

## Traitements de surface

### GENERALITES

Qu'est ce que les traitements de surface ?  
Pour protéger ses biens, il lui a fallu constamment choisir entre :- utiliser un matériau intrinsèquement résistant et souvent « noble » recouvrir celui-ci par un revêtement ou un matériau plus résistant ( ex : la bijouterie )

- ❑ Industrie automobile
- ❑ Infrastructure et construction
- ❑ Protection Aéronautisme
- ❑ Décoration
- ❑ Tuning !
- ❑ Batiment
- ❑ Bijouterie
- ❑ Modifier les propriétés des matériaux
- ❑ Microélectronique
- ❑ Electrique, frottement, dureté

#### DEFINITION

#### PROCEDE

#### SUBSTRAT

L'expression « Traitements de surface » sous-entend l'ensemble des traitements réalisés à la surface d'une pièce, généralement de l'ordre de quelques microns, qui confèrent au produits des propriétés de surface différentes de celles qui existent dans la masse.

- ❑ Procédé
- ❑ Substrat
- ❑ Science des Matériaux
- ❑ Métallurgie polymères
- ❑ Génie des procédés transfert de chaleur- chimie des solutions chimie organiqueélectrochimie
- ❑ Rejets : dépollution, législation

## Objectifs :

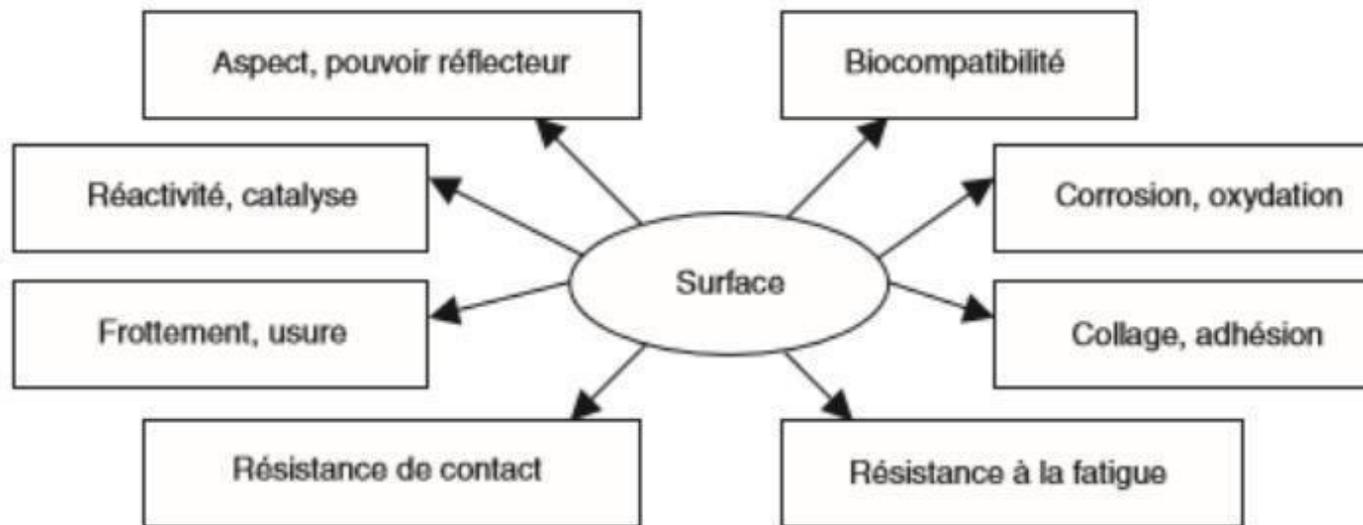
- Connaître l'intérêt et les différentes voies des traitements de surface;
- Identifier et savoir choisir les paramètres et le mode opératoire des traitements de surface;
- Evaluer l'influence des traitements de surface sur les différentes caractéristiques des matériaux traités;

# Introduction

## Propriétés Spécifiques des Surfaces

L'état de surface est un élément de cotation d'une pièce indiquant la fonction, la rugosité, la géométrie et l'aspect des surfaces usinées.

Une **surface réelle** usinée n'est jamais parfaite, elle présente toujours des défauts.



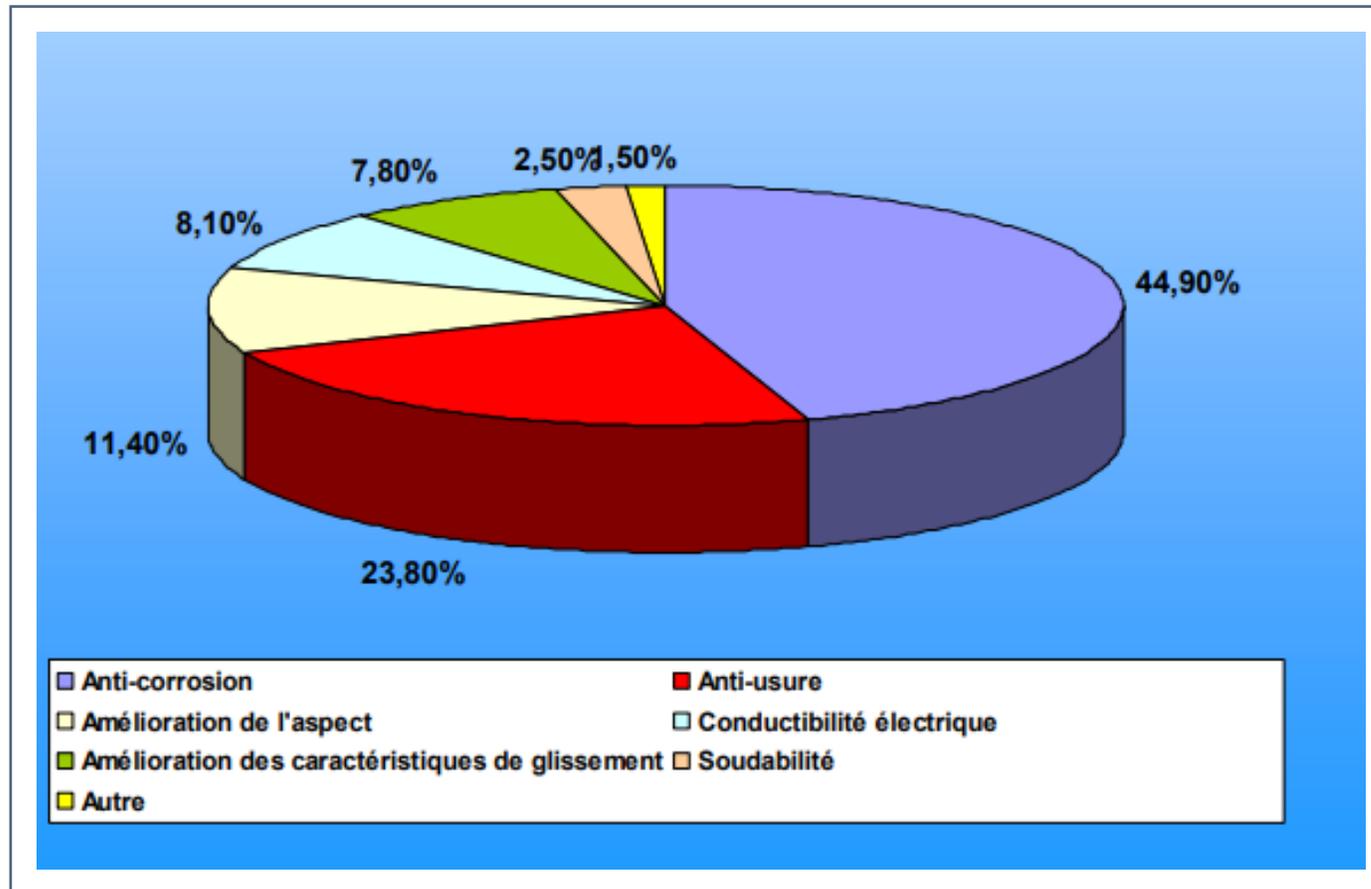
Les **phénomènes de surface** jouent un rôle déterminant dans l'**optimisation** des propriétés d'un matériau.

Propriétés fonctionnelles d'une surface

## Qu'est ce qu'un traitement de surface ? ?

- Les « Traitements de surface » sont l'ensemble de différents procédés réalisés à la surface d'une pièce, généralement de l'ordre **de quelques microns**, qui confèrent au matériau des **propriétés de surface** différentes de celles qui existent à l'intérieur du matériau.

