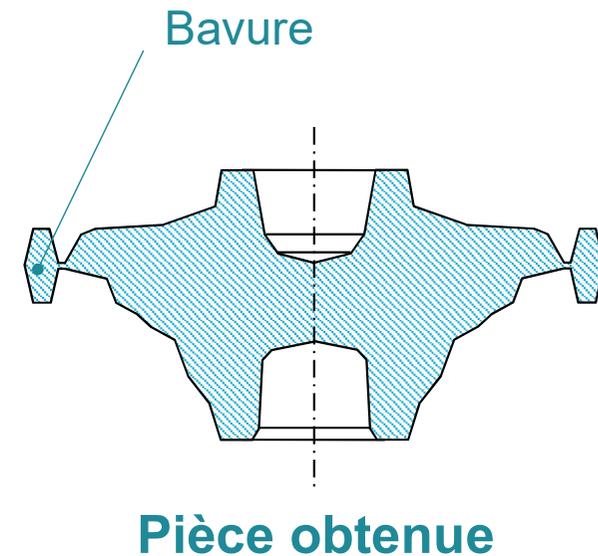
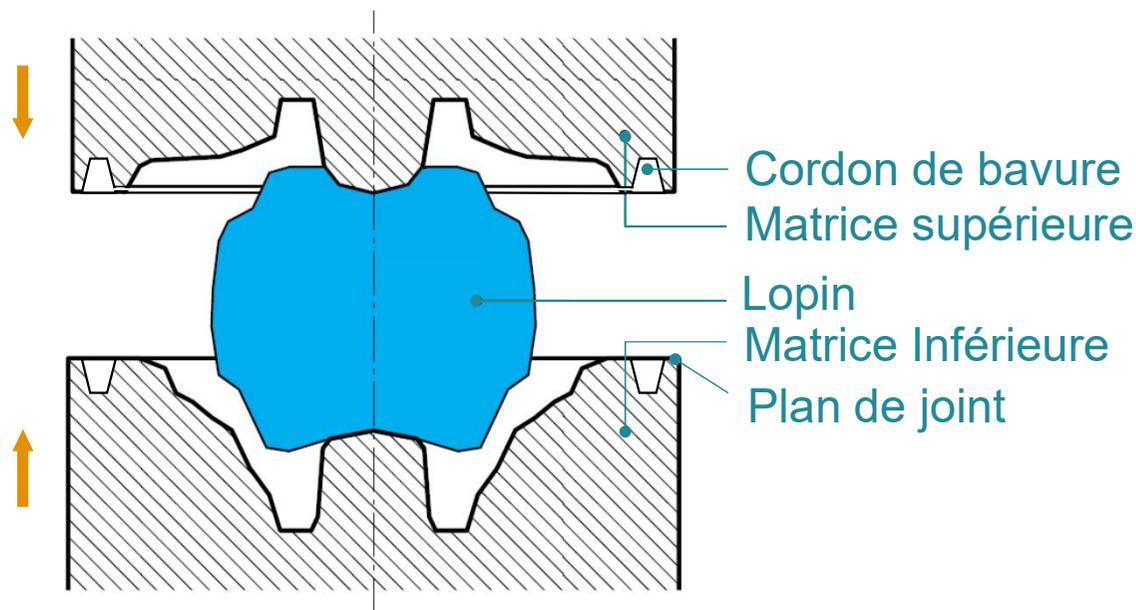
- grande souplesse de production (pièces de quelques grammes à plusieurs tonnes) ;
- mise en œuvre rapide sans création d'outillage ;
- réalisation de grosses pièces (> 15 t) ;
- automatisation des presses (production de séries précise).



## 5 – ESTAMPAGE ET MATRIÇAGE

Après chauffage à haute température d'un lopin, celui-ci est comprimé entre **deux matrices comportant des gravures en creux et en relief** :

- **estampage** : pour les pièces en acier, alliage de nickel et de cobalt ;
- **matriçage** : pour les pièces en alliage d'aluminium, de magnésium, de cuivre ou de titane.



Un procédé complet d'estampage (ou matriçage) comprend :

- des opérations préparatoires (étirage, cambrage...);
- l'estampage (ébauche et finition);
- des opérations de finition (ébavurage...).

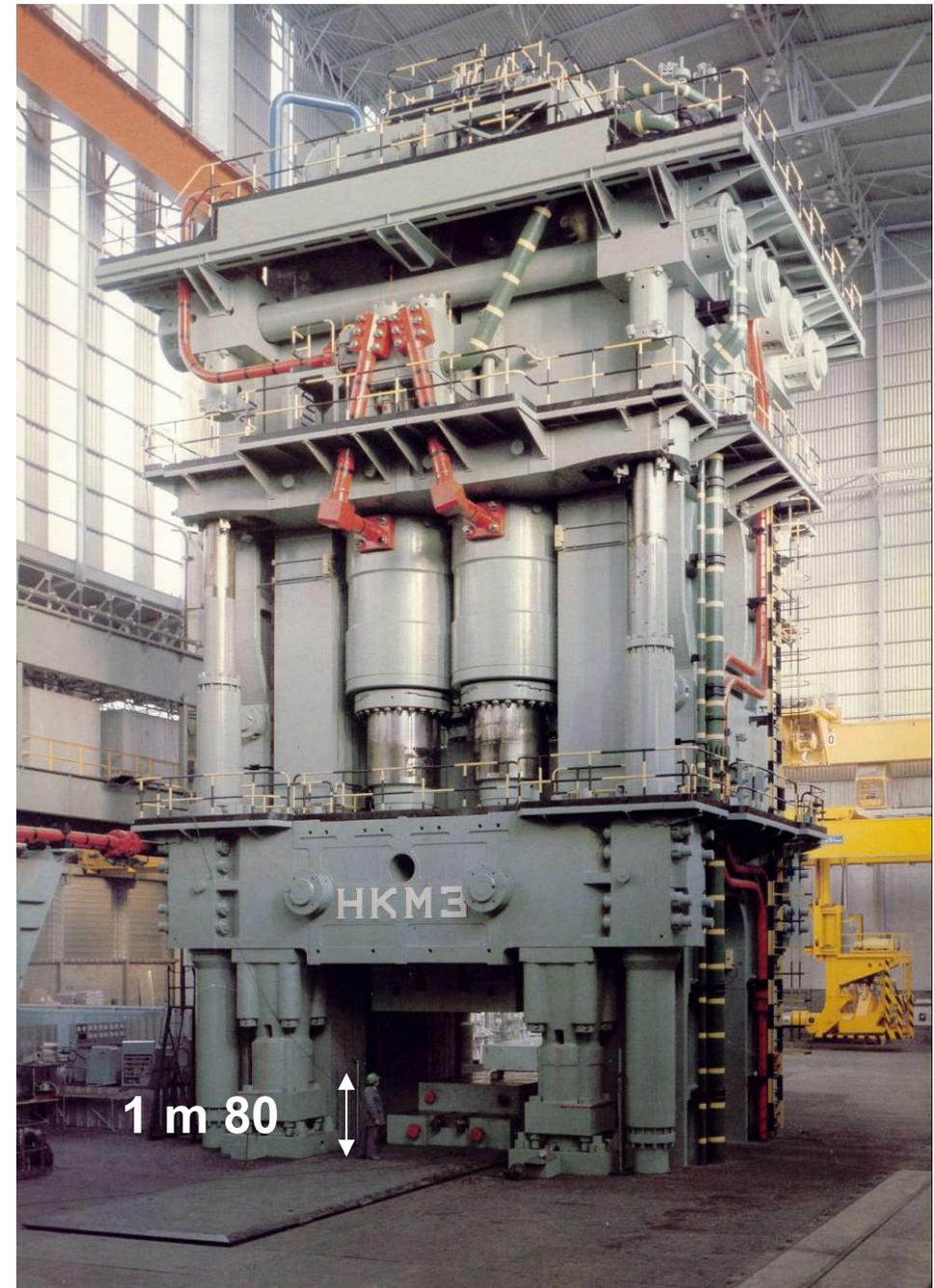


Exemples de gamme d'estampage (bielle automobile)



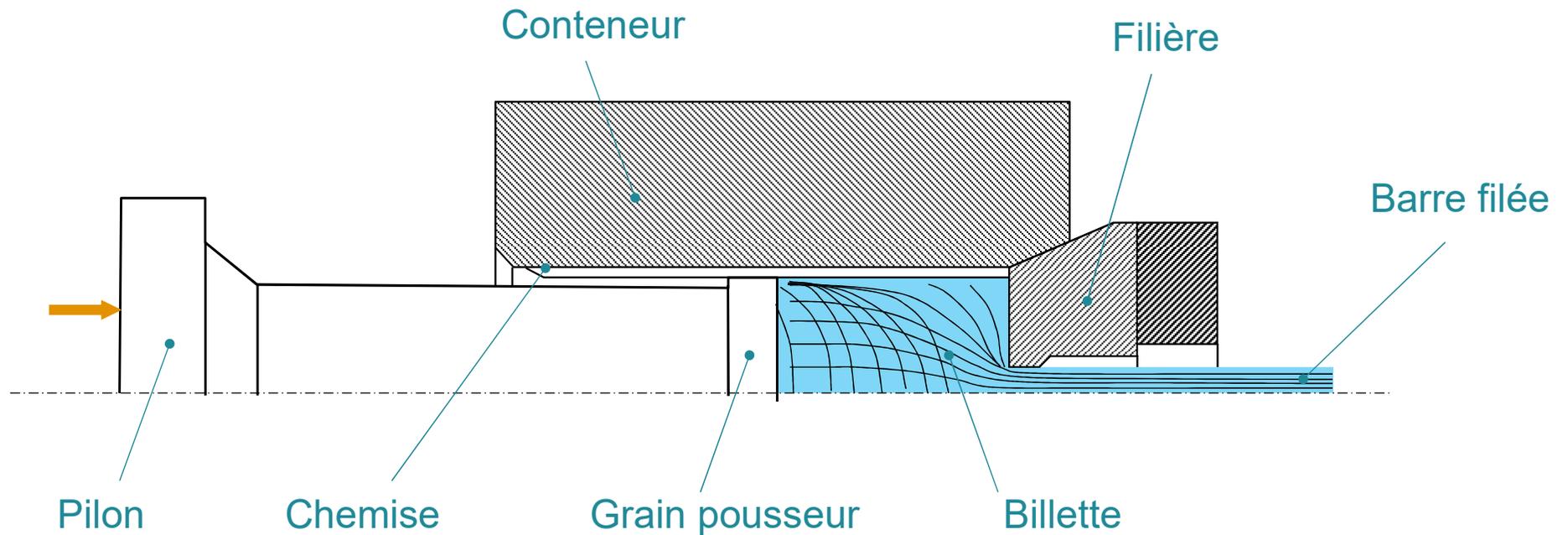
## Presse de 65000 t !

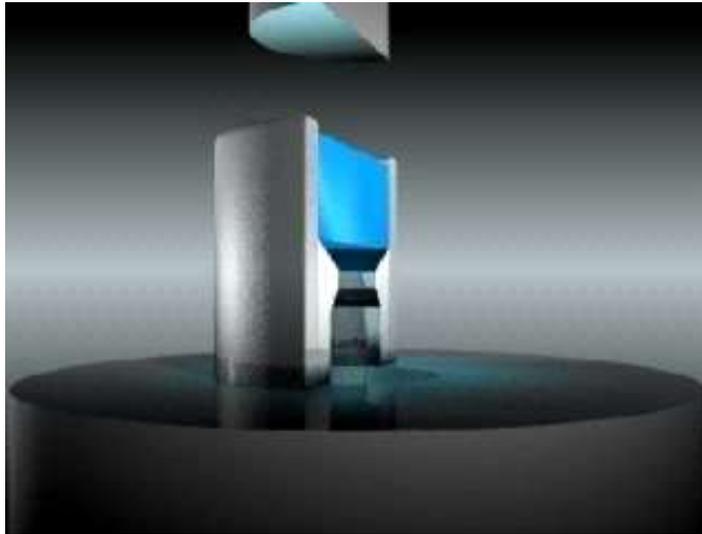
- Interforge (Issoire – 63)
- Poids : 12 000 t  
(2 fois la Tour Eiffel)
- Hauteur totale : 48 m (36 m en surface)
- 5 cylindres :  
1.65 m de diamètre
- Surface de travail :  
3.5 x 6 m
- Vitesse de travail :  
2 à 50 mm/s



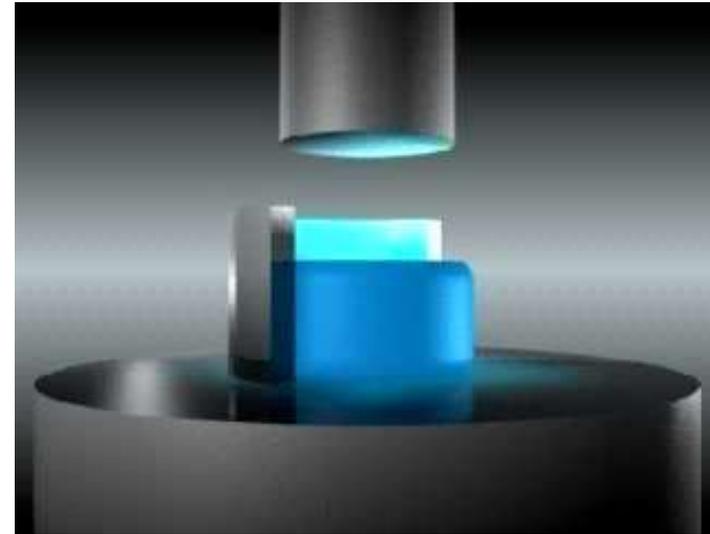
## 6 – EXTRUSION

Sous un effort de compression entre un poinçon (ou pilon) et une **filière**, le métal d'un lopin s'écoule en produisant des pièces définie par celle de l'**outillage**. Il se réalise à chaud (aluminium), à mi-chaud ou à froid.

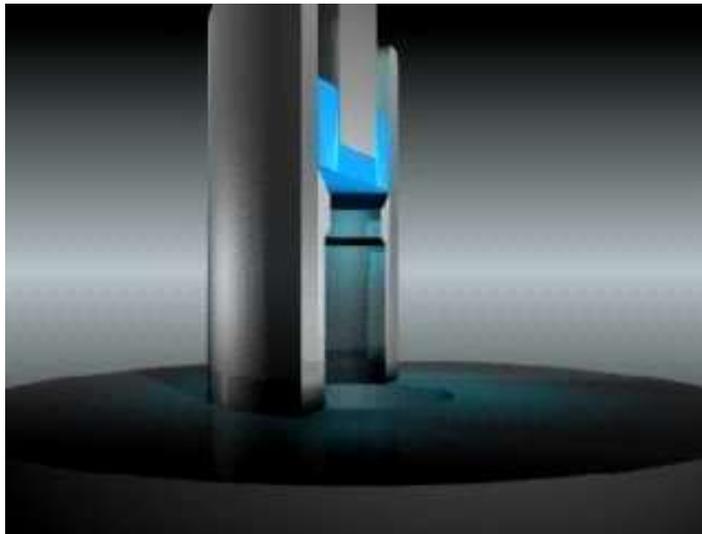




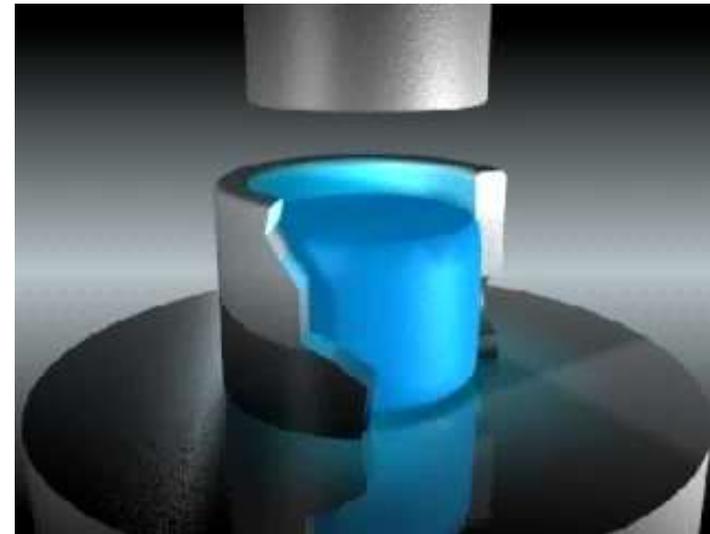
Filage direct



Filage inverse



Étirage

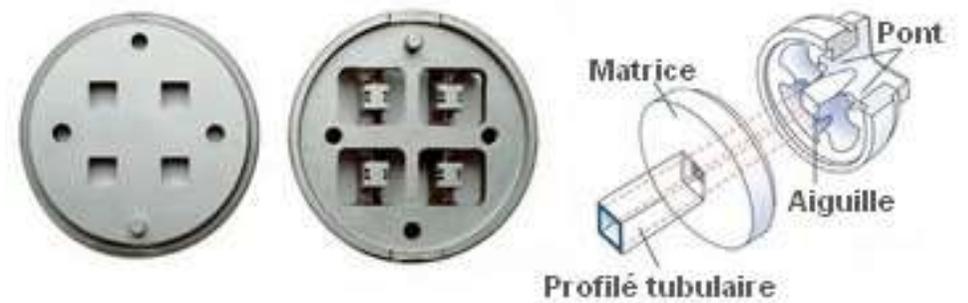


Filage latéral

## Exemples d'extrusion



## Exemples de filières



Procédés de forgeage	Formes	Masses	Températures	Matériaux	Séries
<b>Libre</b>	toutes	de quelques kilogrammes à plusieurs tonnes	élevées, mais toujours inférieures au solidus métaux ferreux	tous	unitaire et faible série
<b>Extrusion</b>	Principalement de révolution et des profilés	de quelques grammes à plusieurs kilogrammes	ambiante 20 °C ou 500 °C pour l'aluminium	aciers à bas carbone et faiblement alliés; alliages légers et cuivreux	à partir de quelques milliers de pièces, selon la forme et la masse
<b>Estampage</b>	toutes	de quelques grammes à plusieurs centaines de kilogrammes	élevées, mais toujours inférieures au solidus	métaux ferreux	à partir de quelques centaines de pièces, selon la forme
<b>Matriçage</b>	toutes	de quelques grammes à plusieurs centaines de kilogrammes	élevées, variables selon la nature du matériau	métaux non ferreux	à partir de quelques pièces, selon la forme

# 3 – FONDERIE

Comment fabriquer le produit ?

## 1 – DÉFINITION

Le principe de la fonderie est de couler un métal ou alliage en fusion dans un moule pour obtenir après solidification des pièces :

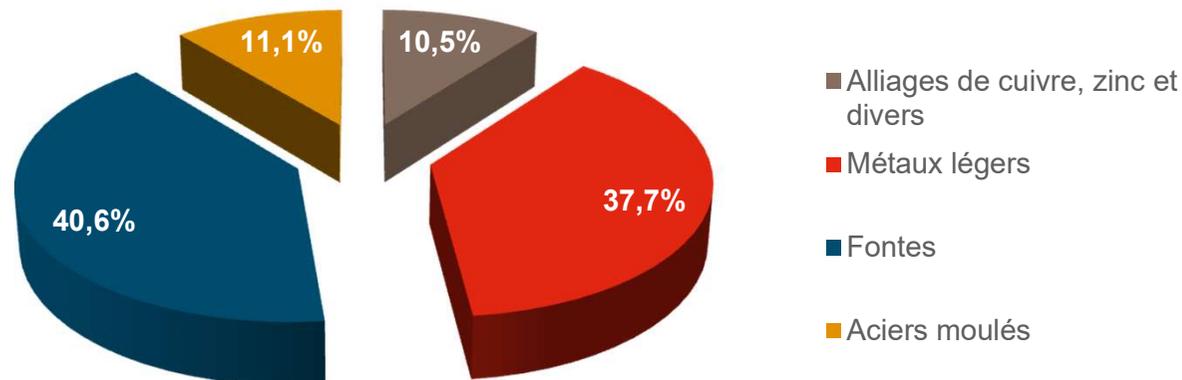
- de forme complexes pleines ou creuses ;
- de précision dimensionnelle allant de quelques mm à quelques 1/10 de mm ;
- de tailles variées (de quelques grammes à plusieurs tonnes) ;
- de série allant de une à plusieurs milliers.



## 2 – ALLIAGES DE FONDERIE

Les alliages utilisés en fonderie sont (en rouge la température de fusion) :

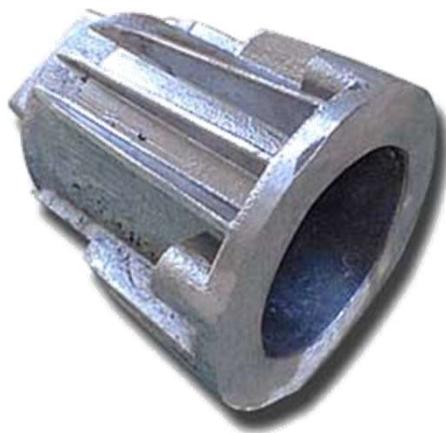
- Alliages ferreux :
  - fontes – 1500 °C (2,5 à 4 % de C) ;
  - aciers – 1700 °C (- de 0,5 % de C).
- Alliages non ferreux :
  - alliages cuivreux – 1200 °C (bronze, laiton, cupro-aluminium) ;
  - alliages légers (aluminium) – 700 °C (avec 5 à 25 % de silicium ou 5 à 8 % de cuivre ou 3 à 6 % de magnésium).



### 3 – CARACTÉRISTIQUE PRINCIPALE

Il y a quatre classes de problèmes à résoudre pour déterminer un procédé de fonderie :

- fabrication du moule ;
- fusion et remplissage de l'empreinte ;
- refroidissement de l'alliage dans le moule ;
- extraction de la pièce.



