



Architecture et  
Urbanisme

# Connaissance des Matériaux

Les métaux

**Corrosion**

**UMONS**  
Université de Mons

  
Faculté  
d'Architecture  
et d'Urbanisme

# Les métaux

## Phénomènes de corrosion

### ■ Métaux, métallurgie et corrosion

1. Extraction de minerais
    - Sous forme d'oxydes  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ...
  2. Métallurgie : transformation des minerais en métaux
    - Réduction des oxydes
    - Mais thermodynamiquement instables
- Corrosion par réactions électrochimiques



### ■ Phénomènes de corrosion

- Corrosion « sèche » (attaque par gaz chaud)
- Corrosion « humide »
- Corrosion galvanique

### ■ Phénomènes de corrosion

- Corrosion « humide »
- Corrosion galvanique
- Protections

# Les métaux

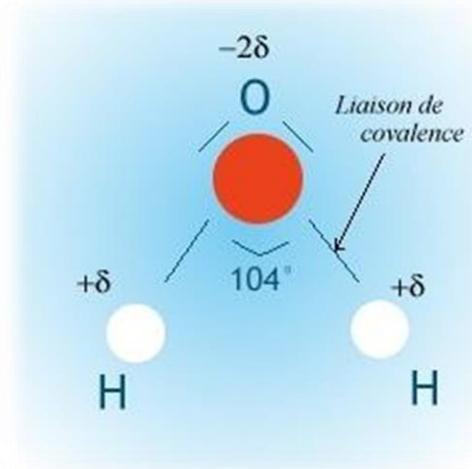
## Corrosion « humide » - Généralités

- 2 modes opératoires

- Sans oxygène
- Avec oxygène

- Corrosion en présence d'un électrolyte

- Electrolyte : substance conductrice car ions mobiles (ex. : eau)
- Corrosion par circulation d'électrons entre le métal (anode) et l'ion  $H^+$  (cathode)



- Phénomènes de corrosion

- Corrosion « humide »  
Généralités

- Sans oxygène

- Avec oxygène

- Protections

- Corrosion galvanique

- Protections

# Les métaux

## Corrosion « humide » - Sans oxygène

- Situation possible : circuits de chauffage en acier
  - Rappel : acier = alliage de fer et de carbone
  - Note : alliage = combinaison métallique avec un ou plusieurs autres éléments chimiques dans le but d'améliorer certaines propriétés

- Cycle

1. Dissolution du métal

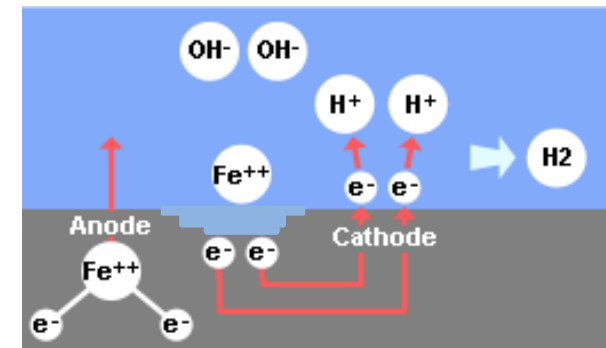
- $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{++} + 2 \text{e}^-$
- Acier chargé négativement
- Apparition d'un potentiel électrique

2. Ionisation de l'eau

- $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$

3. Formation hydrogène gazeux

- $2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 (\text{g})$
- Formation de bulles
- Vitesse de corrosion diminue (car accumulation hydrogène)



- Phénomènes de corrosion

- Corrosion « humide »

  - Généralités

  - Sans oxygène

  - Avec oxygène

  - Protections

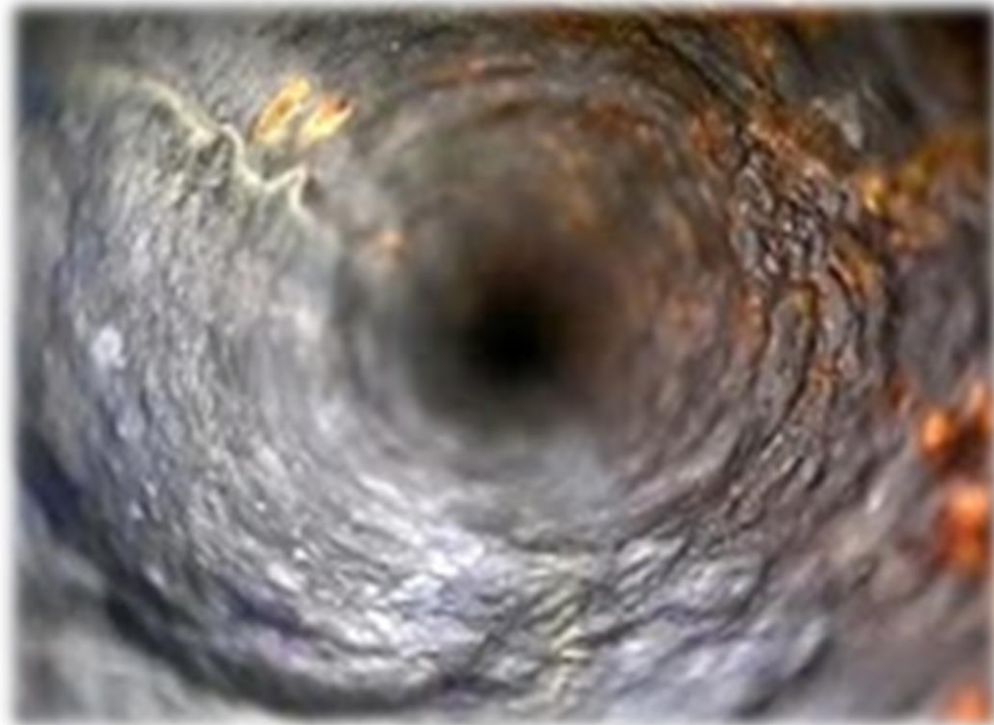
- Corrosion galvanique

- Protections

# Les métaux

## Corrosion « humide » - Sans oxygène

- Conséquences
  - Diminution de l'épaisseur du métal
  - Irrégularités de la surface



- Phénomènes de corrosion
- Corrosion « humide »
  - Généralités
  - Sans oxygène
  - Avec oxygène
  - Protections
- Corrosion galvanique
- Protections

# Les métaux

## Corrosion « humide » - Avec oxygène

- Situation possible : bardage en acier exposé aux intempéries
  - Rappel : acier = alliage de fer et de carbone
  - Note : alliage = combinaison métallique avec un ou plusieurs autres éléments chimiques dans le but d'améliorer certaines propriétés

- Cycle

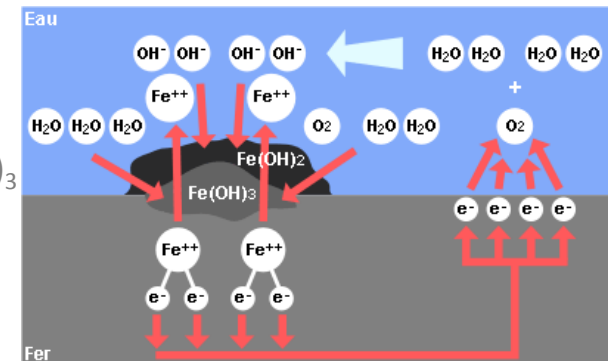
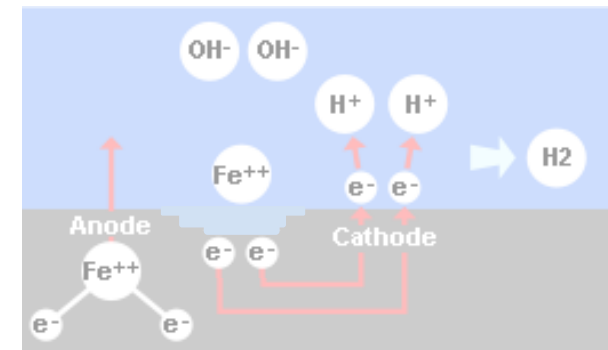
- Cycle identique
- Mais oxygène favorise deux réactions supplémentaires

- a. Recombinaison oxygène et hydrogène

- $2 \text{H}_2 + \text{O}_2 + 4 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$
- ~~Accumulation d'hydrogène~~
- Vitesse de corrosion maintenue

- b. Formation d'hydroxydes

- Rouille
- $\text{Fe}^{++} + 2 \text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$
- $2 \text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{Fe}(\text{OH})_3$



# Les métaux

## Corrosion « humide » - Avec oxygène

### ■ Conséquences

- Formation d'hydroxydes
- Fragilise la structure (poreuse et friable)
- Altération de la surface
- A avoir à l'esprit : peut entraîner l'asphyxie



■ Phénomènes de corrosion

■ Corrosion « humide »

Généralités

Sans oxygène

Avec oxygène

Protections

■ Corrosion galvanique

■ Protections



# Les métaux

## Corrosion galvanique

### ■ Phénomène

- Continuité électrique entre 2 métaux
- Différence de potentiel électrique  
→ couple galvanique
- Renforcé par la présence d'un électrolyte

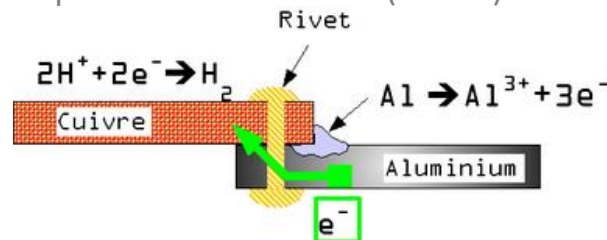
### ■ Couple galvanique

- Qualifie la possibilité d'un métal à en oxyder un autre
- Aussi appelé couple électrochimique
- Application : piles électriques



### ■ Corrosion galvanique

- Oxydation du moins « noble » (cathode), protection du second (anode)



Élément	Potentiel (Volts)
Sodium	- 2.7
Magnésium	- 2.3
Aluminium	- 1.7
Zinc	- 0.8
Chrome	- 0.7
Fer	- 0.4
Nickel	- 0.3
Etain	- 0.1
Plomb	- 0.1
Hydrogène	0
Cuivre	+ 0.3
Argent	+ 0.8
Platine	+ 1.2
Or	+ 1.4

Métaux moins nobles

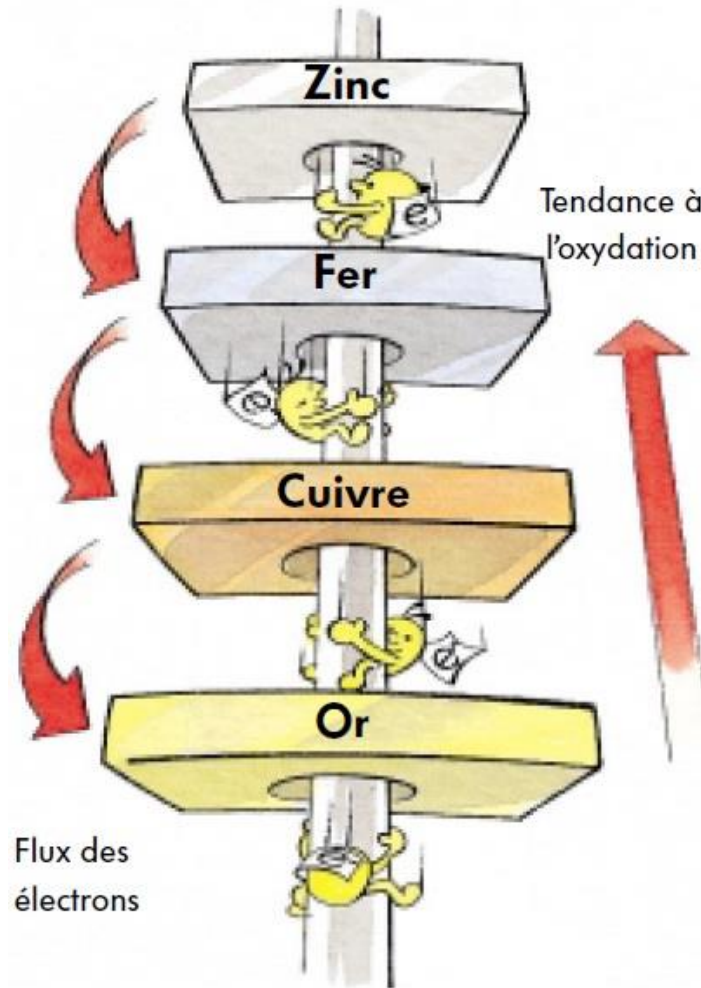
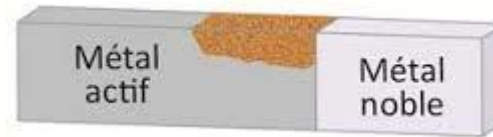
Métaux nobles

- Phénomènes de corrosion
- Corrosion
- Corrosion galvanique
- Protections



# Les métaux

## Corrosion galvanique



Élément	Potentiel (Volts)
Sodium	- 2.7
Magnésium	- 2.3
Aluminium	- 1.7
Zinc	- 0.8
Chrome	- 0.7
Fer	- 0.4
Nickel	- 0.3
Etain	- 0.1
Plomb	- 0.1
Hydrogène	0
Cuivre	+ 0.3
Argent	+ 0.8
Platine	+ 1.2
Or	+ 1.4

- Phénomènes de corrosion
- Corrosion
- Corrosion galvanique
- Protections

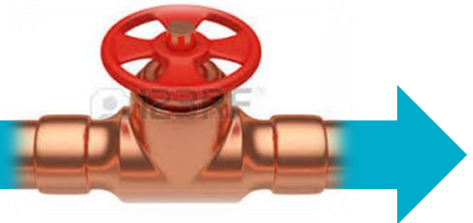
# Les métaux

## Protections

- Choix métaux
  - Potentiels électriques proches
- Mise en œuvre
  - Ne pas mettre en contact des métaux au potentiel galvanique très différent
  - Eviter contacts directs (isolation par éléments en plastique)
  - Si eau, mettre en œuvre métaux « nobles » en aval



Sens de circulation de l'eau



Toiture en acier  
-0,4V



Bardage en cuivre  
+0,3V

Bardage en zinc  
-0,8V

- Phénomènes de corrosion
- Corrosion
- Corrosion galvanique
- Protections

# Les métaux

## Corrosion galvanique - Protections

### ■ Protection cathodique

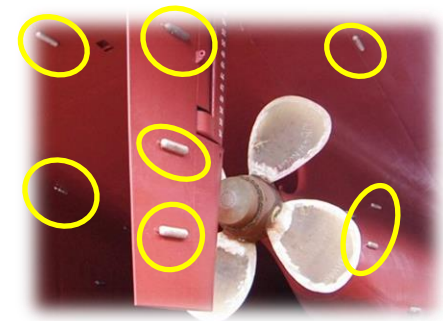
- Courant électrique appliqué au métal qui s'oppose au courant anodique de corrosion



### ■ Protection par « anode sacrificielle »

- Principe : cathode protégée
- Idée : créer un couple galvanique pour protéger le métal en sacrifiant un autre métal moins « noble »

Ex. : coque en acier protégée par anodes en zinc



### ■ Barrière protectrice

- Traitements par peintures protectrices
- Addition d'inhibiteurs chimiques
- Galvanisation, électrozingage...
- Dépôt de calcaire → éviter les adoucisseurs d'eau



- Phénomènes de corrosion
- Corrosion
- Corrosion galvanique
- Protections

# Connaissance des Matériaux

## Les métaux

- **CUIVRE**

# Cuivre

## Présentation

Tableau périodique des éléments

Le tableau périodique des éléments est présenté avec le cuivre (Cu) et l'argent (Ag) mis en évidence. Le cuivre est un métal de transition, et l'argent est un métal noble. Le tableau inclut également des légendes pour les éléments artificiels et les métaux.

