

Pr. Hakim BENSABRA

Cours ***Traitements et revêtements*** ***des surfaces***

Pour les étudiants de la 2^{ème} Année
Master Elaboration et Traitement des Métaux



Université de JIJEL 2024-2025

Contenu du module

* Ce contenu a été proposé par le
Chapitre 1 Pr. H. R. BENSABRA

- ✓ Histoire
- ✓ Définition des TRS
- ✓ But des TRS
- ✓ Classification des TRS

Chapitre 2 :

- ✓ Surfaces idéales
- ✓ Surfaces industrielles (réelles)
- ✓ Préparation des surfaces.
 - Degraissage
 - Decapage
 - Polissage

Chapitre 3 :

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

Chapitre 4 :

- ✓ Aspect technico-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 mécanique, le transport, l'aéronautique, l'armement, le bâtiment, la production et le stockage d'énergie, les biomatériaux, etc.

→ Ces propriétés sont elles influencées par le comportement physico-chimique et mécanique de la surface.

→ En effet, une des causes majeures de dégradation des matériaux à part origine les 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 physico-chimiques à l'origine des phénomènes de corrosion.

→ La lourde charge mécanique 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 de traitements et revêtements de surface.

2- Définition des TRS

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

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 des 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

→ Lors des traitements et revêtements des surfaces ~~après~~ deux approches sont utilisées :

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

b) - Le traitement par diffusion, exp: la cémentation et la nitruration.

c) ② Zone ou couche de diffusion.

d) - traitement par conversion: chimique, électrochimique ou par voie gazeuse (ex: la phosphatation l'anodisation).

e) ③ couche de conversion

f) - traitement par revêtement, exp: étamage, galvanisation, chromatisation, etc.

g) ④ couche de revêtement ou dépôt.

Chapitre 2

1 - Les surfaces idéales : notions de base

1-1. Définition

→ 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, est plus faible qu'en volume.

exp:

Pour le CC. n^{br} coordination $\begin{cases} 8 \text{ en volume} \\ 4 \text{ en surface} \end{cases}$

Pour le C.F.C. n^{br} coordination $\begin{cases} 12 \text{ en volume} \\ 6 \text{ en surface} \end{cases}$

La conséquence de cette discontinuité:

→ Pour rétablir les champs de forces auxquelles ils sont soumis, les atomes de surface ont 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 qu'elle peut apparaître au moyen d'outils de détection, comme le microscope à effet tunnel, correspond à la surface d'un cristal dont l'orientation est bien définie par rapport aux axes cristallographiques. Quant à 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 atomiquement plane dont l'énergie superficielle est minimale.

✓ **Surface Vicinale** : Elle est faiblement désorientée par rapport au plan cristallographique le plus dense.

✓ **Surface Complexes** : Elle est fortement perturbée et caractérisée par une rugosité.

Sur le plan électronique, la création de surface provoque l'altération des propriétés électroniques du matériau : Les atomes de la dernière couche ont des électrons dans des orbitales. Leurs fonctions d'onde interfèrent avec les orbitales des atomes voisins, il en résulte une structure particulière du type "double couche" avec un excès d'électrons en dessus et déficit en dessous de la couche.

1-2- Propriétés énergétiques et phénomène d'adsorption:

1-2-1- Énergie 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.

$$dG = \gamma dA$$

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

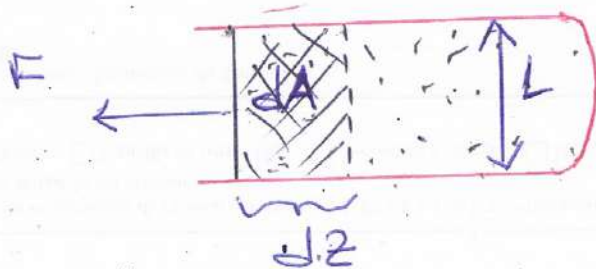
1-2-2- Tension superficielle.

→ 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. 6

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 fournir 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 :

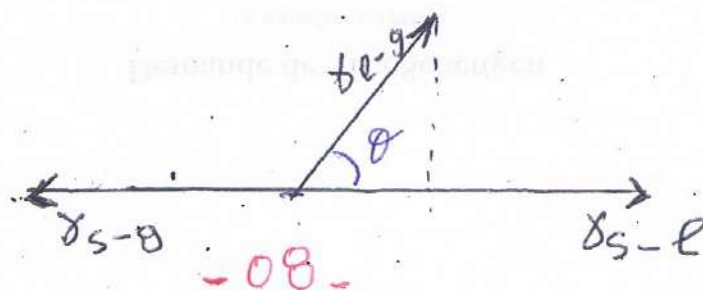
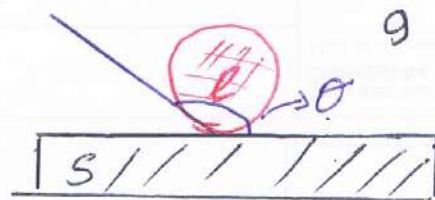
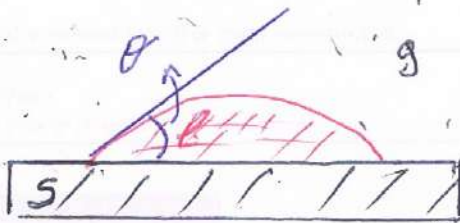
1.2.3. Mouillabilité :

→ 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 (dégraisage 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 - lig.

γ_{l-g} : tension de l'interface lig - 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 suite :

$\theta = 0^\circ$: cas $\theta = K_w = 1$: mouillabilité parfaite (le lig 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 métaux).

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

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

Remarques :

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

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

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

* mesure dynamique : c'est les méthodes tensiométriques

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'adsorbé : 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'adsorbé la réactivité de la surface est sensiblement modifiée.

→ Selon l'énergie de liaison, on distingue deux types d'adsorption :

* La physisorption : c'est pour le cas des énergies de liaison $E < 0,15 \text{ eV}$, la liaison sont du type Van der Waals.

* La chimisorption : ($E > 0,1 \text{ eV}$) c'est le cas de liaison par mise en commun ou transfert d' e^- .

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

$$\tau = \frac{A}{1+A}$$

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 :

$$\tau_i = \frac{A}{1+A}$$

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

P_i : pression partielle

P_t : pression totale

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

Pour les liquides :

$$\tau = \frac{B}{1+B}$$

$$B = (C_i/C_T) \exp \left\{ \frac{-\Delta G_i^{\text{sq}}}{RT} \right\}$$

c_i : concentration de l'espèce i

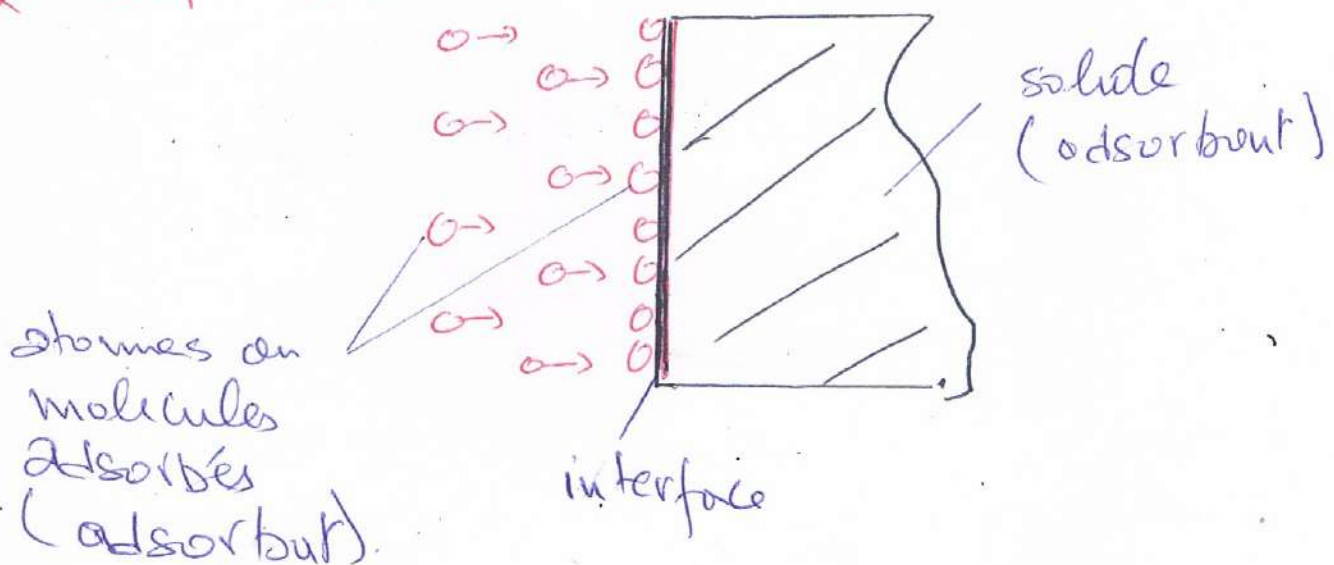
c_T : concentration totale.

