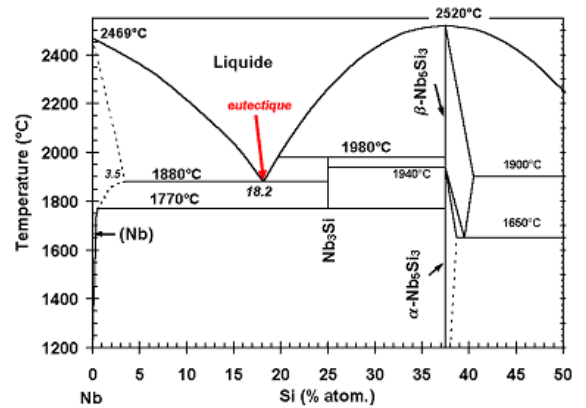
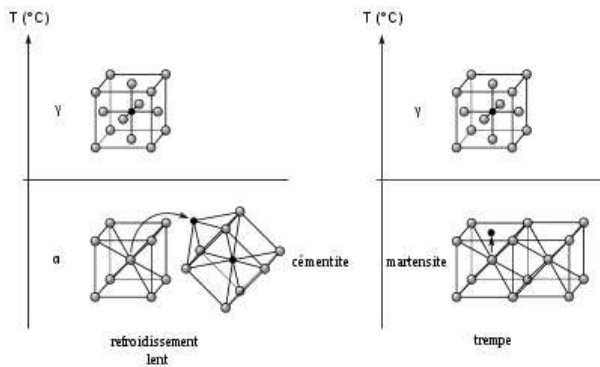


# Cycle 7: Analyser et mettre en place un processus de fabrication par une approche PMP

## Chapitre 4 : Traitements thermiques des aciers



Problématique

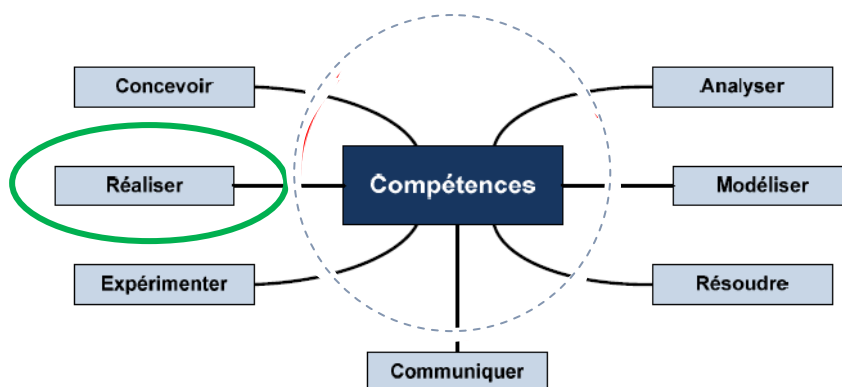
Quels sont les principes physiques et matériaux associés à un traitement thermique volumique (trempe, revenu, recuit) ou surfacique (cémentation, nitruration...) sur un acier ?



Savoir

### F. Réaliser:

- A partir d'un dossier ressources, proposer un traitement thermique en fonction d'un cahier des charges de pièce
- Justifier le positionnement d'un traitement thermique dans un processus de réalisation d'une pièce





## Traitements thermiques des aciers

### 1. Le traitement thermique

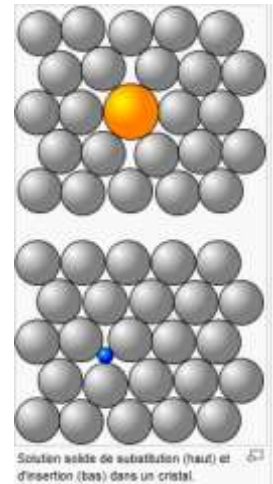
#### 1.1. Introduction

Le **traitement thermique** d'une pièce de métal consiste à lui **faire subir des** transformations structurales grâce à des cycles prédéterminés de chauffage et refroidissement afin d'en améliorer les caractéristiques mécaniques : *R<sub>m</sub>, R<sub>m</sub>, HRC, E...*

Dans les métaux, les atomes sont organisés sous la forme **de matrice** : ils forment une **structure** cristalline. Des atomes étrangers (impuretés, éléments d'alliage) peuvent s'introduire dans ce réseau, soit en **substitution des atomes** « de base », soit en insertion, c'est la notion de solution solide.

