

INSA

INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
LYON

Polissage de surface

ROFA

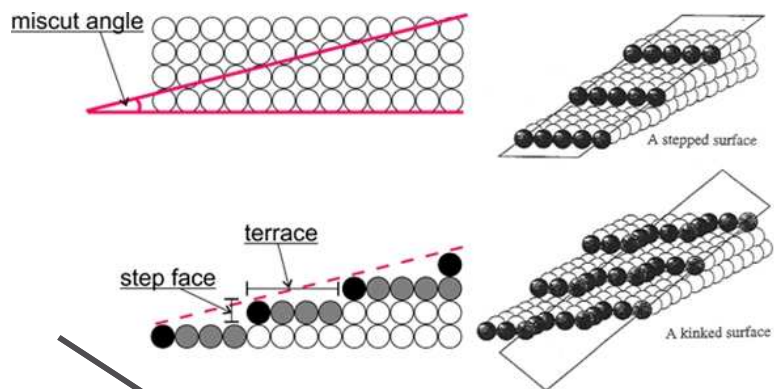
Equipe Procédés de Fabrication

T. Chaise, T. Elguedj, F. Girardin, L. Martini, N. Noel,
N. Tardif

généralités

C'est quoi une surface?

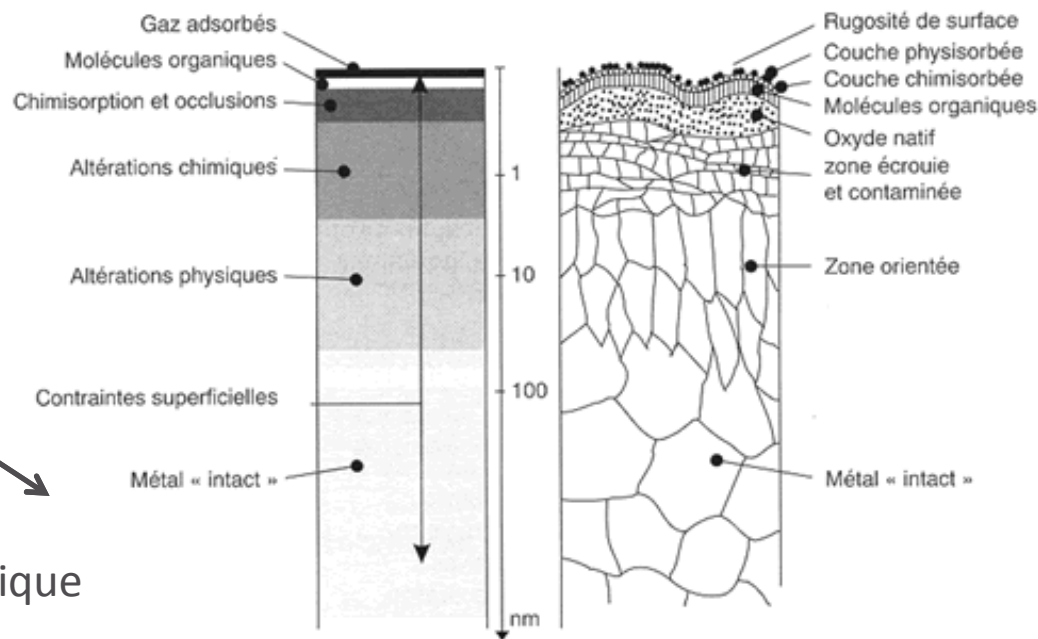
Energie superficielle dépendant de la désorientation par rapport au plan de haute densité du cristal



échelle atomique

échelle micrométrique

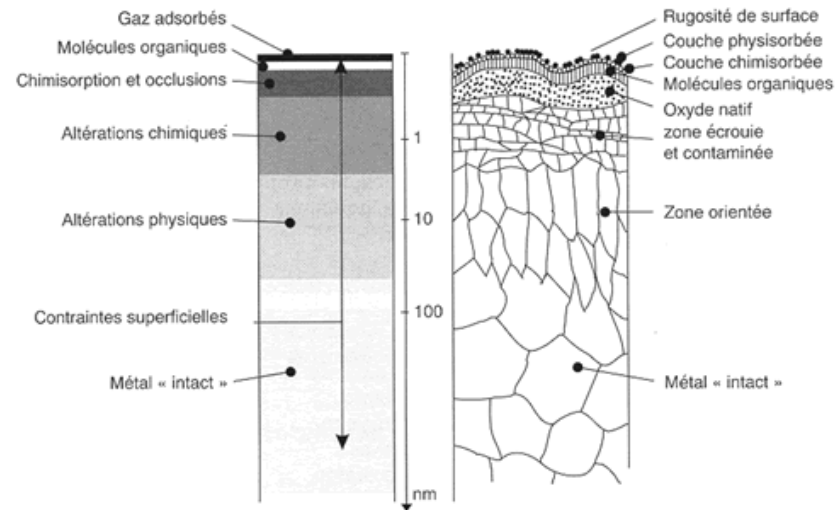
Surface industrielle



C'est quoi une surface?

Propriétés physiques :
Conductivité thermique
Pouvoir réflecteur

Propriétés chimiques :
- réactivité



Propriétés mécaniques :
-dureté
-ténacité
-coefficient de frottement
-contraintes résiduelles

Propriétés géométriques :
-rugosité

Propriétés métallurgiques :
structure cristallographique
taille de grain
texture
inclusion, porosité

Pourquoi fonctionnaliser une surface?

Aspect, Pouvoir réflecteur



Biocompatibilité



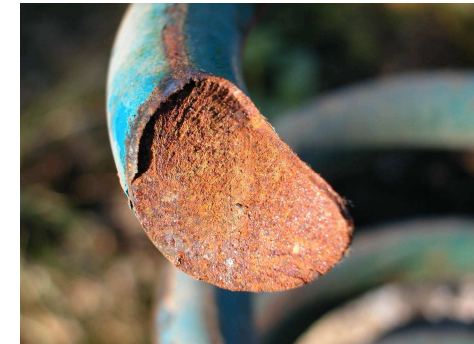
résistance de contact



frottement, usure



résistance à la fatigue



corrosion, oxydation



étanchéité



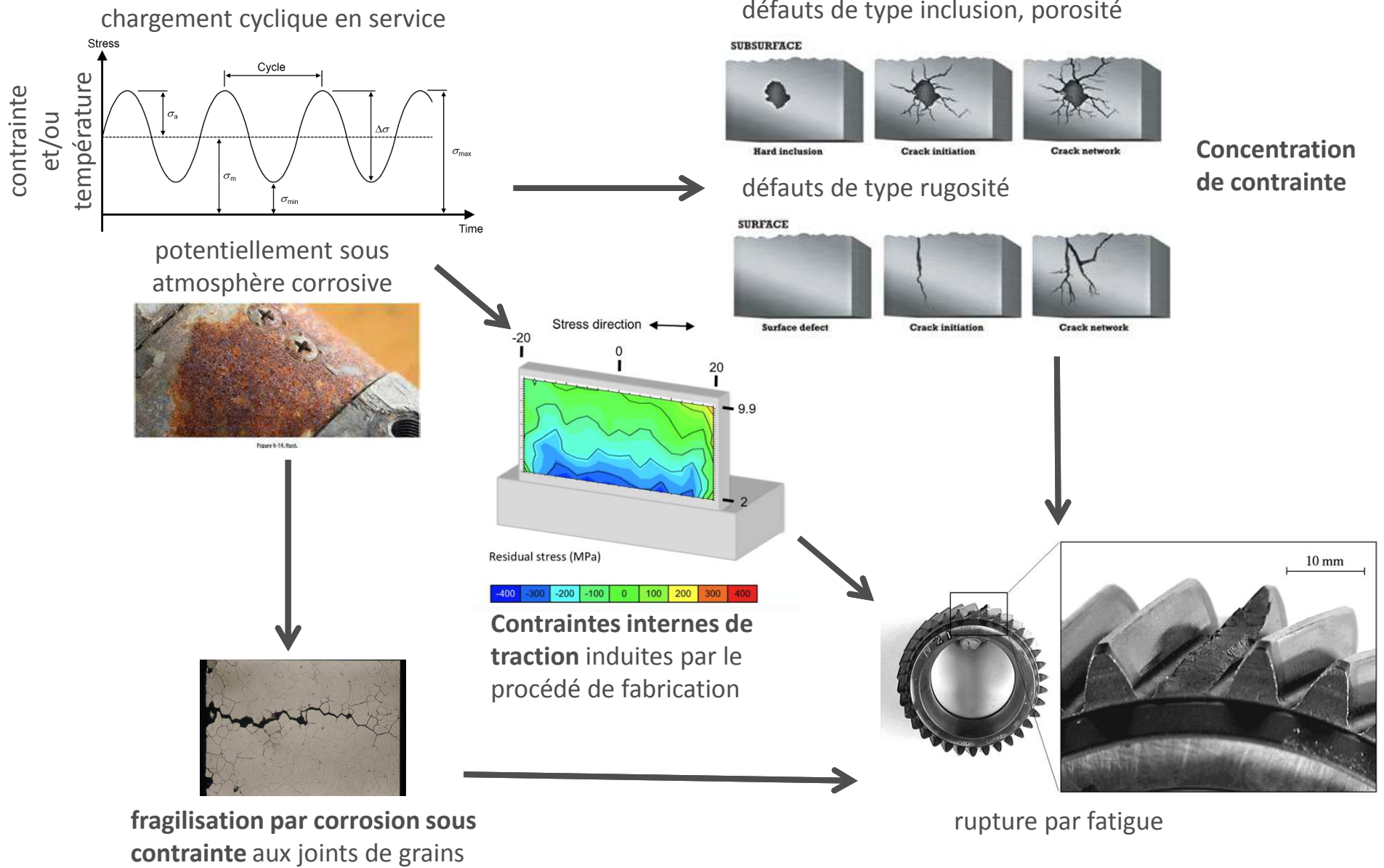
biomimétisme

La peau des requins leur permet d'améliorer leur hydrodynamisme	Le lotus développe une hydrophobie de surface	Certains papillons montrent des couleurs issues de la texture de leurs ailes			
Côté nature	Côté ingénieur	Côté nature	Côté ingénieur	Côté nature	Côté ingénieur

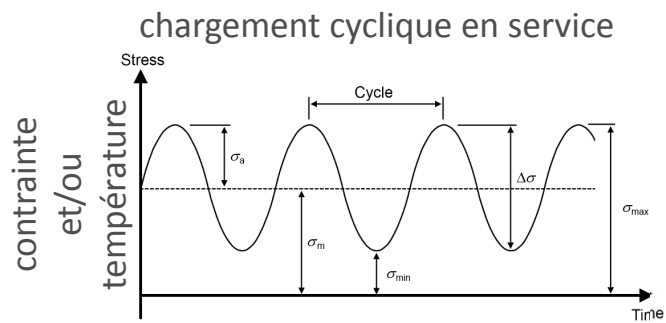
collage, adhésion

réactivité, catalyse...

Enjeux du traitement de surface : exemple de la rupture par fatigue



Enjeux du traitement de surface : exemple de la rupture par fatigue

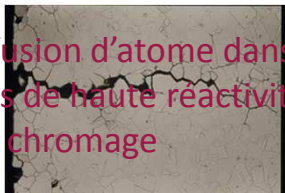


potentiellement sous atmosphère corrosive



Figure 6-16, Rivis

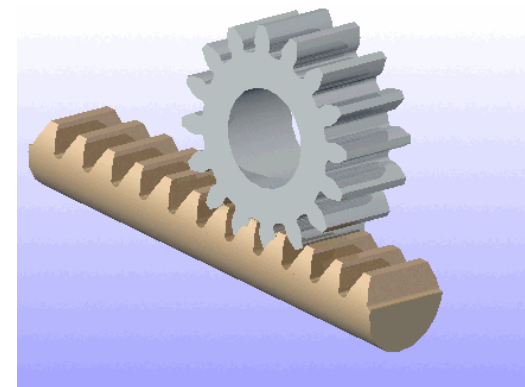
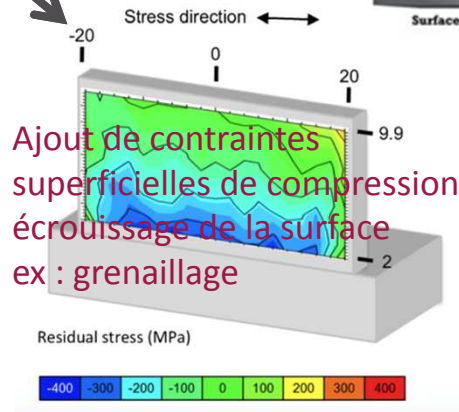
Diffusion d'atome dans les sites de haute réactivité
ex : chromage



défauts de type inclusion, porosité



défauts de type rugosité



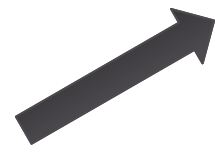
Revêtements & Traitements de Surface (RTS)



Traitement de surface :
Modification structurale superficielle des surfaces
Modification comportant un gradient dans l'épaisseur



Traitements préparatoires :
-Nettoyage, Mise à vif de la surface
-Amélioration de l'aspect



Revêtement :
Couche métallique, organique ou minérale déposée sur une surface de façon assez homogène sans modification notable du substrat



Les différentes classes de traitements préparatoires

Dégraissage :

élimination des graisses animales, végétales ou minérales
Voies chimique, électrolytique, ou mécanique.

Décapage :

élimination des produits adhérents au métal (ex oxydes) ou de corps étrangers (ex sables pour les pièces issues de fonderie)
Voies chimique, électrochimique, mécanique.

Polissage :

élimination des imperfections géométriques.
Voies abrasion fine, dissolution chimique ou électrochimique.

Traitements préparatoires

Dégazage :

élimination des gaz adsorbés ou dissous dans un matériau métallique ou les produits de distillation des contaminants organiques résiduels.
Voie étuvage ou traitement sous vide.

Lavage :

élimination des éléments solubles ou les particules peu adhérentes à la surface ou les produits qui restent piéger par capillarité.

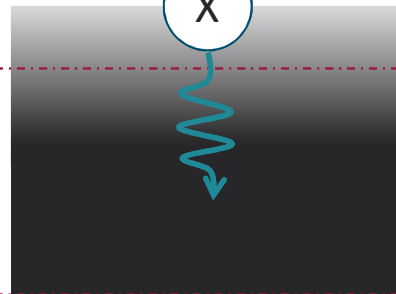
Les grandes familles de RTS classées par mécanismes d'édification des couches

Traitements par transformation structurale d'origine mécanique ou thermique



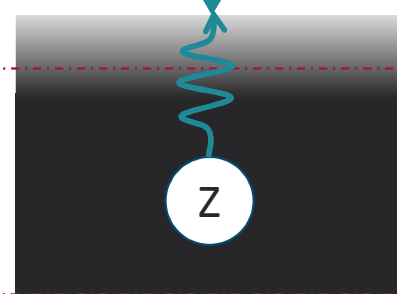
Augmentation de la résistance mécanique de la surface avec introduction de contrainte résiduelles de compression

Traitements par diffusion



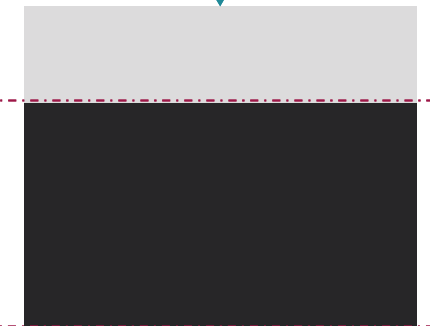
métalloïde :
tenue en fatigue ++
résistance à l'usure +
métal :
résistance à la corrosion

Traitements de conversion



résistance à la corrosion
adhérence des lubrifiants
aspect / coloration

Revêtements



résistance à la corrosion
tenue au frottement et à l'usure
aspect
conductibilité
biomatériau

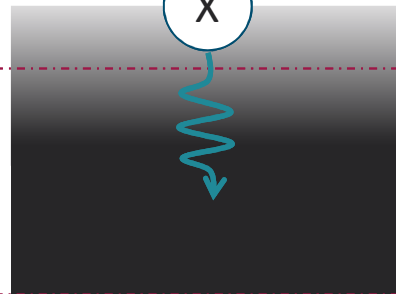
Les grandes familles de RTS classées par mécanismes d'édification des couches

Traitements par transformation structurale d'origine mécanique ou thermique



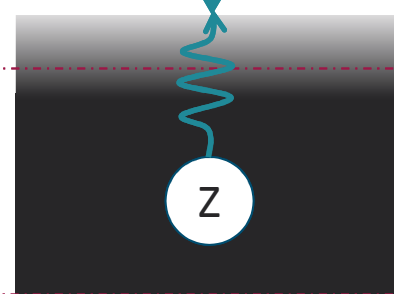
Mécanique : tribofinition, grenailage, galetage, moletage, choc laser ...
Thermique : chalumeau oxyacétylénique, induction magnétique, faisceau laser, faisceau électrons...

Traitements par diffusion



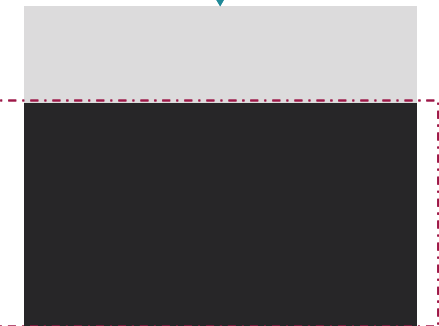
Cémentation, Carbonituration, nituration, oxydation, implantation ionique ...

Traitements de conversion



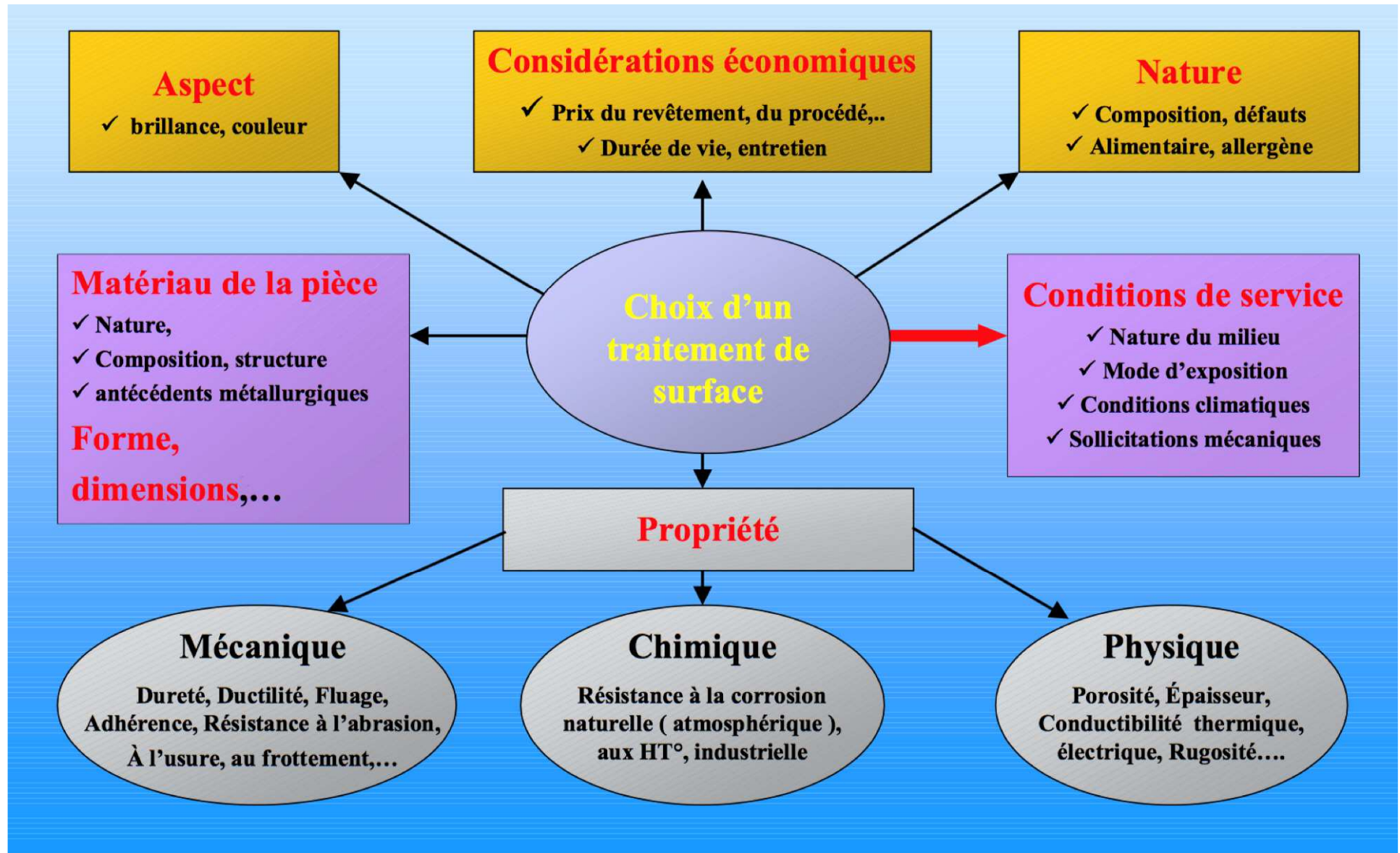
Traitements chimiques : phosphatation, chromatisation, brunissage...
Traitements électrochimiques : sulfuration ...
Oxydation anodique
Traitements par voie sèche : par plasma ...