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 (cinétique des réactions superficielles)
- ✓ le traitement des surfaces.

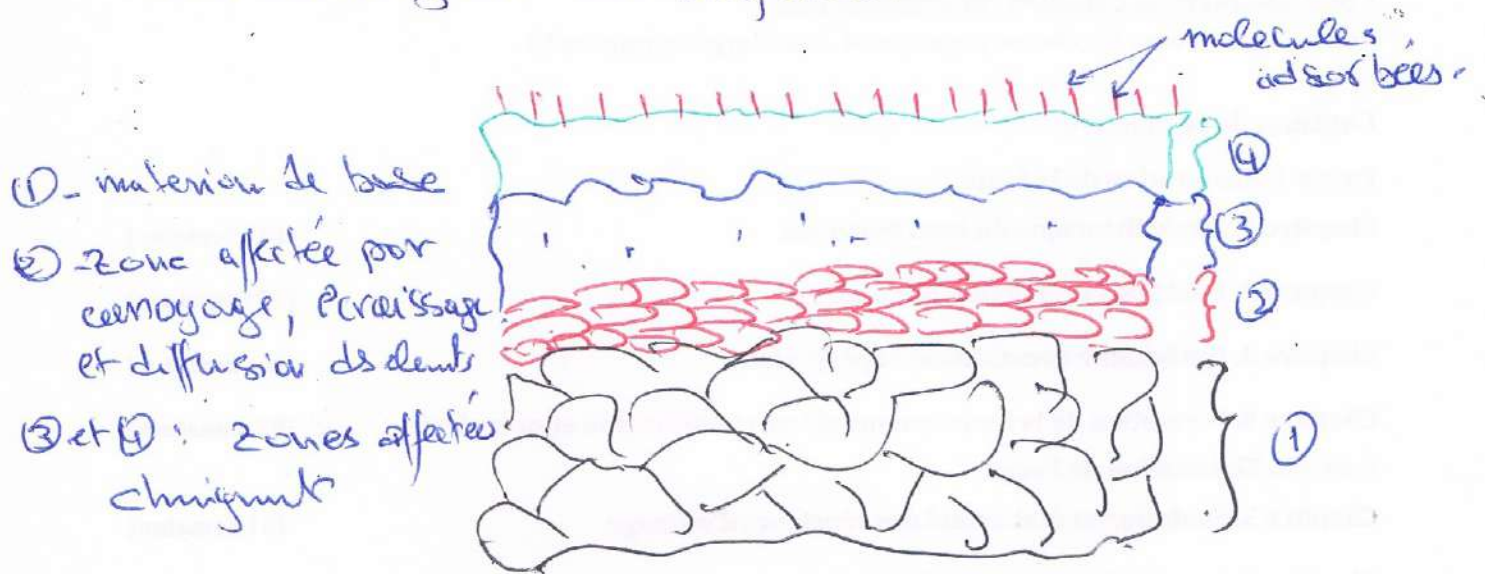
* Adsorption sur un solide.



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 outil, la rectification, le laminage à froid, le moulage, etc.
- Les observations au microscope à balayage permettent bien de distinguer ces surfaces.



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 cristallinographique et l'effet de l'environnement.

2-3. Propriétés des surfaces industrielles:

→ Les propriétés physicochimiques, structurales et électromagnétiques 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: vieillissement, adhésion, adsorption, oxydation, lubrification, choc thermique, etc.

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

Propriétés de la surface

- structure de la surface
- comp. chim.
- stérilisation

Aspect collant

- rugosité
- formation des oxydes
- propriétés de surface

Reactivité

- tension superficielle
- rhéologie
- adsorption

Surface du matériau

Résistance à l'usure et frottement

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

Résistance à la fatigue

Résistance à la corrosion

- corrosion électrolytique
- oxydation sèche

Ces

caractérisation de surfaces industrielles.

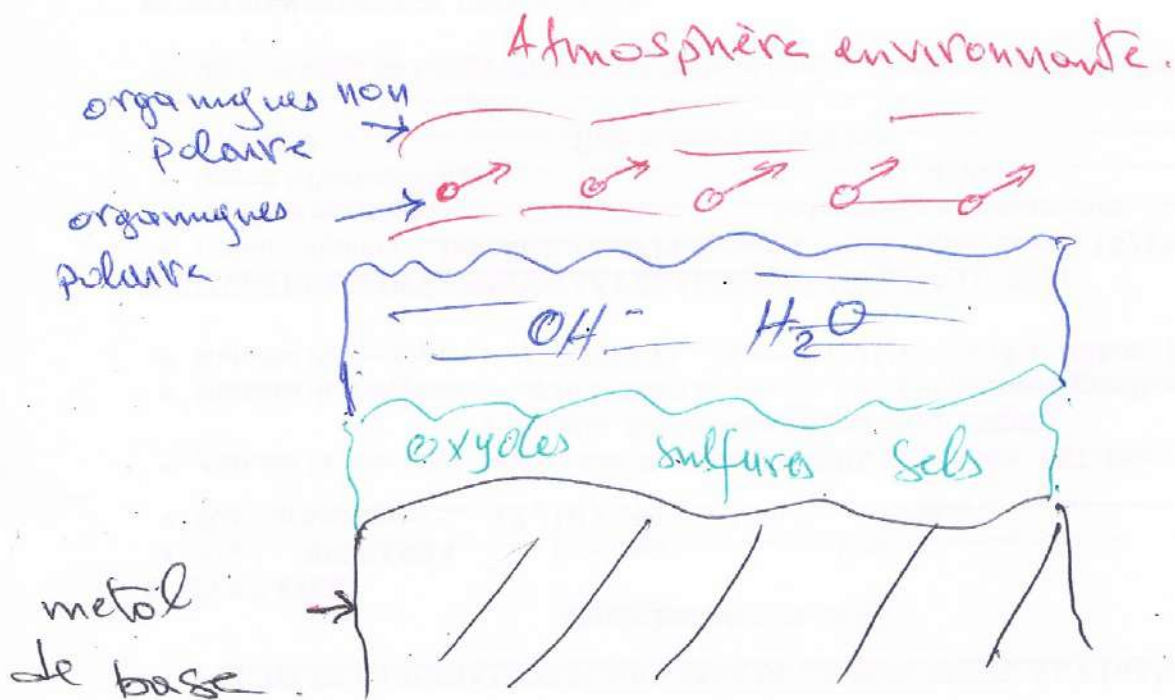
3. Préparation de surfaces.

3-1- Surface contaminée.

→ D'une manière générale une surface industrielle ou réelle présentant 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 réactivité de la surface et met en cause le rendement et la réussite des T.A.S. appliquées.



différents types de contamination sur une
surface métallique.

3-2. Notion de surface propre.

→ Tout traitement de surface doit être, impérativement, appliqué sur une surface propre.

→ Une surface sera dite "propre" lorsque toutes, ou en une partie, des contaminations indésirables auront été éliminées en vue de satisfaire certaines exigences et rendre le matériau apte aux traitements visés.

