

# Table des matières

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b><u>Chapitre I : Présentation de la société.</u></b>	
<b>I-Introduction :.....</b>	<b>3</b>
<b>II-Production et produit :.....</b>	<b>3</b>
<b>III-clients de la société :.....</b>	<b>4</b>
<b>IV-La structure de la société (SADF) :.....</b>	<b>4</b>
<b>V-Procédé de fabrication : .....</b>	<b>4</b>
<b>A-Matière première : .....</b>	<b>5</b>
<b>B-Chaine de production :.....</b>	<b>5</b>
<b>1-Modélisation : .....</b>	<b>5</b>
<b>2-découpage :.....</b>	<b>5</b>
<b>3-Gravure : .....</b>	<b>6</b>
<b>4-Repoussage :.....</b>	<b>6</b>
<b>5-Fondrie : .....</b>	<b>7</b>
<b>6-Limage : .....</b>	<b>7</b>
<b>7-soudure :.....</b>	<b>7</b>
<b>8- décapage :.....</b>	<b>7</b>
<b>9-polissage : .....</b>	<b>8</b>
<b>10-Ravivage :.....</b>	<b>8</b>
<b>11-Contrôle de qualité :.....</b>	<b>8</b>
<b>12-traitement de surface : .....</b>	<b>8</b>
<b>13-Emballage : .....</b>	<b>8</b>
<b>VI- Conclusion.....</b>	<b>9</b>
<b><u>Chapitre II : Traitement de surface par voie électrolytique.</u></b>	
<b>I-Introduction :.....</b>	<b>11</b>
<b>II-Electrolyse : .....</b>	<b>12</b>
<b>1-définition :.....</b>	<b>12</b>
<b>2-Principe :.....</b>	<b>12</b>
<b>3-les facteurs influençant un dépôt électrolytique : .....</b>	<b>14</b>

4-But et domaine d'application :.....	16
III-Relation de Nernst : .....	16
IV-La loi de Faraday :.....	18
V-Conclusion : .....	18
<b><u>Chapitre III : Procédés et Techniques appliquées.</u></b>	
I- Introduction :.....	20
II-Equipement des bains : .....	20
III-Les différents Bains utilisés dans la société : .....	21
1- Dégraissage :.....	21
a-définition : .....	21
b-Mécanisme : .....	21
c-Types de dégraissage :.....	22
2-Cuivrage :.....	24
a-Cuivrage en milieu alcalin (solution de sels complexes) : .....	25
b-Cuivrage en milieu acide (solution de sels simples) : .....	27
3-Nickelage :.....	28
4-Argenture :.....	31
5-séchage : .....	33
IV- Le Rendement électrolytique : .....	33
La masse expérimentale :.....	34
La masse théorique : .....	34
Le rendement :.....	34
Interprétation des résultats : .....	35
V-Conclusion :.....	35
Conclusion Générale .....	36
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	37

## Liste des Figures

<b>Figure 1</b> : L'organigramme de la Société.....	4
<b>Figure 2</b> : Schéma de Montage d'une cellule d'électrolyse.....	13
<b>Figure 3</b> : Potentiel Standard de réaction d'électrode par rapport à l'électrode normale à hydrogène.....	16
<b>Figure 4</b> : Schéma simplifié de la chaine de traitement.....	20
<b>Figure 5</b> : Mécanisme de Saponification.....	21
<b>Figure 6</b> : Mécanisme de détergence.....	22

## Liste des Tableaux

<b>Tableau 1</b> : Identification de SADF.....	3
<b>Tableau 2</b> : composition et conditions de travail du bain de dégraissage.....	22
<b>Tableau 3</b> : Caractéristiques physiques et mécaniques du cuivre.....	24
<b>Tableau 4</b> : Mode opératoire du cuivrage alcalin.....	25
<b>Tableau 5</b> : Mode opératoire du cuivrage acide.....	27
<b>Tableau 6</b> : Principales Caractéristiques physiques du Nickel.....	28
<b>Tableau 7</b> : Mode opératoire du Nickelage.....	29
<b>Tableau 8</b> : Les propriétés physico-chimiques d'argent.....	31
<b>Tableau 9</b> : Mode opératoire et conditions de travail du bain d'argent.....	31
<b>Tableau 10</b> : Le rendement électrolytique.....	34

## Liste des images

<b>Image 1</b> : Matière première.....	5
<b>Image 2</b> : Gravure à la main.....	6
<b>Image 3</b> : Procédé de formation d'une pièce.....	6
<b>Image 4</b> : Les chutes de laiton.....	7
<b>Image 5</b> : Fendage des Chutes.....	7
<b>Image 6</b> : Contrôle de qualité par des spécialistes.....	8
<b>Image 7</b> : Emballage en papier.....	9
<b>Image 8</b> : Emballage en plastique.....	9
<b>Image 9</b> : Bain de dégraissage.....	23
<b>Image 10</b> : Bain de rinçage.....	24
<b>Image 11</b> : Bain de cuivre alcalin.....	26
<b>Image 12</b> : Bain de cuivre acide.....	27
<b>Image 13</b> : Bain de Nickel.....	29
<b>Image 14</b> : Paniers en Titane.....	30
<b>Image 15</b> : Bain d'argenture.....	32
<b>Image 16</b> : Four pour le séchage des pièces.....	33

## Liste des abréviations

**PVD** : Dépôt Physique en phase vapeur.

**CVD** : Dépôt Chimique en phase vapeur.

**SADF** : Société des Artisans Dinandiers de Fès.

**ENH** : L'électrode Normale à hydrogène.

**PVC** : Poly chlorure de vinyle.

**T** : La Température en degré (°C).

**°B** : Degrés baumé.

**PH** : Le potentiel d'hydrogène.

# INTRODUCTION GENERALE

L'homme cherche toujours de matériaux de qualité, d'un aspect décoratif et résistants à la corrosion ; d'où la notion de traitement de surface métallique.

Les traitements et revêtements de surface constituent actuellement un des moyens essentiels pour améliorer les propriétés fonctionnelles des métaux, notamment la résistance à l'oxydation et à la corrosion, la tenue à la fatigue sous toutes ses formes (fatigue mécanique, fatigue thermique, fatigue de surface), la résistance au frottement et à l'usure, le durcissement superficiel du matériau, sans oublier la couleur et l'aspect esthétique [1].

Le traitement de surface des métaux comprend deux types :

- Dépôt par voie sèche : projection thermique, dépôt chimique en phase vapeur (CVD), dépôt physique en phase vapeur (PVD).
- Dépôt par voie humide : **les dépôts électrolytiques**, les dépôts chimiques, les dépôts par immersion en métal fondu.

**La Société Des Artisans Dinandiers De Fès (SADF)** est une société qui utilise des procédés de traitement de surface du laiton par voie **électrolytique** en utilisant des bains de cuivre, de nickel et d'argent. Ces bains sont toujours sous contrôle en effectuant des analyses pour répondre aux normes donnés dans des fiches techniques.

Cette société utilise le laiton comme un métal de base car il est moins cher et il est facile d'emploi, sa malléabilité lui permet d'être facilement moulé, comme il peut être travaillé à chaud ou à froid et il est facile à usiner.

La première partie de ce rapport permet de présenter la société, la matière première utilisée ainsi que la chaîne de production qui explique toutes les procédures de fabrication d'une pièce.

La seconde partie montre les différents procédés d'électrolyse (cuivrage alcalin, cuivrage acide, nickelage et argenture), et le calcul de la masse déposée sur les quatre plaques en laiton afin de déduire le rendement pour chacune des plaques.

Et puis on termine avec une conclusion générale.

*Chapitre I :*  
*Présentation de la société*

# Chapitre I [Présentation de la société]

---

## **I-Introduction :**

La création de la Société des Artisans Dinandiers de Fès remonte à 1982. En effet, un groupe de Maîtres-artisans avait pensé mettre en place une unité de production renfermant tout le processus de fabrication. Cela leur permettrait de préserver le produit artisanal, de le développer et de lui donner l'aspect qui réuni à la fois beauté, goût et qualité ; sans oublier la prise en considération du côté coût pour qu'il soit abordable par la plupart des clients.

Aujourd'hui SADF a réussi de gagner la confiance de ses clients et d'imposer sa marque sur tous les marchés en effet elle est considérée parmi les meilleures sociétés du Maroc qui présentent et qui honorent les produits artisanaux marocains.

**Tableau 1 : Identification de SADF**

Dénomination de la Société	SADF
Secteur d'activité	Artisanat
Date du lancement du projet	1982
Directeur de la société	TAHIRI JOUTI Abderafie
Adresse	47, lot industriel BENSOUDA Fès Maroc
Tél	05 35 65 51 43

## **II-Production et produit :**

Depuis sa mise en place, la SADF n'a pas cessé de déployer ses efforts pour apposer son empreinte sur ses articles par exemples : luminaire, tables, plateaux, miroirs ...