# Domaine d'application des Traitements de Surfaces



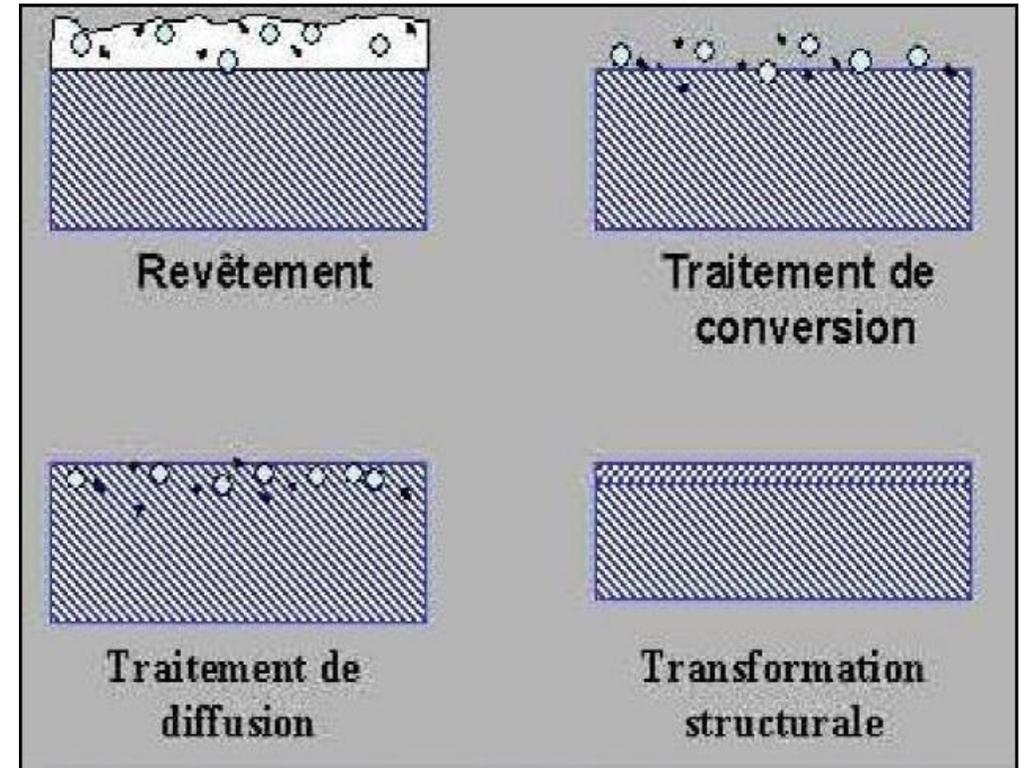
- Anti-corrosion
- Anti-usure
- Amélioration de l'aspect (Décoration)
- Amélioration de la dureté
- Soudabilité

## Classification des procédés de traitements de surface

<b>Revêtement métallique</b>	Dépôt par voie humide	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Dépôt électrolytique</li> <li>✓ Dépôt chimique</li> <li>✓ Immersion en métal fondu</li> </ul>
	Dépôt par voie sèche	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Projection thermique</li> <li>✓ Phase vapeur</li> <li>✓ Faisceau énergétique</li> <li>✓ Rechargement métallique</li> </ul>
<b>Traitement de conversion</b>	Electrolytique	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Anodisation</li> <li>✓ Sulfuration</li> </ul>
	Chimique	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Phosphatation</li> <li>✓ Chromatation</li> </ul>
<b>Traitement thermochimique de diffusion</b>	Diffusion d'éléments non métalliques.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Cémentation</li> <li>✓ Nitration</li> <li>✓ Carbonituration</li> </ul>
	Diffusion d'éléments métalliques	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Chromisation</li> <li>✓ Aluminisation</li> </ul>
<b>Traitement par transformation structurale</b>	Voie thermique	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Fusion et trempe superficielle</li> </ul>
	Voie mécanique	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Grenailage, galetage</li> </ul>

# Mécanismes de traitement de surface

- ❑ **Les revêtements** : le matériau d'apport ne réagit pas ou peu avec le substrat.
- ❑ **Les traitements par conversion chimique** : le matériau d'apport réagit superficiellement avec le substrat.
- ❑ **Les traitements thermochimiques avec diffusion** : le matériau d'apport diffuse dans le substrat.
- ❑ **Les traitements superficiels avec transformation structurale** : la structure métallurgique du substrat est modifiée.



# Nettoyage des surfaces

- Avant tout traitement, le nettoyage des surfaces est une phase essentielle qui a pour objet d'enlever les souillures existant à la surface des pièces et qui comprend deux opérations distinctes.
- Ces opérations sont toujours suivies d'un rinçage.

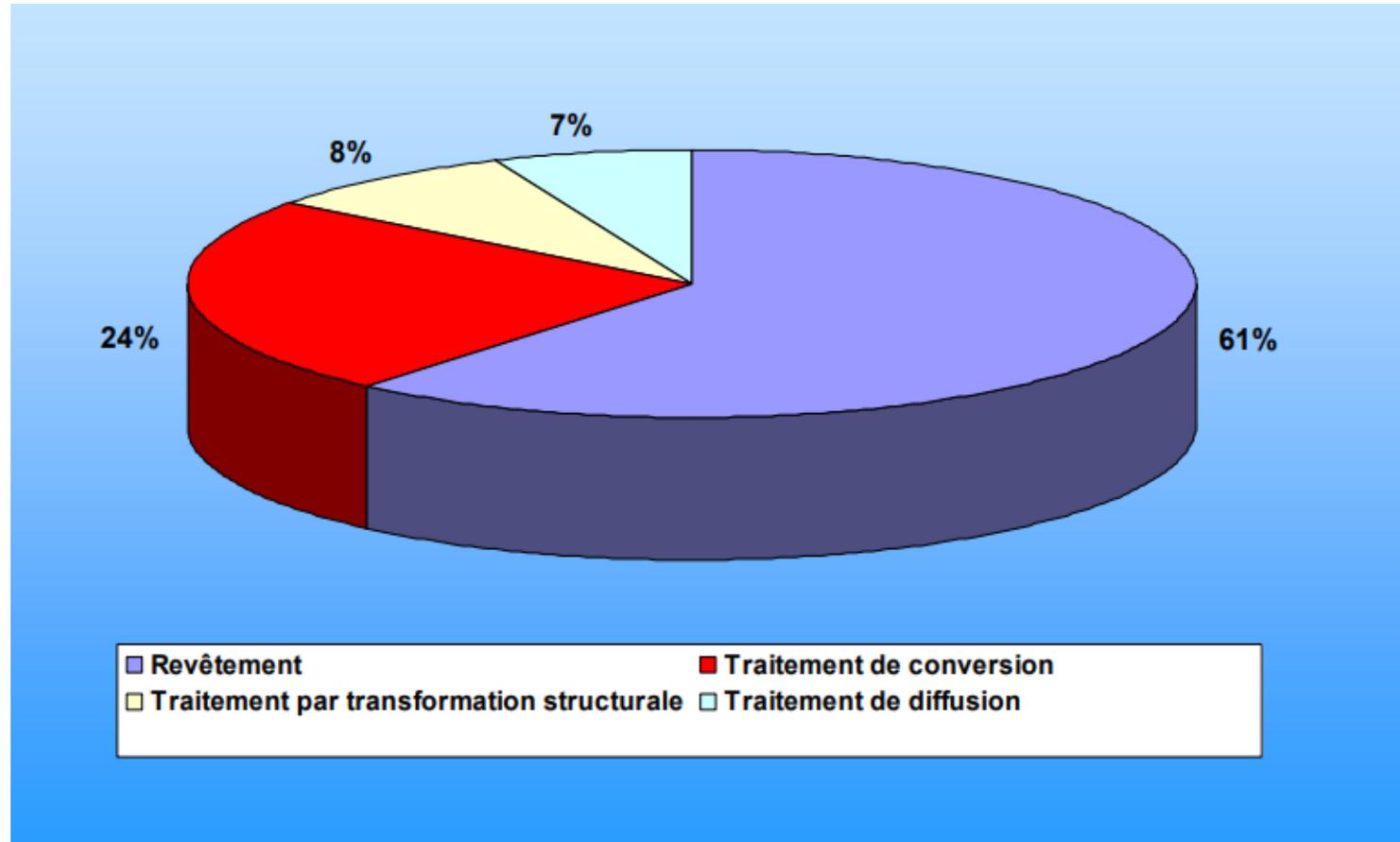
## Dégraissage

- élimine les corps gras : par des actions mécaniques, chimiques, électrolytiques

## Décapage

- enlève toute trace de corrosion et d'oxyde qui adhèrent à la surface des pièces par une action **mécanique** (sablage ou grenailage), **chimique** ou **électrolytique**.

