

Pr. Hakim BENSABRA

Cours

***Traitements et revêtements
des surfaces***

***Pour les étudiants de la 2ème Année
Master Elaboration et Traitement des Métaux***



Université de JIJEL 2024-2025

Contenu du module

* Ce contenu n'a pas été proposé par le

Chapitre 1 Pr. Hafid BENSAÏD

- ✓ Historique
- ✓ Définition des TRS
- ✓ But des TRS
- ✓ Classification des TRS

Chapitre 2 :

- ✓ Surfaces idéales
- ✓ Surfaces industrielles (réelles)

- ✓ Préparation de surfaces.
 - Dégraissage
 - Décapage
 - Polissage

Chapitre 3 :

- ✓ Traitements de surfaces par durcissement structurel
- ✓ Traitements de surfaces par diffusion
- ✓ Traitements de surface par conversion
- ✓ Traitements de surface par revêtement

Chapitre 4 :

- ✓ Aspect technique-économique des traitements et revêtements des surfaces.

Chapitre 1

1 - Introduction

- Les propriétés d'usage des matériaux sont très dépendantes de leur surface dans nombreux domaines d'utilisation, tels que : l'industrie chimique, la métallurgie, le transport, l'aéronautique, l'armement, le bâtiment, la production et le stockage d'énergie, les biomatériaux, etc.
- Ces propriétés sont alors influencées par le comportement physicochimique et mécanique de la surface.
- En effet, une des causes majeures de dégradation des matériaux à par origine des interactions de leurs surfaces avec le milieu environnant, il s'agit :
 - ✓ d'interactions mécaniques et thermiques : responsables de l'usure par frottement ou de fissuration par fatigue ;
 - ✓ d'interactions physicochimiques à l'origine des phénomènes de corrosion.
- La leur de charge émane aussi causée par la dégradation des matériaux suite à ces interactions rend nécessaire l'amélioration des propriétés des surfaces des matériaux, l'un des palliatifs les plus adéquats est l'application des traitements et revêtements de surface.

2- Definition des TRS

→ un traitement de surface est une opération mécanique, physique, chimique ou électrochimique qui a pour conséquence de modifier les propriétés de l'aspect de surface des matériaux. ~~composition~~

3- But des TRS

→ il est bien rare que la surface d'un matériau, telle qu'elle résulte de l'élaboration, transformation à chaud ou à froid, traitement thermique, satisfasse l'ensemble des propriétés requises dans le domaine d'utilisation.

→ le but d'un traitement de surface est de rendre le matériau apte à la ou les fonctions demandées. En d'autres termes, il permet d'améliorer les propriétés fonctionnelles de surfaces des matériaux, à savoir :

- ✓ La résistance à la corrosion dans les milieux agressifs
- ✓ La résistance à l'usure et l'aptitude au frottement,
- ✓ La résistance à la fatigue d'origine mécanique ou thermique
- ✓ L'aptitude à l'assemblage
- ✓ La biocompatibilité
- ✓ L'aspect et le pouvoir réflecteur.

4- Classification des TRS

→ hors des traitements et revêtements des surfaces ~~utiles~~ deux approches sont utilisées :

- ✓ Modification d'une couche superficielle du matériau par altération de la microstructure

b) Le traitement par diffusion, exp: la Cémentation et la nitration.

c)  Zone ou couche de diffusion.

d) traitement par conversion: chaux, électrolyse de la bauxite (ex: la phosphatation l'anodisation).

③ couche de conversion

d) traitement par revêtement, exp: étainnage, galvanisation, chromatation, etc.

④ couche de revêtement ou dépôt.

Chapitre 2

1 - Les surfaces idéales : notions de base

1-1. Definition

- La surface d'un corps correspond à une discontinuité dans l'arrangement périodique des ~~des~~ atomes et molécules.
- En surface. Le nombre de coordination d'un atome, c'est à dire le nombre d'atomes voisins les plus proches, et plus faible qu'en volume.

Exo: Pour le CC. ^{1er} coordination $\begin{cases} 8 \text{ en volume} \\ 4 \text{ en surface} \end{cases}$
Pour le CfC ^{1er} coordination $\begin{cases} 12 \text{ en volume} \\ 6 \text{ en surface} \end{cases}$

La conséquence de cette discontinuité:

- Pour retrouver les champs de forces magnétiques ils sont soumis, les atomes de surface vont tendance à échanger ou créer de nouvelles liaisons avec les atomes les plus proches voisins (que ce soit en surface ou en volume) avec des atomes ou des molécules de l'environnement. Il en résulte alors une grande réactivité de la surface qui va dépendre de l'environnement avec lequel le corps est en contact.

sur le plan topographique, une surface idéale, telle que peut apparaître au moyen d'outils de détection, puis, comme le microscope à effet tunnel, correspond à la surface d'un cristal dont l'orientation est bien définie par rapport à un axe cristallographique.

Si l'orientation de ce plan par rapport à un plan de grande densité atomique, on peut considérer trois catégories de surfaces :

Surface singulière : Elle est étrangement plane, dont l'énergie superficielle est nulle.

Surface vicinale : Elle est faiblement désordonnée par rapport au plan cristallographique le plus dense.

Surface complexe : Elle est fortement perturbée et caractérisée par une rugosité.

Sur le plan électrique, la création de surface génère altération des propriétés électriques du matériau : Les atomes de la dernière couche ont des électrons orbitales. Leurs fonctions d'onde interfèrent avec les fonctions des atomes voisins, il en résulte une structure tricouche du type "double couches" avec un excès - en dessus et déficit en dessous de la couche.

1-2- Propriétés énergétiques et phénomène d'adsorption

1-2-1- Energie de surface

- L'énergie de surface est la grandeur thermodynamique la plus importante dans l'étude des phénomènes de surfaces.
- L'énergie de surface (γ) correspond à l'excès d'énergie libre qu'il faut donner à une surface, solide ou liquide, pour augmenter l'aire d'un incrément (dA). L'origine de l'énergie de surface est la force entre les molécules.

$$dG = \gamma dA$$

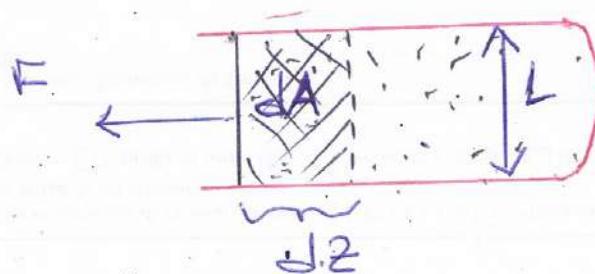
$$\gamma = \left(\frac{\partial G}{\partial A} \right)_{P,T,n} \quad [\text{J/m}^2]$$

1-2-2- Tension superficielle

- La tension superficielle est définie comme la force par unité de longueur qui correspond à l'énergie de surface d'un corps solide ou liquide.
- Cette notion permet de décrire facilement les effets de surface des liquides.

Ex.:

un film de savon, de longueur L , est étendu sur un tube (fil) en forme de U.



Pour augmenter la surface du film d'un increment

$$dA = L dz$$

Il faut faire pour un travail :

$$dw = F_s \cdot dz = -2\gamma L dz$$

avec

γ : l'énergie de surface

F_s : la force de traction appliquée pour éviter que la surface du film diminue.

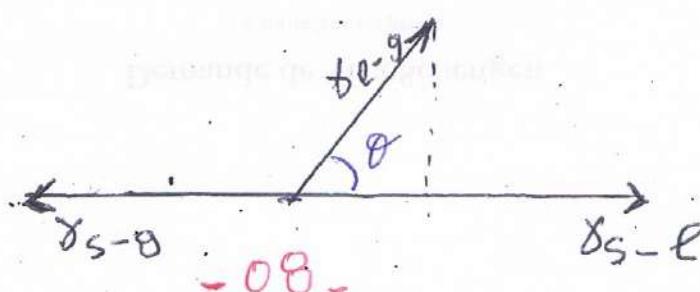
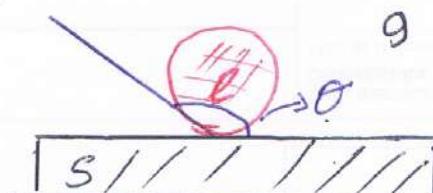
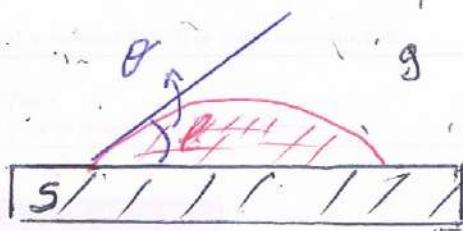
1.2.3. Mouillabilité

→ la mouillabilité caractérise la facilité avec laquelle une goutte de liquide s'étend ^{sur} une surface d'un solide.

→ La mouillabilité joue un rôle primordial dans l'application des revêtements ainsi que les opérations de préparation des surfaces (dégraissage et décapage)

→ Quand une goutte d'un liquide est disposée sur la surface d'un solide, elle va s'étaler et adopter (atteindre) un état d'équilibre.

→ On caractérise la mouillabilité par l'angle de contact (θ) qui résulte de l'équilibre des γ des trois interfaces:



γ_{s-l} : tension de l'interface sol - liquide

γ_{l-g} : tension de l'interface liquide - gaz.

γ_{s-g} : tension de l'interface sol - gaz.

On aura la relation suivante:

$$K_w = \cos \theta = \frac{\gamma_{g-s} - \gamma_{e-s}}{\gamma_{g-l}}$$

K_w est appelé coef. de mouillabilité; il varie de $-1 \rightarrow 1$.
Selon la valeur de ce coefficient la mouillabilité de la surface peut être définie comme suit:

$\theta = 0^\circ$: ces $\theta = K_w = 1$: mouillabilité parfaite (le liquide s'étale sur la surface solide d'une façon spontanée.)

$0^\circ < \theta < 90^\circ$: $0 < K_w < 1$: la mouillabilité est bonne. (c'est le cas des métal.)

$90^\circ < \theta < 180^\circ$: $-1 < K_w < 0$: la mouillabilité est mouillante.

$\theta = 180^\circ$: $K_w = -1$: pas de mouillabilité.

Remarques:

→ l'angle de contact θ traduit l'E fournie lors de l'étalement de la goutte.

→ la détermination de la manilleabilité consiste à mesurer l'angle θ . Deux types de méthodes sont utilisées :

* mesure statique : c'est la méthode de la greinte posée.

* mesure dynamique : c'est les méthodes tensionnelles

1-2-4- Adsorption sur les surfaces

→ A cause de leur réactivité importante, les surfaces se recouvrent rapidement d'atomes étrangers qui vont modifier profondément leur propriétés. On distingue alors :

* l'adsorbat : élément qui se fixe sur la surface

* l'adsorbant : surface solide (substrat).

→ Selon la T° , le type d'atmosphère et la nature du substrat on peut avoir une ou plusieurs couches adsorbées.