3-3. Evaluation 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 destructives pouvant être réalisées dans les ateliers, il s'agit des techniques courantes. 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.

1- Méthodes de contrôle courant en d'atelier:

→ Ce type de méthodes permettent d'évaluer, sans contact, des propriétés très dépendantes de la contamination superficielle. C'est le cas de la mesure de :

- ✓ la maniabilité
- ✓ la tension ou potentiel de surface
- ✓ le pouvoir d'émission exothermique.

b- Methodes de controle au laboratoire.

→ Ce sont des methodes d'analyse basees sur spectroscopie des rayonnements et des flux de particules (ions, e) emis par la surface du materiel convenablement excite.

Il existe differentes methodes 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 vibrationnelle.
- ✓ L'infrarouge
- ✓ la spectroscopie Raman.

3-4- Principales operations de preparation des Surfaces.

→ Ces operations peuvent etre classees en deux categories :

- ✓ techniques de nettoyage : Degraissage et decapage
- ✓ techniques d'amelioration de l'aspect : Polissage.

→ Tous les opérations sont suivies de lavage, rinçage et séchage.

3-1-1 - 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 les fines métalliques et les poussières tout en évitant l'attaque du matériau de base (substrat).

→ Il s'agit d'un traitement chimique ou électrochimique qui doit rendre la surface physiquement propre.

B - Types :

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

✓ Pré-dégraissage : se fait avec des solvants ou avec des produits lessiviers qui contribuent à l'élimination de l'essentiel des polluants organiques.

✓ Dégraissage chimique (aqueux) : se réalise dans des milieux aqueux avec finition souvent électrolytique qui permet de déterminer 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 de fluides cryogéniques (glace, CO_2 ...)
- ✓ 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 Prédégraissage (dégraissage aux solvants)

→ Cette opération permet d'éliminer de 85 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 pré-dégraissage ou le dégraissage aux solvants fait appel à différents liquides organiques:

Les solvants les plus couramment utilisés sont :

- Les solvants chlorés
- Les hydrocarbures
- Les autres oxygénés.

→ Le pré-dégrossissage est souvent utilisé dans le cas des pièces fortement souillées. Il contribue à l'amélioration de l'efficacité ou le rendement du dégrossissage chimique et électrochimique ultérieur.

→ A l'échelle industrielle le dégrossissage aux solvants peut être appliqué par trois méthodes :

- ✓ Le trempé (phase liquide)
- ✓ la phase vapeur
- ✓ la méthode mixte.

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

→ Dans cette opération on utilise des solutions alcalines ou neutres.

→ Le mécanisme de dégrossissage 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 dégrossissage électrochimique ou électrolytique.

→ Les sequences du degreissage chimique en ligne peuvent etre representees par le schéma suivant :

Nettoyage de la
surface metallique

Décollement des
soudures

Détachement des
particules solides
emprisonnées dans
les films gras et
maintien de ces
derniers en solution

Division, dispersion
peptisation, défaturation
des soldures solides

* Saponification
des graisses
animales et
vegetales

* Decomposition
des graisses en
composés solubles

* Emulsification
des graisses et
huiles non
saponifiables
* déplacement du
film composé
des corps gras
de la surface met-
allique vers la
solution et mai-
ntien de gouttes
formées stables

* Complexage des
sels insolubles
susceptible de
se former sur
la surface.

A) L'emulsification

→ L'emulsification \rightarrow représente l'action principale du nettoyage chimique. Elle est due aux agents tensioactifs, appelés encore agents mouillants ou surfactants.

→ Les agents tensioactifs permettent de rendre la surface mouillable par la diminution de la tension de surface $\gamma_{\text{eau-solide}}$. (augmentation de l'angle de contact θ entre la φ_{huile} et la surface solide.)

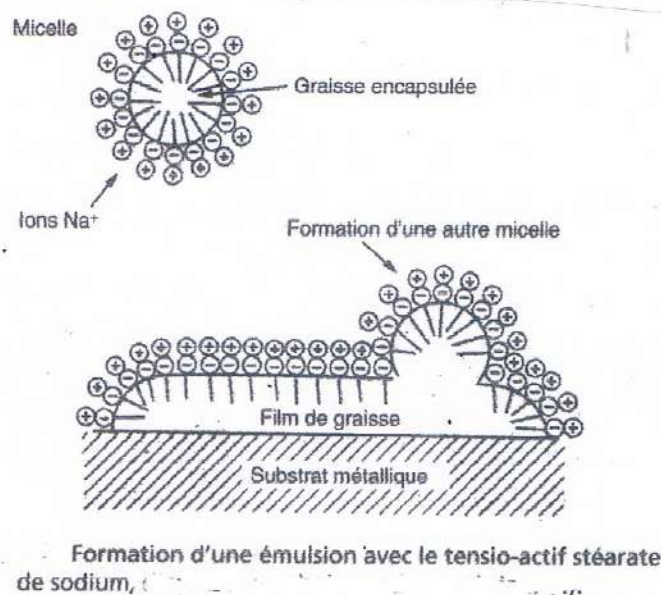
→ Il existe quatre catégories de tensioactifs

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

→ Les tensioactifs anioniques sont les plus utilisés pour leur bonne solubilité dans les milieux alcalins aqueux pour leurs propriétés tensioactives élevées et leur grande stabilité sous l'effet du pH et de la T° .

La formation de micelles lors du procédé d'emulsification est décrite comme suite :

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



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 - Degraissage electrolytique

→ Appelé encore degraissage electrolitique, il s'agit d'un degraissage alcalin auquel on superpose, aux actions habituelles, des reactions electrolitiques par application d'une difference de potentiel electrique.

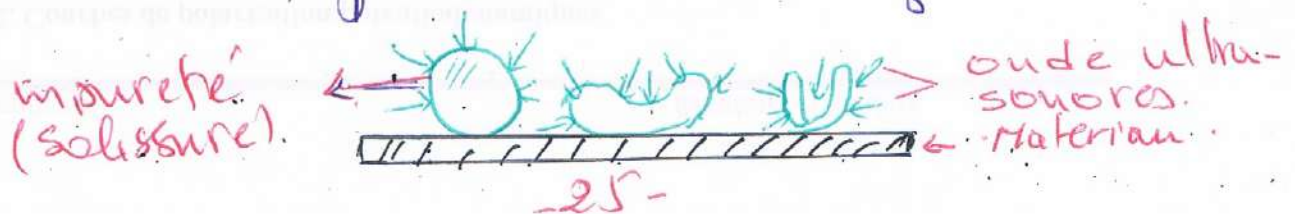
UTB: Les bains de degraissage en phase aqueuse sont constitués avec différents produit assurant à la fois l'émulsification, la solubilisation et la dispersion des polluants.

3-4-1-4 - Degraissage assiste par ultra-sons ou par le vide.

→ Le degraissage assiste par ultra-sons est utilise dans le cas des petites pieces et de geometrie complexe.

→ Dans ce type de degraissage, les turbulences creees par les ondes ultrasonores detachent et eloignent les contaminations et les impuretes des surfaces.

→ Le detachement des impuretes se fait selon le phenomene de cavitation par les ondes U.S. dont la frequence est de 20 - 400 KHz.



3-4-2 Le decapage.

3-4-2-1. Définition.

→ Le decapage est la dixième étape dans l'opération de ~~la~~ préparation des surfaces ~~au~~ TRS.

→ 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'attaque 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 depassivation des métaux.

✓ de l'enlèvement des revêtements en démétallisation.

→ Le decapage 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 decapage.

→ Le decapage peut être classé en trois grandes familles.

a. Decapage chimique

b. " électrochimique

c. " Mécanique

- Dans le decapage mécanique on trouve :
- le decapage par impact.
 - " " au LASER
 - " " par plasma froid.

3-4-2-3 le Decapage chimique :

A - Définition

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

B - Choix des solutions de decapage :

- Le choix des solutions utilisées pour le decapage chimique dépend de :
- ✓ La nature et la composition chimique du matériau à decaper (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 au nou des assemblages en soudures 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 influence 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 machif utilisé, la durée de décapage augmente avec la présence de certains ions métalliques provenant de l'attaque chimique du matériau décapé.