C'est pour cette raison elle est considéré parmi les plus importantes sociétés de Fès spécialisée dans la fabrication des articles artisanaux en utilisant comme matière première

soit du boit, laiton ou assemblé de plusieurs matières dans le but de satisfaire les besoins de ses clients marocains et étrangers.

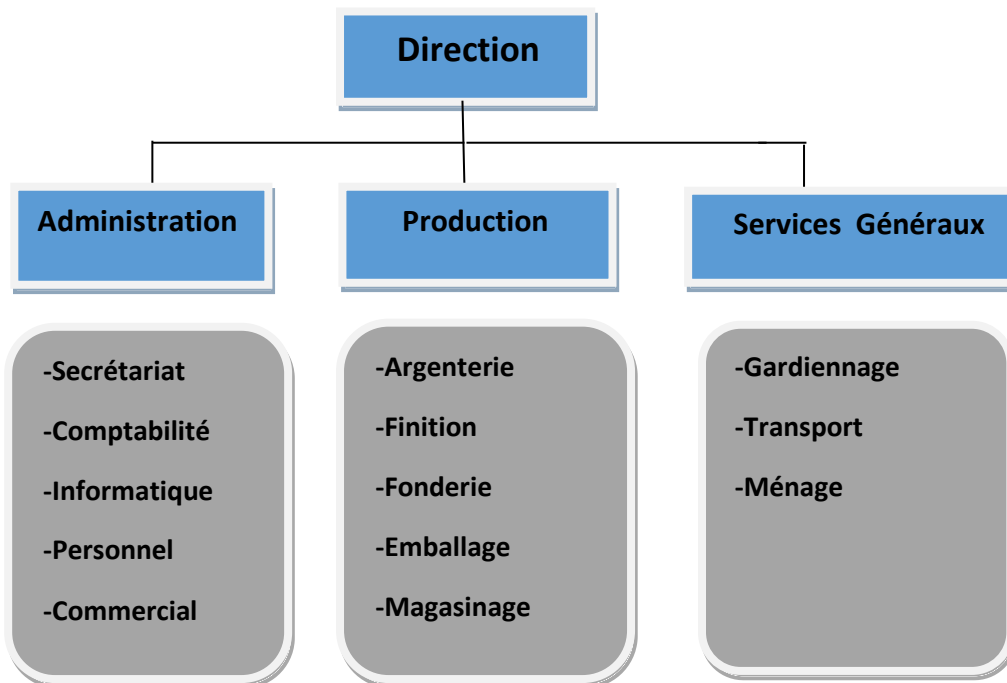
### **III-clients de la société :**

Les clients de la Société Des Artisans Dinandiers De Fès sont aussi bien des marocains que des étrangers.

- ✚ Au niveau national : Palais royaux, Hôtels, Etablissement étatique...
- ✚ Au niveau international : Emirat Arabes Unies (foires de Dubaï et d'Abu Dhabi), Arabie Saoudite (foires de Riad), Qatar...

### **IV-La structure de la société (SADF) :**

La SADF comprend actuellement 180 personnes avec 84% d'hommes et 16% de femmes.



**Figure 1** : l'organigramme de la société

### **V-Procédé de fabrication :**

Le procédé de fabrication dépend de deux éléments à savoir :

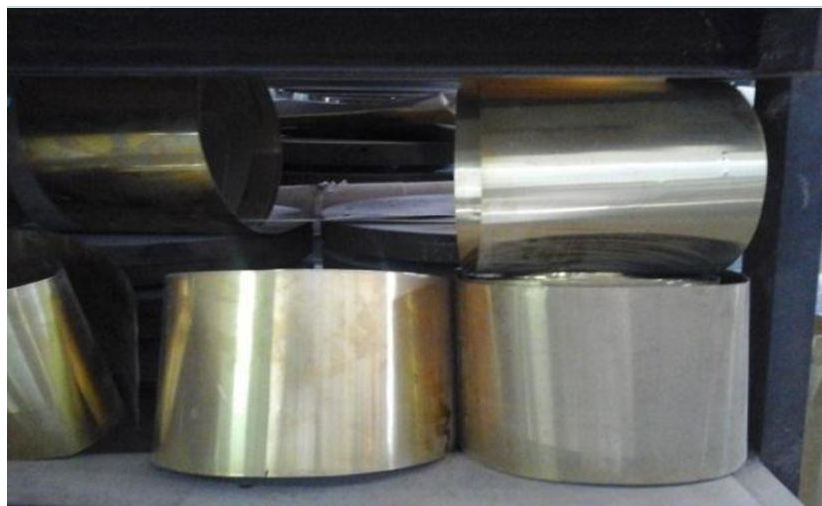
- ✓ La matière première.



- ✓ La chaîne de production.

### ***A-Matière première :***

La Société « SADF » utilise comme matière première le laiton; qui est un alliage de cuivre (60-70%) et de zinc (30-40%), et il peut contenir d'autres éléments d'addition comme le plomb, l'étain, le nickel, le chrome et le magnésium, dans des proportions très modérées.



**Image 1 : matière première**

### ➤ **Les propriétés du laiton :**

Très bonne résistance à la corrosion. Le laiton est un alliage relativement malléable qui peut être travaillé à chaud comme à froid. Sa résistance à la corrosion ainsi que sa ductilité lui donne un aspect de surface agréable.

### ***B-Chaine de production :***

#### **1-Modélisation :**

La modélisation se fait par un groupe de modélistes spécialisés qui élaborent des modèles des pièces d'un article sous forme d'exemplaires. Elle consiste à faire un modèle sur un papier à suivre pendant la production des articles.

#### **2-découpage :**

Des modèles requis de différentes pièces de l'article sont tracés sur des plaques de laiton de différentes épaisseurs en tenant compte des dimensions mentionnées sur l'exemplaire. Ensuite ces plaques sont découpées par deux méthodes : soit par découpage manuel ou découpage électrique (ciseau électrique).

### **3-Gravure :**

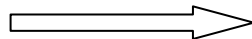
La gravure se fait à la main ou à la machine, C'est une technique qui désigne l'ensemble des procédés qui permettent la réalisation de dessins à partir d'une matrice gravée en creux (pour les plaques des métaux) ou en relief (pour les plaques de bois), La gravure repose sur la compétence des maitres artisans qui exécutent des motifs décoratifs dessinés sur les surfaces de plaque de laiton. Ces motifs présentent la beauté et l'originalité des produits artisanaux marocains.



**Image 2 : Gravure à la main**

### **4-Repoussage :**

Le repoussage est le procédé de mise en forme des pièces produites à partir d'un disque de tôle. Ceci a pour but de fabriquer les articles sous des formes géométriques voulues et désirées.



**Image 3 : procédé de déformation d'une pièce.**

### 5-Fondrie :

Les chutes de laiton provenant des différentes étapes de fabrication sont conduites à la fonderie pour reproduire un article désiré.



Image 4 : les chutes de laiton



Image 5: fendage des chutes.

### 6-Limage :

Les pièces provenant de la fonderie contiennent des irrégularités qui nécessitent des corrections à l'aide d'une machine pour donner aux bords de la pièce la forme demandée.

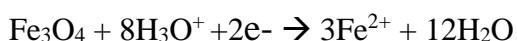
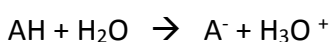
### 7-soudure :

Elle consiste à souder les différentes pièces provenant du limage et de la fonderie. Cette fixation est réalisée par des soudures en étain.

### 8- décapage :

Le décapage est l'élimination de toutes traces d'impureté ainsi que les couches d'oxyde superficielles, les hydroxydes, les particules métalliques incrustées et toutes sortes d'impuretés à la surface du métal. Pour décaper une pièce, on utilise les acides forts et concentrés citons par exemple, HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. Un mélange d'acides peut être aussi utilisé.

❖ Exemple d'élimination d'oxyde de fer à la surface du métal :



### **9-polissage :**

Le polissage est l'action de polir, de rendre les articles lisses et éventuellement brillants, ce procédé est effectué par des brosses montées sur des machines tournantes à grande vitesse.

### **10-Ravivage :**

C'est un polissage secondaire qui donne un éclat à l'article et rend sa surface plus vive par l'utilisation d'une pâte rouge et des machines équipées de papier abrasif.

### **11-Contrôle de qualité :**

Avant d'emballer les articles, la qualité doit être contrôlée. Cette opération est destinée à déterminer, avec des moyens appropriés, si le produit fabriqué est conforme ou non aux exigences.



**Image 6 : Contrôle de qualité par des spécialistes.**

### **12-traitement de surface :**

Le procédé de traitement de surface utilisé par la **SADF** est basé sur le principe de l'électrolyse, il consiste à déposer une couche d'un métal sur un article artisanal et de lui conférer un aspect visuel agréable tout en augmentant sa résistance à la corrosion et à l'usure.