## Répartition par fonction d'utilisation des traitements de surface

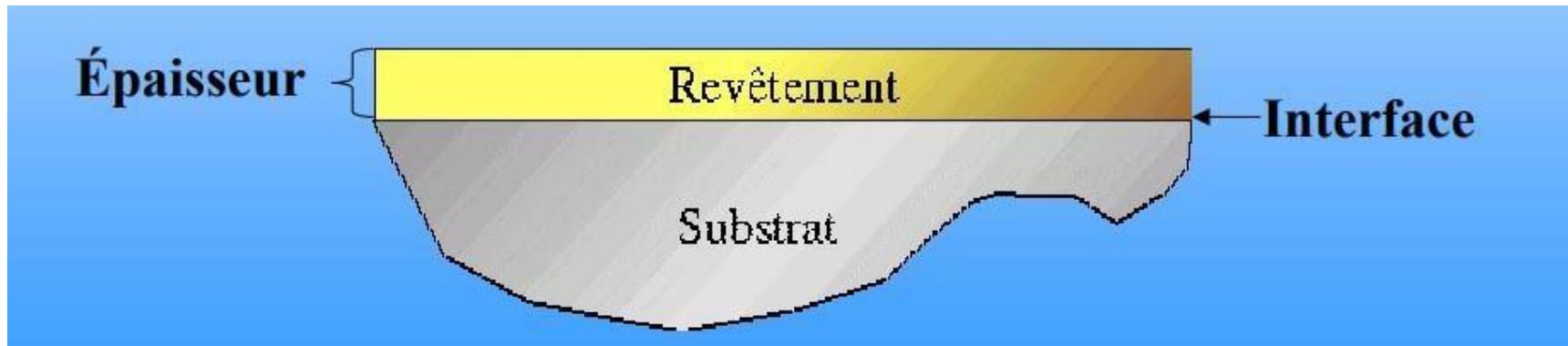


# Les revêtements

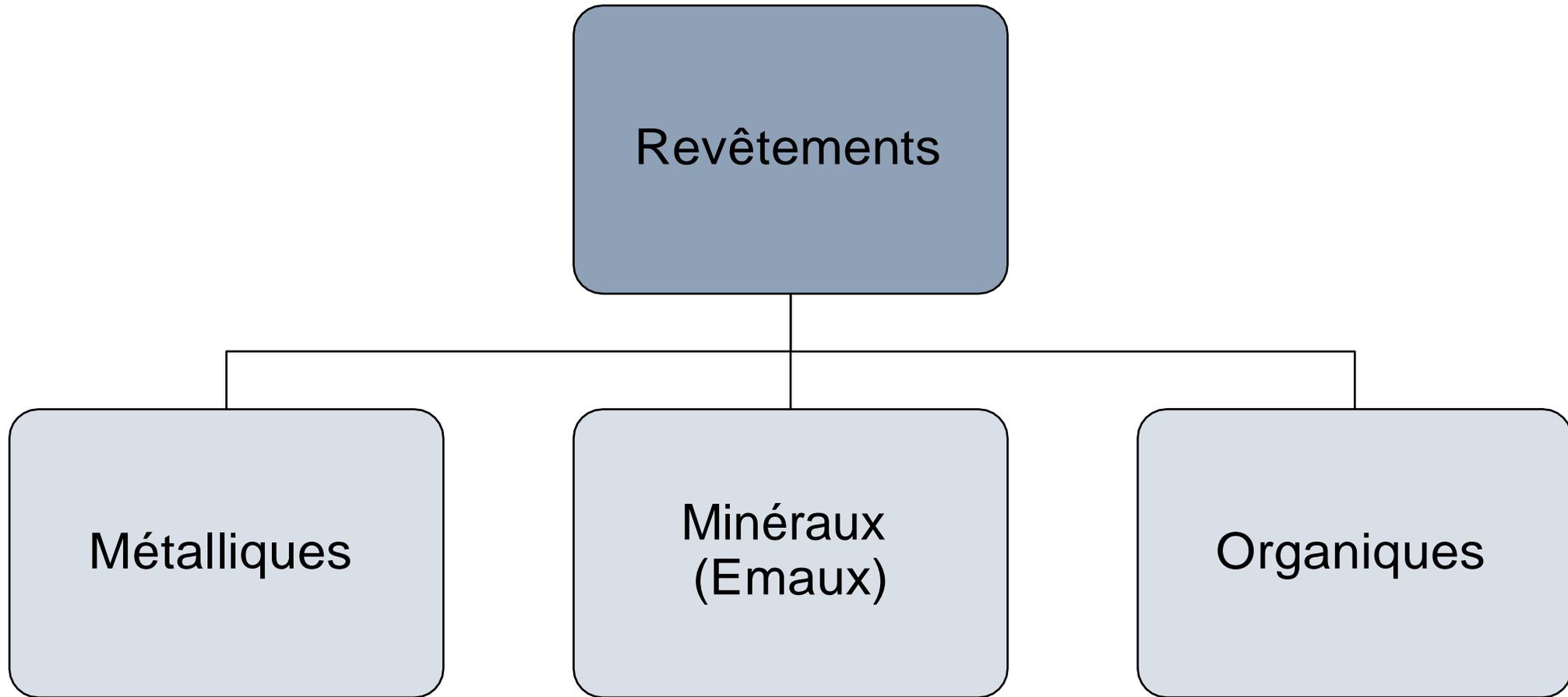
## Qu'est ce qu'un revêtement ?

Toute couche métallique, organique ou minérale déposée sur une surface par un procédé de recouvrement.

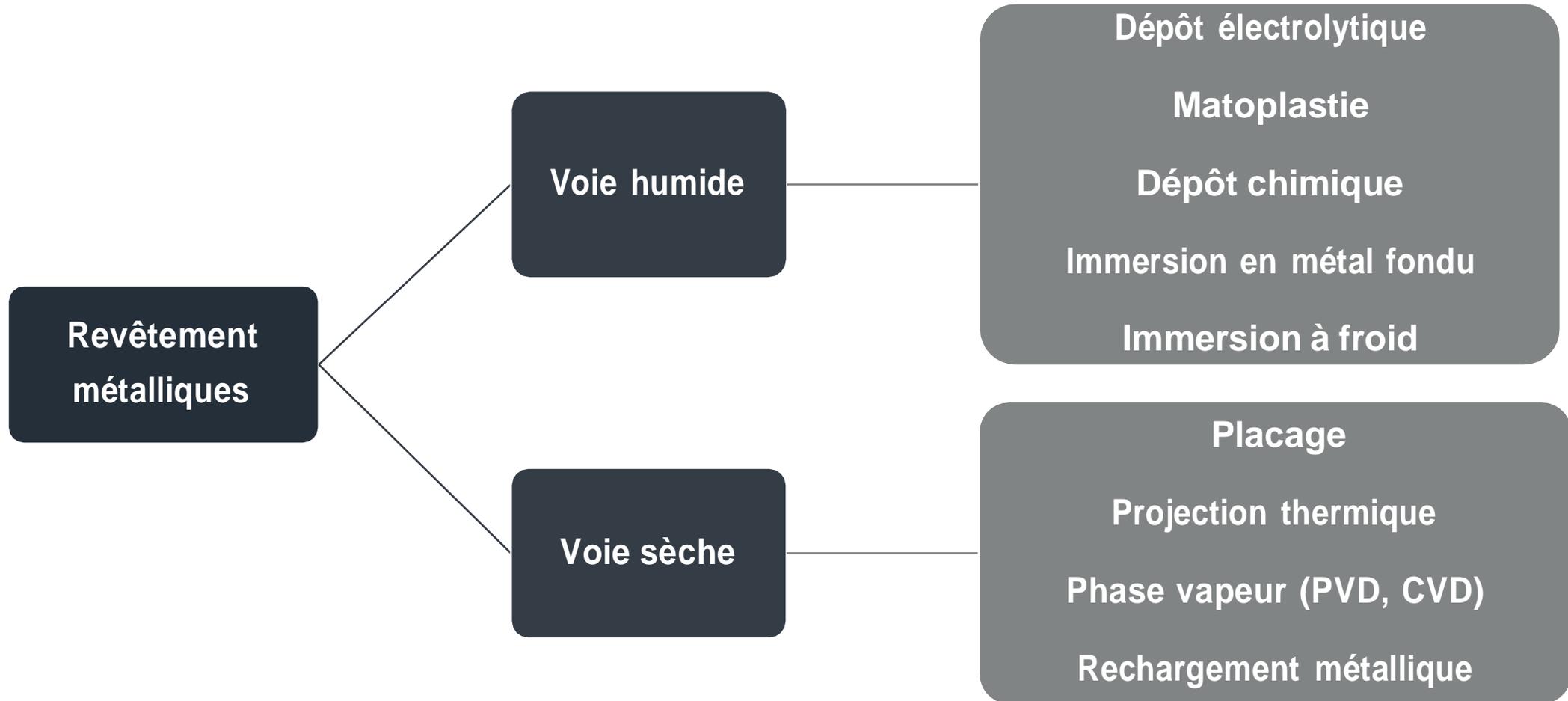
La surface du matériau d'apport doit être assez homogène et continue.