Avec l'**élévation de la température**, les atomes du cristal **s'agitent** autour de leur position et **s'écartent les uns des autres**, provoquant la **trempe**. Cela a plusieurs conséquences :

- *l'espace entre les atomes augmente, ce qui permet d'accueillir plus d'atomes en solution d'insertion, et des atomes plus gros ;*
- *les atomes s'agitent, ils deviennent mobiles et peuvent se déplacer dans le cristal, phénomène appelé diffusion ;*
- *dans certains cas, les atomes du cristal se réorganisent en une autre phase cristallographique, on parle **d'allotropie**.*



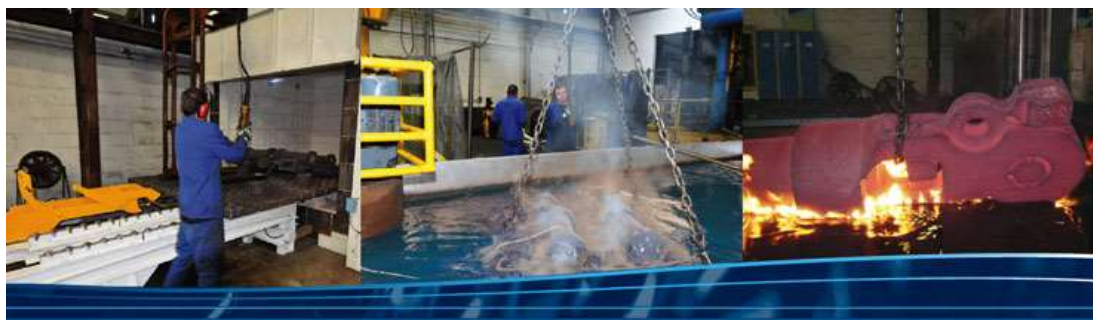
Ce sont ces mécanismes qui entrent en jeu lors des **traitements thermiques**.

#### 1.2. La TREMPE

Le but de la trempe est une augmentation de la dureté **de l'acier** (on passe de  $200 < HV < 250$  à HV mini 550). Elle engendre aussi une augmentation des autres caractéristiques mécaniques du métal trempé telle que la **limite élastique (Re)**, la **résistance maximale (R<sub>m</sub>)**, le **module d'Young (E)** ...

Les étapes :

- 1) On **chauffe** la pièce à une température  $\theta_t$  (appelée température de trempe), afin d'amener l'alliage à un état austénitique (*voir bandes d'austénisation Fig.1 page suivante*)
- 2) On **maintient** cette température de façon à permettre au carbone de migrer dans le fer  $\gamma$  et à obtenir l'homogénéité de l'austénite.
- 3) On **refroidit rapidement** la pièce par immersion dans un liquide (eau, huile azote), ou à l'air. On évite ainsi la formation des constituants d'équilibre obtenus par un refroidissement lent (perlite, ferrite).





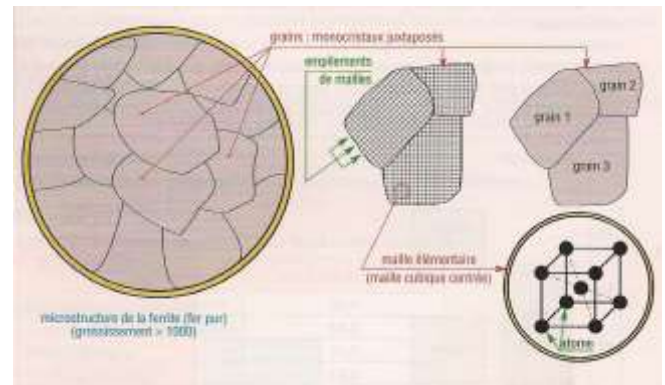
## Traitements thermiques des aciers

Ce traitement, comme la plupart des autres ne modifie pas la composition chimique de l'alliage, mais il apporte des modifications :