### **13-Emballage :**

Avant d'emballer les articles il faut s'assurer que ces derniers sont dépourvus de défauts, cette étape est réalisée par une équipe spécialisée. Et comme les pièces métallique sont exposées au phénomène d'oxydation, aux chocs, aux poussières... lors du transport, on les protège par des emballages spécifiques (papier fin, sacs en plastiques, cartons...).



**Image 7 : Emballage en papier**



**Image 8 : Emballage en plastique**

## **VI- Conclusion**

Chaque opération dans la société a un rôle bien défini, et sûrement conditionne la qualité du produit final et surtout l'aspect des articles artisanaux qui est une dimension très importante pour la société.

***Chapitre II :***  
***Le traitement de surface par voie***  
***Electrolytique.***



# Chapitre II [Traitement de surface par voie électrolytique]

---

## **I-Introduction :**

En électrochimie, on étudie les phénomènes engendrés lorsqu'un milieu chimique électrolytique est en interaction avec un circuit électrique ; On distingue deux systèmes importants [2] :

- **Les piles (transformation spontanée) :** elles transforment l'énergie chimique en énergie électrique.

Pôle positif : cathode : réduction.

Pôle négatif : anode : oxydation.

- **Les électrolyseurs (transformation forcée) :** l'énergie électrique sert à provoquer des réactions électrochimiques.

Une réaction d'électrolyse correspond à la somme de 2 réactions électrochimiques qui se produisent au contact de 2 électrodes, reliées à un générateur de courant, plongeant dans une solution électrolytique. Les 2 réactions ont lieu dans le sens non spontané grâce à l'énergie électrique apportée par le générateur.

Pôle positif : anode : oxydation.

Pôle négatif : cathode : réduction.

Un système électrochimique (pile ou électrolyseur) est composé de deux électrodes (milieu à conduction électronique) plongeant dans un milieu électrolytique (milieu à conduction ionique) [2].

La SADF utilise la technique d'électrodéposition puisqu'elle est moins coûteuse et peut être appliquée à la fabrication des substrats de géométrie complexe, ce dépôt basé sur le principe d'électrolyse, il se réalise à partir d'une solution contenant les ions du métal à déposer ainsi que des additifs visant à améliorer la qualité du revêtement réalisé.

La vitesse de dépôt est liée à la densité du courant circulant dans la cellule d'électrolyse, dont la pièce à revêtir constitue la cathode, l'anode pouvant être une plaque du métal à déposer (anode soluble) ou un matériau inerte.

## II- Electrolyse :

### *1-définition :*

L'électrolyse est un processus d'échange au cours duquel l'énergie électrique est transformée en énergie chimique. La réaction a lieu dans une solution d'eau salée: l'électrolyte. Les ions doivent pouvoir circuler librement dans l'eau pour passer d'une électrode à l'autre.

Une électrolyse est utilisée lorsque les réactifs de départ ne peuvent évoluer spontanément pour former les produits souhaités. Ce type de réaction permet de faire évoluer un système dans le sens contraire de son sens d'évolution spontané, c'est-à-dire on force le système à évoluer dans le sens inverse on lui fournit de l'énergie par un générateur de tension continue [3].

### *2-Principe :*

L'électrolyse se réalise dans une cuve contenant un électrolyte dans lequel sont plongées deux électrodes reliées aux bornes d'un générateur de courant continue.

Ce générateur oblige le courant à passer de la borne positive à la borne négative en traversant le circuit électrolytique, et les électrons circulent en sens inverse du courant (du pôle négatif vers le pôle positif du générateur)

Les électrons affluant à l'électrode reliée au pôle négatif du générateur y provoquent la réduction de certaines espèces en solution. Cette réduction ne peut avoir lieu que grâce à l'apport des électrons fournis par la borne négative du générateur. L'électrode correspondante, siège d'une réduction, est appelée cathode.

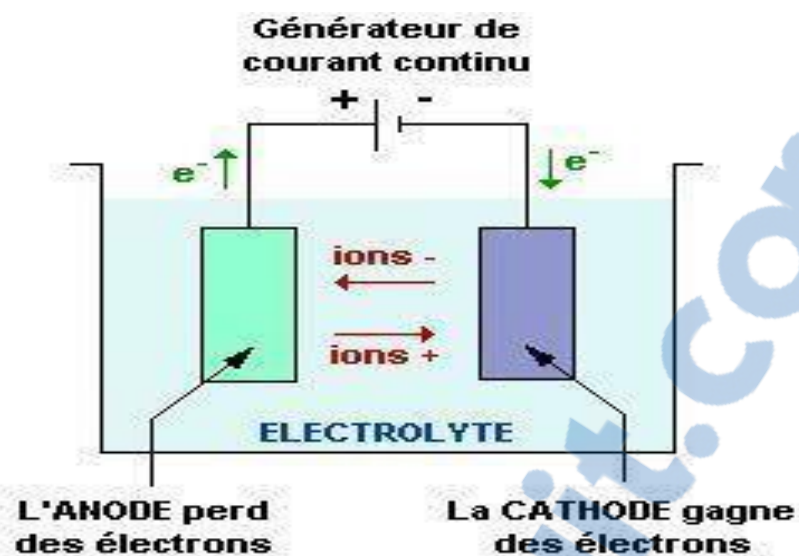
**Simultanément**, des électrons se déplacent de l'autre électrode vers le pôle positif du générateur. Ces électrons sont fournis par l'oxydation d'autres espèces en solution, oxydation se déroulant à la surface de cette électrode, appelée anode. On parle généralement de réduction cathodique et d'oxydation anodique.

En résumé, le pôle négatif du générateur est toujours relié à la cathode de l'électrolyseur (siège d'une réduction) et son pôle positif à l'anode (siège d'une oxydation) [4].

Donc :

- L'électrode liée à la borne + est l'anode et elle va attirer les ions négatifs.
- L'électrode liée à la borne – est la cathode qui va attirer les ions positifs.



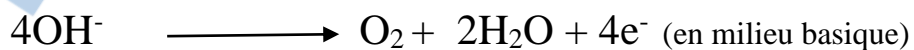
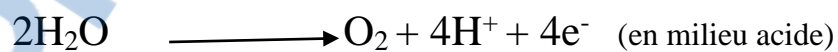
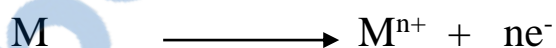


**Figure 2 :** Schéma de montage d'une cellule d'électrolyse.

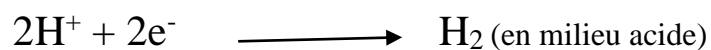
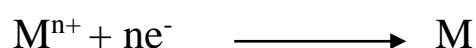
**Le montage électrolytique utilisé pour l'électrolyse comporte trois parties essentielles:**

- Une source de courant continu pour procurer l'énergie nécessaire à la réaction.
- Deux électrodes, la cathode et l'anode.
- Un électrolyte.

➤ Les réactions possibles à l'anode sont :



➤ Les réactions possibles à la cathode sont :





### N.B.:

- ❖ La différence entre système de pile et système d'électrolyse c'est que l'anode n'a pas le même signe dans le fonctionnement en électrolyseur que dans le fonctionnement en pile. Mais on a toujours : **oxydation à l'anode et réduction à la cathode [2]**.
- ❖ Dans le cas des piles le principe est basé sur le potentiel standard des couples redox.
- ❖ Deux types d'anodes peuvent être utilisés :

**Les anodes soluble:** ils donnent les ions métalliques dans le bain électrolytique et repoussent les ions positifs vers le substrat (pièce à la cathode) pour être déposés. Ce type d'anode est consommée au cours du traitement donc il doit être remplacé régulièrement.

**Les anodes insolubles (inerte) :** ces anodes ne fournissent pas d'ions métalliques, mais elles ont une seule fonction : repousser les ions positifs vers la cathode. Elles sont fabriquées dans les matériaux conducteurs qui ne participent pas à la réaction de la solution.

### *3-les facteurs influençant un dépôt électrolytique :*

La variation des facteurs d'électrolyse influe sur la qualité du dépôt relatif [5], Il est établi que la structure métallique du revêtement dépende de la densité de courant appliquée, les caractéristiques du dépôt dépendent aussi de l'agitation et de la composition de l'électrolyte, L'action est similaire à celle de la température et de l'ajout des éléments d'additions, tels que, les brillanters, les agents nivelant, les mouillants... etc.

#### **a-Température :**

Si la température du bain augmente, la vitesse de diffusion des ions et la conductibilité du bain augmentent aussi, cela accélère le processus du dépôt électrolytique. Cependant, dans le même temps, les surtensions diminuent et cela favorise la croissance des grains (dépôt mat) [6].

#### **b-Agitation :**

Au cours de l'électrolyse, la concentration de l'électrolyte au niveau de la cathode diminue. Il est nécessaire de maintenir une certaine agitation pour uniformiser les concentrations afin d'obtenir un dépôt continu et régulier. D'un autre côté, cela facilite la diffusion des ions [7].