Revêtements



en voie liquide : dépôts électrolytiques
en bains fondus : immersion dans un métal fondu
en phase gazeuse : CVD, PVD...
Projection à chaud : Coldspray, rechargement

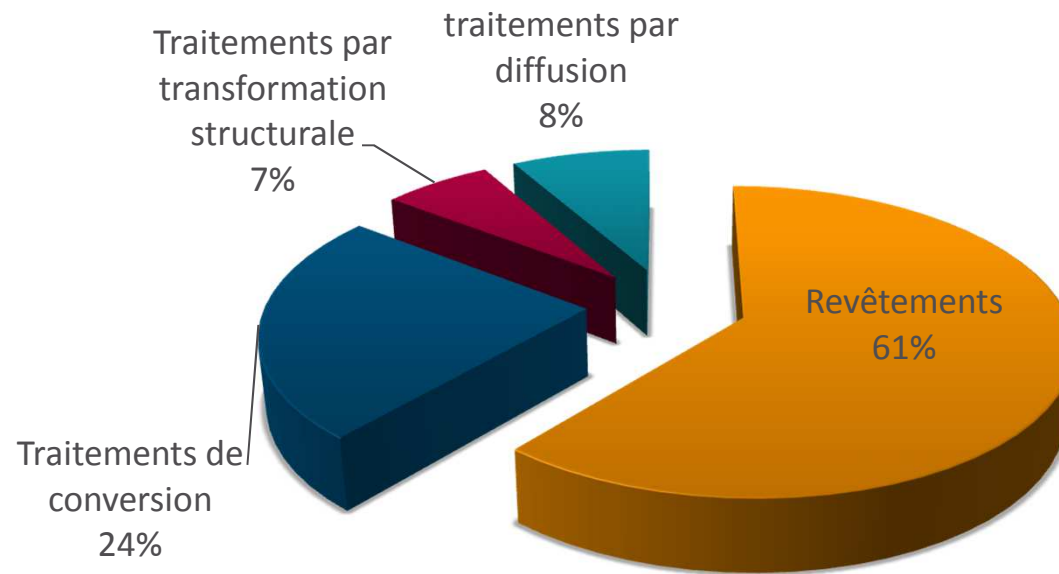
Critères de choix d'un RTS



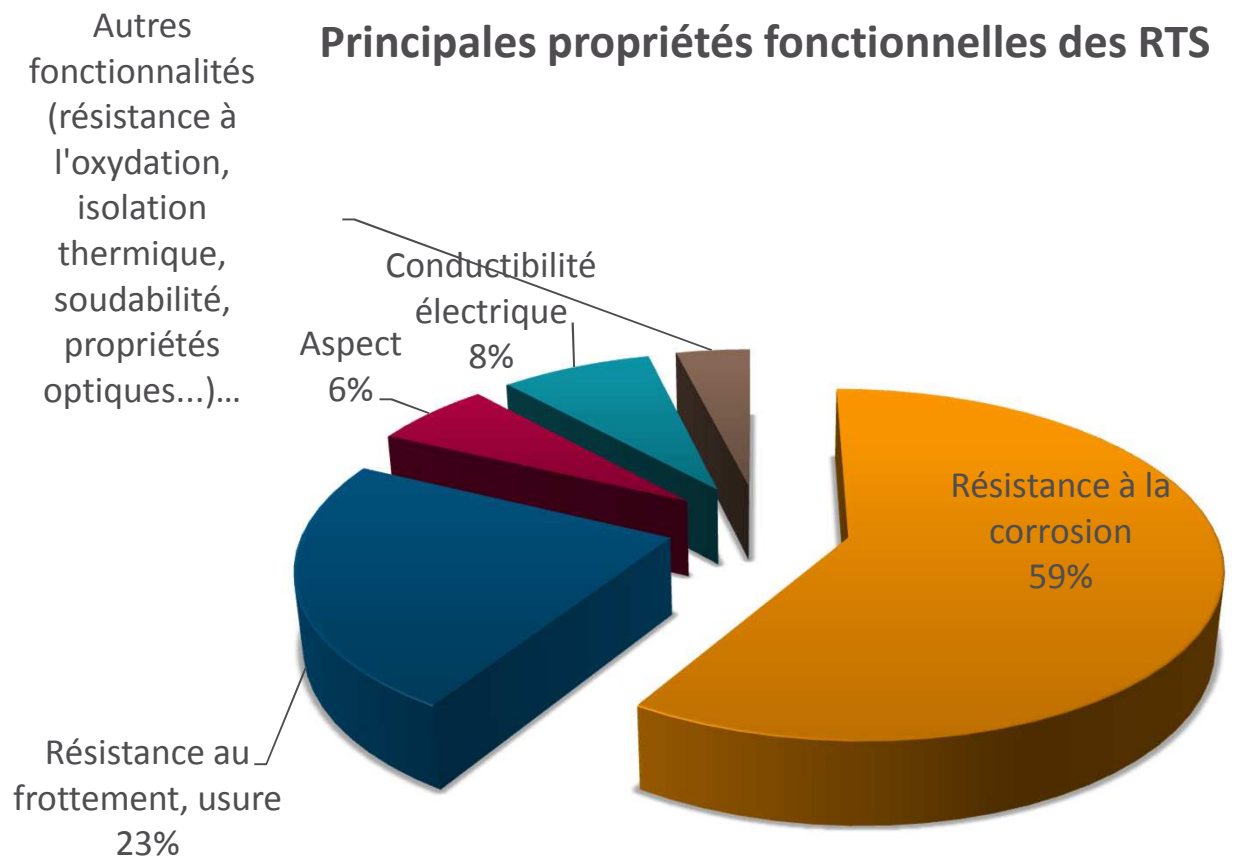
Données économiques

- Secteur d'activité de 440000 personnes en Europe (2004)
- 18300 entreprises en Europe (2004)
- 30000 personnes en France pour un chiffre d'affaire de 4G€ (2004)

Répartition des différentes filières de traitements de surface en France (2000)



Données économiques



INSA

INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
LYON

Préparatoires : Focus sur le polissage

Etats de surface obtensibles par les procédés conventionnels

Aspect Qualité	Terne		Mat			Brillant			Glacé		
	Grossière		Moyenne			Fine			Très fine		
R en μm	125	63	32	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,25	0,1	0,05
Ra en μm	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0
Moulage sable	■		■			■			■		
Moulage cire perdue	■		■			■			■		
Moulage moule métallique	■		■			■			■		
Moulage sous pression	■		■			■			■		
Matriçage à chaud	■		■			■			■		
Laminage à chaud	■		■			■			■		
Laminage extrusion à froid	■		■			■			■		
Sciage	■		■			■			■		
Oxycoupage	■		■			■			■		
Frittage	■		■			■			■		
Rabotage	■		■			■			■		
Fraisage acier rapide	■		■			■			■		
Fraisage carbure	■		■			■			■		
Tournage ébauche	■		■			■			■		
Tournage finition	■		■			■			■		
Tournage outil diamant	■		■			■			■		
Perçage au foret	■		■			■			■		
Alésage à l'alésoir	■		■			■			■		
Alésage à outil diamant	■		■			■			■		
Brochage	■		■			■			■		
Taillage	■		■			■			■		
Rectification ébauche	■		■			■			■		
Rectification de production	■		■			■			■		
Rectification de précision	■		■			■			■		
Rodage à la pierre	■		■			■			■		
Rodage au rodoir	■		■			■			■		
Polissage mécanique	■		■			■			■		
Polissage électrolytique	■		■			■			■		
Superfinition	■		■			■			■		
Usinage électrolytique	■		■			■			■		
Galetage	■		■			■			■		

Usage : ■ grossier ■ normal ■ difficile

Polissage mécanique

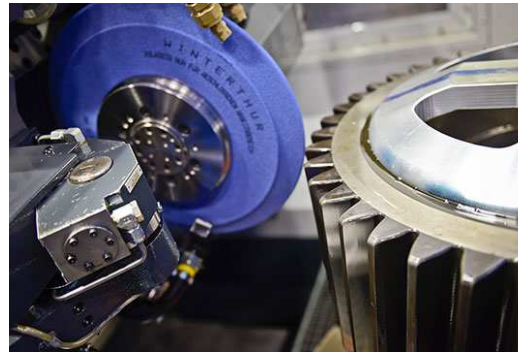
finition brillante ↓

Dégrossissage

Bandes



Meules



Finition

Tamponnage (alliages d'aluminium et cuivres)

Brossage (métaux durs)

Avivage (tampon très doux)



Rectification

- Dernière opération d'usinage \Rightarrow besoin de fiabilité, rigidité des machines
- Très faible quantité de matière enlevée
- Obtention d'excellentes qualités de surfaces

- Paramètres d'entrée

Rectification conventionnelle

Vitesse périphérique de la meule

30-45 m/s

Vitesse périphérique de la pièce

1-200 mm/s

Avance par tour

0.005 (F) - 0.1 (E) mm/tr

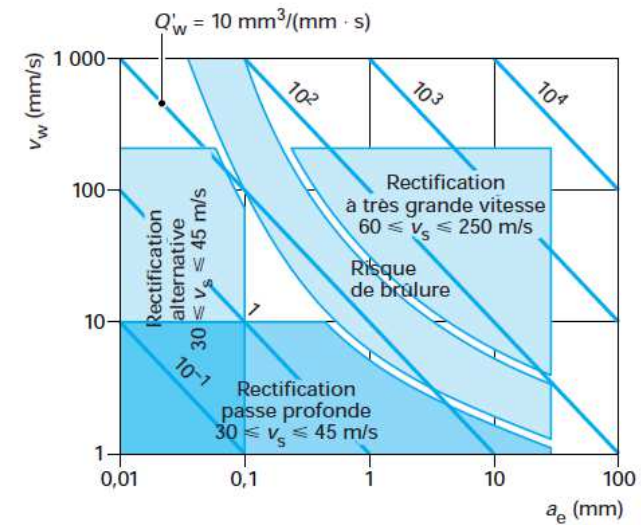


Rectification d'un vilebrequin

Rectification - Améliorations

- Rectification 5 axes : machines similaires aux machines d'usinage 5 axes, rectification de formes gauches
- Pour les états de surface encore meilleurs, on parle de *superfinition*

- Améliorations :
Rectification à très grande vitesse ; en passe profonde



v_s (m/s) : vitesse de rotation périphérique de la meule
 a_e (mm) : profondeur de passe
 v_w (mm/s) : vitesse de rotation de la pièce usinée
 Q'_w (mm³/(mm · s)) : volume de matière enlevée par unité de temps (ou débit de matière) et par unité de largeur de meule

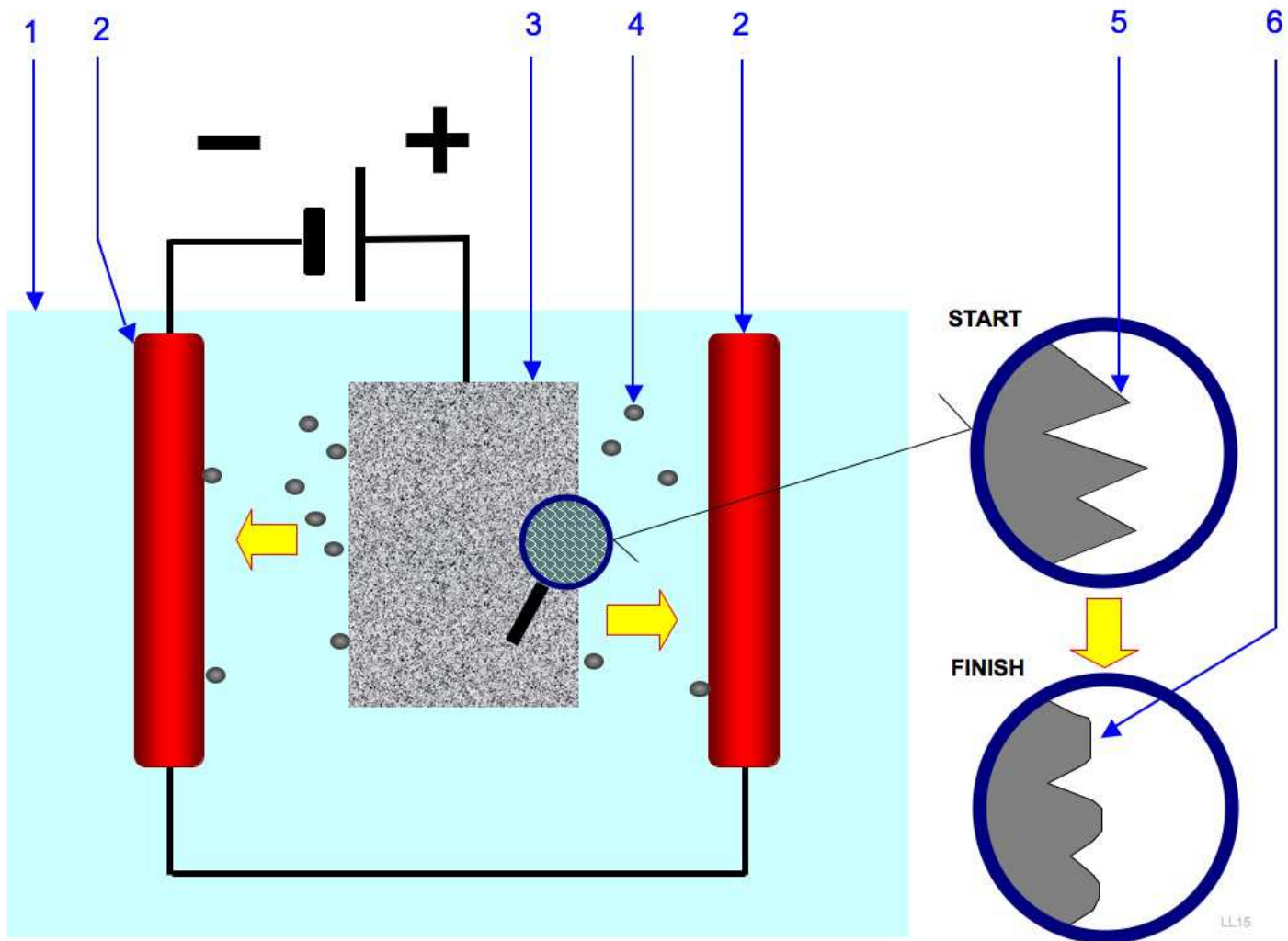
Zones d'applications des différents types de rectification

Polissage mécanique : Avantages et inconvénients des procédés

- ⊖ • **Accessibilité des surfaces complexes telles que surfaces gauches, canaux internes complexes (outil de forme)**
- ⊕ • **Vitesse tangentielle de l'ordre de 30-40m/s selon le matériau confère une couche de Belby (couche très écrouie, sous forte contrainte)**
 - **Accroît la résistance à la corrosion atmosphérique**
 - **Accroît la tenue de revêtements ultérieurs de faible épaisseur pour la décoration**

Polissage électrolytique

Electropolishing

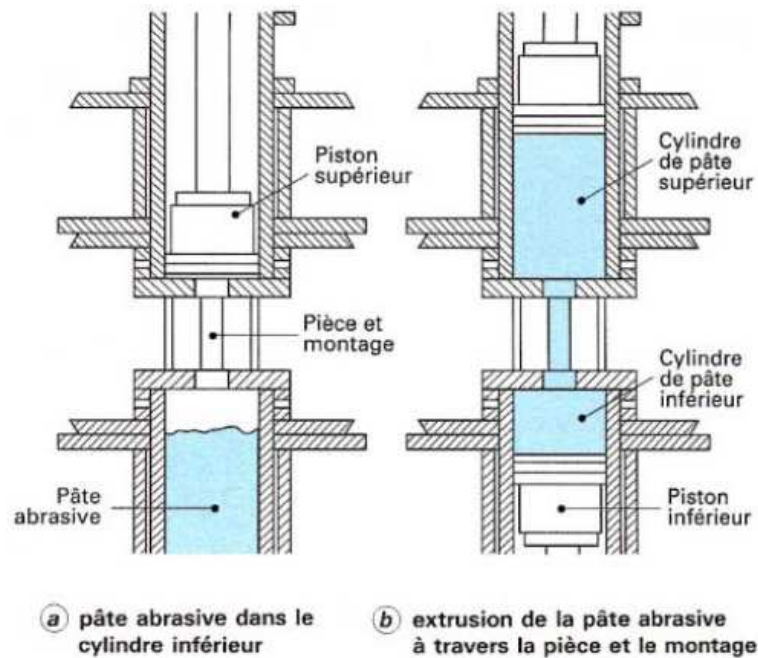


Polissage électrolytique

- ⊖ • **Utilisable seulement sur matériau ayant un domaine de passivité relativement important (aciers inoxydables, Alliage cuivreux, Alliages d'aluminium, Alliages de titane)**
- **réduction des « pics » mais pas des « creux » : pas de gros gain en fatigue.**
- ⊕ • **Qualité de brillance**
- **Accroît adhérence des traitements ultérieurs**

Extrusion de pâte abrasive – Abrasive Flow Machining

- Finition des surfaces et arêtes par extrusion d'une pâte abrasive visqueuse
Abrasion dans les zones de restriction de l'écoulement
- Façonnement de plusieurs cavités et pièces simultanément ⇒ forte productivité



Revêtement

Différentes filières de revêtements

Filière de revêtement	Conditionnement	Structure interface	Procédés
Faible effet thermique	Milieu aqueux	Pas de déplacement à l'interface	Galvanoplastie, chimie, réduction chimique
Faible effet thermique	Milieu gazeux	Pas de déplacement à l'interface	Dépôt PVD, PACVD
Faible effet thermique	Apport de métal sous forme pulvérénte	Pas de déplacement à l'interface	Projection thermique
Fort effet thermique	Milieu gazeux	Déplacement par diffusion	Dépôt CVD
Fort effet thermique	Voie liquide, enduction	Déplacement par diffusion	Dépôt en bain de sel, métal fondu, bouillies, émaillage
Fort effet thermique	Apport de métal sous forme de poudre ou de fil	Déplacement par dilution	Rechargement TIG, MIG, plasma, laser

Dépôt Electro-Lytique

- 1 Principes et applications
- 2 Electrochimie
- 3 Limitations et contraintes

DÉPÔTS ÉLECTROLYTIQUES

Idée

Utiliser un **apport** de métal obtenu par **électrolyse**.

Phénomène de base

- Réduction d'ions métalliques : $M^{n+} + ne^{-} \longrightarrow M$
- Les ions M^{n+} sont fournis par un électrolyte.
- M déposé sur la cathode d'une cellule d'électrolyse.
- L'énergie est fournie par un générateur externe.

APPLICATIONS

Deux méthodes donc deux procédés.

- 1 La pièce finie est constituée de la pièce initiale + le dépôt. Le revêtement déposé est fin : $0,1\ \mu\text{m}$ à $0,5\text{mm}$.

Il s'agit donc d'un procédé de **traitement de surface** (donc pas tout à fait d'un UNC). C'est un type de traitement de surface parmi beaucoup d'autres, souvent réalisé en sous-traitance.

- fonctions : protection, renforcement, frottement, rechargement, décoration, ...
- propriétés : forte adhérence dépôt/pièce initiale, comportement mécanique, métallurgie, continuité (pores, fissures, ...), rugosité, aspect, ...

EXEMPLES



Chromage dur sur tige de vérin hydraulique, diamètre 80mm, dureté Hv 800 à 1200.

Revêtement protecteur :

- corrosion,
- dureté,
- usure.



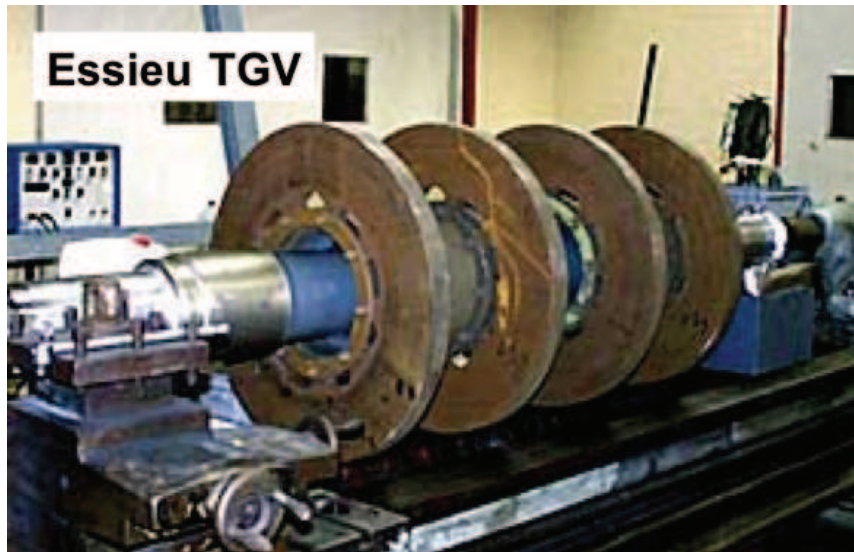
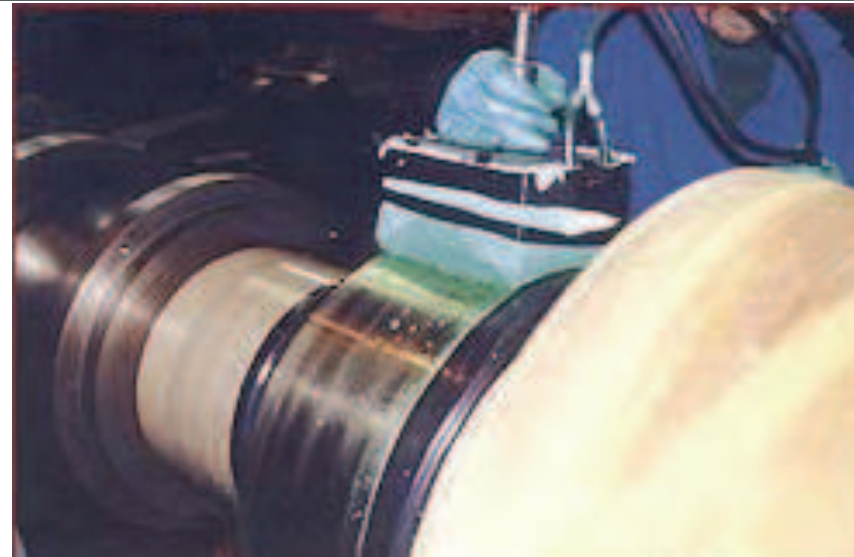
EXEMPLES II



Chromage sur cylindres de laminoir.