- *De sa constitution : insertion du carbone, structure de la maille.*
- *De la structure : grosseur du grain, répartition des constituants.*
- *De l'état mécanique : les différences de température, à un instant donné, aux différents points de la pièce (en surface ou à cœur par exemple), provoquent des irrégularités de dilatation donc des contraintes internes.*

### Rappel physique:

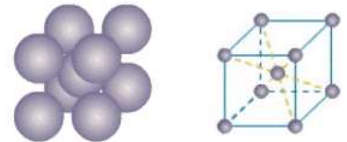
Un métal à l'état solide se présente sous forme d'un assemblage de grains microscopiques (taille variant en général de 2 à 20  $\mu\text{m}$ ) orientés au hasard, dont chacun constitue un cristal. Chaque cristal est constitué par un empilement régulier d'ions métalliques formant un réseau. La *structure cristalline* de base d'un réseau est appelée *maille*.



### a) Structure cubique centrée (cc) → matériaux **peu ductiles**

Structure alphasène ( $\alpha$ ) : Cette structure est celle des métaux suivants : **Fer  $\alpha$** , **Chrome (Cr)**, **Molybdène (Mo)**, **Tungstène (W)**, **Vanadium (V)**

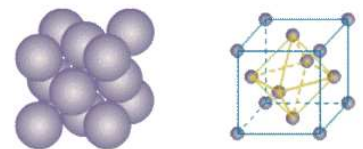
La maille est un cube. Les centres des ions occupent les sommets et le centre du cube.



### b) Structure cubique à faces centrées. (cfc) → matériaux **très ductiles**

Structure gammagène ( $\gamma$ ) : Cette structure est celle des métaux suivants : **Fer  $\gamma$** , **Aluminium (Al)**, **Cuivre (Cu)**, **Nickel (Ni)**, **Plomb (Pb)**

La maille est un cube. Les centres des ions occupent les sommets et les centres des faces du cube.



### c) Structure hexagonale compact (hc) → matériaux **fragiles**

Cette structure est celle des métaux suivants : **Magnésium (Mg)**, **Zinc (Zn)**,.....





## Traitements thermiques des aciers

La vitesse de refroidissement influe sur les caractéristiques finales de l'alliage trempé.

Les modifications des propriétés mécaniques de l'alliage sont en fait provoquées par des **arrangements de structure cristalline**. La transformation la plus intéressante pour la trempe est celle qui rend possible le passage de l'**austénite** en **martensite** (constituant très dur). Cette transformation ne peut se faire que si la vitesse de refroidissement est supérieure à la **vitesse critique de trempe**, rendant impossible la diffusion des atomes de carbone.

### 1.2.1. Austénitisation des aciers

**Etape 1** d'un durcissement par trempe austénitique : **chauffer la pièce** à une température  $\theta_t$  (appelée température de trempe), afin d'amener l'alliage à un état austénitique (voir bandes d'austénitisation Fig.1).

Température de chauffe (voir figure 1):

- Pour un **acier hypoeutectoïde**, la température de chauffe doit être supérieure à  $A_3$  afin que toute la Ferrite et la Perlite soient transformées en austénite.
- Pour un **acier hypereutectoïde**, la température de chauffe doit être supérieure à  $720^\circ\text{C}$ . L'Austénite cohabite alors avec la Cémentation qui est très dure, il n'est donc pas nécessaire de chauffer jusqu'à  $A_3$  pour obtenir une structure entièrement austénitique.

