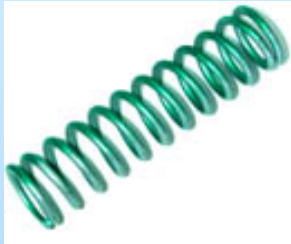


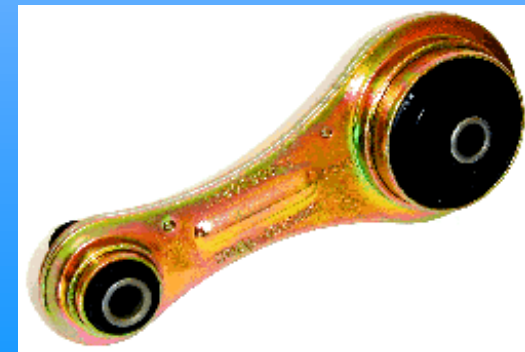
COURS



LES TRAITEMENTS DE SURFACE

Christophe HOLTERBACH

christophe.holterbach@cetim-cermat.fr



Les traitements de surface

Qu'est ce qu'un traitement de surface?

Définition donnée par l'encyclopédie Universalis.

« Traitement de surface » = Terme général regroupant:

« Toutes les opérations mécaniques, chimiques, électrochimiques ou physiques qui ont pour conséquences **de modifier la fonction** ou **l'aspect** de la surface d'un matériau, afin de l'adapter à des **conditions d'utilisation données** ».

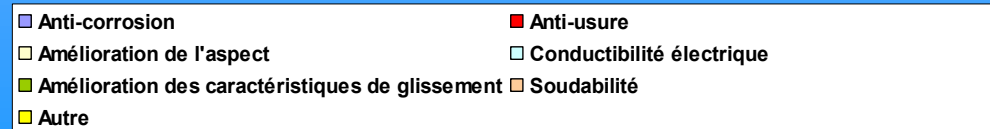
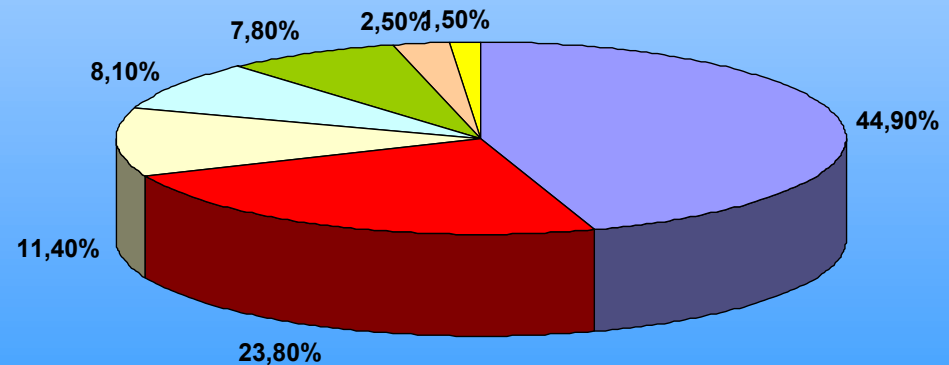
Les traitements de surface

Un traitement de surface, pour quoi faire?

Une SURFACE est faite pour satisfaire des propriétés d'emploi données. C'est la raison pour laquelle on est souvent amené à pratiquer un (ou des) « traitements » pour « **anoblir** » la surface et lui conférer **une fonctionnalité spécifique**.

Domaines d'applications:

- ❖ L'aspect de surface/décoration
- ❖ La résistance à la corrosion
- ❖ La résistance au frottement
- ❖ La résistance à l'abrasion/érosion
- ❖ La résistance à la fatigue
- ❖ L'aptitude au collage



Les traitements de surface

Qu'est ce qu'un traitement de surface?

**UN TRAITEMENT DE SURFACE CE COMPOSE
TOUJOURS:**



D'un (ou plusieurs) **traitement préparatoire**
(préparation de surface)

ET



D'un **traitement de
surface superficielle**

ET/OU

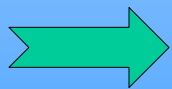
D'un **revêtement**

**Remarque: Les traiteurs à façon font une distinction très nette entre un revêtement
et un traitement de surface superficielle :**

Les traitements de surface

Qu'est ce qu'un traitement préparatoire ?

Conditionnement d'une surface industrielle par une succession d'**opérations appropriées** afin de la rendre **apte** à recevoir (et à garder) un traitement ultérieur.



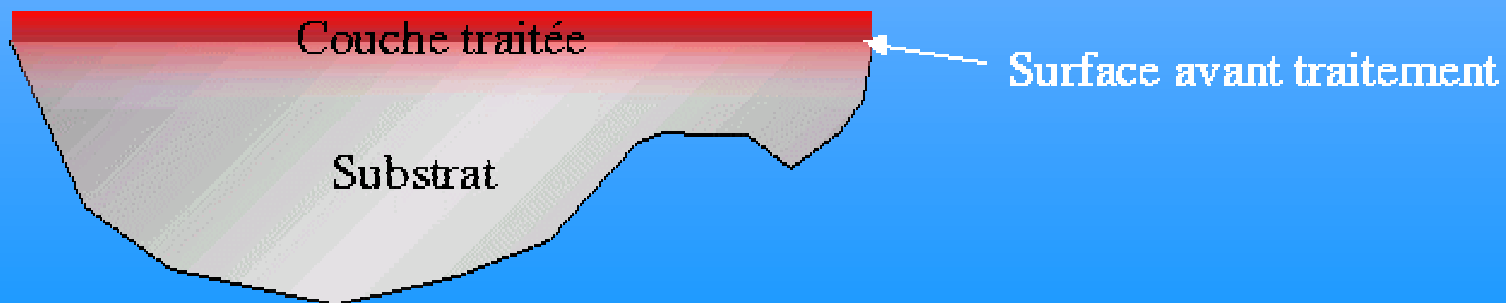
SEQUENCE DE PREPARATION

Les traitements de surface

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

Terme général désignant une **modification structurelle superficielle des surfaces**; la modification de structure n'étant pas, en général, homogène suivant l'épaisseur et étant caractérisée par:

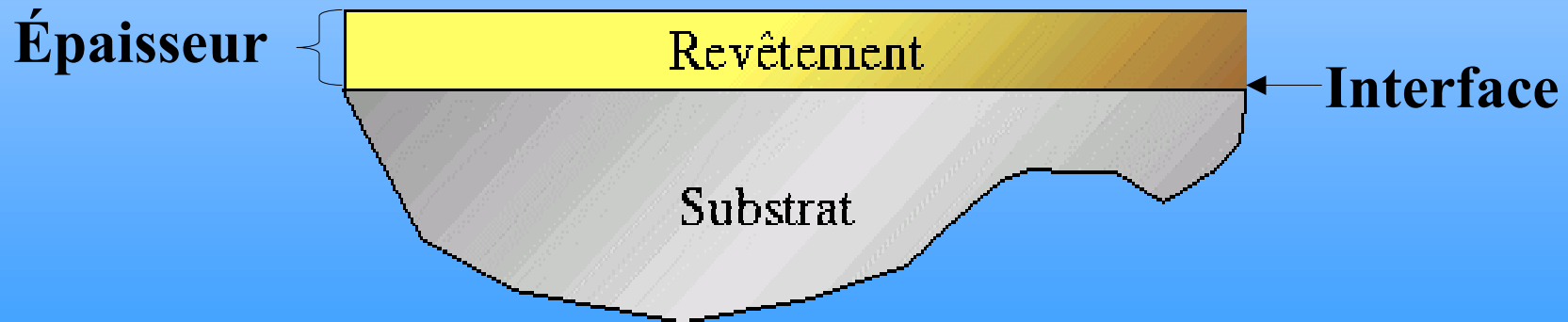
- ❖ Un effet thermique \Rightarrow **Traitement thermique de surface**
- ❖ Un effet mécanique
- ❖ La diffusion d'un métal ou d'un métalloïde \Rightarrow **Traitement thermochimique de diffusion**
- ❖ La formation d'un nouveau composé \Rightarrow **Traitement de conversion**



Les traitements de surface

Qu'est ce qu'un revêtement ?

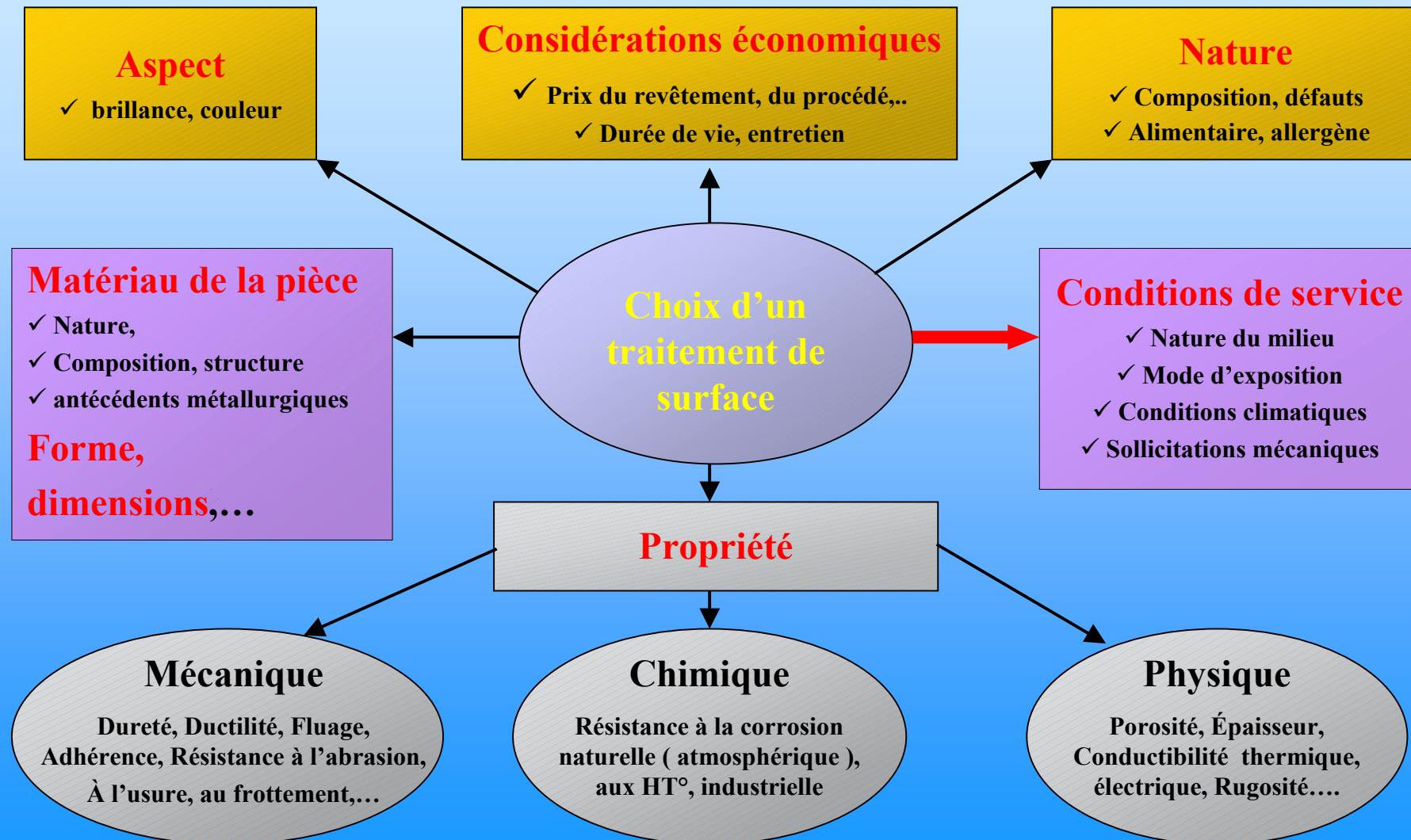
Terme général désignant toute **couche métallique, organique ou minérale** déposée sur une surface par un procédé de recouvrement, tel que la surface du matériau d'apport soit assez homogène et **les modifications du matériau de base à l'interface négligeable** pour que la qualité de la couche soit définie par son épaisseur.