Carter de 800 g

**Les problèmes  
seront différents!**



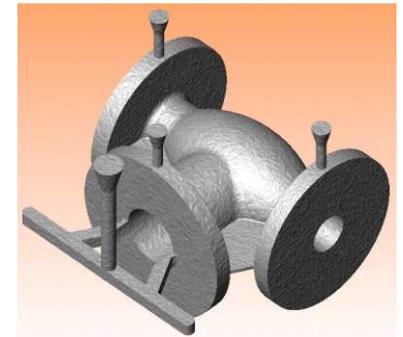
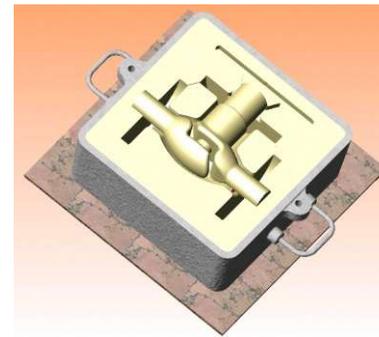
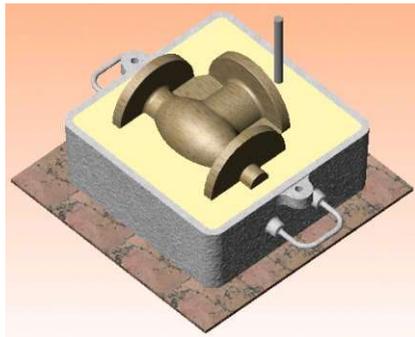
Turbine de 40 Kg

## 4 – FABRICATION DU MOULE

Les possibilités sont :

- Moules non permanent (usage unique) : en sable ou en céramique

➡ Le moule est détruit pour extraire la pièce



- Moules permanent (usage multiple) en métal

➡ Le moule est ouvert pour libérer la pièce

Remarque : les parties creuses de la pièce sont réalisées par des éléments rapportés du moule appelés noyaux.

## 5 – REMPLISSAGE DE L'EMPREINTE

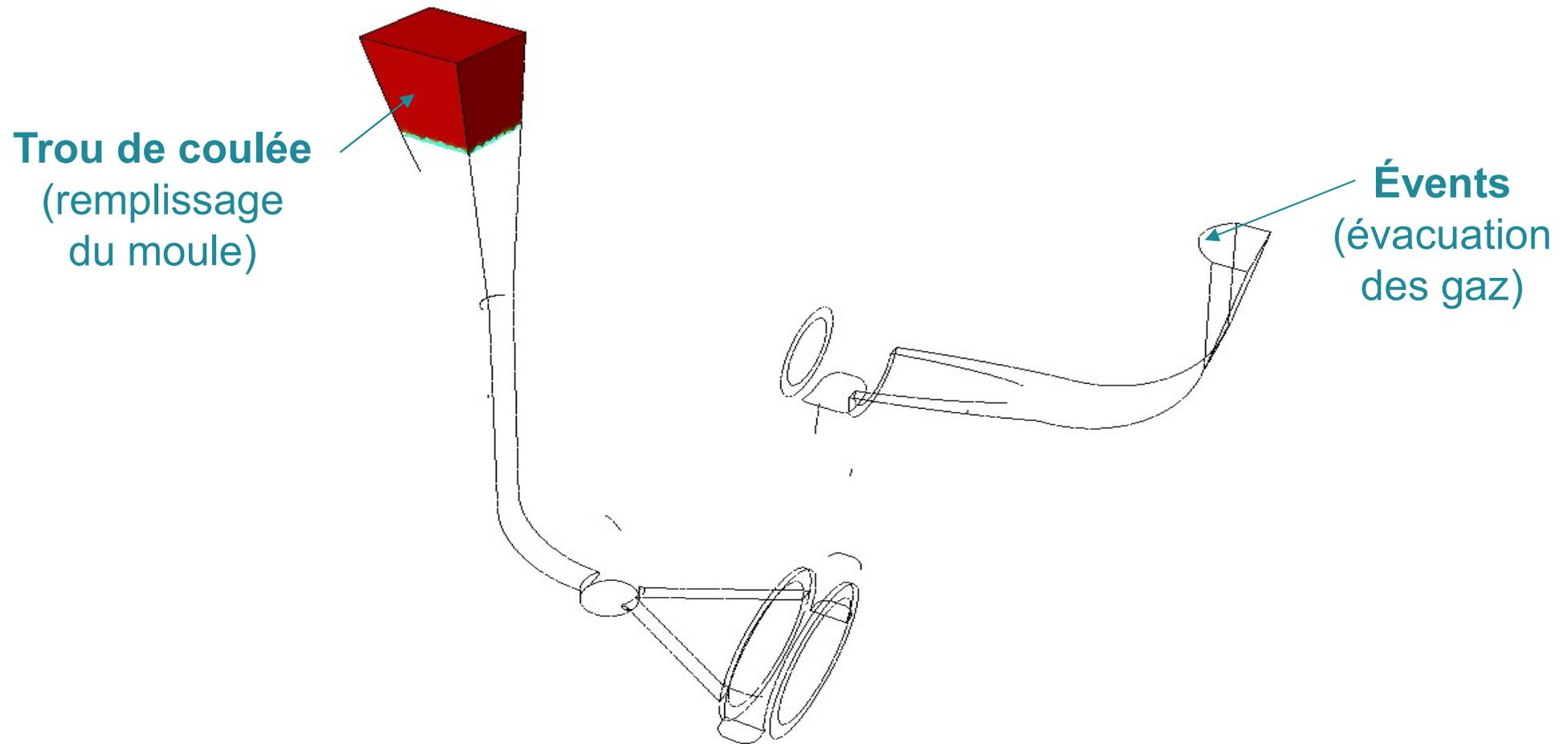
Les contraintes sont :

- la pression de remplissage :
- gravité ;
- pression extérieure.

L'évacuation des gaz enfermés dans le moule :

- canaux dans le moule appelés **évents** ;
- porosité du moule ;
- coulée sous vide.

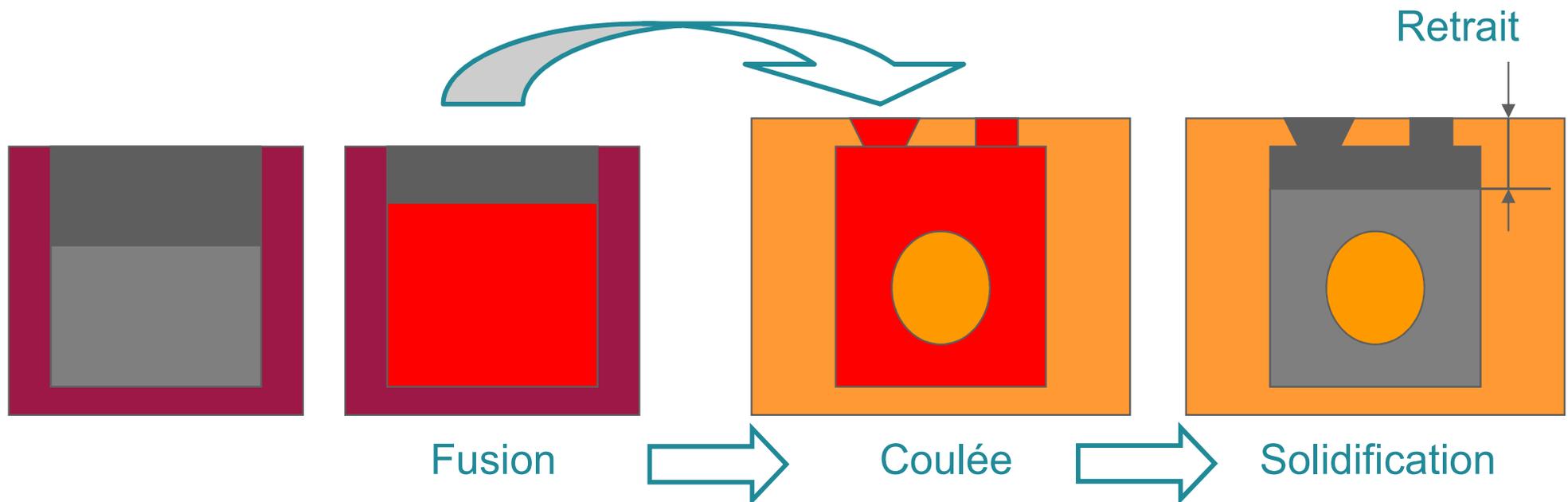
## Exemple : remplissage par gravité



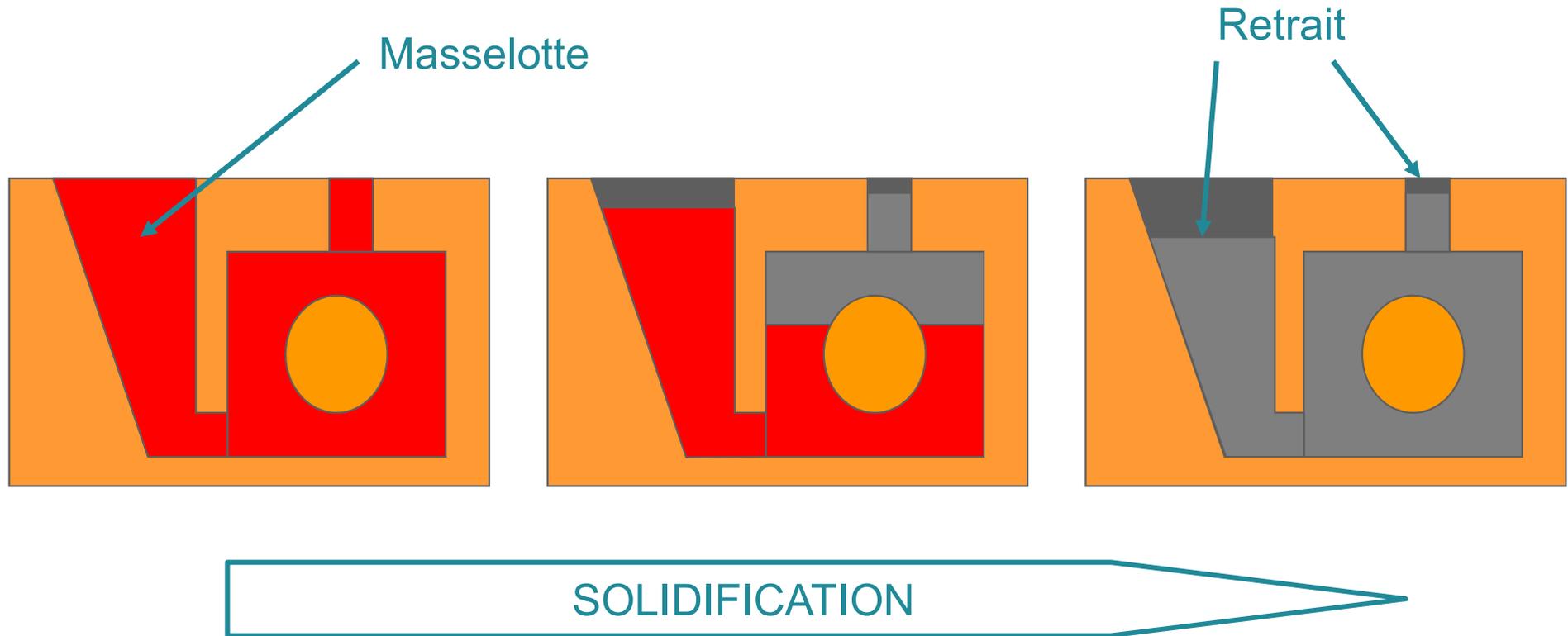
## 6 – REFROIDISSEMENT DE L'ALLIAGE

La problématique est de contrôler le refroidissement. Pourquoi ?

La fusion du métal engendre une dilatation volumique (thermique + changement de phase). Celui est coulé dans le moule, puis il se solidifie entraînant une **contraction volumique appelé retrait** (de 6 à 15 %).

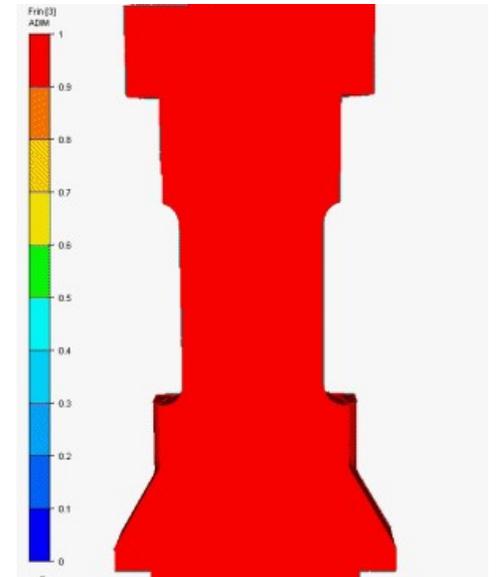


La solution consiste à créer une réserve qui alimente la pièce en métal liquide pendant la solidification : **c'est la masselotte**.



Le refroidissement non contrôlé est l'origine des défauts de fonderie :

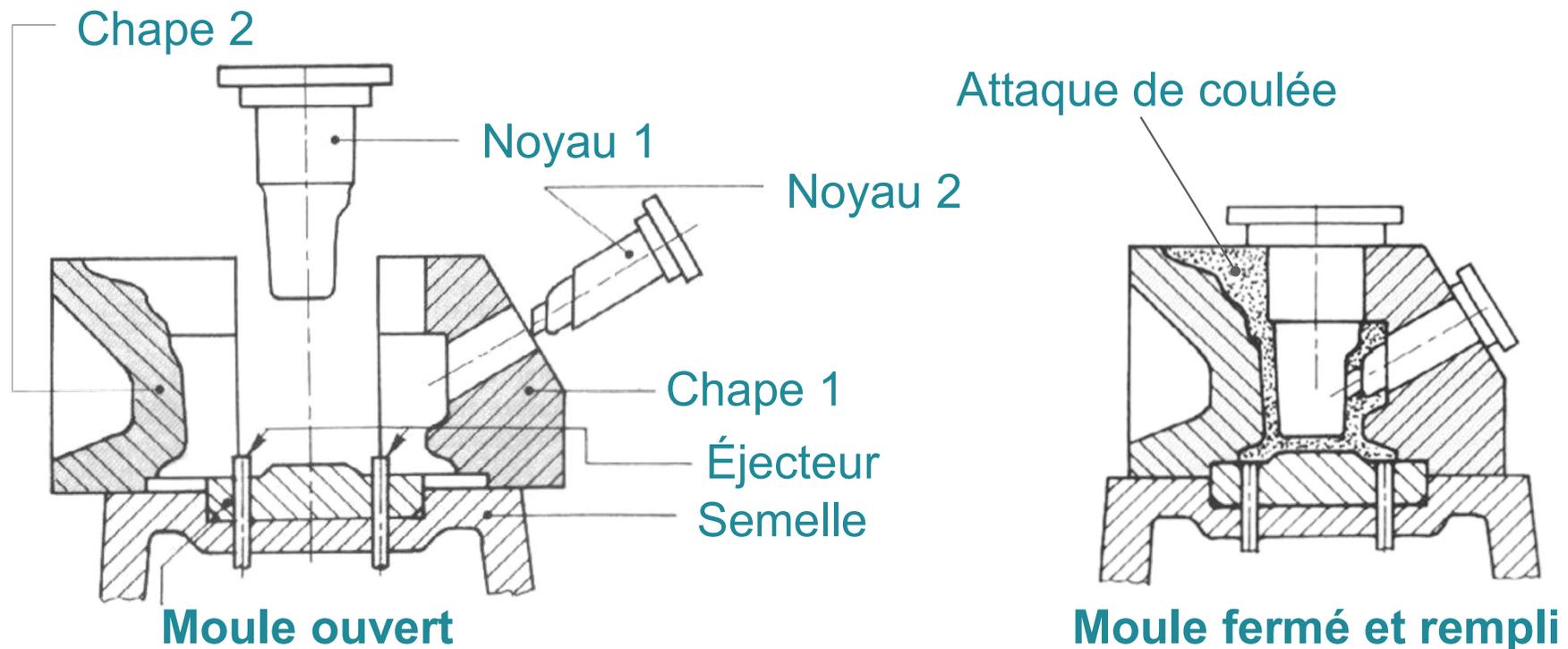
- **les criques** : rupture partielles résultant d'inégalités de retrait ;
- **les retassures** : cavités en profondeur ou en surface dues aux variations inégales du volume lors de la solidification ;
- **les piqûres et les soufflures** : défauts d'origine gazeuse ;
- **les malvenues** : manque de matière sur le pièce du au remplissage incomplet du moule.



## 7 – EXTRACTION DE LA PIÈCE

L'extraction de la pièce est réalisée :

- Par destruction du moule (moule non permanent) ;
- Par ouverture du moule (moule permanent) :
  - complexité du moule comprenant de nombreuses parties ;
  - dépouilles pour extraire la pièce.



0%

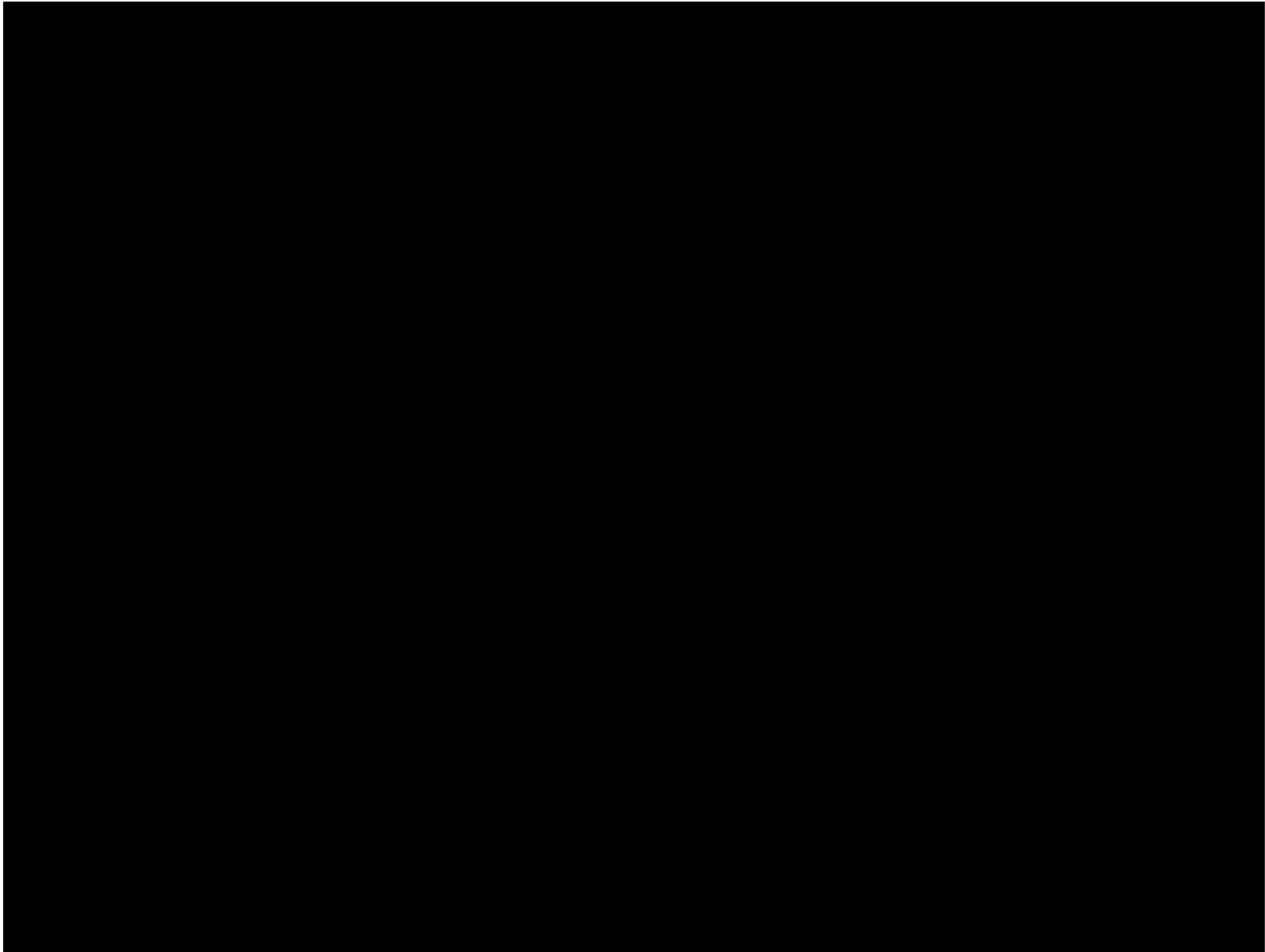


## 8 – PRINCIPAUX PROCÉDÉS DE FONDERIE

Les principaux procédés de fonderie sont :

- En moule non permanent :
  - moulage au sable ;
  - moulage à la cire perdue ;
  - moulage avec modèle gazéifiable.
- En moule permanent :
  - moulage en coquille par gravité ;
  - moulage sous pression ;
  - moulage par centrifugation ;
  - moulage basse pression.

Procédés de fonderie	Moule	Remplissage	Refroidissement	Extraction	Remarques
<b>Sable</b>	Non permanent au sable Modèle permanent en bois ou en métal	Par gravité	Naturel Évacuation des gaz par événements et porosité du moule	Destruction du moule	Dépouille sur modèle pour son extraction
<b>Cire perdue</b>	Non permanent céramique Modèle non permanent en cire	Par gravité	Naturel Évacuation des gaz par événements ou coulée sous vide	Destruction du moule	Pas de dépouille Très bonne qualité
<b>Coquille</b>	Permanent en métal Modèle numérique	Par gravité	Naturel Évacuation des gaz par événements	Ouverture du moule	Dépouille sur pièce pour son extraction
<b>Sous pression</b>	Permanent en métal Modèle numérique	Sous pression grâce à un vérin	Naturel et circulation d'eau Évacuation des gaz par chambre spé.	Ouverture du moule	Dépouille sur pièce pour son extraction



## À RETENIR

La fonderie c'est :

- une grande variété de pièces et de formes ;
- des procédés adaptés à la petite comme à la grande série ;
- une conception rigoureuse en fonction du procédé :
  - épaisseurs constantes, rayons...
  - dépouilles naturelles sur la pièce...

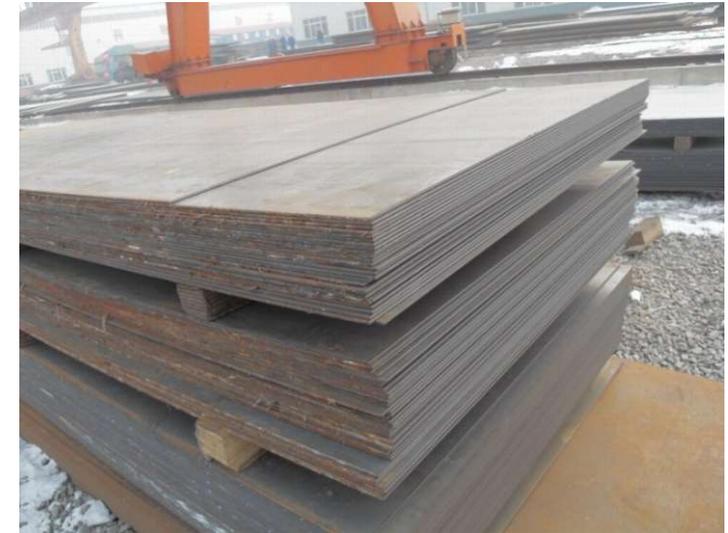
# 4 – MÉTAUX EN FEUILLES ET SOUDURE

Comment fabriquer le produit ?