→ L'adsorption est un processus d'une grande importance dans les traitements et revêtements des surfaces. Car en présence d'adsorbat la réactivité de la surface est sensiblement modifiée.

→ Selon les énergies de liaison, on distingue deux types d'adsorption :

* la physisorption : c'est pour le cas des énergies de liaison $E \leq 0,5 \text{ eV}$, les liaisons sont du type Van der Waals.

* la chimisorption : ($E > 0,5 \text{ eV}$) est le cas de liaison par mise en commun du transfert d'é-

→ Le paramètre principal caractérisant l'adsorption est le taux de recouvrement de la surface de l'adsorbant par l'adsorbat.

$$\tilde{\Gamma} = \frac{A}{(1+A)}$$

A : la fraction atomique superficielle réelle (atomes adsorbés)

$(1+A)$: la fraction atomique superficielle maximale de l'espèce considérée

* le taux de recouvrement dépend de l'activité de l'espèce dans le milieu environnant, c'est à dire une P_i pour les gaz, une $\{ \}$ pour un liquide.

Pour les gaz :

$$A = \frac{P_i}{P_t} \exp \left\{ -\frac{\Delta G_i^{\text{ads}}}{RT} \right\}$$

P_i : pression partielle

P_t : pression totale

ΔG_i^{ads} : variation de l'énergie libre d'adsorption

Pour les liquides :

$$A = \frac{B}{(1+B)}$$

$$B = \left(\frac{c_i}{c_t} \right) \exp \left\{ -\frac{\Delta G_i^{\text{seg}}}{RT} \right\}$$

c_i : concentration de l'espèce i

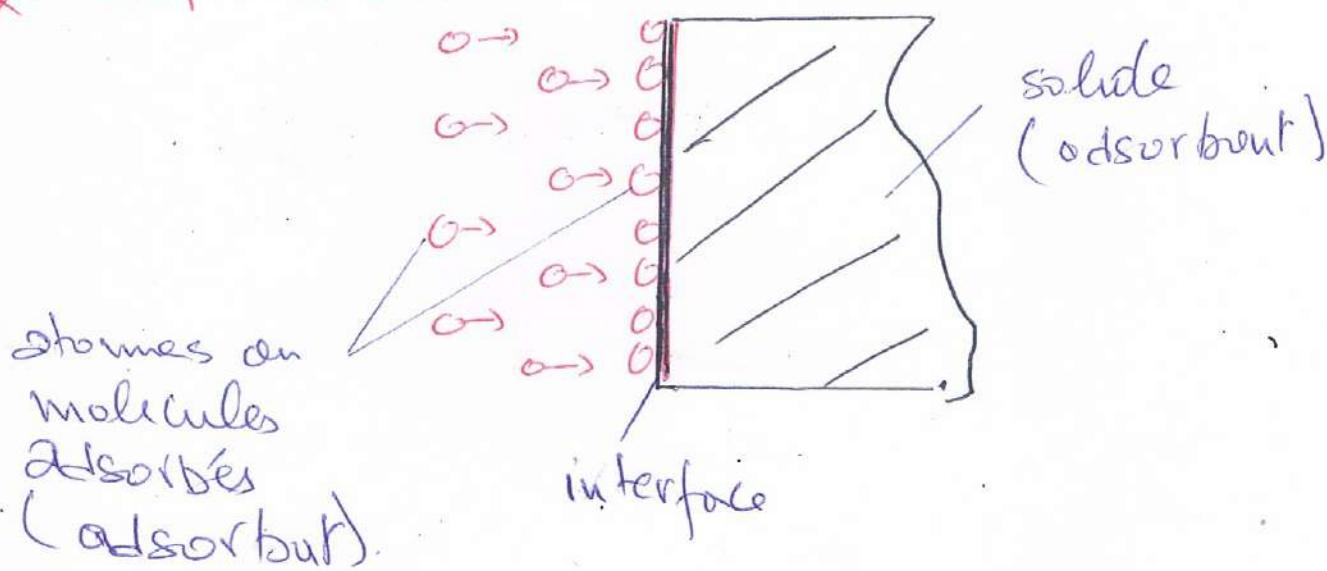
c_T : concentration totale

ΔG_{seg} : variation de l'enthalpie libre de ségrégation

→ L'adsorption peut modifier profondément :

- ✓ Le travail d'extraction des e^-
- ✓ La conductibilité électrique et magnétique.
- ✓ La réactivité (kinétique des réactions superficielles)
- ✓ Le traitements des surfaces.

* Adsorption sur un solide

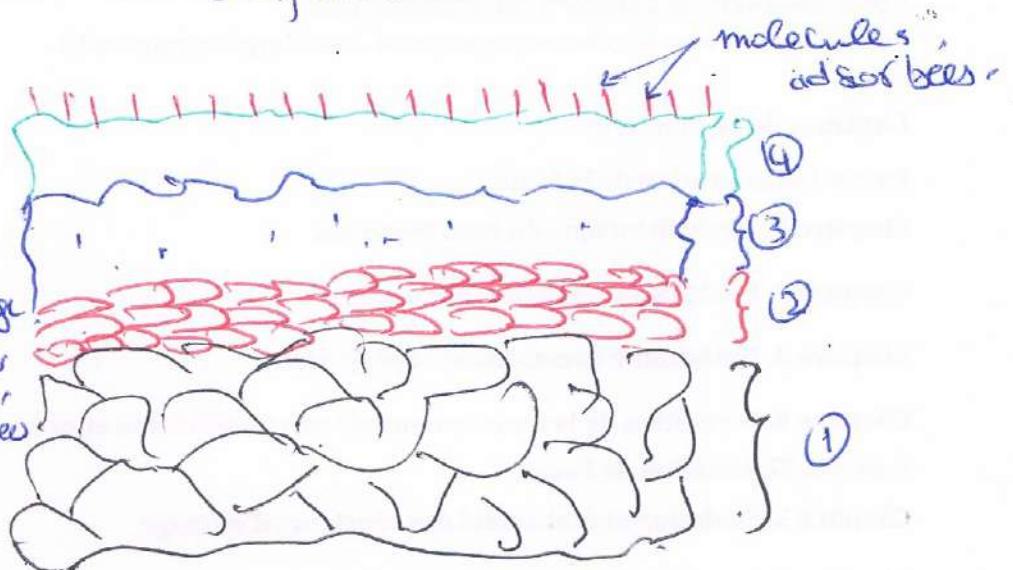


2- Les surfaces réelles (Industrielles)

2-1- Définition

- Par rapport aux surfaces idéales, les surfaces industrielles gardent l'empreinte du procédé de mise en œuvre à l'image de l'usinage à ouïe, la rectification, le laminage à froid, le meulage, etc.
- Les observations au microscope à balayage permettent bien de distinguer ces surfaces.

- ①- matériau de base
- ② zone affectée par usinage, polissage et diffusion des débris
- ③ et ④ : zones affectées chimiquement



Etat structural et analytique d'une surface industrielle.

2-2- Critères fonctionnels d'une surface industrielle.

2- Critères chimiques:

Les propriétés spécifiques d'une surface sont liées à la présence des couches d'oxyde, hydroxyde, films de nature organique, les couches adsorbées, etc. C'est un facteur qui limite l'adhésion.

b- Critères physiques:

Les critères les plus représentatifs sont la conductibilité thermique et le pouvoir réflecteur

c- Critères géométriques:

Il s'agit surtout de l'effet de l'irrégularité macroscopique et microscopique de la surface.

d- Critères mécaniques:

C'est les propriétés mécaniques telles que la résistance mécanique et le taux des contraintes résiduelles.

e- Critère métallurgiques:

c'est l'effet de la structure en métallographie et l'effet de l'environnement.

2-3- Propriétés des surfaces industrielles:

→ Les propriétés physicochimiques, structurales et électriques des surfaces diffèrent d'une manière notable de celles du matériau de base car la surface est une région frontière qui est le lieu de phénomènes spécifiques: meillage, adhésion, adsorption, oxydation, lubrification, choc thermique, etc.

L'effet des surfaces industrielles peut être défini par différentes manières:

Problematique

- structure de la surface
- temp. chaleur
- sterilisation

Aspect collant

- rugosité
- formation des oxydes
- propriétés de surface

Réactivité

- tension superficielle
- adsorption

Surface du matériau

Résistance à l'usure et au frottement

- usure par adhésion
- usure par abrasion
- usure par diffusion

Résistance à la corrosion

- corrosion chimique
- oxydation sèche

Résistance à la fatigue

Ces

compréhension de surfaces industrielles.

3. Préparation des surfaces.

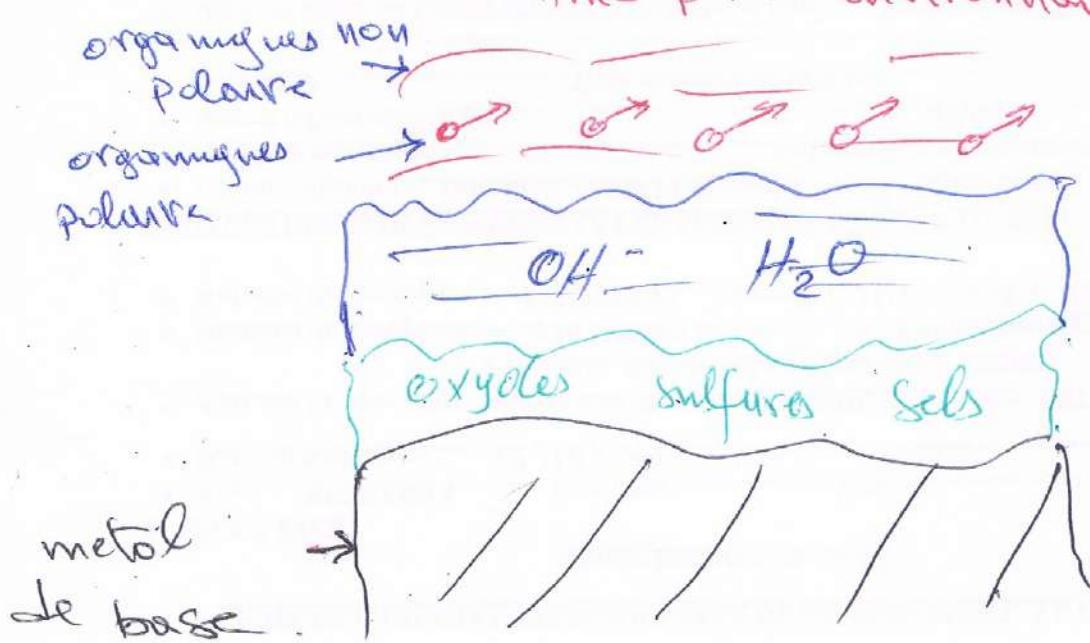
3-1- Surface contaminée.

→ D'une manière générale une surface industrielle ou réelle présente des contaminations différentes telles que : les poussières, les oxydes, les corps gras (huile et graisse), les sels minéraux, les vapeurs condensées, le CO_2 et les micro-organismes.