Numéro atomique : 29  
Symbole de l'élément : Cu  
Masse atomique : 63,546  
Electronegativité : 1,9

Principaux nombres d'oxydation : +1, +2  
Le plus fréquent est en gras : +1, +2

Norme : IUPAC

Éléments artificiels : L'astérisque (\*) signifie élément radioactif (métal)

- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication
- Applications types
- Alliages

- Métal (de transition)
  - 29<sup>ème</sup> élément du tableau périodique (Cu)
- « Métal rouge » ou « cuivre rouge »
  - Métal naturellement coloré (rougeâtre)
  - Laitons dits « cuivres jaunes »
  - En anglais, copper
- Premier métal travaillé par l'Homme
- 3<sup>ème</sup> métal le plus utilisé





# Cuivre

## Caractéristiques - Positives

- Aptitudes à la constitution d'alliage
- Excellent conducteur électrique et thermique
- Imperméable et résistant à la corrosion
- Effets bactériostatique et fongicide
- Parfaitement recyclable
  - Indéfiniment et sans altération des performances
  - Couvre 40% des besoins
- Amagnétique
  - Pas d'attraction avec les aimants, métaux...
- Ductile et malléable
  - Facile à travailler à froid et à chaud
- Aptitudes aux traitements de surface
- Soudabilité satisfaisante



- Présentation
- Caractéristiques
  - Positives
  - Négatives
  - Patine
- Processus de fabrication
- Applications types
- Alliages

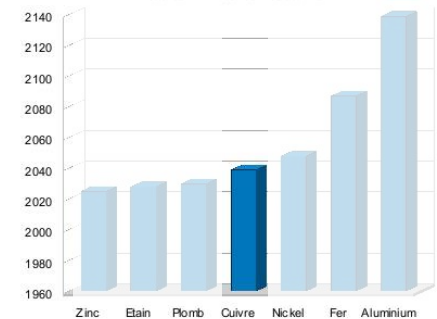
# Cuivre

## Caractéristiques - Négatives

- Propriétés mécaniques faibles
  - $E_{Cu} = 120 \text{ GPa}$  ( $E_{acier} = 210 \text{ GPa}$ )
  - $R_{e,Cu} = 60 \text{ MPa}$  ( $R_{e,acier} = 235 \text{ MPa}$ )
- Masse volumique  $\rho = 8960 \text{ kg/m}^3$ 
  - $\rho_{acier} = 7800 \text{ kg/m}^3$
- Usinabilité limitée
- Conductivité thermique  $\lambda = 380 \text{ W/(m.K)}$ 
  - $\lambda_{acier} = 50 \text{ W/(m.K)}$
  - $\lambda_{isolant} = 0,065 \text{ W/(m.K)}$
- Dilatation thermique :  $17 \mu\text{m}/(\text{m.}^\circ\text{C})$ 
  - 1,5 fois plus grande que l'acier
- 60 MJ/kg (5,8 kg de  $\text{CO}_2$  par kg)
  - Energie nécessaire à la production de métal vierge
  - Acier : 29 MJ/kg
- Ressource non-renouvelable
- Prix moyen (de 2010 à 2015) = 7500\$/T
  - Prix moyen acier = 700\$/T



Date prévisible d'épuisement des stocks  
Etude ministère industrie



10 kWh  
= 36 MJ  
= 1 l de mazout  
≈ 3,5 kg de  $\text{CO}_2$



# Cuivre

## Caractéristiques - Patine

- Le cuivre et ses alliages forment une patine protectrice très résistante à la corrosion... mais toxique !

- 2 étapes

- I. Formation de l'oxyde de cuivre de couleur brun-noir



- II. Formation du carbonate de cuivre (vert-de-gris)



- Présentation

- Caractéristiques

  - Positives

  - Négatives

  - Patine

- Processus de fabrication

- Applications types

- Alliages

# Cuivre

## Processus de fabrication - Extraction

- 2 types d'exploitation
    - Mines à ciel ouvert (si possible)
    - Mines souterraines
  - 2 types de gisement
    - Minerais sulfurés (80% de la production mondiale)
      - Cu-Fe-S : chalcopyrite ( $\text{CuFeS}_2$ ) et bornite ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ )
      - Cu-S : chalcocite ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) et covellite ( $\text{CuS}$ )
      - Minéraux complexes (avec antimoine et arsenic)
    - Minerais oxydés (20% de la production mondiale)
      - Cuprite ( $\text{Cu}_2\text{O}$ )
      - Malachite ( $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ ), pseudo-malachite, azurite...
- Type de gisement → type de traitement d'enrichissement



Chalcopyrite



Covellite



Cuprite



Malachite

- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication
  - Extraction
  - Traitement
    - Pyrométallurgie
    - Hydrométallurgie
  - Affinage
  - Nuances
  - Transformations
- Applications types
- Alliages

- Extraction de minéraux à faible teneur en Cu (max 4%)
  - Besoin d'augmenter la teneur
  - Traitement
    - Minerais sulfurés, par pyrométallurgie
    - Minerais oxydés, par hydrométallurgie
  - Transport en dehors du site minier

- Présentation

- Caractéristiques

- Processus de fabrication

- Extraction

- Traitement

- Pyrométallurgie

- Hydrométallurgie

- Affinage

- Nuances

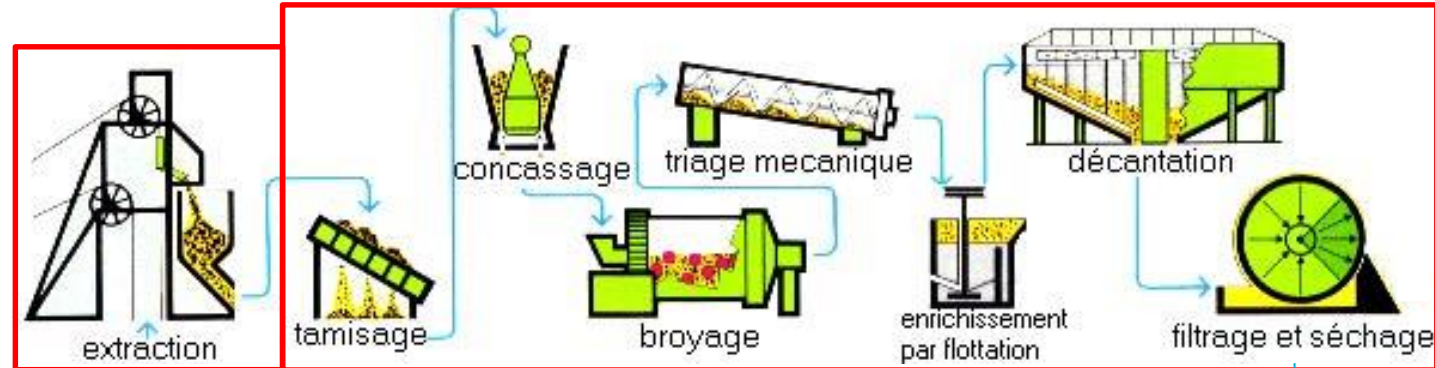
- Transformations

- Applications types

- Alliages

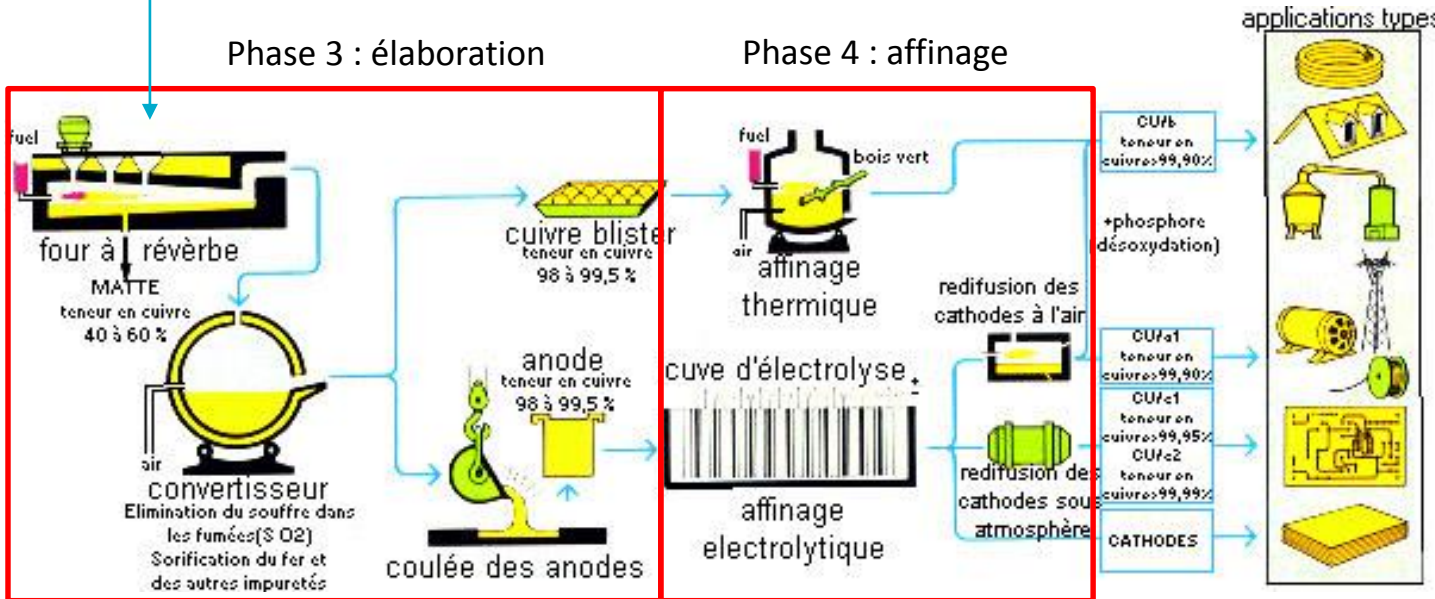
# Cuivre

## Processus de fabrication - Pyroméallurgie



Phase 1 : extraction

Phase 2 : traitement (broyage et flottation)



Phase 3 : élaboration

Phase 4 : affinage

applications types

- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication

Extraction

Traitement

Pyroméallurgie

Hydroméallurgie

Affinage

Nuances

Transformations

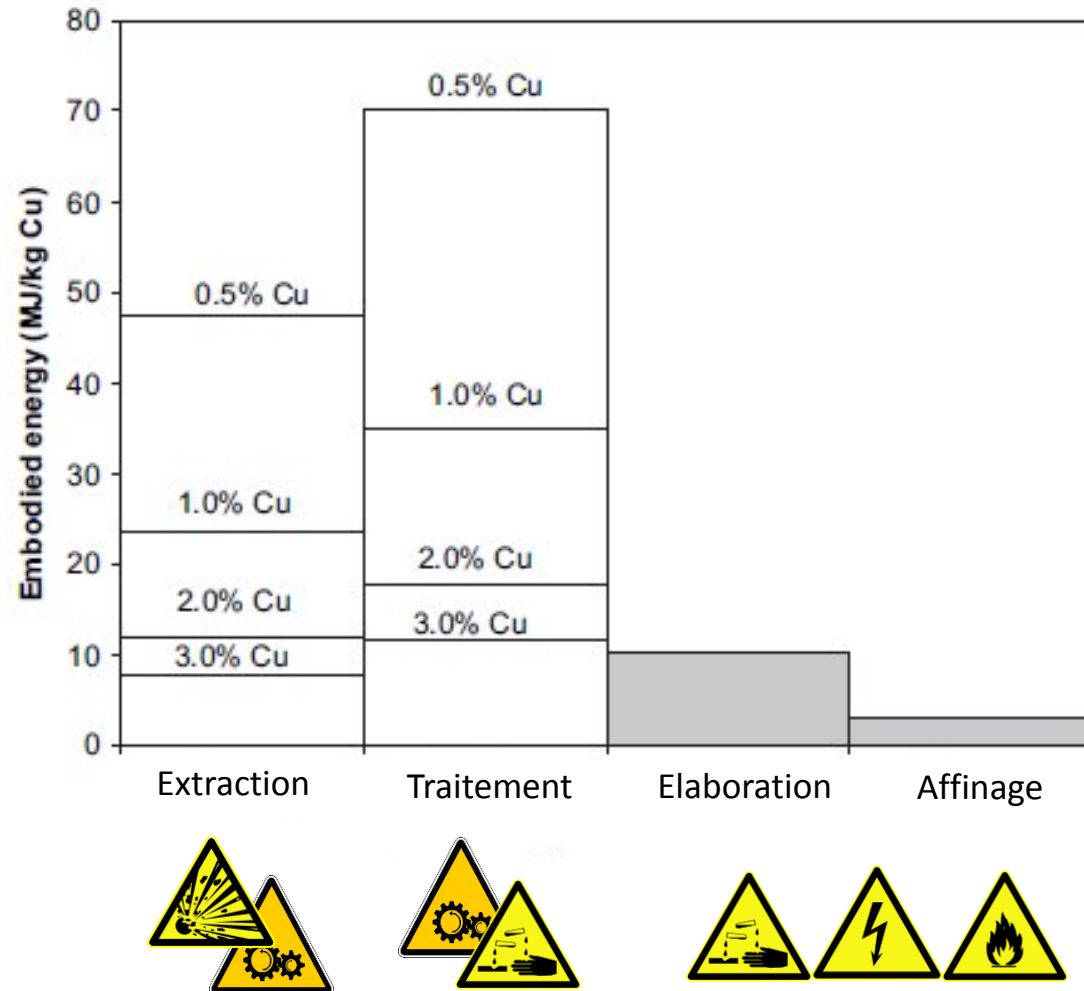
- Applications types

- Alliages

# Cuivre

## Processus de fabrication - Pyroméallurgie

- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication
  - Extraction
  - Traitement
    - Pyroméallurgie
    - Hydroméallurgie
  - Affinage
  - Nuances
  - Transformations
- Applications types
- Alliages