## 1 – INTRODUCTION

Les procédés de transformation des métaux en feuille sont les procédés permettant de transformer les métaux en plaque ou en tôle de quelques 1/10 de millimètres à un mètre d'épaisseur, principalement :

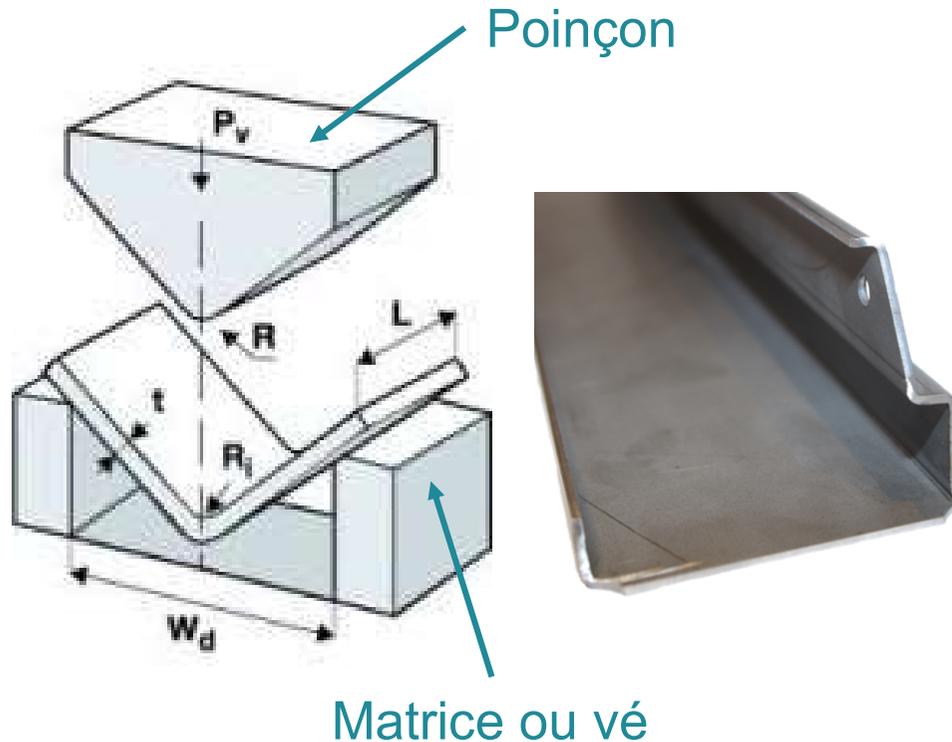
- Pliage ;
- Emboutissage ;
- Découpe ;
- Soudure.



## 2 – PROCÉDÉS DE PLIAGE

C'est un procédé qui consiste à déformer de la tôle selon un pli :

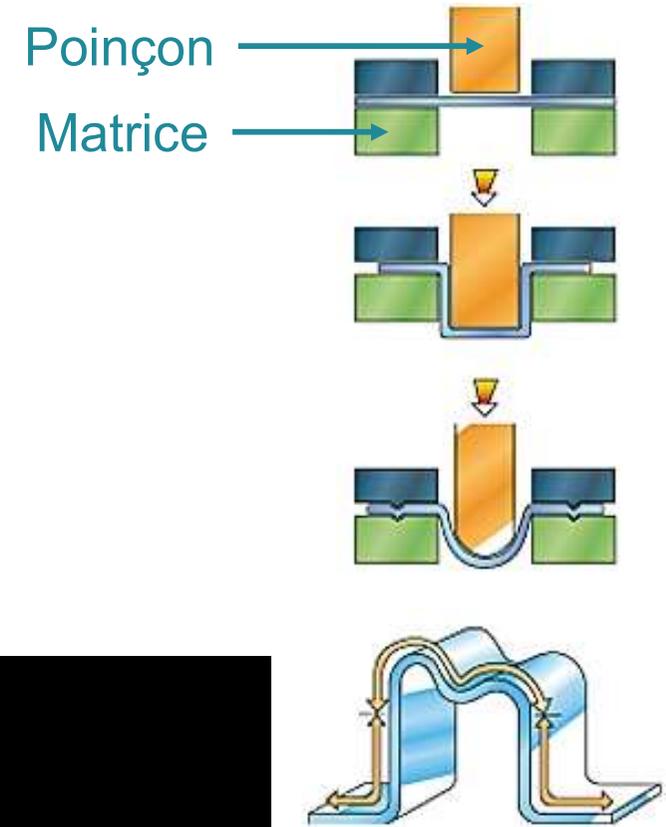
- le pliage en l'air est défini lorsque c'est la course de la plieuse qui détermine l'angle de pliage ;
- le pliage en frappe est défini quand le poinçon vient frapper le vé, l'angle est ainsi déterminé par le vé (ou matrice).



### 3 – EMBOUTISSAGE

L'emboutissage est une technique de fabrication permettant d'obtenir à froid, à partir d'une feuille de tôle plane et mince, un objet dont la forme n'est pas développable.

Ce procédé de fabrication est très utilisé dans l'industrie automobile, et dans l'électroménager...



## 4 – PROCÉDÉS DE DÉCOUPE

Les procédés de découpe permettent de réaliser des formes complexes, des trous ou des encoches par enlèvement de matière dans divers matériaux : métaux, papier, composite, bois, aliment, mousse...

Et dans des épaisseurs de quelques 1/10 de millimètres à 1 mètre.

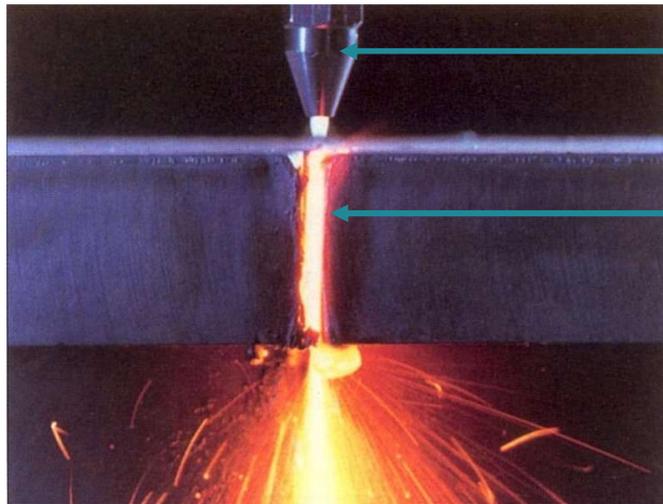
- Par effet thermique :
  - Oxycoupage ;
  - Laser ;
  - Plasma...
- Par effet mécanique :
  - Poinçonnage ;
  - Cisailage ;
  - Jet d'eau...

## Oxycoupage

L'oxycoupage est un procédé de découpe des métaux, par oxydation localisée et continue, à l'aide d'un jet d'oxygène pur.

Le point de la pièce où la coupe est débutée, est porté à une température d'environ 1 300 °C, dite température d'amorçage (ou d'ignition) par un chalumeau, puis apport d'oxygène :

- découpe manuelle ou automatisée selon un gabarit de coupage ;
- utilisé pour la découpe des aciers ;
- de quelques millimètre à près de 1 mètres d'épaisseur.



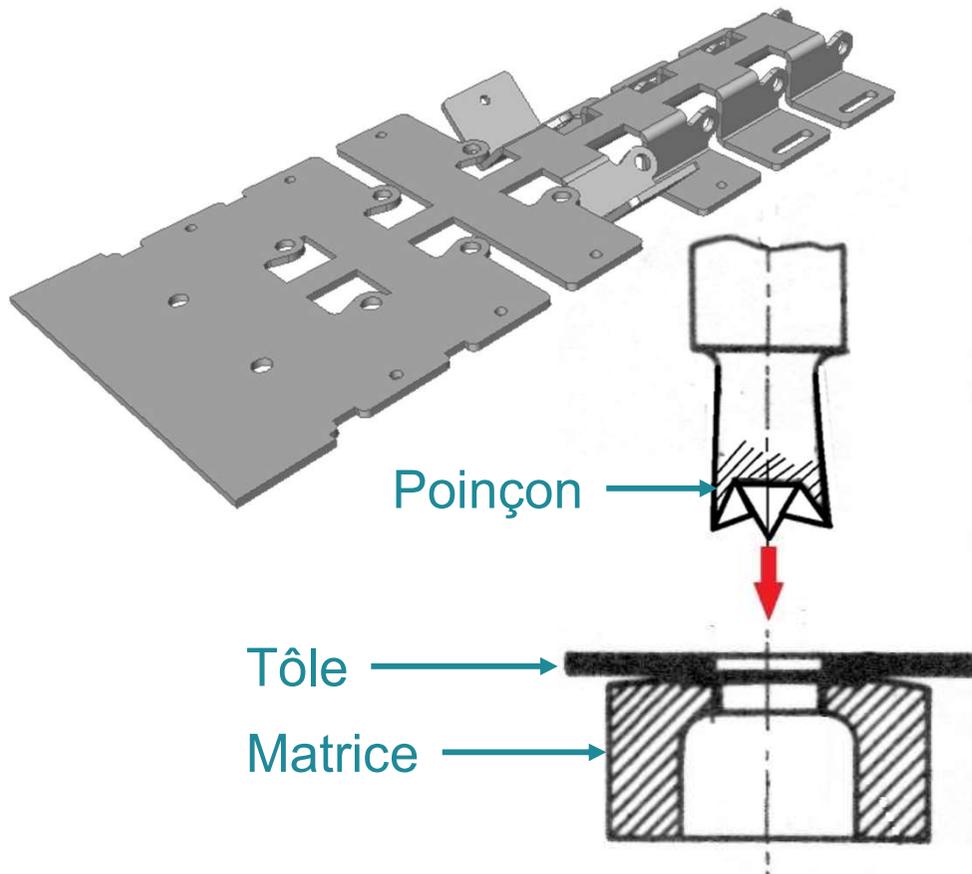
Chalumeau

Saignée



## Poinçonnage

Le poinçonnage est procédé par cisailage des tôles. La tôle est coincée entre un poinçon et une matrice. La descente du poinçon dans la matrice découpe le matériau comme le ferait une paire de ciseaux.



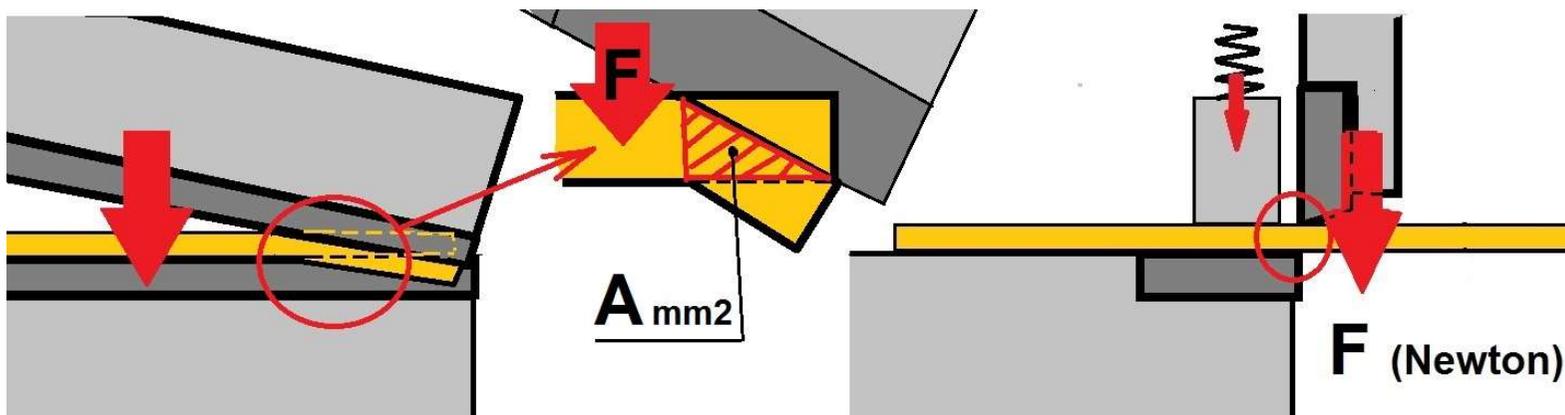
## Cisailage

Le cisailage est une technique de découpage de tôles métalliques en particulier.

La tôle est cisailée entre deux lames : l'une fixe et l'autre mobile, sans formation de copeaux.



### Cisaille de type guillotine



## **5 – PROCÉDÉS DE SOUDURE**

Le terme soudure désigne un ensemble de procédés d'assemblage de pièces mécaniques (tôle, barre, profilé) généralement par chauffage.

### **Le soudage des métaux :**

- technique d'assemblage permanent qui établit la continuité métallique entre les pièces soudées ;
- la soudure est également le nom donné au joint formé par la fusion des bords des pièces à souder entre elles ;
- avec ou sans adjonction d'un métal d'apport ;
- beaucoup de métaux sont soudables : les aciers, le cuivre, l'aluminium, le nickel et leurs alliages.

### **Le soudage des plastiques :**

- les thermoplastiques sont soudables (PVC, polypropylène, ABS, le polyéthylène et les acryliques)
- il existe divers procédés utilisant ou non des produits d'apport.

Soudage à la flamme

Soudage aluminothermique

Soudage électrique par résistance

Soudage à l'arc électrique avec  
électrodes enrobées

Soudage à l'arc avec électrodes  
non fusibles

Soudage à l'arc avec fil  
électrodes fusibles ou soudage  
semi-automatique

Soudage orbital

Soudage laser

Soudage plasma

Soudage par faisceau d'électrons

Soudage par friction

Soudage par friction malaxage ou  
soudage thixotropique

Soudage à l'arc sous flux

Soudage hybride

Soudage électrogaz

Soudage par diffusion

Soudage par explosion

Soudage par impulsion  
magnétique

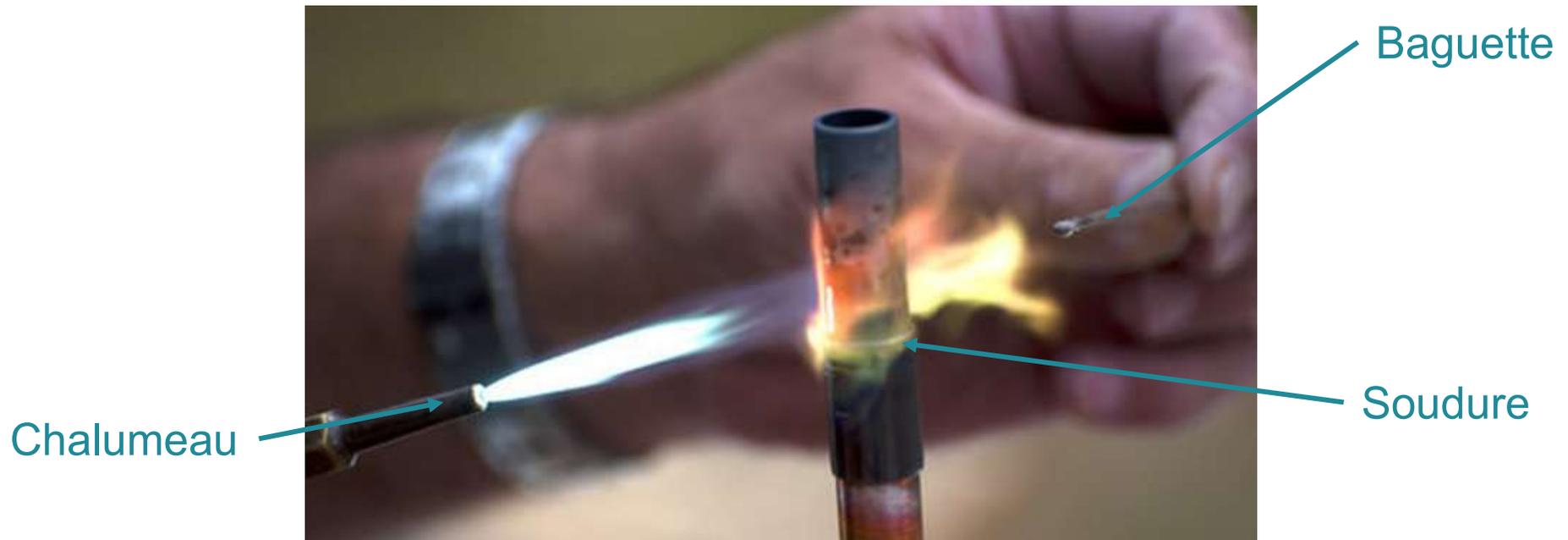
Soudage par ultrasons

Brassage

## Soudage à la flamme

L'énergie thermique, générée par l'oxy-combustion d'un mélange gazeux combustible et comburant (par exemple acétylène et oxygène), focalisée à la sortie de la buse du chalumeau, est utilisée pour faire fondre les bords à souder :

- sans métal d'apport ;
- avec métal d'apport : baguette métallique.



## Soudage électrique par résistance

Le soudage est réalisé par la combinaison d'une forte intensité électrique et d'une pression ponctuelle.

Ce procédé ne nécessite pas d'apport extérieur de matière. L'intensité électrique chauffe la matière jusqu'à la fusion par effet joule.

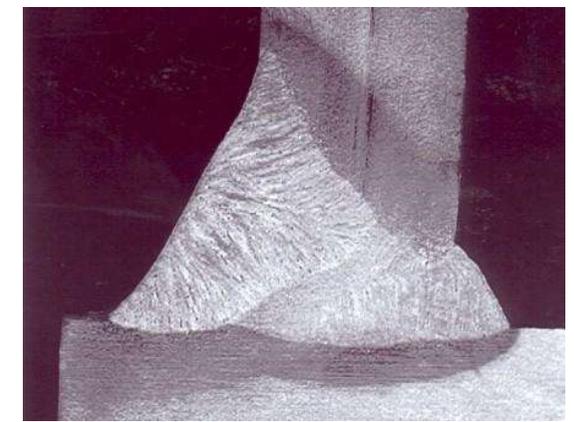
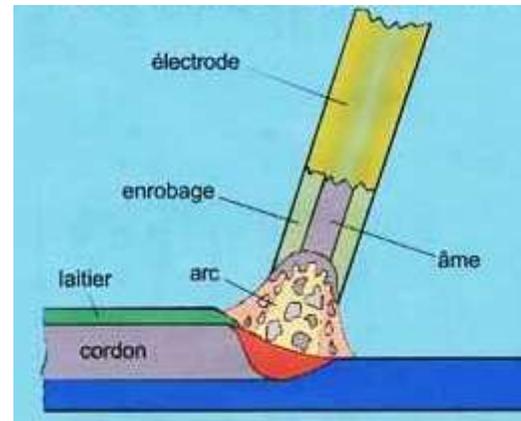


SOUDAGE PAR RESISTANCE

## Soudage à l'arc avec électrode enrobée

Une électrode métallique enrobée est reliée à une source de courant électrique (+) par un porte électrode. Le métal à souder est relié à l'autre borne (-) de cette même source de courant par une pince de masse.

En plaçant la pointe de l'électrode sur le métal puis en la retirant, un arc électrique se forme. La chaleur intense de l'arc fait fondre les deux parties à souder, ainsi que la pointe de l'électrode métallique qui fournit le métal d'apport utilisé principalement pour souder des pièces en acier.



Principe

Coupe d'un cordon

## À RETENIR

- Réalisation de pièce unitaire, petites, moyennes et très grandes série ;
- Principalement les aciers, aluminium, cuivre, zinc, fonte et les plastiques ;
- Réalisation de pièces unitaire et très grande série ;
- Procédé manuel ou robotisé ;
- Tous les métaux ne sont pas soudable, fonction de leur constitution chimique ;
- Contraintes thermiques et déformations des pièces ;
- Nécessite souvent un traitement thermique après soudure.

# 5 – USINAGE

Comment fabriquer le produit ?

## 1 – PRINCIPE DE L'USINAGE

L'usinage est une famille de techniques de fabrication de pièces mécaniques. Le principe de l'usinage est d'enlever de la matière de façon à donner à la **pièce brute** la forme et les dimensions voulues, à l'aide d'une machine-outil.

Le principe de base de l'usinage est l'enlèvement de matière, obtenu par le déplacement d'un **outil de coupe**.

L'enlèvement de matière réalisé par la conjonction de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil :

- le mouvement de coupe (**vitesse de coupe**)
- le mouvement d'avance (**vitesse d'avance**).

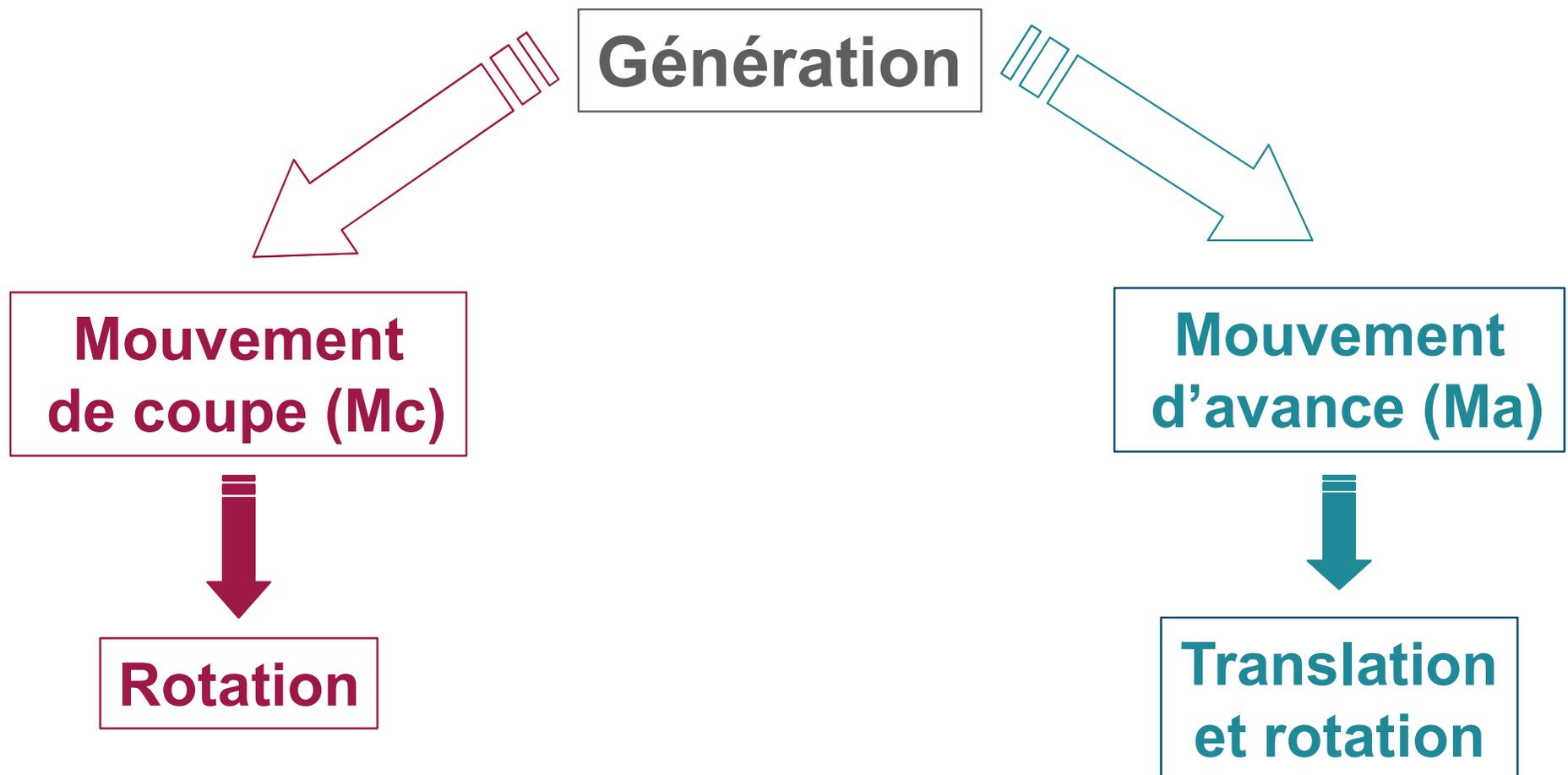
Étant donnée la forte puissance requise pour la coupe, la quantité de matière enlevée est limitée. Par conséquent, l'usinage peut nécessiter plusieurs coupes successives (**passe**).

le fraisage  
le tournage  
la rectification  
l'alésage  
le brochage  
le décolletage  
le découpage  
le mortaisage  
l'étincelage  
le polissage  
l'électro-polissage  
la super finition  
le sablage

le grattage  
le meulage  
le découpage  
le grenailage  
le roulage  
le polygonage  
le sciage  
le cisailage  
le limage  
l'usinage chimique  
l'usinage électrolytique  
l'usinage électrochimique  
l'usinage par ultrasons  
...