→ Ces contaminations sont indésirables car elles affectent les caractéristiques physico-chimiques, les propriétés électriques, les mesures des énergies de surface, etc.

La présence de ces contaminations diminue la粗糙度 de la surface et met en cause le rendement et la réussite des T.R.S. appliquées.

Atmosphère environnante.



Different types de contaminations sur une surface métallique.

3-2. Notion de surface propre.

- Tout traitement de surface doit être, impérativement, appliquée sur une surface propre.
- Une surface sera dite "propre" lorsque toutes, ou une partie, des contaminations indésirables auraient été éliminée en vue de satisfaire certaines exigences et rendre le matériau apte aux traitements visés.

3-3. Évaluation d'une surface propre.

- L'évaluation de la qualité ou la propreté d'une surface réelle s'effectue généralement au moyen de techniques simples et économiques. Ce sont des techniques non destructive peuvent être réalisées dans les ateliers, il s'agit des techniques environnement dans certains cas on fait appel à des équipements plus importants, il s'agit dans ce cas des techniques de laboratoire qui peuvent être destructives.

2. Méthodes de contrôle courant ou d'atelier:

- Ce type de méthodes permettent d'évaluer, sans contact, des propriétés très dépendante de la contamination superficielle. C'est le cas de la mesure de:
 - ✓ la rugosité
 - ✓ la tension au potentiel de surface
 - ✓ le pouvoir d'émission exothermique.

b- Méthodes de caractérisation au laboratoire

→ Ce sont des méthodes d'analyse basées sur spectroscopie des rayonnements et des flux de particules (ions, é) émis par la surface du matériau convenablement écraté.

Il existe différentes des méthodes physicochimiques d'analyse permettant d'avoir beaucoup d'informations sur la composition chimique de la surface et des couches adjacentes. C'est le cas de :

✓ la spectroscopie ESCA

✓ la spectroscopie Auger (AES).

✓ la spectroscopie de masse d'ions secondaire (SIMS)

✓ la spectroscopie vibrionnelle

✓ L'infrarouge

✓ la spectroscopie Raman.

3-4- Principales opérations de préparation des surfaces

→ Ces opérations peuvent être classées en deux catégories :

✓ techniques de nettoyage : Dégrossissage et découpage

✓ techniques d'amélioration de l'aspect : Polissage.

→ Tous les opérations sont suivie de la lessive, rinçage et séchage.

3-1-1-1 - le dégraissage

A - Définition.

→ L'opération de dégraissage a pour but d'éliminer les graisses et les huiles superficielles ainsi que les polluants solides tels que des fines métalliques et les poussières tout en évitant l'attaque du matériau de base (substrat).

→ Ce s'agit d'un traitement chimique ou électrolytique qui doit rendre la surface plus ou moins propre.

B - Types:

→ L'opération de dégraissage se divise en deux grandes classes.

✓ Prédégraissage: Il se fait avec des solvants ou avec des produits lessiviels qui contribuent à l'élimination de l'essentiel des polluants organiques.

✓ Dégraissage chimique (aqueux): Il se réalise dans des milieux aqueux avec finition souvent électrolytique qui permet de détruire les résidus des corps gras de faible épaisseur.

Remarque:

- En plus de ces deux procédés classiques, il existe actuellement des moyens plus modernes pour effectuer le dégraissage des surfaces métalliques, il s'agit de :
- ✓ l'utilisation des fluides cryogéniques (glace, CO₂...)
 - ✓ dégraissage assisté par plasma froid.
 - ✓ dégraissage assisté par ultrasons.

C. Critères du choix du mode de dégraissage:

- Le choix du mode de dégraissage se fait sur la base des critères suivants :
- ✓ la nature de la contamination superficielle en huile et graisse.
 - ✓ la nature du substrat (matériau de base).
 - ✓ le type de dégraissage

3-4-1-1- Le prédegraissage (dégraissage aux solvants)

- Cette opération permet d'éliminer de 95 à 98 % de la masse graisseuse, mais la surface du matériau reste toujours hydrophobe après cette opération ce qui la rend insuffisamment préparée pour recevoir un traitement ou revêtement de surface.
- le prédegraissage ou le dégraissage aux solvants fait appel à différents liquides organiques :

Les solvants les plus couramment utilisés sont :

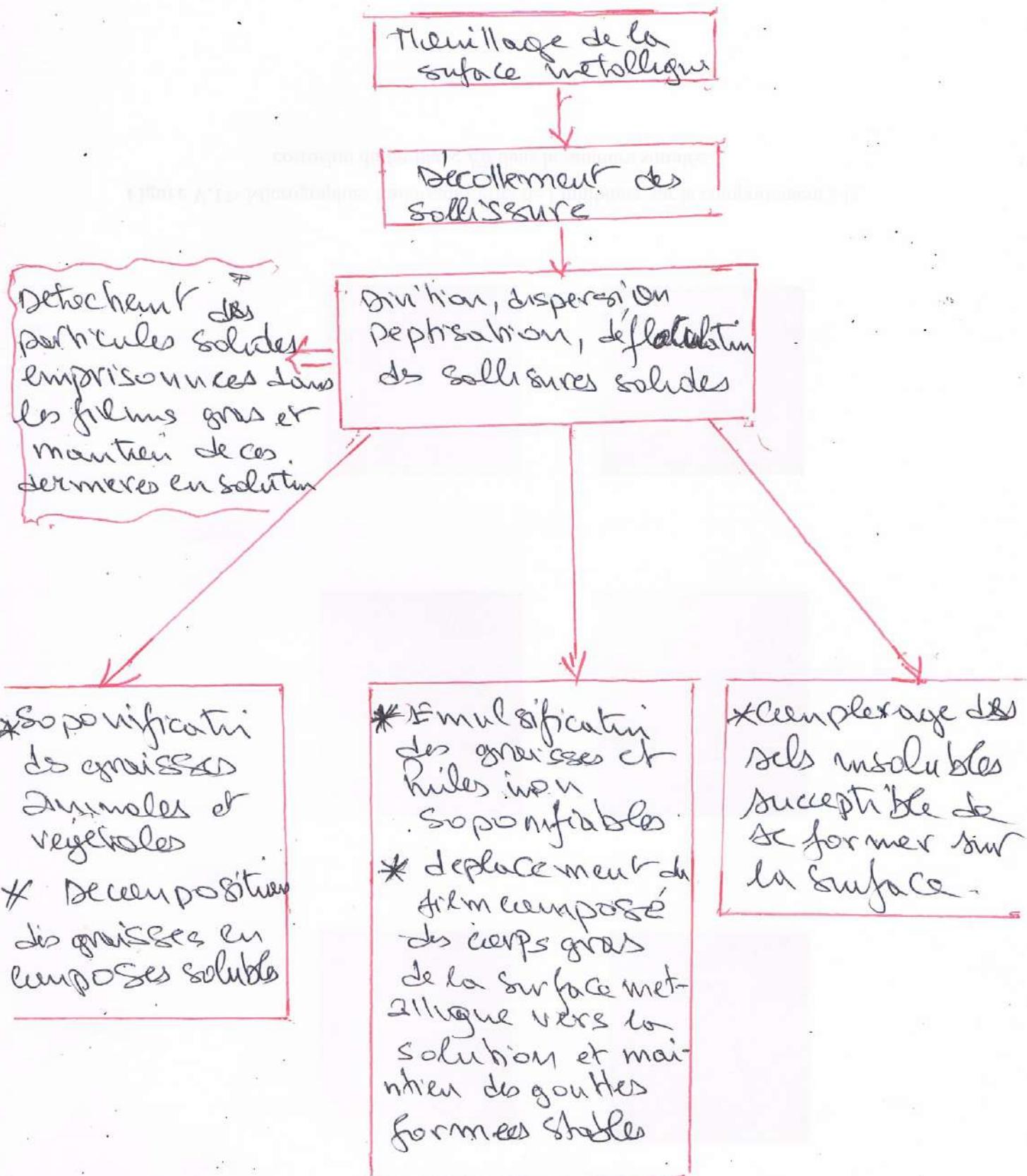
- les solvants chlorés
- les hydrocarbures
- les diuves oxygénés

- le predegrossage est souvent utilisé dans le cas des pièces fortement souillées, ce qui contribue à l'amélioration de l'efficacité et le rendement du degrossage chimique et électrochimique ultérieur.
- A l'échelle industrielle le degrossage aux solvants peut être appliquée par trois méthodes :
- ✓ le trempé (phase liquide).
 - ✓ la phase vapeur
 - ✓ la méthode mixte.

3-4-1-2 . Degrossage en phase aqueuse.

- Dans cette opération on utilise des solvants alcalines ou neutres.
- Le mécanisme de degrossage dans ce cas est basé sur la réalisation d'une émulsion (émulsification) par des phénomènes tensio-actifs et une saponification.
- Les phénomènes peuvent être accélérés par une polarisation de la pièce traitée : on parle dans ce cas d'un degrossage electrochimique ou electrolytique.

→ Les séquences du dégringlage changeant d'agent peuvent être représentées par le schéma suivant :



A) L'emulsification

→ L'emulsification → représente l'action principale du dégraissage huileux. Elle est due aux agents tensioactifs, appelés encore agents mauvillants ou surfactants.

→ Les agents tensioactifs permettent de rendre la surface mauvillable par la diminution de la pression de surface $\gamma_{\text{eau-solide}}$. (Augmentation de l'angle de coulomb θ entre la huile et la surface solide.)

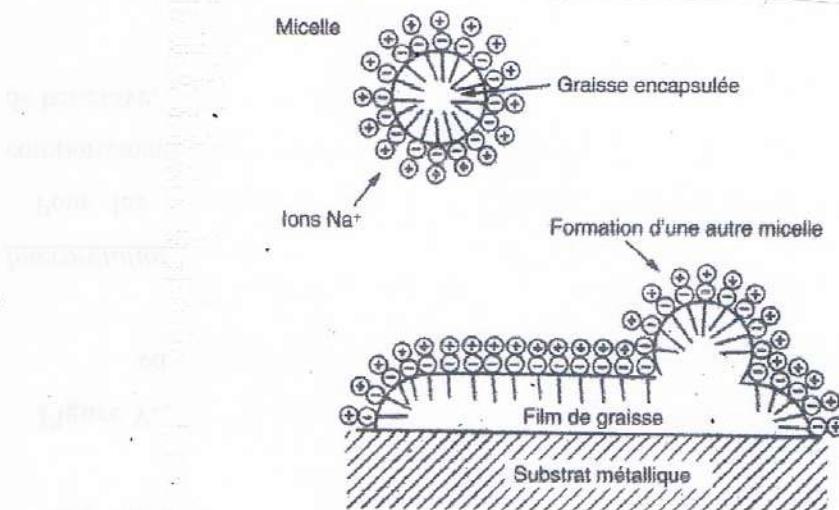
→ Il existe quatre catégories de tensioactifs

- ✓ tensioactifs anioniques
- ✓ " cationiques
- ✓ " amphoteriques
- ✓ " non ioniques

→ Les tensioactifs anioniques sont les plus utilisés pour leur bonne solubilité dans les milieux alcalins. Cela signifie que leurs propriétés tensioactives élevées et leur grande stabilité vers l'effet du pH et de la température.