EXEMPLES III

Electrolyse au tampon :
dépôts localisés,
rechargement, réparation,
...



EXEMPLES IV



Electrolyse au tampon sur arbre de turbine.

APPLICATIONS

Deux méthodes donc deux procédés.

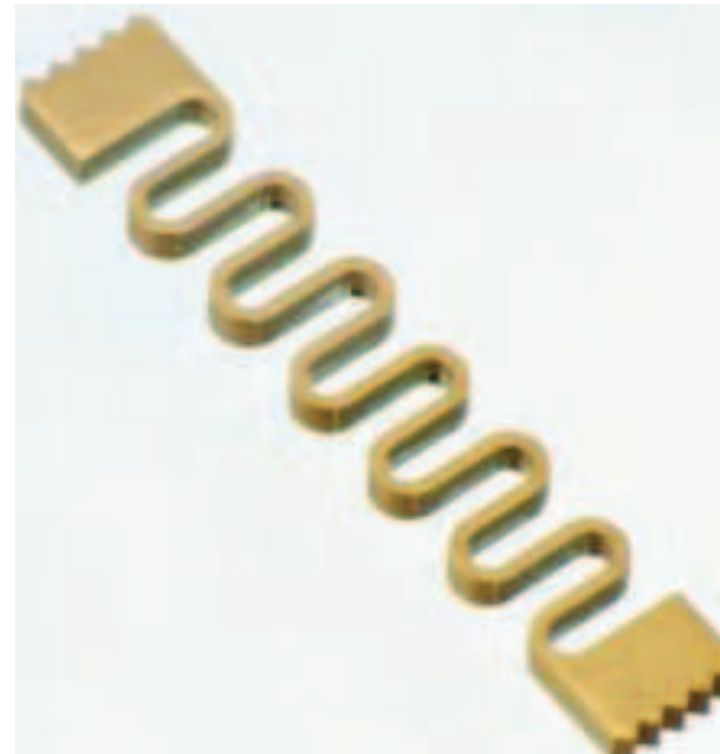
- 1 La pièce finie est constituée de la pièce initiale + le dépôt. Le revêtement déposé est fin : $0,1\ \mu\text{m}$ à $0,5\text{mm}$.
- 2 La pièce finie est constituée uniquement du dépôt

Ce procédé qui est un UNC est appelé **électroformage**.

- la pièce initiale est l'outil "mandrin",
- complémentarité géométrique outil/pièce,
- l'épaisseur déposée est de $0,1$ à 10mm ,
- il y a séparation pièce/outil après dépôt.

EXEMPLES

Pièce test en nickel :
hauteur 100mm,
épaisseur $0,5\text{mm} \pm 30\%$,
rugosité $Ra=0,02\mu\text{m}$.



Ressort nickel-cobalt plaqué or
 $6,1 \times 1 \times 0,25\text{mm}$
section $100 \times 250\mu\text{m}$
tolérances $\pm 3\mu\text{m}$

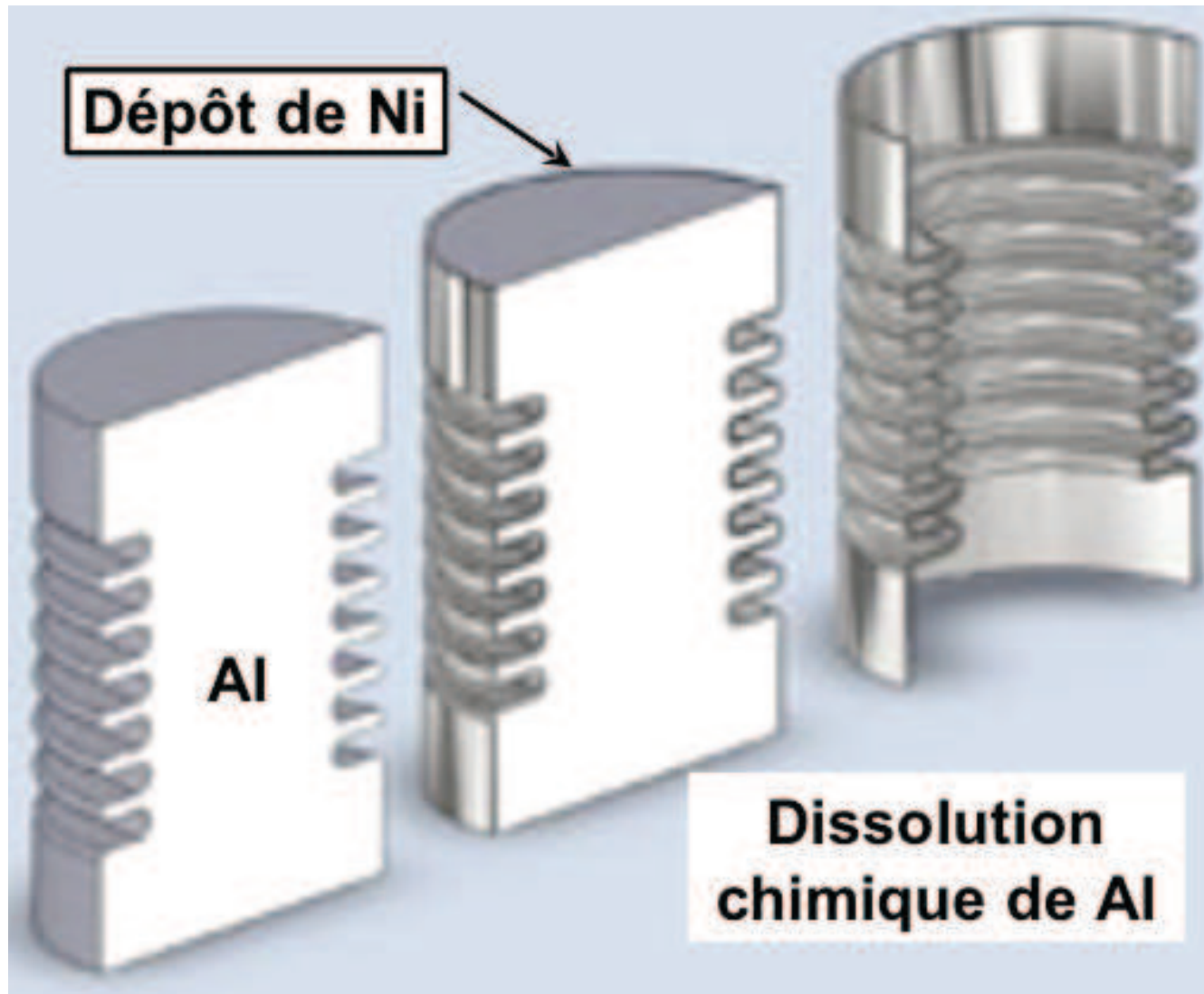
EXEMPLES II

Soufflets electroformés

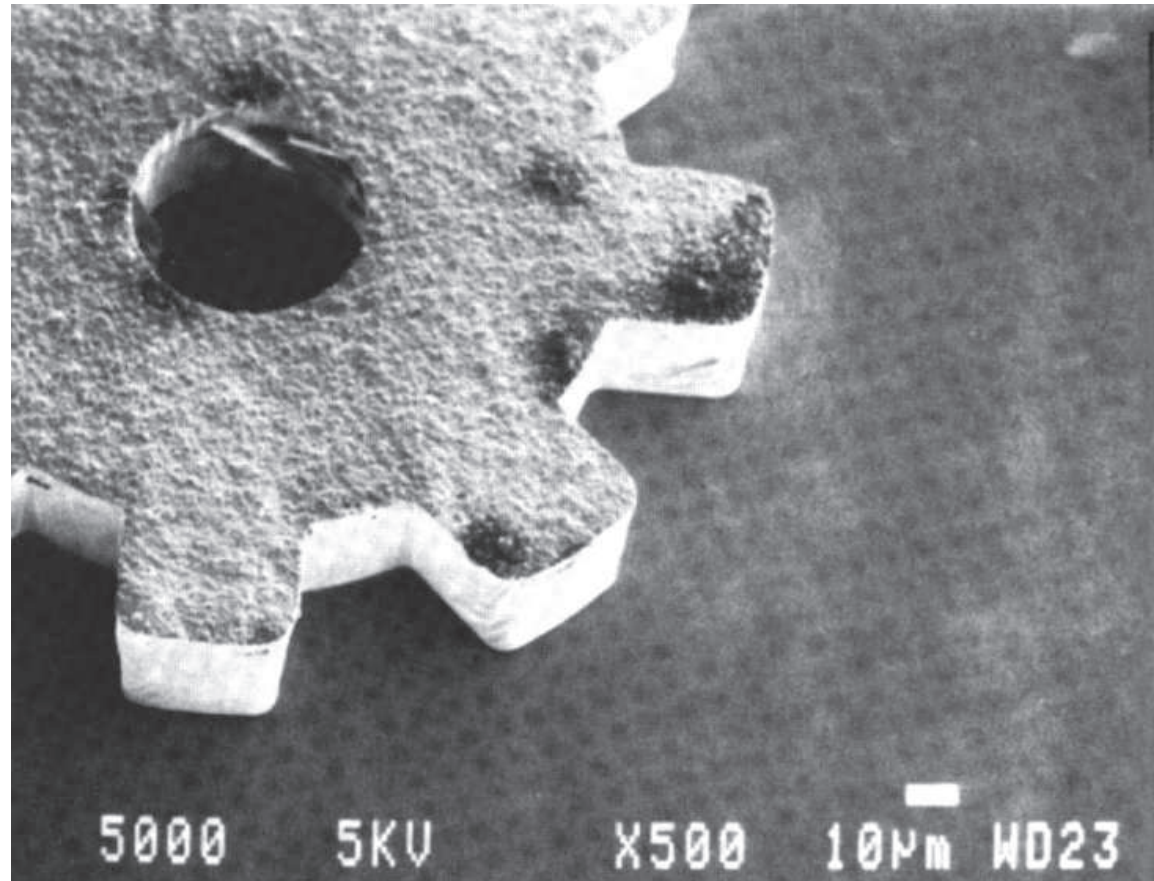


EXEMPLES II

Soufflets electroformés



EXEMPLES III



Engrenage en nickel, diamètre $320\mu m$, épaisseur $30\mu m$, dépôt localisé par un masque de résine, durée 40min.

PRINCIPE

Réduction

pièce = cathode



l'électrolyte est le stock d'ions métalliques donc l'outillage !

il y a consommation des ions $M^{n+} \Rightarrow$ régénération des ions à l'aide d'anodes consommables.

oxydation

anode = outillage



sauf pour les métaux nobles Au, Ag, Pt, P, Cr

\Rightarrow oxydation de l'eau donc pas de régénération.

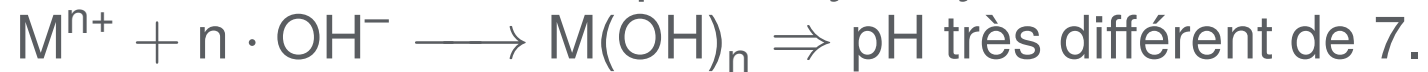
FORMULATION

- **Électrolyte : solutions aqueuse de sels métalliques :**

- sels simples : chlorates, sulfates, ...
- sels complexes : cyanures, ...
- sels organiques ...

⇒ formulations inombrables

- **Stabilité des ions M^{n+} : pas d'hydrolyse**



- milieu acide : $0 < pH < 5$
- réduction parasite possible $H_3O^{+} + e^{-} \longrightarrow \frac{1}{2}H_2$
- milieu basique $pH > 9$ pour stabiliser les cyanures.

- **Problème environnemental : détoxification, rejets, ...**

⇒ tendance à utiliser des bains acides.

LOI QUANTITATIVE : FARADAY

$$m = \frac{A}{nF} \int_0^T i(t) \eta dt \qquad \frac{de}{dt} = \frac{A}{nF \rho} J \eta$$

n : valence

A : masse atomique

T : durée de l'usinage

t : temps

e : épaisseur déposée

J : densité de courant

ρ : masse volumique

F = 1 Faraday = 96500 Coulombs

m : masse de matière enlevée

i : intensité du courant

η : rendement de la dissolution

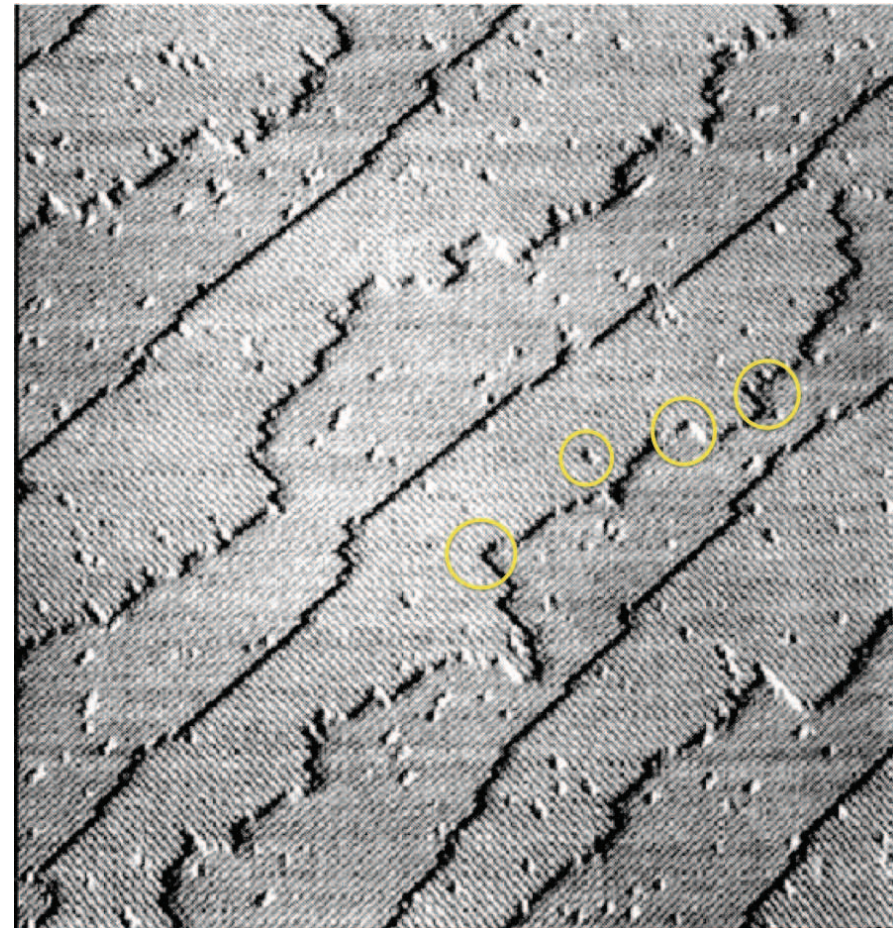
prend en compte les éventuelles oxydations parasites à l'anode.

LIMITATIONS

- Réductions parasites $\eta < 1$
- La croissance cristalline génère des contraintes résiduelles.
 - + la dureté superficielle du matériau est élevée
 - fragilisation en surface, déformation des pièces.

Croissance cristalline :
intégration d'atomes au
réseau cristallin en des
sites favorables.

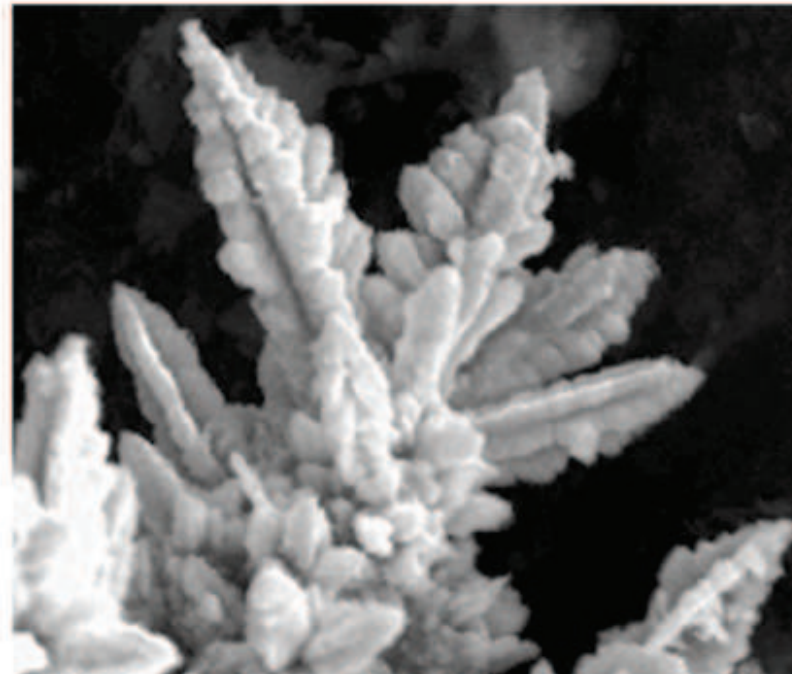
Surface cristalline : plan
cristallin interrompue.



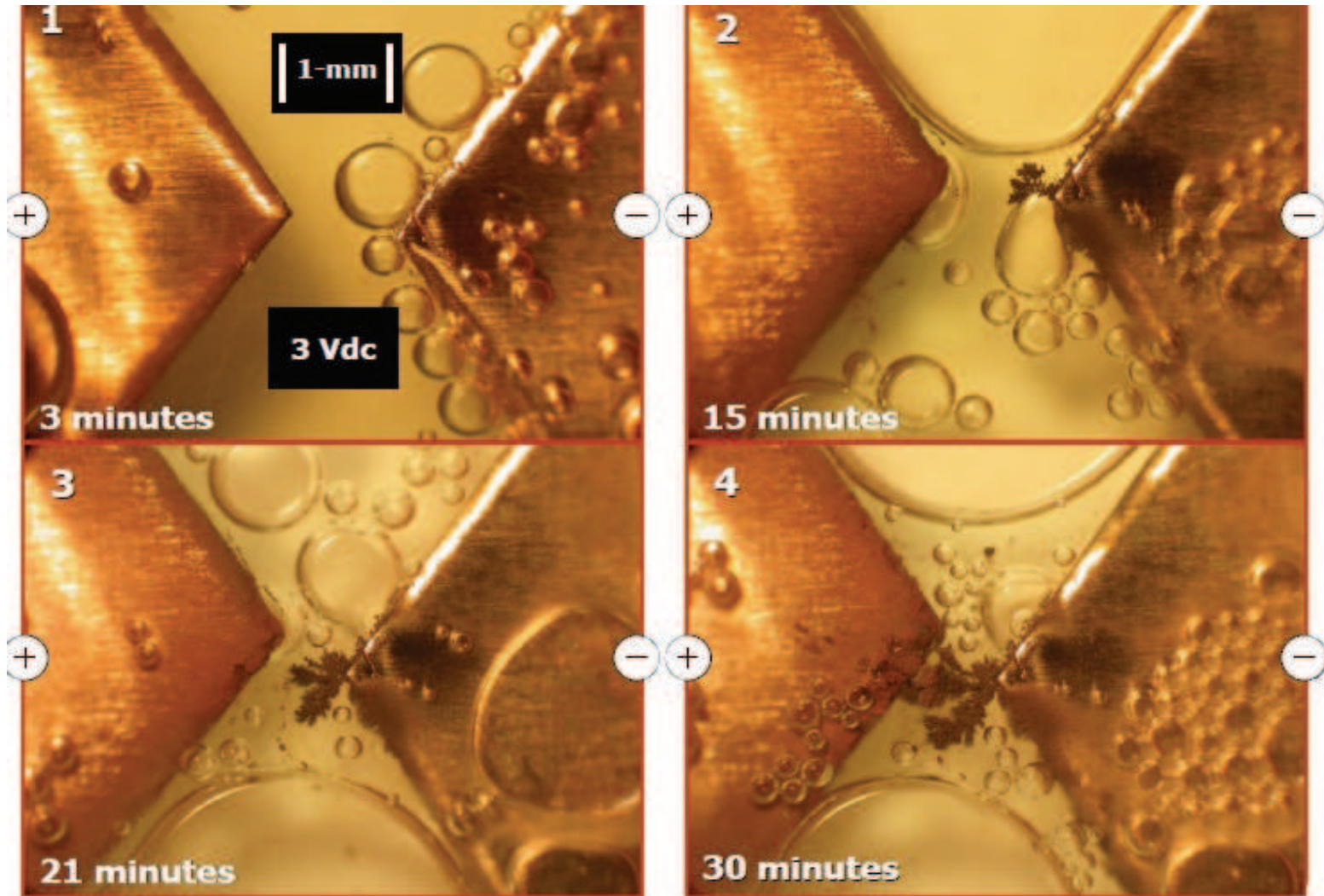
LIMITATIONS

- Réductions parasites $\eta < 1$
- La croissance cristalline génère des contraintes résiduelles.
 - + la dureté superficielle du matériau est élevée
 - fragilisation en surface, déformation des pièces.
- la vitesse de croissance cristalline est limitée par la physique, si on essaie d'accélérer le processus il y a formation de nodules, dendrites ...