- Extraction de minéraux à faible teneur en Cu (max 4%)
  - Besoin d'augmenter la teneur
  - Traitement
    - Minerais sulfurés, par pyrométallurgie
    - Minerais oxydés, par hydrométallurgie
  - Transport en dehors du site minier

### Pyrométallurgie (voie sèche)

- Transformation en poudre ( $\leq 150\mu\text{m}$ )
  - Broyage, concassage...
- Flottation et séchage
  - Procédé d'enrichissement (25 à 40%)
  - Mettre en suspension un minerai broyé dans de l'eau et des agents de flottation, ph basique
- Elaboration
  - Homogénéiser le métal (98%)
  - Température de fusion  $1100^{\circ}\text{C}$
- Affinage

■ Présentation

■ Caractéristiques

■ Processus de fabrication

Extraction

Traitement

Pyrométallurgie

Hydrométallurgie

Affinage

Nuances

Transformations

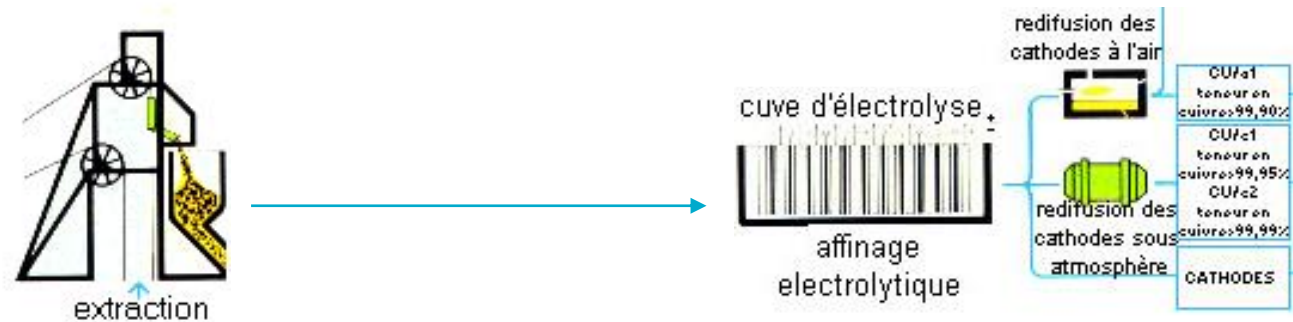
■ Applications types

■ Alliages



# Cuivre

## Processus de fabrication - Hydrométaburgie



### Pyrométaburgie (voie sèche)

- Transformation en poudre ( $\leq 150\mu\text{m}$ )
  - Broyage, concassage...
- Flottation et séchage
  - Procédé d'enrichissement (25 à 40%)
  - Mettre en suspension un minerai broyé dans de l'eau et des agents de flottation, ph basique
- Elaboration
  - Homogénéiser le métal (98%)
  - Température de fusion  $1100^\circ\text{C}$
- Affinage

### Hydrométaburgie (voie humide)

- Dissolution (lixiviation)
    - Mise en solution
    - $\text{CuO} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CuSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$
  - Purification
    - Séparation des métaux par un solvant, par précipitation...
  - Electrolyse
    - Récupérer le métal (99,95%)
- Moins énergivore  
➤ Métaux plus purs  
➤ Gangue non traitée



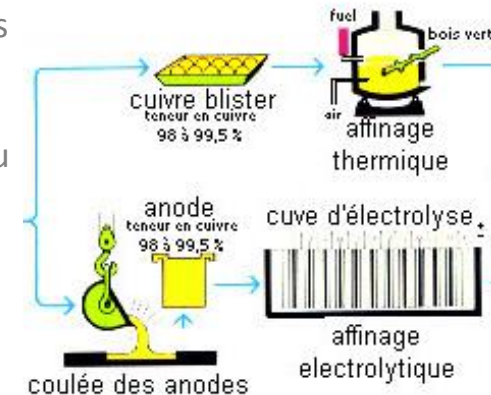
# Cuivre

## Processus de fabrication - Affinage

- Métal obtenu (« blister ») encore impur (98%) → affinage (99,9%)

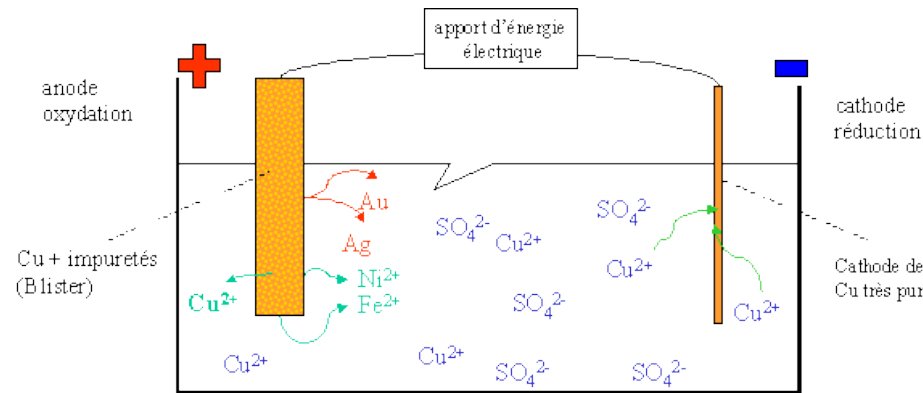
- Affinage thermique

- Procédé : fusion oxydante (impuretés plus sensibles que le cuivre)
- Résultat : cuivre poreux + impuretés (conductibilité électrique dégradée et peu soudable)



- Affinage électrolytique

- Procédé : différence de potentiel électrique dans un solvant
- Résultat : cuivre très pur mais refusion nécessaire (cause : état de surface)



Présentation

Caractéristiques

Processus de fabrication

Extraction

Traitement

Pyrométallurgie

Hydrométallurgie

Affinage

Nuances

Transformations

Applications types

Alliages

- 3 principales catégories :
  - Cuivres contenant de l'oxygène (0,01%)
    - $99,85\% \leq \text{Cu} \leq 99,90\%$
    - Brasage uniquement
      - **[Cu-a1] usage électrique**
      - [Cu-a2] identique à [Cu-a1] mais qualité moindre
      - [Cu-a3] alliages
  - Cuivres désoxydés (avec désoxydant résiduel, phosphore)
    - $\text{Cu} \geq 99,90\%$
    - Diminue conductivité électrique
    - Augmente température de recuit
    - Brasage ou soudage
      - **[Cu-b1] tubes sanitaires, laminé pour toiture...**
      - [Cu-b2] compromis [Cu-a1] et [Cu-b1], usage électronique
  - Cuivres exempts d'oxygène (ou désoxydés sans désoxydant résiduel)
    - $\text{Cu} \geq 99,95\%$
    - Conductivité électrique  $>$  [Cu-a1]
    - Brasage ou soudage
      - [Cu-c1] usages scientifiques
      - [Cu-c2] usages scientifiques notamment sous vide

■ Présentation

■ Caractéristiques

■ Processus de fabrication

Extraction

Traitement

Pyrométallurgie

Hydrométallurgie

Affinage

Nuances

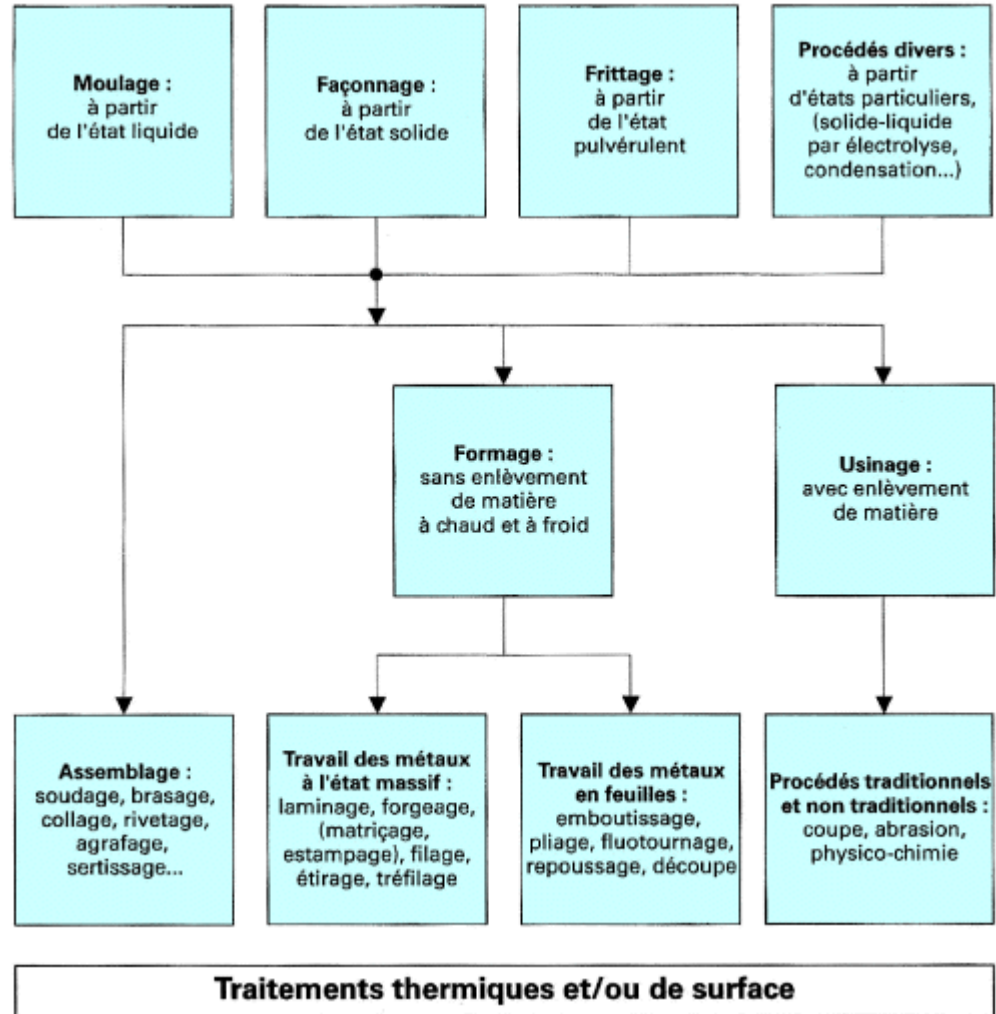
Transformations

■ Applications types

■ Alliages

# Métaux

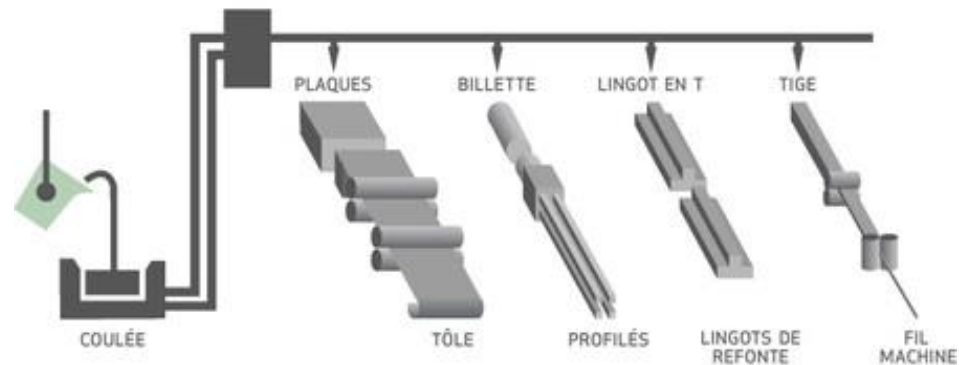
## Processus ... - Traitements thermiques et de surface



- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication
  - Extraction
  - Traitement
    - Pyrométallurgie
    - Hydrométallurgie
  - Affinage
  - Nuances (Traitements therm...)
  - Transformations
- Applications types
- Alliages

# Cuivre

## Processus de fabrication - Transformations



### ■ Moulé

- Métal coulé dans sa forme définitive

➤  $R_{e,Cu} = 40\text{MPa}$

### ■ Ecroûi

- Laminage, forgeage, tréfilage...
- Taux d'écroûissage
- Durcissement du métal sous l'effet de sa déformation plastique

➤  $R_{e,Cu} = 190 \text{ à } 320\text{MPa}$

➤ Fragile

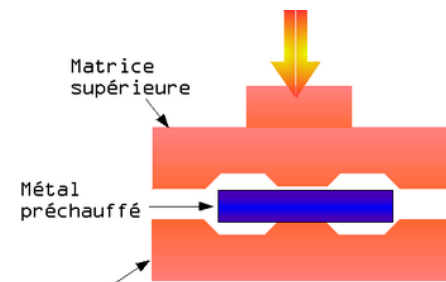
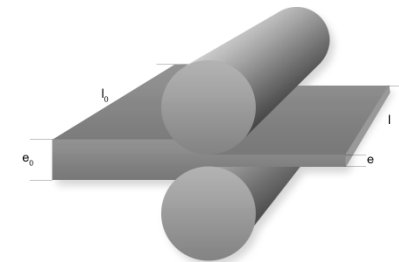
### ■ Recuit

- Cycle de chauffage pour diminuer les contraintes

➤  $R_{e,Cu} = 60\text{MPa}$

➤ Ductile

➤ Améliore l'usinabilité



- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication

Extraction

Traitement

Pyrométallurgie

Hydrométallurgie

Affinage

Nuances

Transformations

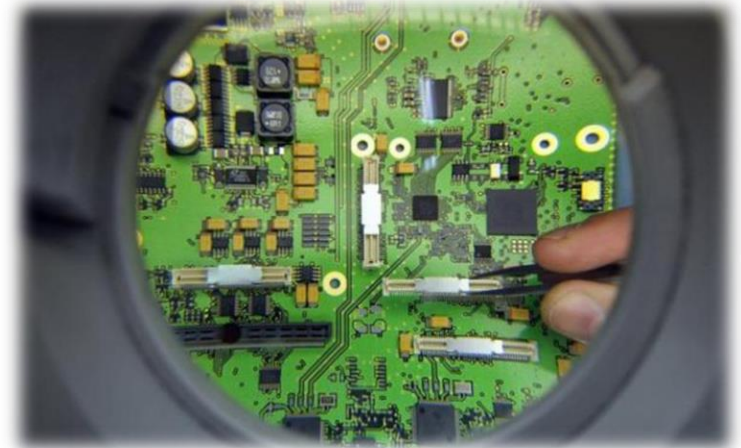
- Applications types

- Alliages

# Cuivre

## Applications types

- Conductivité électrique
  - Câbles électriques
  - Circuits électroniques
  - Paratonnerre



- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication
- Applications types
- Alliages

# Cuivre

## Applications types

- Conductivité thermique
  - Radiateurs et échangeurs de chaleur
- Qualités bactériostatiques et fongicides
  - Tubes sanitaires pour l'eau chaude ou froide
- Non toxique en cas d'incendie
  - Remplace les tubes en plastique pour le chauffage
  - Climatisation
- Résistance à la corrosion
  - Transport du gaz naturel



- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication
- Applications types
- Alliages



# Cuivre

## Applications types

- Ductilité et résistance à la corrosion
  - Laminés de toiture (mais cher et difficile à poser)
  - Eléments de bardage, de toiture...
  - Accessoires extérieurs (gouttières, chenaux...)