## 2 – GÉNÉRATION DES SURFACES

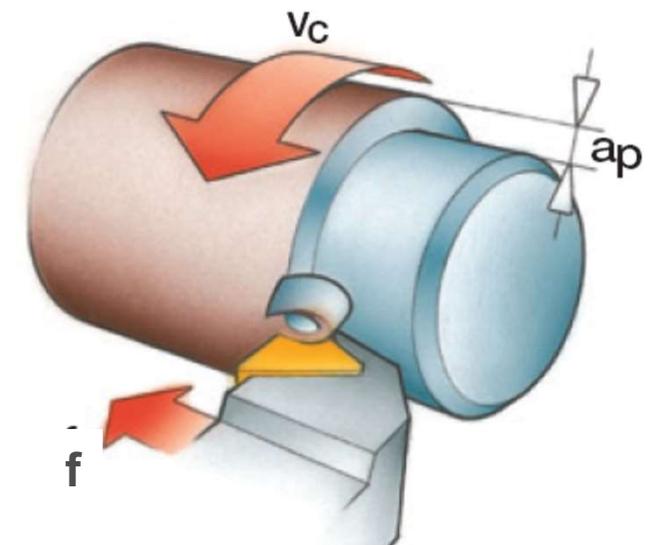
Dans les procédés de TOURNAGE et de FRAISAGE le mouvement de coupe sera associé à un mouvement de **ROTATION**.



### 3 – TOURNAGE

- Mouvement de coupe : **rotation** donnée à la **pièce** ;
- Mouvement d'avance : **translation** de l'outil par rapport à la pièce ;
- Outil coupant : principalement à **une arête** de coupe active.

Paramètre	Nom	Symbole	Unité
Mouvement de coupe	Vitesse de coupe	$V_c$	m/min
Mouvement d'avance	Avance outil/pièce	$f$	mm/tr
Pénétration	Profondeur de passe	$a_p$	mm



## Paramètres de tournage

# Definitions turning

**SANDVIK**  
Coromant

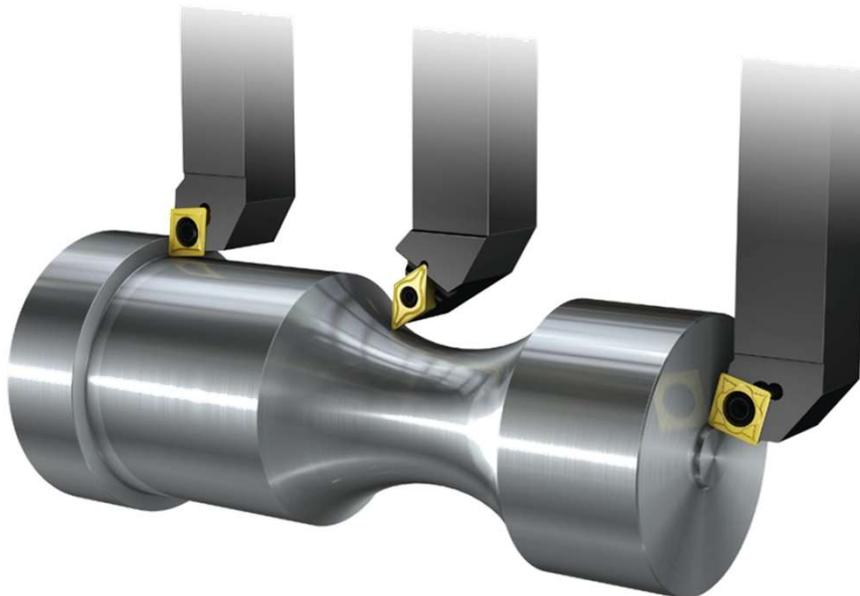
## Outils coupants de tournage

Ce sont principalement des outils à plaquette rapportées dont la géométrie est normalisée. Les matériaux à plaquettes sont :

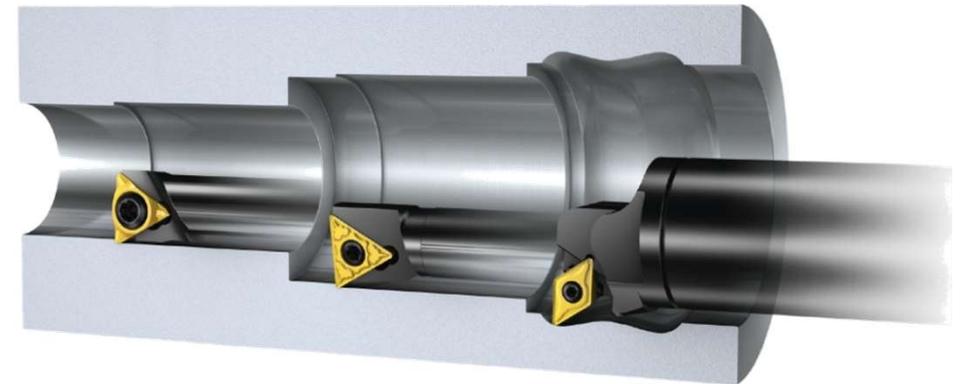
- Carbure (carbone et tungstène) ;
- Céramique ;
- Diamant.



**Géométries plaquette**



**Outils d'extérieur (prismatique)**



**Outils d'intérieur (cylindrique)**

## Conditions de coupe en tournage

Les paramètres de coupe dépendent principalement :

- pour la vitesse de coupe :
  - du matériaux de la pièce à usiner ;
  - du matériaux de l'outil coupant ;
  - du type d'usinage (intérieur, extérieur ...).
- pour l'avance et la pénétration :
  - de la géométrie de l'outil ;
  - de la puissance de la machine.

Elles sont fournies par les fabricants d'outil coupant. Exemple pour une plaquette carbure :

Matière pièce	Acier	Fonte	Aluminium
Vitesse coupe : $V_c$ en m/min	120 à 250	150 à 300	200 à 800
Avance : $f$ en mm/tr	0,2 à 0,5	0,25 à 0,6	0,1 à 0,6
Pénétration : $a_p$ en mm	0,1 à 10	0,1 à 5	0,1 à 4

## Machines de tournage

- Machine manuelle ;
- Machine automatisée : Machine Outil à Commande Numérique (MOCN).



Machine manuelle



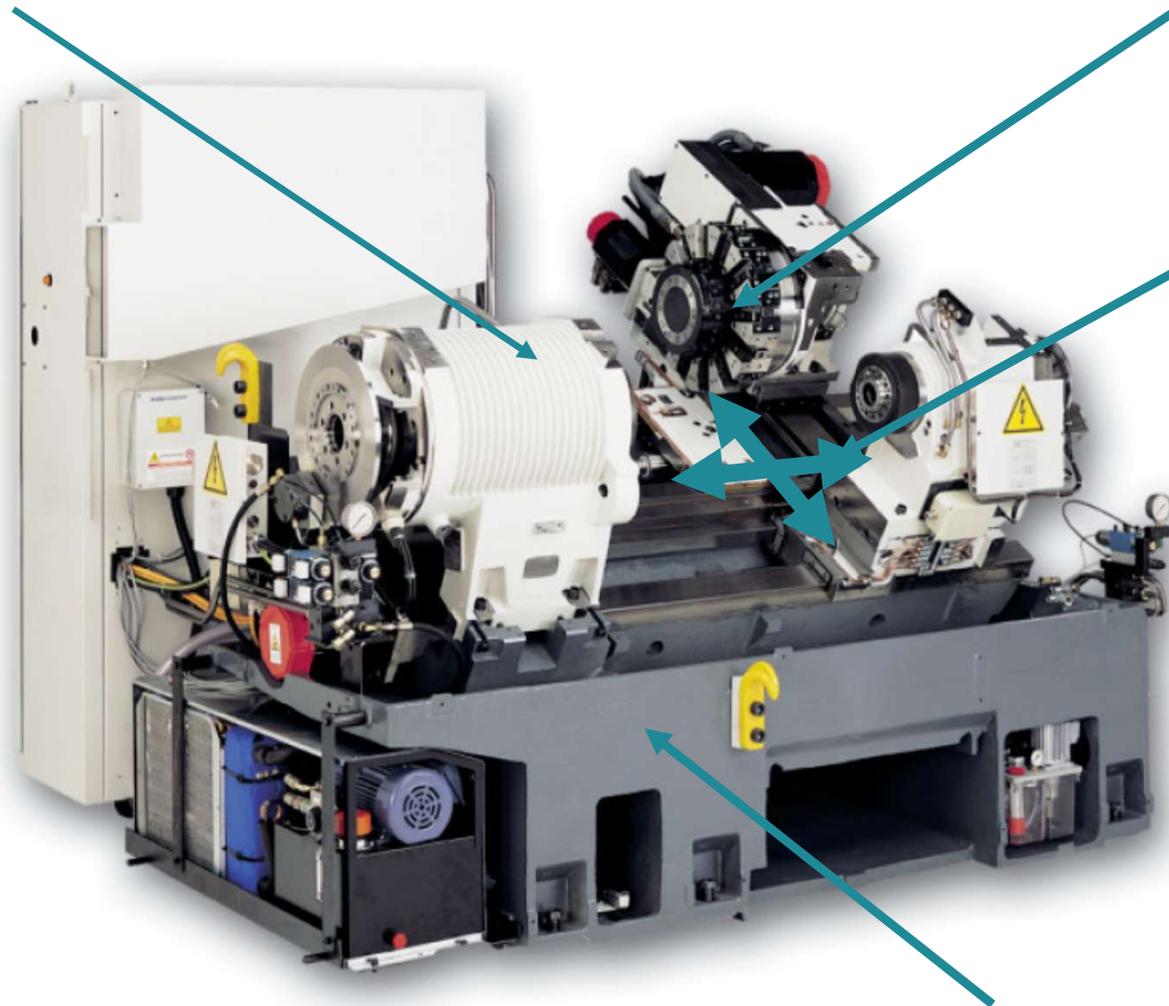
MOCN

## Architecture des machines de tournage

Porte pièce : BROCHE  
(mouvement de coupe)

Porte outils :  
TOURELLE

AXES  
(mouvements  
d'avance)



BATI (élément fixe)

## Porte-pièces en tournage

Ils sont montés sur la broche de la machine :

- Mandrins avec mors durs ;
- Mandrins avec mors doux ;
- ...



Mors doux

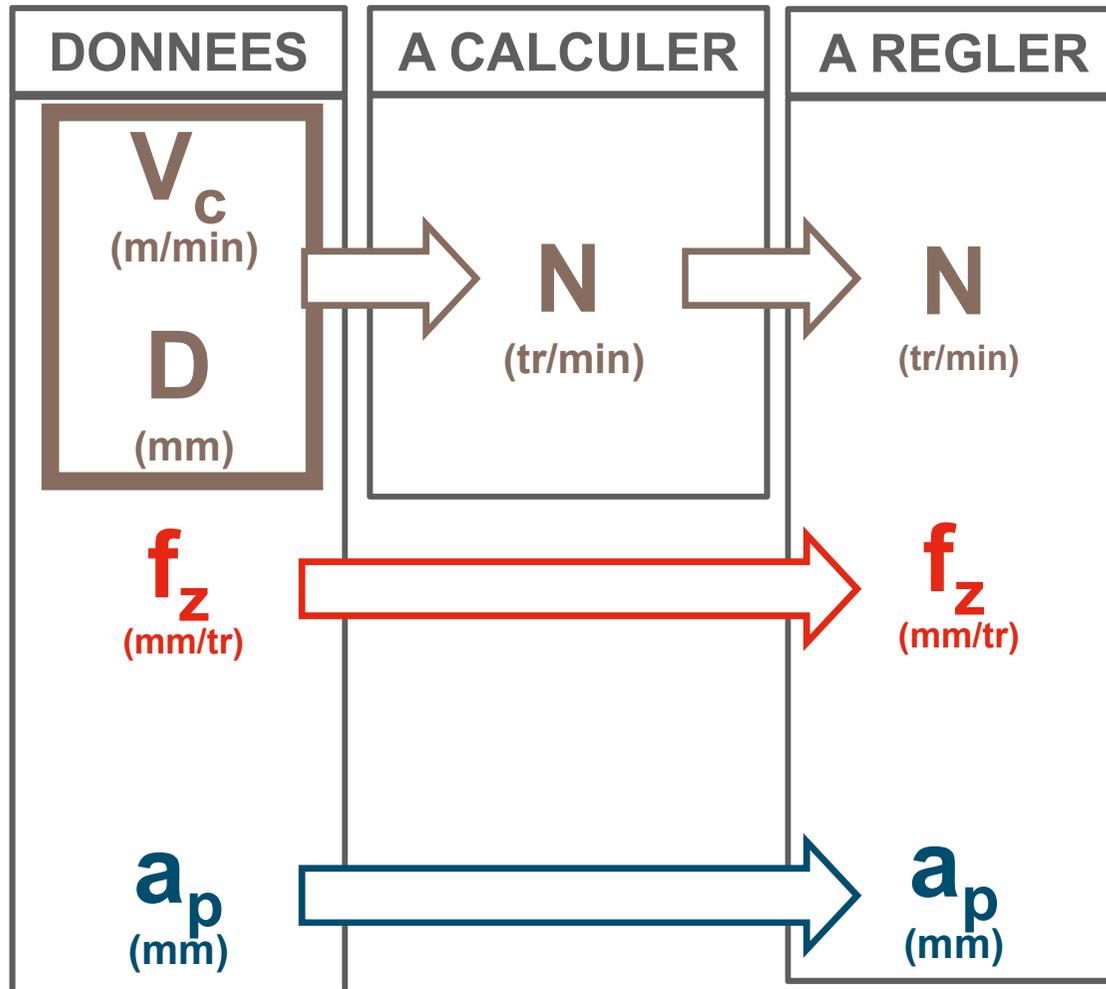


Mandrin 3 mors



Mors dur

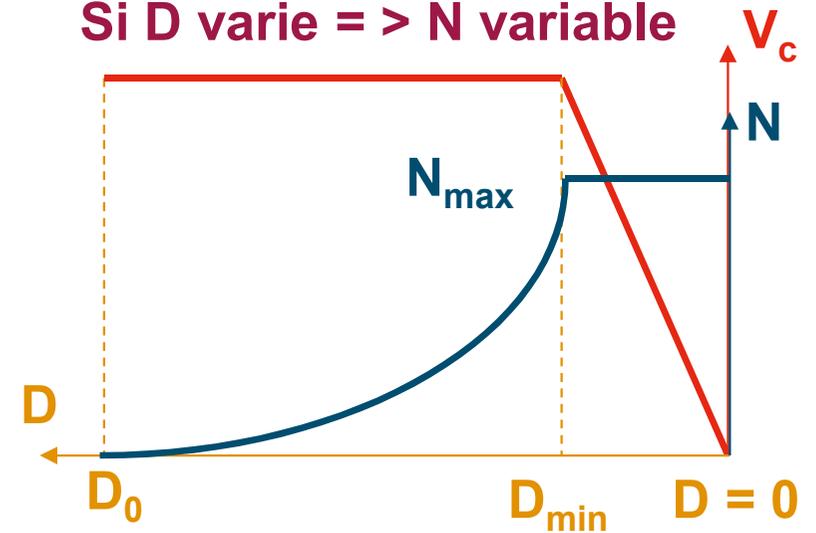
## Détermination des paramètres de tournage

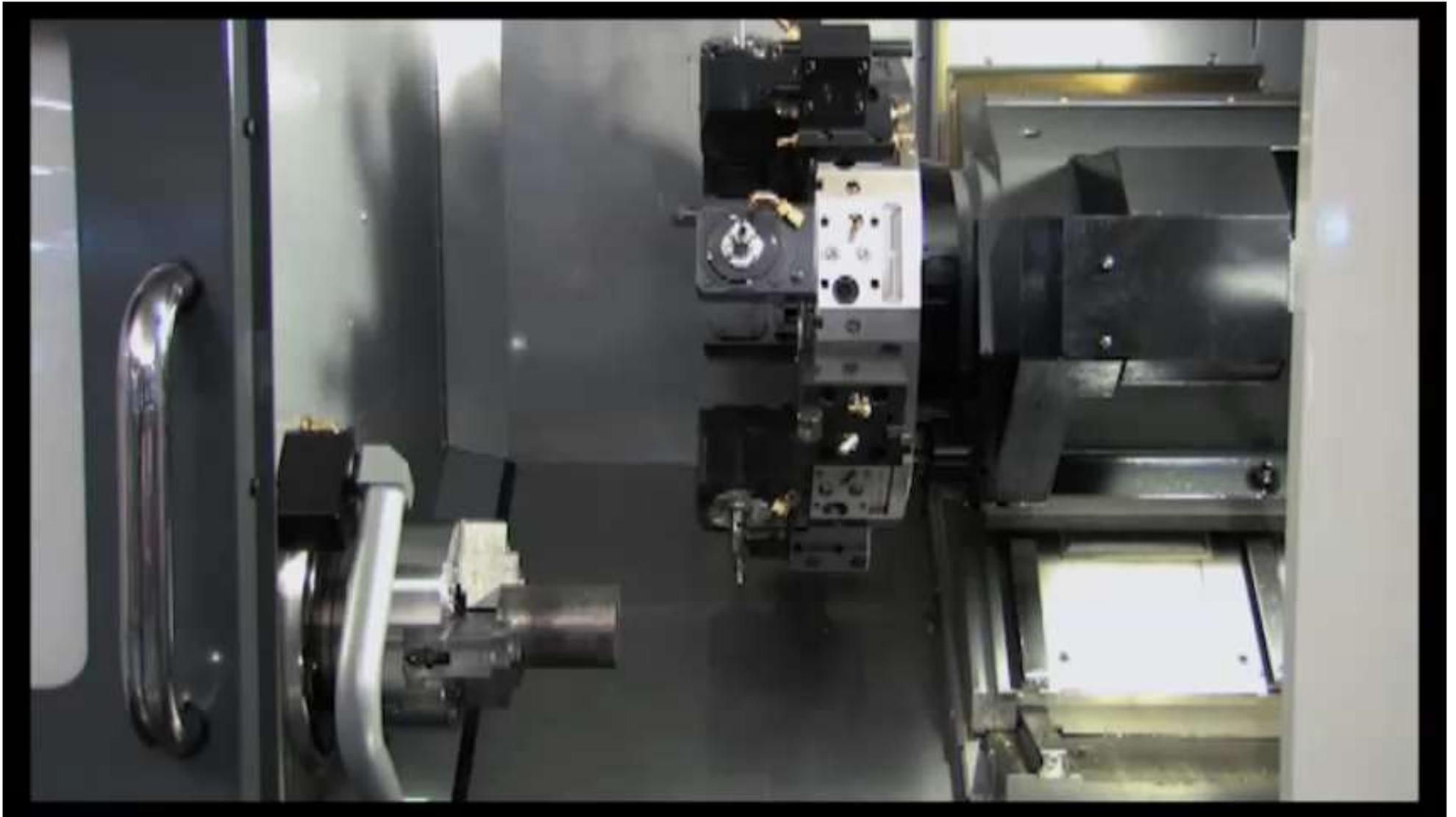


$$N = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times D}$$

(D : diamètre usiné en mm)

Si D varie => N variable

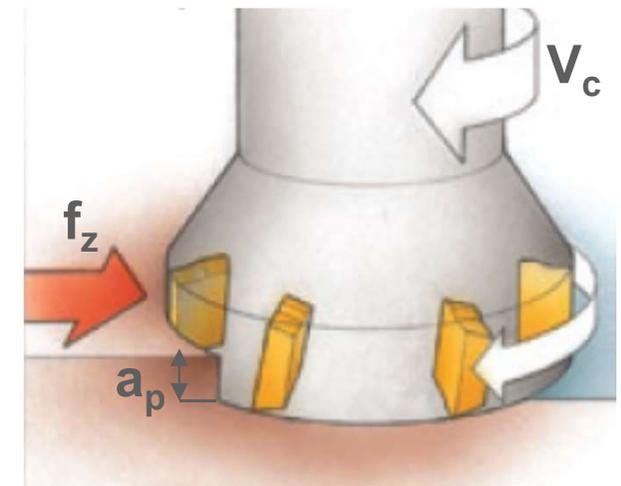
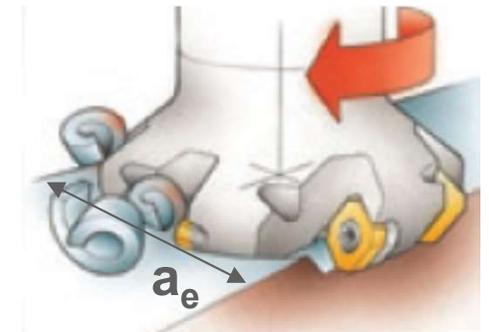




## 4 – FRAISAGE

- Mouvement de coupe : **rotation** donnée l'outil ;
- Mouvement d'avance : **translation** et **rotation** de l'outil par rapport à la pièce ;
- Outil coupant : principalement à **plusieurs arêtes de coupe** (dents) actives.