# Classification des revêtements



# Revêtements métalliques



## Exemple de revêtements métalliques par voie humide



Cuivrage des ustensiles de cuisine



Bain de nickelage chimique industriel

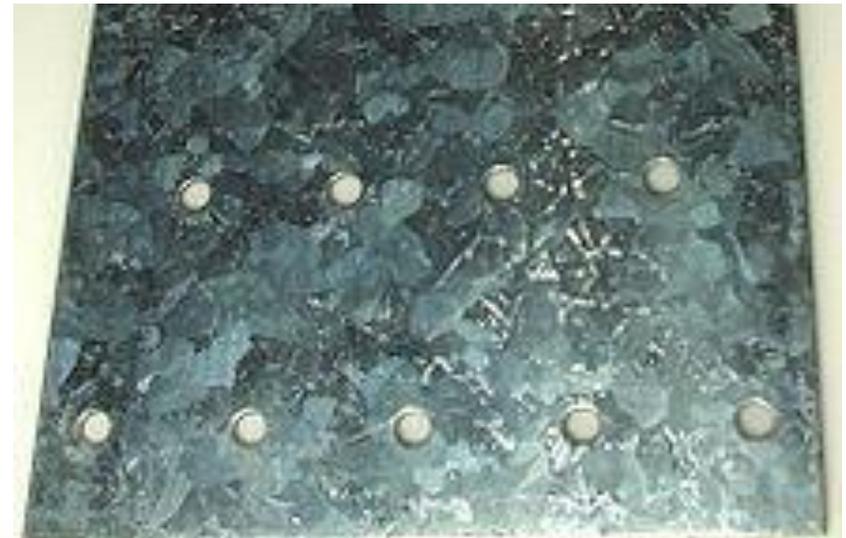


Bain de nickelage chimique au laboratoire

Galvanisation d'un métal pour le protéger de l'oxydation.



Dorure électrolytique



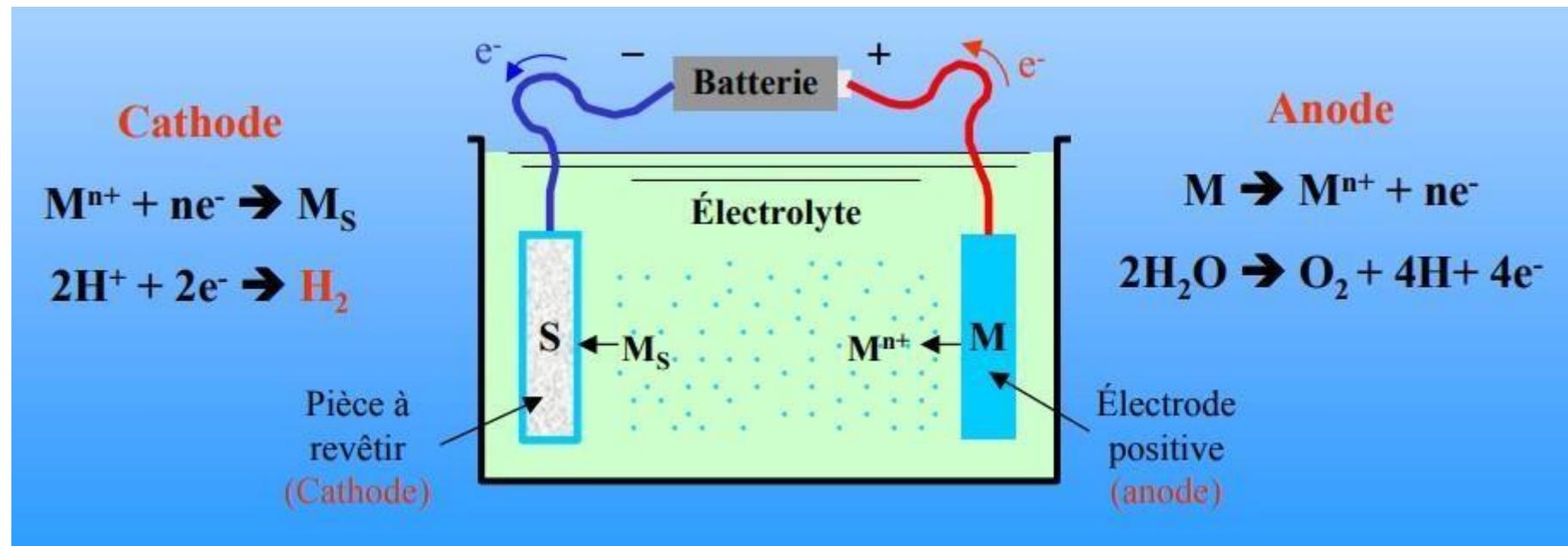
# Exemple de revêtements métalliques par voie humide

## L'électrodéposition

Utilisée pour déposer une ou plusieurs couches métalliques sur une surface métallique.

### Principe

L'électrode à recouvrir est placée dans un bac à électrolyse pour jouer le rôle d'une cathode sur laquelle viennent se déposer des ions métalliques



## Facteurs d'un dépôt électrolytique

- **Température du bain**, si elle augmente, la vitesse de diffusion des ions et la conductibilité du bain augmentent aussi, cela accélère le processus du dépôt électrolytique.
- **Agitation Au cours de l'électrolyse**, Il est nécessaire de maintenir une certaine agitation pour uniformiser les concentrations afin d'obtenir un dépôt continu et régulier.
- **pH du bain**; les solutions d'électrolytes sont maintenues à un pH constant par addition d'une substance tampon. Cela permet d'éviter les modifications de qualité du dépôt qui résulteraient des variations de l'acidité.
- **Densité du courant** à appliquer dépend du métal à déposer et du type d'application recherché.
- **Nature de l'électrolyte**; un électrolyte c'est un composé qui produit une solution ionique quand il est dissous dans une solution aqueuse. L'expérience a montré que l'électrolyse de sels complexes donne des dépôts de meilleure qualité que ceux obtenus à partir des sels simples.
- **Concentration de l'électrolyte** ; si la concentration de l'électrolyte augmente, le nombre des ions devient plus grand et la vitesse de leur décharge croît. Néanmoins, lorsque la concentration dépasse une limite déterminée, le dépôt devient pulvérulent.

# Loi de Faraday

La quantité de matière qui se forme ou qui disparaît aux électrodes est proportionnelle à l'intensité du courant (I) et à la durée de l'électrolyse (t). La masse du revêtement mise en solution par électrolyse est donnée par la loi de Faraday :

*Masse déposée*

$$m = \frac{1}{96500} \frac{A \times I \times t}{n}$$

**m** : masse déposée (g)

**A** : masse atomique (g)

**n** : valence

**I** : intensité (A)

**t** : temps (s)

Vitesse de déposition

$$V_d = \frac{60}{965} \frac{A \times J \times}{n \times d}$$

**V<sub>d</sub>** : μm/mn

**A** : masse atomique (g)

**n** : valence

**I** : densité de courant (A/dm<sup>2</sup>)

**d** : densité (kg/dm<sup>3</sup>)

L'épaisseur (e) du dépôt donnée par la formule suivant

$$e = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n\rho} \cdot \frac{I}{s} \cdot t$$

# Revêtement par émail

- L'**émailage** est un procédé de fabrication consistant à déposer sur un métal, ou un autre support, une couche vitreuse, transparente ou colorée, l'émail.
- Les pièces émaillées ont une grande durabilité, une grande résistance aux rayures et aux agents chimiques, et sont faciles à nettoyer.