Hôpital Avicennes



Ecole des Beaux-Arts de Clermont-Ferrand



Ecole des Beaux-Arts de Clermont-Ferrand

- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication
- Applications types
- Alliages

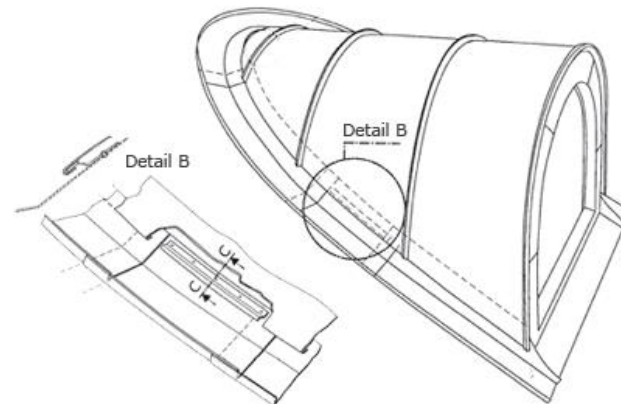


Statue de la Liberté

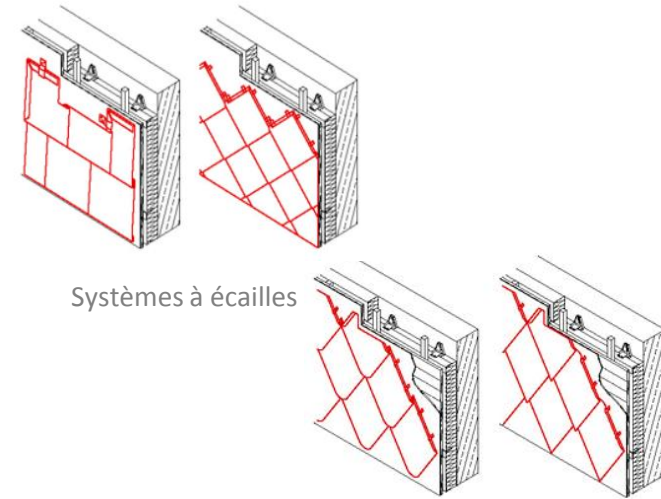


# Métaux

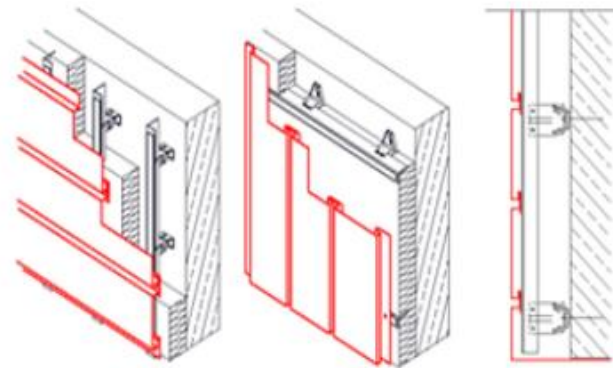
## Applications types



Bacs préfaçonnés à joint debout



Systèmes à écailles



Panneaux à emboîtement (droits ou cintrés)



Cassettes (droites ou cintrées)

- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication
- Applications types
- Alliages

- Fabrication d'alliages
  - Combinaison entre métal et au moins un autre élément chimique
  - Ex. : l'acier, alliage entre fer et carbone
  - But : améliorer certaines caractéristiques du matériau de base

- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication
- Applications types
- Alliages

# Cuivre

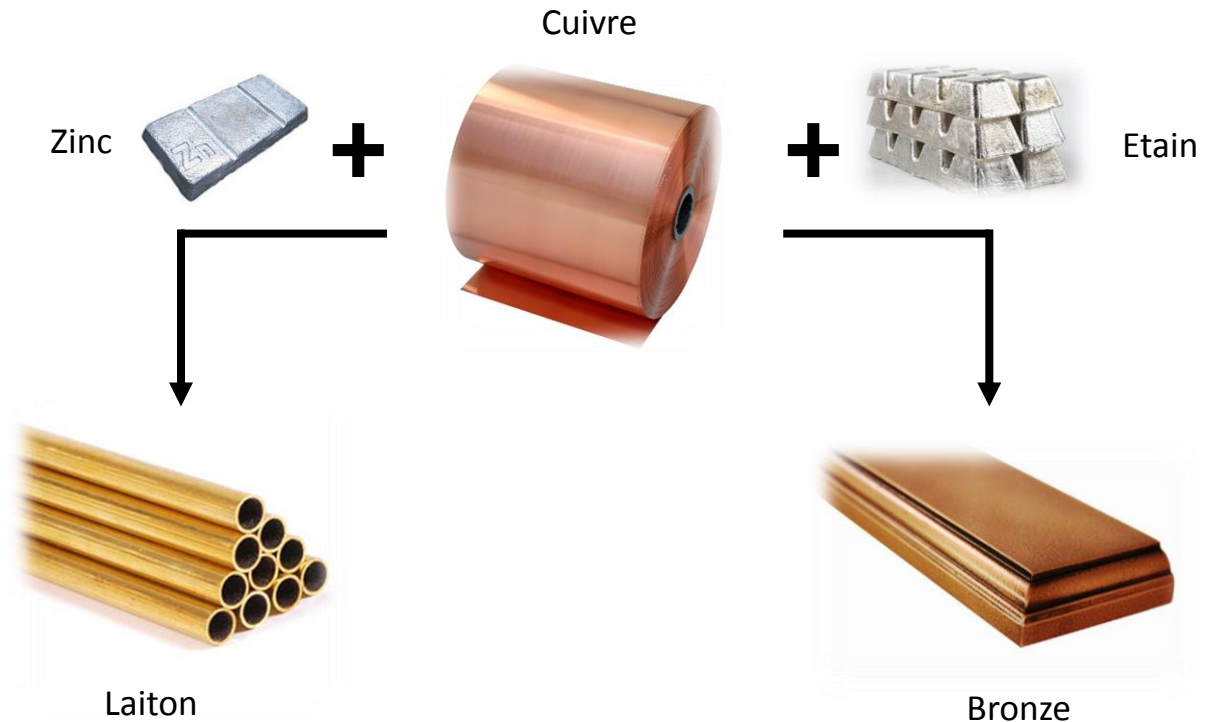
## Alliages - Généralités

### Différences entre cuivre, laiton et bronze ?

#### ■ La composition

- Cuivre (Cu)
- **Laiton** = alliage de **cuivre** et de **zinc** (Cu + Zn)
- **Bronze** = alliage de **cuivre** et d'**étain** (Cu + Sn)

#### ■ Les caractéristiques



- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication
- Applications types
- Alliages
  - Généralités
  - Laitons
  - Bronzes
  - Alliages à mémoire...

# Cuivre

## Alliages - Laitons

- **Alliages cuivre-zinc**
  - Cuivre + 5 à 45% de zinc + % autres éléments
  - Brass (anglais)
  - Couleur jaune-argenté
  - « Tombak », « Cuivres jaunes », « bronze vénitien »...
- **Propriétés similaires au cuivre mais influencées par la proportion de zinc**



### Avantages

- **Masse volumique plus faible**
  - $\rho_{\text{laiton}} = 8450 \text{ kg/m}^3 < \rho_{\text{Cu}} = 8960 \text{ kg/m}^3$
- **Améliore performances mécaniques**
  - $E_{\text{laiton}} = 135 \text{ GPa}$
  - $R_{e,\text{laiton}} = 100 \text{ à } 440 \text{ MPa}$
- **Température de fusion plus basse**
  - Moins d'énergie nécessaire
- **Meilleure usinabilité, emboutissage, frappe à froid...**
- **Facile d'entretien**

### Inconvénients

- **Conductibilité électrique faible**
  - 25 à 60% de celle du cuivre
- **Conductibilité thermique nettement réduite**
  - $\lambda_{\text{laiton}} = 121 \text{ W/(m.K)} < \lambda_{\text{Cu}} = 380 \text{ W/(m.K)}$
- **Dilatation plus importante**
  - $\alpha_{\text{laiton}} = 20 \mu\text{m/(m.}^\circ\text{C)} > \alpha_{\text{Cu}} = 17 \mu\text{m/(m.}^\circ\text{C)}$
- **Alliage plus fragile**
- **« Dézincification » en présence d'eau**



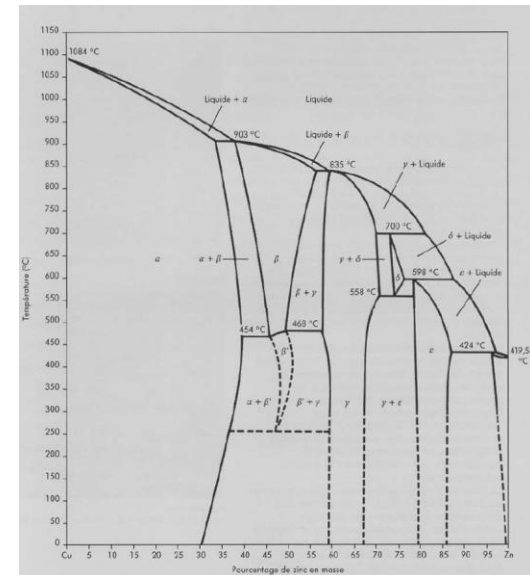
- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication
- Applications types
- **Alliages**
  - Laitons
  - Bronzes
  - Alliages à mémoire...

# Cuivre

## Alliages - Laitons

- 3 principales catégories :
  - Laitons simples ou binaires
    - Souvent 36% de Zn et le reste en Cu
    - Déformable à froid et usinable à chaud
    - Brasage ou soudage
    - Laminés, barres, tubes et fils
  - Laitons au plomb
    - Cu et Zn + 1 à 3 % de Pb
    - Utilisé pour son aptitude à l'usage
    - Brasage uniquement
    - Laminés et barres
  - Laitons complexes
    - Avec arsenic, résistant à la dézincification
    - Avec aluminium, utilisable en eaux salines
    - Avec fer, plomb, aluminium..., haute performance mécanique

Diagramme d'équilibre des laitons binaires



- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication
- Applications types
- Alliages
  - Laitons
  - Bronzes
  - Alliages à mémoire...

# Cuivre

## Alliages - Laitons

### ■ Applications types

- Robinetterie à gaz, tubes...
- Compteur d'eau
- Serrurerie, quincaillerie...
- Éléments de bardage, de toiture...



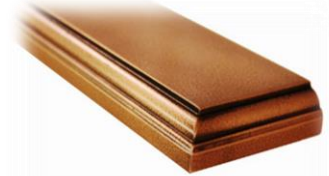
- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication
- Applications types
- Alliages
  - Laitons
  - Bronzes
  - Alliages à mémoire...



# Cuivre

## Alliages - Bronzes

- **Alliages cuivre-étain**
  - Cuivre + 3 à 16% d'étain + % métaux + phosphore (impuretés dues à la désoxydation)
  - Couleur rouge avec reflets jaunes
  - « Airain »
- Propriétés similaires au cuivre mais influencées par la proportion d'étain



### Avantages

- Améliore performances mécaniques
  - $E_{\text{bronze}} = 110 \text{ GPa}$
  - $R_{e,\text{bronze}} = 120 \text{ à } 600 \text{ MPa}$
- Résistant à l'usure
- Excellente aptitude au moulage
- Résistant aux atmosphères industrielles et marines

### Inconvénients

- Conductibilité électrique réduite
  - 10 à 20% de celle du cuivre
- Conductibilité thermique nettement réduite
  - $\lambda_{\text{laiton}} = 60 \text{ W/(m.K)} < \lambda_{\text{Cu}} = 380 \text{ W/(m.K)}$
- Avant usinage, décapage nécessaire (oxyde abrasif)
- Sujet à la « peste de l'étain »
  - $-13^\circ\text{C}$ , changement de phase
  - Propriétés mécaniques diminuent



- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication
- Applications types
- Alliages
  - Laitons
  - Bronzes
  - Alliages à mémoire...



# Cuivre

## Alliages - Bronzes

- Bronzes de corroyage (Sn < 10% + traitement d'homogénéisation)
  - Bronzes binaires (Cu, Sn, [P])
    - Déformation à froid et propriétés mécaniques
  - Bronzes phosphoreux (Cu, Sn, P)
    - Frottement, résistance mais fragile
  - Bronzes au zinc (Cu, Sn, Zn)
    - Propriétés mécaniques correctes, prix, malléabilité mais résistance au frottement plus faible
- Bronzes de fonderie (pas de traitement)
  - Bronzes binaires (Cu, Sn)
    - Propriétés mécaniques, frottement, moulage mais fragile
  - Bronzes phosphoreux (Cu, Sn, 6 à 30% Pb)
    - Usinage et étanchéité



- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication
- Applications types
- Alliages
  - Laitons
  - Bronzes
  - Alliages à mémoire...

# Cuivre

## Alliages - Bronzes

### ■ Applications types

- Robinetterie sous pression (eau, essence), pièces soumises au frottement
- Sculptures
- Éléments de bardage



- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication
- Applications types
- Alliages
  - Laitons
  - Bronzes
  - Alliages à mémoire...