**LE MATERIAU D'APPORT NE REAGIT PAS OU TRES PEU
AVEC LE SUBSTRAT**

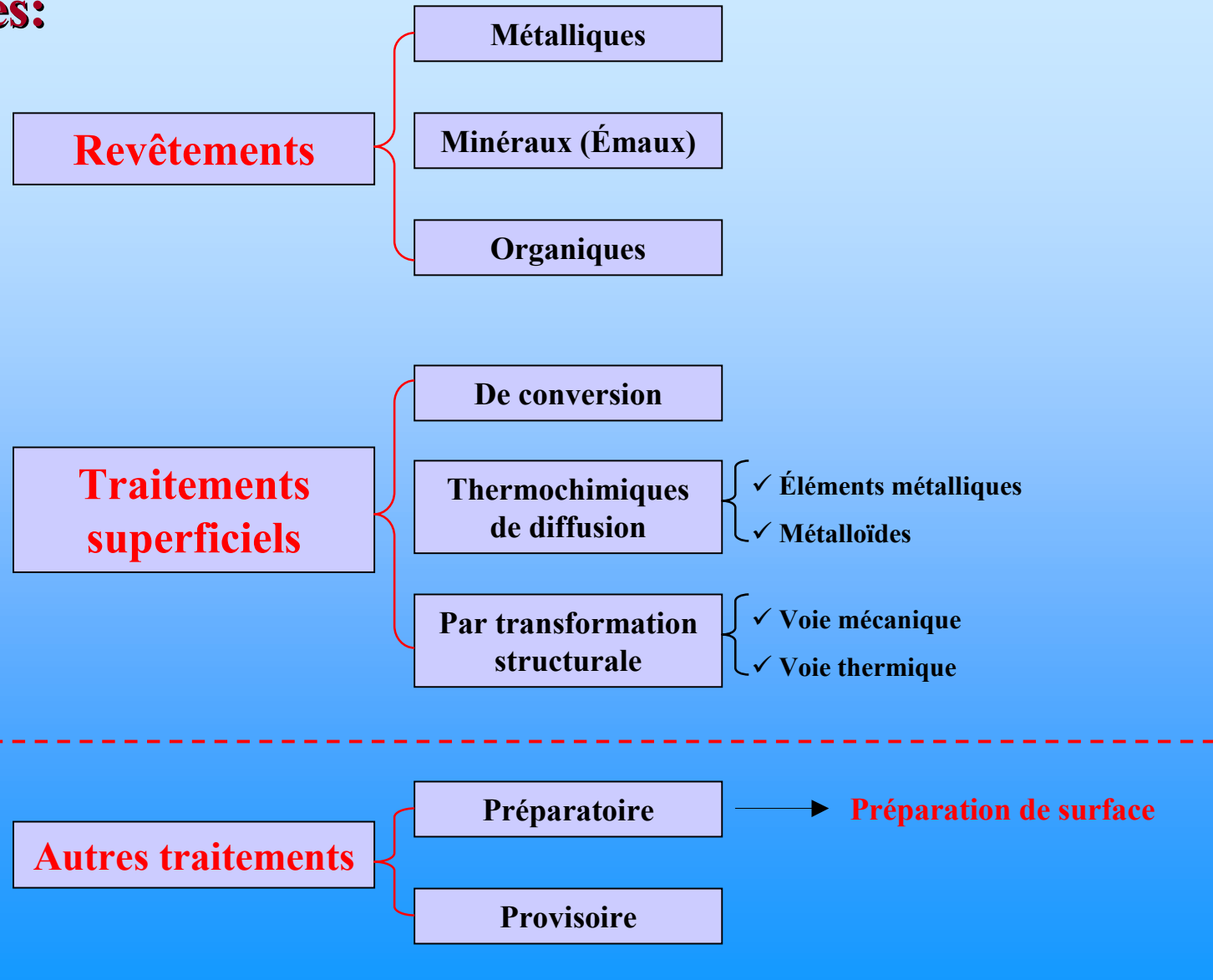
Les traitements de surface

Critères de choix:



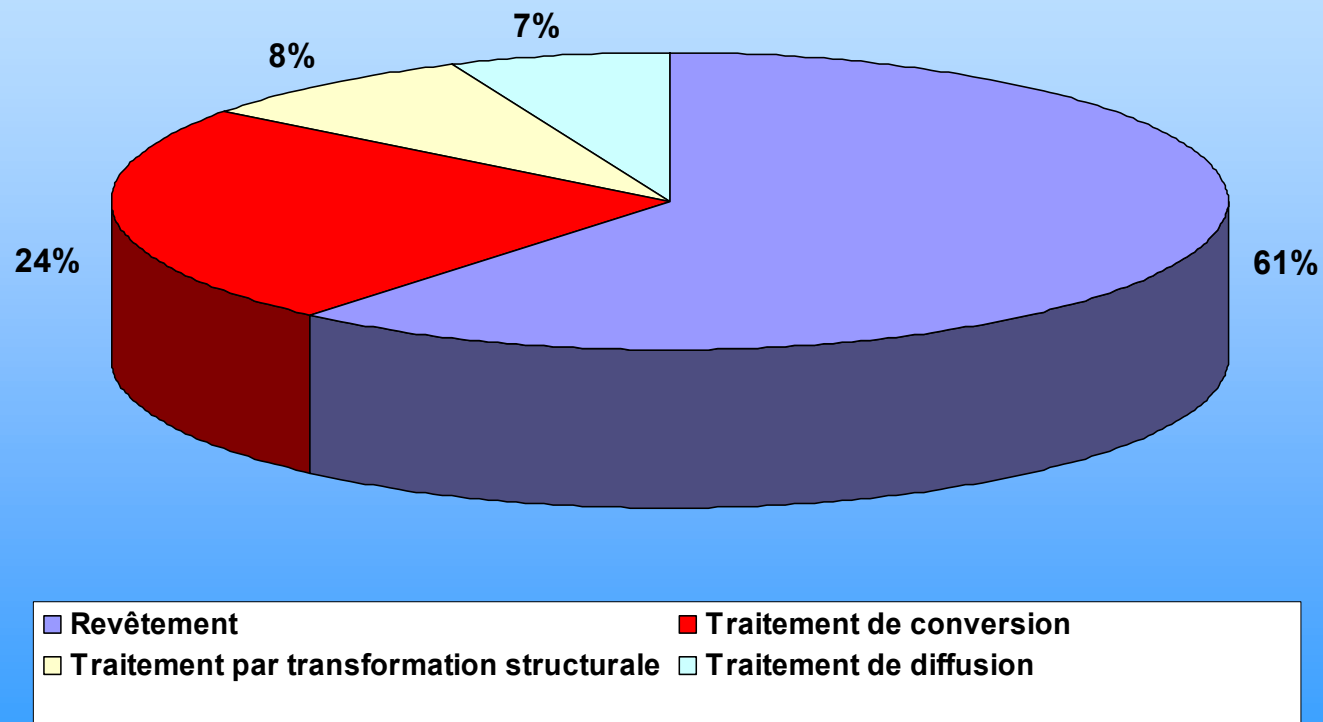
Les traitements de surface

2 possibilités:



Les traitements de surface

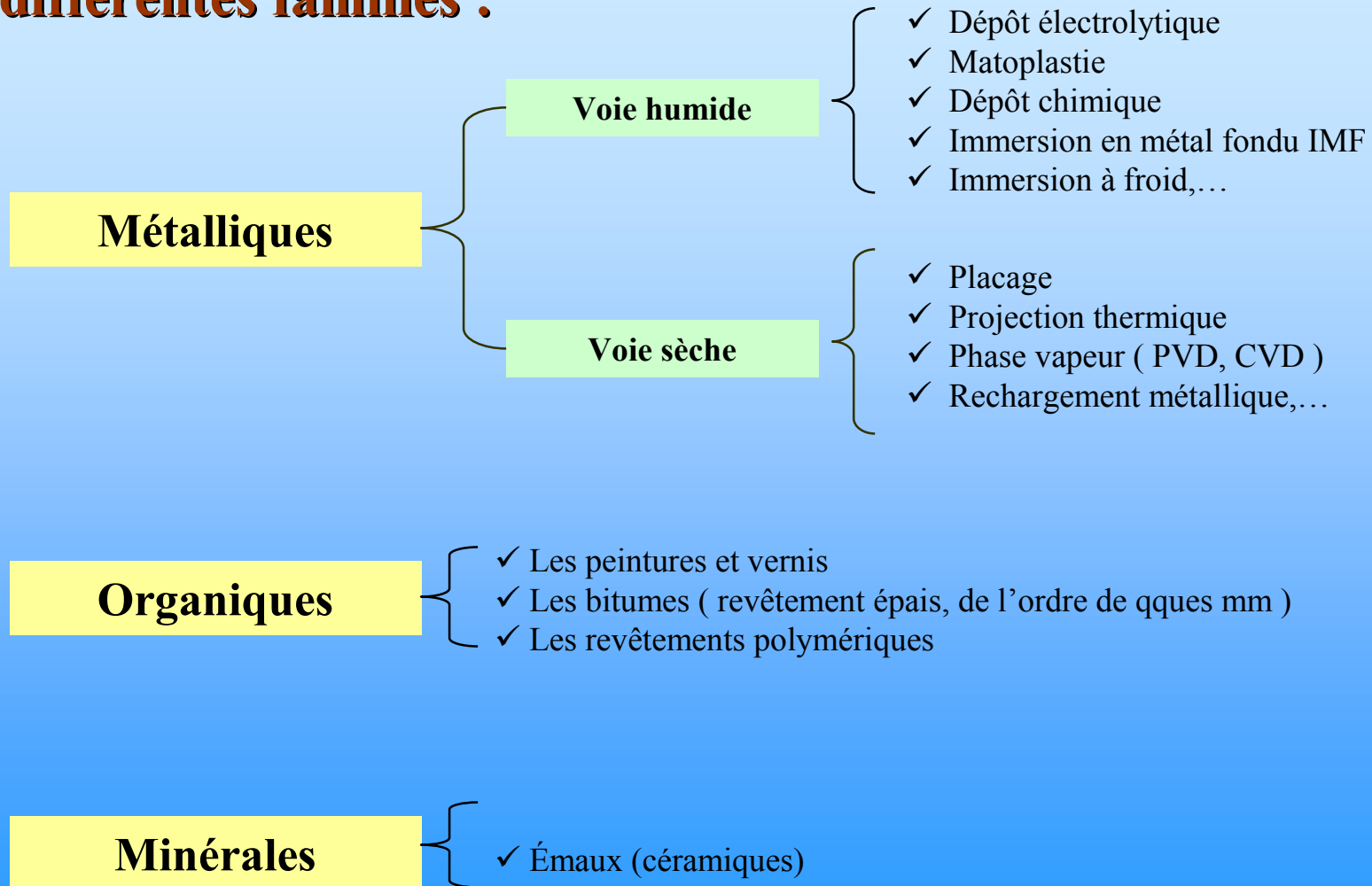
Répartition par fonction d'utilisation:



LES REVETEMENTS

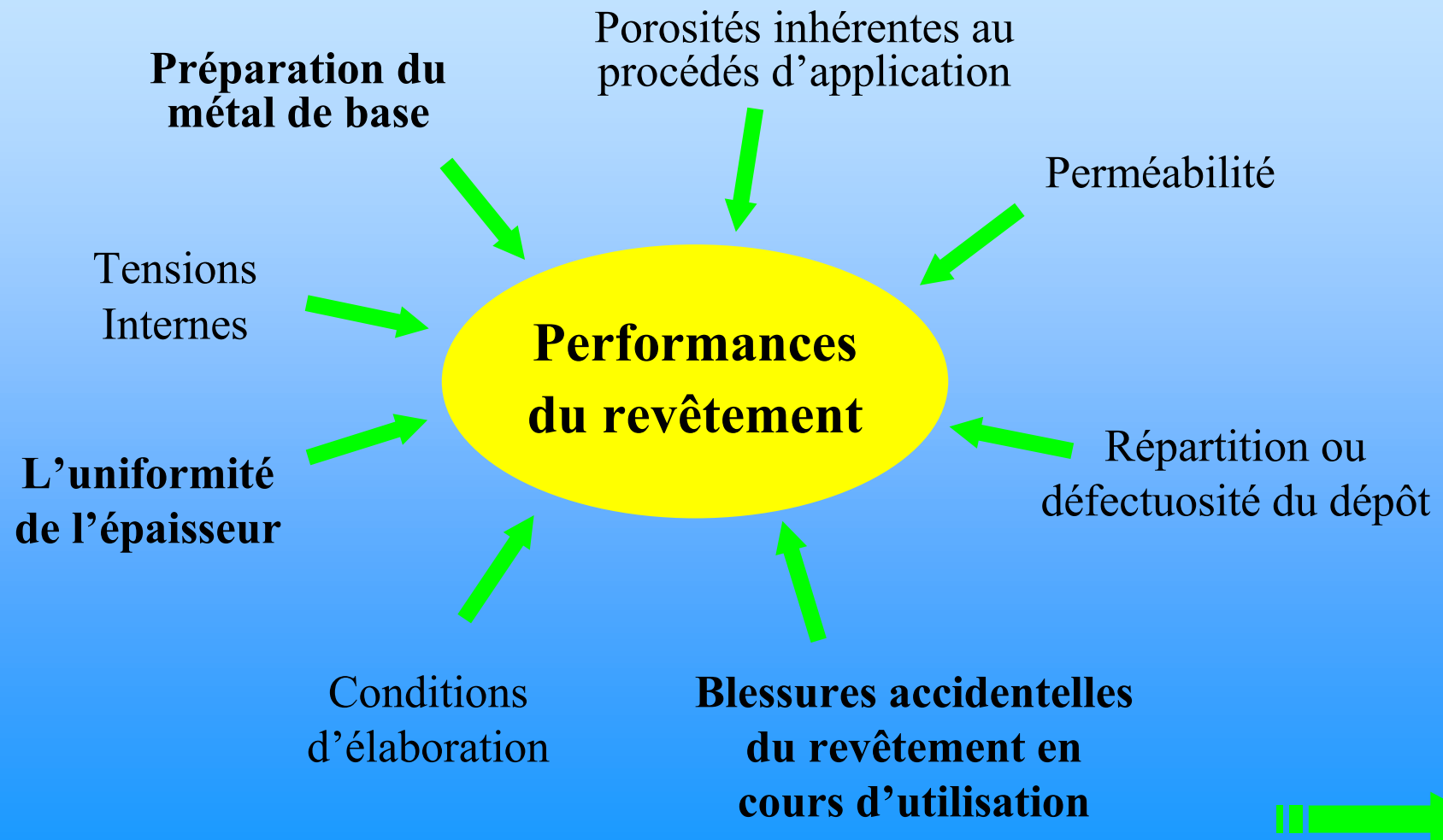
Les revêtements

Les différentes familles :



Les revêtements métalliques

Facteurs susceptibles d'influencer les performances d'un revêtement :



Les revêtements métalliques

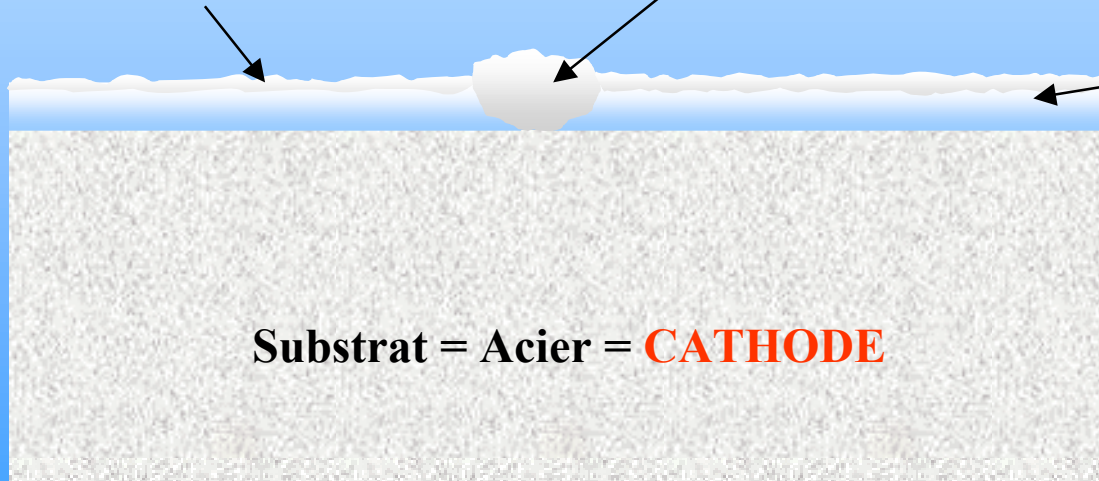
CAS DES REVETEMENTS ANODIQUES (Zn, Mg,..)

Corrosion généralisée du revêtement
par couplage galvanique

Oxyde de zinc
= cicatrisation

Revêtement =
ANODE

Substrat = Acier = **CATHODE**

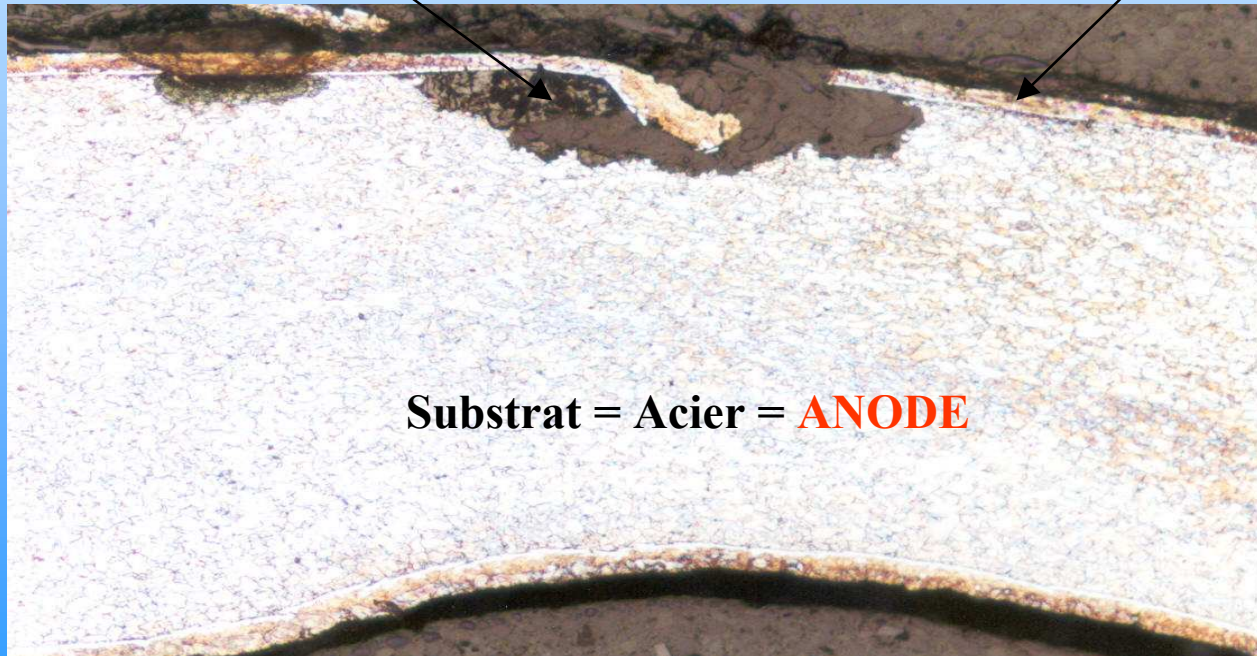


Les revêtements métalliques

CAS DES REVETEMENTS **CATHODIQUES**

Corrosion par **couplage galvanique**

Revêtement = Aluminium (oxyde)
= **cathode**



Substrat = Acier = **ANODE**

Les revêtements métalliques

LES REVETEMENTS OBTENUS PAR VOIE HUMIDE

Les revêtements métalliques par voie humide

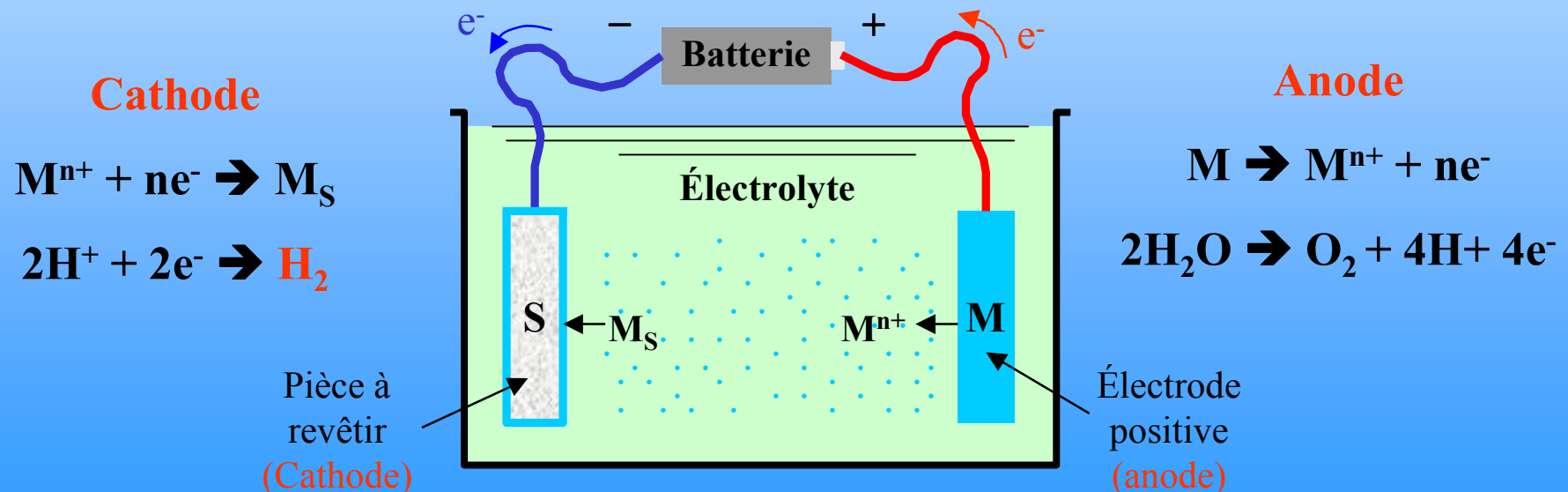
***LES REVETEMENTS
ELECTROLYTIQUES***

Les revêtements électrolytiques

Principe :

Un générateur électrique fournit des électrons qui réduisent le métal d'apport (M) à la surface du substrat (S)

Équation chimique: $M^{n+} + ne^- \rightarrow M_S$



L'anode n'est pas forcément le métal à déposer, celui ci peut déjà se trouver sous sa forme ionique en solution

Les revêtements électrolytiques

Avantages des revêtements électrolytiques:



☐ Grande variété de dépôts:

- Tous type de métaux (Zn, Cr, Ni, Cu, Sn, Ag, Au,)
- Alliages (codépôts)
- Composites (Ni+carbure de silicium)

☐ Grande variété de procédés:

- Immersion
- Hors cuve (au tampon)
- Pulsé
- En vrac (au tonneau)

☐ Épaisseur variable

☐ Économie

☐ Disponibilité

Les revêtements électrolytiques

Inconvénients des revêtements électrolytiques:



❑ Traitement par voie humide: \Rightarrow pollution

❑ Gammes de traitement élaborées:

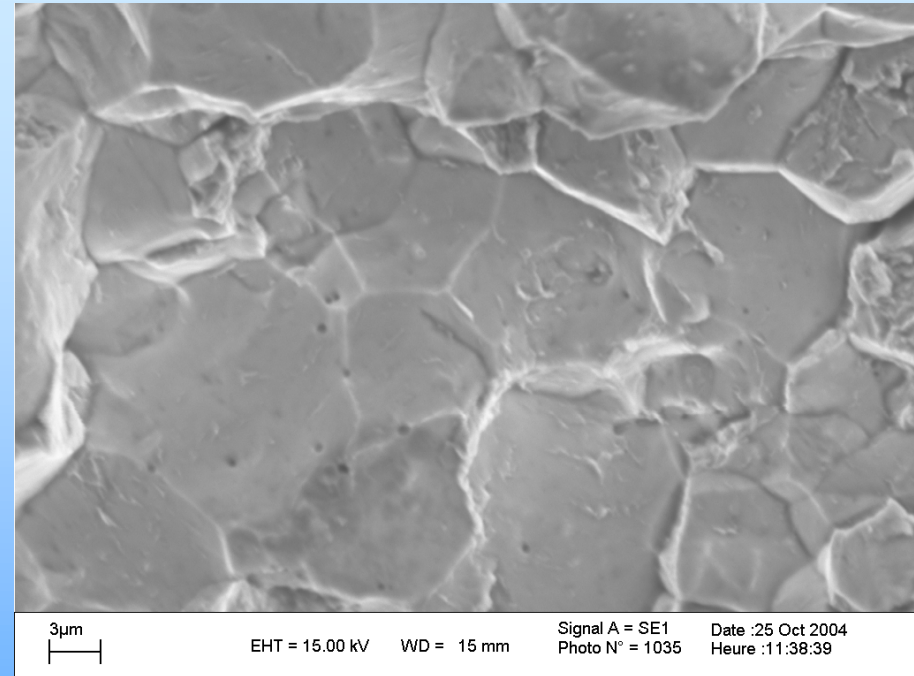
❑ **Fragilisation** \Rightarrow H_2 (réaliser un traitement de dégazage) 

❑ **Répartition du dépôt** \Rightarrow fonction de la forme de la pièce

Les revêtements électrolytiques

Les faits :

Rupture de brides en acier XC45
électrozinguées bichromatées



Le responsable :

- ✓ H₂ ayant entraîné la fragilisation de la pièce (absence de dégazage)
- ✓ Dureté relativement élevée: 440 à 490 HV (1420 à 1595 N/mm²)

Les remèdes :

- ✓ Réaliser un traitement thermique de dégazage (déshydrogénation)



Les revêtements électrolytiques

A partir d'une résistance à la rupture de 1450 Mpa environ, les risques de fragilisation deviennent particulièrement importants et des précautions doivent être prises quelque soit le traitement électrolytique.