CROISSANCE CRISTALLINE : NODULES ET DENDRITES

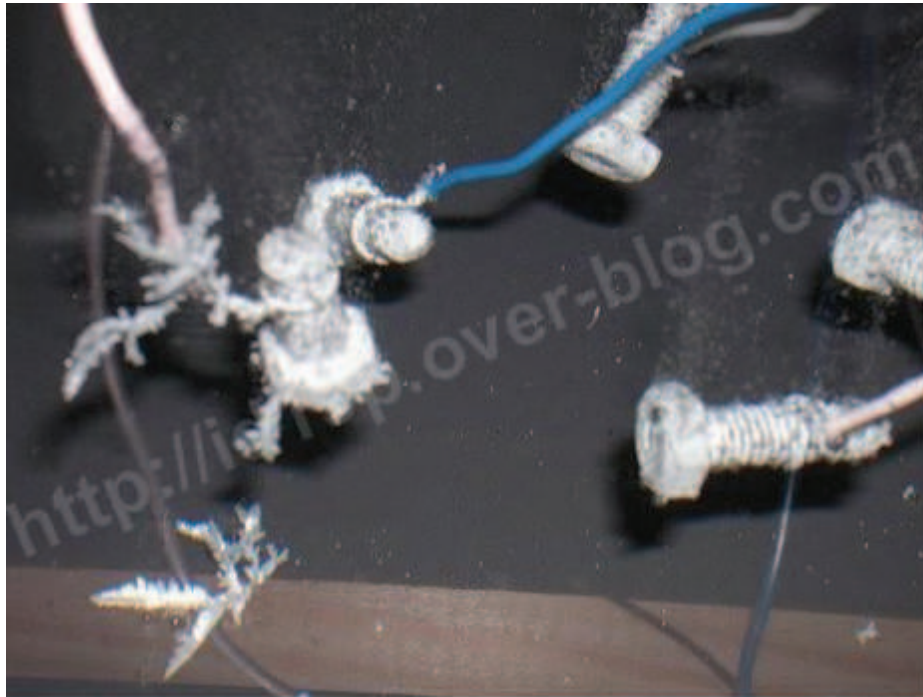


CROISSANCE CRISTALLINE : NODULES ET DENDRITES



CROISSANCE CRISTALLINE : NODULES ET DENDRITES

Electro-zingage au fond du garage...



16V, 2A, concentrations non maîtrisées, 2h de temps ...
Ne faites pas ça chez vous ! (vous avez des TPs pour ça !)

[http ://id19p.over-blog.com/article-1740932.html](http://id19p.over-blog.com/article-1740932.html)

QUELS MATÉRIAUX ?

- tous les matériaux purs (ceux du mécanicien et les autres).

Rendement :

Cu $\eta \simeq 1$

Ni, Zn, Sn,... $0.8 < \eta < 1$

Cr $0 < \eta < 0.2$

Al et Mg $\eta = 0$

- des alliages

laitons (Cu-Zn)

Ni-Co

W-Co

métaux “nobles”

=> électrolytes compliqués !

- des composites à matrice métallique

GÉOMÉTRIE DU DÉPÔT

L'épaisseur est contrôlée par J et T . (cf UEL) L'objectif est d'obtenir une épaisseur uniforme, il faut donc que J soit uniforme.

- 1 complémentarité anode(s)-cathode(s) : compliqué et cher, donc rarissime !
- 2 approximations : épaisseur et J quasi-uniformes.
 - distance anode-cathode très grande devant les dimensions caractéristiques de la pièce.
 - optimisation de la formulation des bains : polarisations, rendement, etc...
 - “ruses” techniques : anodes locales, écrans isolants, etc... pour adapter le champ électrique.

SIMULATION NUMÉRIQUE

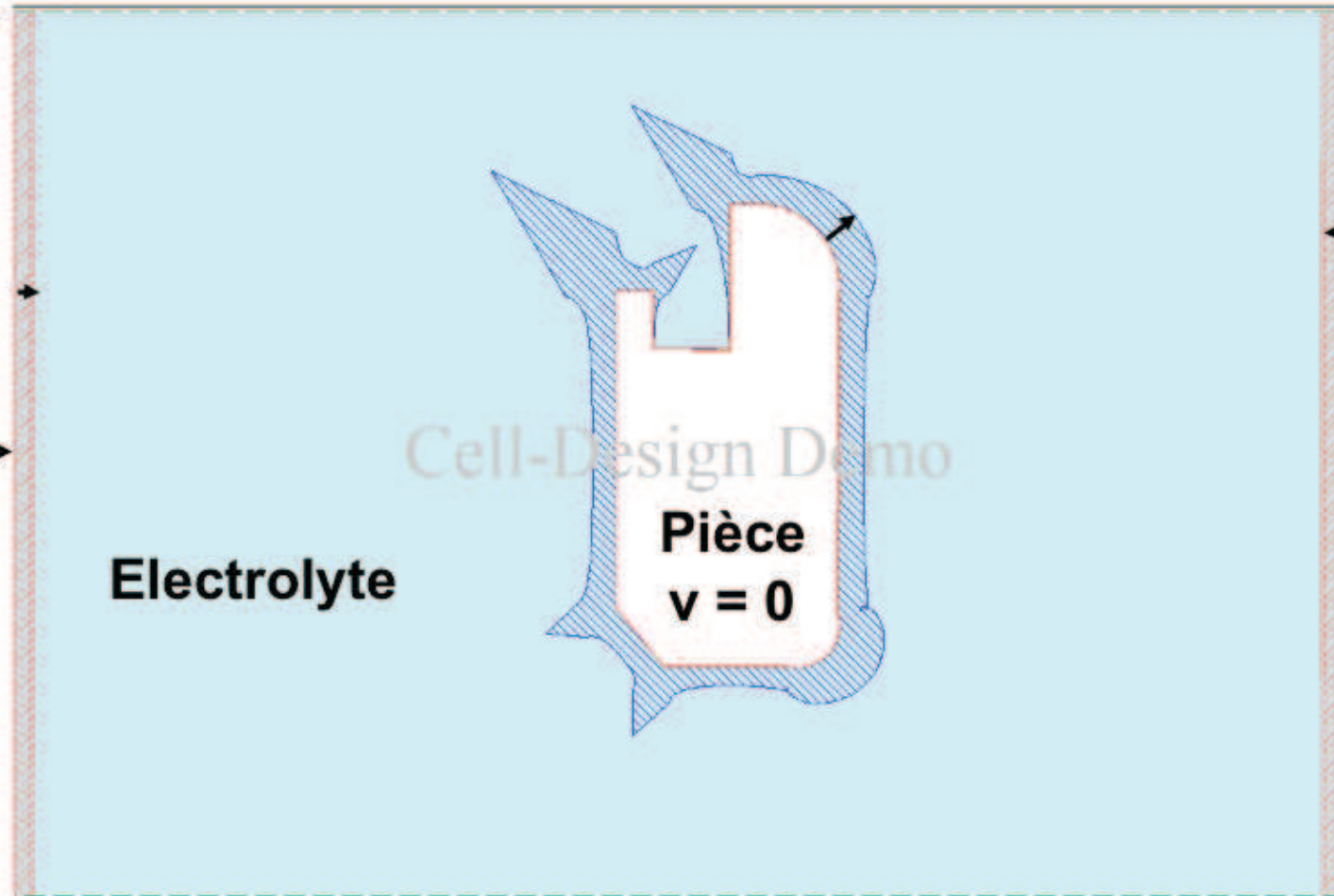
Répartition 1 aire de J (celle des électriciens)

Anode 1

Anode 2

+V

+V

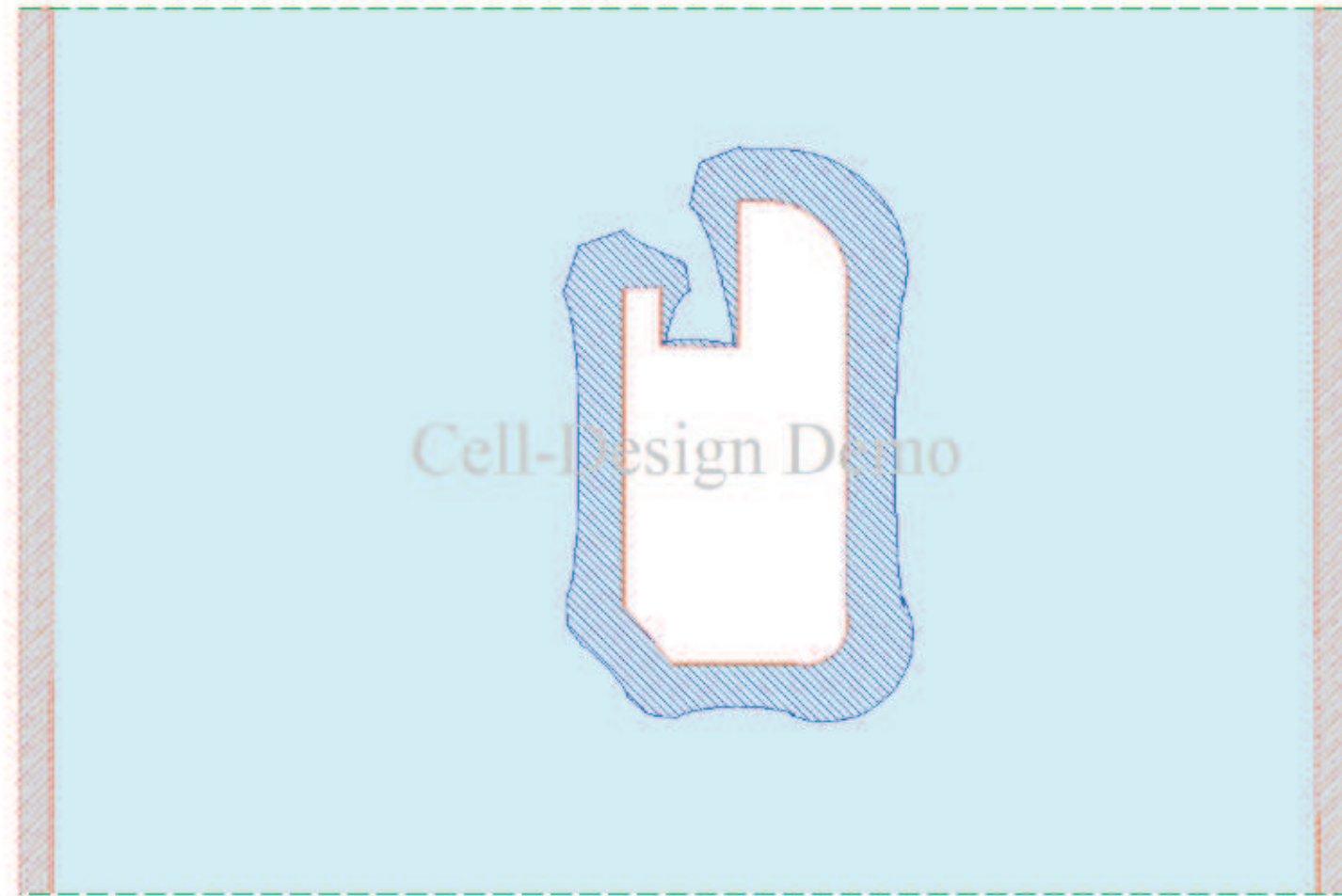


Electrolyte

**Pièce
 $v = 0$**

SIMULATION NUMÉRIQUE

Répartition 2aire de J : prise en compte de l'électrochimie.

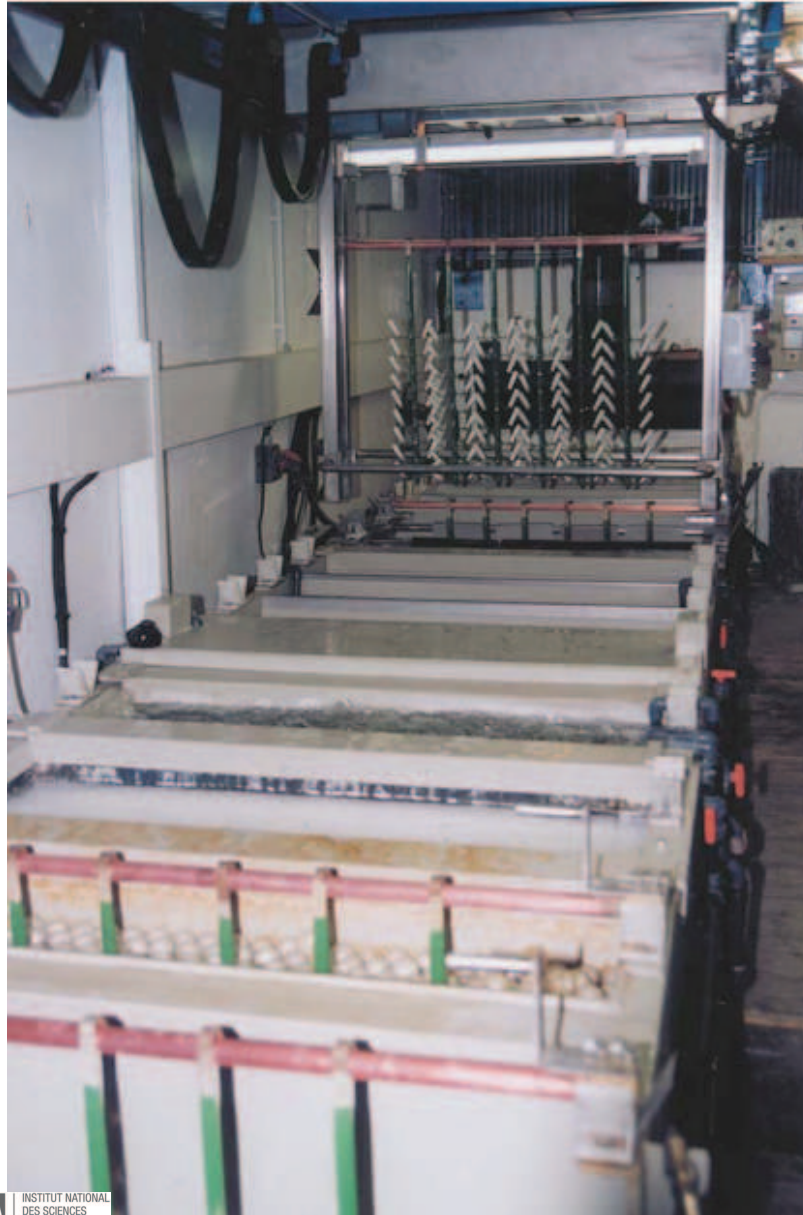


Etape suivante : anodes auxiliaires, écrans, etc...

TECHNOLOGIE



TECHNOLOGIE



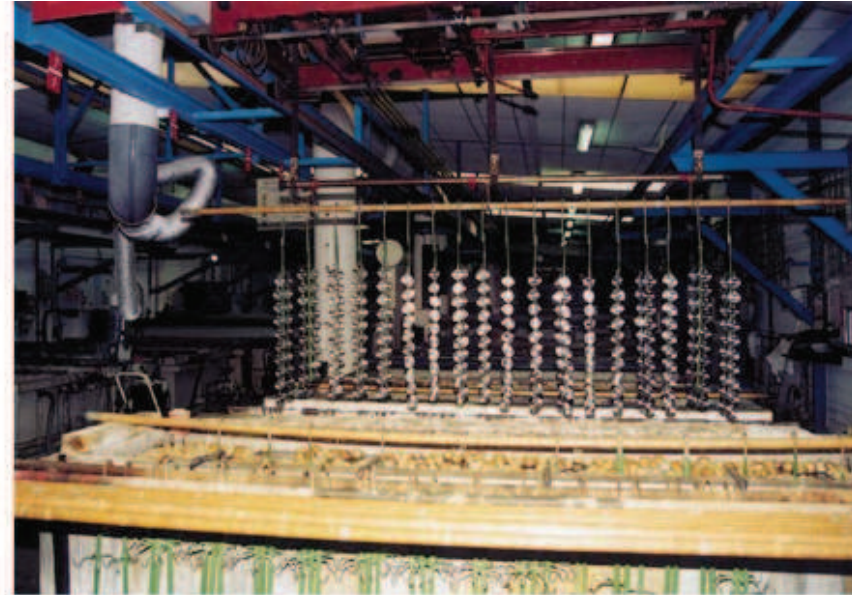
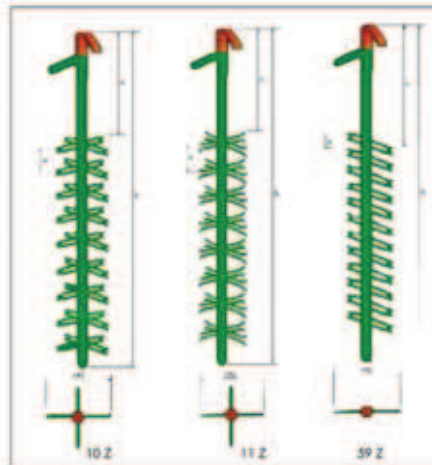
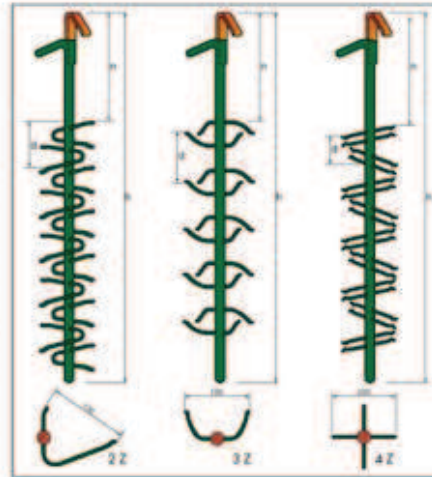
TECHNOLOGIE

MONTAGES ELECTROLYTIQUES

MONTAGES ELECTROLYTIQUES STANDARDS

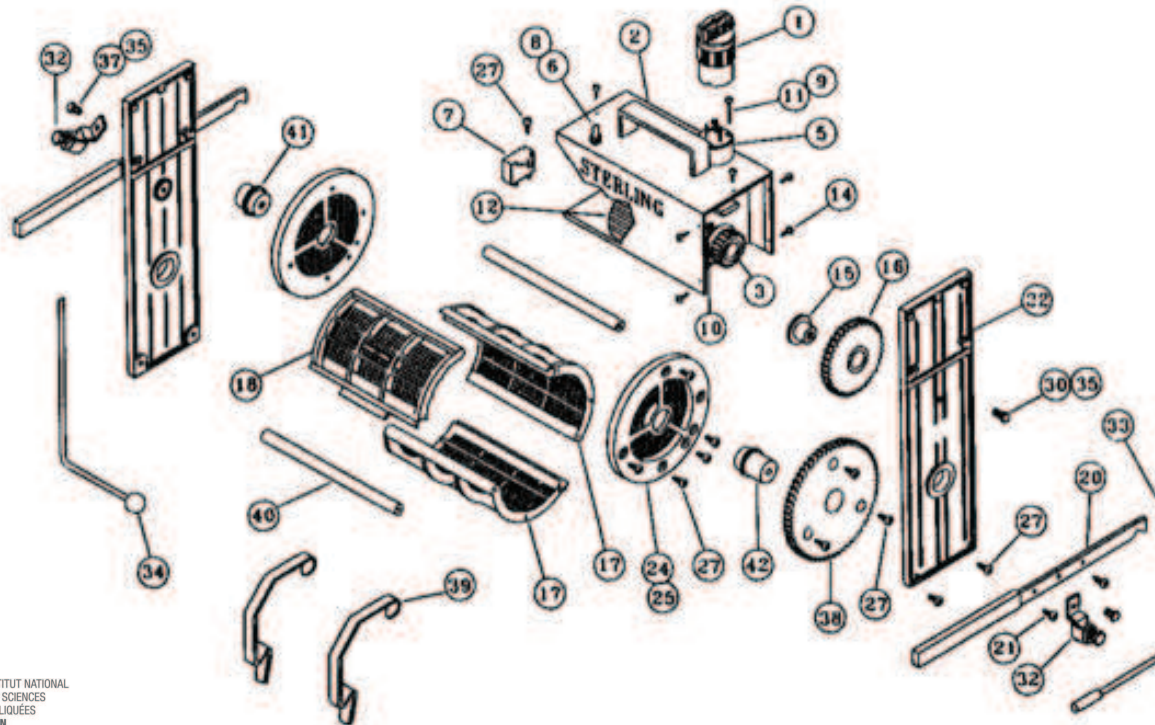
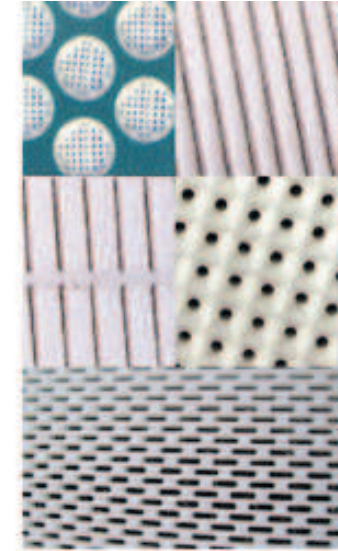
Utilisation : Attache de pièces
Caractéristiques : Cuivre + Inox revêtu PVP

REFERENCES	NBRE DE PIECES	LONGUEURS en mm
2 - Z - 10	10	800
2 - Z - 12	12	900
2 - Z - 20	20	800
2 - Z - 23	23	900
3 - Z - 10	10	800
3 - Z - 12	12	900
3 - Z - 20	20	800
3 - Z - 23	23	900
4 - Z - 20	20	800
4 - Z - 24	24	900
4 - Z - 28	28	800
4 - Z - 32	32	900
10 - Z - 72	72	800
10 - Z - 84	84	900
11 - Z - 72	72	800
11 - Z - 84	84	900
59 - Z - 32	32	800
59 - Z - 38	38	900
59 - Z - 72	72	800
59 - Z - 84	84	900



59 E.A.P. 36, rue du Parc • 91330 Yerres • Tél. : 01 69 48 83 83 • Fax : 01 69 49 20 61

TECHNOLOGIE



Revêtements en phase gazeuse : Dépôt chimique en phase vapeur CVD

- **Formation d'un revêtement sous réaction chimique :**

 - Apport d'un ou plusieurs composé gazeux

 - réaction avec le substrat (déplacement, réduction,

 - dissociation de précurseurs gazeux (halogénures

 - métalliques chlorure, fluorure) à hautes températures (900-

 - 1100°C)

 - Diffusion de l'élément métallique d'apport dans le substrat

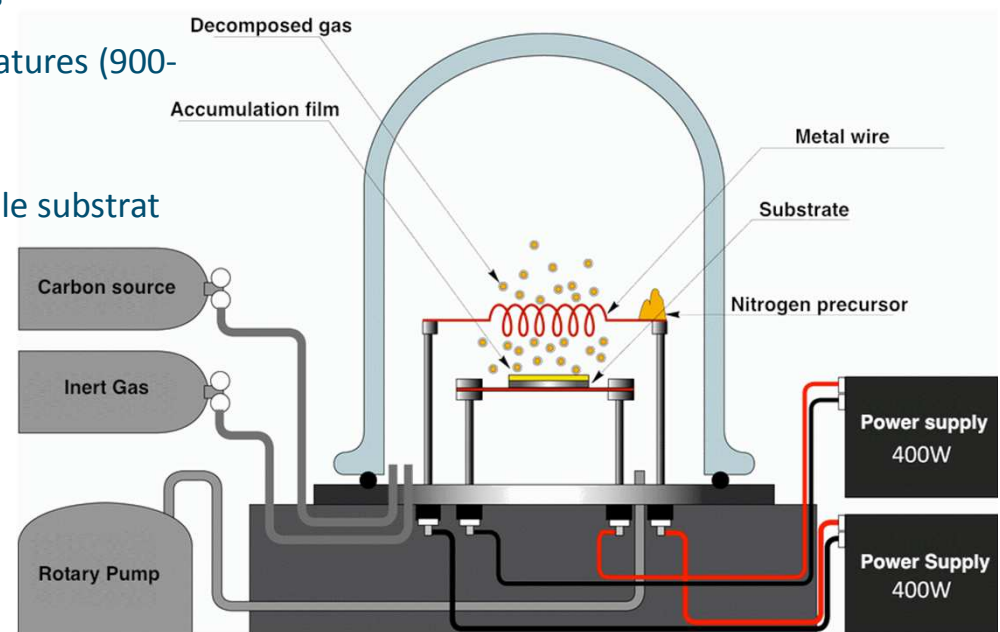
- **Domaines d'application :**

 - électronique : élaboration de composants

 - (Si, SiO₂, GaAs)

 - mécanique : outil de coupe Al₂O₃-TiN-TiC

 - outils d'extrusion, Moule sous pression.