La formation de micelles lors de l'procédé d'emulsification est décrite comme suit :

→ Le mécanisme d'émulsification, formation des micelles, peut être décrit comme suit.



B- La saponification

- La saponification est une réaction utilisée pour éliminer uniquement les huiles animales et végétales qui sont des huiles moins complexes que ceux industrielles.
- C'est une réaction chimique exothermique qui se réalise en présence d'une base forte (NaOH) : Elle donne naissance à un sel alcalin d'acide gras et la glycérine qui est un produit soluble dans l'eau.

3-4-1-3 - Degrissage electrolytique

→ Appelé encore dégrissage électrolytique, il s'agit d'un dégrissage alcalin auquel on superpose, aux actions habituelles, des réactions électrolytiques par application d'une différence de potentiel de charge.

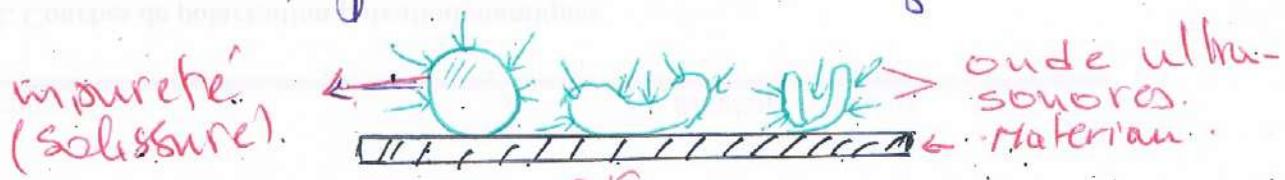
→ NB : les bains de dégrissage en phase aqueuse sont enrichis avec différents produits assurant à la fois l'émulsification, la solvatation et la dispersion des polluants.

3-4-1-4 - Degrissage assisté par ultrasons pour le vide

→ Le dégrissage assisté par ultrasons est utilisé dans le cas des petites pièces et de géométrie complexe.

→ Dans ce type de dégrissage, les turbulences créées par les ondes ultrasonores détachent et éloignent les contaminants et les impuretés des surfaces.

→ Le détachement des impuretés se fait selon le phénomène de cavitation par les ondes U.S. dont la fréquence est de $20-400\text{ KHz}$.



3-4-2 Le décapage.

3-4-2-1. Définition.

- Le décapage est la 10^{me} étape dans l'opération de ~~la~~ préparation des surfaces aITRS.
- Elle consiste à éliminer de la surface à traiter les différents oxydes et substances métalliques (engendrés ^{par} les étapes de préparation antérieures) tout en évitant tout risque d'altération de la surface.
- Il peut s'agir dans ce cas:
 - ✓ de l'élimination d'une couche d'oxyde formée sur les alliages ferreux (calamine), ce le procédé qui s'appelle "decalaminage"
 - ✓ de l'élimination d'une couche d'hydroxyde c'est le cas de la dépassivation des métaux.
 - ✓ de l'enlèvement des revêtements en démétallisation
- Le décapage est considéré comme une étape d'activation de surface, car il permet de l'activer pour qu'elle soit apte au TRS.

3-4-2-2. Types de décapage.

- Le décapage peut être classé en trois grandes familles.
 - Décapage chimique
 - " électrochimique
 - " mécanique

- Dans le découpage mécanique ou tronçonnage :
- le découpage par impacte.
 - " " au LASER
 - " " par plasma froid.

3-4-2-3 le ~~découpage~~ chimique:

A - Définition:

- Le découpage chimique consiste à éliminer la couche des oxydes de surface par dissolution, voir par échafaudement de la couche.
- Cette opération se fait par immersion du matériau dans des solutions aquatiques spécifiques ou par aspiration sur la surface.
- Les solutions utilisées dans le découpage chimique sont essentiellement acides car les oxydes des métaux présentent généralement un caractère basique ou amphotère.

B - Choix des solutions de découpage:

- Le choix des solutions utilisées pour le découpage chimique dépend de :
- ✓ la nature et la composition chimique du matériau à découper (car dans certains cas il existe certains composés ou éléments d'addition qui favorisent l'attaque).
 - ✓ l'état de surface initial du matériau, en d'autres termes, la nature et la quantité des produits à éliminer.

✓ la présence ou non des assemblages de structures car ils représentent des structures hétérogènes.

Remarque

→ Pour ajuster l'attaque chimique et éviter l'attaque du matériau de base (substrat) on ajoute aux solutions de décapage des composés chimiques pour stopper les réactions et limiter l'attaque, il s'agit des inhibiteurs de corrosion.

C - Paramètres influençant l'efficacité du décapage

* la concentration de la solution : Il existe une concentration dite "optimale" au-delà de laquelle l'efficacité des éléments décapants n'augmente pas.

* la température : est un paramètre important car il augmente la vitesse des réactions de décapage ainsi que la solubilité des produits (sels) formés. D'autre part, elle peut favoriser l'émission des vapeurs toxiques.

* L'agitation : le mécanisme d'agitation influe principalement sur les mécanismes de transport dans la solution. D'une part elle aide et facilite le dégagement de H_2 et d'autre part elle favorise le détachement des particules d'oxyde. Elle permet également de régénérer la solution au niveau de la surface.

D. Contrôle des solutions de décapage.

→ Quelque soit le matériau utilisé, la durée de décapage augmente avec la présence de certains ions métalliques provenant de l'attaque chimique du matériau décapé.

→ En revanche, cette efficacité diminue avec la présence d'autre ions (tel que les Fe^{3+} pour le cas du fer) qui favorise les réactions d'attaque.

→ La réalisation d'un décapage correct nécessite un suivi régulier de :

- ✓ La concentration des éléments chimiques
- ✓ l'acidité (pH) du milieu décapant
- ✓ la température.

→ Pour assurer une bonne efficacité (γ^1)

du décapage chimique ainsi qu'une bonne maîtrise de l'impact écologique, on doit éliminer en continu une partie du bain usagé et l'ajout de produits neufs (ré génération des bains).

E. Differentes compositions des bains de décapage.

* Alliages ferreux

✗ Bains à base d'acides minéraux

• H_2SO_4 : T_c 25-60°C, \mathcal{C} 10-15% en volume

• HCl : T_c 25-85°C, \mathcal{C} 20-50% en volume

• Tétrabrochifs + multibrochifs.

→ Dans le cas de l'acier inox on utilise comme acides, l'acide nitrique (HNO_3) ou l'acide fluorhydrique (HF) .

* Alliages d'Alumin

- + Mélange sulfophénique ($CrO_3 + H_2SO_4$) : $T_c = 60 \text{ à } 70^\circ\text{C}$
- + Mélange fluorhydrique ($NO_3H + HF$) : $T_c = 20^\circ\text{C}$
- + Acide phosphorique (H_3PO_4) : $T_c = 50^\circ\text{C}$
- + Mélange ternaire ($H_3PO_4 + H_2SO_4 + NaHF$) .

* Alliages du zinc :

- + H_2SO_4 (1% en volume), HCl (3% en volume)
Acide fluorborique HFB_4 (3% en volume).

3-4-2-4- Le décapage electrolytique

- Le décapage électrolytique ou électrolytique se réalise dans des solutions acides ou basiques.
- On distingue deux types de décapage électrolytique : anodique et cathodique .

A-Décapage électrolytique anodique:

- Dans ce cas on utilise sur l'acier, représenté par le matériau à décapé, l'effet de l'oxydation; le dégagement de O_2 favorise le décollement de l'oxyde aussi .

que sa transformation à un degré d'oxydation plus supérieur ce qui va le rendre plus soluble.

* L'inconvénient de ce type de décapage est la possibilité d'avoir le risque d'attaque du substrat. Cependant, il présente l'avantage d'absence de risque de la fragilisation par hydrogène.

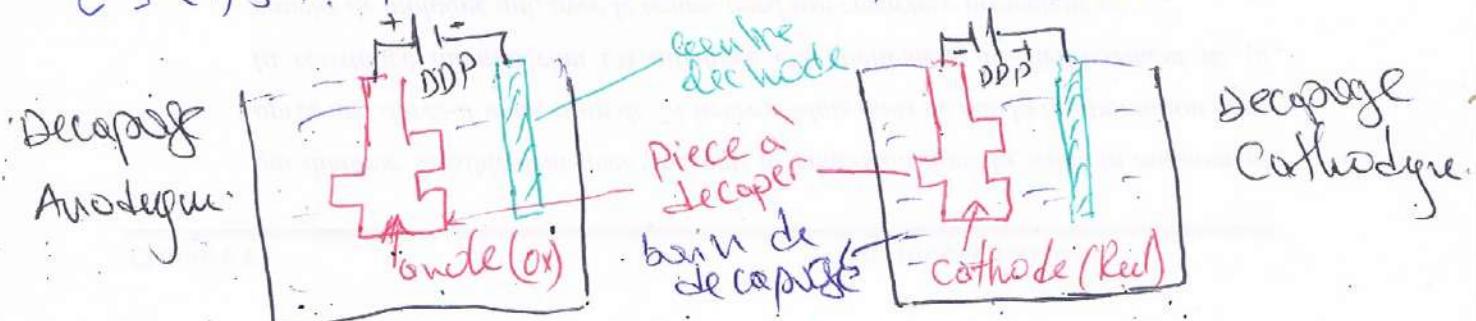
B- Décapage cathodique

→ Dans ce mode de décapage le matériau à décapier représente la cathode de la cellule electrolytique. Sur les sites cathodiques (sites de réduction) on utilise l'effet mécanique du dégagement d' H_2 lors de la réduction. Le dégagement de bulles d' H_2 va provoquer le décollement des oxydes.

→ Le décapage cathodique présente l'avantage d'avoir un bon état de surface avec absence des risques d'attaque du métal de base. Cependant, l' H_2 dégagé peut provoquer le phénomène de fragilisation du matériau.

Exemple:

Décapage de l'acier au carbone dans de l' H_2SO_4 12.75%. $t_c = 20 \pm 60^\circ C$, $I = 20 A/dm^2$.



3-4-2-5 - Décapage mécanique

- Le but de ce mode de décapage est d'enlever la couche d'oxyde adhérente à la surface par action mécanique.
- Elle peut être effectuée de différentes manières. En plus du brossage, nous avons à citer : le décapage par impact, par LASER et par plasma.