Paramètre	Nom	Symbole	Unité
Mouvement de coupe	Vitesse de coupe	$V_c$	m/min
Mouvement d'avance	Avance outil/pièce	$f_z$	mm/dent/ tour
Pénétration	Profondeur de passe	$a_p$ et $a_e$	mm



## Paramètres de fraisage

# Milling definitions

**SANDVIK**  
Coromant

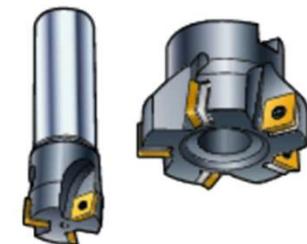
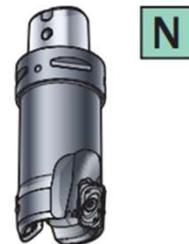
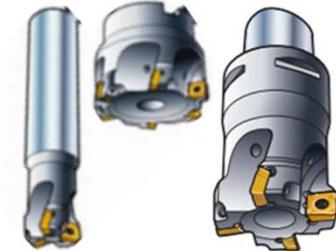
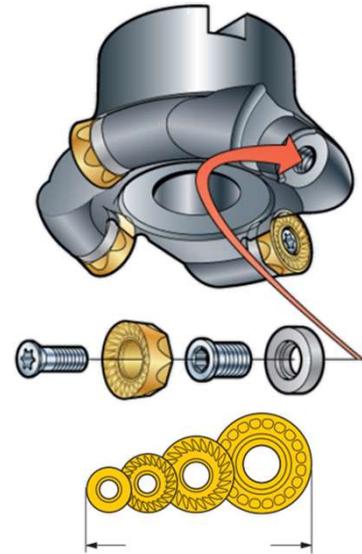
## Outils de fraisage (fraises)

Ce sont des outils monobloc carbure ou à plaquettes rapportées.

Les plaquettes sont à géométrie normalisée et spécifique.

Les matériaux à plaquette sont :

- Carbure (carbone et tungstène) ;
- Céramique ;
- Diamant.



## Conditions de coupe en fraisage

Les paramètres de coupe dépendent principalement :

- pour la vitesse de coupe :
  - du matériaux de la pièce à usiner
  - du matériaux de l'outil coupant
  - du type d'usinage (intérieur, extérieur, ...)
- pour l'avance et la pénétration :
  - de la géométrie de l'outil ;
  - de la puissance de la machine.

Elles sont fournies par les fabricants d'outil coupant. Exemple pour une fraise carbure monobloc :

Matière pièce	Acier	Fonte	Aluminium
Vitesse coupe : $V_c$ en m/min	80 à 150	120 à 240	250 à 480
Avance : $f$ en mm/tr	0,02 à 0,12	0,02 à 0,12	0,05 à 0,2
Pénétration : $a_p$ en mm	0,1 à 10	0,1 à 5	0,1 à 4

## Machines de fraisage

- Machine manuelle ;
- Machine automatisée : Machine Outil à Commande Numérique (MOCN).



Machine manuelle



MOCN



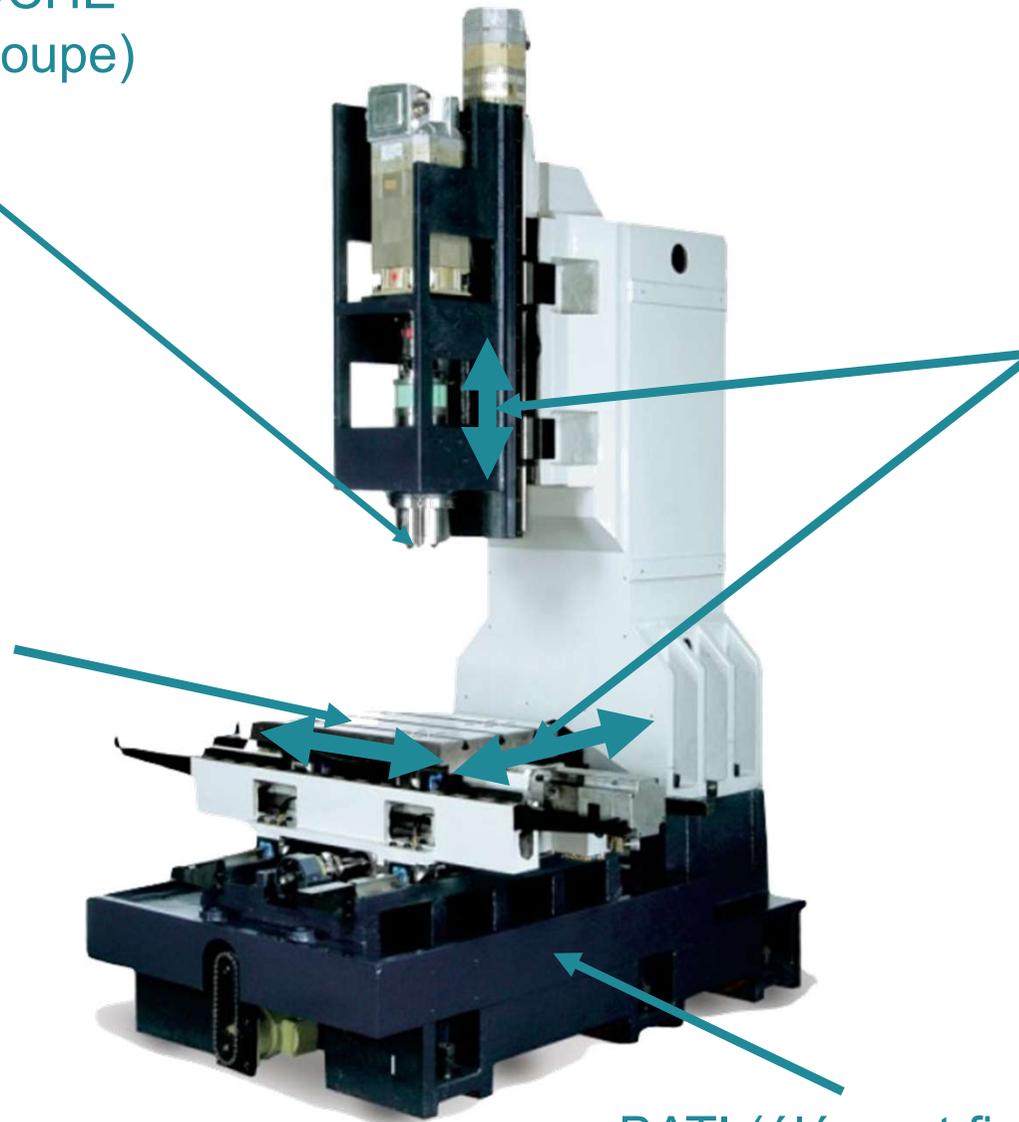
## Architecture des machines de fraissage

Porte outil : BROCHE  
(mouvement de coupe)

AXES  
(mouvements  
d'avance)

Porte pièce :  
TABLE

BATI (élément fixe)

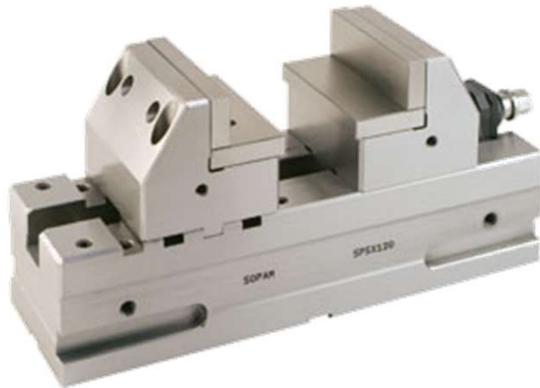


## Porte-pièces de fraisage

Ils sont montés sur la table de la machine :

- les portes pièce polyvalent, conçu pour une morphologie donnée ;
- les portes pièce spécifique, conçu pour une pièce donnée.

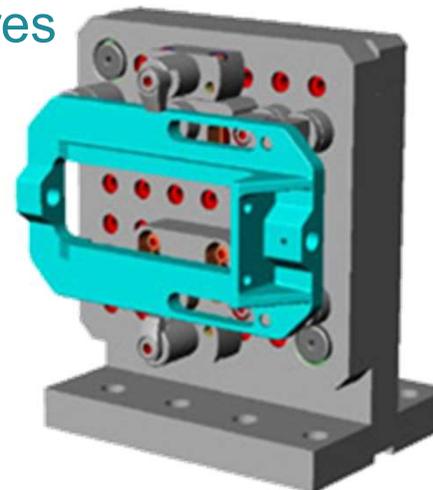
Étau



Assemblage  
d'éléments  
modulaires

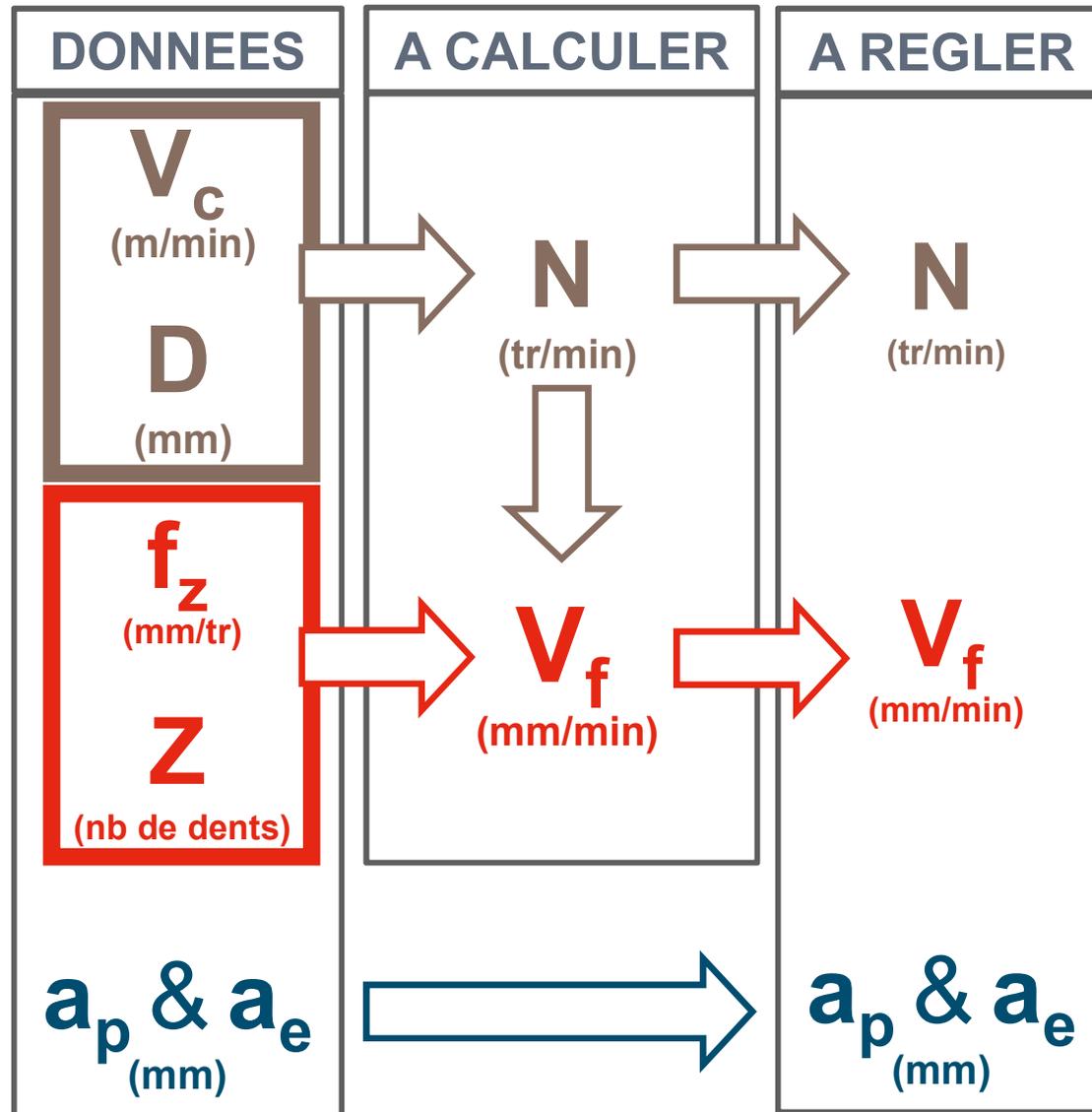


4 étaux en  
panoplie



Fabrication  
spécifique

## Détermination des paramètres de fraisage

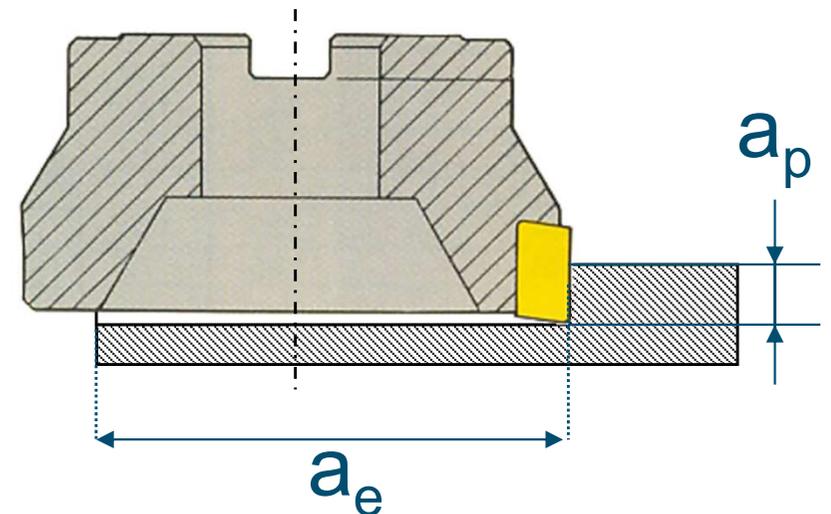


$$N = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times D}$$

$$V_f = N \times Z \times f_z$$

D : diamètre de la fraise en mm

Z : nombre de dents





# 6 – PROCÉDÉS MATIÈRE PLASTIQUE

Comment fabriquer le produit ?

## 1 – CLASSIFICATION

Thermoplastique ou thermodurcissable?

**Thermoplastique (TP)** : se ramollit après mise en forme lors de l'élévation de température (structure amorphe ou semi cristalline) ;

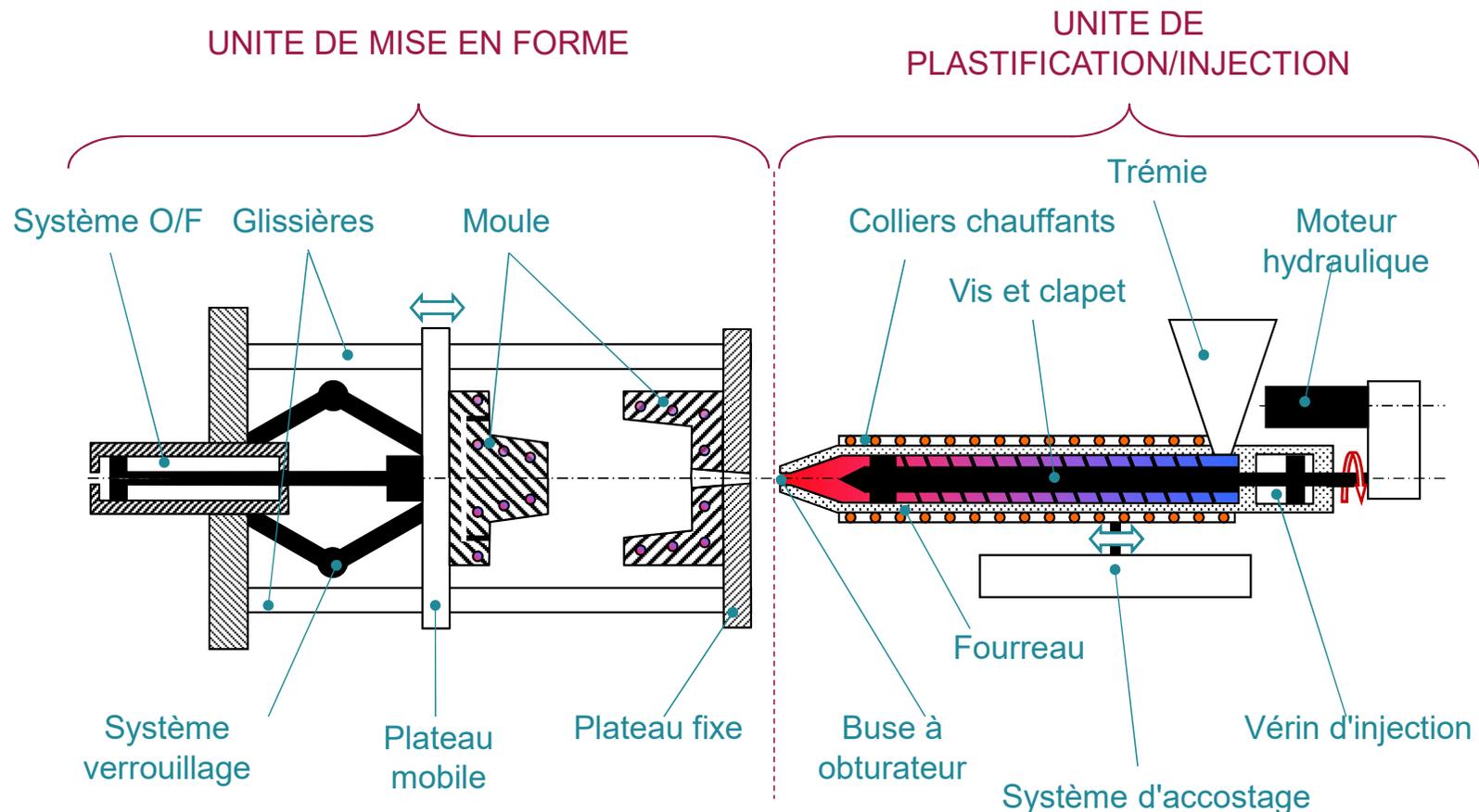
⇒ Poudres, granulés ou produits semi-finis (plaques, ...)

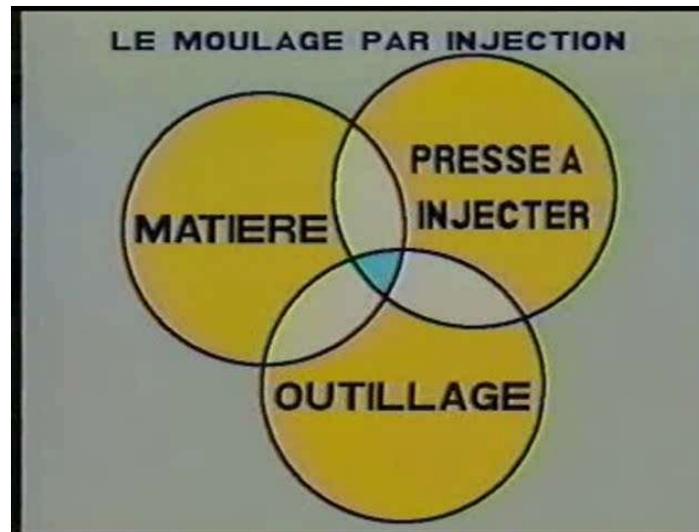
**Thermodurcissable (TD)** : ne se ramollit pas après mise en forme lors de l'élévation de température, jusqu'à carbonisation (structure tridimensionnelle).

⇒ Polymérisation partielle, achevée avec catalyseurs (ou chaleur)

## 2 – INJECTION PLASTIQUE

L'injection plastique consiste à ramollir de la matière plastique afin de la rendre malléable et de l'injecter sous pression dans un moule fermé. Après refroidissement la pièce est évacuée par ouverture du moule.





## Exemples



Divers types



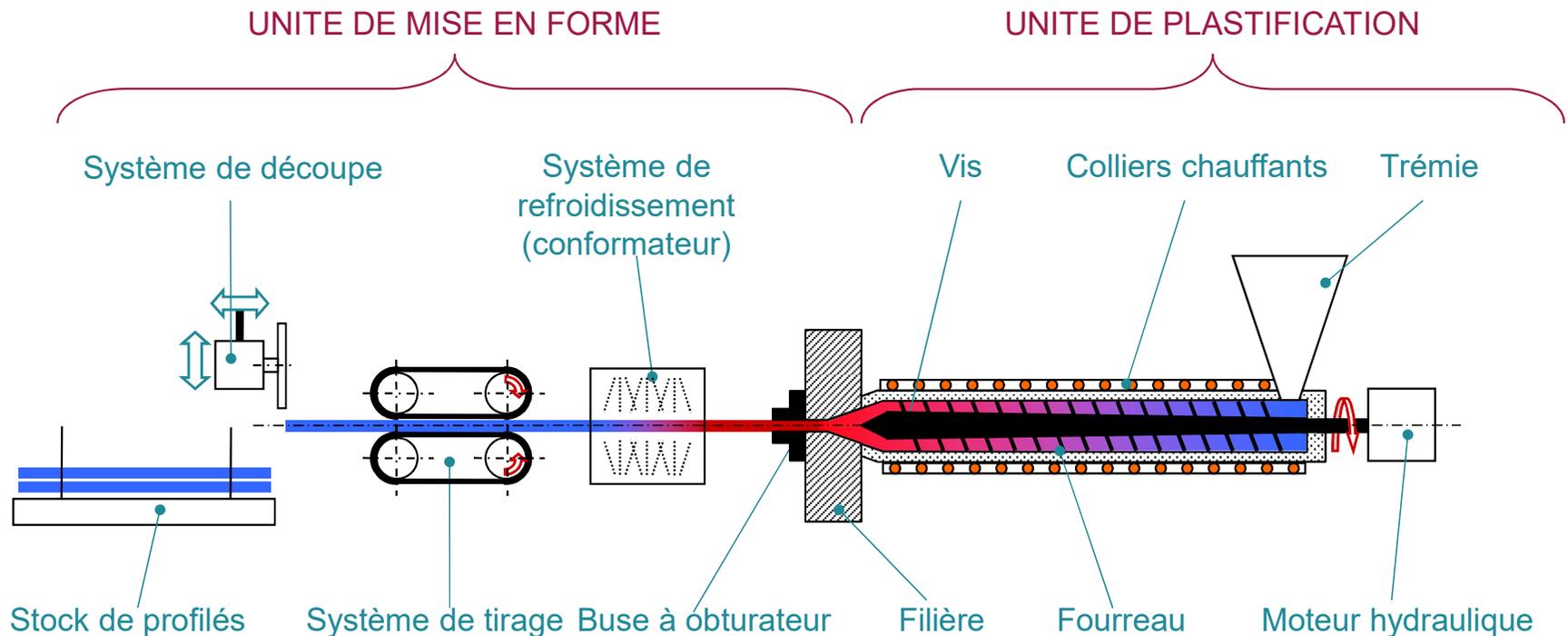
Coques de perceuses

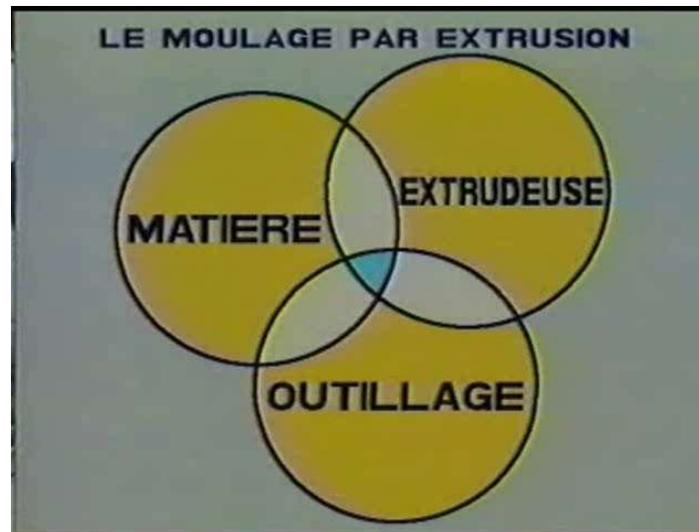


Préformes de bouteilles

### 3 – EXTRUSION

L'extrusion est un procédé de transformation en continu. Il consiste à introduire le plastique sous forme de poudre ou de granulés dans un cylindre chauffant, à l'intérieur duquel la matière se ramollit et se comprime par l'intermédiaire de la rotation d'une vis sans fin. A l'extrémité de celle-ci, elle passe au travers d'une filière qui lui donne la forme souhaitée.