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

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

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

→ Pour assurer une bonne efficacité (γ) du décapage chimique ainsi qu'une bonne maîtrise de l'impact écologique, on doit éliminer en continu une partie du bain usagé et l'ajouter de produits neufs (régénération des bains).

E - Différentes compositions des bains de décapage.

* Alliage ferreux

* Bains à base d'acides minéraux

* H_2SO_4 : $t^{\circ}C$ $75 \div 80^{\circ}C$, τ $10 \div 15$ heures Volume

HCl : $t^{\circ}C$ $< 85^{\circ}C$, τ $20 \div 50\%$ en Volume

+ Tenacités + inhibiteurs.

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

* Alliage d'Aluminium

- + Mélange sulfocrotonique ($\text{CrO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4$) : $T_c = 60-70^\circ\text{C}$
- + Mélange fluorhydrique ($\text{HNO}_3 + \text{HF}$) : $T_c = 20^\circ\text{C}$
- + Acide phosphorique (H_3PO_4) : $T_c = 30^\circ\text{C}$
- + Mélange ternaire ($\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{NaHF}$)

* Alliage du Zinc

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

3-4-2-4 - Le décapage électrochimique

- Le décapage électrochimique 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 pour l'anode, représentée par le matériau à décaper, l'effet de l'oxydation : le dégagement de O_2 favorise le décollement de l'oxyde ainsi

que sa transformation d'un degré d'oxydation plus supérieur ce qui va le rendre plus soluble.
 * L'inconvénient de ce type de decapage 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.

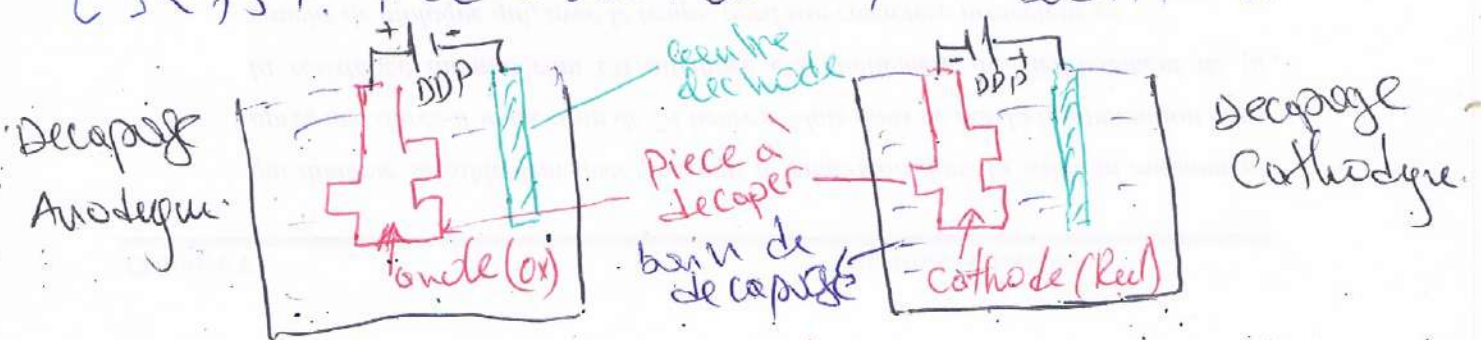
B. Decapage cathodique.

→ Dans ce mode de decapage le matériau à decaper represente la cathode de la cellule électrolytique. Sur les sites cathodiques (site de réduction) on utilise l'effet mécanique dû au dégagement d' H_2 lors de la réduction. Le dégagement de bulles d' H_2 va provoquer le décollement des oxydes.

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

Exemple:

Decapage de l'acier au carbone dans de l' H_2SO_4
 [] < 75%. $t_c = 20-60^\circ C$, $I = 20 A/dm^2$.



3-4-2-5 - Decapage mecanique :

→ Le but de ce mode de decapage est d'enlever la couche d'oxyde adherente à la surface par action mecanique.

→ Elle peut être effectuée de différentes manières :

En plus du broissage, nous avons à citer :
le decapage par impact, par LASER et par plasma.

A - Le decapage mecanique par impact :

→ Le traitement par impact peut se réaliser manuellement ou par voie automatique dans des équipements appropriés.

→ Les abrasifs utilisés, qui sont l'outil de decapage, peuvent être naturels (sable, etc.) ou synthétiques (verre, corindon, carbure de Si) = Sans oublier les grenilles métalliques et les billes de glace et carboglace.

→ L'opération de decapage se fait par projection de l'abrasif chargé sur la surface oxydée par voie pneumatique, mécanique ou par turbine.

→ Dans le cas de l'utilisation du sable comme abrasif on parle de Sablage.

Dans le cas de l'utilisation des grenilles métalliques on parle de grenailage.

B. Decapage 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.

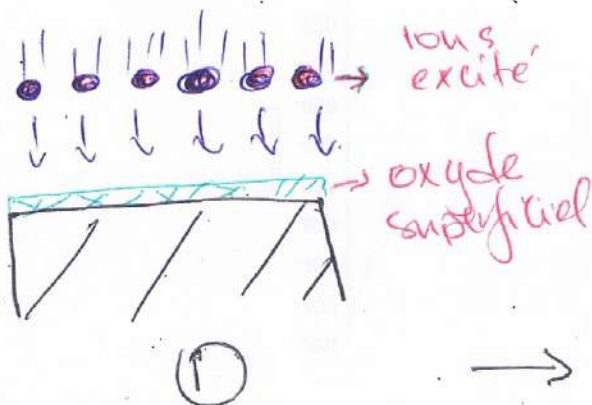
→ La forte énergie absorbée par la surface du matériau engendre un plasma au niveau des oxydes de la surface et lors de sa détente ce plasma provoque une onde choc qui fragmente et ejecte la couche d'oxyde superficielle.

→ Le domaine privilégié pour l'application de ce mode de decapage est la preparation des surfaces des moules dans l'industrie du verre et la plasturgie.

C. Decapage par plasma froid.

→ Ce decapage se realise par un gaz ionisé (Ar, He, etc.)

→ Les ions ou molecules du gaz excités perdent leur énergie d'excitation par collision avec la couche d'oxyde superficielle ce qui conduit à ~~la~~ sa pulvisation (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 porres 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 spéculaire ou scientifique : il est utilisé principalement pour la préparation des surfaces en vue d' observation microscopiques (métallurgie). La rugosité ne doit pas dépasser les $0,01 \mu m$.

* 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 surface 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' O_2 chimisorbé.
- 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 broches
 - * Les bandes et papier abrasif
 - * Les disques en feutres
 - * Les tampons (empilement de rondelles de tissus que l'on mélange de graine et particules abrasif fines).
- Les principaux abrasifs utilisés sont :
- * le quartz, l'alumine Al_2O_3 (corindon naturel) et corindon artificiel (Alume + silice + oxyde du fer et titane), le carbone du silicium, le diamant industriel (sous forme de pâte diamantée).