#### **c-PH du bain :**

Par exemple dans les bains de nickelage, un pH trop grand donne un dépôt mat, Pour éviter ces inconvénients, les solutions d'électrolytes sont maintenues à un pH constant par addition d'une substance tampon [8,9].

#### **d- La densité du courant :**

La densité du courant à appliquer dépend du métal à déposer et du type d'application recherché. Si la densité du courant augmente, un effet favorable peut être constaté au début : la vitesse de formation des germes augmente sans que la vitesse de croissance de ceux-ci soit modifiée. En effet, par une accélération de l'électrolyse, il est possible d'obtenir une augmentation de la vitesse de diffusion des ions [10].

Cependant, si la densité du courant est trop grande, la croissance de revêtement devient irrégulière. Au-delà d'un seuil, il se forme un dépôt pulvérulent se réduisant facilement en poudre qui ne tarde pas à se désagréger.

#### **e-Nature de l'électrolyte :**

Un électrolyte est une substance, ou un composé qui à l'état liquide ou en solution, permet le passage du courant électrique, par déplacement d'ions.

L'expérience a montré que l'électrolyse de sels complexes donne des dépôts de meilleure qualité que ceux obtenus avec les sels simples. Ainsi, le dépôt d'argent réalisé en électrolysant une solution d'un sel simple (par exemple, le nitrate d'argent  $\text{AgNO}_3$ ) est formé de longues aiguilles et est peu consistant alors qu'avec des solutions cyanurées, le dépôt est très compact et très adhérent. Les cristaux sont alors petits [11].

#### **f-Concentration de l'électrolyte :**

Si la concentration de l'électrolyte augmente, le nombre des ions devient plus grand et cela favorise un dépôt des grains fins. Néanmoins, lorsque la concentration dépasse une limite déterminée, le dépôt devient pulvérulent [12].

### g- Nature du métal :

Des métaux ont tendance à donner des dépôts grossiers et d'autres des dépôts à grains fins, à conditions d'électrolyse égales. La différence se situe au niveau de la surtension. Les métaux qui ont tendance à donner des dépôts grossiers ont une faible surtension. On met des agents brillanters pour favoriser la finesse du grain [13].

### h- les additifs :

En électrodéposition, les additifs sont utilisés dans le but de changer les conditions d'électro cristallisation et les propriétés des dépôts électrolytiques. Les uns permettent d'obtenir des dépôts brillants, les autres diminuent la tension superficielle à l'interface métal/solution et facilitent le décollement d'hydrogène gazeux [12].

### 4-But et domaine d'application :

L'électrolyse ou les traitements électrolytiques permettent de déposer sur les métaux de faibles couches de revêtements métalliques [14], ce dépôt joue plusieurs rôles :

- Améliorer les propriétés de surface d'un métal pour le protéger en accroissant sa dureté, sa résistance à la corrosion...
- Cette technique a une large utilisation dans le domaine industriel, par exemple : L'électrolyse d'une solution de chlorure de sodium permet d'obtenir du dichlore, du dihydrogène, de la soude et de l'eau de javel (cela dépend des conditions d'électrolyse).
- A l'aide d'un procédé qui se nomme "électrolyse à anode soluble", on peut purifier des métaux comme le plomb, le fer, le zinc ou le cuivre.

## III-Relation de Nernst :



**Figure 3 :** Potentiel standard de réaction d'électrode par rapport à l'électrode normale à hydrogène

L'échelle des potentiels représentés sur la figure 3 reporte les potentiels d'équilibre dans les conditions standards. Mais en réalité, dans une expérience d'électrodéposition, les conditions de travail sont différentes des conditions standard. On définit alors un autre potentiel à l'aide de l'équation de Nernst qui s'applique à une réaction d'électrode en équilibre :  $M^{n+} + ne^- \rightleftharpoons M$

Elle permet de relier le potentiel thermodynamique (ou d'équilibre)  $E$  d'un couple redox en solution à son potentiel standard  $E^0$  en fonction des concentrations de ses espèces en solution et de leur température [15].

$$E = E^{\circ} + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[ox]^a}{[Red]^b}$$

Avec :

$E$  : le potentiel d'équilibre.

$E^0$ : potentiel standard (donné par les tables).

$F$  : Constante de Faraday (96500 C.mol<sup>-1</sup>).

$n$  : nombre d'électron mis en jeu.

$R$  : Constante des gaz parfaits (8,314 J.mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>).

$T$  : température (K).

[Ox] : la concentration de l'oxydant (mol.l<sup>-1</sup>).

[Red] : la concentration du réducteur (mol.l<sup>-1</sup>).

$a, b$  : les coefficients stœchiométriques.

Lorsqu'on applique à une électrode un potentiel inférieur à son potentiel d'équilibre, on parle d'une réaction de réduction et la polarisation est dite cathodique. Lorsque le potentiel appliqué est supérieur au potentiel d'équilibre, on parle d'une réaction d'oxydation et la polarisation est anodique [15].

La différence de potentiel entre le potentiel de l'électrode et le potentiel d'équilibre est appelée la surtension. Elle s'exprime de la manière suivante :

$$\eta = E_I - E$$

Ou,  $E_I$ : le potentiel appliqué.

## IV-La loi de Faraday :

Michael Faraday a montré dans ses travaux classiques que la quantité de métal déposée à la cathode et la quantité dissoute à l'anode sont proportionnelles à la quantité d'électricité mis en jeu, et le temps de l'électrodéposition.

Faraday relie également la quantité du métal déposée ou dissoute à son poids atomique et aux nombre d'électrons impliqués dans la réaction électrochimique [16].

La masse du revêtement mise en solution par électrolyse est donnée par la loi de Faraday :

$$m = \frac{M \cdot I \cdot t}{n \cdot F}$$

**Avec :**

**m** : la masse théorique déposée en (g).

**F** : la Constante de Faraday (96500 C/mol).

**n** : nombre de valence (nombre d'électrons mis en jeu).

**I** : courant imposé (A).

**t** : Temps d'application du courant en (s).

**M** : la masse molaire en (g/mol).

On peut utiliser la loi de faraday pour calculer le rendement électrolytique. Ce rendement permet de déterminer l'efficacité du dépôt électrolytique et de déterminer les conditions opératoires permettant d'optimiser le rendement pour avoir un meilleur revêtement métallique.

Le rendement est calculé par la relation :

$$R = \frac{m_{exp}}{m} \times 100$$

Avec :

**m<sub>exp</sub>** : la masse expérimentale en (g).

**R** : le rendement (%).

**m** : la masse théorique en (g).

## V- Conclusion :

Le dépôt électrolytique est utilisé pour déposer une ou plusieurs couches métalliques sur une surface de métal. L'objectif de ce procédé est de transmettre les propriétés protectrice et esthétique d'un métal noble au substrat.

***Chapitre III :***  
***Procédés et techniques appliquées.***

# Chapitre III [Procédés et techniques appliquées]

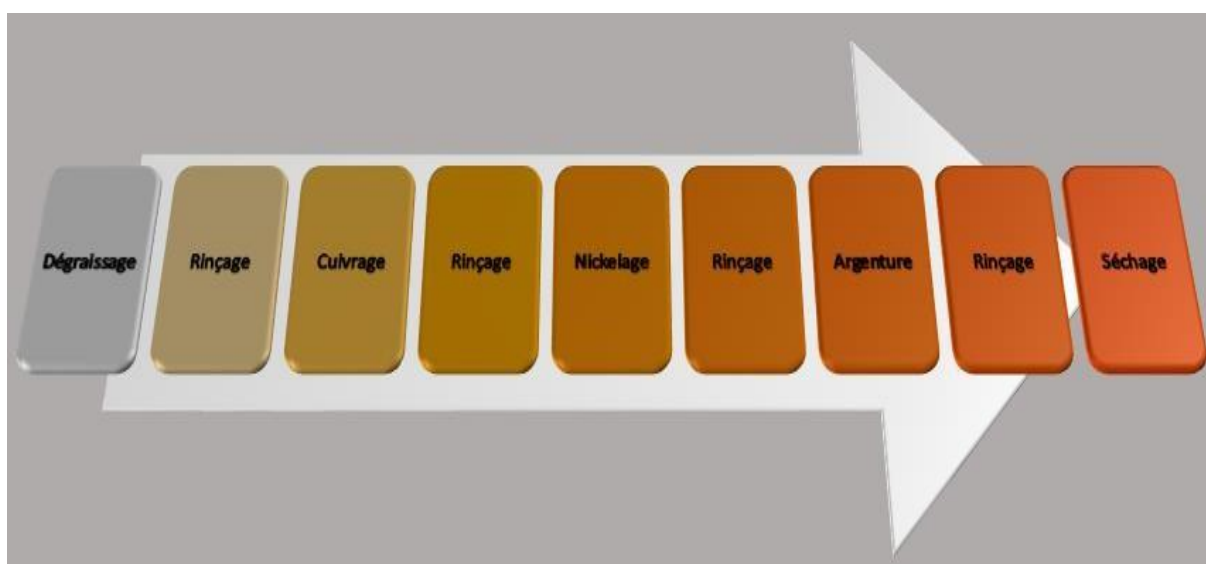
---

## **I-Introduction :**

Les procédés de traitement de surface des métaux par voie électrolytique sont réalisés dans les bains électrolytiques d'une manière séquentielle.