**Etape 2** d'un durcissement par trempe austénitique maintien à la température de trempe (voir figure. 2). Sur cet exemple (acier 35 CrMo 4) l'austénitisation complète est obtenue en 1 seconde à  $1000^\circ\text{C}$  et en 100 secondes à  $850^\circ\text{C}$ . Si  $\theta$  augmente  $\rightarrow$  temps diminue

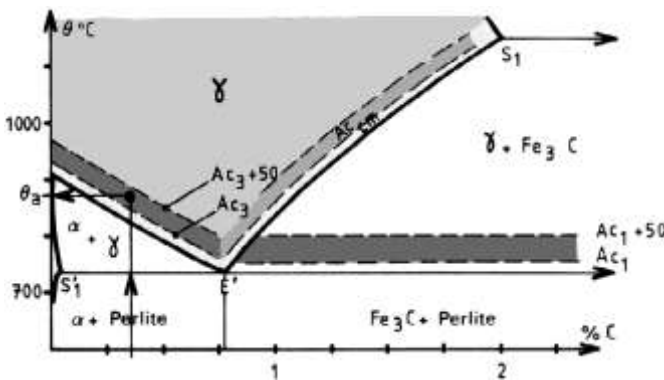


Figure 1 : bandes d'austénitisation des aciers.

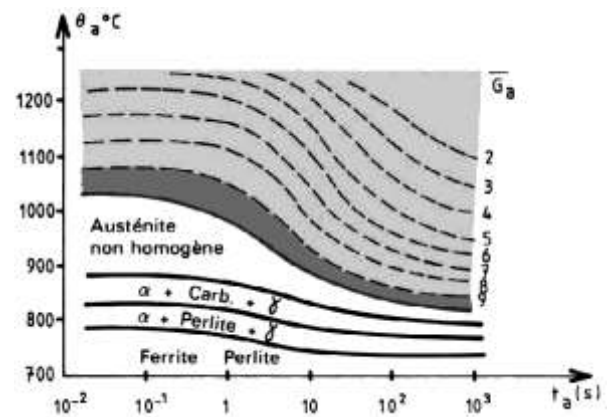


Figure 2 : austénitisation isotherme du 35 CrMo 4.



## Traitements thermiques des aciers

### 1.2.2. Refroidissement continu

**Etape 3** d'un durcissement par trempe austénitique : on **refroidit rapidement** la pièce par immersion dans un liquide (huile, eau ou bain de sel) ou à l'air.

#### Influence de la vitesse de trempe.

Pour des vitesses de refroidissement très faibles, le carbone peut diffuser totalement dans le réseau du fer et donner des constituants d'équilibre tels que **ferrite**, **perlite** : ce n'est pas le but recherché.

Pour des vitesses de refroidissement très élevées, le carbone n'a pas le temps suffisant pour diffuser dans le réseau du fer : le constituant alors obtenu est de la **MARTENSITE**.

**Vitesse critique de trempe** : C'est la vitesse minimale de refroidissement permettant d'obtenir une structure entièrement martensitique.

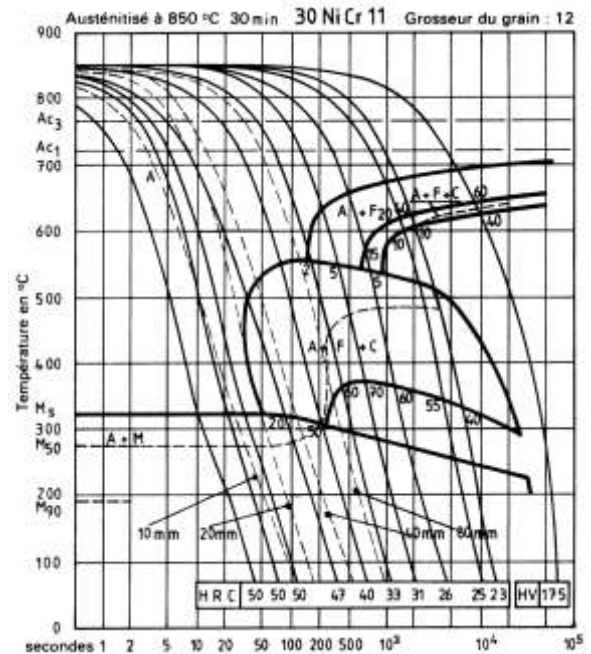


Figure 3 : courbes de refroidissement du 30 Ni Cr 11

La composition physico-chimique obtenue après trempe, dépendra de trois paramètres :