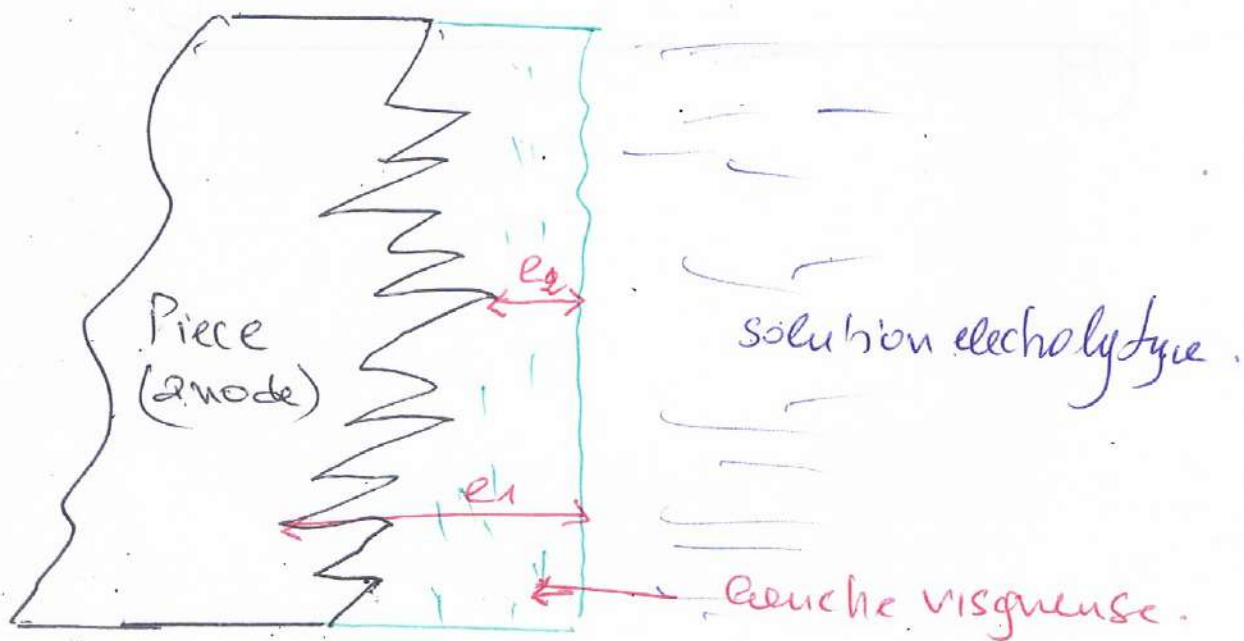
3-4-3-3. Le polissage électrolytique.

- 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 dissoudre le matériau et les impuretés éventuellement présentes à la surface.

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

→ Les produits de cette dissolution conduisent en contribuant 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 traitements de surfaces peuvent être divisés en 4 grandes classes :
- ✓ traitements des surfaces par durcissement structural.
 - ✓ traitements des surfaces par diffusion
 - ✓ traitements des surfaces par conversion.
 - ✓ Revêtements

1.1. Les traitements 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 : grenaillage, galebage, 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 structurale 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 suivi d'un refroidissement. La trempe superficielle étant l'exemple le plus courant.

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

- ✓ flamme : chaudière, oxyacétylénique.
- ✓ induction 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 métalloïde (C, etc.) ou un métal. On distingue ainsi les familles suivantes :

A - Traitements par diffusion des métalloïdes.

- Cette filière regroupe les procédés des traitements thermochimiques tels que la cémentation, la nitruration et les procédés mixtes (carbonitruration, 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 tel 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 → Chromoaluminisation

C - Traitement par implantation et mélange ionique.

→ C'est le domaine des traitements par faisceaux d'E selon 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.

→ Il s'agit des traitements pour lesquels le métal d'appartenance réagit superficiellement avec le substrat pour conduire à la modification structurale visée.

→ On distingue trois différents types de conversion :

* La conversion chimique

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

- ✓ la phosphatation
- ✓ la chromatisation
- ✓ 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 peintures.

* La conversion électrochimique

- Ce traitement est le résultat d'une attaque en 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 de surface par plasma froid. Il est utilisé surtout pour l'amélioration de l'aspect esthétique dans l'architecture des divers inox.

NB :

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

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

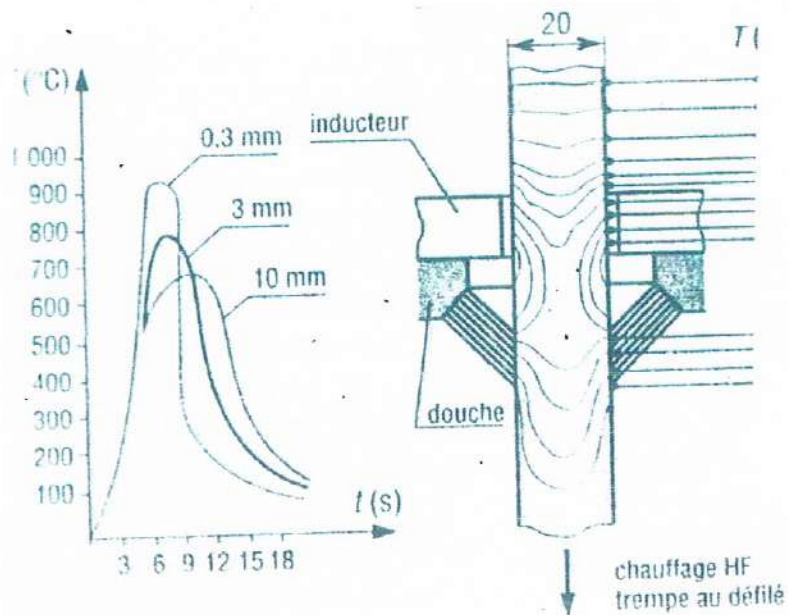
2 - Traitement superficiel par induction.

2-1 - Définition.

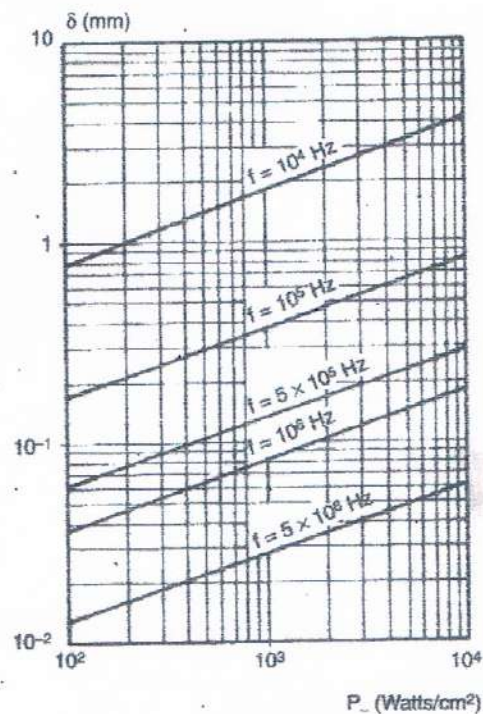
→ Dans ce type de traitement le durcissement structural est apporté par voie thermique en utilisant la transformation martensitique ($\gamma \rightarrow M$) issue chauffage rapide suivi d'un refroidissement énergique de la surface du matériau.

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 flambes d'arrosage en bouche.
- Le principe de la trempe 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 (δ).

-43 W's-

2-3. Paramètres.

→ L'induction magnétique reste, pour l'instant, le moyen de chauffage le plus utilisé.

→ Le chauffage du matériau 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 δ 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 transfert 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 déterminer comme suite :

$$\delta = 503 \sqrt{\rho / \mu f}$$

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

Avec :

δ : profondeur de pénétration en [mm]

ρ : résistivité du matériau en $\Omega \cdot m$.

μ : perméabilité magnétique du matériau avant le point de Curie C (Pour les aciers $C = 770^\circ C$)

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

NB: le point de Curie est la température à partir de laquelle le métal perd son magnétisme.

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

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

✓ δ en $\{mm\}$.

✓ P_0 en $\{W/cm^2\}$ est la puissance induite.

→ 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 matériau (α), par les relations suivantes:

$$\theta_0 = \sqrt{2} \cdot (P_0 / \sqrt{\lambda \cdot C}) \sqrt{\pi}$$

$$\alpha = \lambda / C$$

Avec

α : diffusivité thermique,

C : capacité calorifique en $\{KJ \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}\}$

λ : conductivité thermique en $\{W \cdot Cm^{-1} \cdot K^{-1}\}$

ρ : masse volumique en $[g \cdot cm^{-3}]$.

τ : temps de chauffage en $[s]$.

Exemple.

→ Pour un acier au carbone :

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

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

Remarques :

→ En fonction des données précédentes, il est possible de construire des abaquages qui fournissent avec une bonne approximation les valeurs des paramètres : P_0 et θ_0 pour une fréquence f et une valeur déterminée de δ .

→ L'utilisation pratique de ces abaquages permet de choisir, pour une épaisseur de traitement déterminée, la fréquence (f) la plus adéquate pour une production industrielle (49).