Les installations de la chaîne de traitement sont composées d'une série d'étapes à suivre dès le nettoyage de la surface du métal jusqu'au séchage au four à la fin du processus.

On peut résumer la chaîne de traitement par le schéma suivant :



**Figure 4 : Schéma simplifié de la chaîne de traitement.**

## **II-Equipement des bains :**

**Cuves** : les bains doivent être revêtus de caoutchouc, de PVC...

**Générateur** : est la source d'énergie électrique en courant continu, lors d'électrolyse cette énergie sera transformée en énergie chimique.

**Les électrodes** : en général on utilise des électrodes métalliques de première espèce. Le choix des électrodes est réparti selon les bains.



**Système d'agitation** : est effectuée : mécaniquement, par vibration des articles sans agiter la solution ou bien par barbotage de la solution.

**Système de chauffage** : les cuves doivent être équipées d'un système de chauffage assuré par les thermoplongeurs avec une régulation thermostatique.

**Filtration** : la filtration se fait en utilisant une pompe qui contient le charbon actif pour éliminer les traces des impuretés qui se trouvent dans le bain.

Cette filtration donne une couche de métal propre et lisse déposée sur l'article.

### **III- les différents bains utilisés dans la Société :**

#### ***1- Dégraissage :***

La qualité d'un revêtement dépend énormément de la préparation préalable de la surface. De façon générale, le but de la préparation de la surface est l'augmentation de l'adhérence. Pour qu'il y ait adhérence, il faut avoir des liaisons directes entre le substrat et le revêtement, donc il faut éliminer les agents étrangers déposés sur la surface, essentiellement les graisses.

##### **a-définition :**

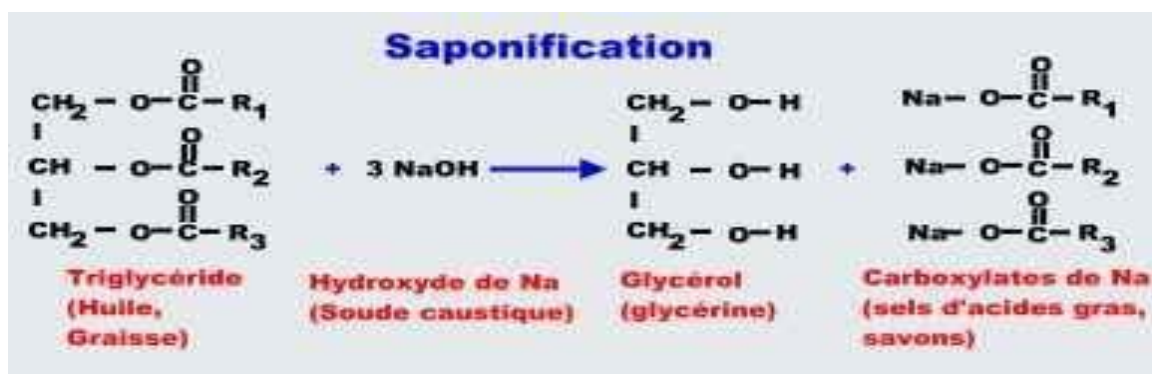
Le dégraissage est un traitement chimique ou électrolytique qui permet d'éliminer les graisses et les huiles présentes sur la surface des pièces, le rôle de cette opération est primordial car elle conditionne le déroulement des opérations ultérieures et la qualité du produit final.

##### **b-Mécanisme :**

Le mécanisme de dégraissage est constitué de deux phénomènes principaux:

##### ○ **Saponification**

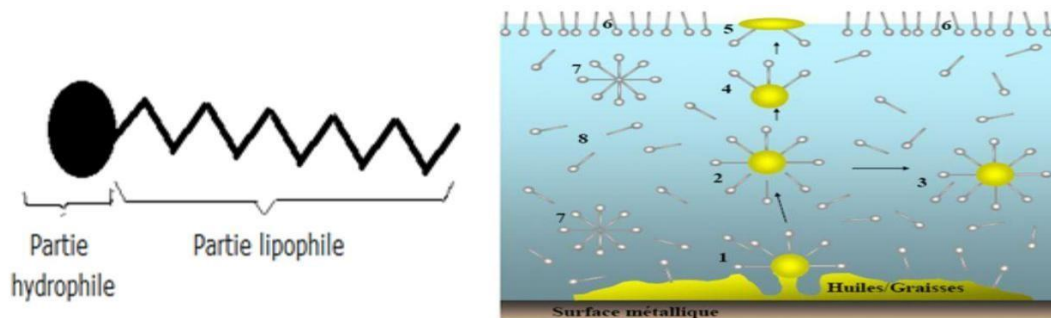
C'est l'action de la soude caustique sur des triglycérides (huile, graisse) pour donner un sel (Savon) et du glycérol, c'est la décomposition de la couche graisseuse saponifiable et sa transformation en savon.



**Figure 5 : Mécanisme de saponification.**

##### ○ **Détergence**

Dans cette étape, les tensio-actifs permettent la dispersion des corps gras dans l'eau ce qui aboutit à la formation des micelles. Chaque tensio-actifs constitue de deux parties : partie hydrophile reste en contact avec l'eau de solution et partie lipophile se fixe facilement sur les graisses.



**Figure 6 : Mécanisme de détergence.**

### c-Types de dégraissage :

- **Dégraissage chimique** : ce type de dégraissage utilise des produits chimiques pour nettoyer l'aspect extérieur de la pièce ; on note la présence **des solutions alcalines** dont la forte alcalinité exerce un effet saponifiant ainsi la présence **des tensio-actifs** qui sont des molécules amphiphiles (présentent deux parties l'une lipophile et apolaire, l'autre hydrophile et polaire).
- **Dégraissage électrolytique** : Ce procédé repose sur l'électrolyse des pièces à nettoyer, dans un bain alcalin composé de soude caustique, d'agents mouillants, de dispersants et d'autres produits chimiques. Lors du nettoyage, la pièce joue le rôle soit d'anode, soit de cathode. L'application d'un courant continu provoque la formation d'oxygène à l'anode et d'hydrogène à la cathode, le gaz forme de petites bulles directement à la surface du métal, sous la couche de salissures ces bulles montent vers la surface, ce qui a pour effet de détacher de la surface des pièces les salissures qui sont ensuite dissoutes ou émulsifiées dans la solution de dégraissage.

Dans la Société on utilise le dégraissage électrolytique dont la composition de bain est :

**La soude caustique NaOH** : matière première de l'alcalinité, pouvoir saponifiable.

**Carbonate de sodium Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>** : Agent tensioactif.

**Phosphate tri-sodique Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>** : il possède un excellent pouvoir dispersant et il améliore le rinçage des détergents ainsi qu'il est un très bon agent tampon.

**Tableau 2 : composition et conditions de travail du bain de dégraissage.**

Composition	Les Conditions de travail
-La soude caustique NaOH	-pH= (11 à 12)
-Cyanure de sodium NaCN	-5 à 10 minutes
-Phosphate tri sodique Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	-Température ambiante
-Carbonate de sodium Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-Baumé de 15 à 17 degré

**Remarque :** Cette technique a généralement de très bons résultats, mais elle donne certains effets secondaires (formation d'oxydes à l'anode, attaque du métal par la solution basique, fragilisation du substrat par l'hydrogène, redéposition d'impuretés à partir de bain pollué)



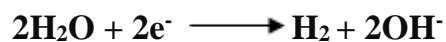
**Image 9 :** Bain de dégraissage.

Les réactions qui se produisent dans ce bain sont :

- **A l'anode :**



- **A la cathode (la pièce) :**

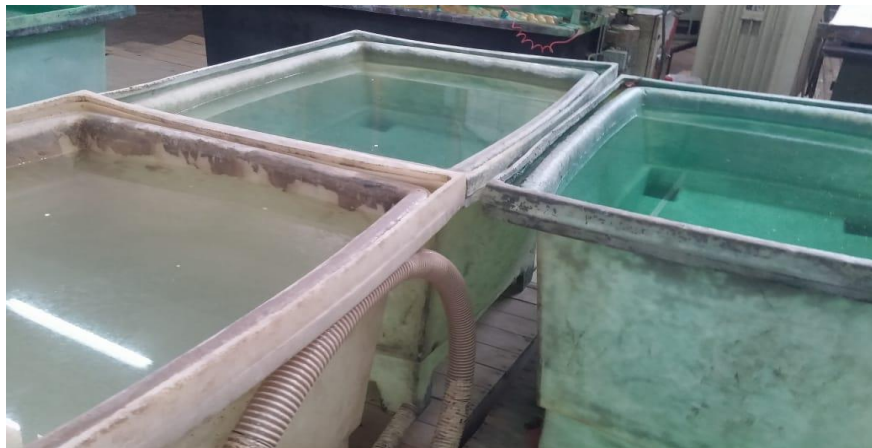


Les bulles d'hydrogènes dégagées au niveau de la cathode permettent de détacher les salissures qui se trouvent à la surface de la pièce.