A - Le décapage mécanique par impact

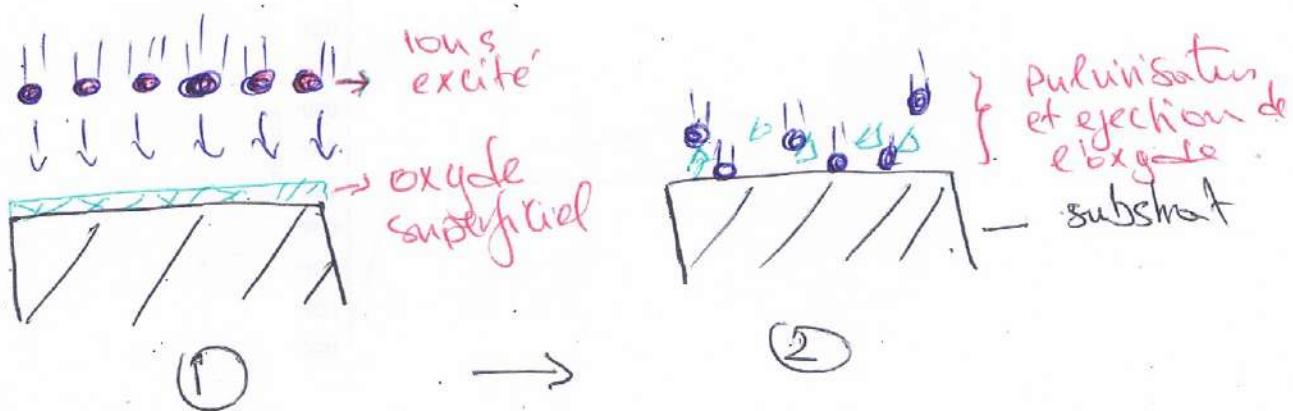
- Le traitement par impact peut se réaliser manuellement ou par voie automatisée dans les équipements appropriés.
- Les étoffages utilisés, qui sont l'outil de décapage, peuvent être naturels (sable, etc.) ou synthétiques (verre, corindon, carbure de silicium). Sans oublier les grenailles métalliques et les billes de glace et carbone de glace.
- L'opération de décapage se fait par friction de l'étoffage choisis sur la surface oxydée par voie pneumatique, mécanique ou par turbine.
- Dans le cas de l'utilisation du sable comme étoffage on parle du sablage.
Dans le cas de l'utilisation des grenailles métalliques ou parle du grenailage.

B- Décapage par LASER.

- Le principe de nettoyage de surface par LASER est basé sur une réaction photomécanique induite par l'interaction entre le faisceau issu d'un LASER (à impulsion courte et forte puissance) et une surface.
- La forte énergie absorbée par la surface du matériau engendre un plasma au niveau des oxydes de la surface et lors de sa détente ce plasma provoque une onde choc qui fragmente et éjecte la couche d'oxyde superficielle.
- Le domaine privilégié pour l'application de ce mode de décapage est la préparation des surfaces des moules dans l'industrie du verre et la plasturgie.

C- Décapage par plasma froid.

- Ce décapage se réalise par un gaz ionisé (Ar, He, etc.)
- Les ions ou molécules du gaz excités perdent leur énergie d'excitation par collision avec la couche d'oxyde superficielle ce qui conduit à ~~sa~~ sa pulvrisation (bombardement ionique).



3-4-3 Le Polissage.

3-4-3-1 Définition.

→ Le polissage est une opération de finition, son but est de réduire au maximum la rugosité de surface et de modifier sa topologie en éliminant les défauts superficiels mis en évidence par les opérations de préparation antérieures. Ces défauts se présentent généralement sous forme de fissures, de porosité ou d'inclusions.

→ On distingue trois types de polissage :

- ✓ Polissage mécanique
- ✓ Polissage électrolytique
- ✓ Polissage chimique.

3-4-3-2. Le polissage mécanique.

→ C'est une technique très ancienne de mise en œuvre des surfaces.

→ Selon le type d'application visée on distingue :

* le polissage speculaire ou scientifique : il est utilisé principalement pour la préparation des surfaces en vue d'observation microscopiques (metallographie). La rugosité ne doit pas dépasser les $0,01 \mu\text{m}$.

* le polissage industriel : il se décompose en plusieurs étapes : le degrossissage avec bandes abrasives ou meules et finition par différentes techniques (tamponnage, brossage et lavage..).

A- Propriétés des surfaces polies.

- un polissage mécanique soigné augmente la résistance à la corrosion atmosphérique par:
 - diminution des sites anodiques
 - formation sur la surface polie d'un film d'oxydation imperméable.
- un polissage mécanique soigné permet également d'avoir un revêtement de décoration d'une bonne continuité et d'une bonne adhérence et brillance.

B- Outils et abrasif de polissage.

- Les principaux outils utilisés dans le polissage sont:
 - * Les meules et brossettes
 - * Les bandes et papier abrasif
 - * Les disques en feutres
 - * Les tampons (empilement de rondelles de tissus que l'on mélange de graisse et particules abrasif fines).
- Les principaux abrasifs utilisés sont:
 - le quartz, l'alumine Al_2O_3 (corindon naturel) et corindon artificiel (Alumine + silice + oxyde d'uranium + titane), le carbure de silicium, le diamant industriel (sous forme de pâtes diamantées).

3-4-3-3. Le polissage électrolytique.

- Le polissage électrolytique ou l'électropolissage est une opération de finition qui permet d'avoir un état de surface incomparable.

→ le principe de ce mode de polissage consiste à plonger la pièce à polir dans une solution électrolytique spéciale. La pièce représente l'anode dans la chaîne électrochimique. L'action du courant électrique permet de dessoudre le matériau et les impuretés éventuellement présentes à la surface.

→ La dissolution se fera d'abord sur les bavures et les angles vifs où parlera donc d'un ébavurage électrochimique.

→ Les produits de cette dissolution conduisent et contribuent à la formation d'une couche visqueuse relativement épaisse autour de l'anode (la pièce) ce qui facilite l'égalisation des irrégularités de surface, comme le montre le schéma suivant:



CHAPITRE 03

Les traitements et revêtements de surface

1. Les classes

- selon le mécanisme d'édification des couches les traitant de surfaces peuvent être divisés en 4 grandes classes :
 - ✓ traitements des surfaces par durcissement structural.
 - ✓ traitements des surfaces par diffusion
 - ✓ traitements des surfaces par éversion.
 - ✓ Revêtements

1.1. Les traitement par durcissement structural :

- Dans ce type de traitements il n'y a pas de matériau d'apport.
- La modification de la surface (transformation de la structure) se fait par action mécanique ou par action thermique.
- L'application de ce type de traitement assure une amélioration de la résistance mécanique de la surface

A. Transformation structurale d'origine mécanique

- hors de ce traitement la transformation de la structure de la surface du matériau traité se fait par une action mécanique selon différents procédés : grenatillage, grilleage, choc LASER, etc.

→ Ces traitements sont utilisés surtout pour :

- ✓ améliorer la tenue à la fatigue
- ✓ améliorer la résistance à la corrosion sous contraintes

B - Transformation structurelle d'origine thermique :

→ c'est le cas des traitements thermiques qui sont le résultat d'un chauffage de la surface (apport énergétique superficielle) par différentes techniques suivie d'un refroidissement. La température superficielle étant l'exemple le plus courant.

→ Le chauffage de la surface peut être effectué par des sources thermiques différentes, à savoir :

- ✓ flamme : chlorure de calcium, oxyacétylique
- ✓ étincelle magnétique : classique ou à impulsion
- ✓ laser et faisceau d'é.

→ Ces traitements sont applicables surtout aux aciers au carbone utilisés dans l'industrie automobile, la construction mécanique, etc.

→ L'avantage principal de ces traitements est la possibilité d'avoir un matériau tenace à cœur et aussi dur que possible en surface.

1-2 - Traitement par diffusion.

→ Dans ce type de traitement d'apport peut être un métalluide (C, etc.) ou un métal. On distingue ainsi les familles suivantes :

A-Traitements par diffusion des métalloïdes.

- Cette filière regroupe les procédés des traitements thermochimique tels que la cémentation, la nitruration et les procédés mixtes (carbonitration, etc.).
- Les traitements thermochimiques sont largement utilisés dans le domaine de la construction mécanique, le transport et l'aéronautique.
- Ces traitements sont utilisés surtout pour améliorer la tenue à la fatigue et la résistance à l'usure.

B-Traitement par diffusion des métaux.

- Ce type de traitement est basé sur la diffusion des métaux tels que le Cr ou l'Al afin d'améliorer la résistance à la corrosion des aciers et des alliages du Ni.
- Ils peuvent être des traitements mixtes tels que le ~~chromo~~aluminisation.
- Les traitements par diffusion des métaux sont des traitements de dépôt chimique en phase vapeur.
- Diffusion de l'Al → Aluminisation
- Diffusion du Cr → Chromisation
- Diffusion de Cr et Al → Chromaluminisation

C - Traitement par implantation et mélange ionique.

- C'est le domaine des traitements par faisceaux d'Éléments lesquels des ions, sélectionnés et accélérés à des basses pressions, s'implantent dans la surface du matériau à traiter
- Cette implantation permet de modifier certaines propriétés fonctionnelles du matériau telles que la résistance au frottement ou la tenue à la corrosion selon la nature de l'espèce implantée.

1 - 3 - Traitement de conversion.

- Ce sont des traitements pour lesquels le métal d'upport réagit superficiellement avec le substrat pour conduire à la modification structurelle visée.
- On distingue trois différents types de conversion:

* La conversion chimique

- C'est le résultat d'un attaque chimique du matériau à traiter. Nous avons comme procédés:

- ✓ la phosphorylation
- ✓ la chromation
- ✓ l'oxalation
- ✓ les procédés mixtes

- Le traitement de conversion chimique permet généralement d'augmenter la résistance au frottement, la résistance à la corrosion et l'accrochage des dentaires.

* La conversion électrochimique

- Ce traitement est le résultat d'une attaque ou oxydation électrochimique (par voie électrolytique). Nous avons dans ce type de traitement la conversion par anodisation et double anodisation, la sulfuration, etc.
- Ce traitement est utilisé pour améliorer la tenue à la corrosion et la résistance à l'usure.

* Conversion par voie gazeuse:

- Ce traitement de conversion concerne la décoration par oxydation sèche et la fonctionnalisation des surfaces par plasma froid. Il est utilisé surtout pour l'amélioration de l'aspect esthétique dans l'architecture des divers IMX.

N.B.:

- * Les traitements par conversion chimique sont utilisés pour assurer:
 - ✓ la bonne adhérence des polymères et céramiques.
 - ✓ la biométrie.
 - ✓ la bonne résistance à la corrosion
 - ✓ la bonne tenue à l'usure
 - ✓ le bel aspect

- * Les GCS sont utilisés dans plusieurs domaines tels que: l'industrie automobile, la bijouterie, les biomatériaux, l'aéronautique et l'architecture.