Exemples :

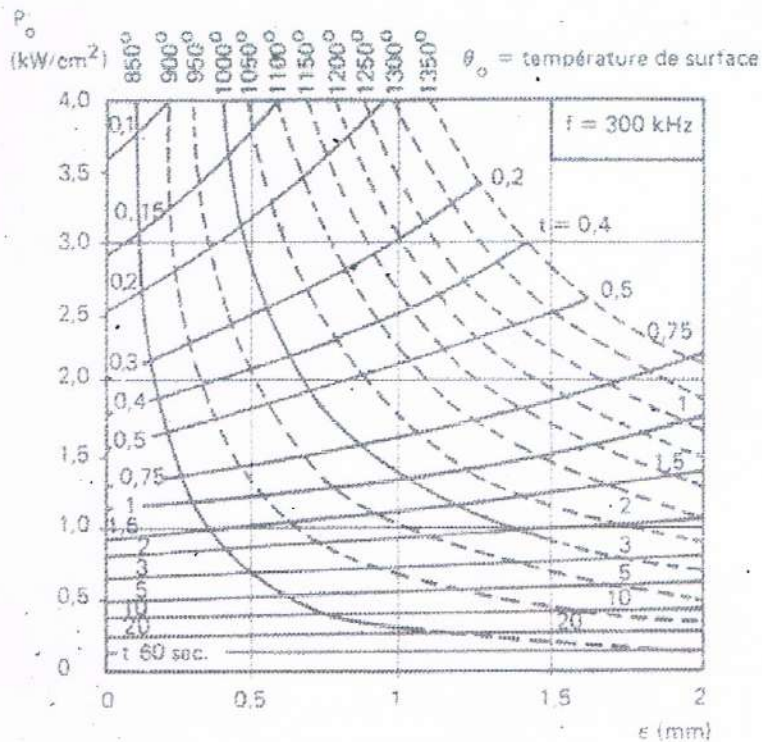
Pour $\begin{cases} \text{une épaisseur de bronze } \delta = 1 \text{ mm} \\ \text{une } \theta_0 \text{ maximale } \theta_0 = 850^\circ \end{cases}$

la comparaison entre les fréquences utilisées donne :

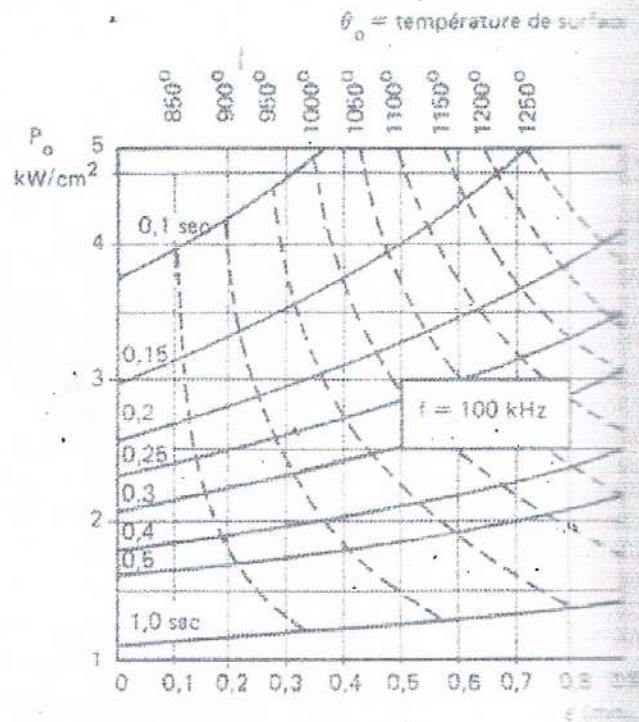
✓ Pour 300 KHz $\rightarrow P_0 = 0,25 \text{ Kw} \cdot cm^2$, $\tau = 3 \text{ sec}$

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

Nous remarquons que pour une fréquence $f = 10 \text{ KHz}$ l'usure de l'énergie est exagérée donc la on utilise la $f = 300 \text{ KHz}$ pour avoir l'épaisseur $\delta = 1 \text{ mm}$ (voir abaquages figures suivantes).



a) Fréquence de 300 kHz

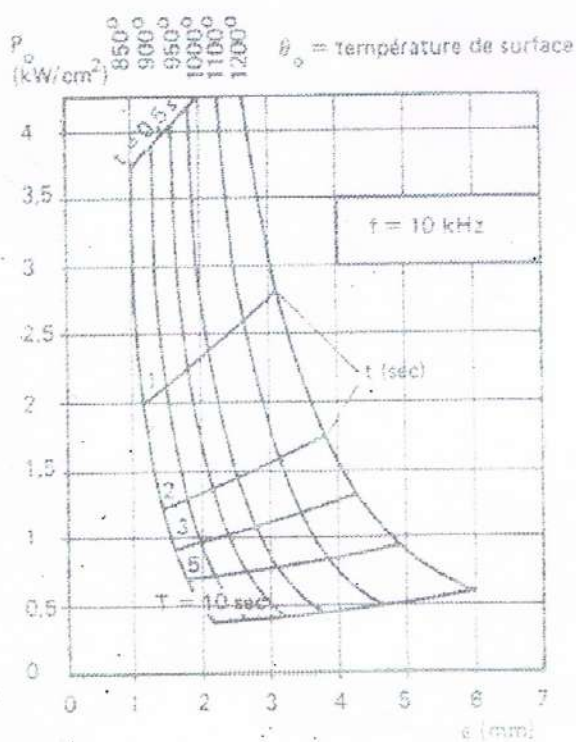


b) Fréquence de 100 kHz

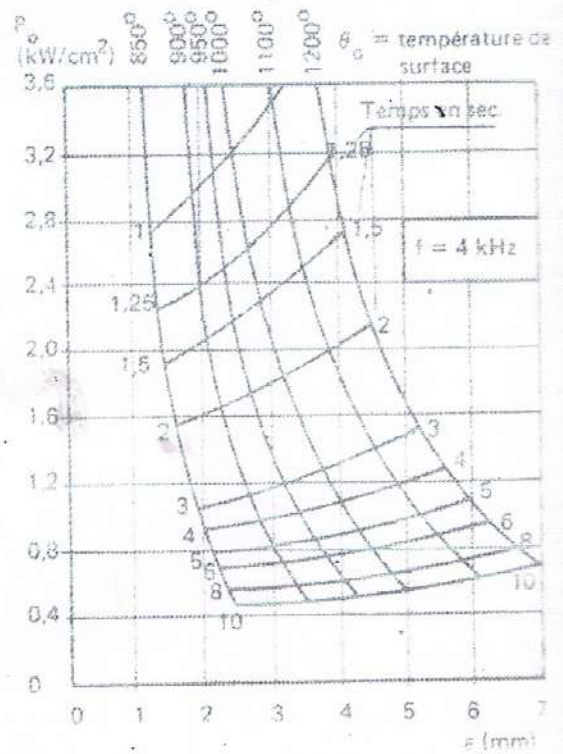
Relation :

$$P_o \text{ (kW/cm}^2\text{)} \cdot \epsilon \text{ (épaisseur durcie } \theta_{\epsilon} > 800^\circ\text{)}$$

θ_o = température surface · t = temps chauffage (sec)



c) Fréquence de 10 kHz



d) Fréquence de 4 kHz

3 - Revêtement par projection thermique :

un mode de revêtement comporte 3 étapes :

- 1 - l'insoluction 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 Principe :

Ds 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 à V_{sc} .