Revêtements en phase gazeuse : Dépôt physique en phase vapeur PVD

- **Formation d'un revêtement sous pression réduite en**

3 étapes :

Vaporisation des espèces à déposer

Transport de ces espèces jusqu'au substrat contenant éventuellement des éléments réactifs par vide primaire

Condensation et croissance du dépôt

- **2 types :**

par évaporation

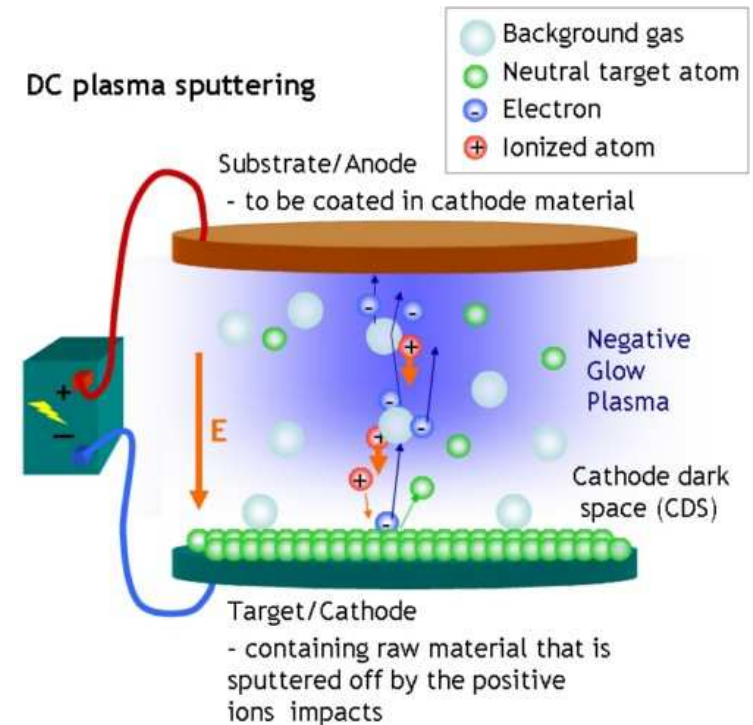
par pulvérisation (« sputtering »)

- **Domaines d'application :**

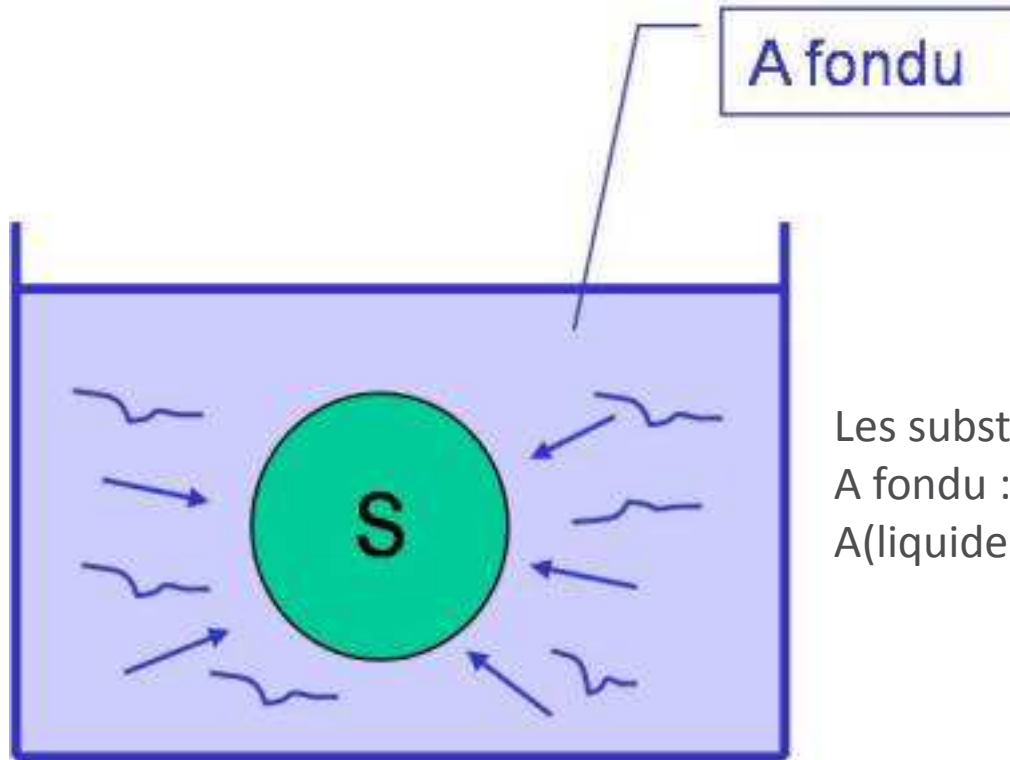
fonctions décoratives : composants d'optiques, surfaces réfléchissantes

fonctions mécaniques : connectique, outillages de découpe, prothèses orthopédiques , outils de coupe

PVD par pulvérisation



Immersion dans les métaux fondus IMF

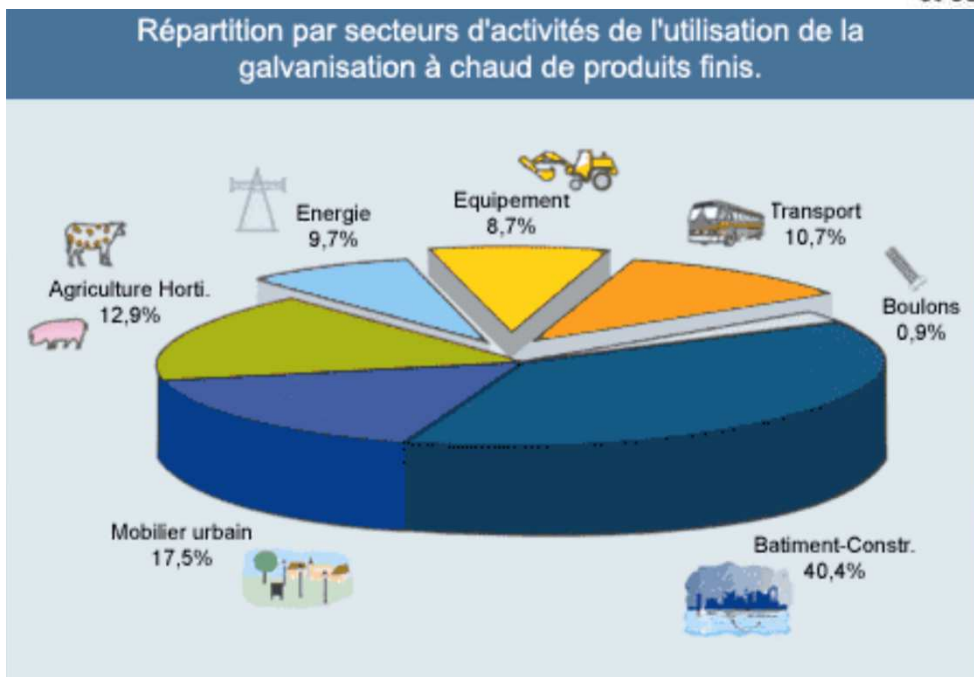
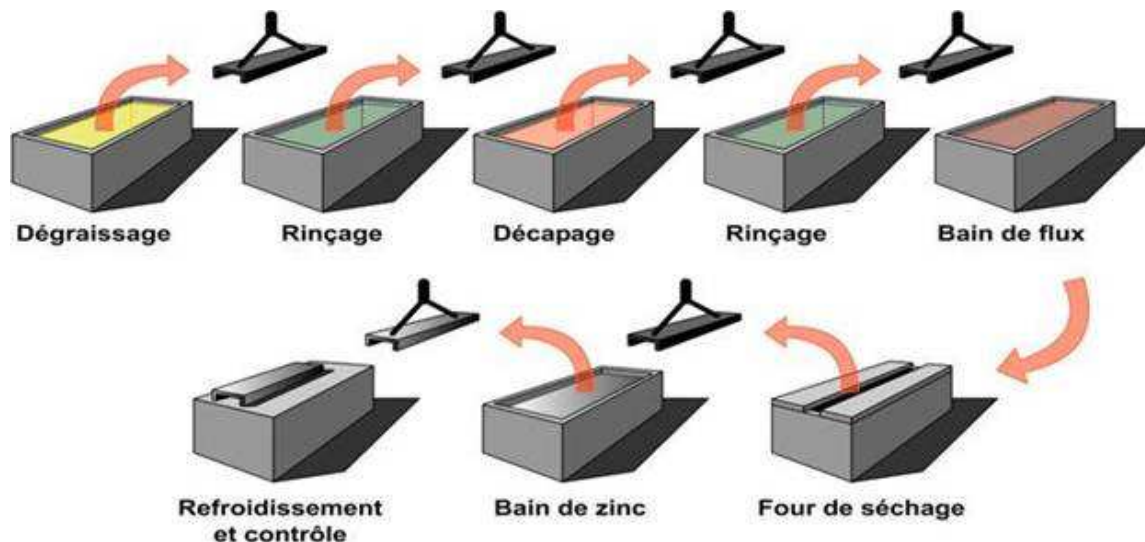


Les substrat S est immergé dans le métal d'apport A fondu :
A(liquide) -> A(solide)

1. Mouillage de l'acier par le métal en fusion lié à la composition superficielle de l'acier, sa propreté, sa rugosité et aux caractéristiques du bain (composition et température)
2. Attaque du fer par le bain avec dissolution
3. Réactions de diffusion

IMF : exemple de la galvanisation à chaud (470°C)

Protection contre la corrosion extérieure



Projection dynamique à froid - principe et comparaison

Procédé très répandu

Coût faible

Procédé adapté à la série

épaisseur importante (qqes μm)



protection longue durée

procédé non fragilisant

très adhérent

revêtement ductile

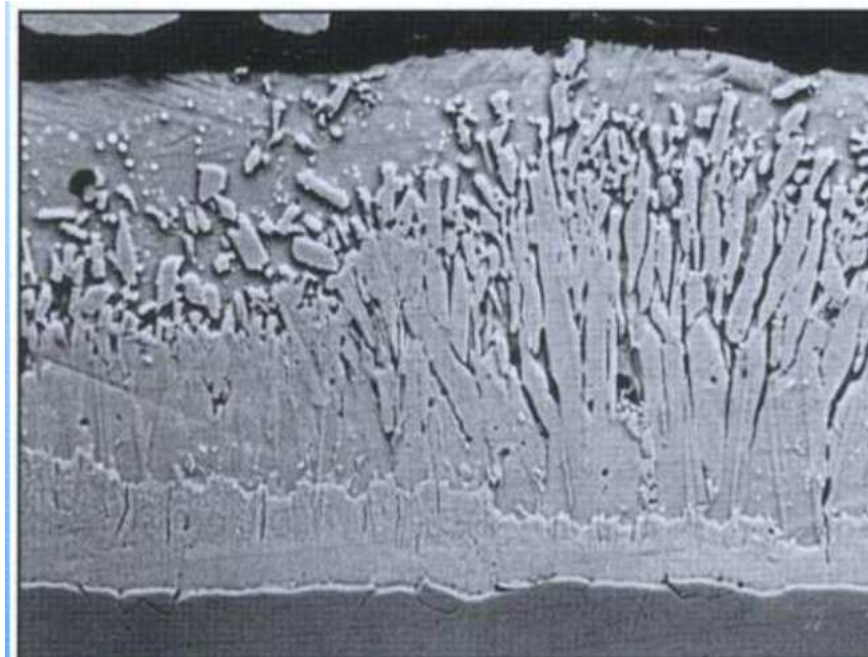
pas d'entretien particulier

Surqualité (durée de vie trop longue)

Surépaisseur dans les cavités

Chocs thermiques possibles

Déformation possible à chaud



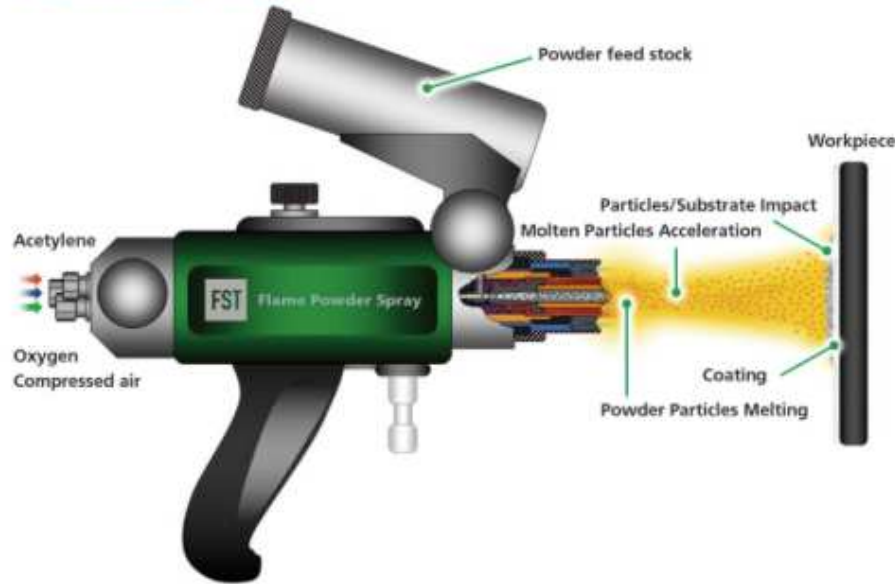
Eta - (η) - layer
Zeta - (ζ) - layer
Delta - (δ) - layer
Gamma - (Γ) - layer
Steel

Projection à chaud - Principe

- Production d'énergie thermique et cinétique, par différents moyens d'apport d'énergie
- Introduction du matériau d'apport dans la zone où l'énergie thermique est concentrée
- interactions des particules avec le milieu : échauffement et accélération
- édification du revêtement couche par couche (accrochage mécanique), avec refroidissement brutal des particules qui peut conduire à des structures métastables ou microcristallisées.
- Propriétés du revêtement :
 - Epaisseur de couches entre 50 et 300 μ m dans la majorité des cas
 - 3 familles : Alliages métalliques, carbures avec liant métallique (cermets), céramiques

Projection à chaud : plusieurs sources d'apport d'énergie

Flame Powder Spray

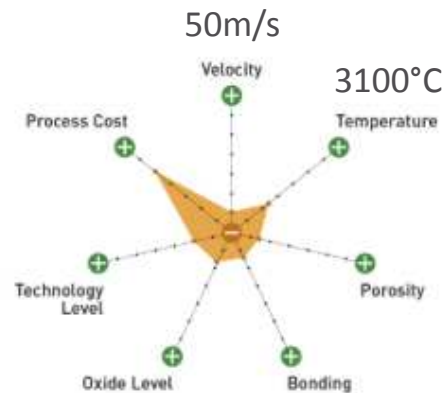


Typical coatings

- ➔ Self-fluxing alloys (fusing)
- ➔ Iron based alloys
- ➔ Nickel based alloys
- ➔ Ceramics & Cermets
- ➔ Abradables

Main applications

- ➔ Wear resistance
- ➔ Corrosion protection
- ➔ Chemical resistance
- ➔ Dimensional restoration



Flame Wire Spraying

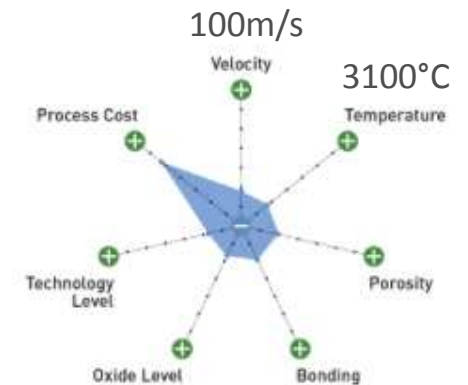


Typical coatings

- ➔ Iron based alloys
- ➔ Nickel based alloys
- ➔ Molybdenum
- ➔ Copper & Copper alloys
- ➔ Aluminium, Zinc, Al/Zn alloys

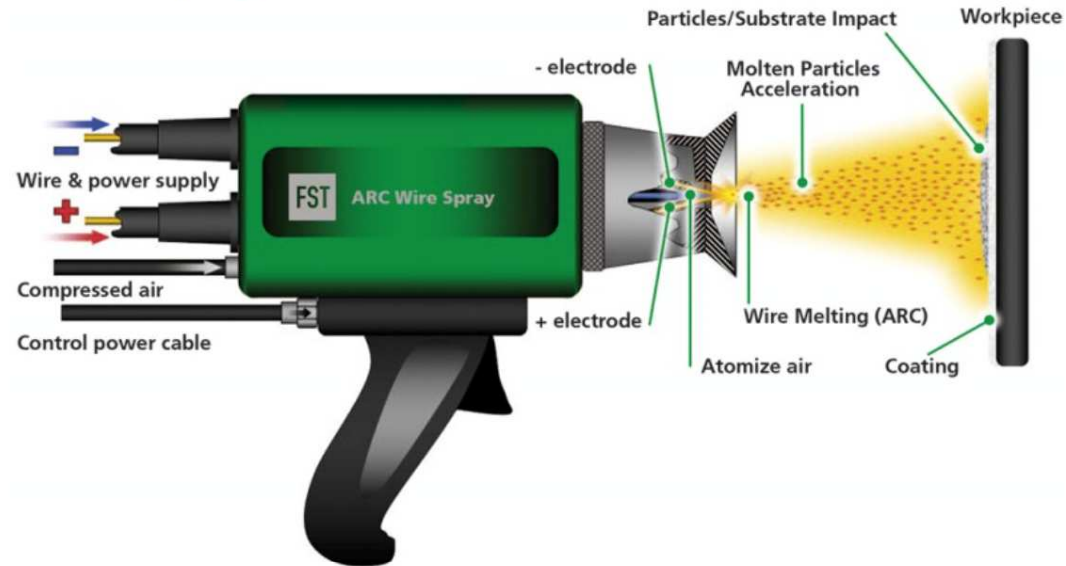
Main applications

- ➔ Wear resistance
- ➔ Friction properties
- ➔ Corrosion protection
- ➔ Dimensional restoration
- ➔ Electromagnetic shielding



Projection à chaud : plusieurs sources d'apport d'énergie

Arc Wire Spray

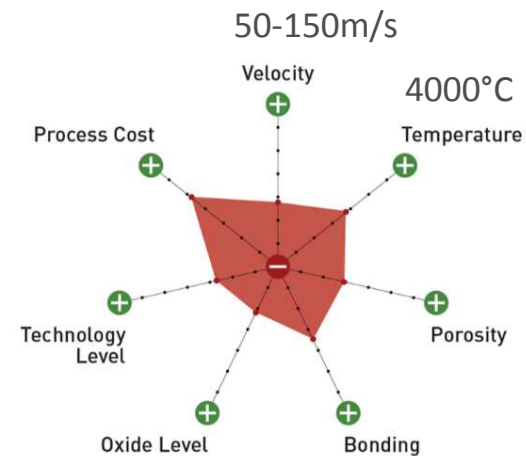


Typical coatings

- Iron based alloys
- Nickel based alloys
- Copper & Copper alloys
- Aluminium, Zinc, Al/Zn alloys
- Babbitt alloys