Exemple de traitement thermique de dégazage pour un zingage électrolytique :

Résistance à la traction (Mpa)	Durée (heures)	Température (°C)
≤ 1100	Pas obligatoire	
$> 1100 \leq 1450$	8	190-230
$> 1450 \leq 1800$	18	190-230
> 1800	24	190-230

Selon norme NF A 91-102 (juin 1980): dépôts électrolytiques de zinc ou de cadmium sur acier

Ce traitement thermique doit être appliqué **au maximum dans les 4 heures qui suivent la réalisation du revêtement électrolytique** et avant le traitement de chromatisation.

Exemple de revêtement électrolytique

Le zingage

Domaine principale d'application:



**Protection contre la CORROSION
de pièces en acier: tôle, feuillards, visserie...**



LE ZINGAGE

Épaisseur déposée selon NF A 91 102:

Conditions d'emploi		Épaisseur déposée (μm)
Agressivité selon ISO 1458	Désignation du milieu	
4	« Très agressif » ✓ Corrosion chimique ✓ Milieu tropical, marin, industriel	25
3	« Agressif » ✓ Milieu urbain	12
2	« Peu agressif » ✓ Extérieur sec ✓ Intérieur humide	8
1	« Non agressif » ✓ Intérieur sec	5

LE ZINGAGE

Avantages et inconvénients:



- ☐ Revêtement anticorrosion sacrificiel (anodique/acier)
⇒ protection des bords de découpe
- ☐ Protection contre la corrosion peu onéreuse
- ☐ Bonne tenue en immersion dans l'eau de mer
- ☐ Bonne tenue aux substances organiques



- ☐ Inversion de la polarité (zinc-fer) en milieux aqueux au delà de 80°C
⇒ attaque directe du substrat
- ☐ Pas de tenue en milieu acide ou basique
- ☐ Pas de tenue en présence d'embruns
- ☐ Tenue moyenne en atmosphère industrielle
- ☐ Répartition mauvaise de l'épaisseur
- ☐ Pas d'utilisation dans l'alimentaire (sels toxiques)

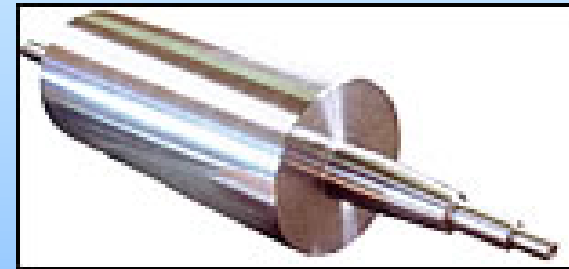
Exemple de revêtement électrolytique

Le chromage

Domaines d'application :

Tous les domaines où l'on cherche:

- ☐ Des propriétés d'antiadhérence
- ☐ Une dureté superficielle
- ☐ Une résistance à l'usure et à la corrosion



Nature des substrats (tous support) :

Aciers, fontes, zinc et alliages, cuivres et alliages, aluminium

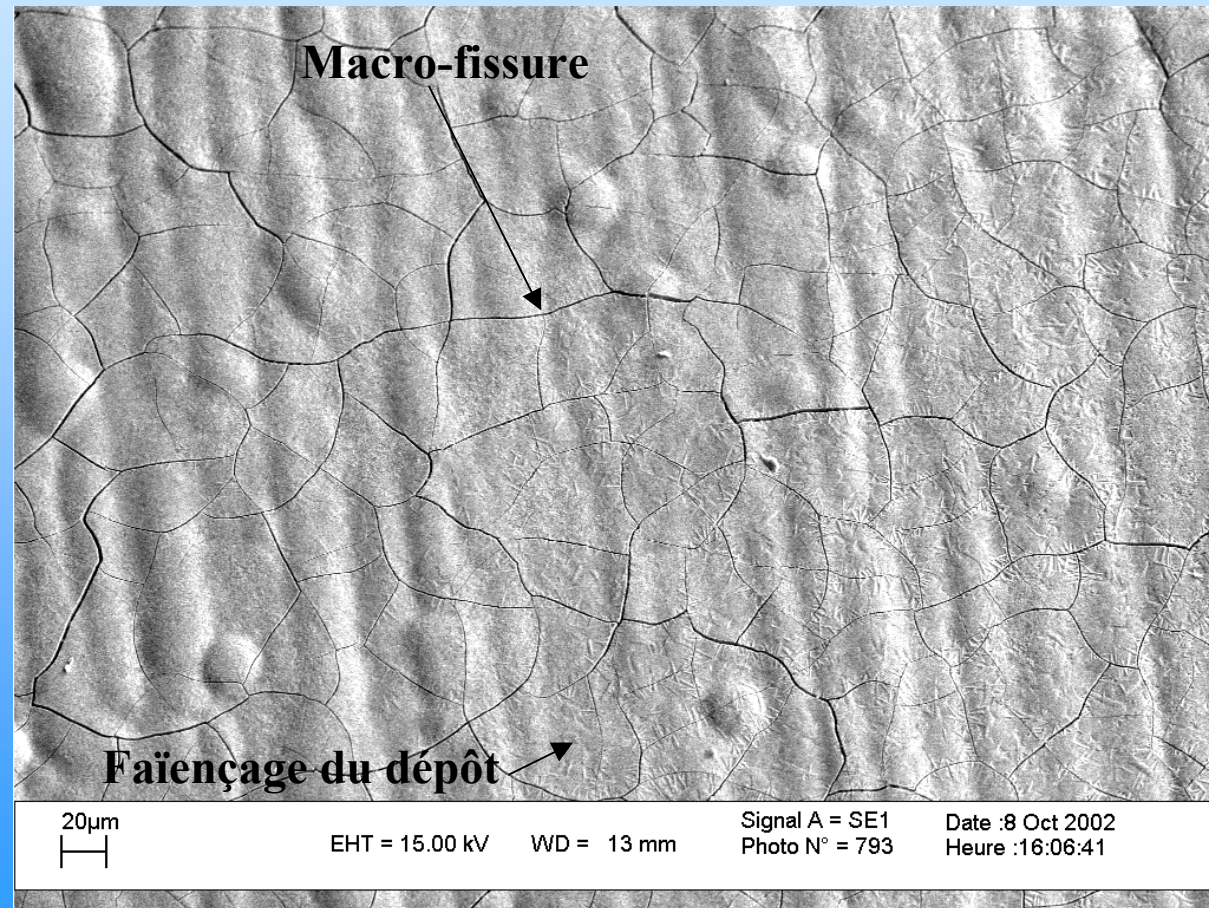
LE CHROMAGE

Caractéristiques du dépôt:

- ❑ Une grande dureté (valeur courante 1000 à 1100 HV)
 - ❑ Une grande aptitude au polissage
- ❑ Une faible ductilité \Rightarrow *dépôt cassant*
 - ❑ Une structure fissurée
- ❑ Un faible coefficient de frottement
 - ❑ Des propriétés antiadhérentes
 - ❑ Résistance à l'usure
 - ❑ Résistance à la corrosion

LE CHROMAGE

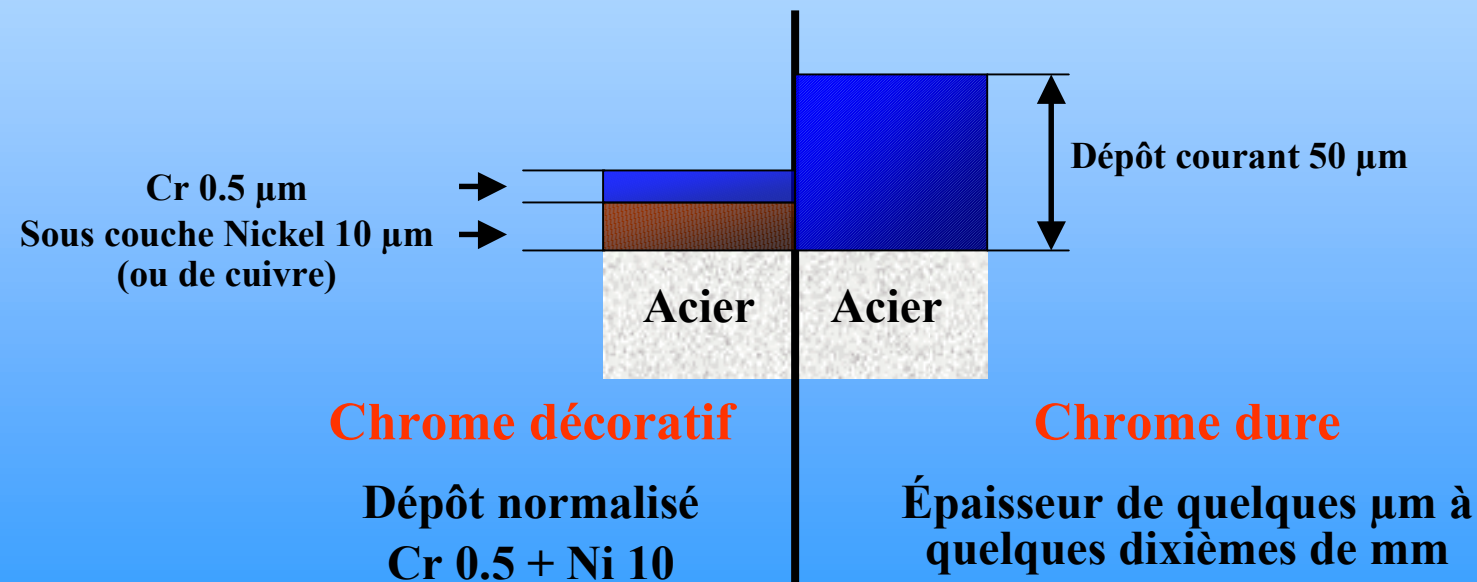
Aspect du dépôt:



LE CHROMAGE

Épaisseur déposée:

Deux types de chromage:



↳ **Épaisseur $\geq 50 \mu\text{m}$ → protection contre la corrosion et/ou l'usure**

LE CHROMAGE

Avantage du chromage:

□ Bonne résistance à la corrosion et à l'oxydation:

- ❖ Atmosphère normale, chaude et oxydante
- ❖ Oxygène → 600 ° C
- ❖ Vapeur d'eau → 1000° C
- ❖ Gaz carbonique et sulfureux → 100° C
- ❖ Acide acétique et citrique
- ❖ **Chlore sec** → 300° C
- ❖ Soude, potasse caustique, carbonate de sodium et potassium, ammoniacque
- ❖ Tenue à HNO₃, produits organiques divers