L'émail dentaire



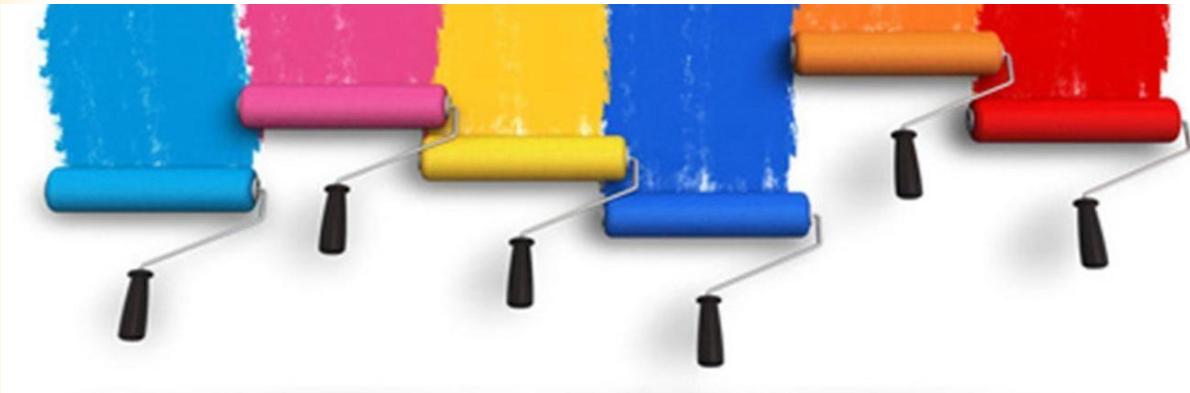
Casserole en fonte émaillée



Œuvres d'art émaillées

## Le revêtement organique (par peinture)

- C'est l'un des plus utilisés au monde.
- Il est principalement composé de matériaux polymères ainsi que de pigments qui donnent la couleur au revêtement.
- Le revêtement organique est fabriqué à base de peinture. Le principal avantage de ce type de revêtement demeure dans sa durabilité. Il s'applique sur divers substrats notamment l'acier au carbone, l'acier inoxydable, l'acier au silicium et l'aluminium.



Pigments de peinture

# Composition des peintures

Les principaux constituants sont :

- **liant et/ou mélange de liants** : partie non volatile du milieu ;
- **pigments** : sous forme de fines particules;
- **matières de charges** : substances en poudre, pratiquement insolubles dans les milieux de suspension, souvent blanches ou faiblement colorées, employées en raison de certaines de leurs propriétés chimiques ou physiques ;
- **solvant** : constituant liquide ayant la propriété de dissoudre totalement le liant, même à forte concentration ;
- **diluant** : liquide simple, volatil dans des conditions normales de séchage, incorporé en cours de fabrication ou ajouté au moment de l'emploi, pour obtenir les caractéristiques d'application requises sans entraîner de perturbations ;
- **additifs** : substances souvent incorporées à faible dose dans les liants,
  - vernis, peintures pour y développer certaines qualités propres à en améliorer
  - soit les conditions de fabrication et/ou de conservation et/ou d'application,
  - soit certaines propriétés spécifiques.

## COMPOSITION SCHEMATIQUE D'UNE PEINTURE



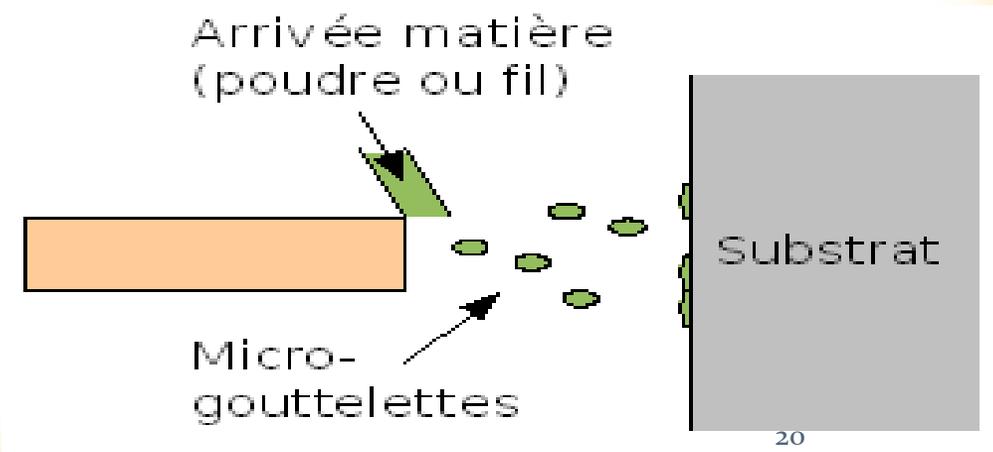
# Dépôt par voie sèche

## Rechargement métallique par projection thermique

Consiste à projeter à l'aide d'un gaz vecteur un matériau généralement sous forme de poudre, à haute température et à grande vitesse, sur un substrat (surface de la pièce à revêtir) généralement métallique, afin de former un revêtement.



Projection flamme poudre



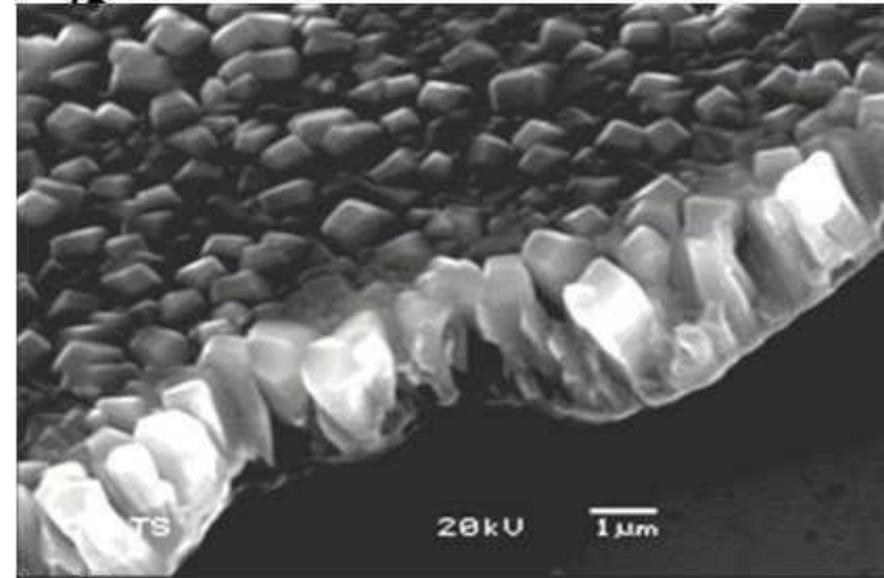
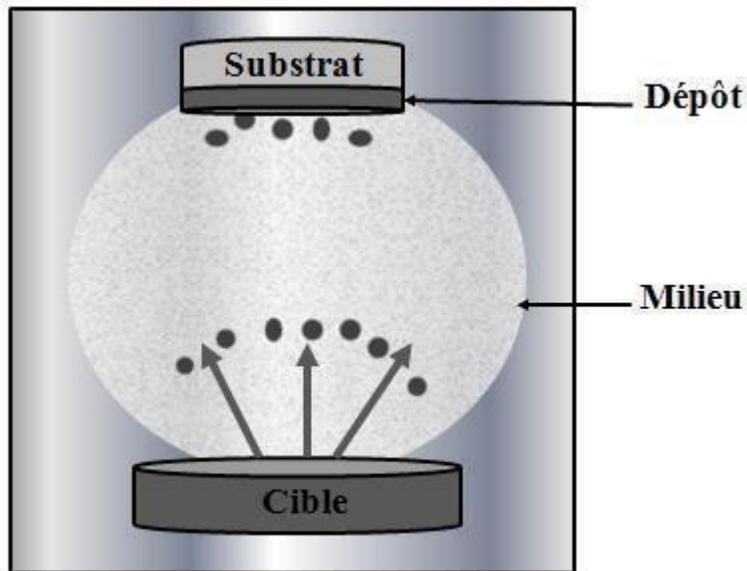
# Dépôt par voie sèche

Phase vapeur (PVD, CVD)

Deux grandes familles de techniques de réalisation de ces dépôts sont utilisées :

- **PVD** : Dépôt physique en phase vapeur
- **CVD** : Dépôt chimique en phase vapeur.