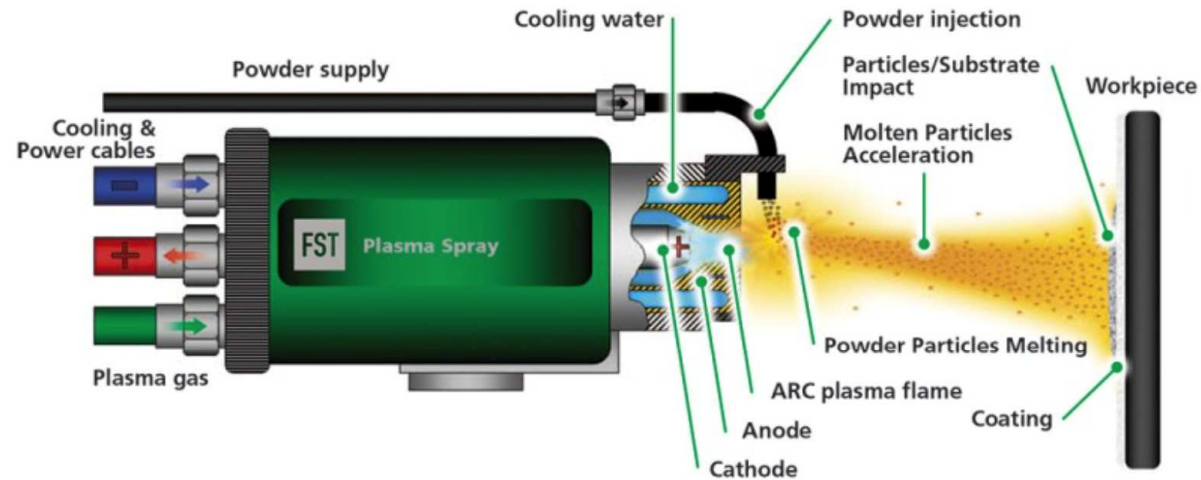
Main applications

- Wear resistance
- Corrosion protection
- Dimensional restoration
- Bond coat



Projection à chaud : plusieurs sources d'apport d'énergie

Plasma Spraying

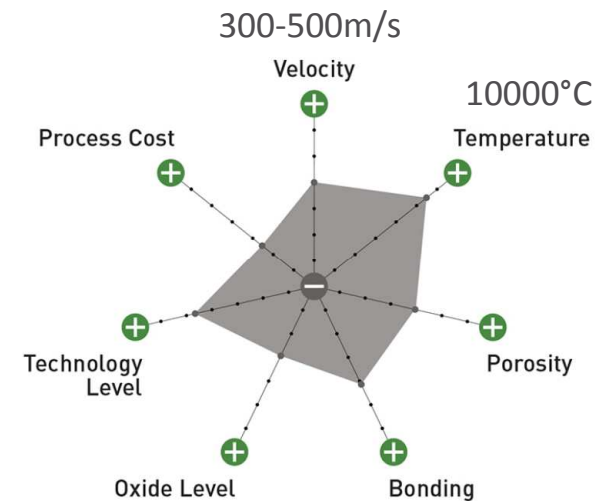


Typical coatings

- ➔ Ceramics
- ➔ Carbides & Cermets
- ➔ Iron, Nickel & Cobalt based alloys
- ➔ Abradables

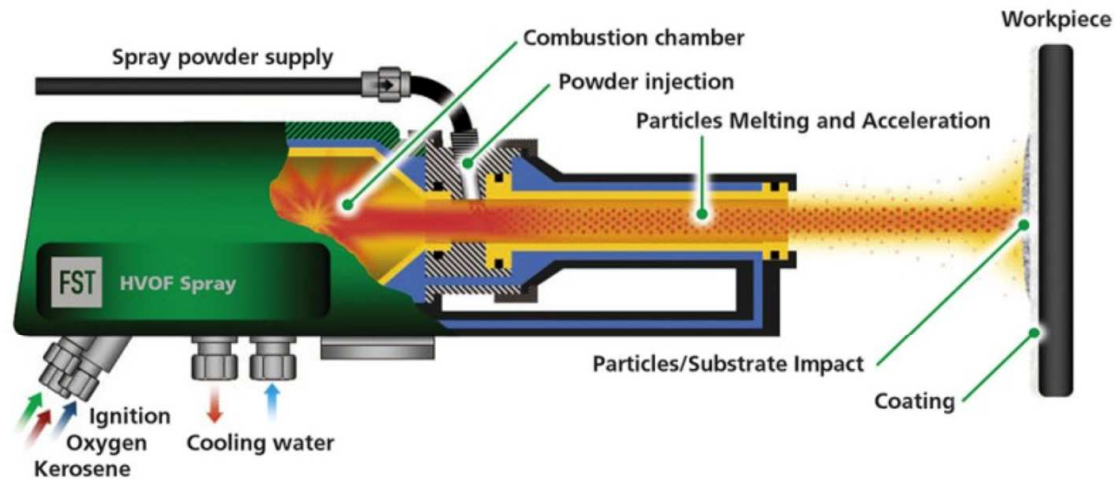
Main applications

- ➔ Wear resistance, Sliding, Abrasive, Erosion, etc.
- ➔ Corrosion resistance
- ➔ Thermal barriers
- ➔ Combinations



Projection à chaud : plusieurs sources d'apport d'énergie

HVOF - High Velocity Oxygen Fuel

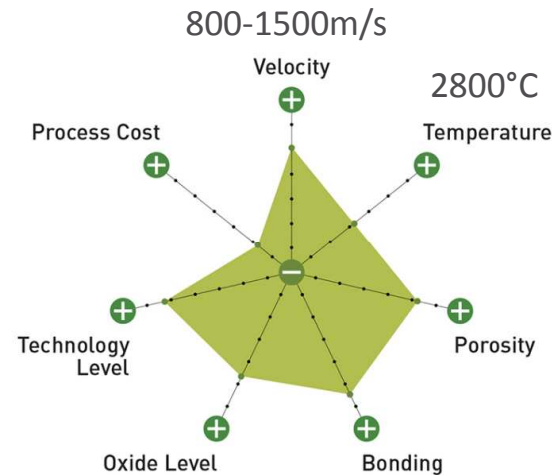


Typical coatings

- Nickel & Cobalt based alloys, Stellite,
- Triballoy, Inconel,
- Iron based alloys, AISI 316L, etc.
- Carbides & Cermets
- MCrAlY

Main applications

- Wear resistance Sliding, Abrasive, Erosion, etc.
- Chemical resistance
- High Temperature applications



Projection à chaud

- **Domaines d'application :**

Industrie aéronautique (trains d'atterrissage, aubes de turbines, barrière thermiques ...)

Industrie mécanique (dépôt résistant à l'usure sur poulies de guidage et cabestans de trefilage, rouleaux tensionneurs dans les installations de traitements (dépôt, thermiques) avant laminage)

Industrie chimique (arbres de compresseurs et plans de joints mécaniques, malaxeurs de pâtes abrasives).

- **Comparaison projection de cermet par HVOF par rapport à dépôt électrolytiques de chrome dur :**



meilleure résistance à l'usure (x3-5)

meilleure résistance à la corrosion

meilleure résistance à la fatigue

pas de fragilisation par l'hydrogène

meilleure résistance aux impacts

grandes pièces (instrumentation sur robots)



moins bonne adhérence

coût plus élevé (x1.5-2)

accessibilité pour canaux internes

faible productivité pour un

investissement important

Projection dynamique à froid - principe et comparaison

- projection de particules de taille 10-40 μ m de dureté limitée (<40HRC)
- Température entre 100-800°C
- Projection sur un substrat au moyen d'un dispositif transformant un jet subsonique en jet supersonique (buse de laval) sous gaz inerte (azote, hélium) à fort débit (30-80 Nm³/h) et forte pression 35bars.
- Plastification importante des particules projetées



fort rendement (>90%)

bonne compacité et absence d'inclusion d'oxydes

large gamme d'épaisseurs (20 μ m à 1mm)

bonne adhérence

faible rugosité superficielle



susceptibilité des dépôts à l'écaillage

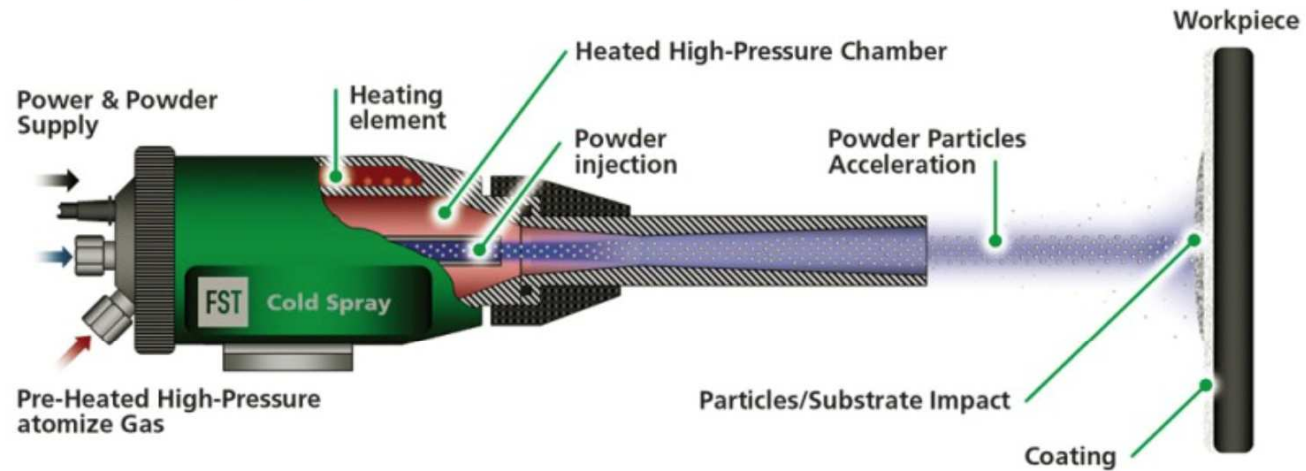
niveau de bruit important (enceinte

isolée phoniquement)

coût élevé du procédé

Projection dynamique à froid

Cold Gas Spray

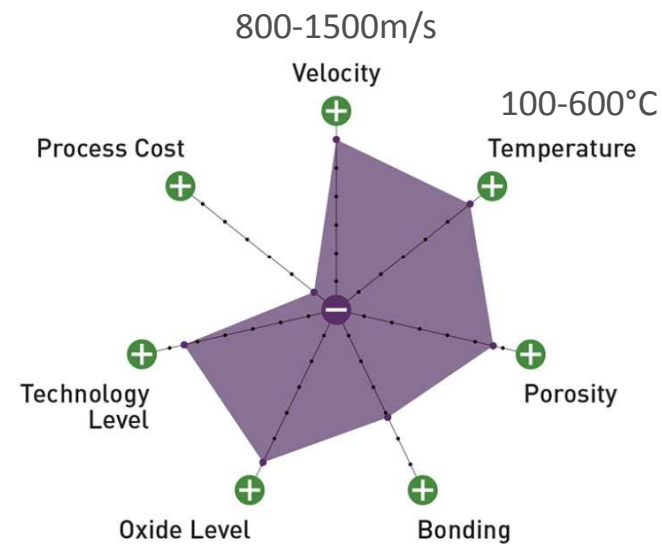


Typical coatings

- Ductile materials & alloys, Zn, Al, Ni, Ti, Cu, Ag, NiCr, CuAl, MCrAlY's, etc.
- High end materials: Niobium or Tantalum

Main applications

- Electrical and thermal conductivity
- Pre-placement of solders
- Corrosion protection
- Dimensional restoration



Rechargement - principe

- Fusion d'un métal d'apport sur un substrat (s'apparente au soudage).
- Le Revêtement obtenu est composé à la fois du métal d'apport et de la partie du substrat fondu.
- Taux de dilution : $\text{Quantité du substrat fondu} / \text{Quantité de métal fondu (substrat + apport)}$
- Possibilité de réaliser des dépôts épais (>5mm)
- Multifonctionnalité (ex résistance à la corrosion, à l'usure en liaison avec une bonne ténacité)
- S'utilise sur matériau soudable (acier avec $C < 0.4\%$, alliages cuivreux)



Rechargement - Différentes sources d'énergie

Procédé	Densité locale d'énergie	Dilution	Déformation	Homogénéité de l'épaisseur	Reprise finale après dépôt	Vitesse dépôt (kg/h)	Epaisseur minimale (mm)
MIG/MAG	4	10-40	4	2-3	3-4	1-6	3
TIG	3	10-20	4	2	3	0.5-4	2.5
PTA	2	5-20	2	2	2	0.5-7	0.8
Laser	1	1-5	1	1	1	0.5-4	0.5

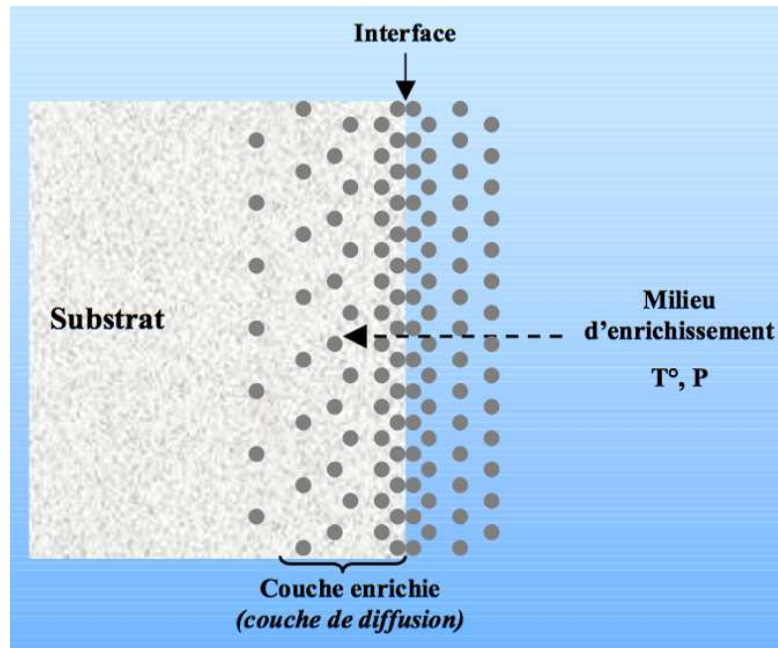
PTA : plasma à arc transféré

Rechargement - domaines d'application

- **Alliages base fer :**
résistance à l'usure par abrasion (ex : cylindres de laminoir, éléments de broyeurs...)
- **Alliages base nickel :**
résistance à l'usure sous atmosphère agressive (milieux acides organiques ou réducteurs) (ex : outil d'extrusion)
résistance à chaud des substrat (ex : outils de forge d'aciers,, outils d'extrusion d'aluminium)
- **Alliages base cobalt :**
résistance au frottement et à l'usure au delà de 500°C
résistance à la déformation à chaud (outillages de forges, aubes soupapes...)
- **Industries**
Nucléaire (robinetterie...), transport (sièges de soupapes...), mécanique (pale de malaxeur), métallurgie (matrices de forges...), chimie, production d'énergie (turbines...)

Traitements par diffusion

Traitements de diffusion



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

Modification de la composition chimique en surface.

- +++ Augmentation de la dureté superficielle (tenue à l'usure par abrasion)
- +++ Diminution du coefficient de frottement superficiel (résistance à l'usure par frottement, au grippage)
- ++ Augmentation de la résistance en fatigue
- + Augmentation de la résistance à la corrosion

Traitements de diffusion des métalloïdes

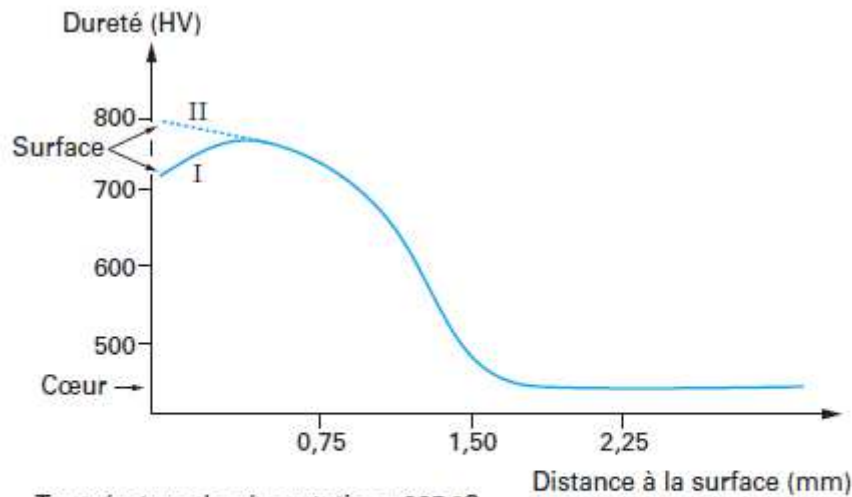
Type de traitement	Matériau concerné	Mis en oeuvre	Type de couche superficielle	Dureté maxi Profondeur
Cémentation	Aciers (0.1-0.25%C)	Diffusion de C T max 1050°C Trempe	Martensite à gradient de teneur en C	800-900 HV 500-1500µm
Carbonituration	Aciers	Diffusion C et N T max 850°C Trempe	Martensite à gradient de teneur en C et N	800 à 900 HV 200 à 700 µm
Nitruration	Aciers, Fontes, Alliages de Titane	Diffusion de N (avec C éventuel) Tmax 600°C pour aciers, 800°C pour Ti	Couche de combinaison (nitrure) Couche de diffusion de N	600 à 1500HV quelques µm-600µm
Oxydation	Aciers, Alliages de Titane, Zirconium	Diffusion de O, Tmax 600°C pour acier, 550 pour Ti, 800 pour Zr	Couche de combinaison (oxydes)	550 à 750 HV quelques µm à 50 µm
Implantation ionique	Tous matériaux métalliques, Polymères	Diffusion par voie physique	Solution solide, éléments implantés	Pas mesurable environ 0,2µm max

Traitements de diffusion exemples



- Cémentation**

Cémentation dans atmosphère gazeuse puis trempe
 ⇒ augmentation de la dureté superficielle et contraintes résiduelles



Température de cémentation : 925 °C
 C_p : 0,85 %

- I trempe directe
- II double trempe ($T_a = 790$ °C)

Profil de dureté d'une couche cémentée sur un acier
 16NiCrMo13 après trempe

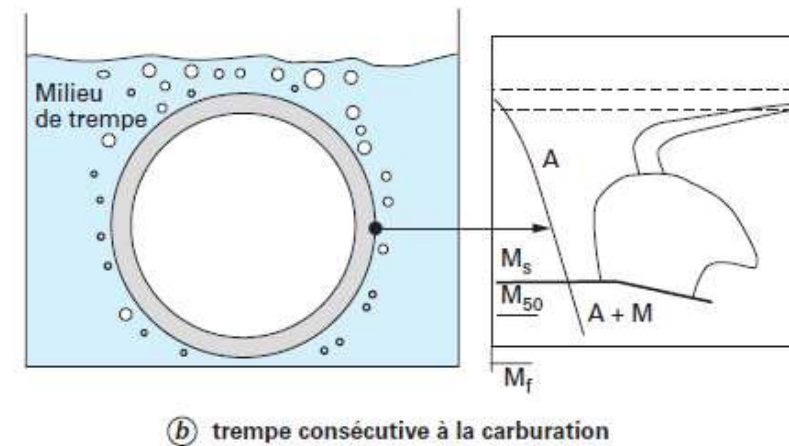
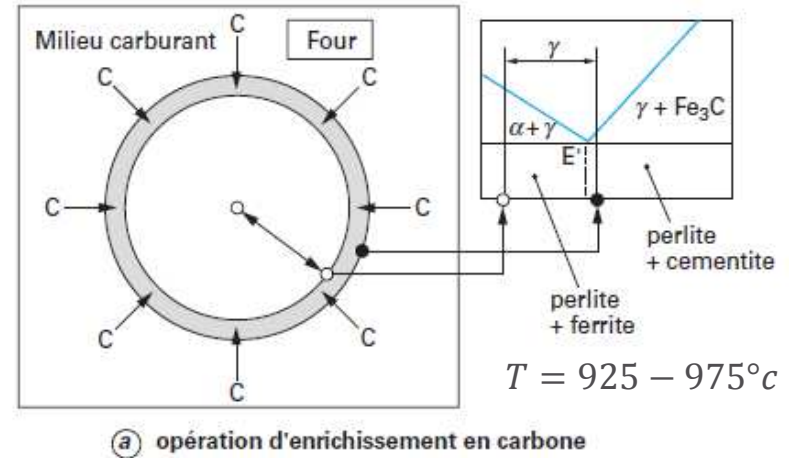
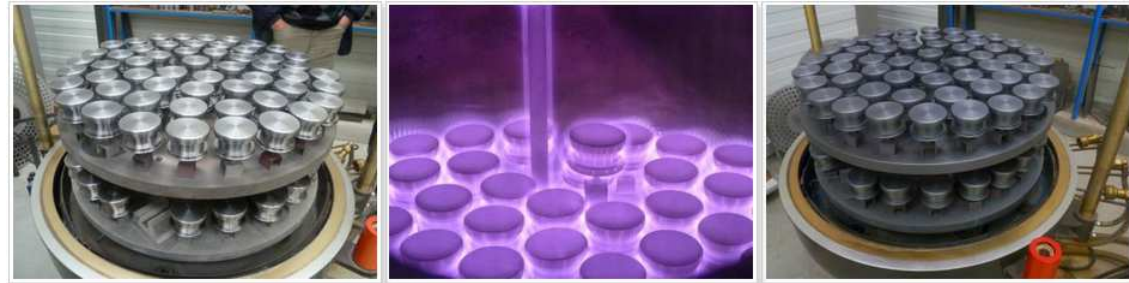