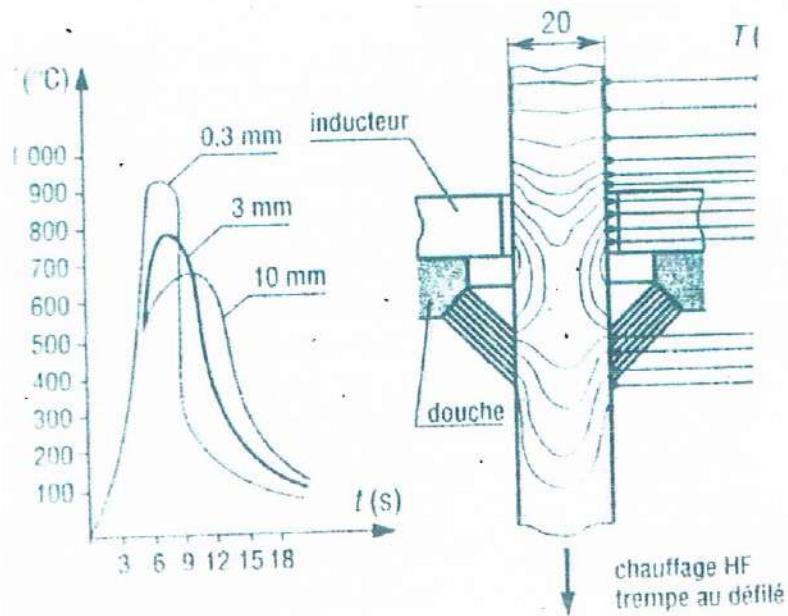
2- Traitement superficiel par induction.

2-1- Définition.

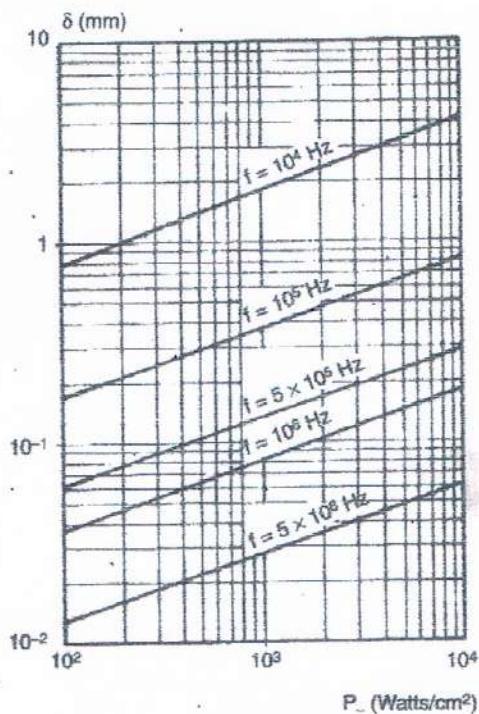
→ Dans ce type de traitement le durcissement structural est apporté par voie thermique en utilisant la transformation martensitique ($\gamma \rightarrow \alpha$) issue chauffage rapide suivi d'un refroidissement énergique de la surface du matériau.

2-2- Principe.

- La pièce à traiter est placée dans un champ magnétique
- Le champ magnétique est créé par une bobine (inducteur) parcourue par un courant de fréquence (f) de quelques Hz à quelques centaines de KHz
- La pièce à traiter joue le rôle de la bobine secondaire d'un transformateur alors que l'inducteur alimenté par le courant joue le rôle de la bobine primaire.
- Le chauffage de la pièce, assuré par les courants induits par le champ magnétique, est suivi par un refroidissement rapide à l'aide des rampes d'arrosage ou douche.
- Le principe de la trempage superficielle par induction magnétique est représenté par la figure suivante.



✓ Procédés de transformation (durcissement) structurale : Chauffage par induction



Évolution de la pénétration δ en fonction de la puissance P_0 pour différentes fréquences f (8).

-43 10's ~

2-3- Paramètres.

- L'induction magnétique reste, pour l'instant, le moyen de chauffage le plus utilisé.
- Le chauffage du métal dans ce type de procédés résulte principalement du double phénomène :
 - ✓ L'échauffement direct et rapide du matériau par les courants induits sur une profondeur de chauffe S qui dépend de la puissance et de la fréquence du courant.
 - ✓ L'échauffement par conduction thermique des couches sous-jacentes à l'épaisseur de la pénétration des courants (δ). Ce chauffage thermique par conduction dépend de la conductivité thermique (λ) du matériau et du temps de chauffage.
- La profondeur conventionnelle de pénétration des courants induits (δ) peut se formuler comme suit :

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{f}{\mu f}}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\lambda \mu f}}$$

avec :

δ : profondeur de pénétration en [mm]

f : fréquence du matériau [Hz. m³].

μ : perméabilité magnétique du matériau au "le point de Curie C" (Pour les aciers C = 770°C)

f. La fréquence du courant d'alimentation de l'inducteur. [Hz].

NB: le point de curie "C" et la température à partir de laquelle le métal perd son magnétisme.

→ la profondeur de pénétration (δ) peut être reliée à la puissance spécifique unité comme suit:

$$\delta = 38 P_0^{1/3} \left(\frac{1}{f}\right)^{2/3}$$

✓ δ en [mm].

✓ P_0 en [W/cm^2] et la puissance unité.

→ la température (θ_0) à la surface soumise à la puissance spécifique (P_0) est reliée à la fréquence (f) et la diffusivité thermique du métal (α), par les relations suivantes :

$$\theta_0 = \sqrt{2} \cdot \left(P_0 / \lambda \cdot \alpha \right)^{1/2}$$

$$\alpha = \lambda / \rho c$$

Avec

α : diffusivité thermique;

C : capacité calorifique en [$\text{Kj} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

λ : conductivité thermique en [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

d : masse volumique en $\{ \text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \}$.

T : temps de chauffage en $\{ \text{s} \}$.

Exemple:

→ Pour un acier au carbone :

$\lambda = 0,5$; $c = 0,7$ et $d = 7,8$ nous avons

$$\boxed{\theta_0 = 0,85 P_0 \sqrt{\tau}}$$

Remarques:

→ En fonction des données précédentes, il est possible de construire des abaques qui fournissent avec une bonne approximation les valeurs des paramètres : P_0 et θ pour une fréquence f et une valeur déterminée de δ .

→ L'utilisation pratique de ces abaques permet de choisir, pour une épaisseur de trempage déterminée, la fréquence (f) la plus adaptée pour une productivité industrielle (χ).

Exemple:

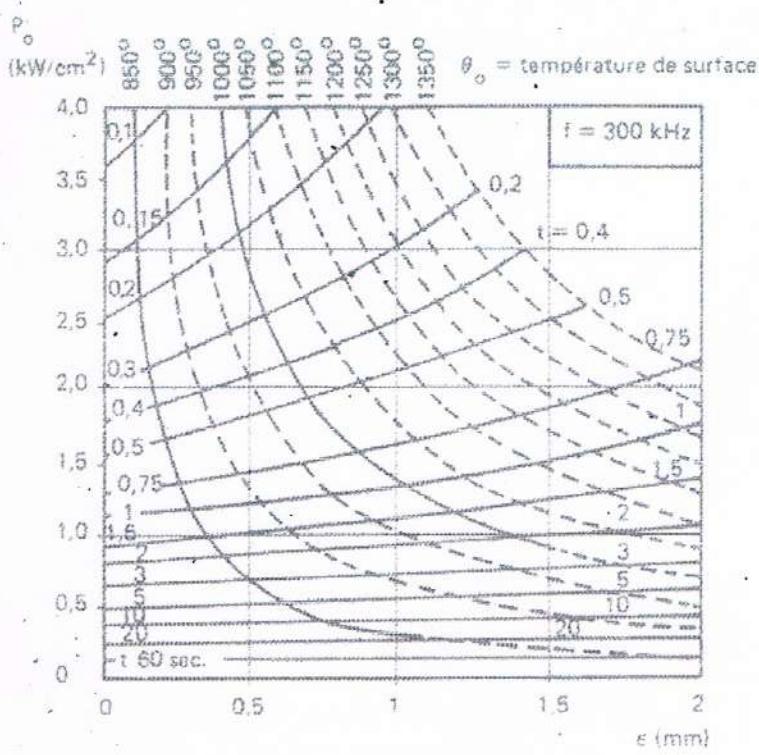
Pour une épaisseur de trempage $\delta = 1 \text{ mm}$
une θ maximale $\theta = 850^\circ \text{C}$

La comparaison entre les fréquences utilisées donne :

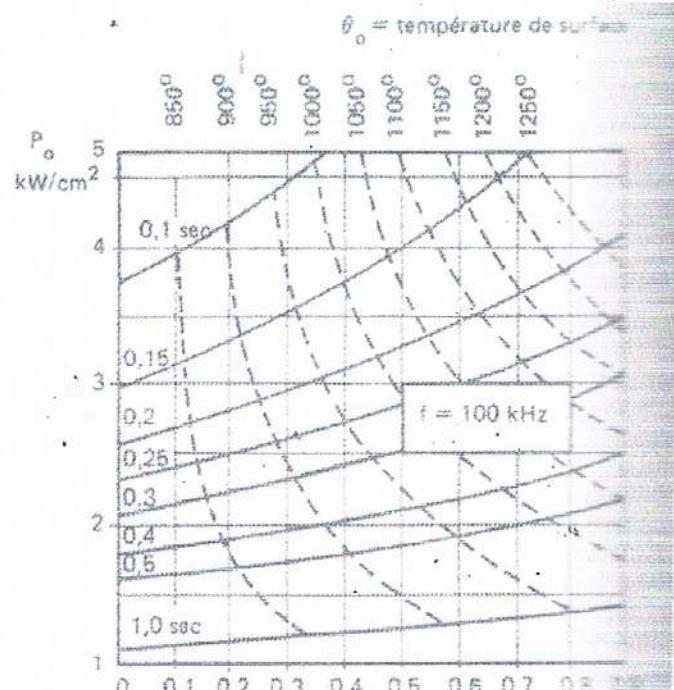
✓ Pour $300 \text{ kHz} \rightarrow P_0 = 0,25 \text{ Kw.cm}^{-2}$, $\tau = 3 \text{ sec}$

✓ Pour $10 \text{ kHz} \rightarrow P_0 = 3,75 \text{ Kw.cm}^{-2}$, $\tau = 0,8 \text{ sec}$

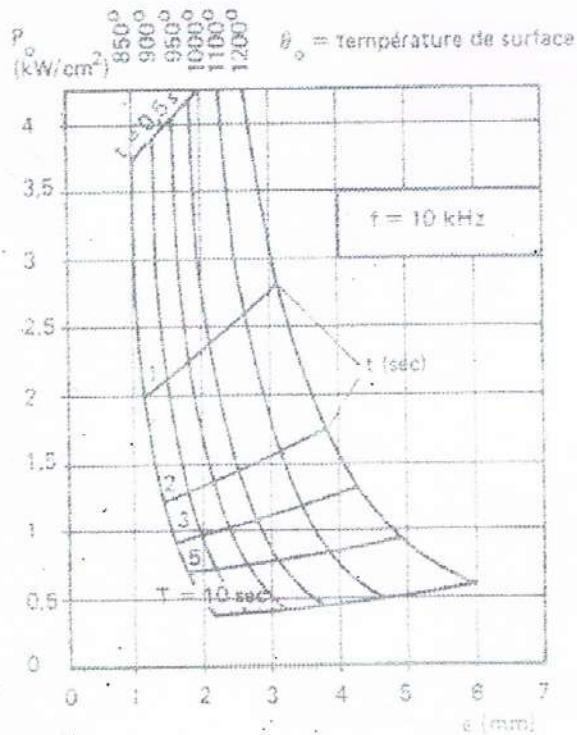
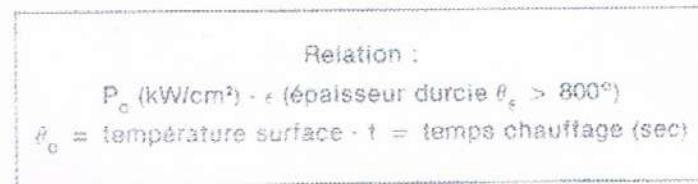
Nous remarquons que pour une fréquence $f = 10 \text{ kHz}$ la dépense d'énergie est exagérée donc on utilise la $f = 300 \text{ kHz}$ pour avoir l'épaisseur $\delta = 1 \text{ mm}$ (voir abaques, figures suivante).