- La **composition chimique de l'acier** : il faudra choisir un acier en fonction des caractéristiques mécaniques attendues
  - La **masse** de la pièce
  - Le **fluide de refroidissement**
- } → Ces deux éléments définiront les vitesses de refroidissement aux différents points de la pièce.

### 1.2.3. Choix d'une nuance d'acier

Une première étude en **statique**, en **dynamique**, nous a fourni les sollicitations extérieures sur chacune des pièces de l'ensemble étudié.

La **RDM** nous a permis de dimensionner les pièces : dimensions géométriques et résistances mécaniques.

Nous pouvons maintenant déterminer une nuance d'acier appropriée en fonction:

- Des caractéristiques désirées après trempe.
- Des dimensions de la pièce.

On choisira une nuance avec un **pourcentage de Carbone élevé (>1%)** et un acier fortement allié si les caractéristiques désirées après trempe en surface et à cœur sont **élevées (> 60 HRC)** et (ou) les dimensions de la pièce sont **importantes**.

On choisira une nuance avec un **pourcentage de Carbone moyen (0,4 à 0,6%)** et un acier faiblement allié si les caractéristiques désirées après trempe en surface et à cœur sont **moyennes (45 à 55 HRC)** et (ou) les dimensions de la pièce sont **faibles**.





## Traitements thermiques des aciers

### 1.2.4. Notion de trempabilité

**Définition** : la trempabilité est l'aptitude d'un acier à obtenir une structure **entièrement martensitique** après austénisation.

La vitesse de refroidissement est maximale à la périphérie de la pièce et diminue graduellement vers le cœur. Le constituant de trempe martensitique ne se forme que dans les zones où la vitesse critique de trempe est dépassée. La propagation du refroidissement vers le centre dépend du rapport **masse / surface de la pièce trempée**.

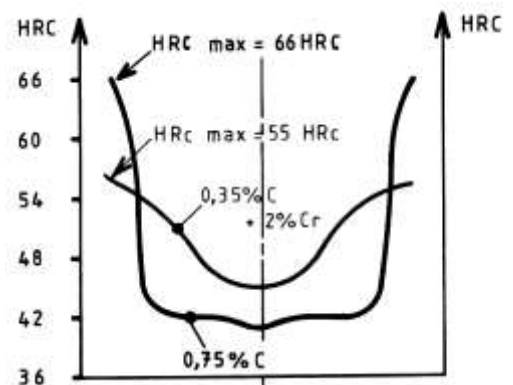
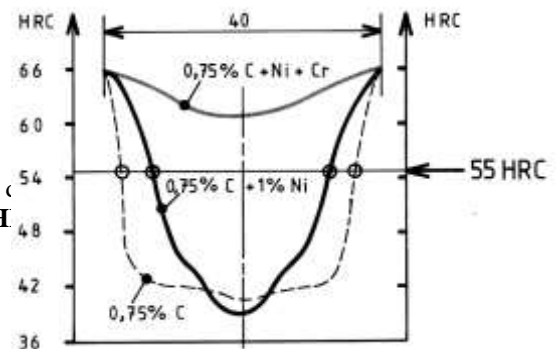
Lors d'une trempe, les vitesses de refroidissement varient d'un point à un autre de la pièce. Pour un milieu de trempe et des dimensions de pièce données, les lois de refroidissement varient de la surface vers le cœur et donnent des duretés qui peuvent varier d'un point à un autre de la pièce (structure non homogène après trempe).