Schéma simplifié du traitement de cémentation

Traitements de diffusion exemples

Nitruration ionique



- **Carbonitruration**

Apport d'azote (par ammoniac) en plus du carbone \Rightarrow réduction de la température de traitement

+ : distorsion moindre des pièces ; amélioration de la trempabilité

- : Limité à $\approx 0,75mm$ (temps de diffusion ; contrôle) ; abaissement du point M_S donc plus d'austénite résiduelle

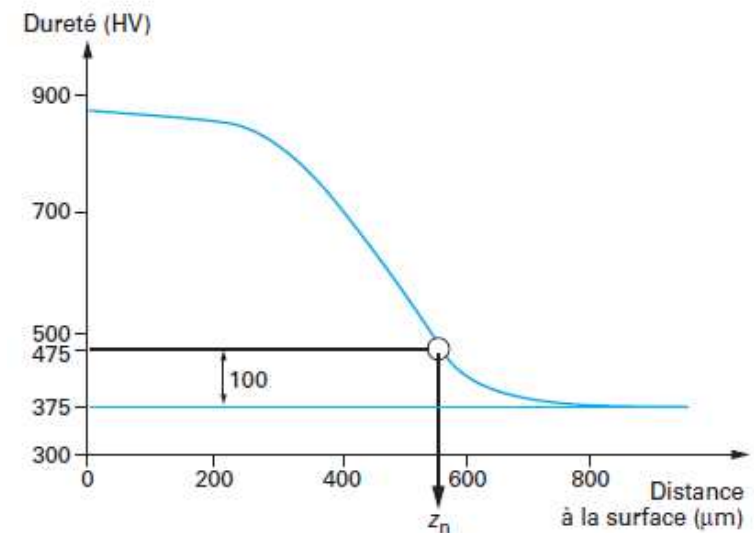
- **Nitruration et nitrocarburation**

Apport d'azote à des températures $[520; 580^\circ C]$, en phase liquide, gazeuse ou ionique

Matrice à l'état ferritique \Rightarrow durcissement et contraintes résiduelles générées par un **effet de précipitation**

(phases ϵ et γ')

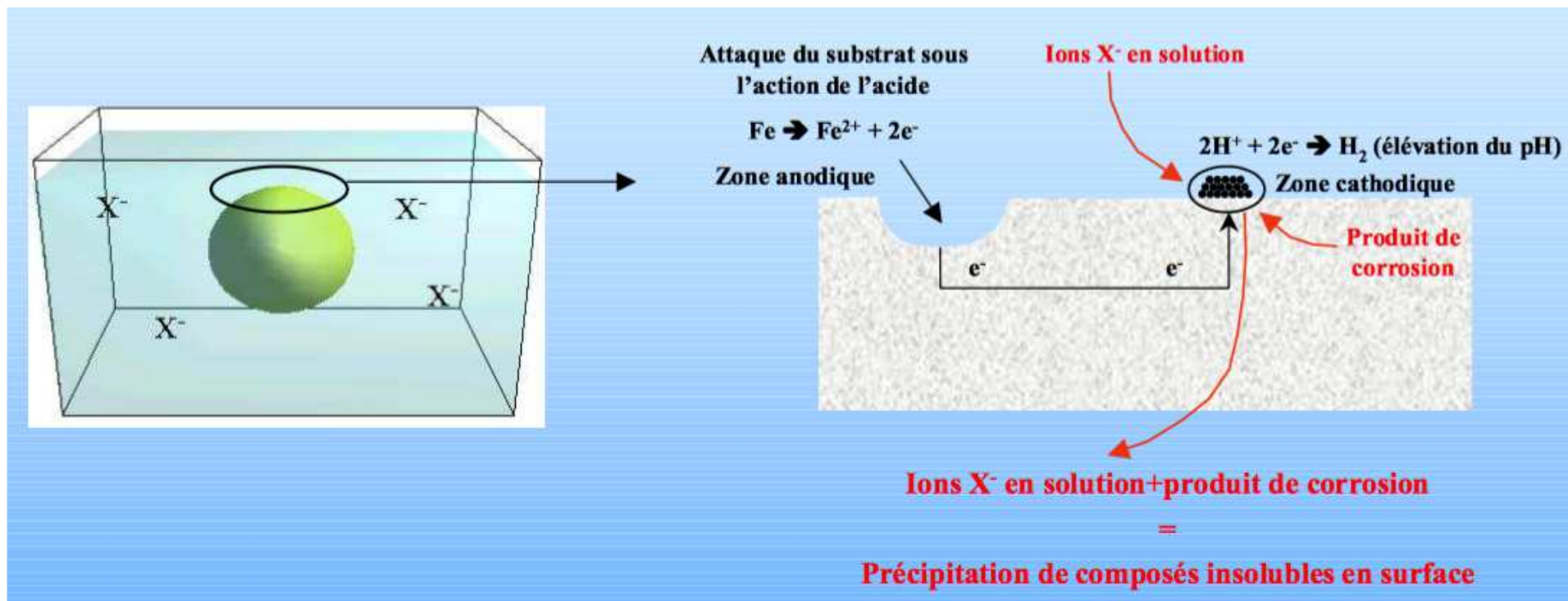
Pas d'étape de trempe



Profil de dureté et détermination de la profondeur conventionnelle de nitruration

Traitements par conversion

Principe de la conversion chimique



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 différents traitements de conversions chimiques

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

Chromates : Chromatation (aciers, fontes alliages d'aluminium et de zinc). Tenue à la corrosion, brillance, coloration, adhérence pour revêtement ultérieur

Phosphates : Phosphatations (aciers, alliages d'aluminium et de zinc). Tenue à la corrosion, base d'adhérence, résistance électrique superficielle, coefficient de frottement, antireflet.

Nitrates : Passivation (aciers inoxydables)

Oxalates : Oxalatation (aciers inoxydables). Améliorer l'adhérence des lubrifiants

Brunissage sur aciers : aspect esthétiques + protection contre la corrosion atmosphérique

- **Domaines d'application**

Stabilisation de l'interface entre un substrat métallique et un matériau polymère ou éventuellement céramique (présence d'oxyde + hydroxyde et rugosité).

Les différents traitements de conversions chimiques

- **Accessibilité des formes**
- ⊕ **Large diffusion**
- **Procédés peu coûteux**
- **Facilité de mise en œuvre**
- ⊖ **Problème de rejets aqueux (station d'épuration).**

INSA

INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
LYON

...ents par transformation structurale d'origine mécanique ou thermique

Contraintes résiduelles

- **Définition**

Les contraintes résiduelles, souvent notées σ_R ou σ_{res} , sont des contraintes multiaxiales, statiques, auto-équilibrées, existant dans un système isolé de température uniforme et en l'absence de tout chargement extérieur.

⇒ Auto-équilibrées : s'il y a de la traction quelque part, c'est qu'il y a de la compression ailleurs

⇒ Contraintes existant en l'absence de tout chargement extérieur : peuvent avoir un impact sur la tenue mécanique de la pièce en service, sur sa durée de vie

Si contraintes de traction :

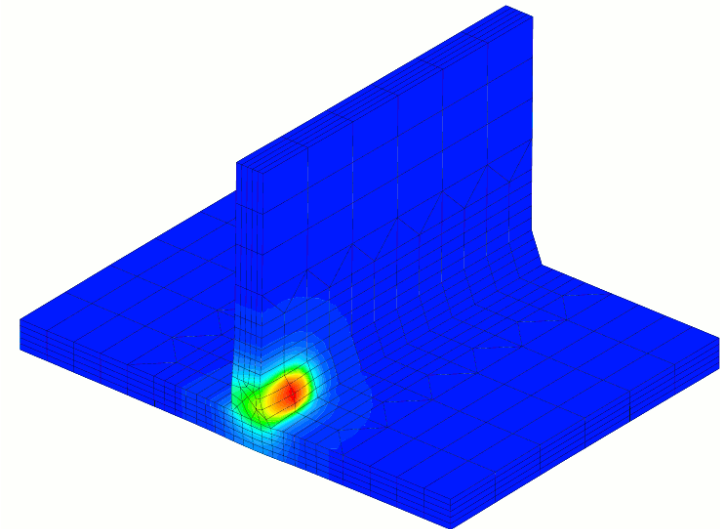
augmentation du risque de rupture

Si contraintes de compression :

gain potentiel en durée de vie/résistance à la fatigue

Sur des pièces de faibles dimensions :

génération de distortions



Distorsion d'un joint soudé

Source : ec2-modélisation

Contraintes résiduelles

- **Comment les mesurer ?**

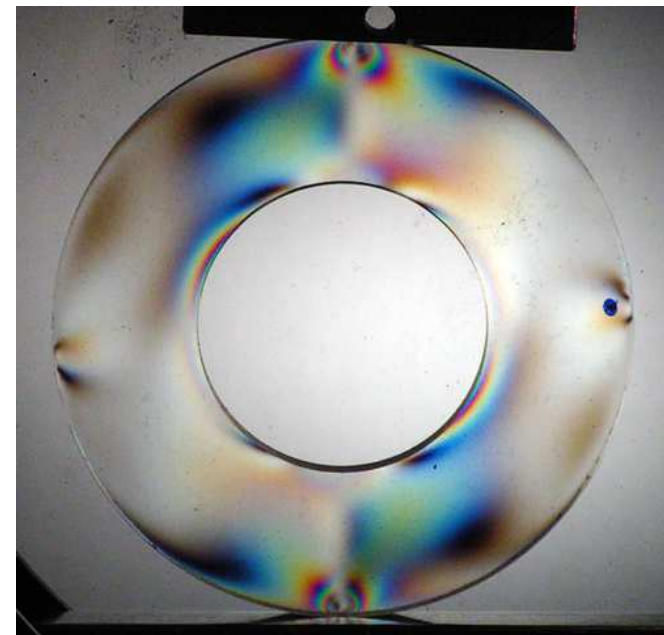
On ne sait pas mesurer une contrainte... mais on sait mesurer une déformation.

La connaissance des propriétés élastiques du matériau permet de faire le lien.

- **Quelques méthodes existantes :**

Photoélasticimétrie :

ok pour des matériaux biréfringents uniquement



Contraintes résiduelles

- Quelques méthodes existantes :

- Méthodes destructives :

- Mesure de la déformation après un enlèvement de matière

- La mesure des déformations de rééquilibrage permet de remonter aux contraintes résiduelles

- Détermination de profils possible

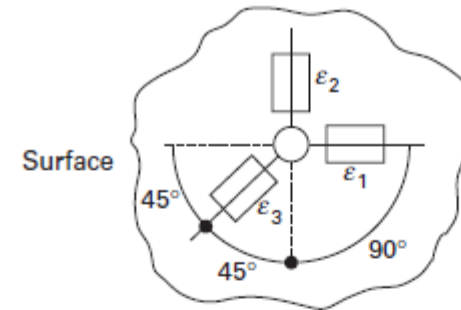
- Méthode du trou :

- Perçage $D = [0,5; 3mm]$; $V_c < 0,3mm.s^{-1}$

- Limitations proches de la surface, pour les forts gradients et pour $z > 0,5D$

- Méthode du trépan incrémentale :

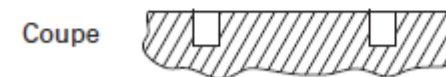
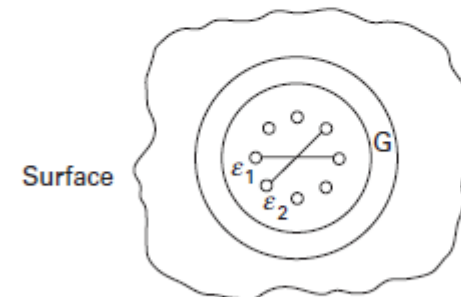
- $D_{ext} = 15mm$; $e = 2mm$



□ Jauge

perçage et mesure des déformations $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$

Ⓐ méthode du trou



○ jauge

G gorge à fond plat

trépanage et mesure de déformations $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$

Ⓑ méthode du trépan

Contraintes résiduelles

- Quelques méthodes existantes :

Méthodes par diffraction :

Diffraction de rayons X ou de neutrons

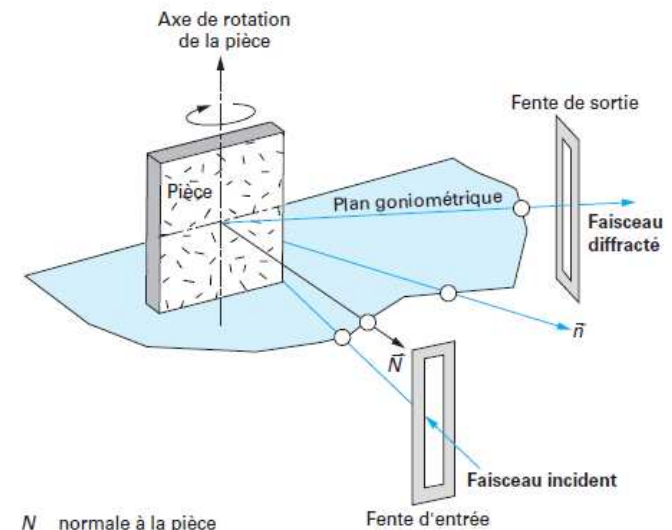
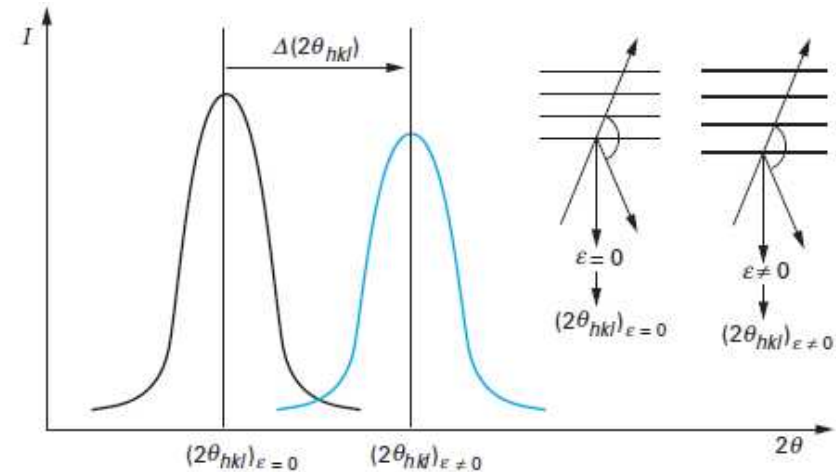
La position des pics de diffraction dépend de l'espace interatomique

⇒ S'il y a déformation cet espace change, le décalage du pic permet d'estimer la déformation

Méthodes non destructives mais à pénétration limitée (mesure de surface ou nécessitant des adaptations)

Les incertitudes sont souvent grandes :

$$\varepsilon = 0.001 \text{ (200MPa pour un acier)} \Rightarrow \Delta\theta = 0,5^\circ$$



N normale à la pièce
 n normale aux plans diffractants, direction de mesure de la déformation fixe dans l'espace

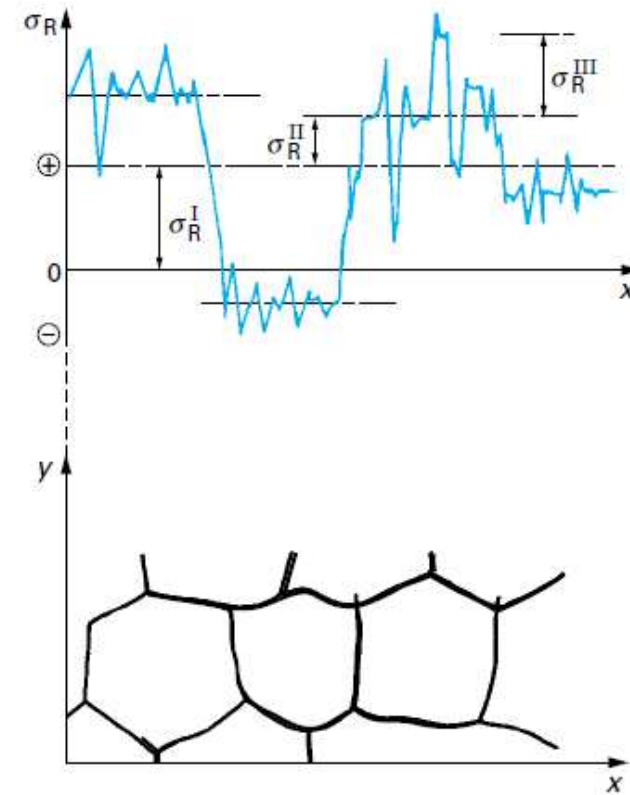
Contraintes résiduelles

- **Différents ordres de contraintes résiduelles**
 Pour les matériaux polycristallins

 Ordre 1 : homogènes et constantes sur plusieurs grains

 Ordre 2 : homogène des dans un grain

 Ordre 3 : hétérogènes même dans des zones
 correspondant à quelques distances interatomiques



– joints de grains

$$\sigma_R = \sigma_R^I + \sigma_R^{II} + \sigma_R^{III}$$

$$\sigma_R^I = \left(\frac{\int \sigma_R dA}{\int dA} \right)_{\text{plusieurs grains}}$$

$$\sigma_R^{II} = \left(\frac{\int \sigma_R dA}{\int dA} \right)_{\text{un grain}} - \sigma_R^I$$

$$\sigma_R^{III} = (\sigma_R - \sigma_R^I - \sigma_R^{II}) \text{ un point}$$

avec dA élément de surface

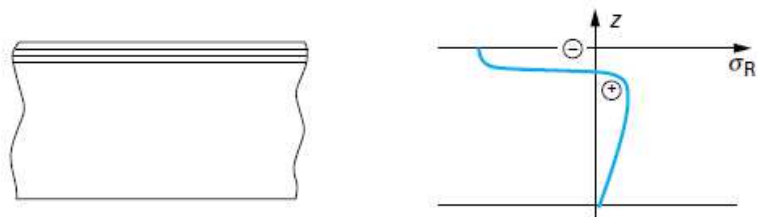
Contraintes résiduelles

- **Origine des contraintes résiduelles**

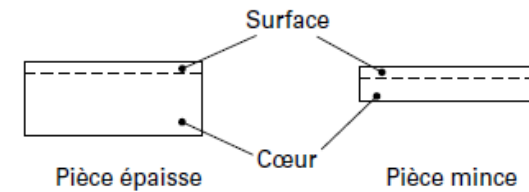
Proviennent des hétérogénéités de déformation :

- déformation plastique hétérogène entre différentes zones d'une pièce
- Variations de volume dues à des changements de phases
- ...

Exemple d'un matériau mis en compression par déformation plastique des couches superficielles



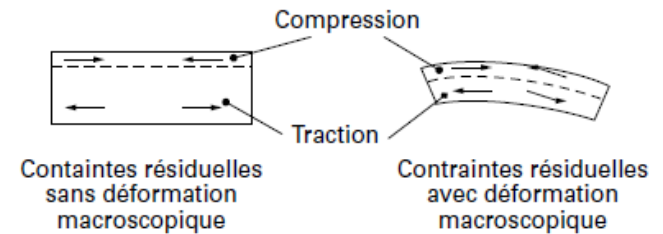
couche déformée plastiquement : source des contraintes résiduelles
 z profondeur sous la surface
 On rappelle que les contraintes de compression sont affectées d'un signe - et les contraintes de traction d'un signe +.