□ Autres caractéristiques:

- ❖ Grande dureté (1000 à 1100 HV)
- ❖ Dépôt avec ou sans microfissures ⇒ *courant pulsé*
- ❖ Faible coefficient de frottement
- ❖ Bonne résistance à l'usure et au frottement

LE CHROMAGE

Inconvénients du chromage:

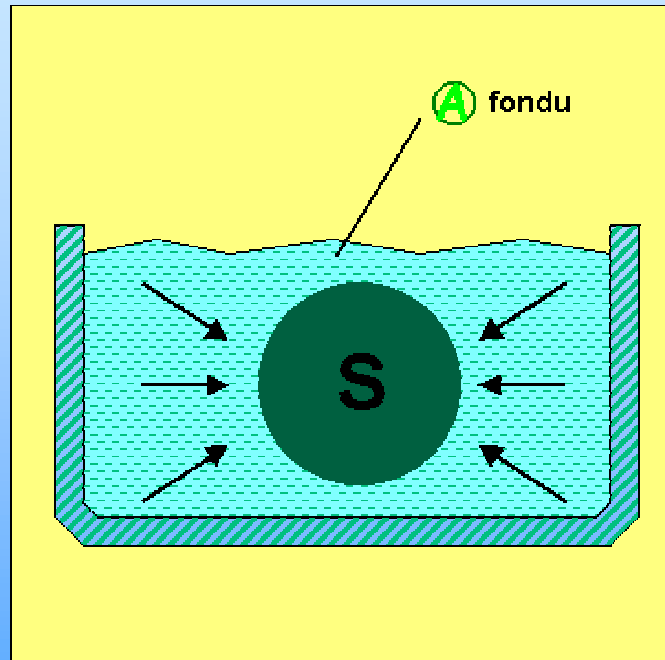
- ❑ Une faible ductilité → **dépôt cassant**
 - ❑ Forte densité de courant
 - ❑ Temps pour obtenir un dépôt épais
 - ❑ **Pas de tenue en milieu chloruré**
- ❑ Protection contre la corrosion non sacrificielle
(revêtement cathodique/acier)

Les revêtements métalliques par voie humide

LES REVETEMENTS PAR IMMERSION DANS LES METAUX FONDUS (I.M.F)

Immersion dans les métaux fondus IMF

Principe:



Le substrat S est immergé dans le métal d'apport A fondu

$A_{\text{liquide}} \rightarrow A_{\text{solide}}$

Immersion dans les métaux fondus IMF

Principe (suite):

Lorsque l'on plonge un élément en acier dans un bain de métal en fusion, différents phénomènes se produisent plus ou moins conjointement:

- ❖ **le mouillage de l'acier** par le métal en fusion lié à la **composition superficielle** de l'acier, sa propreté et sa **rugosité** d'une part et aux caractéristiques du bain (**composition** et **température**) d'autre part;
- ❖ **une « attaque » du fer** par le bain avec dissolution;
- ❖ **des réactions de diffusion** conduisant à la formation d'alliages métalliques, dépendant du bain et des conditions opératoires (temps – température).

Immersion dans les métaux fondus IMF

EXEMPLE DE REVETEMENT OBTENU PAR IMMERSION DANS UN METAL FONDU



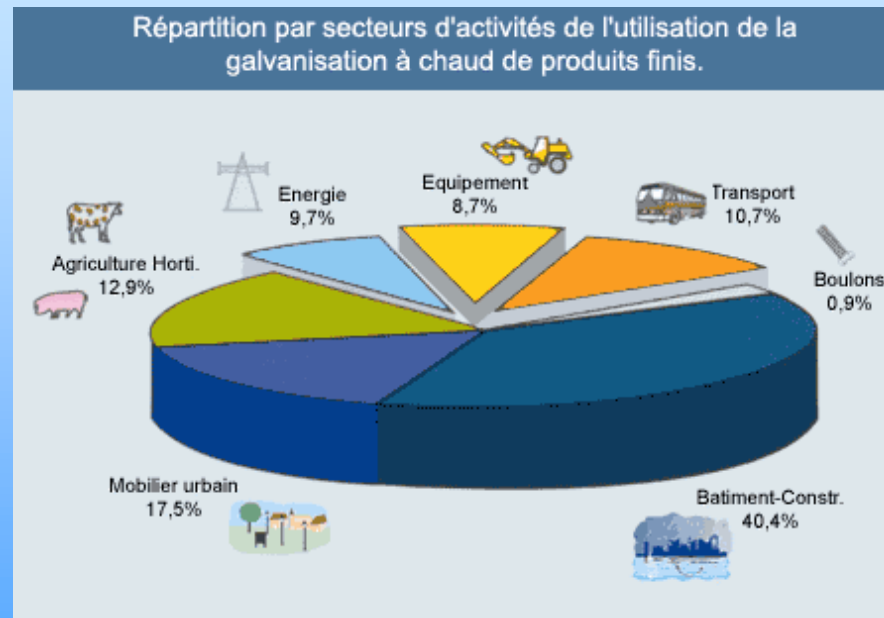
T° du bain
470°C~

LA GALVANISATION A CHAUD

LA GALVANISATION

Domaines d'applications:

PROTECTION CONTRE LA CORROSION ATMOSPHERIQUE



- ❑ **Protection physique** → Écran entre le milieu extérieur et le substrat
- ❑ **Protection cathodique** → Revêtement anodique/acier

Formation **d'oxyde** ou de **carbonate basique de ZINC**

LA GALVANISATION

Caractéristique du revêtement :

EPAISSEUR VARIABLE

Pour un métal donné, elle varie d'une dizaine de μm à quelques centaines de μm :

Ordre de grandeur:

Tôles galvanisées 400 g/m² Double Face soit 28 μm par face

MICROSTRUCTURE PARTICULIERE DU REVETEMENT

FONCTIONS:

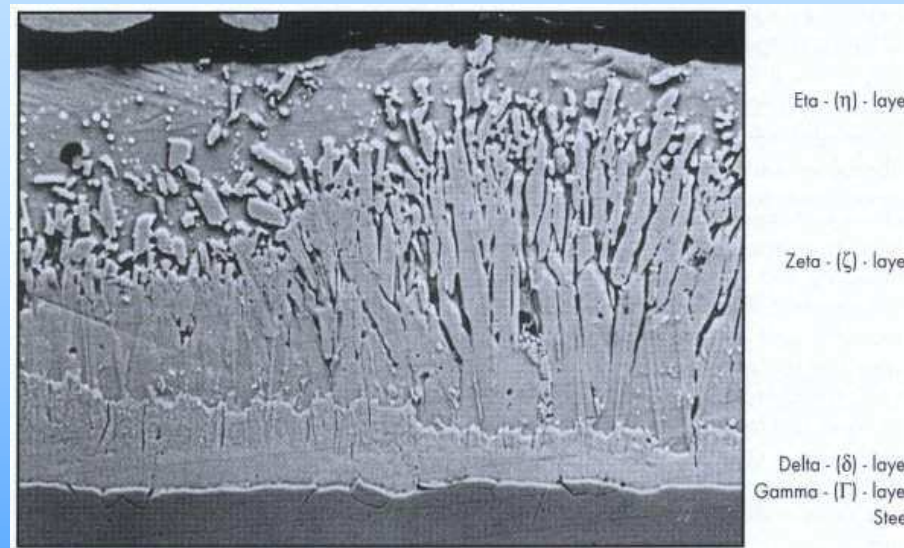
- ☐ Température et composition du bain
- ☐ Durée d'immersion
- ☐ Vitesse de retrait

LA GALVANISATION

Caractéristique du revêtement :

Microstructure type obtenu par galvanisation à chaud (bain de zinc pur):

On distingue successivement plusieurs phases



- ☐ Γ Toujours très fine ($\leq 1\mu\text{m}$) et difficile à observer
- ☐ δ 2 couches de même caractéristiques physiques mais de structure métallographique \neq
 - 1 bande continue fine
 - 1 bande plus épaisse à l'aspect microfissurée
- ☐ ξ sous forme de bâtonnets perpendiculaires au métal support
- ☐ η solution solide de zinc

LA GALVANISATION

Avantages et inconvénients :



- ☐ Procédé très répandu
- ☐ Coût faible
- ☐ Procédé adapté à la série
- ☐ Épaisseur importante
- ☐ Protection longue durée
- ☐ Procédé non fragilisant
- ☐ Très adhérent
- ☐ Revêtement ductile (adapté à la mise forme, découpe possible)
- ☐ Pas d'entretien particulier



- ☐ Surqualité (durée de vie trop longue/à d'autres équipements d'une installation)
- ☐ Surépaisseur dans les cavités
- ☐ Chocs thermiques possibles (éclatement des pièces)
- ☐ Déformation possible à chaud

LES REVETEMENTS OBTENUS PAR IMMERSION A FROID

REVETEMENT LAMELLAIRE

- ❑ Dacromet – Géomet
- ❑ Delta Tone – Delta Protekt
- ❑ Zintek,...

LES REVETEMENTS LAMELLAIRES

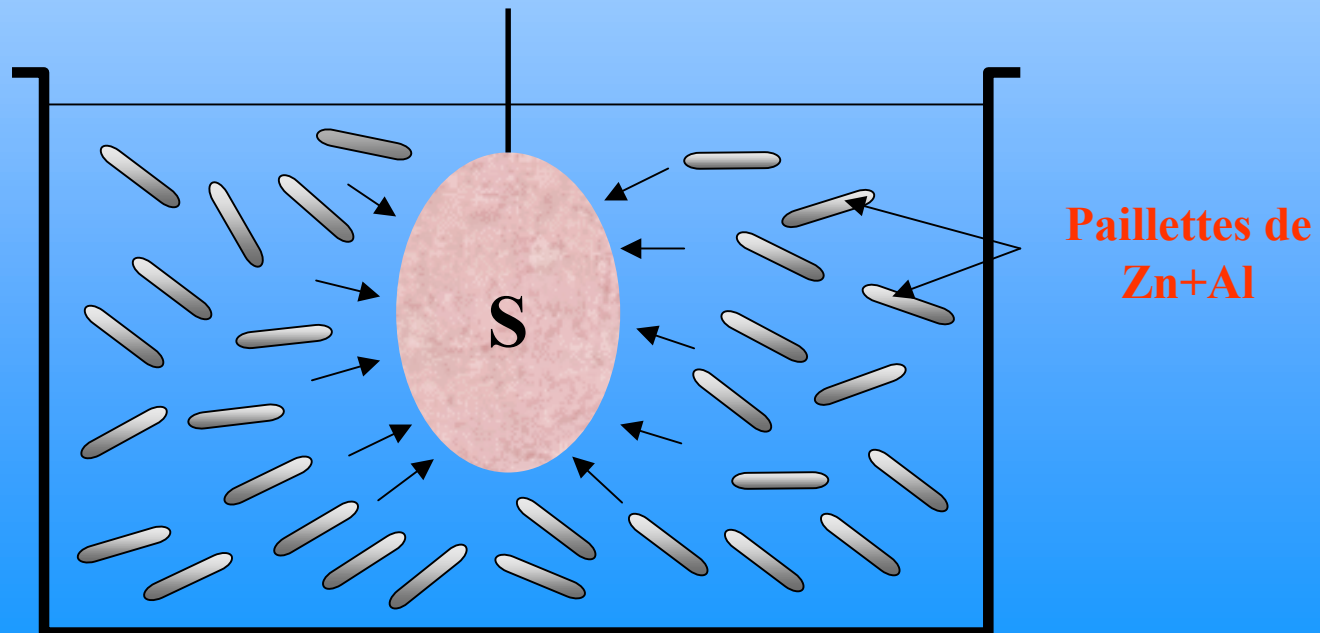
Principe :

Le substrat (S) est immergé dans une solution aqueuse organique et/ou minérale maintenu à température ambiante et contenant du **ZINC** et de l'**ALUMINIUM** sous la forme de paillettes.