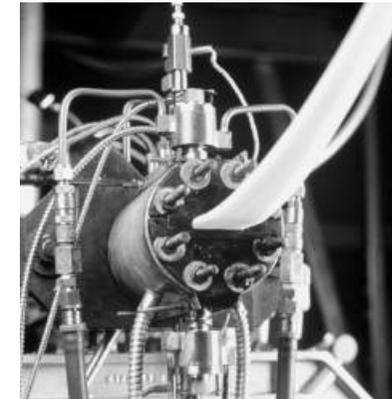


## Filière

La filière est l'élément permettant de donner la forme à l'extrudé. Sa section détermine la forme du profilé qui peut être plein ou creux.



Filières



## Exemples



Profilés simples et complexes

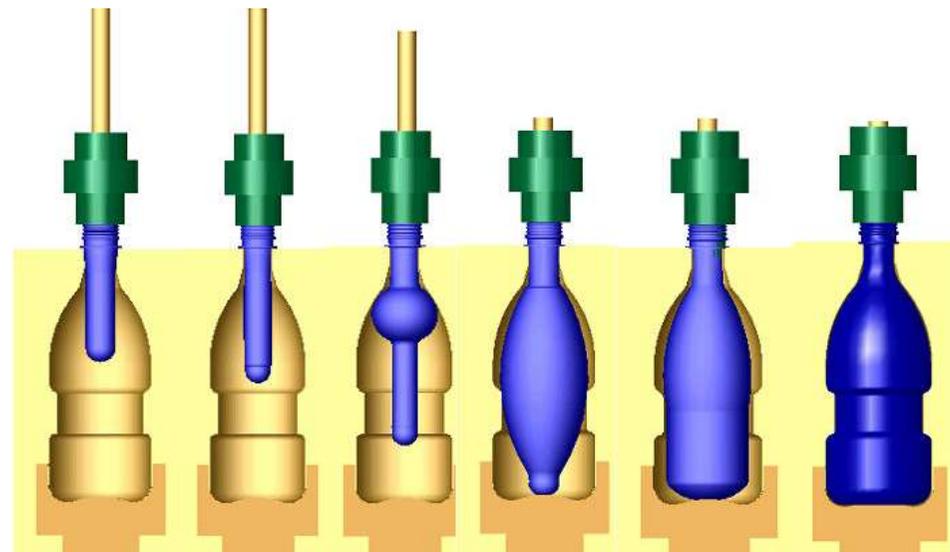


## 4 – INJECTION SOUFFLAGE

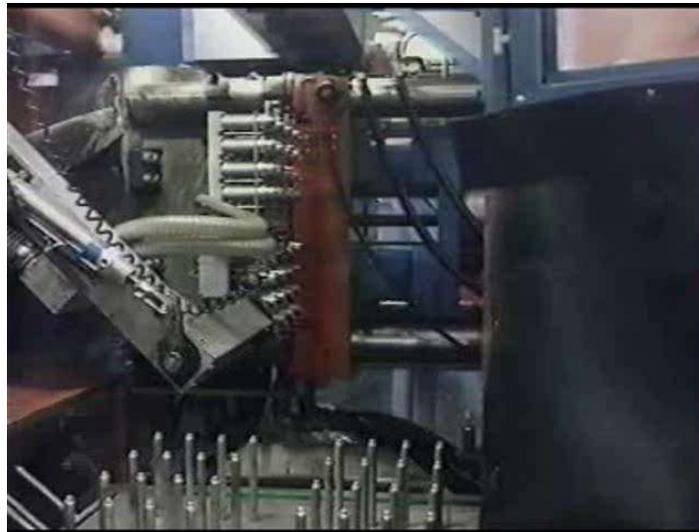
Ce procédé utilise une préforme injectée, qui est chauffée puis étirée et soufflée afin d'obtenir la forme souhaitée.



Préforme injectée



Étapes d'étirage et de soufflage



## Exemples

Moule + bouteille obtenue



Bouteilles d'eau



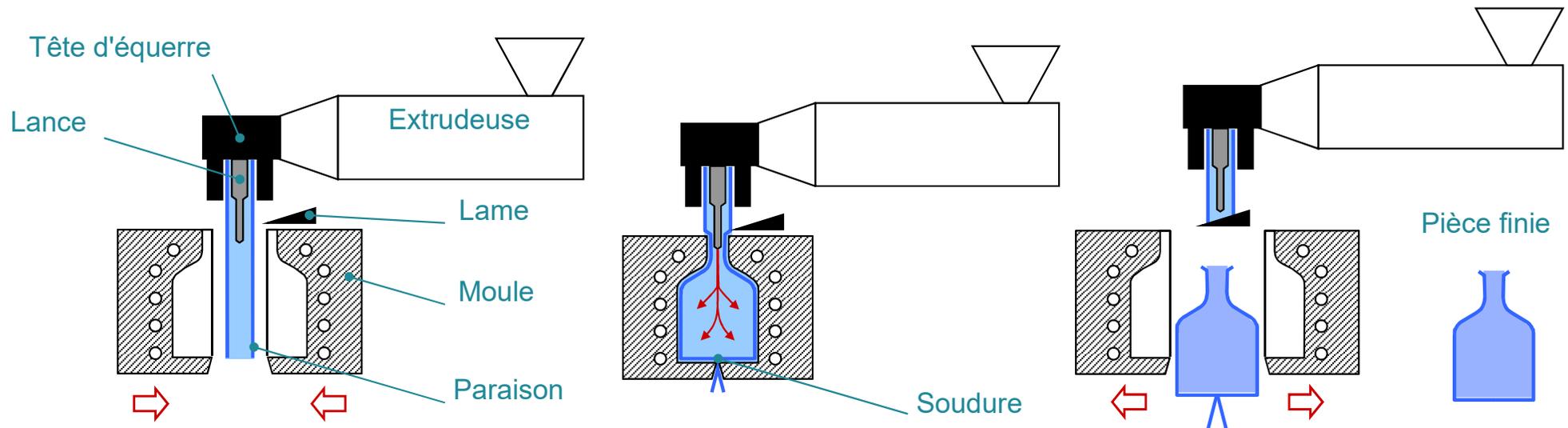
Flacons



Le point d'injection sur la pièce finie est visible et provient de la préforme.

## 5 – EXTRUSION SOUFFLAGE

Ce procédé se situe en aval de l'extrudeuse. La paraison formée en sortie s'écoule, avant refroidissement, entre les deux parties d'un moule. A sa fermeture, une pression d'air permet de plaquer la paraison contre les parois du moule. Une lame procède à la découpe finale





## Exemples

- Possibilités de créer des formes complexes (poignées) ;
- Goulot éventuellement formé par soufflage ;
- Parachèvement obligatoire : présence d'une ligne de soudure en fond de produit.



Réservoir



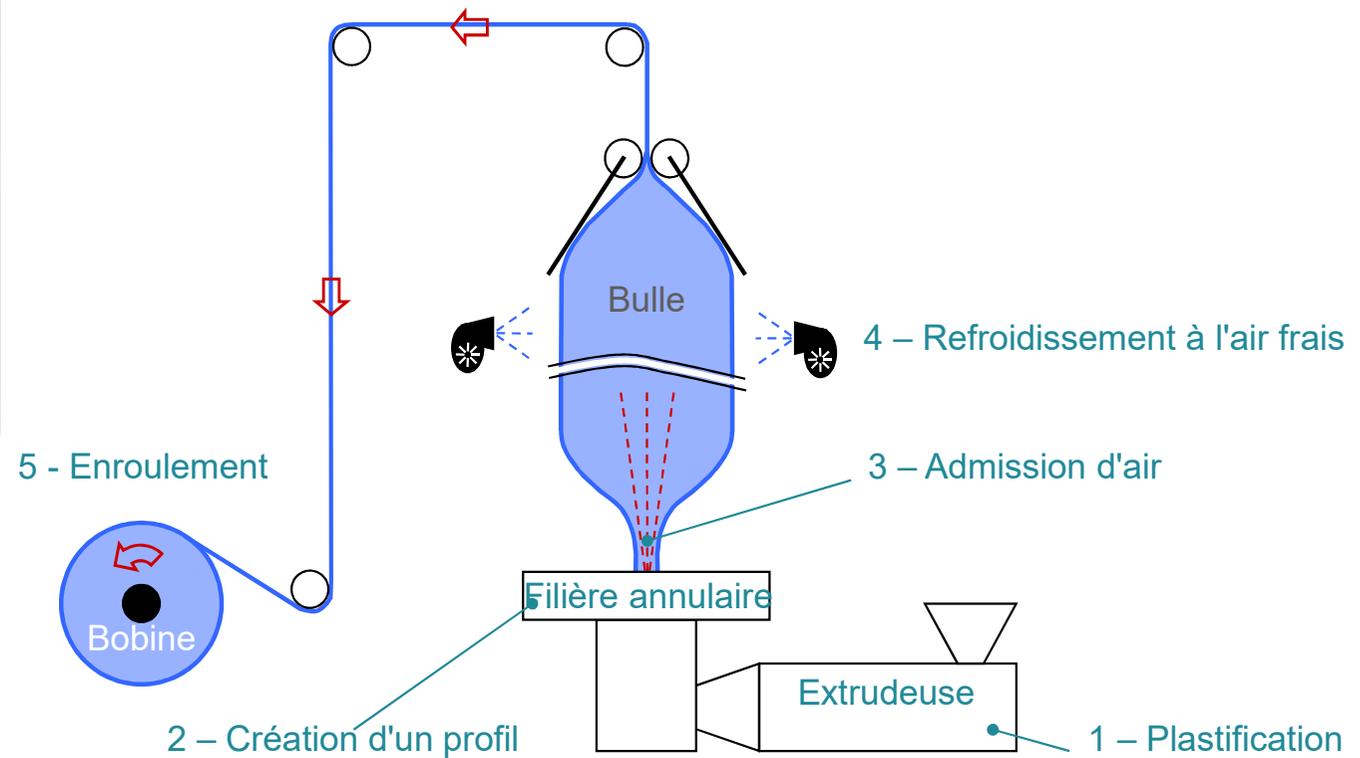
Récipients

## 6 – EXTRUSION GONFLAGE

L'extrusion gonflage est utilisée pour la mise en forme du polyéthylène (PE). Il permet la réalisation de films plastiques.



Formation de la bulle



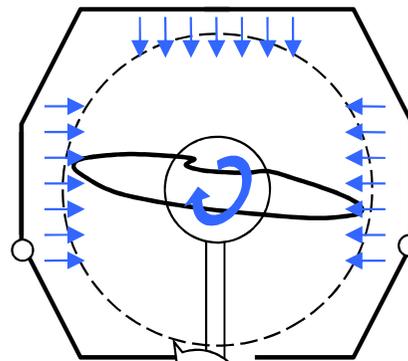


## 7 – ROTOMOULAGE

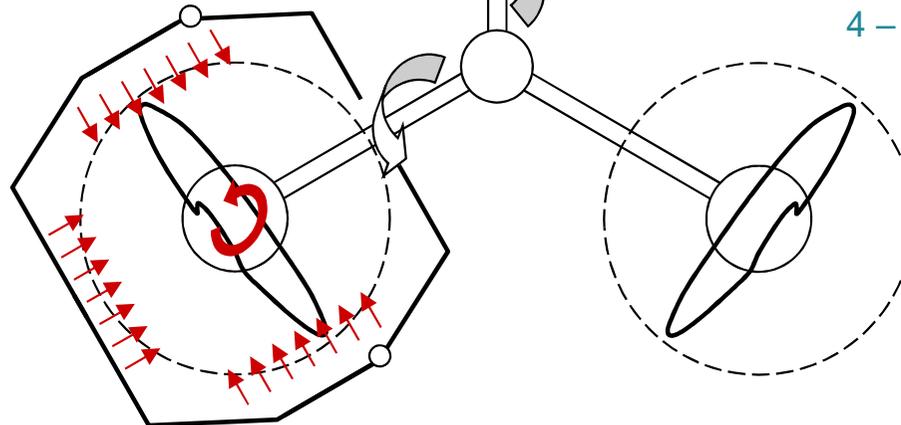
Le rotomoulage est un procédé de moulage par rotation qui est utilisé pour les matières résines ou plastiques. Il permet de produire des ensembles volumineux, le plus souvent creux.



3 – Rotation du moule et refroidissement



4 – Déchargement



2 – Rotation du moule et chauffe

1 – Chargement





## Exemples

Fauteuil design



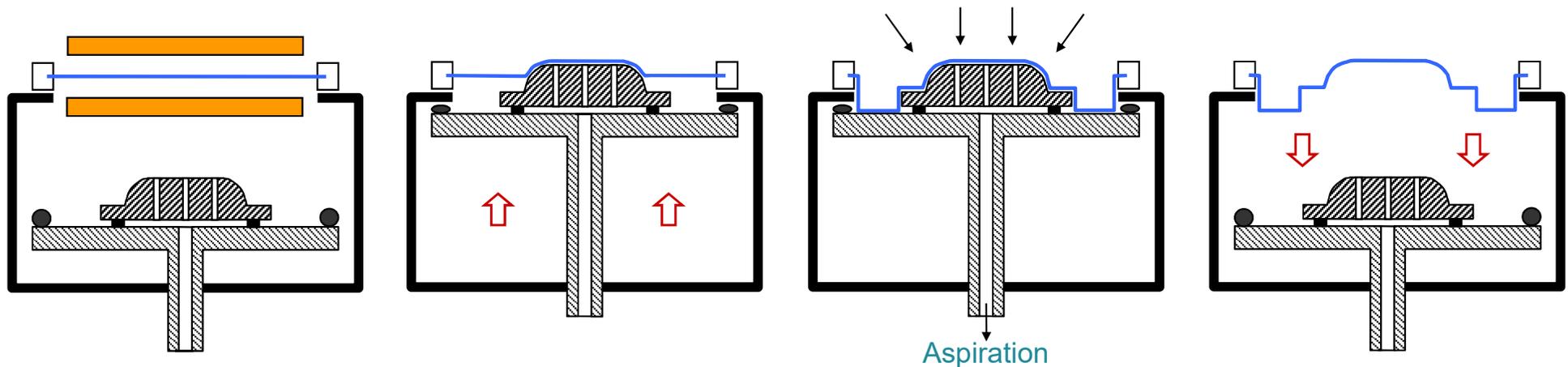
Cuve de récupération

Canoë + moule



## 8 – THERMOFORMAGE

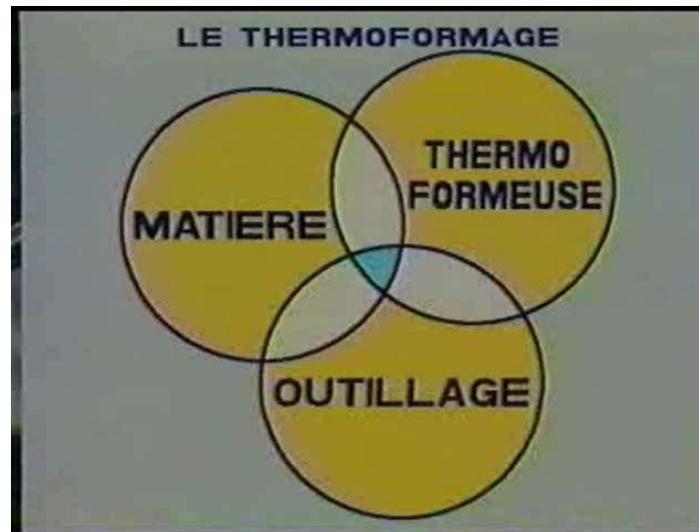
La technique du thermoformage consiste à former sur un moule à empreintes, un film ou une plaque préalablement chauffé pour le rendre malléable. Après refroidissement, la matière garde sa forme.



Chaque de la  
plaque

Montée du moule et aspiration

Refroidissement  
et évacuation



## Exemples



Casque



Gobelets



Tableau de bord automobile

# 7 – PROTOTYPAGE RAPIDE

Comment fabriquer le produit ?

## 1 – INTRODUCTION

La notion de "prototypage rapide" signifie la "fabrication rapide de modèles et prototypes" (restitution d'objets 3D à partir du modèle CAO).

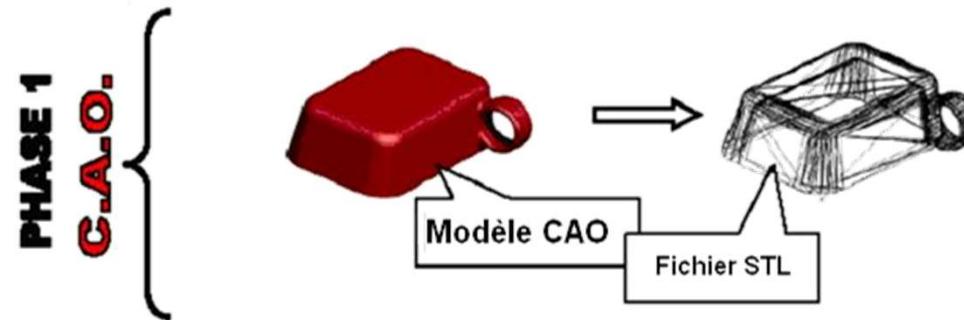
Ces techniques offrent un temps de fabrication beaucoup plus court que les moyens courants.

Dans une grande majorité des cas, la fabrication est réalisée par apport itératif de matière (fabrication couche par couche). De ce fait, le PR s'applique aux pièces unitaires et aux très petites séries.

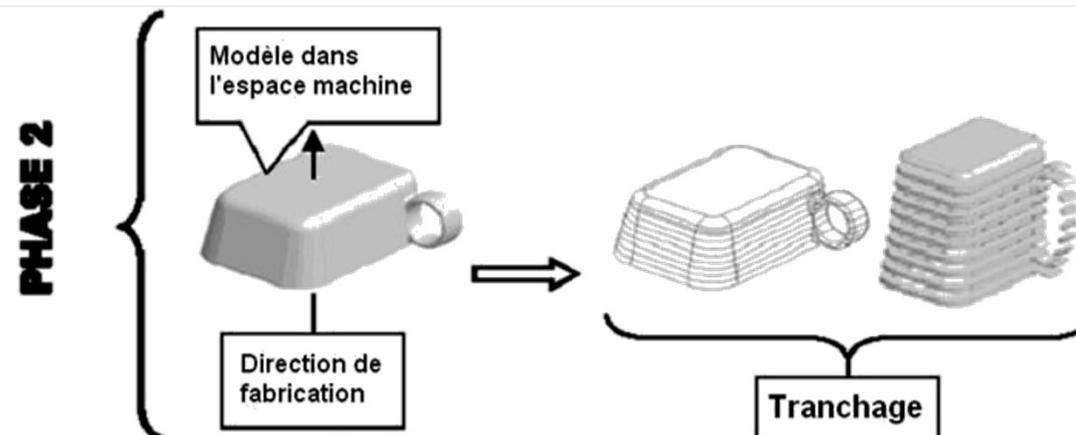
## 2 – MÉTHODOLOGIE DE RÉALISATION

La pièce 3D est obtenue en 3 phases :

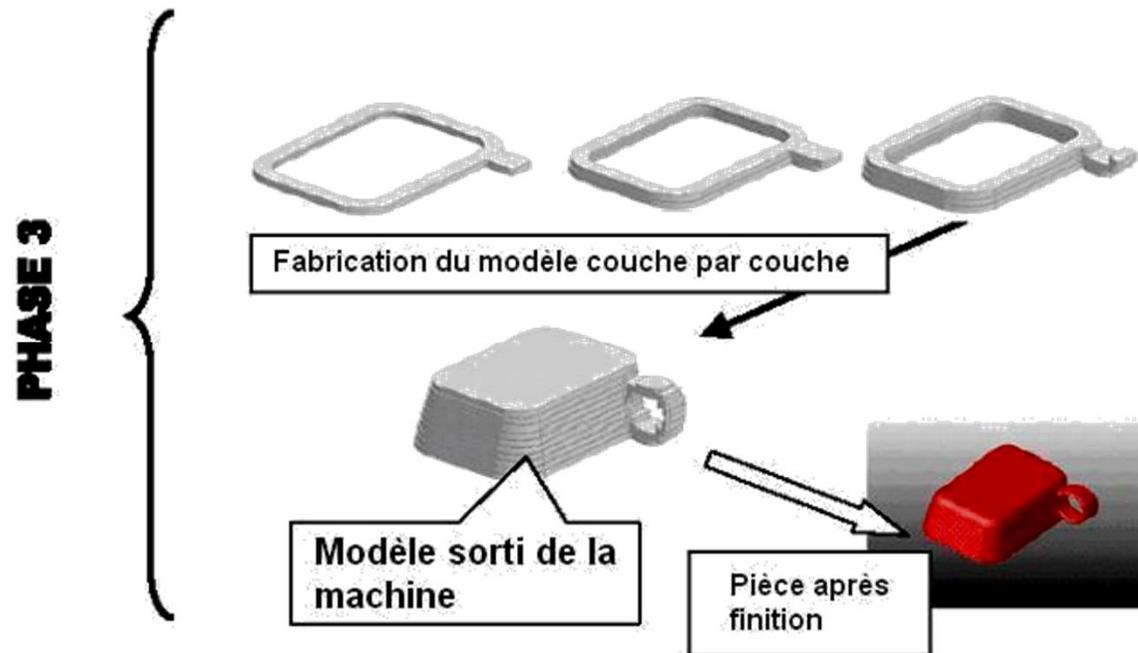
- **Phase 1** : traitement du modèle CAO (enveloppe du modèle « facettisée » en triangles ) ;



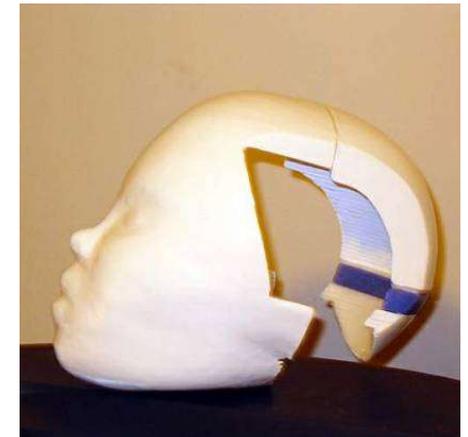
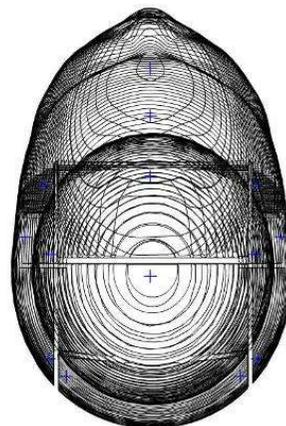
- **Phase 2** : choix du sens de fabrication et découpage en tranche ;



- Phase 3 : fabrication du modèle et finition.