Dans les deux cas, la matière est pulvérisée sous **forme gazeuse**. On agit sur la source et sur le milieu pour **évaporer** la matière qui se condensera pour donner le dépôt.



Couche d'un métal déposée par PVD

Principe du PVD; le métal évaporé est déposé de la cible vers le substrat

# Dépôt par voie chimique

## Le Brunissage

- Le brunissage a pour but de donner **un aspect noir** à une pièce en métal. Il existe deux types de procédés de brunissage :
- Le brunissage **à chaud**
- Le brunissage **à froid**



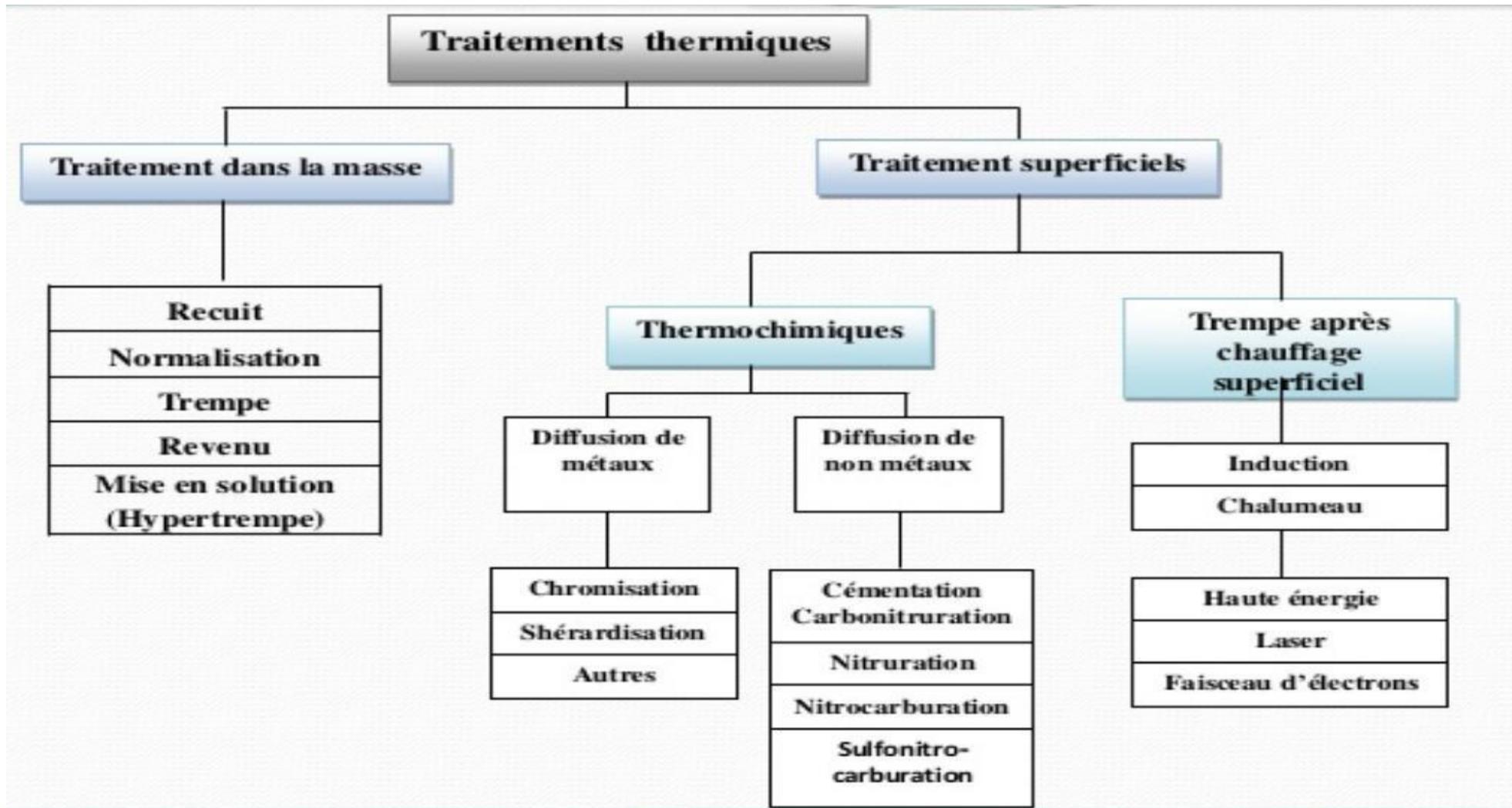
# Traitement par transformation structurale

## Par voies thermique

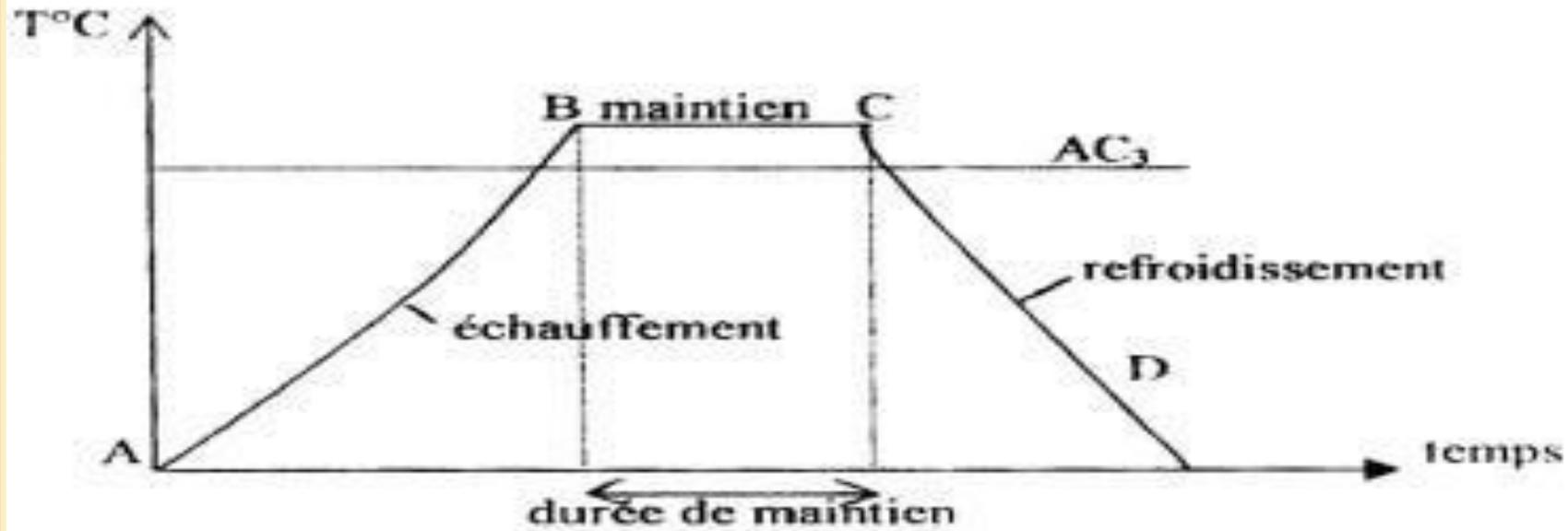
- Les traitements thermiques se définissent comme étant « l'ensemble des opérations de **chauffage et de refroidissement contrôlé** » appliqués à des métaux et alliage.
- De manière générale, les traitement thermiques agissent au **niveau microstructural** des métaux (matrice, précipités, distribution, etc.). Ils permettent de **modifier les propriétés** mécaniques (en les augmentant ou en les diminuant), les propriétés physiques (par exemple, les conductibilités thermiques et électriques) et les propriétés chimiques (par exemple, la résistance à la corrosion).
- En somme, les traitements thermiques sont des opérations qui consistent à faire varier la température des métaux qui reste néanmoins à **l'état solide**. La variation de la température en fonction du temps est appelée cycle thermique ( **chauffage, maintien et refroidissement** ).

# Traitement par transformation structurale

## Par voies thermique



## Diagramme de base de traitement thermique



- AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation (par exemple :  $AC_3$ ).
- BC : Maintient à une température définie.
- CD : Refroidissement avec une vitesse donnée :
  - lente (dans le four, à l'air).
  - Assez rapide (dans l'huile).
  - Très rapide (dans l'eau).