+

Pré-séchage 60 à 80°C pdt ~ 15 min → élimination de l'eau et solvant organique

Cuisson (200-300°C ~) pdt ~ 30 à 45 min → formation du film final



LES REVETEMENTS LAMELLAIRES

Domaine principale d'utilisation :

PROTECTION CONTRE LA CORROSION ATMOSPHERIQUE

Exemples d'utilisations :



- ☐ Industrie automobile
- ☐ Éléments de fixation
- ☐ Boulonnerie
- ☐ Visserie



LES REVETEMENTS LAMELLAIRES

Trois mécanismes de protection:

❑ Protection par effet barrière :

dû à la structure lamellaire du dépôt

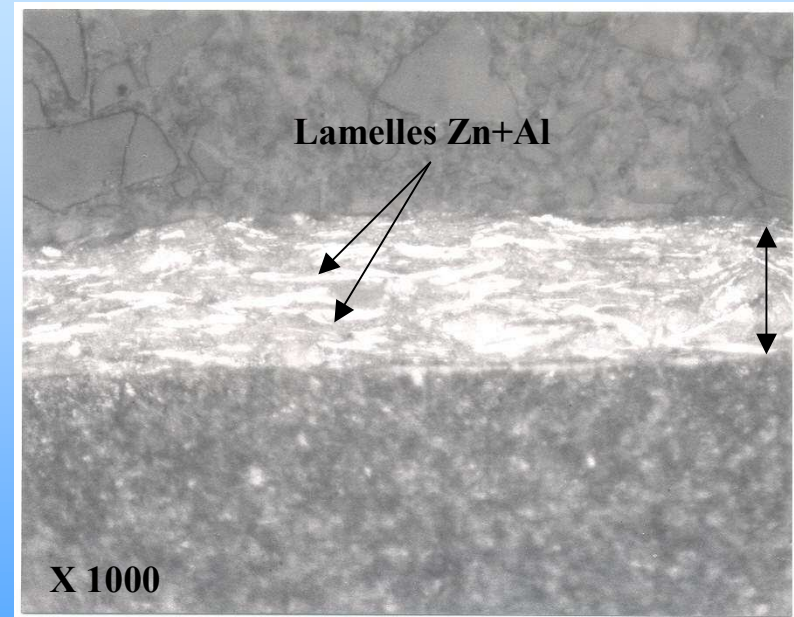
⇒ Obstacle physique à la pénétration des éléments corrosifs (**effet de tuile**)

❑ Protection sacrificielle :

revêtement anodique/au substrat ferreux

❑ Passivation du film:

réduit la vitesse de corrosion du Zn et Al



Coupe micrographique d'un revêtement lamellaires

↳ revêtement anodique → Durée de vie f (**EPAISSEUR**)

LES REVETEMENTS LAMELLAIRES

Avantages et inconvénients :



- ☐ Propriétés du revêtement maintenues jusqu'à des T° de l'ordre de 280° C (→ 650°C pour certaine formulation)
- ☐ **Pas de fragilisation par H₂**
- ☐ Revêtement anticorrosion sacrificiel
- ☐ Coloration possible du revêtement



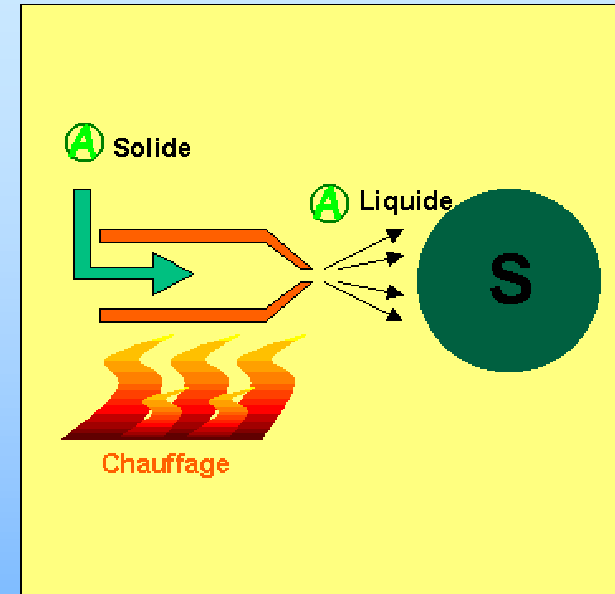
- ☐ Préparation de surface poussée
- ☐ Surépaisseur friable pour les pièces creuses
- ☐ Cuisson finale du revêtement à 300°C (**☠️ revenu**)
- ☐ Certaine formulation comporte des solvants organiques ou du chrome VI → **pollution**

Les revêtements métalliques par voie sèche

***LES REVETEMENTS OBTENUS
PAR PROJECTION
THERMIQUE***

LA PROJECTION THERMIQUE

Principe :



Le matériau d'apport solide sous forme de poudre ou de fil est fondu au moyen d'une source de chaleur appropriée (flamme, arc ou plasma d'arc).

Aussitôt porté à l'état liquide, il est pulvérisé et projeté sous forme de fines gouttelettes par un courant gazeux à grande vitesse.

Le courant gazeux peut être constitué soit par un gaz auxiliaire, plus généralement de l'air, parfois de l'argon ou de l'azote, soit par des gaz provenant de la combustion (flamme oxygaz) ou du plasma d'arc

LA PROJECTION THERMIQUE

Matière projetée :

☐ **Tous types de métaux et alliages:**

- Zn, Al, Ti, Cr, Cu, Mo, Sn, Nb,...
- Alliages de Zn, Al, base Co, Ni ,Cu,....
- Aciers au carbone et aciers inox

☐ **Carbures de W et Cr**

☐ **Oxydes métalliques** (alumine, oxydes de Cr, de Ti, de Zr,...)

☐ **Plastiques**

☐ **Composites**

Conditionnement :

☐ **fil** (pour les matériaux tréfilables: métaux)

☐ **poudre:** céramiques

☐ **Cordon** (poudre enfermée dans une gaine organique)

LA PROJECTION THERMIQUE

LES DIFFERENTES APPLICATIONS DE LA PROJECTION THERMIQUE (suite)

Protection contre la corrosion

- ❑ Dans les industries chimiques et alimentaires et en immersion dans l'eau (Al, Zn, TaCR, Cr_2O_3 , CrB_2 , WSi_2)
- ❑ Dans les atmosphères industrielles, salines ou polluées (Al, Zn, Cr, Ta, Cr_2O_3)

Revêtements à propriétés électriques


- ❑ Blindages radiofréquences (Al, Zn, Cu, Sn)
- ❑ Dépôts diélectriques (Al_2O_3)
- ❑ Bonne conductivité électrique (Al, Cu)


Revêtements pour la réparation et la mise en forme

- ❑ Les métaux non ferreux (Ti et ses alliages, Al et ses alliages Al-Mg, NiAl, Al-Si, Cu et ses alliages bronze Al, Co et ses alliages Co-Cr-W-Si, Ni et ses alliages Ni-B-Si, NiAl, NiCu)
- ❑ Les métaux ferreux (acier, acier au Cr, acier austénitique, acier à bas taux de carbone, fontes)

LA PROJECTION THERMIQUE

Avantages et inconvénients :

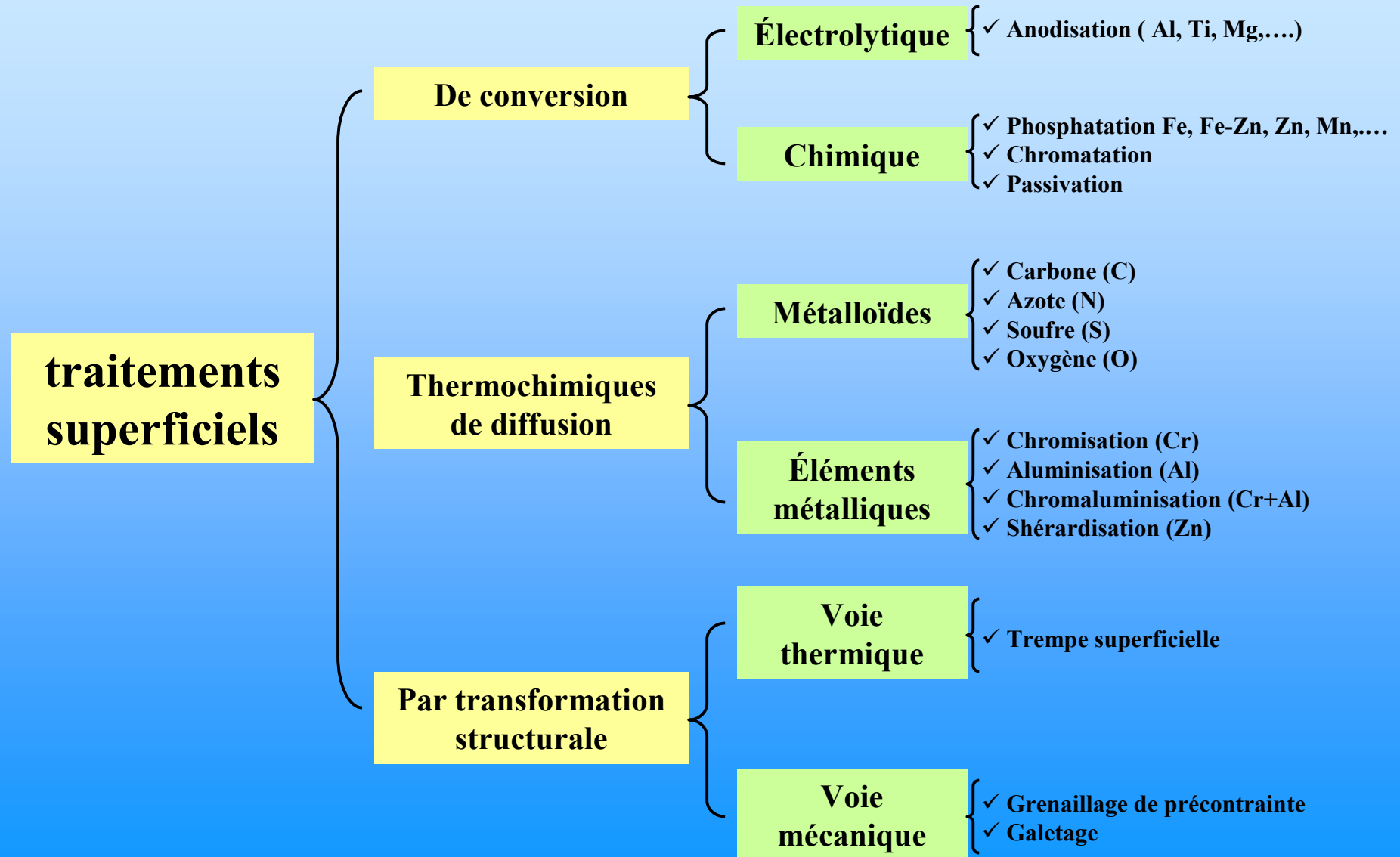
- 
- ☐ Nombreux dépôts possibles
 - ☐ Possibilité de traitements sur site
 - ☐ Utilisable en réparation localisée
 - ☐ Automatisable
 - ☐ Pas d'effluents aqueux

- 
- ☐ Faible adhérence et porosité (sauf plasma et projection haute vitesse)
 - ☐ Bruits (notamment plasma) \Rightarrow réalisation de dépôts dans des pièces insonorisées
 - ☐ Poussières \Rightarrow protection des yeux, des voies respiratoires, risques de problèmes intestinaux pour opérateur (Zn)