- Alliages cuivre, zinc et aluminium
  - 70% Cu + 25% Zn + 4 à 10% Al
  - 2 phases cristallographiques (martensitique, austénitique)
- Développement récent
  - Découvert en 1930
- Propriétés inédites
  - Super-élasticité (déformations importantes mais réversibles)
  - Mémoire simple (après chauffage, reprend sa forme initiale)
  - Mémoire double (alterne entre deux positions avec la température)
  - Amortissant (dissipe l'énergie des chocs et vibrations)

- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication
- Applications types
- Alliages
  - Laitons
  - Bronzes
  - Alliages à mémoire...

# Connaissance des Matériaux

## Les métaux

- **ALUMINIUM**

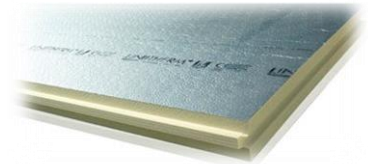




# Aluminium

## Caractéristiques - Positives

- Léger  $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ 
  - $\rho_{\text{acier}} = 7800 \text{ kg/m}^3$
- Aptitudes à la constitution d'alliage
- Bon conducteur électrique et thermique
- Amagnétique
- Propriétés réfléchissantes
  - Lumière et chaleur
- Imperméable et résistant à la corrosion
  - $2 \text{ Al} + 3 \text{ O}_2 \longrightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$  (alumine transparente)
- Parfaitement recyclable (aluminium de 2<sup>nd</sup> fusion)
  - Indéfiniment et sans altération des performances
  - 35% des besoins couverts par le recyclage
- Ductilité et malléabilité
- Aptitudes aux traitements de surface et facile à usiner
- Facile d'entretien

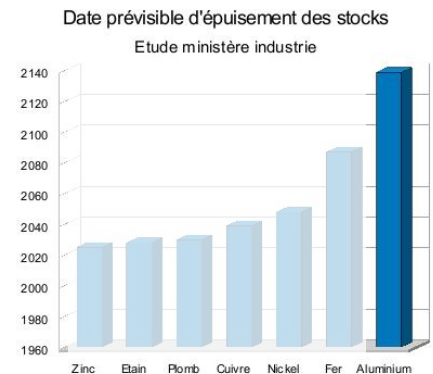
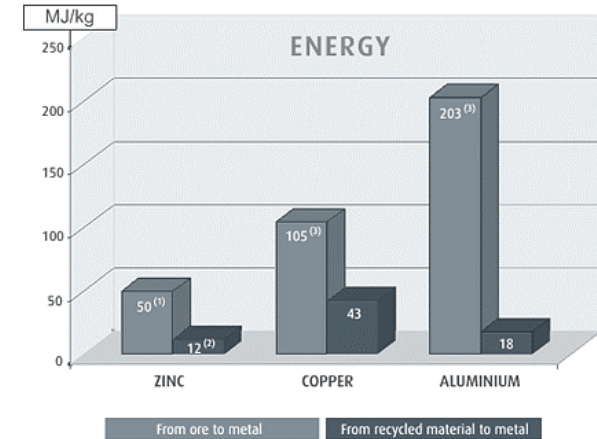




# Aluminium

## Caractéristiques - Négatives

- Propriétés mécaniques faibles
  - $E_{Al} = 70 \text{ GPa}$  ( $E_{acier} = 210 \text{ GPa}$ )
  - $R_{e,Al} = 40 \text{ MPa}$  ( $R_{e,acier} = 235 \text{ MPa}$ )
- Conductivité thermique  $\lambda = 240 \text{ W/(m.K)}$ 
  - $\lambda_{acier} = 50 \text{ W/(m.K)}$
  - $\lambda_{isolant} = 0,065 \text{ W/(m.K)}$
- Dilatation thermique :  $24 \mu\text{m}/(\text{m.}^\circ\text{C})$ 
  - 2 fois plus grande que l'acier
- Corrosion en milieu acide, en présence d'alcalis (NaOH), sujet à la corrosion galvanique
- 210 MJ/kg (20,4 kg de  $\text{CO}_2$  par kg)
  - Acier : 29 MJ/kg
  - Aluminium de 2<sup>nd</sup> fusion : 18 MJ/kg !!!
- Ressource non-renouvelable
- Faible résistance à l'usure et à la fatigue
- Soudabilité faible
  - $t_{fusion}$  faible ( $660^\circ\text{C}$ )
- Prix moyen (de 2010 à 2015) = 2100\$/T

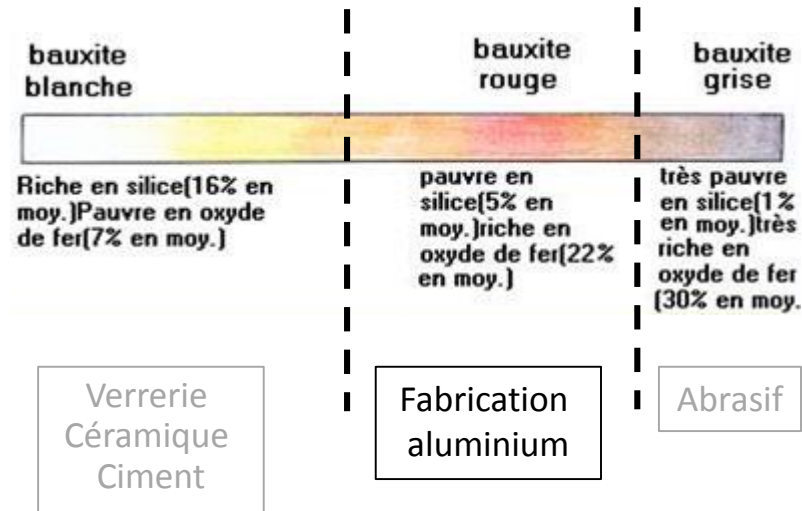


10 kWh  
= 36 MJ  
= 1 l de mazout  
≈ 3,5 kg de  $\text{CO}_2$

# Aluminium

## Processus de fabrication - Extraction

- 2 types d'exploitation
  - Mines à ciel ouvert (si possible)
  - Mines souterraines (généralement)
- Extraction de la bauxite
  - « Terre d'alumine des Baux »
  - Aluminium est très réactif, nature = forme hydraté  $\text{Al}(\text{OH})_3$
  - Couleur variant avec la teneur en fer et en silice



# Aluminium

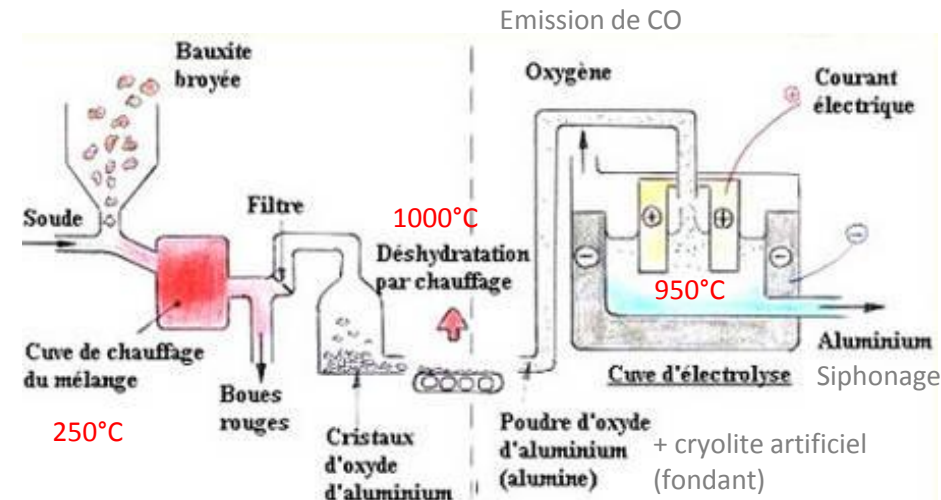
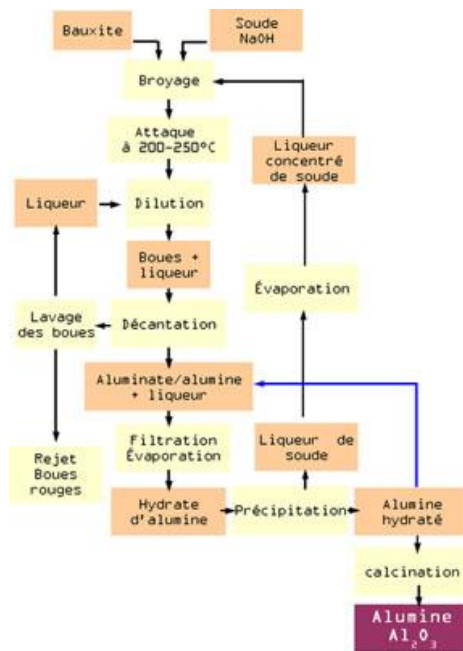
## Processus de fabrication - Traitement

### 1. Transformation de la bauxite en alumine

- Procédé Bayer
- 5T de bauxite = 2T d'alumine

### 2. Transformation de l'alumine en aluminium

- Procédé Hall-Héroult (électrolyse)
- 2T d'alumine = 1T d'aluminium



Présentation

Caractéristiques

Processus de fabrication

Extraction

Traitement

Transformations

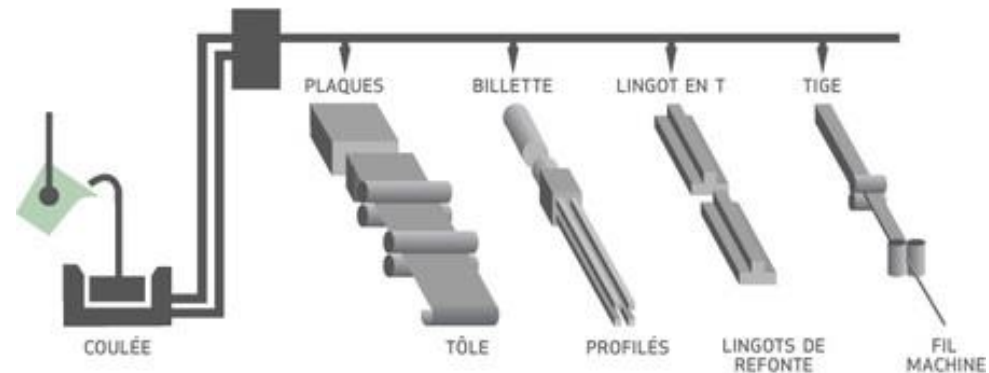
Applications types

Anodisation

Alliages

# Aluminium

## Processus de fabrication - Transformations

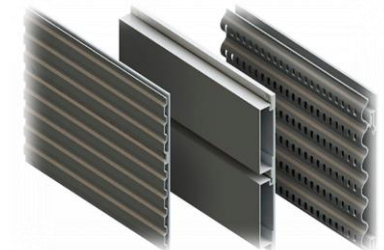


- Laminages à chaud et à froid

- Recuit ou écroui
- Tôles (ép. 6 $\mu$ m à 6,3mm) avec propriétés mécaniques performantes

- Extrusion

- Profilés pleins (filière) ou creux (filière + mandrin)



- Moulage

- Forgeage

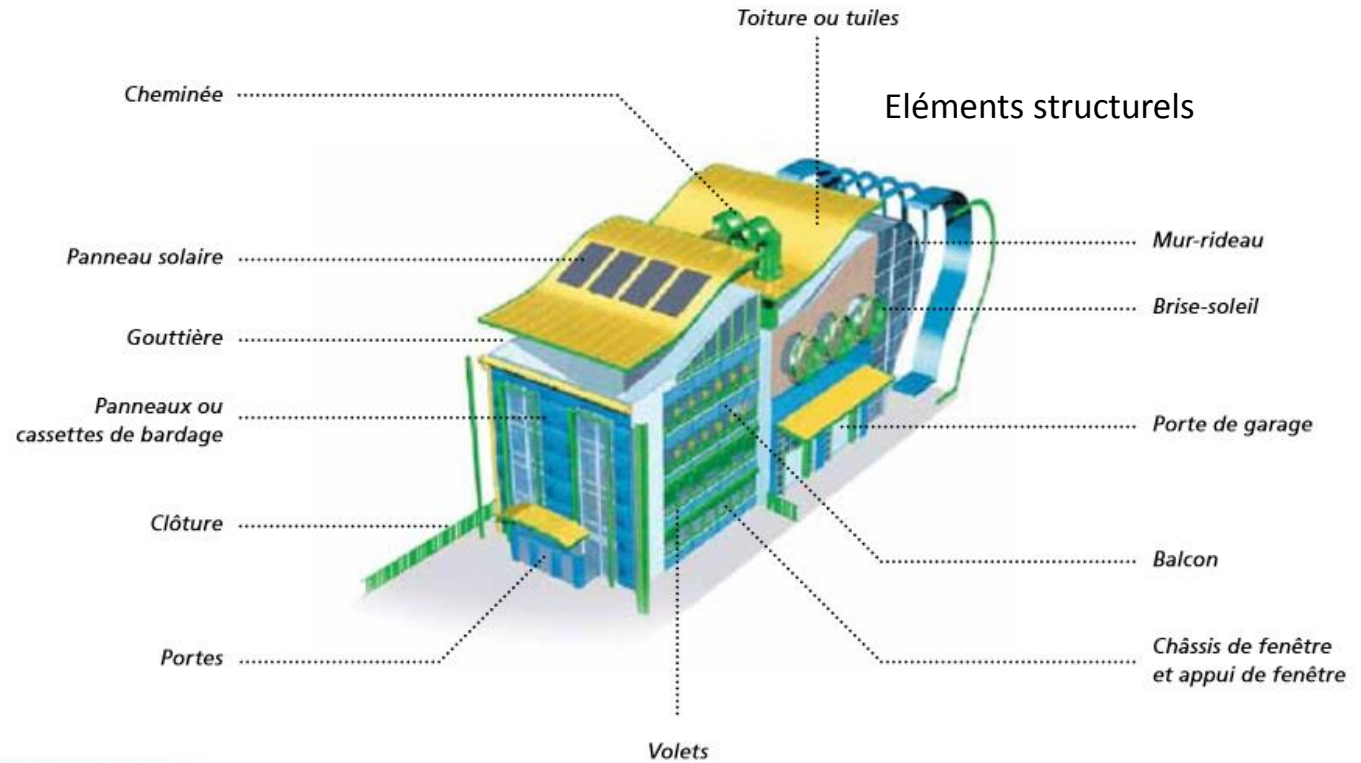
- Etirage



- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication
  - Extraction
  - Traitement
  - Transformations
- Applications types
- Anodisation
- Alliages