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^o pouvant dépasser les $10\ 000^o$:

→ ces vitesses sont supersoniques,

→ la poudre du matériau à projeter est injectée ds le jet gazeux. Elle se transforme en fines gouttelettes liquides entraînées à des grandes V_{sc} 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 représentée sur la figure suivante. -47-

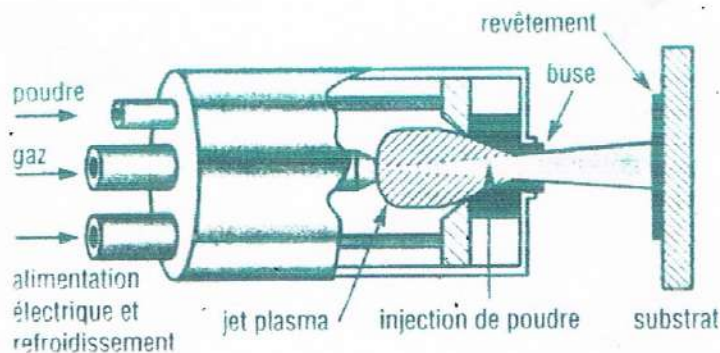


Figure 1 : Torche de projection thermique par jet de plasma

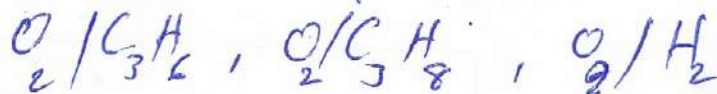
3-3 Projection par gaz de combustion à grande vitesse.

Il existe :

- le procédé à combustion continue
- le procédé à combustion pulsée

3.3.1 Procédé à combustion continue

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



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

$V_{\text{ss particule}} \approx 750 \div 800 \text{ m.s}^{-1}$

→ la combustion continue sous pression donne une flamme stable chauffant fortement le substrat

→ le fonctionnement de l'appareil exige un sys. de ref. très efficace. (possibilité de distorsion thermique et modification chimique des microstructures 1-48-

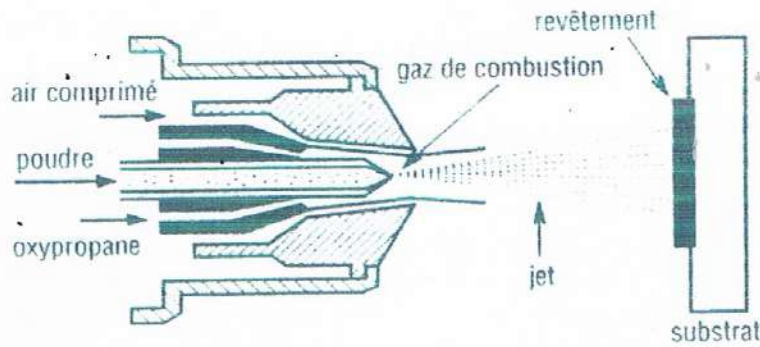


Figure 2 : Torche de projection à combustion continue (HVOF)

3.3-2 Procédé à combustion pulsée : Canon à détonation

* Les inconvénients de la combustion continue n'existent plus pour le canon. La température du substrat dépasse rarement les 150°.

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

* Avec ce procédé on peut réaliser des revêtements à 1600° (WC-Co) de fusion pour des substrats à bas point de fusion (alliage d'Al.) (réfractaires)

Comme les types des revêtements :

3.4

- Les particules fondues s'écrasent à grande vitesse sur le substrat en donnant des plaquettes minces qui s'adaptent à la géométrie de la surface sous-jacente en s'engrenant.
- En s'engrenant les unes aux autres elles forment une couche stratifiée.
- Le dépôt obtenu 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:

- ✓ decapage chimique et sablage afin d'augmenter la rugosité par usinage grossier.
- ✓ application d'une mince couche de liaison (Ni , Zn , Al , Pd)
- ✓ Prechauffage

→ La qualité du dépôt dépend du procédé également:

- ✓ La projection à combustion à grande vitesses donne un revêtement de faible porosité, de faible teneur en oxygène et de faibles concentrations résiduelles.

→ L'épaisseur du revêtement ou du dépôt varie quelquefois de 25 μm .

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

4-4- 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 thermiques.
- ✓ La remise aux cotes par rechargement

Traitement par revêtement électrochimique = Dépôts électrochimiques

But:

→ Les procédés électrochimiques produisent des revêtements à partir d'un électrolyte aqueux, organique ou fondu
→ Les dépôts électrochimiques les plus fréquents sont :

- Les métaux purs
- Les sels métalliques
- Les composites

→ Les procédés électrochimiques sont des techniques de revêtement très attractives car ils s'opèrent généralement à température ambiante.

→ Les dépôts électrochimiques trouvent leur application surtout pour l'amélioration des propriétés anti-corrosion des métaux dans les différents milieux agressifs. Cependant ils sont utilisés pour augmenter la P. ou l'usure ainsi que pour applications décoratives.

Principe:

→ Les dépôts électrochimiques sont obtenus dans des cellules d'électrolyse.

→ Dans ce type de cellule électrochimique la pièce à traiter constitue la cathode : sur sa surface se déroule la réaction de réduction. (pôle (-))

→ L'autre pôle (+) qui est l'anode est constitué par un métal sur lequel se déroule la réaction d'oxydation.

→ la q^{te} de matière déposée lors d'un dépôt électrochimique et de faire par la loi de Faraday

$$m = \frac{M I t}{z F} \quad [g]$$

Donner exple d'application

NB: Notable que si γ est égale = 100%; c'est à dire seule la réaction de l'espèce ait lieu.

* 3. Morphologie des dépôts électrochimiques

→ la morphologie des dépôts obtenus dépend de la densité de courant appliqué

→ le contrôle par activation (forte densité)

les dépôts sont lisses et brillants

→ le contrôle par diffusion (faible densité)

→ L'épaisseur et la conductivité ~~de~~ la géométrie la plus simple.

→ L'adhérence est une caractéristique d'importance primordiale. Le dépôt produit doit être bien adhérent.

→ L'effet de contraintes résiduelles : Les tensions

peuvent entraîner la déformation ~~résiduelles~~ des pièces mises, l'apparition des fissures dans le dépôt

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

→ la porosité : on distingue la porosité due à des inclusions du substrat et la porosité due à

la porosité et qualifiée seul par campage direct
(Radiographie en per test de corrosion). sait ~~par~~ à l'ind
un indice de porosité globale. (mesure de la perméabilité
aux gaz en mesure de Rp).

Type des dépôt

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

Revêtement complexe

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

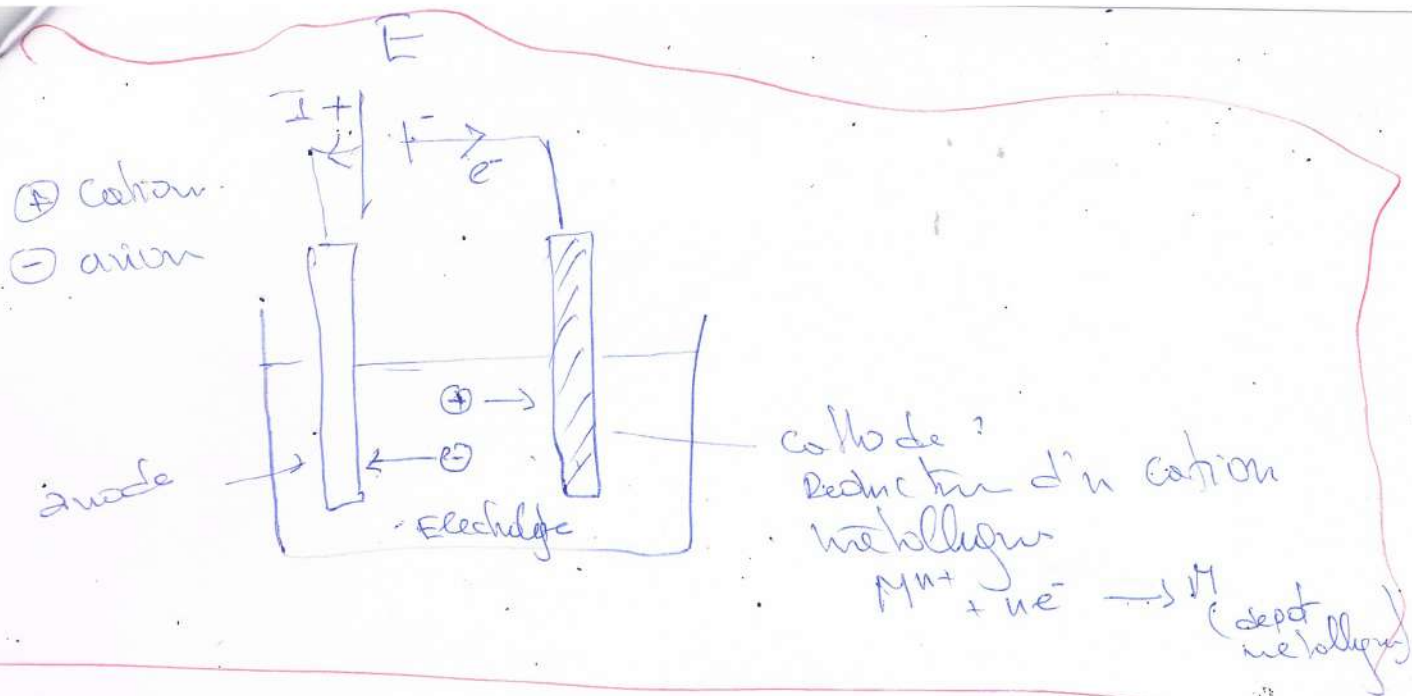
→ Les revêtements complexes, ~~ou~~ qualifiés de "les dépôts"
sont de 3 classes:

1^{er} classe: revêtements composés de couche successive
de métaux purs identiques ou différents

ex p. Cr déposé sur un sous-couche de Ni

2^{ème} classe: revêtement composé par alliage binaire, ternaire
ou quaternaire obtenus par réduction simulta-
nées des ions correspondants

3^{ème} classe: Revêtements constitués par un composite, le
plus souvent métal-céramique ou alliage-céramique,
le renfort doit être sous forme de fibres ou
particules suffisamment fines pour maintenir la
suspension dans le bain.
ex p. dépôt Ni-SiC, Cu-Al₂O₃, Cu-Cu₂O



La tension aux bornes de la cellule traversée par un courant I est donnée comme suit :

$$E(I) = [E_A + \eta_A(I)] - [E_C + \eta_C(I)] = RI$$

Les η_a et η_c sont la surtension anodique et cathodique sont la somme de plusieurs contributions

exp. $\eta_c = \eta_c^{act} + \eta_c^{conc} + \eta_c^{cst}$

- η_c^{act} est donnée par la relation de Tafel

- η_c^{conc} est liée au transport de l'espèce électroactive vers la surface métal-électrolyte à travers une couche hydrodynamique d'épaisseur δ . Cette couche impose un courant limite I_L :

$$I_L = \frac{96.485 z D C_{sal}}{(1-r) \delta}$$

D : coef. dif.
r : nbre de vaissaux

~~NB : cette~~ - la η_c^{cst} est associée aux difficultés énergétiques dues au processus de germination et de croissance.

Applications :

- protection contre les attaques agressives par corrosion < protection cathodique : Zn ou Cd sur acier
" anodique : Cu sur acier
- Decrochage : couche de chrome de 0,5 → 1 μ m
- Résistance à l'usure.

la cementation ~~par le C~~

Donc:

la cementation par le C

$\begin{matrix} \text{C} \\ \text{N} \\ \text{B} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{Mn} \\ \text{Cr} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{Ni} \\ \text{Cu} \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{Al} \\ \text{Si} \end{matrix}$
Borure

- Trait. therm. utilisé pour la dureté superficielle des pièces en acier (0,1 - 0,2 % C).
- Le traitement doit assurer une dureté de la périphérie et une ténacité et ductilité du cœur de la pièce à traiter.

Principe:

Le trait. par cement s'effectue en deux étapes.

Etape 1

→ la couche superficielle est enrichie en C par diffusion à l'état solide.

→ la $t^{\circ}C$ est de $950 \div 1050^{\circ}$, la

48 → solubilité maximale du C.

(0,77% - 2,11%)
solubilité $f(C)$.

- la pièce austénisée est mise en contact avec un milieu solide, liquide gazeux contenant du C. une réaction de surface. la cementation gazeuse est plus adaptée aux grandes pièces.
- les %C ne doivent pas être élevés (grand

Etape 2:

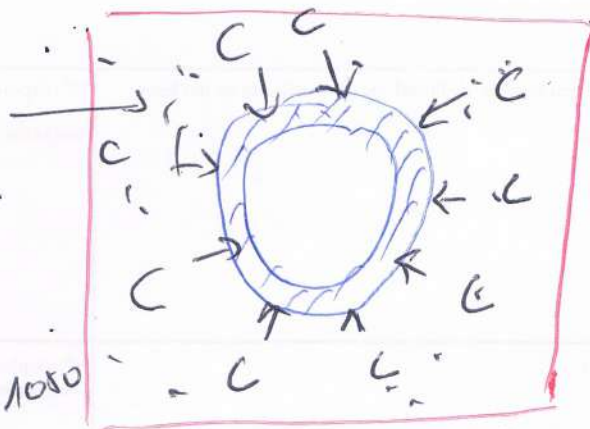
l'enrichissement de la surface de la pièce par le C est suivi par un trait. de trempe qui permet de transformer l'A en Martensite de dureté ↑
la trempe se fait par refroidissement dans un milieu approprié.

Etape 1

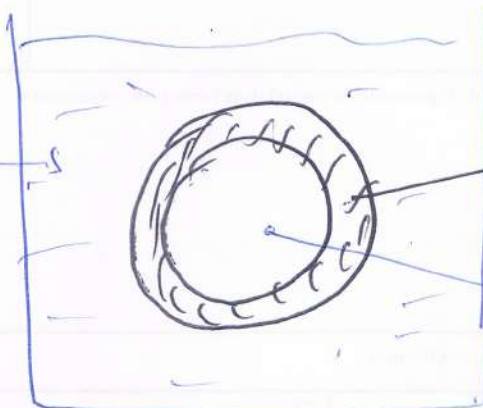
milieu
carburant

+
Q

$T_c 850 \div 1050$



milieu
de
trempage
 $850 \div 900^\circ C$



craquelure
Martensite
cœur ductile
ferre

la Cimentation ou gorgense $\alpha(P, \Delta t_m)$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{Cent. actif} \\ \text{et} \\ \text{Cent. long.} \end{array} \right.$
NB \rightarrow la cémentation solide! (charbon dans bock)
 est pratiquement disparu

\rightarrow la cémentation liq. (en bain de sel) est
 peu utilisée en raison des problèmes
 écologiques (utilisation des cyanures)
 C_xN_x

✓ la cémentation gorgense est le procédé le plus utilisé
 dans la production des pièces de 1 dimension et en
 grande série.

✓ Elle se réalise dans des fours à atmosphère
 contrôlée à une T_c comprise entre 925 et $975^\circ C$
 optimisée en $\Delta t_c +$ (durée de chauffe, déterminée du four et

✓ L'atmosphère du four est constituée d'un ~~endogaz~~
 endogaz cémentant composé de :

quelques $CO, CH_4, H_2, N_2, CO_2, O_2$ et H_2O

Ces gaz sont ~~obtenus~~ issus de différentes sources

* gaz obtenu par combustion d'hydrocarbures

* mélange azote-méthane

~~de~~

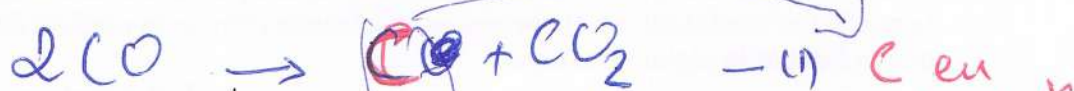
✓ Dans la cimentation gazeuse, le gaz actif est le monoxyde de carbone CO .

la $\{CO\}$ de l'atmosphère se caractérise influé

elle est riche en CO * sur le coeff. de transf. du C au niveau de la surface métallique

* la possibilité d'oxydation au cœur du barillet.

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



C en ss. de C

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

✓ le C_p du milieu de cimentation contrôle le profil de distribution du C de la cenette traitée.