Cours

***LES TRAITEMENTS DE
SURFACE SUPERFICIELLES***

Les traitements de surface superficiels

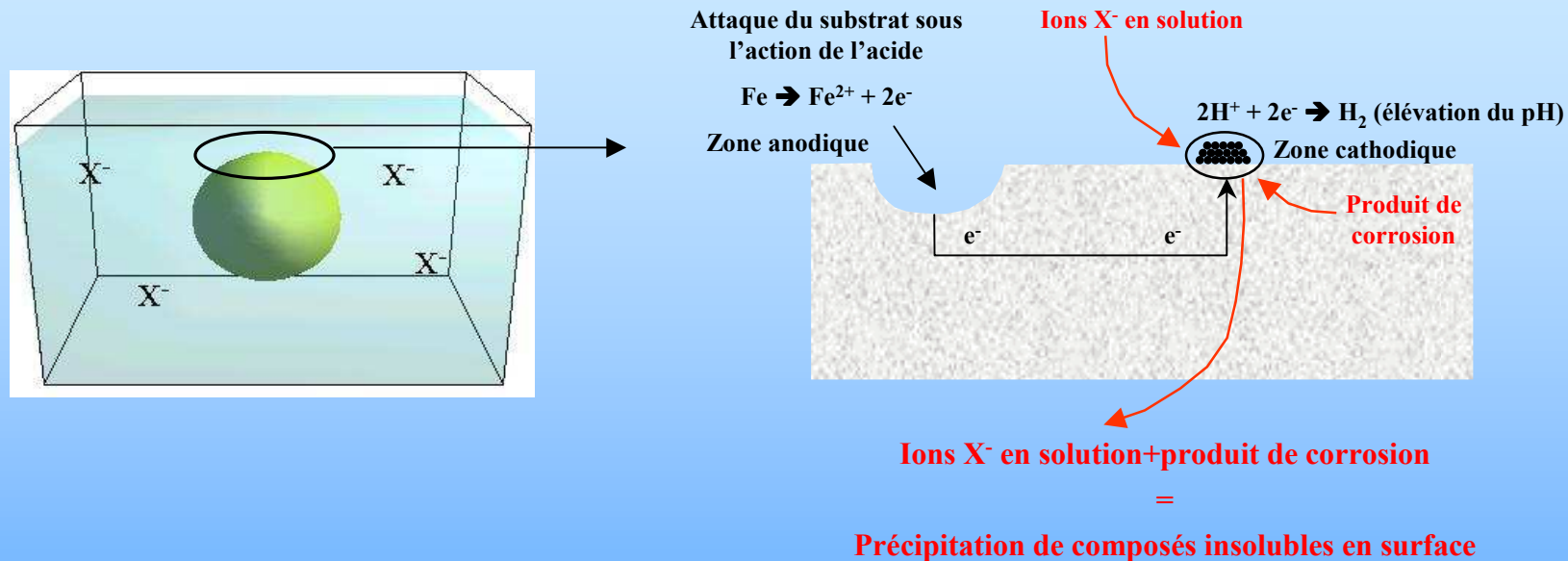


Les traitements de surface

***LES TRAITEMENTS DE
CONVERSION CHIMIQUE***

Les traitements de conversion chimique

Principe générale :



Le métal à traiter est mis en contact (par aspersion ou immersion) avec une solution aqueuse « corrosive », qui provoque la corrosion contrôlée de ce dernier.

La composition de la solution est définie afin que les produits de corrosion forment en présence d'ions X^- un film adhérent et compact qui « isole » le métal du milieu corrodant.

Les traitements de conversion chimique

Principe générale :

Selon les procédés, les solutions de traitement seront à base d'ions (X^-):

- Chromates \Rightarrow **Chromatation**
- Phosphates \Rightarrow **Phosphatation**

Autres types de solution contenant des:

- Nitrates (acide nitrique) \Rightarrow **Passivation (aciers inoxydables)**
- Oxalates (acide oxalique)
- Sulfures \Rightarrow Sulfuration
-

La chromatation

Domaines principaux d'utilisation de la chromatation :

- ❑ **Augmenter la tenue à la corrosion:** *pièces zinguées*
- ❑ **Modifier l'aspect de surface:** *brillance – coloration*
- ❑ **Base d'adhérence** pour revêtement ultérieur: *peintures*
- ❑ **Diminuer la sensibilité aux empreintes et taches** *lors des manipulations manuelles*

La chromatisation

Avantages et inconvénients de la chromatisation :



- ☐ Procédé automatisable
- ☐ Faible épaisseur
- ☐ Augmente considérablement la tenue à la corrosion



- ☐ Toxicité du chrome VI (pièces non alimentaires)
- ☐ Pièces non soudable si couche $> 1 \mu\text{m}$
- ☐ Couche de faible dureté
- ☐ Problèmes de rejet (Cr VI)

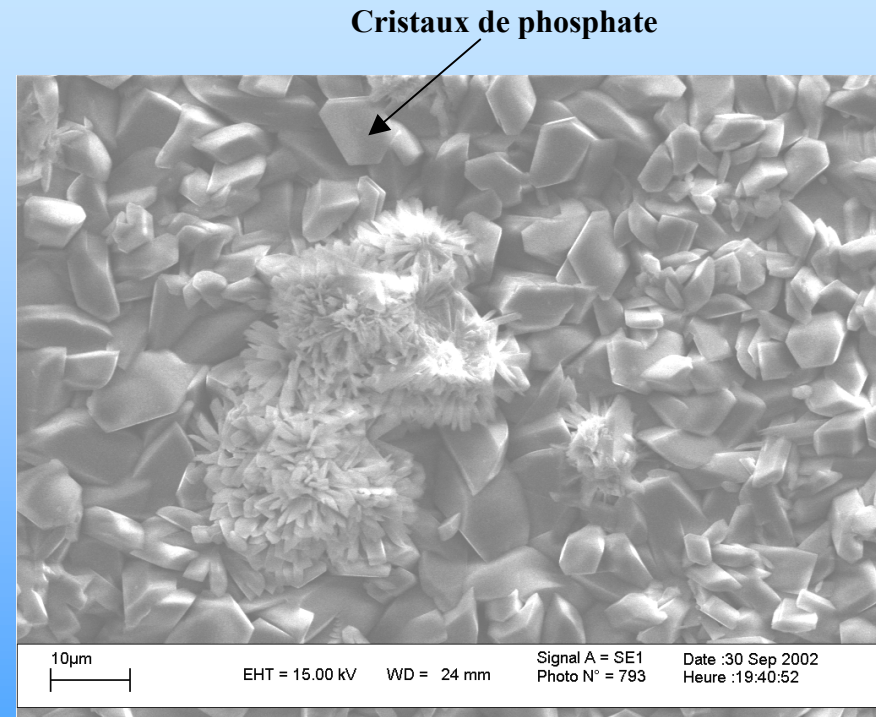
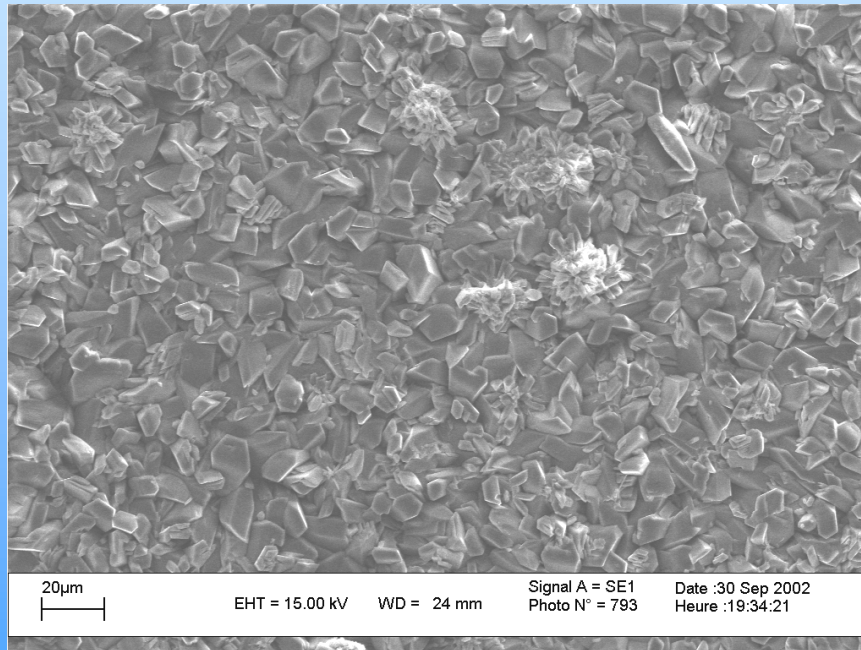
La phosphatation

Domaines principaux d'utilisation de la phosphatation :

- ☐ **Protection contre la corrosion**, *dans ce cas un huilage des pièces est nécessaire (phosphatation grasse),*
- ☐ **Protection temporaire:** *stockage longue durée ou intermédiaire entre 2 opérations*
- ☐ **Base d'adhérence :** *peintures, colles*
- ☐ **Diminuer ou augmenter la résistance électrique superficielle**
- ☐ **Diminuer le coefficient de frottement** *sous lubrification*
 - ☐ **Propriétés optiques:** *antireflet*

La phosphatation

Photo MEB d'une couche de phosphatation :



X 1000

Phosphatation au manganèse

La phosphatation

Avantages et inconvénients de la phosphatation :



- ☐ Bonne porosité (bonne base d'accrochage)
- ☐ Faible coefficient de frottement
- ☐ Soudabilité
- ☐ Faible modification dimensionnelle des pièces



- ☐ Problème de rejets aqueux (\Rightarrow station d'épuration)
- ☐ Faible épaisseur
- ☐ Dureté médiocre

LES TRAITEMENTS DE SURFACE PAR TRANSFORMATION STRUCTURALE

- ☐ ***Le grenaillage de précontrainte***
- ☐ ***La trempe superficielle***

Les traitements de surface

LE GRENAILLAGE DE PRECONTRAINTE OU SHOT PEENING

Le grenaillage de précontrainte

Principe :

Il s'agit d'une projection à grande vitesse (50 à 120 m/s) de petites billes appelées grenailles sur la pièce à traiter.

La grenaille peut être de nature métallique (*acier*) ou minérale (*verre ou céramique*).

But :

Consiste à introduire une déformation plastique à la surface de la pièce traitée pour produire des contraintes superficielles de compression (*ces contraintes s'opposent aux efforts que la pièce subit en fonctionnement*).

Attention :

Ce traitement **ne doit pas être confondu avec le grenaillage ou sablage** qui est un traitement de préparation de surface (*décapage mécanique*)

Le grenailage de précontrainte

Caractéristiques du traitement :

Obtention de quatre effets sur la surface:

- ☐ Modification de la rugosité
- ☐ Modification de la microstructure du métal par déformation plastique (écrouissage)
- ☐ Durcissement de la surface (*pour les matériaux écrouissables*)
 - ☐ Création de contraintes résiduelles de compression

Le grenaillage de précontrainte

Domaines d'applications :

Amélioration de la résistance à:

- ☐ la fatigue (*ressorts, engrenages, pièces forgées*)
- ☐ la corrosion sous contrainte
- ☐ la fatigue corrosion
- ☐ la corrosion de contact (fretting corrosion)

Autre domaines d'applications:

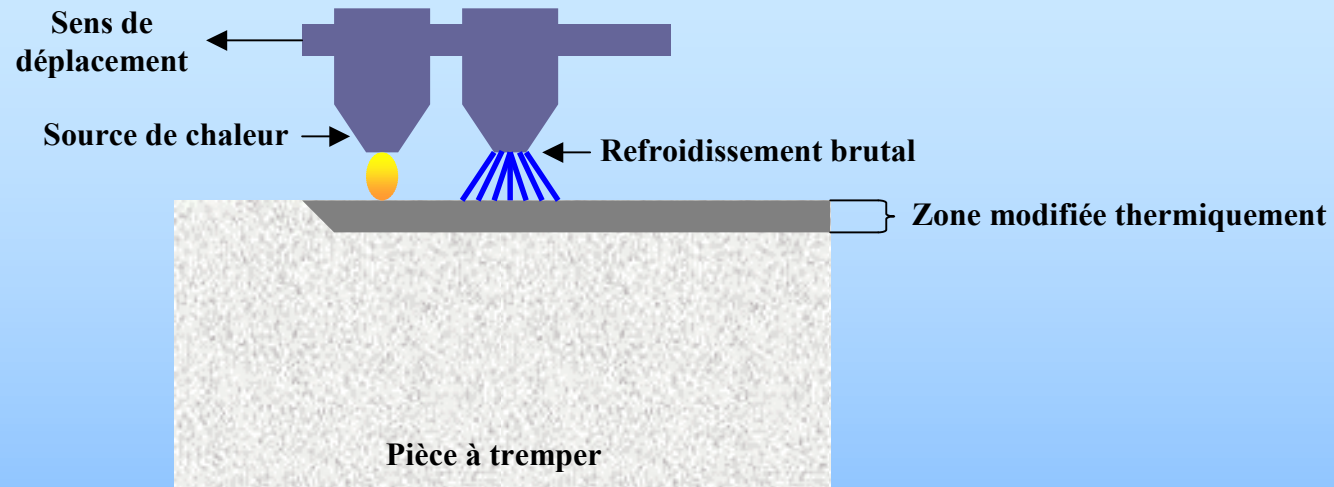
- ☐ le formage *d'ailerons d'avions*
- ☐ La remise en forme (redressage) *de pièces voilées*

Les traitements de surface

LA TREMPE SUPERFICIELLE

La trempe superficielle

Principe :



Consiste à chauffer superficiellement la surface d'une pièce en acier jusqu'à la température d'austénitisation ($800-1000^{\circ}\text{C}$), puis à la refroidir brutalement (trempe).