# Aluminium

## Applications types



Atomium

- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication
- Applications types
- Anodisation
- Alliages



# Aluminium

## Anodisation

### ■ Traitement de surface destiné à l'architecture

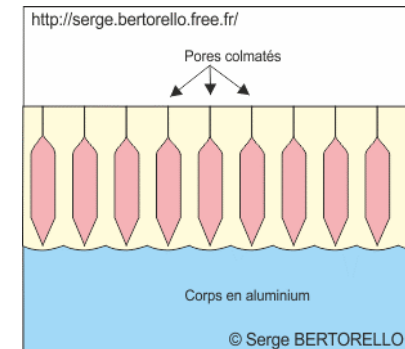
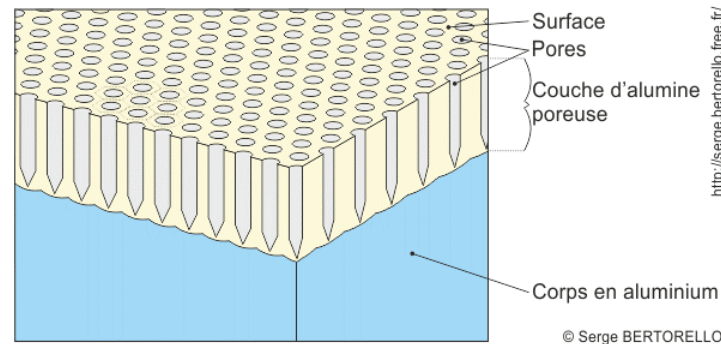
- Améliore résistance à la corrosion (milieux industriels et marins)
- Permet ou non de teindre l'aluminium

### ■ Principe

- Alumine = fine couche ( $\mu\text{m}$ ) protectrice mais poreuse
- Réaliser couche d'oxyde plus épaisse (5 à 100  $\mu\text{m}$ ) et plus compact

### ■ Méthode

- Bains successifs suivis de rinçage
  1. Préparation de la surface (décapage)
  2. Formation de l'alumine
  3. Colorants éventuels
  4. Colmatage par hydratation (gonflement de l'alumine)





# Aluminium

## Alliages - Catégories

- 8 séries

- Séries 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000 et 8000
- Premier chiffre indique l'élément d'alliage principal
- Second chiffre, la variante
- Derniers chiffres, identifiant de l'alliage

Exception : série 1000 = la pureté en aluminium

Exemples :

1050 = 99,50% Al

1075 = 99,75% Al

- 2 catégories

- Les alliages dits « trempants » (traitement thermique)  
Séries 2000, 6000 et 7000
- Les alliages par écrouissage (déformation à froid)  
Séries 1000, 3000, 4000 et 5000

- Présentation

- Caractéristiques

- Processus de fabrication

- Anodisation

- Applications types

- Alliages

  - Catégories

  - Séries

# Aluminium

## Alliages - Séries

- Série 1000
  - Aluminium (pas un alliage) - Ecouissage
  - $E = 70 \text{ GPa}$ ,  $R_e = 40 \text{ MPa}$  et  $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$
  - Applications : cuve, échangeur, bardage...
  - Raffiné (99,99% Al) utilisé pour l'électronique
- Série 2000 (« duraluminium »)
  - Cuivre - Traitement thermique
  - Bonnes propriétés mécaniques mais résistance à la corrosion faible
  - $E = 74 \text{ GPa}$ ,  $R_e = 260 \text{ MPa}$  et  $\rho = 2790 \text{ kg/m}^3$
  - Applications : construction aéronautique
- Série 3000
  - Manganèse - Ecouissage
  - Bonnes résistance à la corrosion, soudabilité et aptitudes à la mise en forme mais propriétés mécaniques relativement faibles
  - Résistance mécanique amélioré par le magnésium (Al-Mn-Mg)
  - $E = 69 \text{ GPa}$ ,  $R_e = 120 \text{ MPa}$  et  $\rho = 2730 \text{ kg/m}^3$
  - Applications : boîtes de conserve, bardage...
- Série 4000
  - Silicium - Moulage
  - Bonnes coulabilité et soudabilité mais usinabilité limité et rend difficile l'anodisation
  - Applications : pièces complexes et fines

■ Présentation

■ Caractéristiques

■ Processus de fabrication

■ Anodisation

■ Applications types

■ Alliages

    Catégories

    Séries

# Aluminium

## Alliages - Séries

- Série 5000
  - Magnésium - Ecouissage
  - Améliore propriétés mécaniques, comportement au basse température, résistance à la corrosion et soudabilité mais diminue aptitude à a déformation (matriçage)
  - $E = 69 \text{ GPa}$ ,  $R_e = 135 \text{ MPa}$  et  $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$
  - Applications : milieux marins et chimiques
- Série 6000
  - Magnésium et silicium - Traitement thermique
  - Bonne aptitude à a déformation, résistance à la corrosion mais propriétés mécaniques moyennes
  - $E = 70 \text{ GPa}$ ,  $R_e = 110 \text{ MPa}$  et  $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$
  - Applications : structures, menuiserie métallique, lignes moyennes et haute-tension, construction aéronautique
- Série 7000
  - Zinc - Traitement thermique
  - Avec Cu, excellentes propriétés mécaniques mais résistance corrosion faible  
 $E = 72 \text{ GPa}$ ,  $R_e = 470 \text{ MPa}$  et  $\rho = 2800 \text{ kg/m}^3$
  - Sans Cu, améliore résistance à la corrosion mais réduit propriétés méca.  
 $E = 71 \text{ GPa}$ ,  $R_e = 210 \text{ MPa}$  et  $\rho = 2780 \text{ kg/m}^3$
  - Applications : aéronautique, sports...
- Série 8000

■ Présentation

■ Caractéristiques

■ Processus de fabrication

■ Anodisation

■ Applications types

■ Alliages

    Catégories

    Séries

# Connaissance des Matériaux

## Les métaux

- **ZINC**



# Zinc

## Caractéristiques - Positives

- Masse volumique  $\rho = 7000 \text{ kg/m}^3$ 
  - $\rho_{\text{acier}} = 7800 \text{ kg/m}^3$
- Indispensable à la galvanisation de l'acier
- Bon conducteur électrique et thermique
- Amagnétique
  - Pas d'attraction avec les aimants, métaux...
- Imperméable et résistant à la corrosion
- Parfaitement recyclable
  - Indéfiniment et sans altération des performances
- Ductile et malléable
  - Facile à travailler
  - $t_{\text{fusion}} = 420^\circ\text{C}$
- Facile d'entretien

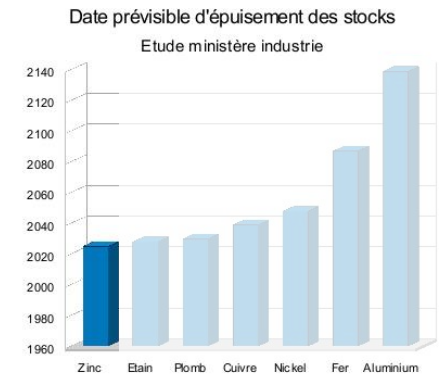




# Zinc

## Caractéristiques - Négatives

- Propriétés mécaniques faibles
  - $E_{Zn} = 105 \text{ GPa}$  ( $E_{acier} = 210 \text{ GPa}$ )
  - $R_{e,Zn} = 35 \text{ MPa}$  ( $R_{e,acier} = 235 \text{ MPa}$ )
- Conductivité thermique  $\lambda = 110 \text{ W/(m.K)}$ 
  - $\lambda_{acier} = 50 \text{ W/(m.K)}$
  - $\lambda_{isolant} = 0,065 \text{ W/(m.K)}$
- Dilatation thermique :  $31 \mu\text{m}/(\text{m.}^\circ\text{C})$ 
  - 2,5 fois plus grande que l'acier
- Fragile en dessous de  $5^\circ\text{C}$  et au dessus de  $200^\circ\text{C}$
- Corrosion en milieu acide ( $\text{SO}_2$ ), sujet à la corrosion galvanique
- 50 MJ/kg (4,9 kg de  $\text{CO}_2$  par kg)
  - Energie nécessaire à la production de métal vierge
  - Acier : 29 MJ/kg
- Ressource non-renouvelable
- Soudabilité très faible
- Prix moyen (de 2010 à 2015) = 2100\$/T



10 kWh  
= 36 MJ  
= 1 l de mazout  
≈ 3,5 kg de  $\text{CO}_2$

# Zinc

## Caractéristiques - Patine

- Au contact de l'air, le zinc forme une patine protectrice très résistante à la corrosion (vitesse moyenne de corrosion 1 µm/an)

- 3 étapes

- I. Formation de l'oxyde de zinc

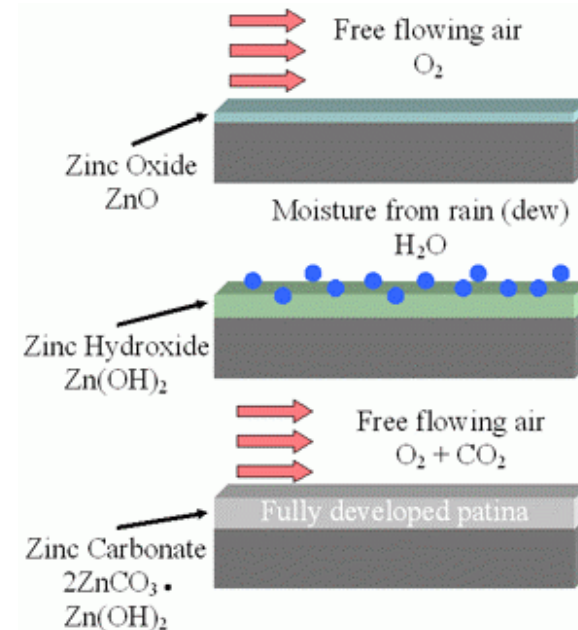
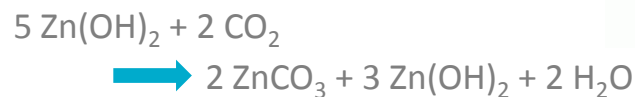


- II. Formation de l'hydroxyde de zinc (« rouille blanche »)



sous forme d'une poudre blanche non adhérente, peut-être « lessivée » mais neutralise l'acidité des pluies

- III. Formation de l'hydroxycarbonate de zinc (couche dense et terne)



- Dans une atmosphère polluée (SO<sub>2</sub>), formation rapide (10 µm/an) de sulfate de zinc (soluble) au détriment de l'hydroxycarbonate de zinc

# Zinc

## Processus de fabrication - Extraction

- 2 types d'exploitation
  - Mines à ciel ouvert (si possible)
  - Mines souterraines
- Minerais : la sphalérite
  - Zn-S, Fe-S
  - « Blende »
  - Couleur varie avec la teneur en fer (jaune, brune, gris, noir)



Sphalérite

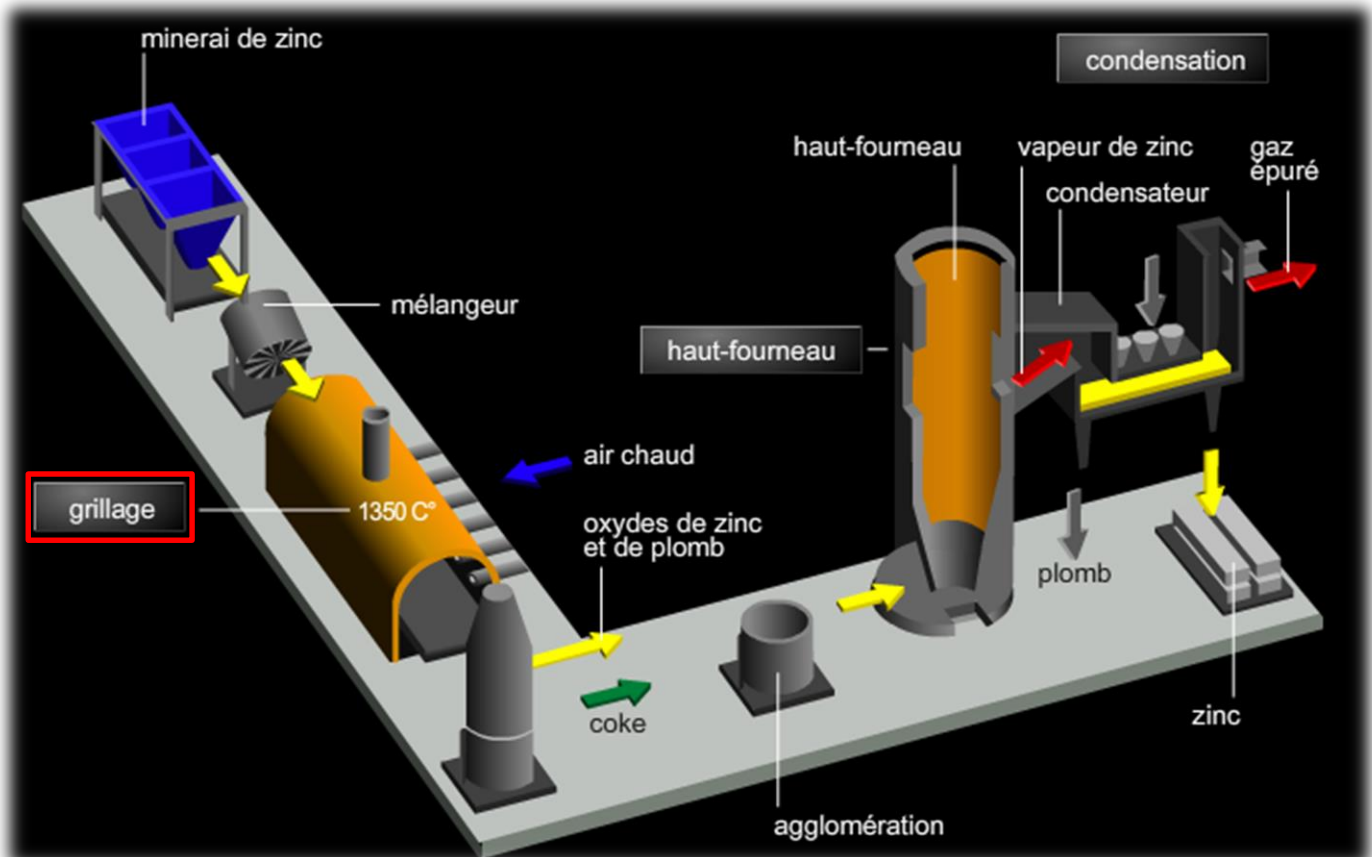
- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication
  - Extraction
  - Traitement
    - Pyrométallurgie
    - Hydrométallurgie
- Applications types
- Alliages