# Traitement par transformation structurale

## Par voies thermique

### La trempe

- La **trempe** consiste à chauffer un matériau à une température dite de changement de phase pendant le temps nécessaire à la transformation de toute la masse chauffée puis à refroidir toute cette masse **très rapidement**.
- La trempe peut suivant la composition du matériau s'effectuer à **l'air ou dans l'huile**...
- **Influence de la trempe sur les propriétés mécaniques** : - Augmentation de la limite élastique (**Re**) ; - Augmentation de la dureté (**H**) ; - Augmentation de la résistance à la rupture (**Rr**) ; - Diminution de l'allongement (**A%**) ; - Diminution de la résilience (**K**)



**Trempe sélective de couteaux:**  
Seule la lame est trempée. Le dos est non trempé ce qui confère au couteau plus de souplesse malgré une dureté de lame importante.

# Traitement par transformation structurale par voies thermique

## Le Revenu

- Cette technique se pratique après une trempe, par chauffage à une température inférieure à celle de la trempe.
- Le revenu a pour but de diminuer les effets de la trempe.
- Le revenu permet d'améliorer la ténacité et diminue les tensions internes, en partie responsables de la fragilité de l'acier trempé, en diminuant très peu la dureté.



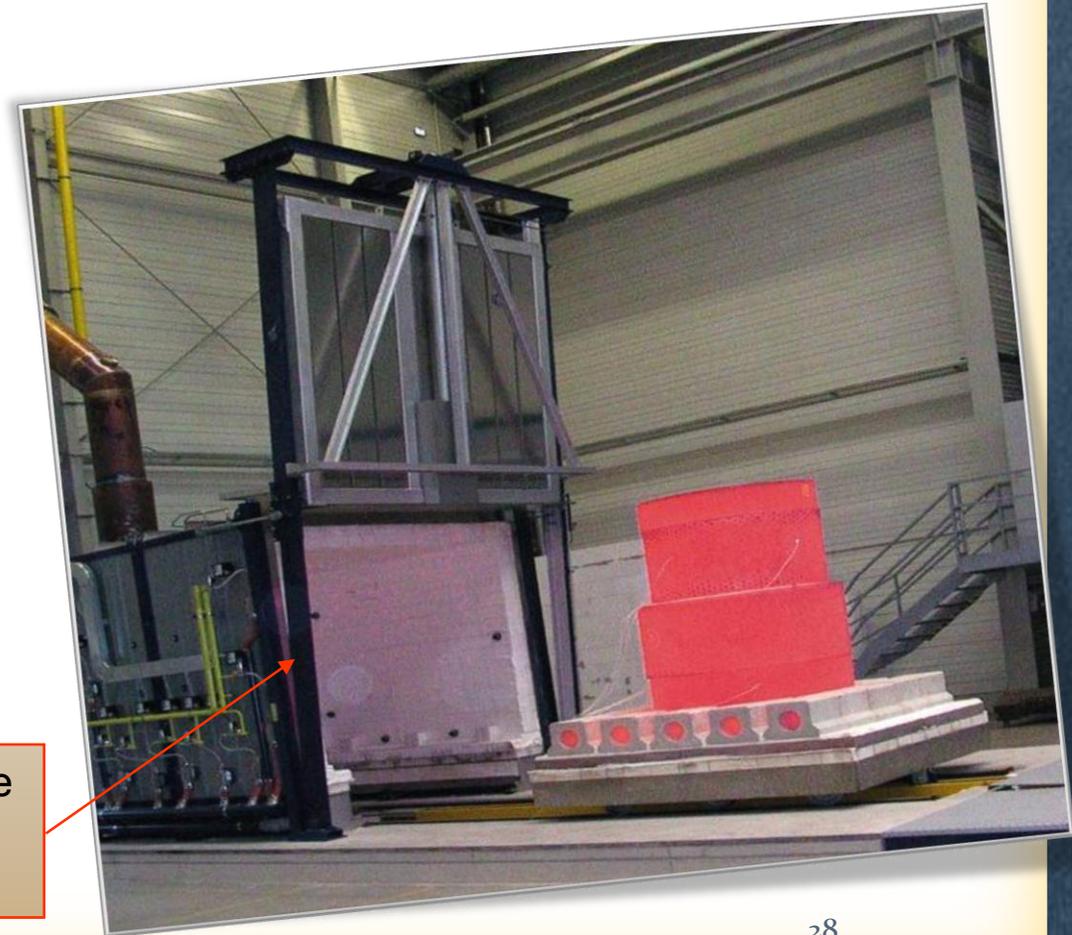
Exemple de lame en acier ayant subit une trempe mais sans revenu, elle représente des fissures :

# Traitement par transformation structurale par voies thermique

## Le Recuit

- Le recuit est utilisé pour **réduire** la dureté, **augmenter** la ductilité et faciliter **l'élimination** des contraintes internes.
- L'acier est **chauffé** pendant un temps plus ou moins long, puis est **refroidi lentement**.
- Cette technique se fait aussi après un traitement mécanique, une opération de soudage, etc.

four à sole mobile  
pour le recuit  
d'anneaux



# Traitement par transformation structurale par voies mécanique

## Le Grenailage

- Consiste à projeter à grande vitesse des billes sur la pièce à traiter.
- On utilise couramment des billes en acier ou céramique.
- But de nettoyage (enlèvement de rouille, calamine...).
- L'opération de grenailage de précontrainte est un traitement mécanique destiné à améliorer les propriétés d'une pièce métallique par durcissement superficiel. On cherche par cette opération à améliorer la résistance à la fatigue et à la corrosion.



Projection des billes ou grenailles sur le matériau



Cabine de grenailage



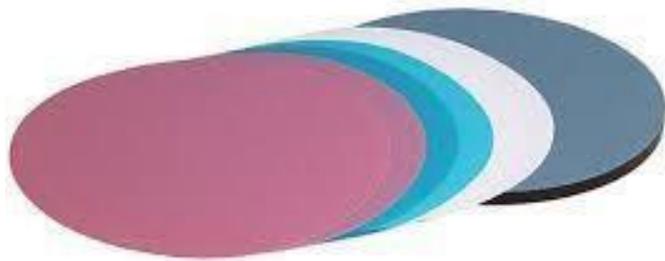
Grenailles en acier coulé

# Traitement par transformation structurale par voies mécanique

## Le Polissage

- Technique de « nettoyage » ou d'abrasion de pièce en métaux.
- On réalise le polissage grâce à des disques de différents matériaux tournant à grande vitesse, avec ou sans pâte à polir.
- Bien réalisé, le polissage permet de renforcer une pièce en supprimant les zones à risques de rupture.

Papier de polissage



Polisseuse mécanique rotative

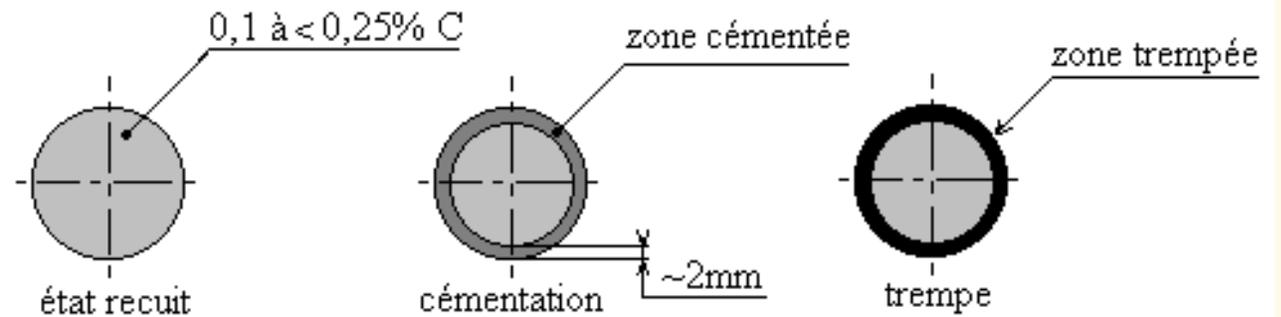


Polissage de voiture

# Traitement de surface thermo-chimique de diffusion

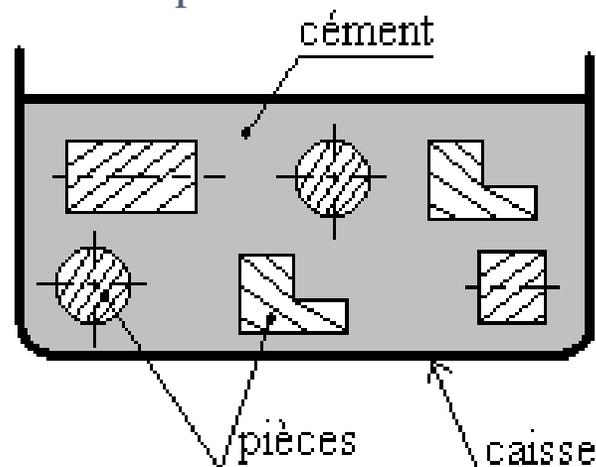
## Cémentation

- Traitement qui consiste en un **apport de carbone dans la surface de la pièce**, suivi d'un durcissement par trempe.
- Cette technique **rend possible la trempe des aciers**.