Le refroidissement s'effectue le plus souvent par jet d'eau sous pression.

↳ **Modification superficielle des propriétés structurales de la pièce (formation de martensite)**

La trempe superficielle

But de la trempe superficielle :

Obtenir à la surface de la pièce traitée (acier ou fonte) **une couche de forte dureté (600 à 800 HV – 52 à 60 HRC)** et d'épaisseur comprise entre quelques μm et quelques mm environ (selon le procédé de chauffage utilisé et le temps de traitement)

Post-traitement :

La trempe est habituellement suivie d'un chauffage à 200°C pendant 1 heure environ (appelé revenu de détente à « basse température ») pour relaxer les contraintes dans la zone martensitique afin de réduire la fragilité de la couche précontrainte.

La trempe superficielle

Effets obtenus :

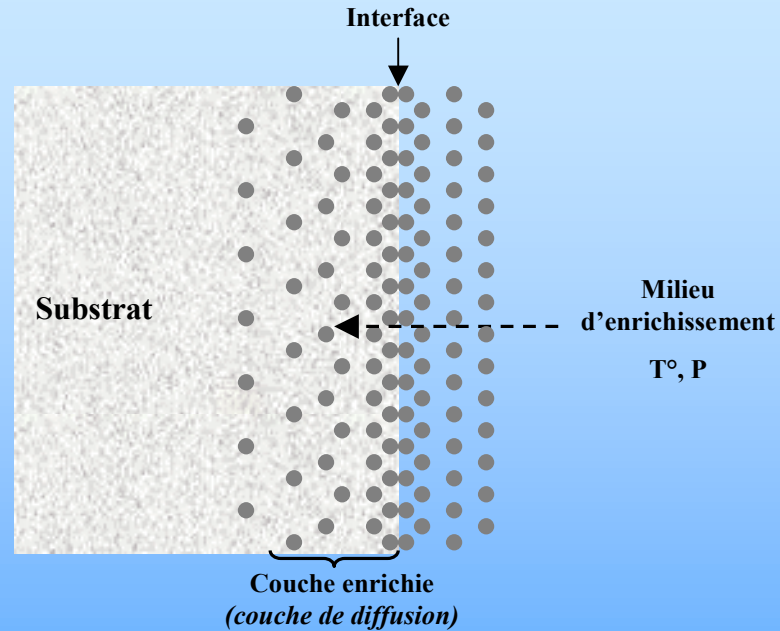
- ❑ ↗ de la dureté superficielle (*augmentation de la tenue à l'usure par abrasion*)
- ❑ ↘ du coefficient de frottement superficiel (*augmentation de la tenue à l'usure par frottement*)
- ❑ ↗ de la résistance en fatigue (*augmentation de la tenue en fatigue, fatigue superficielle et fretting*)
- ❑ Bonne résilience à cœur (*augmentation de la tenue aux chocs mécaniques*)

Les traitements de surface

LES TRAITEMENTS THERMOCHIMIQUES DE DIFFUSION

Les traitements thermochimiques de diffusion

Principe :



Enrichissement superficiel d'un matériau par **diffusion** thermique d'un ou plusieurs **éléments extérieurs**

↳ **modification de la composition chimique en surface**
(nouvelles propriétés)

Les traitements thermochimiques de diffusion

Matériaux traitables :

☐ Aciers principalement

Applications possibles sur les fontes, le titane, les céramiques

Éléments diffusants :

☐ Métalloïdes: C – N – B – O – S (ou combinaison de métalloïdes)

☐ Métaux: Cr – Zn – Al

☐ Plus rarement alliages métalliques: bronze, étain+antimoine

Les traitements thermochimiques de diffusion

Types de traitements possibles :

- ☐ Diffusion de carbone \Rightarrow **Cémentation**
- ☐ Diffusion d'azote \Rightarrow **Nitruration**
- ☐ Diffusion d'azote et d'oxygène \Rightarrow Oxynitruration
- ☐ Diffusion de carbone et d'azote \Rightarrow Carbonitruration
- ☐ Diffusion d'oxygène, d'azote et de carbone \Rightarrow Oxynitrocarburation
- ☐ Diffusion de soufre, d'azote et de carbone \Rightarrow Sulfonitrocarburation
- ☐ Diffusion de bore \Rightarrow Boruration
- ☐ Diffusion de chrome \Rightarrow **Chromisation**
- ☐ Diffusion de zinc \Rightarrow **Shérardisation**
- ☐ Diffusion de d'aluminium \Rightarrow Aluminisation
- ☐ Diffusion de soufre \Rightarrow Sulfuration

Les traitements thermochimiques de diffusion

Propriétés recherchées :

- ❑ ↗ de la dureté superficielle (*augmentation de la tenue à l'usure par abrasion*)
- ❑ ↘ du coefficient de frottement superficiel (*Résistance à l'usure par frottement – au grippage*)
- ❑ ↗ de la résistance en fatigue (*augmentation de la tenue en fatigue, fatigue superficielle et fretting*)
 - ❑ ↗ de la résistance à la corrosion

Les traitements thermochimiques de diffusion

EXEMPLES DE TRAITEMENTS THERMOCHIMIQUES DE DIFFUSION

Les traitements thermochimiques de diffusion

LA CEMENTATION

La cémentation

Principe :

Traitement thermochimique de diffusion de carbone qui permet d'obtenir une couche superficielle de forte dureté.

Le traitement de cémentation comporte habituellement **trois étapes**.

1. **Enrichissement superficiel en carbone** de la pièce (potentiel carbone de 0.7 à 0.9 %). La température du traitement est comprise entre 870 et 1100°C selon les aciers (en règle générale 900 à 950°C) pendant plusieurs heures selon la profondeur recherchée.
2. **Durcissement superficielle par trempe** qui conduit à la dureté et aux contraintes de compression recherchées.
3. **Revenu de détente** vers 150 à 200°C afin de réduire la fragilité de la couche précontrainte (augmentation de la ténacité de la couche superficielle)

La cémentation

Matériaux traitables :

Aciers doux ou extra doux (de 0.11 à 0.25 % C) afin de permettre la bonne diffusion du carbone et de limiter la dureté après trempe

Caractéristiques de la couche formée :

- ☐ Dureté en surface de 700 à 900 HV
- ☐ Épaisseur: de 0.01 à plusieurs mm (limitée à 4 mm maximum)
(épaisseurs les plus courantes varient de 0.2 à 2.5 mm)

Domaines d'application :

- ☐ Résistance en fatigue
 - ☐ Résistance à l'abrasion
- (Vilebrequins – arbre à came – engrenages....)

La cémentation

Avantages et inconvénients :

- 
- ❑ Profondeur de traitement importante: *limitée à 4 mm maximum*

*Contrôlée sur coupe micrographique (filiation de μ dureté):
Profondeur de traitement = épaisseur de la zone où la dureté est
supérieure à 550 HV*

- ❑ Bonnes propriétés mécaniques:

Couche dure 700 à 900 HV en surface + bonne résilience à cœur

- ❑ Cémentation local possible:

*Protection des zones à ne pas cémenter par résine, peinture ou dépôt de
cuivre*

- 
- ❑ Température de traitement importante (900 à 950° C):

Risque de perdre les caractéristiques mécaniques de l'acier

Les traitements thermochimiques de diffusion

LA NITRURATION

La nitruration

Principe :

Traitement thermochimique de diffusion d'azote, réalisé entre 450 et 600°C et qui permet d'obtenir une couche superficielle de forte dureté.

L'azote se combine avec certains atomes de l'acier pour former des **nitrides** (corps très durs).

La nitruration n'est suivie d'aucun traitement ultérieur

Matériaux traitables :

Aciers – Aciers inoxydables – Fonte – Alliages de titane

La nitruration

Constitution de la couche nitrurée :

1. Une couche de combinaison (couche blanche ou couche amorphe): azote combiné sous forme de nitrure de fer.

Épaisseur de 5 à 25 μm

Dureté: 500 à 1100 HV

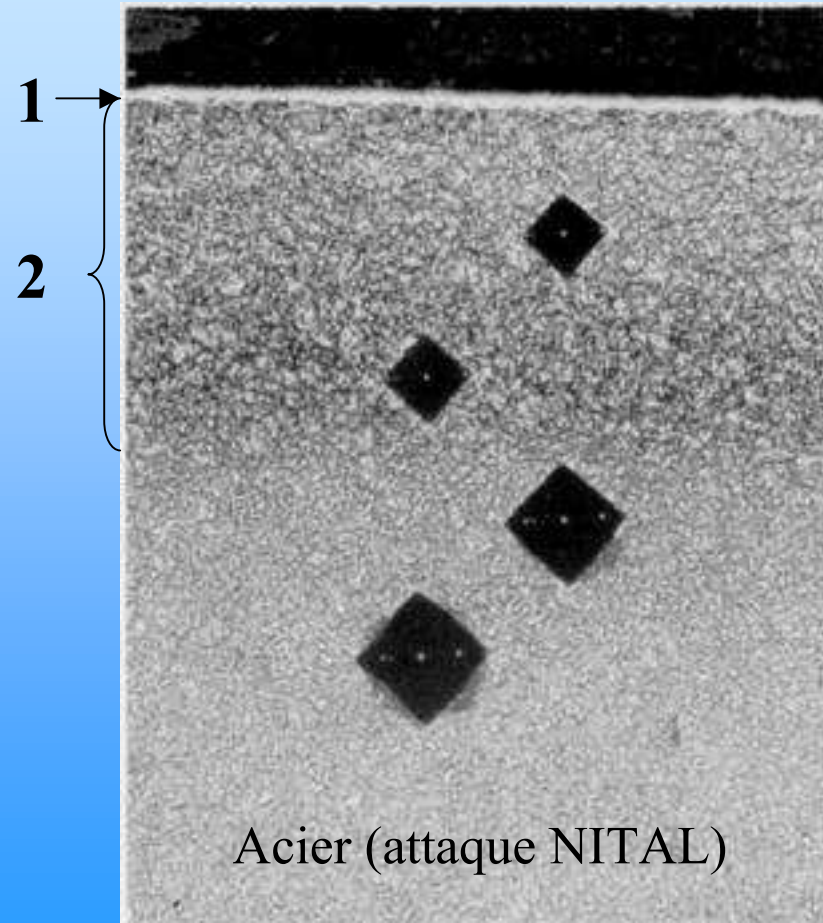
2. Une couche de diffusion:

Épaisseur de 0.1 à 1 mm

Dureté: 300 HV (acier au carbone)

à 1400 HV (acier à outils)

selon la nuance de l'acier, son traitement thermique initial, les paramètres de nitruration (T° , temps = quelques heures à une centaine d'heure)




La nitruration

Domaines d'application :

- ❑ **Augmentation de la tenue à la fatigue:** *fonction de la nuance de l'acier de base, des caractéristiques mécaniques à cœur et de l'épaisseur nitrurée*
- ❑ **Amélioration du coefficient de frottement:** *la nitruration améliore la résistance au grippage: fonction des paramètres de nitruration et de la nature de la couche de conversion*
- ❑ **Amélioration de la tenue à l'usure par abrasion:** *dureté importante*
- ❑ **Amélioration de la tenue à la corrosion (atmosphérique):** *certaines traitements de nitruration associés à des post-traitements (oxydation ou polissage+oxydation) ont des tenues au brouillard salin supérieures à 700 heures (absence de rouille rouge)*

La nitruration

Avantages et inconvénients :

- 
- ☐ Faibles variations dimensionnelles
 - ☐ Bonnes propriétés mécaniques: *dureté, frottement, fatigue*
 - ☐ (Bonne résistance à la corrosion atmosphérique)

- 
- ☐ Faible profondeur durcie (généralement de 0.1 à 0.5mm):

Contraintes, usure, déformations admissibles faibles:

- ☐ Traitement assez long: *jusqu'à 100 heures*
- ☐ Faible résistance au choc