Exemple



### 3 – UTILISATION

Il existe 3 types de prototypes :

- **Prototype de forme** : validation du design, ergonomie, encombrement, étude de marché... (produit R&D) ;
- **Prototype fonctionnel** : validation des fonctions principales du futur produit (matière proche du produit fini) ;
- **Prototype technologique** : validation de la présérie (outillage).



## 4 – AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

Les principaux avantages sont :

- validation rapide de la conception ;
- optimisation de la chaîne d'information numérique ;
- accroissement des choix de formes géométriques ;
- implication de toutes les personnes projet ;
- réalisation de prototypes fonctionnels et outillages.

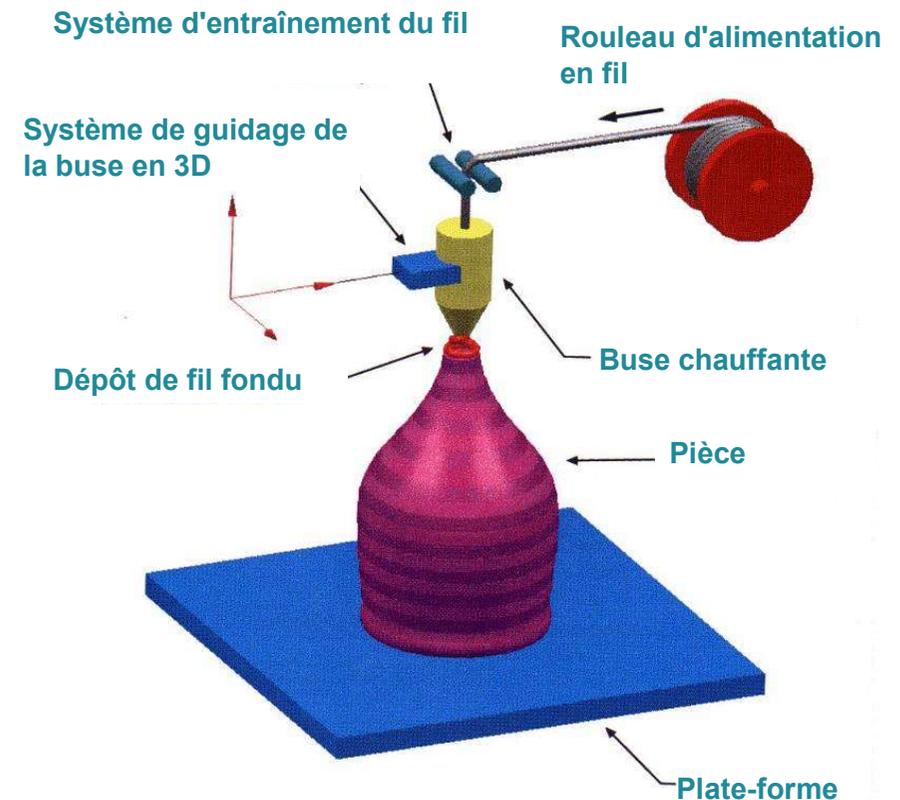
Les principaux inconvénients sont :

- réalisation de forme simple et vitesse d'exécution ;
- précision : escalier, changement d'état de la matière... ;
- finition : pour améliorer le fini.

## 5 – DÉPÔTS DE FIL FONDU

Une buse fond localement un fil en matière plastique pour le déposer sur la pièce en cours de fabrication. Il se solidifie aussitôt au dessus de la couche précédente.

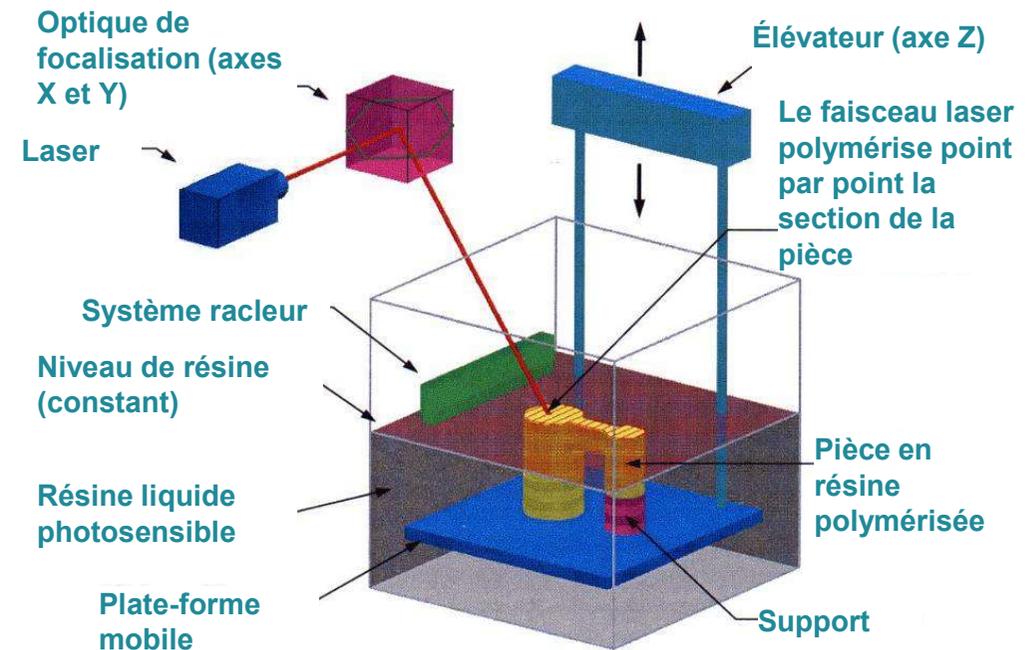
Ainsi les parois sont construites couche par couche en baissant la plate-forme d'une épaisseur et en répétant l'opération.



Matériaux	État matière	Couches	État de surface	Prototype
ABS, nylon,...	Pâteux/solide	Additives	Strié (escaliers)	Fonctionnel

## 6 – STÉREOLITHOGRAPHIE

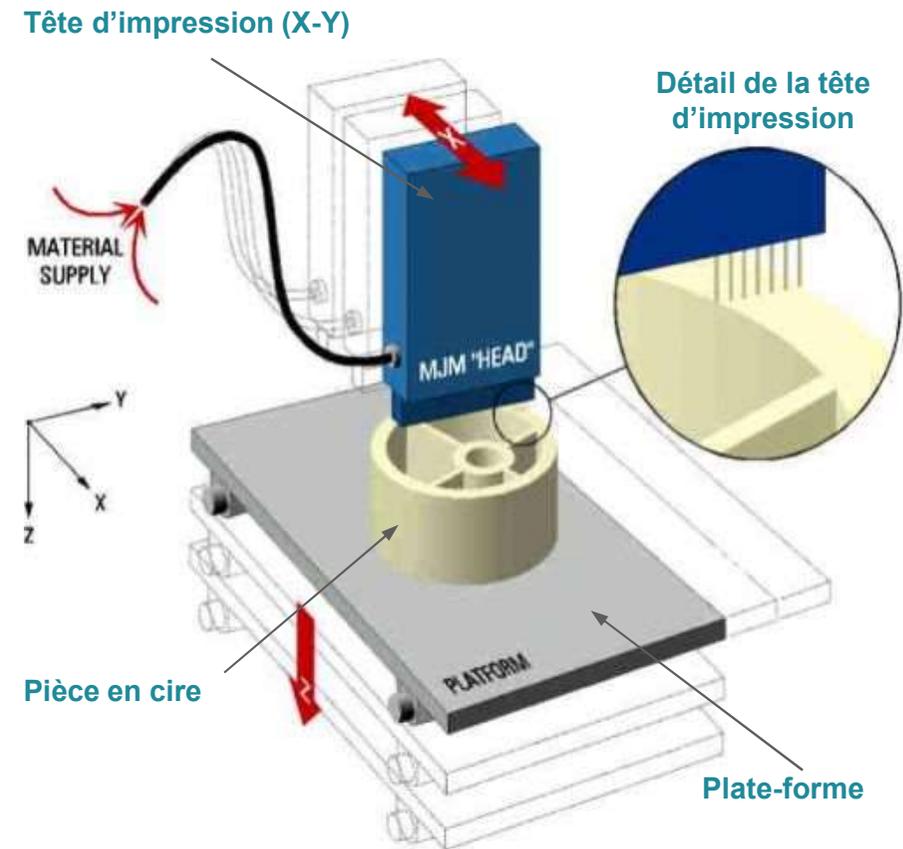
Sous l'action d'un laser, une résine photosensible liquide est solidifiée. Ce laser dessine les points de la couche en cours à la surface du bain de résine à l'aide d'un système de miroirs dynamiques. La plateforme qui porte l'objet descend après chaque couche dans le bain. Pour éviter les répartitions irrégulières, un système racleur passe au dessus de la surface réalisée.



Matériaux	État matière	Couches	État de surface	Prototype
Résine acrylique ou époxy	Liquide/solide	Additives	Fin avec strates Ra 0.8 à 2,5 $\mu\text{m}$	De forme

## 7 – PROJECTION CIRE

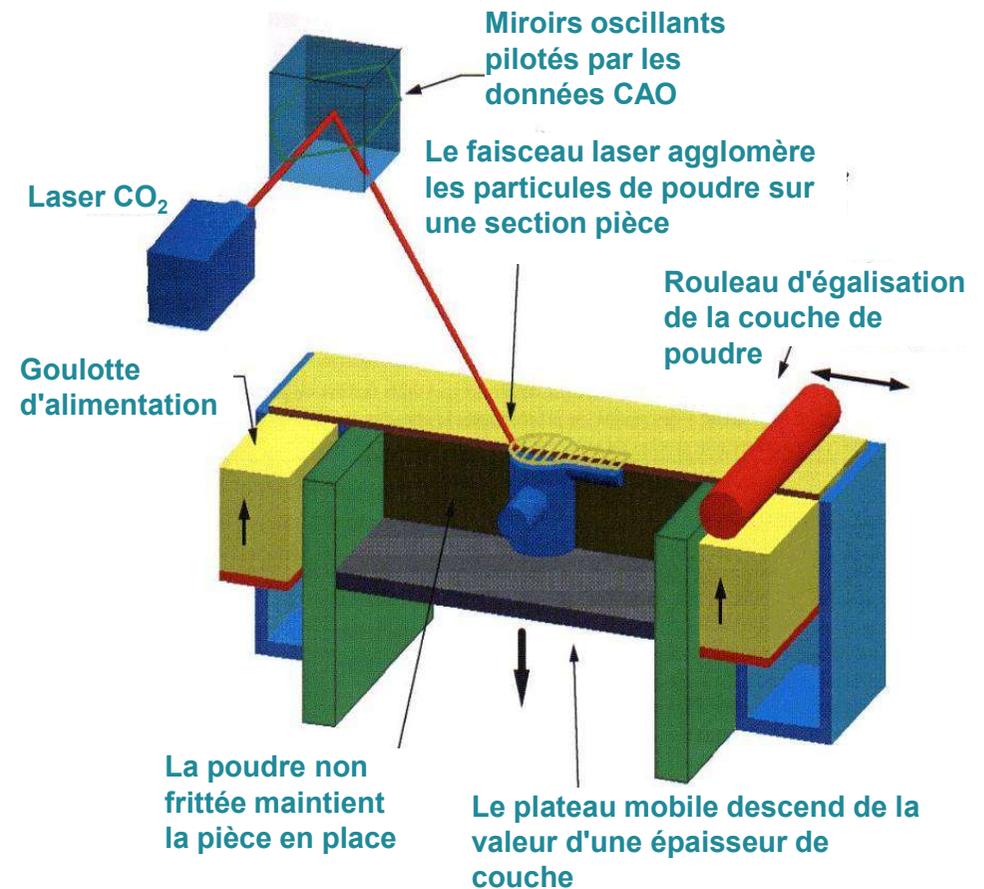
Le modèle est fabriqué couche par couche par projection de cire. Elle est fondue par une tête d'impression composée de plusieurs jets, puis déposée aux endroits nécessaires (fonctionnement identique à une imprimante). La plate-forme est abaissée d'une épaisseur de couche pour réaliser la couche suivante.



Matériaux	État matière	Couches	État de surface	Prototype
Cire	Liquide/solide	Additives	Fin sauf appui support	De forme

## 8 – FRITTAGE DE POUDRE

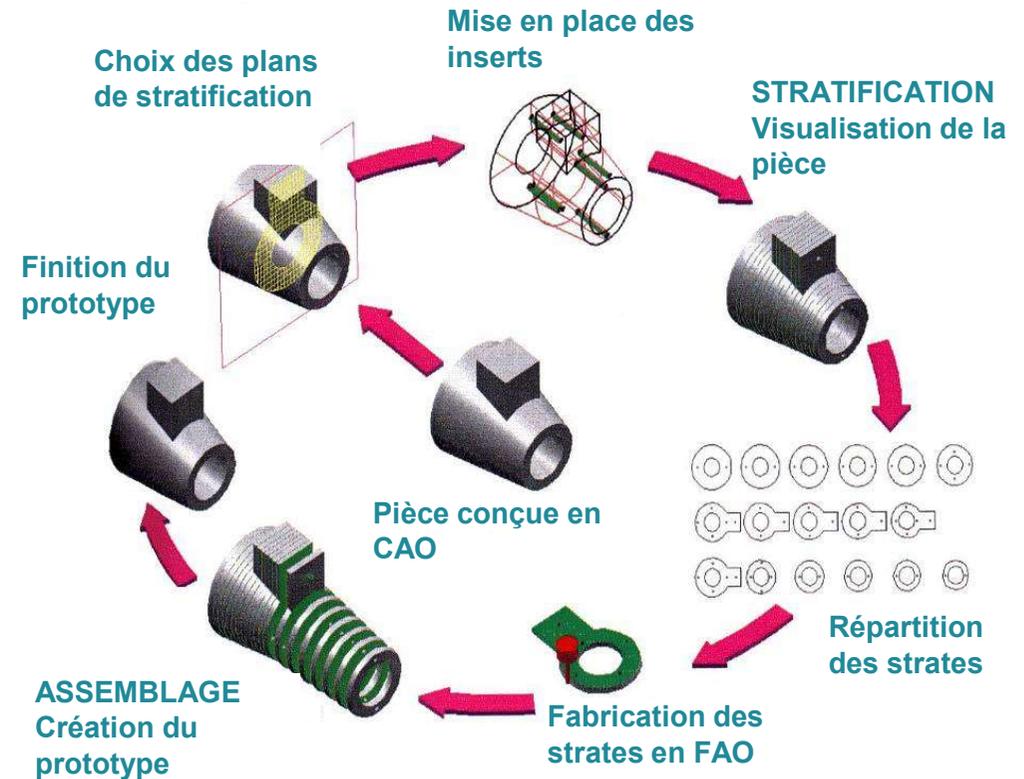
Dans ce procédé, une fine couche de poudre (0,1mm d'épaisseur) est déposée dans une cuve et chauffée dans une atmosphère contrôlée (azote). Ensuite un faisceau laser balaie la surface et fritte la poudre en des endroits précis. A la fin de cette étape, un système de rouleau dépose une nouvelle couche de poudre sur la couche précédente et le cycle peut recommencer.



Matériaux	État matière	Couches	État de surface	Prototype
Métaux, cires, plastiques, ...	Poudres/solide	Additives	Granuleux	Fonctionnel, technologique

## 9 – LAMINATION

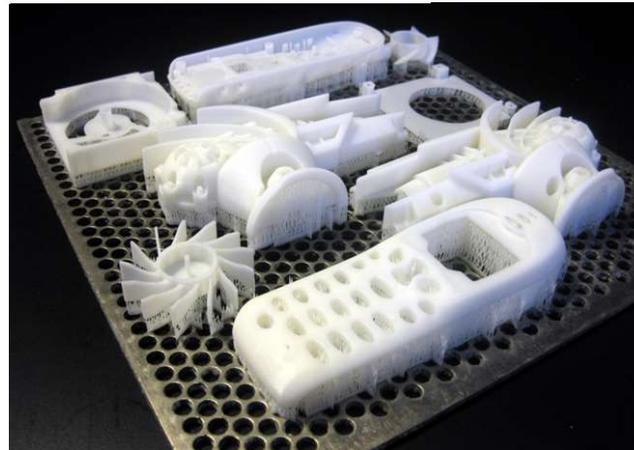
Le principe de ce procédé repose sur l'empilement de matériaux en plaque. Il peut de ce fait s'associer aux procédés conventionnels (centre d'usinage CN). Les différentes sections sont découpées dans une plaque puis assemblées par collage, fusion ou insert.



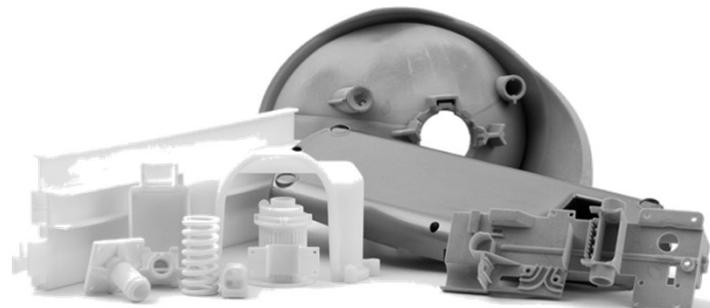
Matériaux	État matière	Couches	État de surface	Prototype
Métaux, papier, bois, plastiques	Feuilles/solide	Soustractives	Strié	Fonctionnel, technologique



Dépôt de fil



Stéréolithographie



Frittage laser de poudre

# 8 – TRAITEMENTS THERMIQUES ET DE SURFACES

Comment fabriquer le produit ?

## 1 – OBJECTIF

L'objectif principal est de modifier les propriétés et les caractéristiques d'un produit métallurgique en vue d'adapter son aptitude au besoin.

Exemples :

- état de surface ;
- résistance à l'abrasion, à l'usure et au frottement ;
- dureté ;
- résistance à la corrosion ;
- ...

## 2 – CAUSES D'ENDOMMAGEMENT

Les trois principales causes d'endommagement sont :

- la corrosion : altération chimique d'un oxydant ;
- la fatigue : phénomènes entraînant la rupture (lié à la charge et au nombre de cycles) ;
- l'usure : phénomènes résultant du frottement relatifs entre pièces.



Corrosion



Fatigue



Usure

### 3 – FAMILLES DE TRAITEMENT

Deux familles de traitements existent :

- Traitements dans la masse :
  - recuit ;
  - trempe ;
  - revenu.
- Traitements de surface :
  - traitements superficiels : trempe, diffusion...
  - revêtements : PVD, CVD, projection...

## 4 – TRAITEMENT DANS LA MASSE

L'objectif consiste à faire subir à la pièce des transformations de structure métallographique, par des cycles de chauffage et refroidissement prédéterminés.

Ainsi, la pièce obtient des propriétés particulières :

- dureté ;
- élimination de contraintes internes ;
- ...

**Le recuit** est réalisé pour adoucir et affiner l'alliage, améliorer l'usinage. Il consiste à chauffer un acier à une température appropriée, à le maintenir à température pour ensuite le refroidir lentement.

- **Matériaux : aciers principalement ;**
- Av. : relaxation des contraintes ;
- Inc. : réduction de la dureté.

**La trempe** consiste, après chauffe du matériau, à le refroidir rapidement par trempage dans un bain d'eau, d'huile ou à l'air.

- **Matériaux : métaux principalement ;**
- Av : augmentation de la dureté et de la résistance ;
- Inc. : fragilité de la pièce avec des contraintes internes.

**Le revenu** est réalisé après une trempe, pour réduire les contraintes mécaniques internes. Il consiste à chauffer de une pièce (300 °C environ pour les aciers) puis à la refroidir très lentement.

- **Matériaux : métaux principalement ;**
- Av. : réduction des contraintes internes ;
- Inc. : diminution de la résistance élastique et du module élastique.

## 5 – TRAITEMENTS SUPERFICIELS

Ces traitements sont utilisés pour modifier les caractéristiques de surface d'une pièce (mécaniques, résistances...). Ils agissent sur une faible profondeur : de quelques micromètres à quelques millimètres.

Les principaux sont :

- la trempe superficielle ;
- la diffusion d'atome ;
- le grenailage.

## Trempe superficielle

La trempe superficielle est réalisée sur la surface de la pièce par chauffage puis refroidissement rapide : la chaleur ne se diffuse pas au cœur de la pièce.