### 1.2.5. Facteurs influençant la trempabilité

#### Influence des éléments d'addition

La trempe à cœur est très rarement obtenue dans le cas d'aciers non alliés, d'addition modifiant sensiblement la pénétration de la trempe. Ainsi le **CH** améliorent très sensiblement la trempabilité d'un acier

*L'exemple ci-contre montre l'influence des éléments Cr (chrome) et Ni (nickel) sur la courbe de pénétration de trempe d'un acier à 0,75% de Carbone (échantillon Ø40). La dureté de 55 HRC correspond à une structure à 50% de Martensite et 50% de Bainite pour l'acier non allié. On notera, pour l'acier non allié, la chute brutale de dureté à partir de la surface. Par contre avec du nickel et du chrome, la courbe est presque plate, la trempe à cœur est possible.*



#### Trempabilité et dureté maximale

Il est important de ne pas confondre **la notion de trempabilité** et celle de **dureté maximale**. Dans l'exemple ci-contre l'acier non allié possède une dureté maximale supérieure à l'acier allié, mais il a par contre une moins bonne trempabilité.

La trempabilité dépend essentiellement des éléments d'alliage. Si % éléments d'alliage  $\nearrow$   $\Rightarrow$  trempabilité  $\nearrow$

La dureté maximale dépend essentiellement du pourcentage de Carbone : si % C  $\nearrow$   $\Rightarrow$  dureté H  $\nearrow$



---

## Traitements thermiques des aciers

---

### 1.3. Le REVENU

#### Préambule

La trempe martensitique des aciers permet l'obtention d'une pièce présentant une **résistance et une dureté élevées** du fait de la présence de Martensite, mais aussi une **grande fragilité** (faible résilience). De plus, les vitesses de refroidissement ont été très différentes entre la surface et à cœur. En général, la pièce ne peut donc pas être utilisée directement à l'état trempé.

#### But du revenu

C'est un traitement thermique **appliqué exclusivement aux aciers trempés**, dont le but est d'atténuer les effets néfastes de la trempe et en particulier la fragilité. Il permet d'atteindre un état plus proche de la structure d'équilibre sans l'atteindre. Il s'agit de réaliser le meilleur compromis pour la pièce entre Résistance mécanique (R), dureté (H), résilience (K) et allongement (A%), en fonction de l'usage de la pièce.

#### Principe du revenu

Le revenu est un traitement thermique qui s'effectue en continu après trempe en trois étapes :

- 1) Réchauffage de la pièce à une température  $\theta_R < AC1$  ( $\theta_R$  fonction de l'état désiré après revenu).
- 2) Maintien de la pièce à  $\theta_R$  pendant un certain temps  $T_R$  (fréquemment plusieurs heures).
- 3) **Refroidissement lent** jusqu'à la température ambiante (la loi de refroidissement dépendant du matériau).

### 1.4. Le RECUIT

Un **matériau ductile** est un matériau pouvant se **déformer plastiquement**, ceci est utilisé pour la **mise en forme** (*laminage, tréfilage, forgeage, ...*). Cette déformation provoque des défauts d'organisation des atomes dans le cristal, ce qui durcit la matière : ce phénomène est l'**écrouissage**

Si l'on **chauffe (entre AC1 et AC3)** de manière modérée le métal, on donne de la **mobilité aux atomes**, ils se réorganisent et éliminent les défauts d'organisation. Ce procédé est appelé RECUIT.