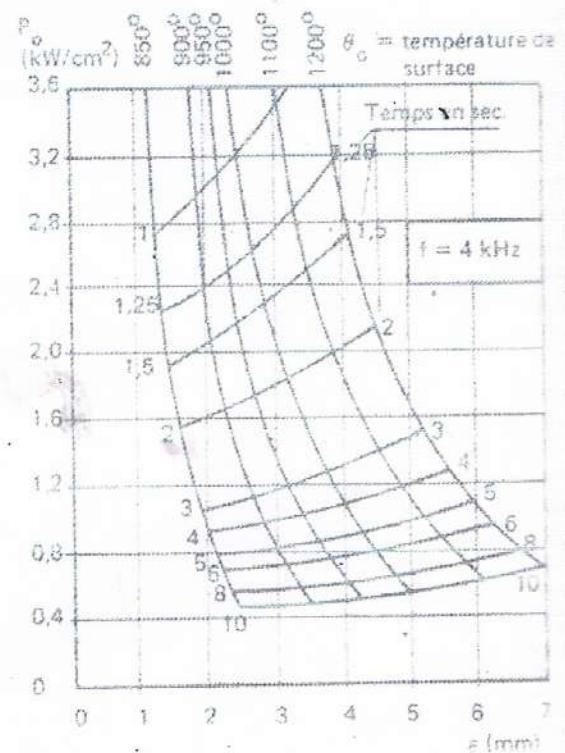
a) Fréquence de 300 kHz



b) Fréquence de 100 kHz



c) Fréquence de 10 kHz



d) Fréquence de 4 kHz

3- Revêtement par projection thermique :

Un procédé de revêtement comporte 3 étapes :

- 1 - Production ou synthèse de l'espèce à déposer,
- 2 - transport de l'espèce à déposer vers le substrat,
- 3 - dépôt sur le substrat et croissance de la couche.

3-1 Principes :

De ce type de procédé, des particules finement divisées d'un matériau, métallique ou non métallique, à l'état fondu, sont projetées à grande vitesse par un jet de gaz sur un substrat convenablement préparé.

On distingue :

- projection par jet de plasma,
- projection par gaz de combustion et N_2 .

3-2 Projection par jet de plasma :

- hors de ce procédé, un gaz, N_2 ou Ar, traverse un arc électrique où il s'ionise.
- on obtient un plasma partiel qui atteint de 6° pourtant de passer les $10\ 000^{\circ}$.
- ces vitesses sont supersoniques,
- la poudre du matériau à projeter est injectée dans le jet gazeux. Elle se transforme en fines gouttelettes liquides entraînées à des grandeurs vise vers le substrat
- la granulométrie de la poudre est un facteur très important
 - | une poudre trop fine se vaporise,
 - | une poudre trop grossière ne se fond pas.
- le schéma d'une torche à plasma est représenté sur la diapositive suivante. -47-

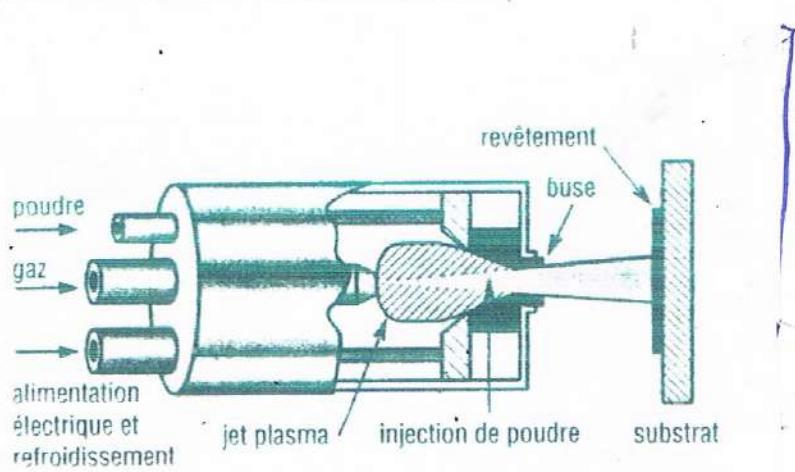


Figure 1 : Torche de projection thermique par jet de plasma

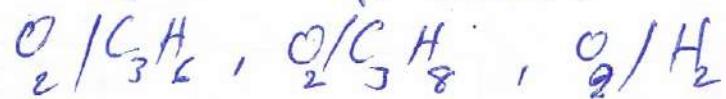
3.3 Projection par gaz de combustion à grande vitesse.

Il existe :

- le procédé à combustion en filet
- le procédé à combustion pulsée

3.3.1 Procédé à combustion continue

→ Dans ce procédé la poudre du revêtement est injectée, axiallement et entraînée par le gaz produit par la combustion du mélange sous pression.



→ $t^{\circ} \approx 2750^{\circ}$, $V_{ss \text{ gaz}} \approx 1200 \text{ à } 2200 \text{ m.s}^{-1}$

$V_{ss \text{ poudre}} = 250 \text{ à } 800 \text{ m.s}^{-1}$.

→ La combustion continue sous pression donne une flamme stable échauffant fortement le substrat.

→ Le fonctionnement exige un système très efficace (possibilité de dissipation thermique et modification chimique des micros structures).

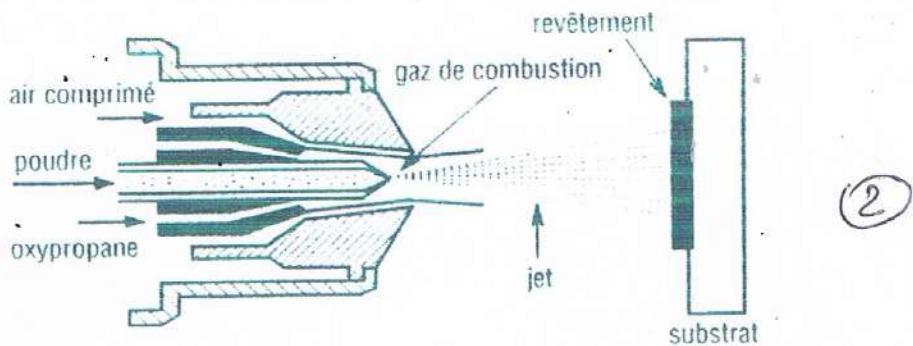


Figure 2 : Torche de projection à combustion continue (HVOF)

3.3.2 Procédé à combustion pulsée : canon à détonation

* Les incinérements de la combustion continue n'existe plus pour le canon. Mais la température dépasse rarement les 1500°.

Les distorsions thermiques sont pratiquement inexistantes et la microstructure n'est pas modifiée.

* Avec ce procédé on peut réaliser des revêtements WC-Cr de fusion sur des substrat à bas point de fusion (alliage d'Al.)

3.4 Caractéristiques des revêtements

- les particules fondues décrivent à grande vss sur le substrat en donnant des plaquettes mince qui s'adapte à la géométrie de la surface sous-jacente sans s'agglomérer.
- En s'empilant les unes aux autres elle forme après refroidissement une couche stratifiée.
- les dépôts obtenus présente certains défauts.
 - particules non fondues ou oxydées
 - cavités ou pores. figure 3.
- la liaison entre le dépôt et le substrat est du type mécanique.

→ La préparation de la surface du substrat est un paramètre très important qui conditionne l'adhérence du revêtement. Elle comprend les étapes suivantes.

- ✓ décapage chimique et sablage afin d'augmenter la porosité par usinage grossier.
- ✓ application d'une mince couche de liaison (Ni, Al, Ti)
- ✓ Préchauffage

→ La qualité du dépôt dépend du procédé également.

- ✓ La projection à combustion à grande vitesse donne un revêtement de faible porosité, de faible densité en oxydes et de faibles concentrations résiduelles

→ L'épaisseur du revêtement ou du dépôt varie quelquefois jusqu'à 25 mm.

→ Les pièces à traiter par la projection thermique peuvent avoir des dimensions et géométrie différentes

L1-L4 - Applications

Le traitement par projection thermique est utilisé pour:

- ✓ Augmenter la résistance à l'usure

- ✓ Augmenter la résistance à la corrosion

- ✓ L'installation de barrière thermique.

- ✓ La remise aux normes par rechangement

Traitement par revêtement électrolytique = Dépôts électrochimiques

Part

- Les procédés électrochimiques produisent des revêtements à partir d'un électrolyte aqueux, organique ou fondu
- Les dépôts électrochimiques les plus fréquents sont :
 - les métalliques
 - les alliages métalliques
 - les composites
- Les procédés électrochimiques sont des techniques de revêtement très attractives car il s'opèrent généralement à température ambiante.
- Les dépôts électrochimiques trouvent leur application surtout pour l'amélioration des propriétés mécaniques des matériaux dans les différents marchés consommateurs. Cependant il sont utilisés pour améliorer la R.O. l'usure ainsi que pour applications décoratives.

Principe

- les dépôts électrochimiques sont obtenus dans des cellules cellules d'électrolyse
- de ce type de cellule électrochimique la première à frapper le cathode : sur sa surface se déroule la réaction de réduction.
- l'autre pôle (+) qui est constitué par un métal sur lequel se réalise la réaction d'oxydation.

①

→ la quantité de matière déposée dans l'un dépôt électrochimique est définie par la loi de Faraday.

$$m = \frac{M I t}{2F} \quad \{ 93 \}$$

Donnez une application.

NB: Nécessaire que si γ est égale à 100%; c'est à dire que la réaction de l'espèce soit bien.

~~3. Morphologie des dépôts électrochimiques~~

→ la morphologie des dépôts obtenus dépend de la solution appliquée

→ le contrôle par oxydation (faible intensité)

les dépôts sont fins et brillants

→ le contrôle par diffusion (forte intensité)

→ l'expression de la vitesse telle que la géométrie est la plus simple.