En général la cémentation se compose des étapes de procédés suivants :

- Cémentation au carbone
- Trempe
- Revenu



Les pièces sont entourées d'un ciment solide à base de charbon de bois et de carbonate de baryum, le tout mis dans des caisses en acier réfractaire et porté en température de traitement pendant un temps très long (environ 1 heure par 0,1mm traité)

# Traitement de surface thermochimique de diffusion

## Nitruration

- C'est une méthode obtenue par **diffusion d'azote en surface**, suivi d'un refroidissement lent, généralement traitées au préalable par trempe et revenu
- Elle donne une plus grande dureté que la cémentation.

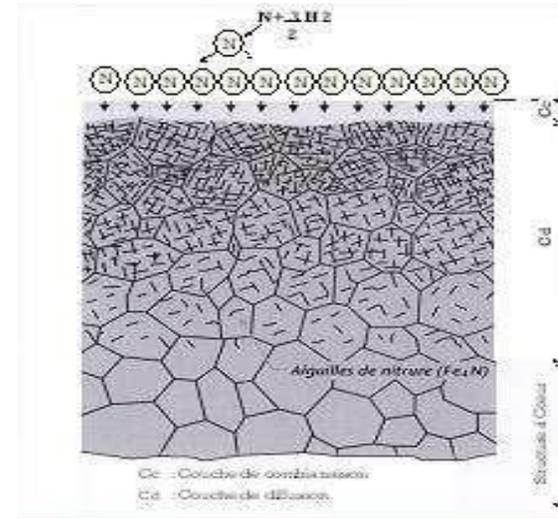
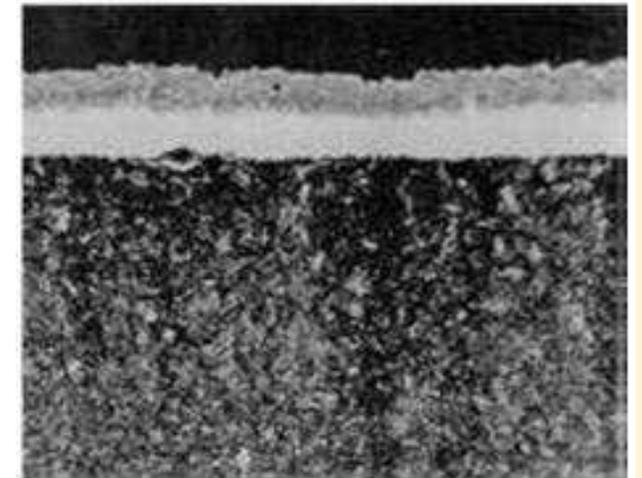
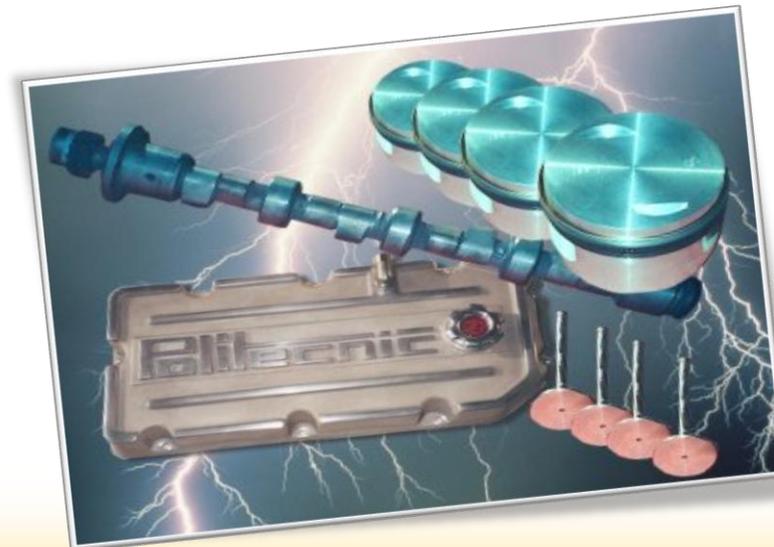


Schéma de la couche nitrurée



Microstructure d'une pièce nitrurée



Fabrication d'arbres à cames sur machine numérique. Traitement thermique par Nitruration sous ions, permettant une **fiabilité** et une **résistance optimale à l'usure**.

# Traitement de surface thermochimique de diffusion

## Carbonituration

- Ce traitement est un mélange de **cémentation** et de **nitruration**.
- Apport en surface de **carbone** et **d'azote** par **chauffage** dans une atmosphère gazeuse entre 600 et 900 degrés C.
- L'opération est généralement **suivie par une trempe**.



# Traitement de conversion

**Les traitements de conversion** produisent une **couche de combinaison chimique** entre le substrat et un réactif. Cette conversion est obtenue par réaction **chimique** ou par **action électrochimique**.

La voie chimique comprend les **phosphatations et passivations**.

# Traitement de conversion

## Par voie chimique

### La Phosphatation

La phosphatation consiste à décaper la surface d'un acier à l'aide d'une solution diluée et chaude d'acide phosphorique. Cela provoque la formation d'une pellicule d'environ 1 micron de phosphate de fer. Cette pellicule assure la résistance à la corrosion de la pièce.



# Traitement de conversion

## Par voie électrochimique

Utilisé surtout pour protéger l'aluminium et alliages d'aluminium (également pour magnésium, titane, inox)

### Cas de l' Aluminium

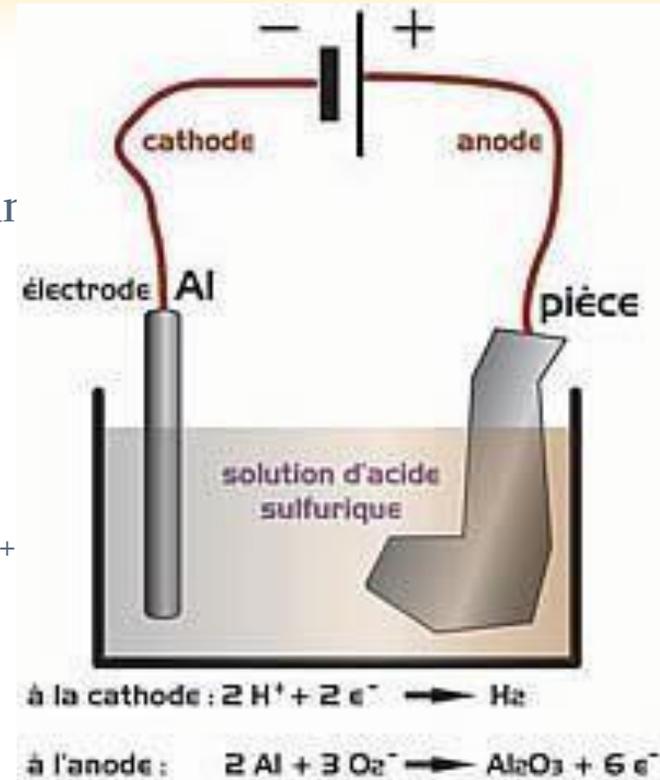
Réaction anodique : dissolution et hydrolyse



Réaction cathodique : dégagement d'hydrogène



On obtient des couches de 15 à 20  $\mu\text{m}$  dont on contrôle la porosité et la couleur (ajout de pigment).



Avant anodisation

Après anodisation

# Conclusion

- Les **traitements de surface** constituent une **étape essentielle de la conception d'une pièce**, en vue de répondre à l'ensemble des propriétés exigées par les conditions d'utilisation.
- Les **propriétés d'ensemble de la pièce** seront **améliorées** pour un **coût souvent raisonnable**, en faisant le choix d'un traitement de surface plutôt que de tenter de trouver un autre matériau de base répondant à toutes les exigences.
- Les **opérations de traitements de surfaces** sont effectuées de nos jours par une multitude de **petites entreprises sous-traitantes pour le compte de grands groupes industriels** dans les domaines : automobile, des bâtiments, aérospatiale, maritime, armement, nucléaire, mécanique...