#### **Refroidissement très lent !!**

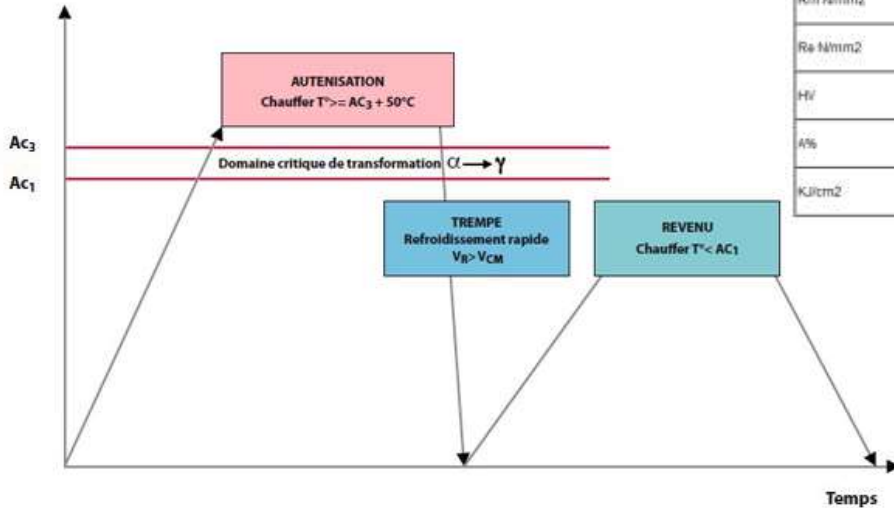
Exemple : Le cycle lent de recuit de bobine de fil d'acier est effectué en plaçant les objets en four à cloche pendant 30 à 40 heures !





Traitements thermiques des aciers

SYNTHESE sur trempe + revenu :



Caractéristiques mécaniques	Avant trempe	Après trempe
Rm N/mm <sup>2</sup>	600-800	1 500-2200
Re N/mm <sup>2</sup>	400-550	1 300-2000
Hv	200-250	550 mini
A%	10 à 20	1 à 5
KJ/cm <sup>2</sup>	30 à 50	1 à 10

Effet de la trempe sur un C55

2. Le traitement de surface

2.1. Introduction

Un **traitement de surface** est une **opération mécanique, chimique, électrochimique ou physique** qui a pour conséquence de modifier l'aspect **ou la fonction de la surface des matériaux** afin de l'adapter à des conditions d'utilisation données. Les traitements de surface jouent un rôle éminent dans le domaine de **la tribologie** et de **l'anti corrosion**.

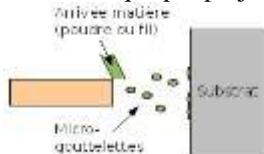
2.2. Les principaux traitements de surface

Il existe de nombreux traitements de surface, en voici une liste des plus couramment rencontrés en construction mécanique, classés par familles :

**REVETEMENTS métalliques**

Dépôt par **voie sèche**

- Rechargement métallique par projection thermique



- Dépôt chimique et physique en phase vapeur (PVD, CVD)

Dépôt par **voie thermique**

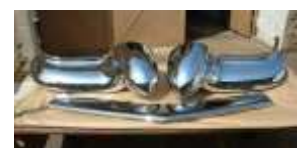
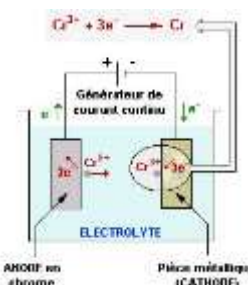
- Etamage, dorure...
- Galvanisation (bain de zinc)



Dépôt par **voie humide**

- **Dépôt électrolytique**

(argenture, borure, chromage...)







# Traitements thermiques des aciers

## TRAITEMENTS de conversion

### Electrolytique

- Anodisation (*oxyde aluminium*)
- Sulfuration



### Chimique

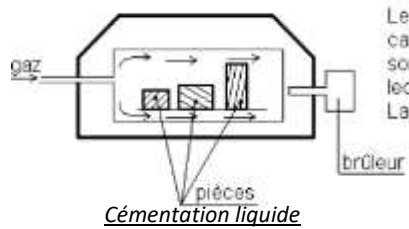
- Phosphatation (*Acide phosph.*)
- Chromatation



## TRAITEMENTS THERMOCHIMIQUES de diffusion

- **CEMENTATION** : apport de carbone par craquage à 900° (azote + méthanol donnant CO) pour les aciers à faible teneur <0.25% : C20, 10CrNiMo14...

→ *augmente la dureté superficielle*



- **NITRURATION** : chauffe ammoniac avec acier à 500° : dégage nitruure fer = **augmentation dureté + réduit usure.**



Nituration des engrenages