**Remarque :**

Lorsque l'opération de dégraissage est terminée, il faut rincer la pièce avant de passer au processus suivant afin d'éviter la mise en contact de substances chimiques non compatibles et la contamination des bassins.

Pour bien rincer, l'installation est composée de trois baigns de rinçage successifs. On immerge la pièce à traiter dans chaque bain avant de passer au bain suivant. L'association de plusieurs rinçages en série permet de réduire la concentration de trace de matière sur la pièce.



**Image 10 : baigns de rinçage**

**2-Cuivrage :**

Opération de revêtement d'une surface par une couche de cuivre. La couche de cuivre déposée sur la surface a plusieurs usages (décoratifs ou techniques) en fonction des besoins, de la matière, et des conditions électrochimiques :

- Protection contre l'oxydation.
- Recouvrement esthétique.
- Préparation de surface avant autres traitements (chromage, nickelage...) : car les alliages cuivreux ne peuvent être chromés ou nickelés directement sur leur surface d'origine.

❖ **Caractéristiques physiques et mécaniques :**

Les différentes caractéristiques physiques du cuivre sont résumées dans le tableau suivant [17] :

**Tableau 3 : Caractéristiques physiques et mécaniques du cuivre.**

Masse atomique .....	(u)	63,54
Masse volumique .....	(g/cm <sup>3</sup> )	8,9 à 8,95
Température de fusion .....	(°C)	1 083
Coefficient de dilatation .....	(K <sup>-1</sup> )	16,5 × 10 <sup>-6</sup>
Conductivité thermique à 273,2 K .....	(W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	403 (428 pour Ag)
Résistivité électrique à 20 °C .....	(μΩ · cm)	1,72 (1,6 pour Ag)
Résistance à la rupture .....	(MPa)	220
Limite d'élasticité .....	(MPa)	50
Allongement .....	(%)	40
Dureté Vickers (Cu recuit) .....	(HV)	50
1 kgf/mm <sup>2</sup> = 9,81 N/mm <sup>2</sup> = 9,81 MPa.		
(1) Cette grandeur dépend beaucoup de la pureté du cuivre.		

### ❖ Propriétés électrolytiques du cuivre :

Le cuivre, métal peu oxydable, présente deux degrés d'oxydation possibles Cu (+I) et Cu (+II).

Sa couleur fonce à l'air par oxydation et noircit par sulfuration. L'air sec et l'eau pure sont sans action sur le cuivre. Tout cela confirme le caractère relativement noble de ce métal.

D'après l'échelle des potentiels normaux par rapport à l'hydrogène, le potentiel standard du couple Cu/Cu<sup>++</sup> est supérieur à celui de l'hydrogène : +0.337 V/ENH (Cu/Cu<sup>+</sup> : 0,52V). En présence de sels ammoniacaux ou de cyanures formant avec les ions Cu<sup>+</sup> des complexes très stables, on observe une très forte corrosion du cuivre, même en l'absence d'oxydants. En effet, dans ces milieux, le domaine de passivation est excessivement réduit et le potentiel d'équilibre du cuivre abaissé à une valeur considérablement plus basse = -1,1V (Autrement dit, le cuivre devient beaucoup moins noble) [18].

Les dépôts du cuivre sont obtenus généralement à partir d'une large gamme d'électrolytes [19], dont les principaux sont :

- Electrolytes acides : ceux sont des électrolytes à sulfate.
- Electrolytes basique : Ceux sont des électrolytes à base de cyanure.

### a-Cuivrage en milieu alcalin (solution de sels complexes) :

Dans les bains de cuivrage cyanurés (complexés), le cuivre se trouve sous forme monovalente Cu (+I), et qui se dépose deux fois plus rapidement que le cuivrage acide.

Dans ces bains le cyanure se forme un complexe très stable : Cupro-cyanure.



Le tableau suivant représente le mode opératoire du cuivrage alcalin ainsi que les conditions de travail utilisées par la société :

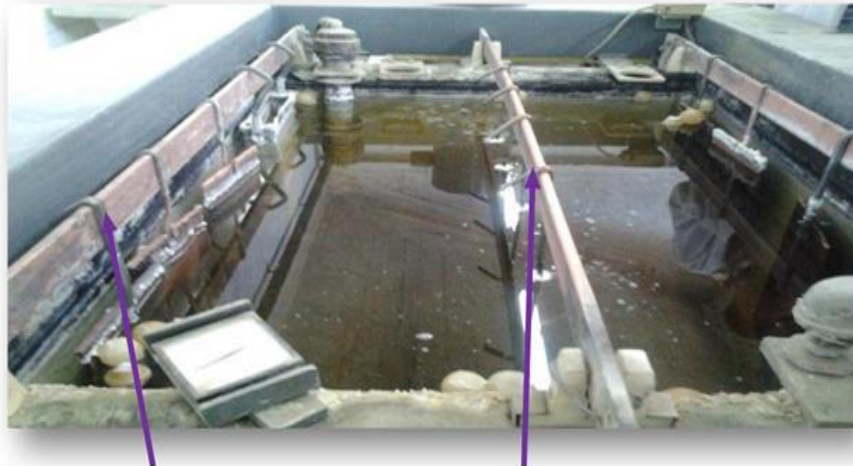
**Tableau 4 : Mode opératoire du cuivrage alcalin.**

Composition	Les Conditions de travail
<ul style="list-style-type: none"><li>-Cyanure de Cuivre CuCN.</li><li>-Cyanure de sodium NaCN.</li><li>-La soude caustique NaOH.</li><li>-Additifs : brillanteur, base, agent mouillant.</li><li>-Anodes en cuivre.</li><li>-Eau déminéralisée.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Température entre 35 et 40 °C</li><li>- Temps d'immersion : 2 à 5 min.</li><li>- densité de courant : 0,5 à 3A/dm<sup>2</sup>.</li><li>- PH = 11.</li><li>- degré baumé : 14°</li></ul>



Le cyanure libre a plusieurs rôles : permet de complexer le cuivre, comme il facilite la dissolution des anodes.

Dans le bain de cuivrage alcalin, la pièce à cuivrer est reliée à la cathode, l'anode sera en cuivre pur. Avant de tenter le traitement des pièces définitives il faudra faire des essais sur quelques échantillons. Comme Il est indispensable d'agiter en permanence la pièce à cuivrer pour avoir une répartition uniforme du dépôt.



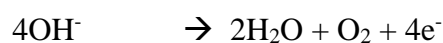
Anode en cuivre

pièce à cuivrer reliée à la cathode

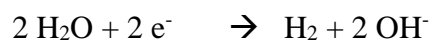
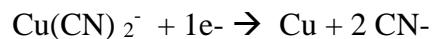
**Image 11 : Bain de cuivre Alcalin.**

Les réactions qui se produisent dans ce bain sont :

- **A l'anode** : l'oxydation du cuivre

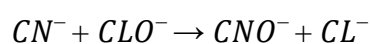


- **A la cathode** : le cuivre se réduit sur la pièce.



Les revêtements de cuivre provenant des cyanures ont un excellent pouvoir de répartition. Ils possèdent une fine granulation ainsi qu'une très bonne adhérence. Mais l'inconvénient majeur de ces électrolytes est leur toxicité.

Après l'utilisation de ce bain, il faut détruire les cyanures par l'ajout d'hypochlorite de sodium NaClO, notamment sous forme d'eau de javel, qui permet d'oxyder le cyanure partiellement en cyanate (substance moins toxique) selon la réaction suivante :



### **b-Cuivrage en milieu acide (solution de sels simples) :**

La plus simple des solutions de cuivrage électrolytique acide est formulée à partir de sulfate de cuivre ( $\text{CuSO}_4$ ), et d'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Le cuivre est entièrement ionisé en  $\text{Cu}^{++}$ .

L'acide sulfurique est indispensable pour la qualité du dépôt du fait qu'il accroît la conductivité de l'électrolyte.

La composition du bain de cuivrage acide est donnée par le tableau suivant :

**Tableau 5 : Mode opératoire du cuivrage acide.**

<b>Composition</b>	<b>Les Conditions de travail</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>-Sulfate de Cuivre : <math>\text{CuSO}_4</math>.</li><li>-Acide sulfurique : <math>\text{H}_2\text{SO}_4</math>.</li><li>-les additifs : Nivelant, brillanteur.</li><li>-anodes en cuivre avec une portion de 0,02 à 0,04 % de phosphore.</li><li>-Eau déminéralisée.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Température ambiante.</li><li>-Temps de traitement ; 15 à 20 min</li><li>-PH <math>\leq 4,5</math></li><li>-Le degré Baumé de 19 à 25 degré</li><li>-Densité de courant : 2 A/dm<sup>2</sup></li><li>-Agitation.</li></ul>

L'anode est constituée d'une plaque de cuivre avec une portion de phosphore, ce bain donne un aspect beaucoup plus décoratif ; car la présence de phosphore favorise la formation des grains très fins et de ce fait influence favorablement la brillance final.