(a) matériau sans contraintes résiduelles



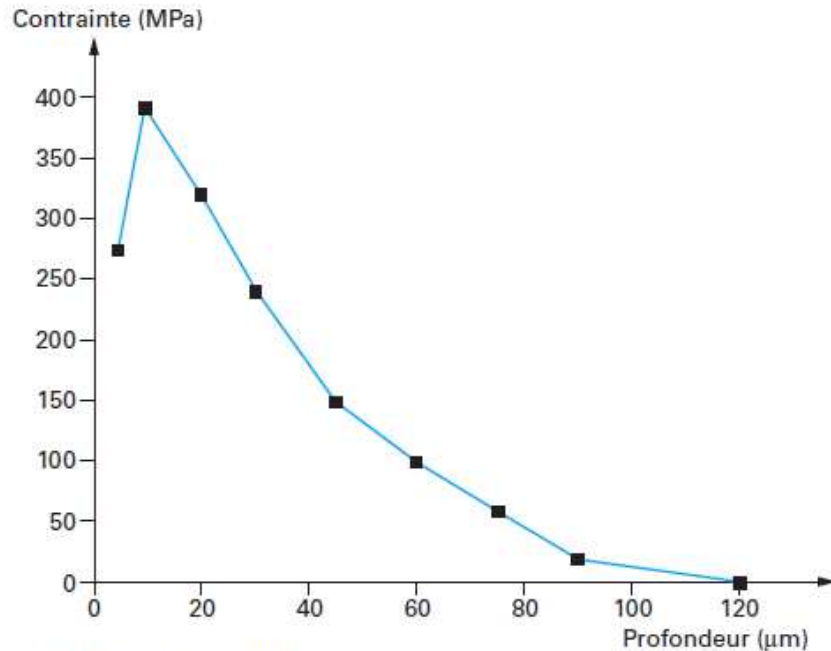
(b) allongement plastique de la surface non liée au cœur



(c) allongement plastique de la surface liée au cœur

Contraintes résiduelles

- Quelques exemples et ordres de grandeurs



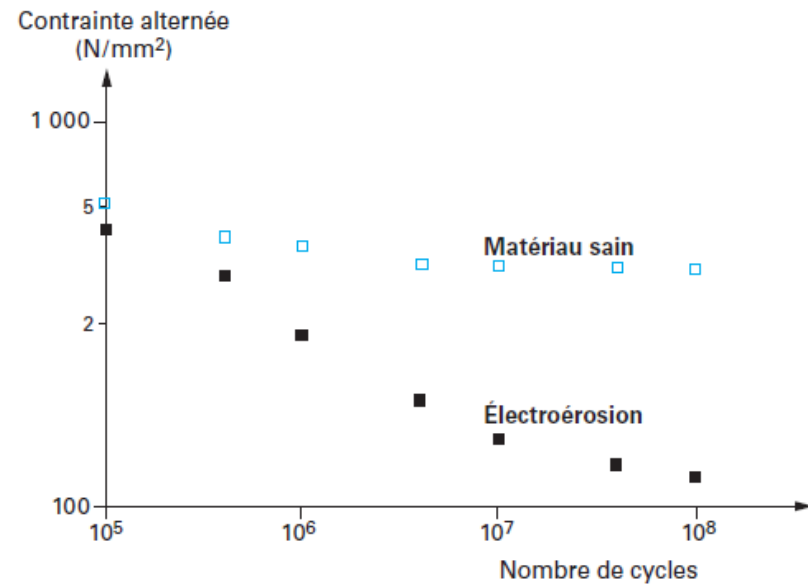
Conditions expérimentales

Décharge { 19 A
50 μs

Pièce : acier 35NCD16 recuit

Électrode : graphite

Contraintes résiduelles après un usinage par électroérosion



Conditions expérimentales

Décharge { 18 A
60 μs

Pièce : acier Nimonic

Effets des contraintes résiduelles sur la tenue en fatigue

Traitement mécaniques superficiels

- Déformation plastique des couches superficielles par action mécanique

Dénomination	Mise en œuvre	Profondeur de traitement	Avantages et inconvénients
Tribofinition	Frottement	de 0,01 à 0,03 mm	Long et coûteux à réaliser
Grenaillage	Projection contrôlée de billes de différents diamètres, de différentes mesures et de différentes vitesses	de 0,1 à 0,6 mm suivant le matériau et les conditions	Quelques problèmes d'incrustation, de microdéfauts et parfois de rugosité S'adapte à toutes les géométries
Martelage	Impact d'aiguilles à extrémité sphérique	de 1 à 2 mm	Problème d'état de surface, ne s'applique qu'aux géométries simples
Galetage	Roulement d'un galet avec une forte force d'appui	de 2 à 3 mm	Variations dimensionnelles, nécessite une géométrie particulière
Ondes de choc	Explosion Laser impulsionnel de très forte puissance	jusqu'à 4 mm	S'adapte à toutes les géométries (pour le laser) Pas de modification de l'état de surface Traitement en cours de développement
Préconformage Autofrettage	Flexion, expansion ou torsion avec passage en plasticité	quelques mm	Traitement directionnel

⇒ Modifications possibles

Des caractéristiques géométriques de la pièce, de la microstructure (↑ densité dislocations)

⇒ changement de la rugosité, des contraintes résiduelles, de la dureté, de la ductilité

Principe mécaniques superficiels

- **Déformation plastique des couches superficielles par action mécanique**

Cas de l'impact d'une sphère sur un plan (*contact de Hertz*)

Selon le type de chargement (géométrie des projectiles, choc laser, ...) les distributions de pression et de contraintes peuvent varier mais le principe reste similaire.

- **Grenaillage de précontrainte**

Projection de billes ($D \approx [0,3; 6mm]$)

libres (turbine, jet d'air) ou

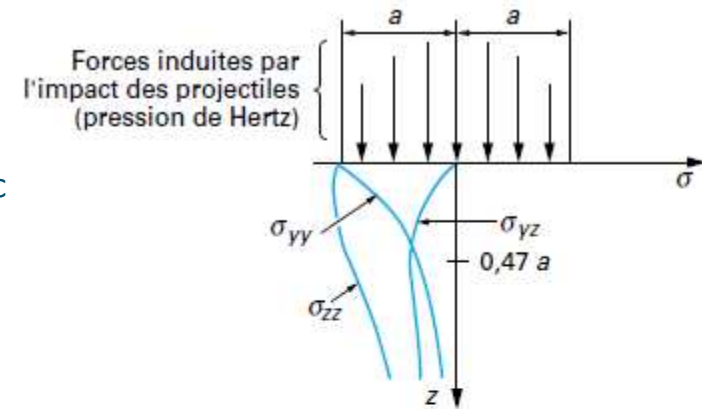
attachées (*rotopeening*)

Principe mécaniques superficiels

- **Déformation plastique des couches superficielles par action mécanique**

Cas de l'impact d'une sphère sur un plan (*contact de Hertz*)

Selon le type de chargement (géométrie des projectiles, choc laser, ...) les distributions de pression et de contraintes peuvent varier mais le principe reste similaire.

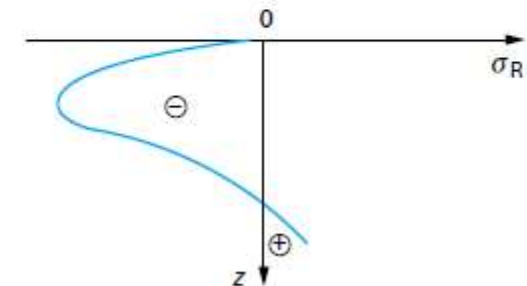


- **Grenailage de précontrainte**

Projection de billes ($D \approx [0,3; 6mm]$)

libres (turbine, jet d'air) ou

attachées (*rotopeening*)



effet plastique localisé et profond (sur 100 à 600 μm)
pression de Hertz

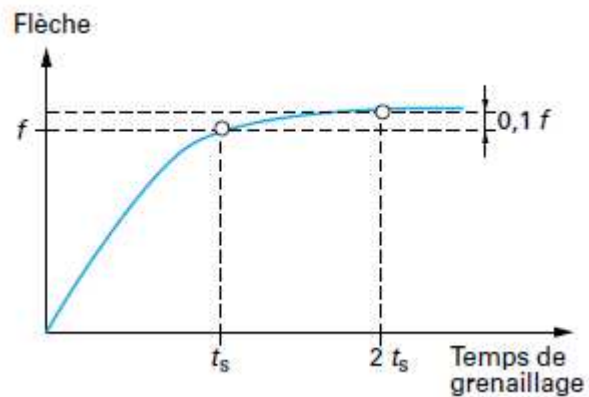
Grenaillage de précontrainte

- Paramètres du procédé :

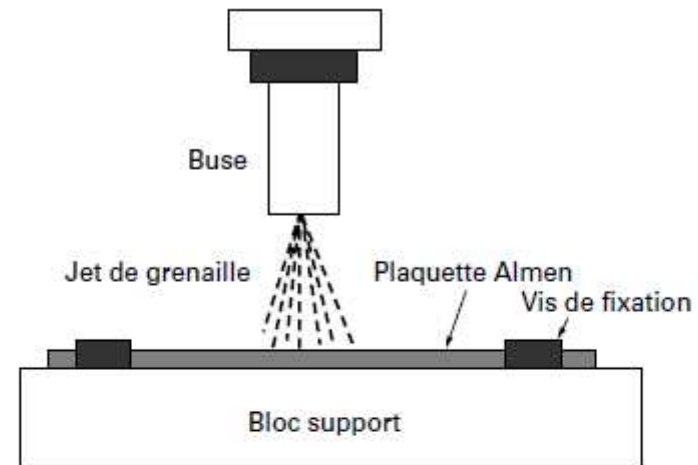
Diamètre, vitesse, matériau des billes

Taux de recouvrement

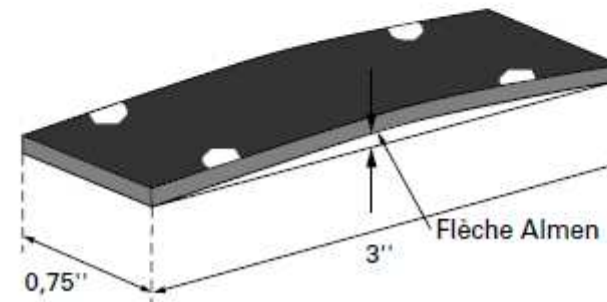
Paramètres industriellement identifiés via l'intensité Almen



Courbe de saturation d'une éprouvette Almen



(a) en cours de grenaillage

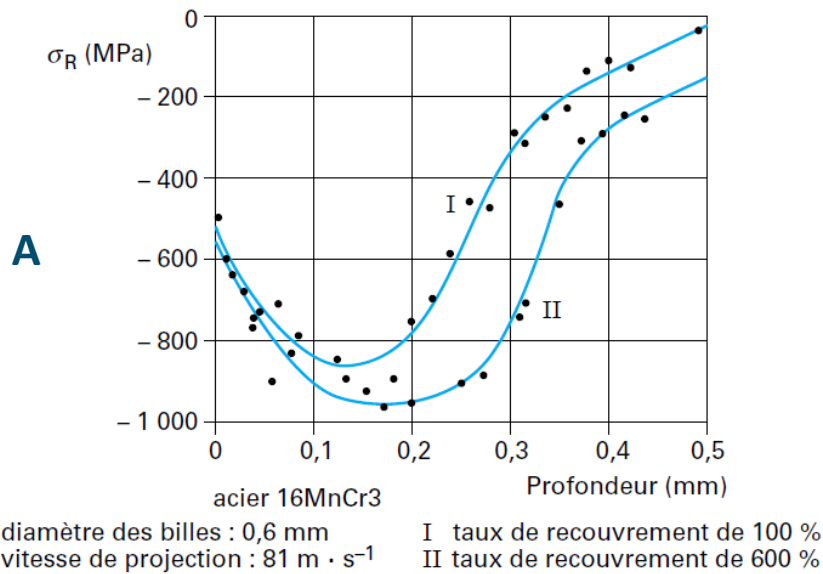


(b) après grenaillage

Montage pour la détermination de l'intensité Almen

Grenailage de précontrainte

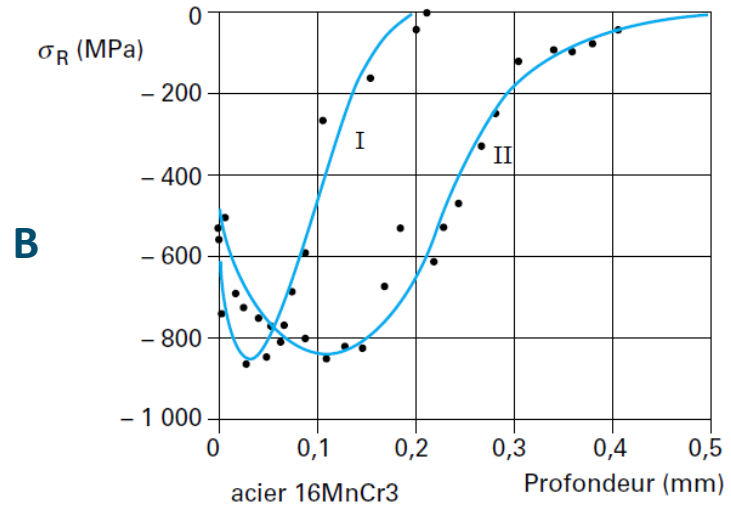
- Influence des paramètres d'entrée



A – Taux de recouvrement

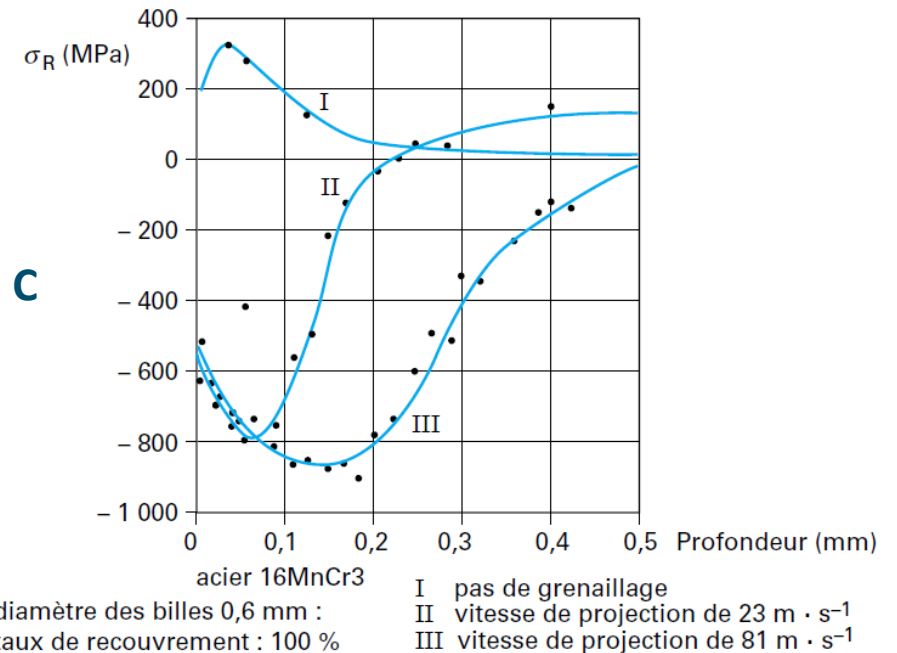
B – Diamètre des billes

C – Vitesse de projection



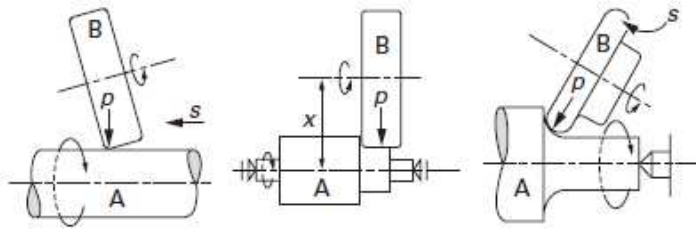
taux de recouvrement : 100 %
vitesse de projection : 53 m · s⁻¹

I diamètre des billes de 0,3 mm
II diamètre des billes de 0,6 mm



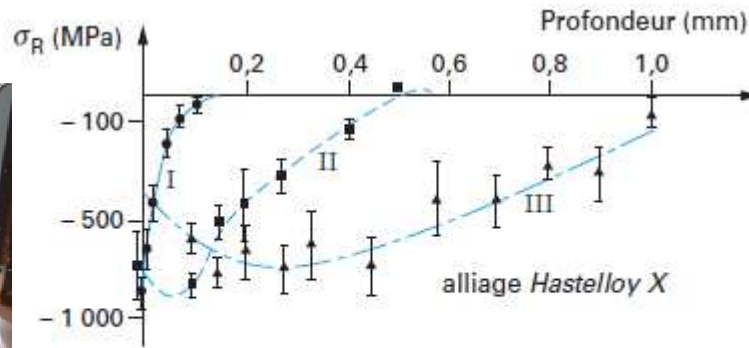
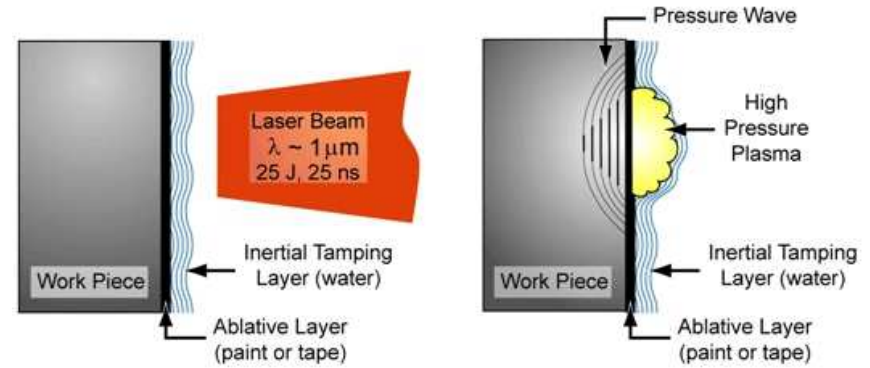
Autres procédés de grenailage

Martelage, galetage

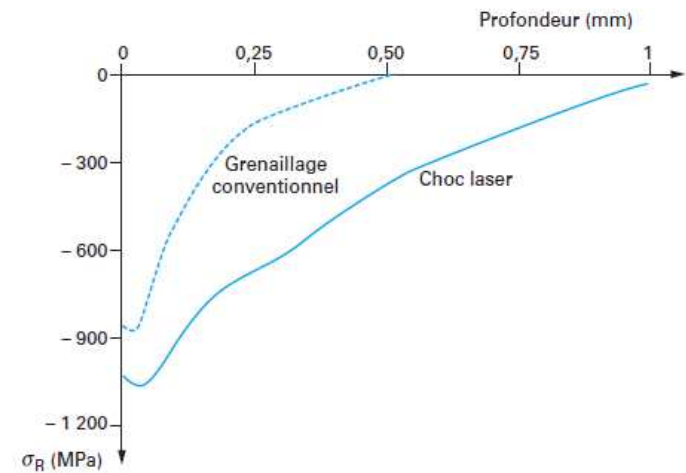


- A pièce
- B galet
- p pression
- s avance
- x écartement des axes suivant le diamètre de la pièce à réaliser

Choc laser



- I sablage
- II grenailage d'intensité Almen 10-12 A
- III martelage






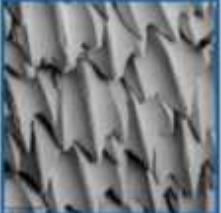
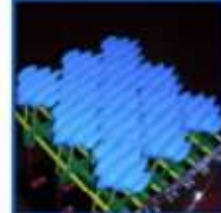
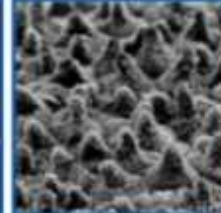
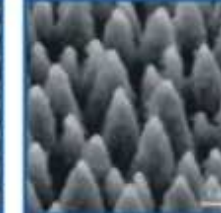
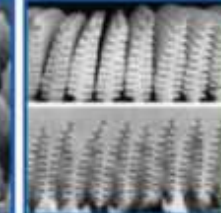
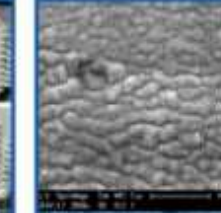
INSA

INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
LYON

... aussi des fonctions de plus en
plus complexes induites par des
texturations à plusieurs échelles.

Texturation laser

biomimétisme

La peau des requins leur permet d'améliorer leur hydrodynamisme	Le lotus développe une hydrophobie de surface	Certains papillons montrent des couleurs issues de la texture de leurs ailes			
					
Côté nature	Côté ingénieur	Côté nature	Côté ingénieur	Côté nature	Côté ingénieur
					

Sources bibliographiques

- <http://www.manutech-usd.fr>
- Traitements et revêtements de surface des métaux, Robert Lévêque, DUNOD, 2013
- Cours en ligne : Les traitements de surface, Christophe Holterbach, CETIM
- Technique de l'ingénieur BM7010V1

Sources des figures (autres que sources bibliographiques)

- <https://lh5.googleusercontent.com/-kwSECgLOZJ8/VJFctGg6WDI/AAAAAAAAAB9A/heBTt-SdynA/w414-h259-no/Fig3%3A0918.tiff>
- http://tribologie.free.fr/images/images_these/surf_metal.gif
- <https://abm-website-assets.s3.amazonaws.com/mdtmag.com/s3fs-public/legacyimages/MDT/Products/2012/01/Morgan.jpg>
- https://shop.hpceurope.com/images/pdts/zoomPdts/METC_Coussinet.jpg
- http://www.config-racing.com/8241-thickbox_default/coussinet-unibal-competition-serie-sse.jpg
- http://www.otelo.fr/waroot/images/products/600/95007001_A.gif
- <http://www.hellopro.fr/images/produit-2/8/3/6/soupape-de-surete-taraudee-2241638.jpg>
- http://media.noria.com/sites/magazine_images/201212/Bearing_Lubrication_Image_2.jpg
- <http://s4.e-monsite.com/2011/05/05/09/pres2.jpg>
- https://tse4.mm.bing.net/th?id=OIP.R8AtH_3B1IHQuPt1WhZI7wEsCZ&pid=15.1
- http://www.cea.fr/PublishingImages/Pages/domaines-recherche/energies/corrosion-alteration-materiaux-nucleaire/corrosion_sous_contrainte.jpg?RenditionID=7
- http://media.noria.com/sites/magazine_images/201212/Bearing_Lubrication_Image_2.jpg
- http://technocalvisi.free.fr/Techno/6eme/fonctionnementOT/mouvement_fichiers/RouesCremail.gif
- https://prp-machines.fr/wp-content/uploads/2015/04/T2eC16NHJG8E9nyfmY4dBQMbsgm3g60_35.jpg

Sources des figures (autres que sources bibliographiques)

- <http://www.machine-outil.com/gfx/photos/grand/6240.jpg>
- https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/24/Electropolishing_principle.png
- <https://www.fst.nl/systems/>
- <https://www.youtube.com/watch?v=xBJ32laCZ3c>
- <https://www.youtube.com/watch?v=hFwqt276YWA>
- <http://www.chaudronnerie-maintenance-industrielle.com/wp-content/uploads/2016/03/2-3-Rechargement-dur-45-HRC-sur-cylindre-1.jpg>
- http://www.emse.fr/tice/unit/2007-12/res/GenTS_imag_7.jpg
- <http://www.galvaunion.com/images/procede-galvanisation.jpg>
- https://www.weizmann.ac.il/materials/igorl/sites/materials.igorl/files/uploads/dcplasma-sputtering_640x480_0.jpg