# Zinc

## Processus de fabrication - Pyroméallurgie

### ■ Grillage

- Formation de la calcine
- $2 \text{ZnS} + 3 \text{O}_2 \longrightarrow 2 \text{ZnO} (\text{l}) + 2 \text{SO}_2 (\text{g}) + \text{impuretés}$
- Réaction exothermique



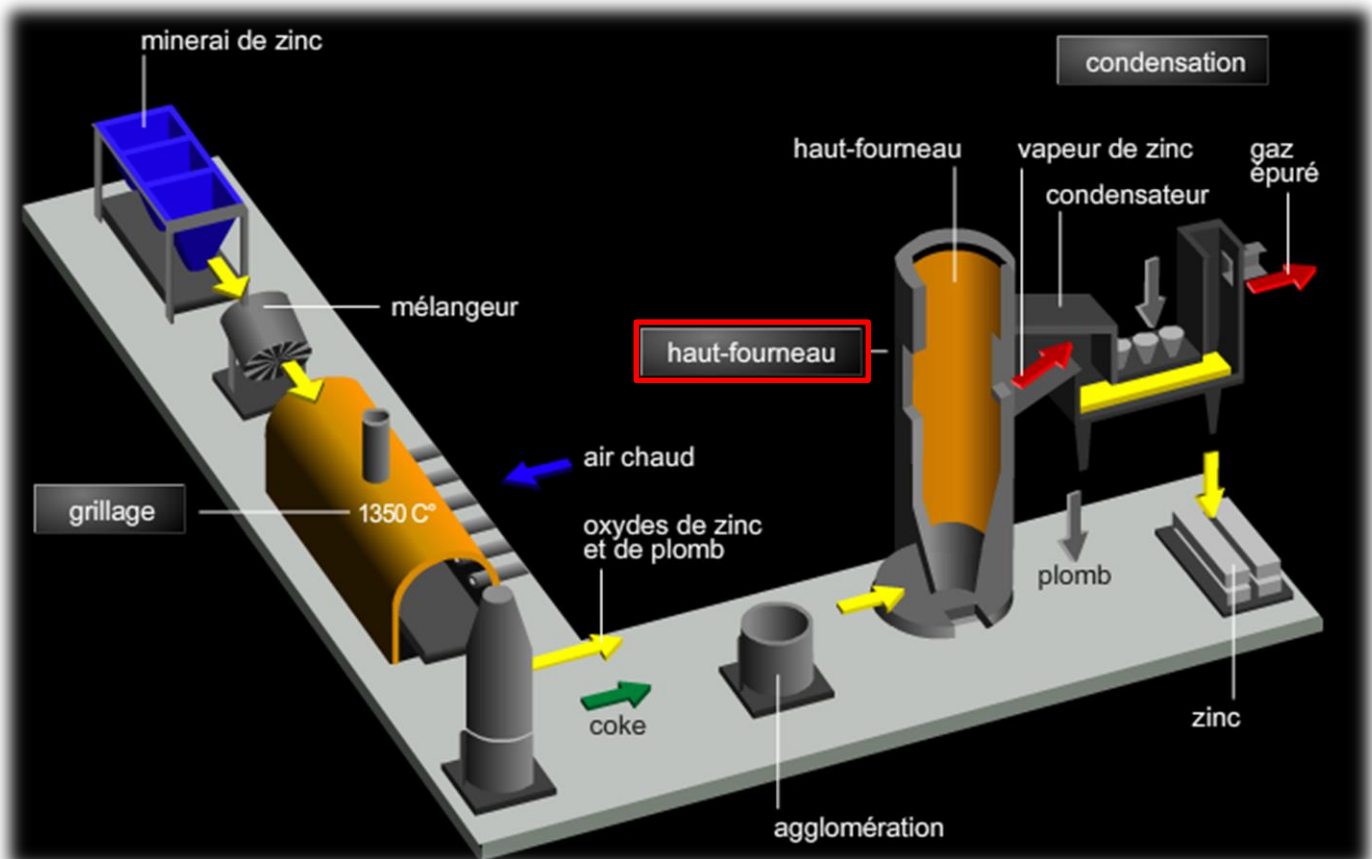
- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication
  - Extraction
  - Traitement
    - Pyroméallurgie
    - Hydroméallurgie
- Applications types
- Alliages

# Zinc

## Processus de fabrication - Pyroméallurgie

### ■ Haut-fourneau

- Procédé « Imperial Smelting »
- Chauffage de l'oxyde de Zn pour obtenir Zn gazeux
- $\text{ZnO (l)} + \text{CO} \longrightarrow \text{Zn (g)} + \text{CO}_2 \text{ (g)}$  [1280°C]
- Plomb et autres oxydes sont liquides et donc séparés



■ Présentation

■ Caractéristiques

■ Processus de fabrication

Extraction

Traitement

Pyroméallurgie

Hydroméallurgie

■ Applications types

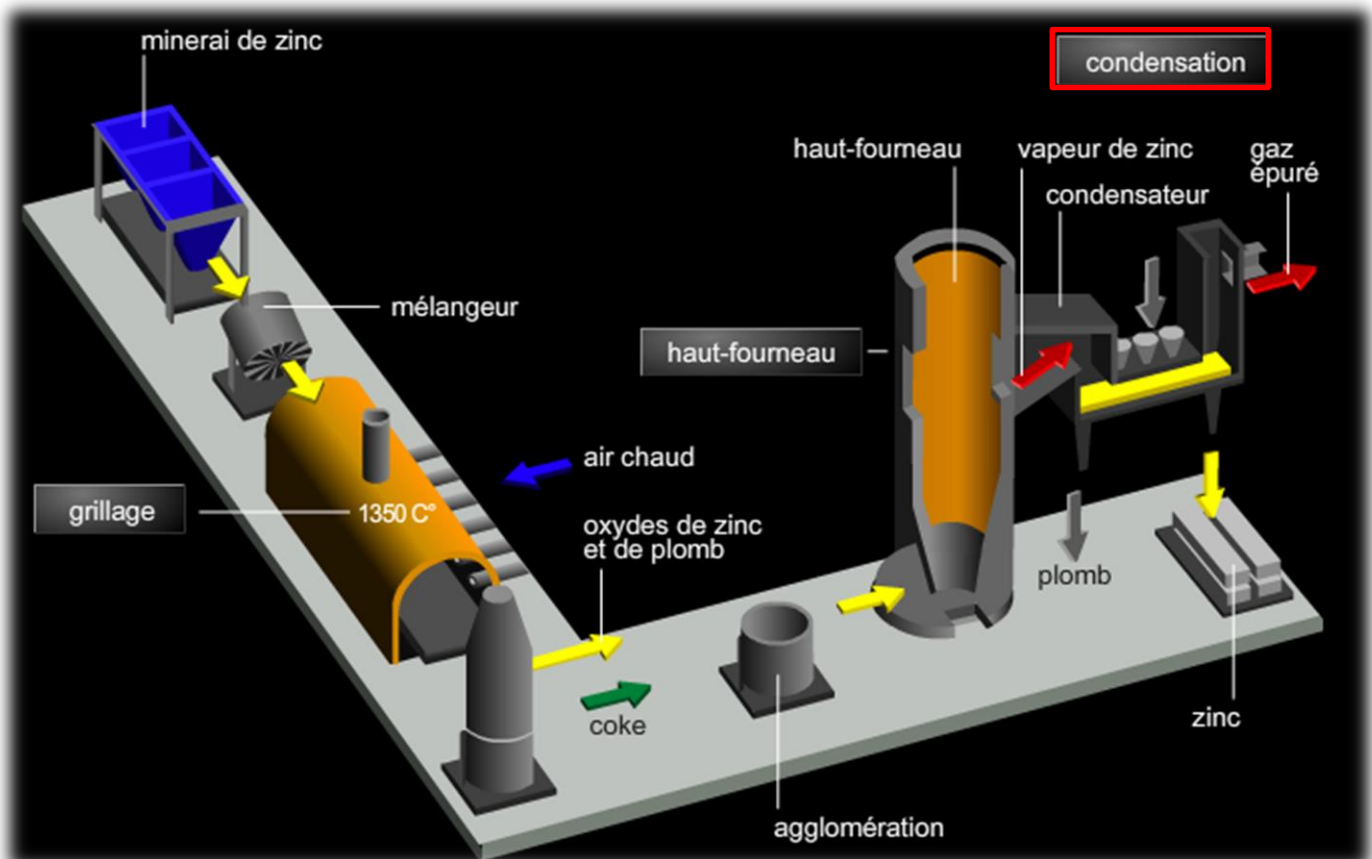
■ Alliages

# Zinc

## Processus de fabrication - Pyroméallurgie

### ■ Condensation

- Gouttelettes de plomb fondu à 550°C → condensation
- Traités par liquation (Zn liquide flotte sur le Pb)
- Zn (98,5%), affiné par distillation (métaux =  $t_{\text{fusion}}$  différentes)



■ Présentation

■ Caractéristiques

■ Processus de fabrication

Extraction

Traitement

Pyroméallurgie

Hydroméallurgie

■ Applications types

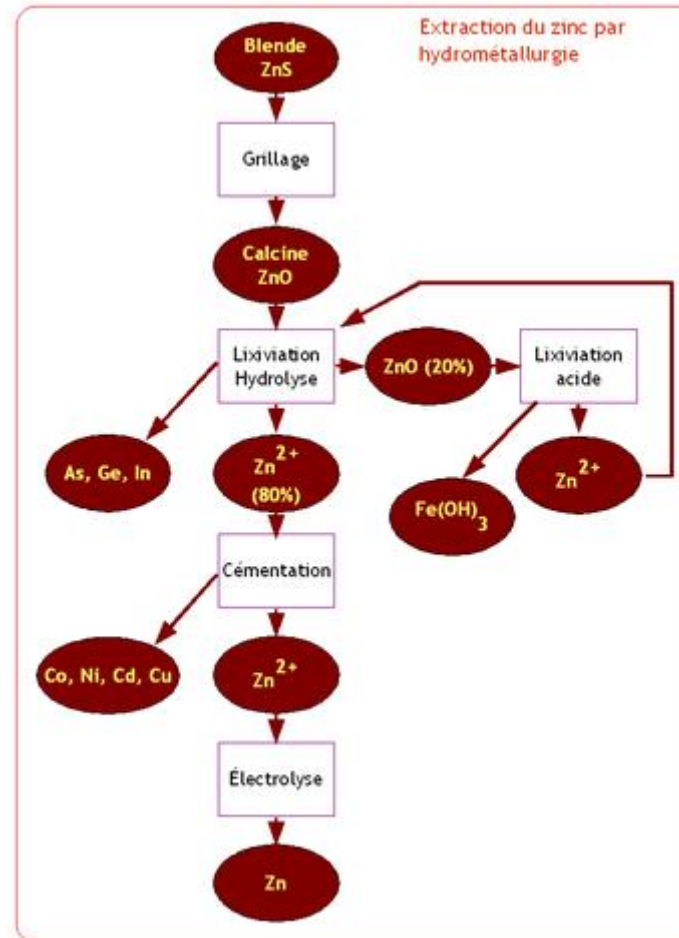
■ Alliages



# Zinc

## Processus de fabrication - Hydrométaballurgie

- 2 possibilités
  - Ancien procédé, depuis la calcine
  - Nouveau procédé, depuis la blende



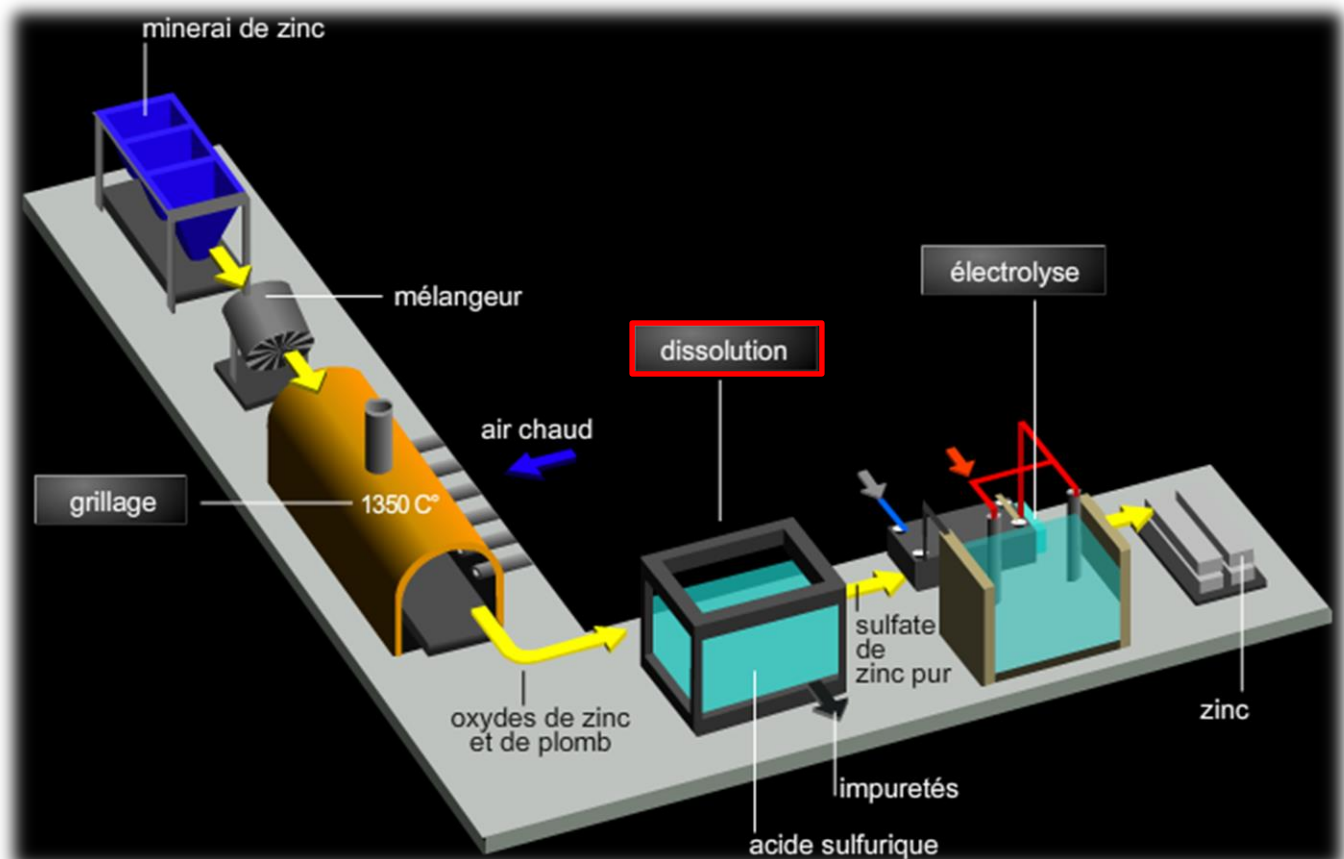
- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication
  - Extraction
  - Traitement
    - Pyrométaballurgie
    - Hydrométaballurgie
- Applications types
- Alliages