#### **Remarque :**

Les additifs sont des substances ajoutées en petites quantités dans des bains d'électrolyse afin d'améliorer ou de modifier certaines propriétés du revêtement durant sa fabrication, son stockage, son transport ou ses applications.

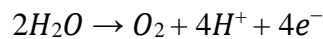
Les agents additifs ont pour rôle de purifier les grains, d'accroître la dureté et la brillance du dépôt de cuivre.



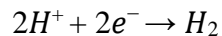
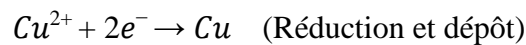
**Image 12 : Bain de cuivre acide.**

Les réactions qui se produisent dans ce bain sont :

○ **A l'anode :**

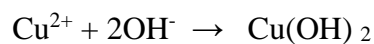


○ **A la cathode :**



**Remarque :**

Dans ce bain on observe un précipité **bleu** qui provient de la réaction suivante :



Tous les bains doivent subir une filtration continuellement par le charbon actif afin d'assurer un dépôt pur et lisse.

***3-Nickelage :***

Le nickelage constitue le procédé de revêtement électrolytique le plus répandu tant par les quantités utilisées que par le grand nombre d'applications liées à sa relative facilité, de dépôt à des épaisseurs très variables, à ses propriétés mécaniques et à la variété des substrats ainsi couverts [20].

❖ **Caractéristiques physiques et mécaniques:**



**Tableau 6 : principales caractéristiques physiques du nickel [21].**

Symbole	Ni
Masse volumique	8.9 g/cm <sup>3</sup>
Température de fusion	1445°C
Coefficient de dilatation	13.6x10 <sup>-6</sup> (°C) <sup>-1</sup> à 20°C
Conductivité thermique	74 à 95 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
Résistivité électrique	6.85 μΩ.cm
Résistance à la rupture	>350 MPa
Limite d'élasticité	150 MPa

❖ **Propriétés électrolytiques :**

Le nickel se caractérise par sa haute résistance à la corrosion et à l'usure, et son pouvoir lubrifiant. présente le degré d'oxydation +II et exceptionnellement +IV. Métal légèrement noble, il se ternit à l'air par formation d'oxyde NiO qui le passive, alors que l'eau pure est sans action sur lui. Le potentiel standard du couple Ni/Ni<sup>++</sup> (-0,25 V/EHN) le rend plus noble que le fer.

❖ **Nickelage en solution du sel sulfate (Bain de watts) :**

On fait circuler un courant continu entre deux électrodes immergés dans une solution conductrice aqueuse de sels de Ni, l'écoulement de courant provoque la dissolution de l'anode et le recouvrement de la cathode par du Nickel. Dont la composition du bain est :

**Tableau 7 : Mode opératoire du Nickelage.**

La composition	Condition du travail
-Sulfate de nickel NiSO <sub>4</sub> . -Chlorure de nickel NiCl <sub>2</sub> . -Acide borique H <sub>3</sub> BO <sub>4</sub> . -Additifs : Fixateur. Brillanteur. Nivelant. -Eau déminéralisée.	-Température : 60°C à 70°C -Temps de traitement : 10 à 15 min -pH : 3,8 à 5 -Densité de courant : 3 à 5 A/dm <sup>2</sup> . -Filtration par charbon actif. -Agitation mécanique.

La source principale de Ni<sup>++</sup> est constituée par le NiSO<sub>4</sub>, sa bonne solubilité (570g/l à 50°C) favorise son usage industriel, cependant en présence de sulfates, les anodes en Nickel tendent à

former un oxyde de Nickel noirâtre qui a tendance à gêner la dissolution du Nickel. Il est donc nécessaire d'ajouter des ions chlorures ( $\text{NiCl}_2$ ) qui favorisent la dissolution anodique. L'acide borique est faiblement ionisé  $\text{H}_3\text{BO}_4 \rightarrow \text{H}_2\text{BO}_3^- + \text{H}^+$

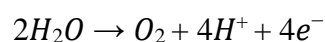
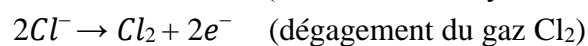
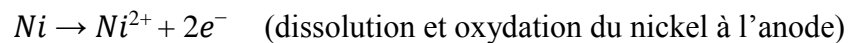
Agit comme un tampon dans les électrolytes de nickelage, il agit en régulant le PH dans le film cathodique et y évite la précipitation d'hydroxyde de Nickel.



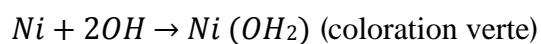
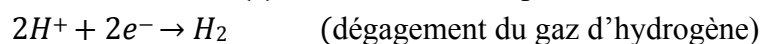
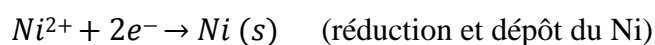
**Image 13 : Bain de Nickel.**

Les réactions qui se produisent dans la solution :

○ **A l'anode :**



○ **A la cathode :**



Remarque :

- Les anodes sont constituées de panier en titane contenant des morceaux de nickel, pour éviter la migration des bouts d'anode détachés dans la solution et la contamination de dépôt.



### Image 14 : Paniers en Titane.

Les dépôts de Nickel sont largement utilisés comme une couche barrière pour empêcher la diffusion de la matière du substrat, comme ils facilitent la soudabilité des métaux d'apport comme l'étain et renforcent les points de soudure, cependant ce dépôt présente également des inconvénients dont le phénomène d'hydrogénation parvient à fragiliser le métal de base lors de l'électrodéposition du nickel.

#### **4-Argenture :**

L'argent est un élément rare qui se trouve naturellement dans la croûte terrestre. Il est déposé sur les pièces généralement sous forme d'argent pur [22].

L'argenture électrolytique est très ductile et appréciée pour son aspect esthétique avec un éclat blanc particulier.

#### **❖ Propriétés physico-chimique d'argent :**

Tableau 8 : les propriétés physico-chimiques d'argent.

Masse volumique	10,5 kg/dm <sup>3</sup>
Température de fusion	961.9°C
Conductivité thermique	420W/mK
Résistivité électrique	1,59 μΩ.cm
Coefficient de dilatation	18,9x10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
Cristallisation	Cubique à faces centrées
Dureté de revêtement électrolytique	65 à 130 HV
Soudabilité	Bonne
Aspect	Blanc brillant

#### **❖ propriétés électrolytiques :**

L'argent fait partie du groupe IB du tableau périodique comprenant aussi les métaux cuivre et or. Ces métaux ont la capacité de résister à l'oxydation et restent relativement stables. Les ions argent peuvent avoir Ag(I), Ag(II) et Ag(III) comme forme d'oxydation mais les deux dernières sont extrêmement rares dans des conditions normales. Ce métal préfère s'associer à des composés basiques.

On le retrouvera surtout lié à des groupes cyanures (CN<sup>-</sup>) et sulfure (S<sup>2-</sup>) [23].

#### **❖ Argenture électrolytique :**

Le procédé d'argenture est obtenu par immersion dans un bain électrolytique de sels d'argent à faible intensité de courant électrique. L'anode est une plaque d'argent pur et la cathode est constituée par les pièces à argenter. Les principaux bains électrolytiques utilisés sont très alcalins à base de cyanure, dont la composition est :

**Tableau 9 : Mode Opérateur et conditions de travail du bain d'argent.**

La composition	Condition du travail
-Cyanure d'argent AgCN. -Cyanure de potassium KCN. -Anodes en Argent. -Additifs : Brillanteur, Nivelant, Base -Eau déminéralisée.	-Température : ambiante -Temps de traitement : 5 à 10min -pH : 12 -degré baumé : 26 à 32° -densité de courant : 1,5 à 5A/dm <sup>2</sup> -filtration par charbon actif -agitation mécanique

Le sel de potassium apporte une meilleure conductivité électrique (électrolyte support).

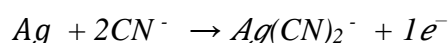
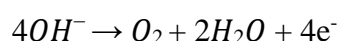
La présence de cyanure libre favorise la dissolution des anodes et améliore la qualité des dépôts en affinant les grains et en donnant une meilleure répartition.



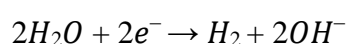
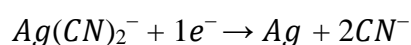
**Image 15 : Bain d'argenteure.**

Les réactions qui se produisent dans la solution sont :

○ **A l'anode :**



○ **A la cathode :**



**N.B.:**

Pour éviter toute sorte de contamination dans le bain d'argent, ou les anodes sont en argent pur, il faut passer d'abord par un bain de pré-argent à faible teneur en argent qui permet d'activer le métal par la formation d'une faible couche d'argent sur la surface de la pièce.