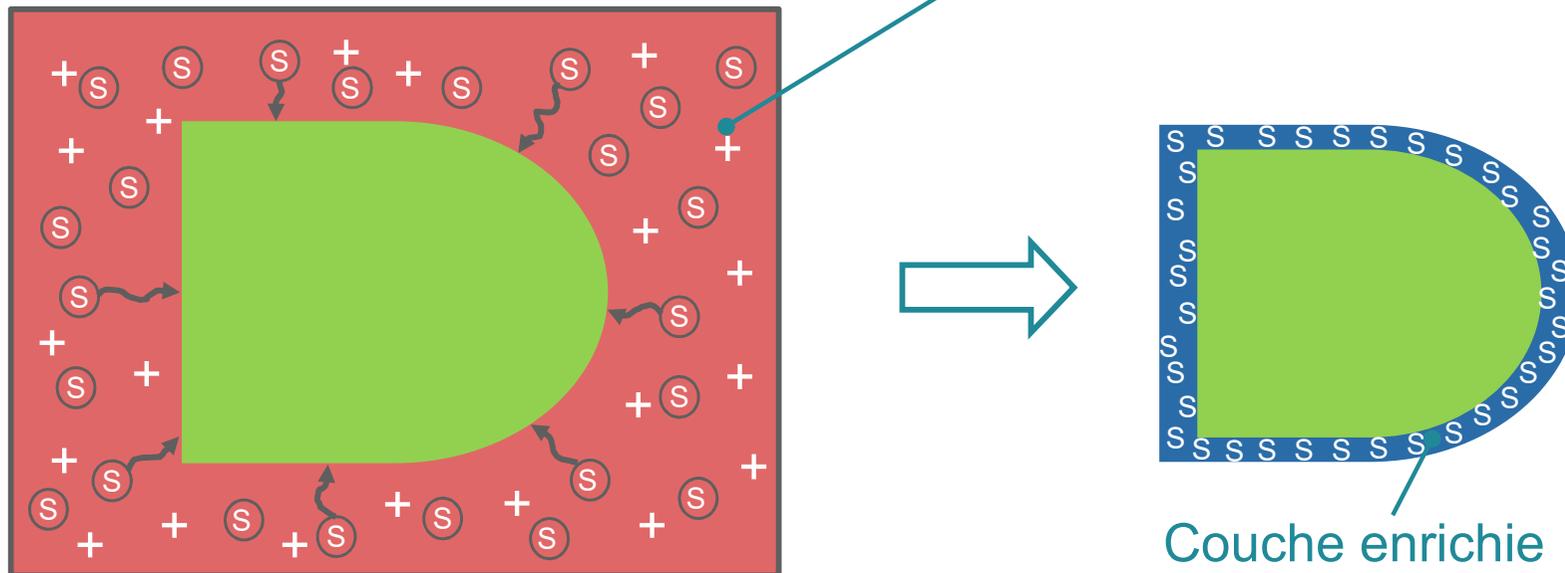


## Diffusion d'atomes

La diffusion d'atomes permet de diffuser des atomes ou molécules dans les structures des aciers :

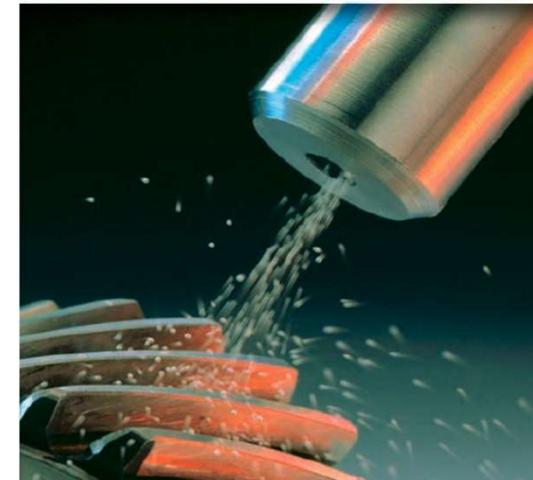
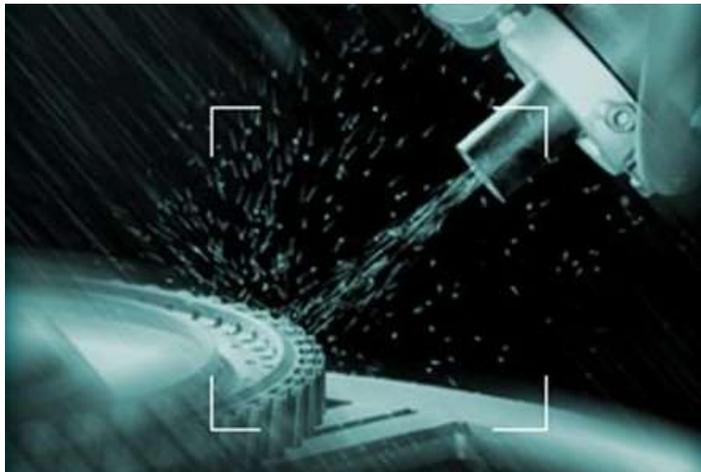
- la cémentation (925 °C) : diffusion de carbone ;
- la nitruration (560 °C) : diffusion d'azote...

Température élevée + milieu ambiant riche en élément d'apport



## Grenaillage

Le grenaillage (traitement par action mécanique) est la projection à grande vitesse de particules sphériques sur la surface à traiter qui entraîne une déformation locale ou écrouissage de la surface, permettant d'améliorer ses caractéristiques mécaniques



## 6 – REVÊTEMENTS

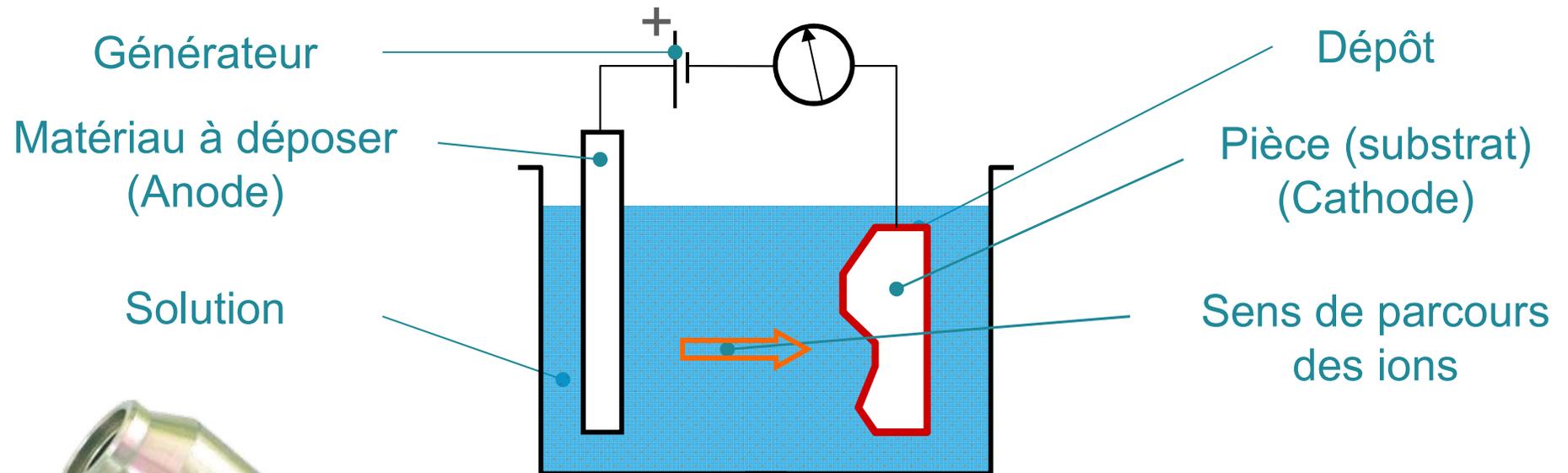
L'objectif des revêtements est de déposer une couche de matériau sur la pièce (ou substrat).

\*Il existe trois familles de revêtements :

- dépôt d'atomes : électrochimique, PVD, CVD...
- dépôt de particules : projection, conversion...
- dépôt massif : galvanisation, peintures...

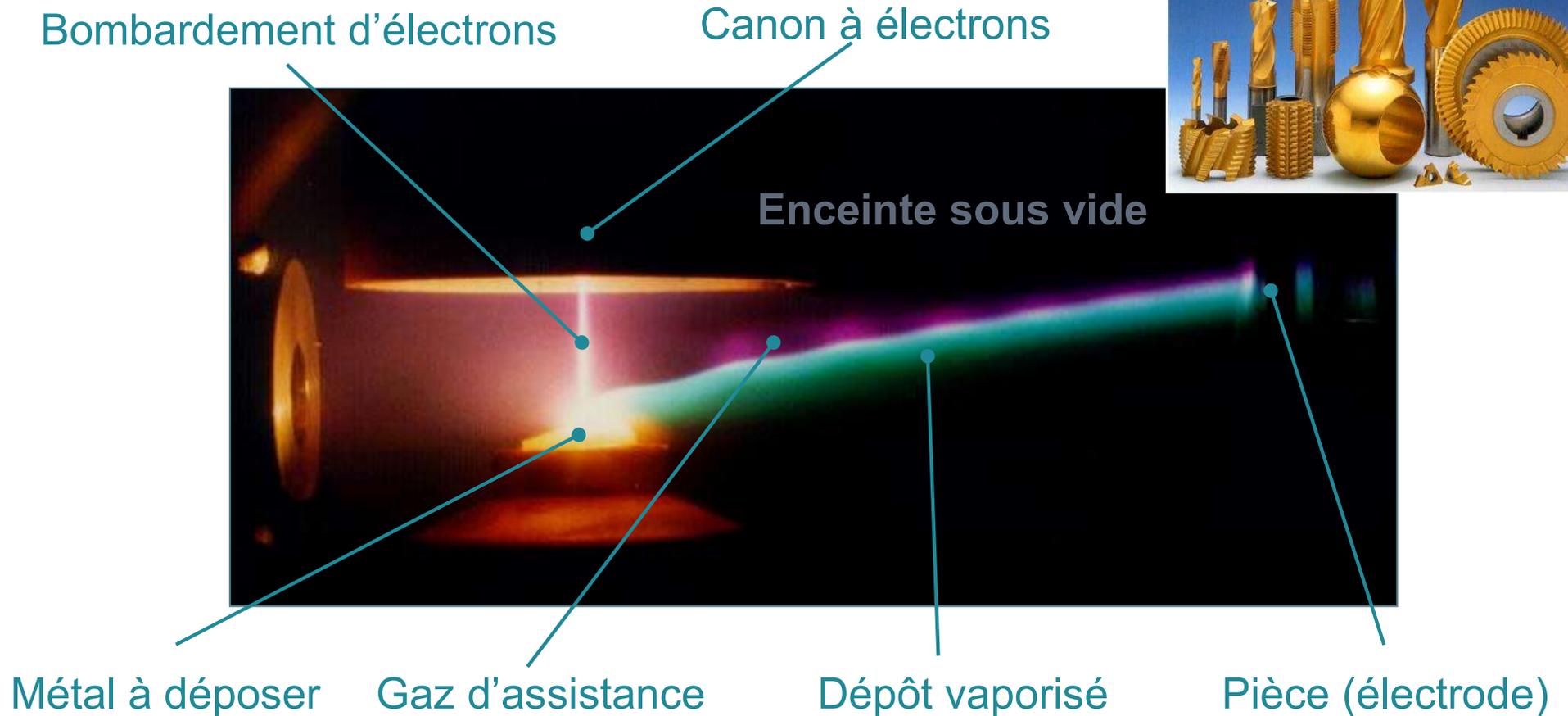
## Revêtement électrochimique

Ce revêtement utilise le principe de l'électrolyse et donc le transfert de matière susceptible de se produire à l'interface d'une électrode immergée dans un électrolyte.



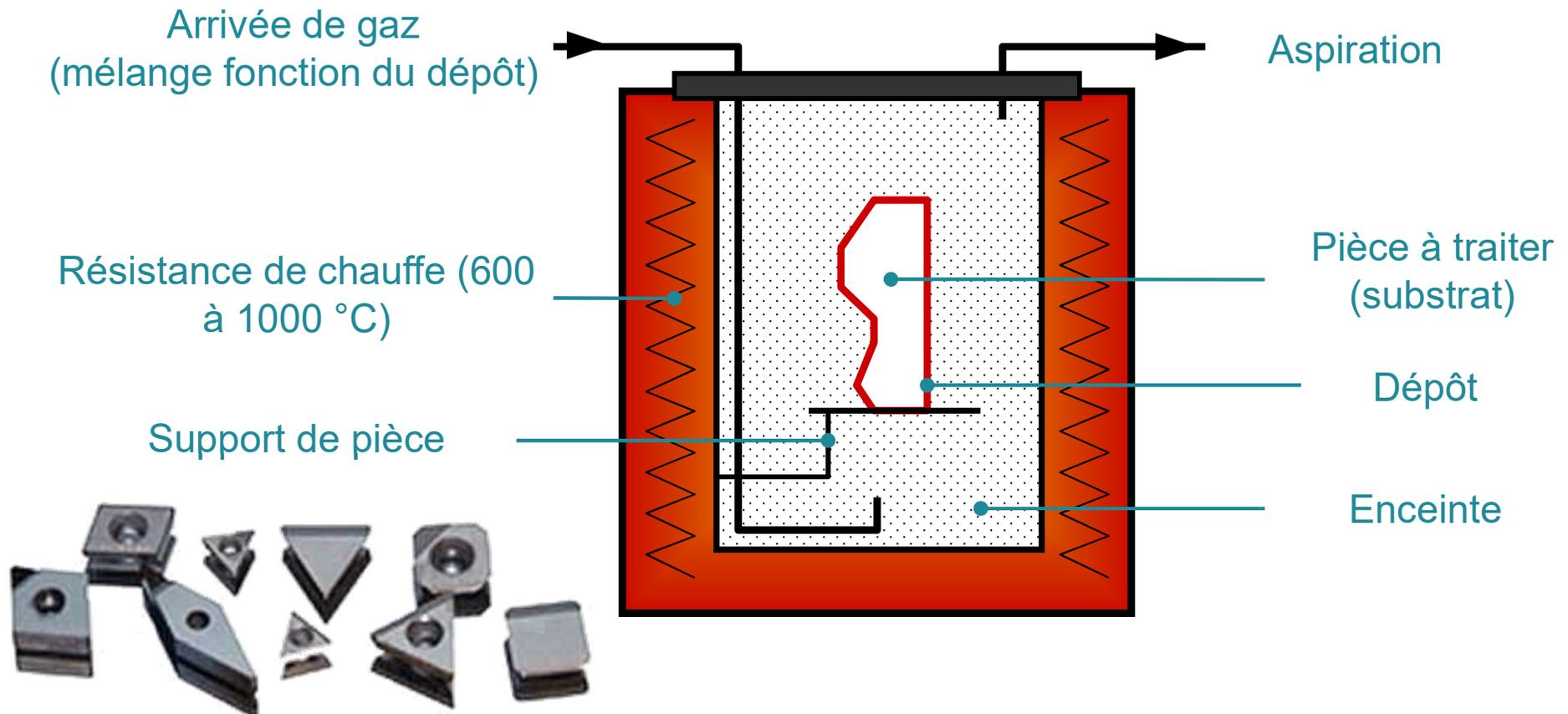
## Revêtement PVD

Le matériau à déposer (carbure, oxyde, nitrure) est vaporisé, puis la vapeur formée se condense sur le substrat polarisé.



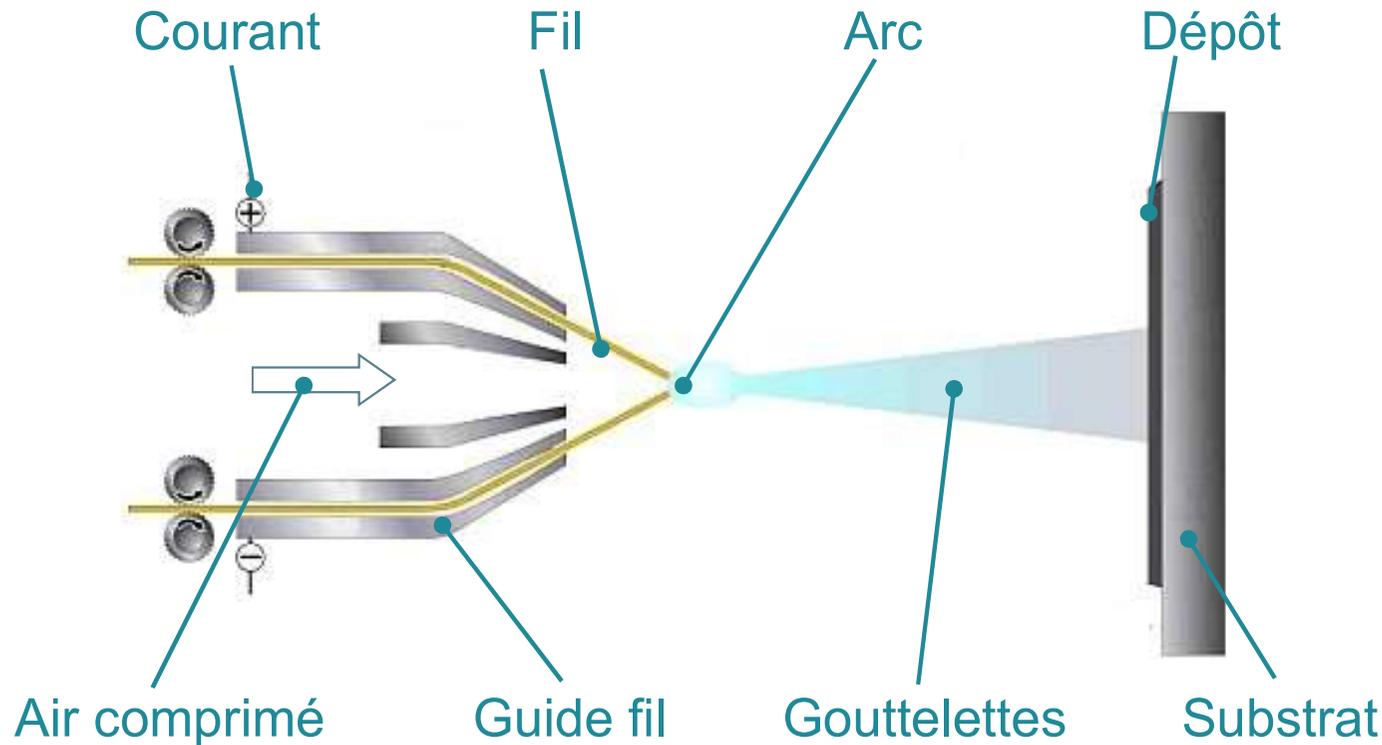
## Revêtement CVD

Le matériau à déposer (carbure, oxyde, nitrure) est issu d'une réaction chimique de plusieurs espèces gazeuses dans une enceinte à température élevée, sur un substrat (métaux sauf aluminium et cuivre).



## Revêtement par projection thermique

Ces procédés utilisent des particules métalliques fondues ou ramollies qui sont projetées à grande vitesse par un jet de gaz sur le substrat.



## Revêtement de conversion

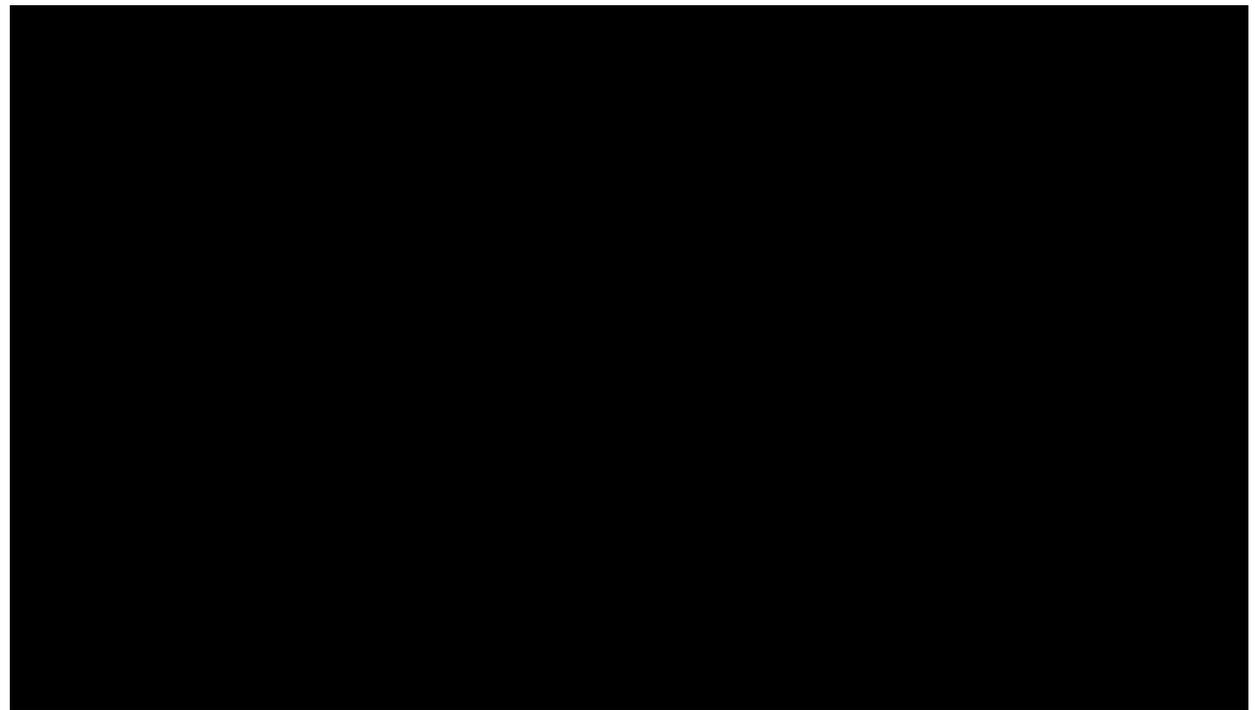
C'est un traitement utilisant également le principe d'une électrolyse mais la pièce, contrairement au revêtement électrolytique, est positionnée sur l'anode (oxydation anodique).



Anodisation des aluminiums

## Revêtement par immersion : la galvanisation

Dans ce procédé, la pièce est plongée dans un bain de métal fondu (zinc). Ce dépôt offre une bonne protection contre la corrosion.



## Revêtement par peinture

Le rôle de la peinture est essentiellement protecteur ou décoratif.

Elles sont composées :

- d'un liant (adhérence à la surface et propriétés mécaniques du film) ;
- d'un solvant (application du film) ;
- de pigments (propriétés de couleur, résistance... ) ;
- d'additifs.



Immersion



Aspersion

# FIN DU COURS 3 & 4

Comment fabriquer le produit ?