→ l'adhérence est une caractéristique d'emploi prépondérante. Le dépôt peut bien adhérer.

→ l'effet de courants résiduels : les tend.

peuvent entraîner la déformation des particules, l'apparition des fissures dans le dépôt

→ la ductilité : elle est mesurée par la déformation uniaxiale ou biaxiale de certaines bâchettes de leur substrat.

→ la porosité : on distingue la porosité due à l'inclusion du substrat et la porosité liée

la porosité et quantifiée soit par exemple directe (radiographie ou par test de conversion), soit par a l'aide d'un indice de porosité global (mesure de la perméabilité ou porosité en mesure de R_p).

Type des dépôts

Revêtement simple: constitue d'une seule couche d'un métal pur.

Revêtement complexe

→ permet de satisfaire les niveaux de performance exigés par les applications industrielles

→ les revêtements complexes, qualifiés de "dépôts" sont de 3 classe.

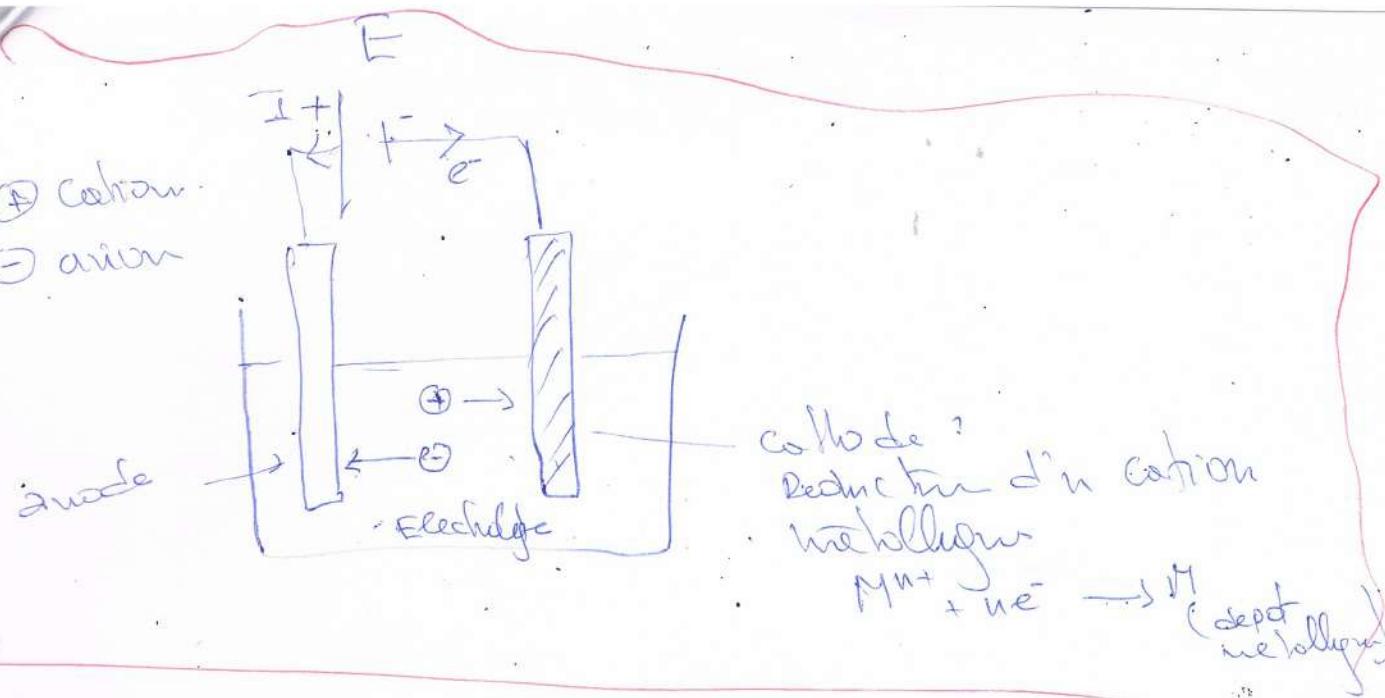
1^{er} classe: revêtement empêche la couche successive de métal pour identifier ou différencier

ex p: Cr déposé sur la surface de Ni

2^{me} classe: revêtement empêche l'alliage binaire, ternaire ou quaternaire obtenus par réduction simultanée des ions correspondant.

3^{me} classe: revêtements constitués par un amorphes, le plus souvent métal-céramique ou alliage-céramique, le renfort doit être sous forme de fibres ou particules suffisamment fines pour maintenir les propriétés de la base.

ex p: dépôt Ni-SiC, Cu-Al₂O₃, Cr₂Cr₂O₃



La tension aux bornes de la cellule traversée par un courant I est donnée par une équation

$$E(I) = \{E_A + \gamma_A(I)\} - \{E_C + \gamma_C(I)\} = RI$$

- les γ_A et γ_C sont les surtensions anodique et cathodique
sont la somme de plusieurs termes d'absorption

ex): $\gamma_A = \gamma_A^{\text{act.}} + \gamma_A^{\text{conc.}} + \gamma_A^{\text{cst.}}$

- $\gamma_A^{\text{act.}}$ est donnée par la relation de Tafel

- $\gamma_A^{\text{conc.}}$ est liée au transfert de l'espèce électroactive vers la surface métal-électrolyte à travers l'eau de couche hydrodynamique d'épaisseur δ : cette couche impose un certain limite I_0 :

$$I_0 = \frac{96.45 F Z D C_{\text{sol}}}{(1-r)\delta}$$

D: coef. diff.
r: nbre de banpels

~~La $\gamma_A^{\text{act.}}$ est associée aux difficultés énergétiques dues au processus de germination et de croissance.~~

Applications:

- protection contre les attaques agressives pour protéger contre l'agression de l'adversaire
- détection : exemple de détection de 0,5 → 1 nm
- recherche de l'heure.

la carburation ~~par la~~

Point

- la carburation par le C₁
→ Théor. : l'acier utilise pour la dureté superficielle. La pièce en acier (0,1 à 0,2 % C).
→ Le traitement doit assurer une dureté de la périphérie et une taute et ductilité au cœur de la pièce à traiter.

Principe: le trait. par canit s'effectue en deux étapes.

Etape 1: la couche superficielle est enrichie en C par diffusion à l'état solide

→ la t°c est de 980 à 1050°, la 480 → solubilité normale du C, (0,77% à 2,11%) solubilité f(c)_g.

→ la pièce austénisée et mise en contact des milieux solides, en gazoïne, cendant du C. via un réacteur de surface. La carburation gazoïne est plus adaptée aux grandes pièces.

→ les % C ne devront pas être trop élevés

Etape 2

l'enrichissement de la surface de la pièce par le C et suivi par un trait. de tempé qu'il permet de transformer l'A en martensite de dureté ↑ la traînée se fait par refroidissement de un milieu approprié.

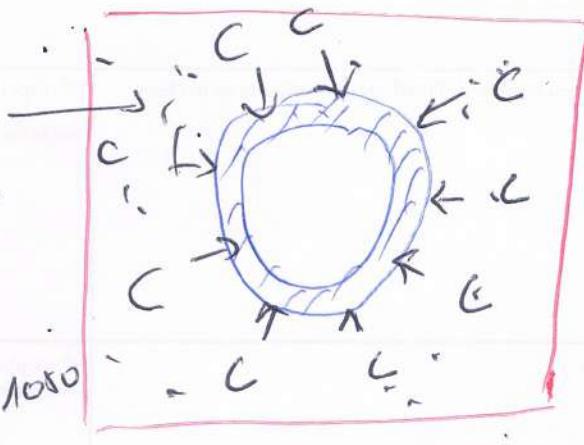
Brûlage 1

minier
extorner

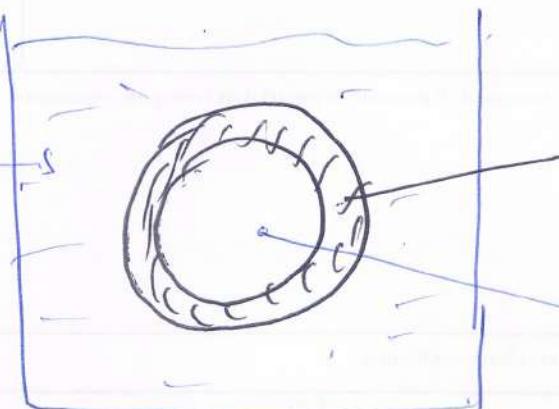
+

Q

$$T_c = 880 \div 1080$$



minier
de
tempo
880 \div 800



évacuer l'air
marchante
coulant de la
ferré

la cimentation gazeuse (P. Olin) { Cent. avt. /
Cent. long.

NB → la cimentation solide : (charbon de bois)
est pratiquement disparue

→ la cimentation liquide (en bain de sel) est
peu utilisée en raison des problèmes
écologiques (utilisation des cyanures)

CxN_x

✓ La cimentation gazeuse est le procédé le plus utilisé
dans la production de pierre de dimension et en
grande série.

✓ Elle se réalise dans des fours à atmosphère
fermée à une température comprise entre 925 et 975°C
en fonction de la nature et de la densité du four et

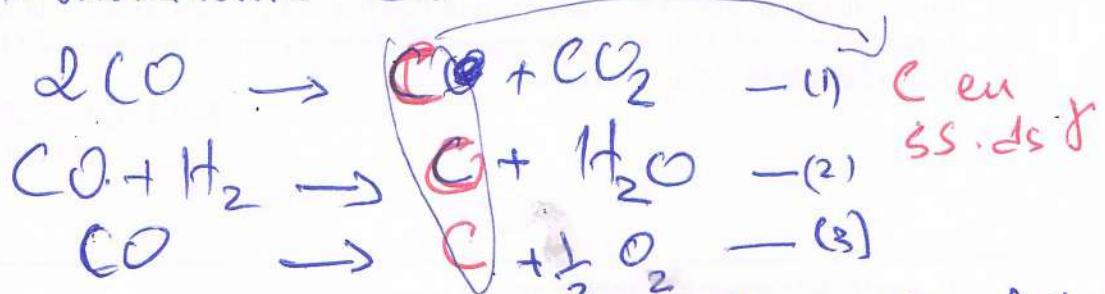
✓ L'atmosphère du four est constituée d'un mélange d'oxygène et d'azote. Ces gaz sont obtenus par combustion d'hydrocarbures et de méthane.

✓ Dans la cémentation gazeuse, le gaz actif est le monoxyde de carbone (CO).

La CO_2 de l'atmosphère se concentre au niveau de la surface métallique sur le reflet de l'oxygène. Il y a un mélange de surface métallique et de CO_2 .

* La possibilité d'oxydation au cours du traitement.

✓ Le carbone est introduit dans la surface métallique par l'intermédiaire des réactions:



* Pour chaque réaction on détermine le potentiel carbone (C_p) qui représente la %C superficielle en équilibre avec la %C de l'atmosphère.

✓ Le C_p détermine le cémentation contrôlée le profil de distribution du C de la couche métallique.