**Remarque :** Après chaque bain de traitement, il faut passer par un bain de rinçage pour éviter la pollution des bains.

***5-séchage :***

Les pièces traitées sont rincées puis séchées à des températures allant jusqu'à 130 °C dans un four.



**Image 16 :** four pour le séchage des pièces.

**IV- Le Rendement électrolytique :**

Dans cette partie on va réaliser des tests de vérification de la fiabilité de processus d'électrolyse. En calculant la masse déposée sur chaque plaque du laiton ainsi que le rendement de dépôt.

Le calcul du rendement permet de déterminer l'efficacité d'une synthèse chimique, L'intérêt du chimiste sera de déterminer les conditions opératoires pour s'approcher le plus près possible de 100%. Les pertes de rendement peuvent avoir divers origines: réactions parasites, présence des impuretés...

On a traité quatre plaques de 0.5 dm<sup>2</sup> de surface dans les quatre bains cités précédemment.

### **La masse expérimentale :**

La différence de masse de plaque de laiton après et avant le dépôt électrolytique selon la relation suivante :

$$m_{ex} = m_{\text{apres depot}} - m_{\text{avant depot}}$$

### **La masse théorique :**

La masse du revêtement mise en solution par électrolyse est donnée par la loi de Faraday :

$$m_{th} = \frac{I \times t \times M}{n \times F}$$

Avec :

**I**: intensité de courant en (A)

**t** : temps d'immersion en (s)

**n** : nombre d'électrons

**F** : constante de Faraday 96500 c/mol

**M** : masse molaire du métal en (g/mol)

### **Le rendement :**

C'est le rapport de la masse expérimentale sur la masse théorique qui s'exprime en % selon la relation ci-dessous :

$$R = \frac{m_{ex}}{m_{th}} \times 100$$

Tous les résultats sont regroupés dans le tableau suivant:



**Tableau 10 : le rendement électrolytique.**

Traitement	Cuivrage alcalin	Cuivrage acide	Nickelage	Argenture
Densité du courant (A/dm <sup>2</sup> )	3	2	4	1
Temps de traitement (min)	5	20	20	20
Masse de plaque avant dépôt (g)	8.026	8.053	7.761	8.28
Masse de plaque après dépôt (g)	8.167	8.714	8.298	9.099
Masse expérimentale (g)	0.141	0.661	0.537	0.819
Masse théorique (g)	0.5922	0.7896	1.4598	1.3417
Rendement électrolytique	23.81%	83.71%	36.78%	61.04%

### **Interprétation des resultats :**

D'après le tableau, on remarque que le meilleur rendement est celui du cuivrage acide (83.71%), ceci est dû à la forte acidité de l'électrolyte par la présence d'acide sulfurique qui favorise la dissolution anodique. Cependant les autres traitements présentent des faibles rendements. Cela peut être expliqué par plusieurs facteurs :

- ✓ Utilisation d'un matériel ancien et archaïque.
- ✓ Les générateurs (redresseurs) ne donnent pas des valeurs précises.
- ✓ Pertes des ions métalliques qui se déposent au niveau des crochets liant les articles à la cathode.
- ✓ La concentration de la solution qui diminue pendant l'électrolyse et qui n'est pas toujours contrôlée.
- ✓ Utilisation des instruments de mesure (l'aréomètre baumé et le papier pH) qui ne donnent pas de valeurs précises.
- ✓ La température, le pH, l'agitation, la filtration variant au cours du processus du dépôt ne sont pas toujours bien contrôlés.
- ✓ Les impuretés et la pollution dans les bains électrolytiques.

Pour avoir un bon rendement électrolytique, on propose de remplacer le matériel archaïque avec un autre moderne et de réaliser des mesures plus précises des différents paramètres physicochimiques qui pourront faciliter le contrôle des conditions du dépôt électrolytique.

En plus, un traitement complet régulier de tous les bains électrolytiques est recommandé. Ceci peut être réalisé par :

- ✓ Une filtration en continu au charbon actif.

- ✓ Une oxydation des impuretés par  $\text{KMnO}_4$  et  $\text{H}_2\text{O}_2$ .
- ✓ Un bon dégraissage des pièces avant le traitement.

## **V-Conclusion**

Suite à ces mesures correctives proposées, la qualité du revêtement sera très satisfaisante d'un point de vue brillance, couleur, résistance à la corrosion et pourra présenter un meilleur aspect décoratif.

# **Conclusion Générale**

Selon les besoins des clients, la société des Artisans Dinandiers de Fès effectue des traitements de surface des articles en métal, pour obtenir une surface d'aspect, de couleur, et de propriétés bien déterminées.

Au cours de cette étude, il s'est avéré qu'un bon dépôt électrolytique dépend de plusieurs facteurs comme la densité de courant, la concentration, la propreté du métal, le pH de l'électrolyte, la Température de la solution, et l'ajout des additifs.

Les résultats du rendement que j'ai calculé au cours de cette étude restent non satisfaisants. Ceci peut être expliqué par l'absence d'un laboratoire pour le dosage des éléments chimiques, ainsi que les redresseurs utilisés dans la société ne donnent pas des valeurs précises.

En effet, différentes mesures correctives pour résoudre ces problèmes ont été proposés pour contrôler le processus de revêtement et avoir des mesures plus exactes et plus précises.

Enfin, ce stage qui a duré un mois et demi, a été très important pour moi car il m'a permis d'avoir un esprit ouvert à la recherche scientifique. Le sujet, très pertinent, m'a permis d'acquérir une compétence satisfaisante dans le domaine de l'électrochimie et plus précisément dans le cas du revêtement des surfaces métalliques.



# REFERENCES

## BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Robert Lévêque, traitement et revêtements de surface des métaux,
- [2] Prof. M-G. Olivier, Electrochimie et application Edition 2009, p.3-12
- [3] [www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-electrolyse-339/](http://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-electrolyse-339/)
- [4] [www.cnrs.fr/cnrs-images/chimieaulycee/THEMES/electrolyse/process.htm](http://www.cnrs.fr/cnrs-images/chimieaulycee/THEMES/electrolyse/process.htm)
- [5] B. Conway et J. Bockris, Electrochemical Acta, 3, p. 340, 1961
- [6] S. Glastone, Electrochimie des Solutions, Félix Alcan, Paris, 1963.
- [7] L. Lacourcelle, Revêtements métalliques par voie électrolytique « Introduction », technique de l'ingénieur 4-1989, pp M 1591.
- [8] D. Landot, Corrosion et Chimie de Surface des Métaux, Presses polytechniques et universitaires Romandes, Lausanne, 1993.
- [9] P. Piessen, Chromatation, techniques de l'ingénieur 4-1989, pp M1555.
- [10] R. H Rousselot, Réparation du Potentiel et du courant dans les Electrolytes, DUNOD, 1959.
- [11] Y. Bade, Revêtement Métalliques par la voie Electrolytique « Nickelage », technique de l'ingénieur, 4-1989, M 1610.
- [12] Y. Badé, Revêtements Métalliques par Voie Electrolytique Nickelage, M 1610, Technique de l'ingénieur, 2000.
- [13] [www.ma.auf.org/corrosion/Galva.htm](http://www.ma.auf.org/corrosion/Galva.htm)-Galvanoplastie ou électrodéposition.
- [14] <https://www.lachimie.net/index.php?page=52#.WwbMP-7RDIU>
- [15] [http://www.sciences-enligne.com/DIST/Data/Ressources/lic2/chimie/chi\\_gen/redox/equation\\_nernst/nernst\\_1.htm](http://www.sciences-enligne.com/DIST/Data/Ressources/lic2/chimie/chi_gen/redox/equation_nernst/nernst_1.htm)
- [16] Nickel Plating handbook; [www.nickelinstitute.org](http://www.nickelinstitute.org), 2014,
- [17] N.GLINK « Chimie générale » Tome II, Edition Mir, 1981.
- [18] A.DESSART, J.JODOGNE et J.PAUL « Chimie minérale » Edition A.De BOECK ; BRUXELLES (1979)
- [19] YVES BADE « Technique d'ingénieur » M6-1605-1982
- [20] P. Benaben, F.Durut, nickelage électrolytique Caractéristiques Techniques de l'Ingénieur, M 1 610 - 1.
- [21] I.Rezgui, « Résistance à la Corrosion des Dépôts Composites nickel-alumine en Présence d'Additifs », Mémoire de Magister, Université de batna, setenu le 08 Décembre 2010.

- [22] L.D Jones (P.Geo), D.V Lefebure (P.Geo), G.O wsiacki (P.Geo) and T.G Schroeter (P.Eng), major silver deposits of British Columbia, 1998.
- [23] Rachel Benoit, spéciation des nanoparticules d'argent dans les sols, 2012, p.12