# Zinc

## Processus de fabrication - Hydrométallurgie

### ■ Dissolution (lixiviation et cémentation)

- Mise en solution du Zn par acide sulfurique
- Ancien,  $\text{ZnO} + \text{H}_2\text{SO}_4 \longrightarrow \text{ZnSO}_4 + \text{H}_2\text{O} (\text{g})$  [100°C]
- Nouveau,  $\text{ZnSO}_4 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \longrightarrow \text{ZnSO}_4 (\text{s}) + 2 \text{FeSO}_4 + \text{S} (\text{s})$  [>90°C]

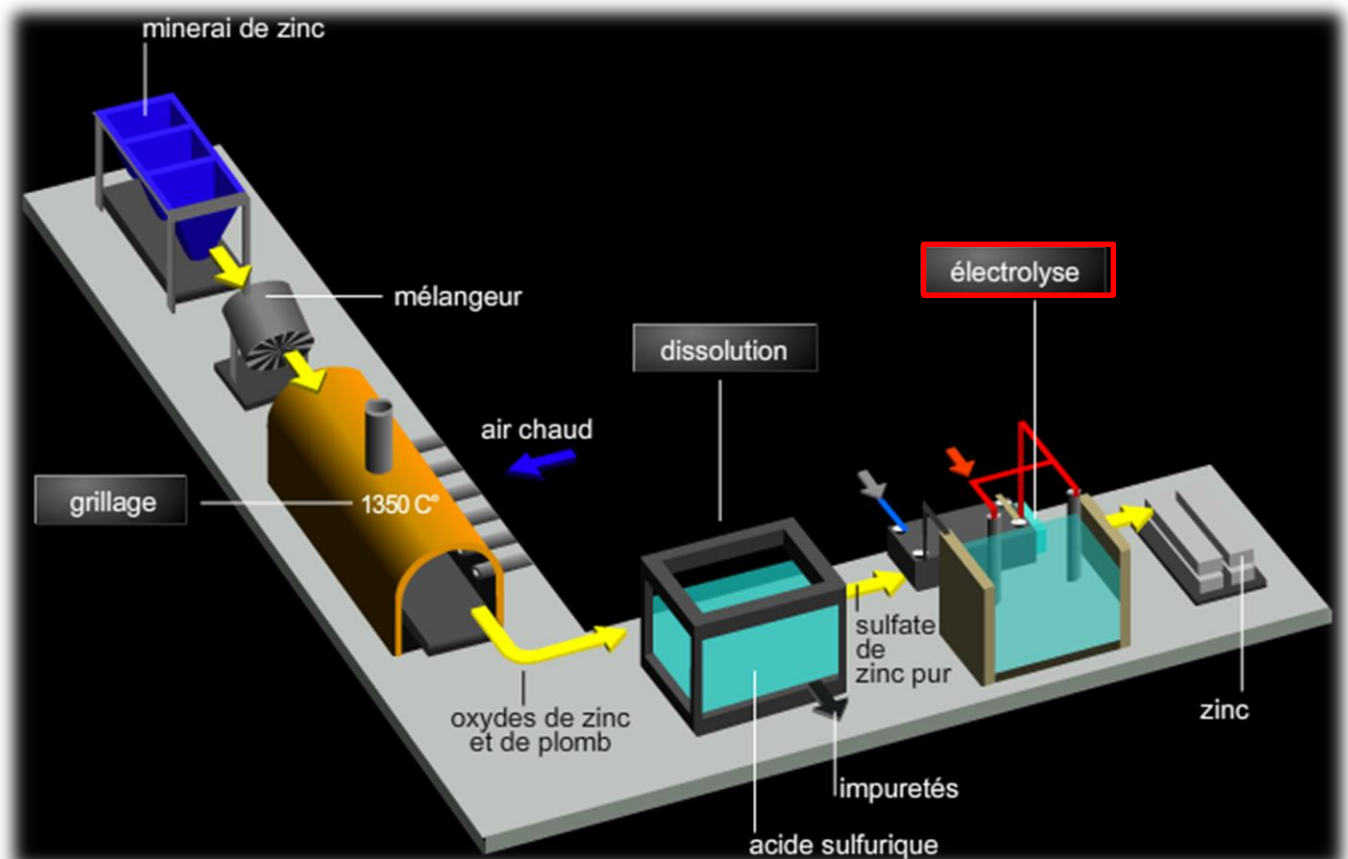


- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication
  - Extraction
  - Traitement
    - Pyrométallurgie
    - Hydrométallurgie
- Applications types
- Alliages

# Zinc

## Processus de fabrication - Hydroméallurgie

### ■ Electrolyse



■ Présentation

■ Caractéristiques

■ Processus de fabrication

Extraction

Traitement

Pyroméallurgie

Hydroméallurgie

■ Applications types

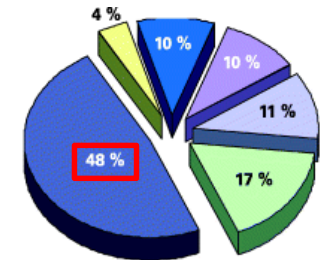
■ Alliages

# Zinc

## Applications types - Généralités

### ■ Type de produit et secteur d'activités

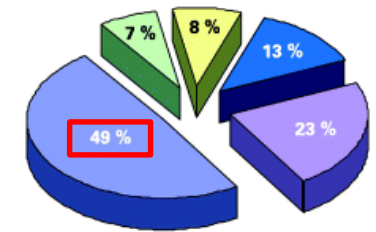
- Galvanisation (48%)
- Construction (49%), sous forme de zinc laminé



■ Autres  
■ Oxydes et Produits chimiques  
■ Laiton  
■ Laminés et extrudés  
■ Coulée sous pression  
■ Galvanisation

### ■ Secteur de la construction

- Toiture
- Bardage (cassettes, plaques)
- Eléments d'évacuation des eaux pluviales
- Anodes coulées pour protection de l'acier



■ Produits de consommation  
■ Transport  
■ Équipements industriel  
■ Infrastructure  
■ Bâtiment

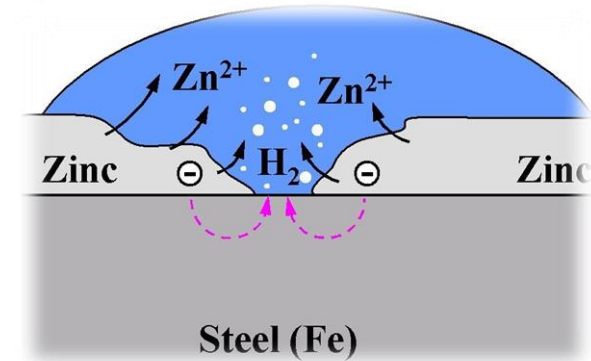


- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication
- Applications types  
    Généralités  
    Galvanisation
- Alliages

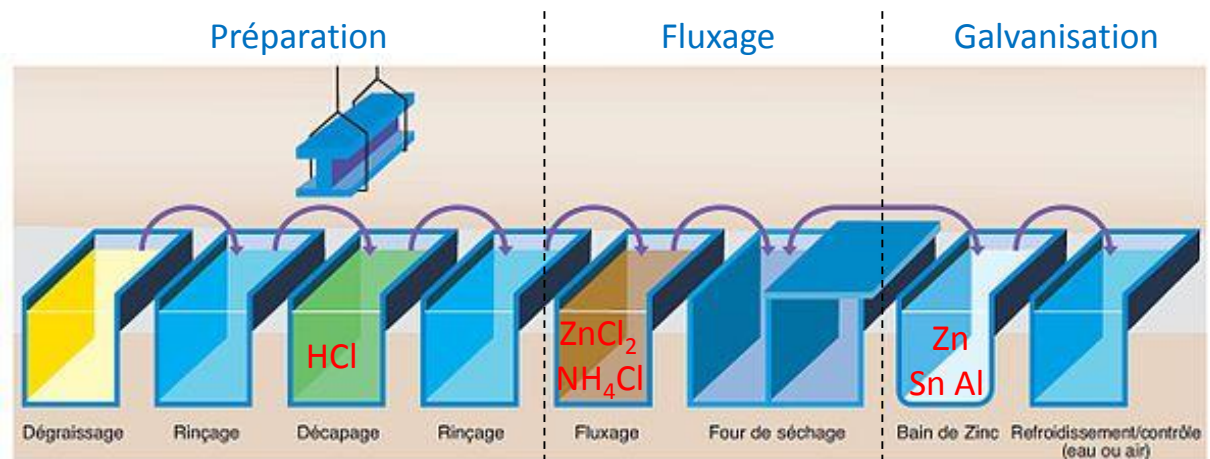
# Zinc

## Galvanisation

- Traitement de protection de l'acier
  - Améliore résistance à la corrosion
  - Protection par « anode sacrificielle »
- Idée
  - Enrober l'acier d'une couche de zinc



- Méthode
  - Bains successifs
    1. Préparation de la surface (décapage à  $t_{\text{ambiante}}$ )
    2. Eviter oxydation (fluxage à 60°C)
    3. Galvanisation (à 450°C, de 3 à 15 min)
      - Etain, améliorer la fluidité du zinc
      - Aluminium, favorise la brillance et empêche oxydation du bain

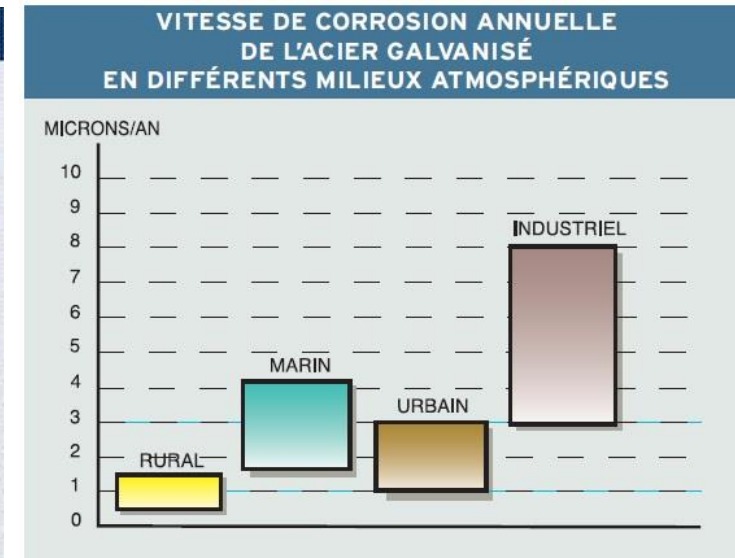
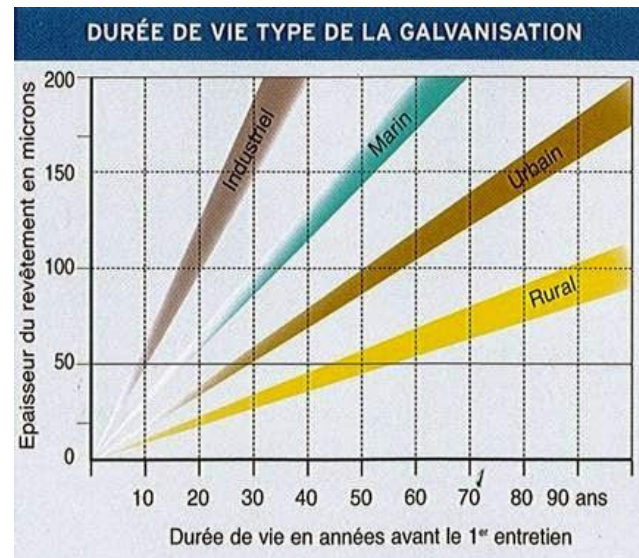
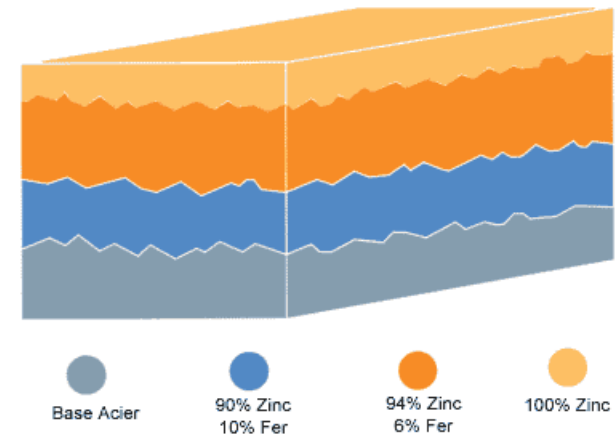


Procédé de la galvanisation à chaud d'un produit fini

# Zinc

## Galvanisation

- Galvanisation
  - Enrobage zinc
  - Et diffusion zinc dans acier
    - Liaison métallurgique
- Durée de vie
  - Dépend du milieu ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{Cl}^-$ )
  - Epaisseur de la couche zinc-fer



- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication
- Applications types
  - Généralités
  - Galvanisation
- Alliages



- Alliages zinc-cuivre et zinc-titane
  - Améliorer la résistance mécanique
  - Améliorer l'aptitude à l'emboutissage, au roulage, au pliage...
  - Alliages pour secteur de la construction
  
- Alliages zinc-aluminium ou Zamak
  - Zamak 3
    - 96% Zn - 4% Al
    - $t_{\text{fusion}}$  faible (400°C) et bonne coulabilité
  - Zamak 2
    - 93% Zn - 4% Al - 3% Cu
    - Augmente résistance mécanique (20%) et à la corrosion mais plus fragile
  - Zamak 5
    - 95% Zn - 4% Al - 1% Cu
    - Augmente résistance mécanique (10%) et à la corrosion mais plus fragile
  - Zamak 7
    - 96% Zn - 4% Al - Ni
    - Augmente coulabilité et ductilité

- Présentation
- Caractéristiques
- Processus de fabrication
- Applications types
- Alliages