



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Hygiène et Sécurité Industrielle

Spécialité : *Securite Prevention Intervention*

LA LUTTE CONTRE LA COROSION DANS L'ENTREPRISE ORSIM

Présenté et soutenu publiquement par :

Zerouali Zakarya et Smail Bilal

Année 2024/2025

Remerciement

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce mémoire.

Avant tout, je remercie sincèrement Mme Mechken, m'encadreur de mémoire, pour sa disponibilité, ses conseils avisés et son accompagnement bienveillant tout au long de ce travail. Sa rigueur scientifique et son exigence m'ont permis de progresser et de mener à bien cette recherche.

Je souhaite également remercier l'ensemble des enseignants de IMSI pour la qualité de leur enseignement et pour les compétences qu'ils m'ont transmises durant ces années de formation.

Enfin, je remercie chaleureusement ma famille et mes amis pour leur soutien moral, leur patience et leur encouragement constant tout au long de ce parcours.

À toutes et à tous, merci.

Dédicace

À mes parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien constant et leurs sacrifices qui m'ont permis d'avancer chaque jour.
À ma famille, pour leur présence, leur patience et leurs encouragements.

À mes amis, pour leur soutien moral, leur écoute et les moments de répit partagés pendant cette aventure.

À tous ceux qui ont cru en moi, même dans les moments de doute.

Ce travail est le fruit de votre confiance. Merci du fond du cœur.

Introduction générale.....	5
I.1. Présentation de l'entreprise ORSIM.....	7
I.2. Différentes unités de production de BCR.....	7
I.3. Structure global du groupe BCR.....	8
I.4. Présentation de l'unité ORSIM.....	8
I.5. Fonctionnement d'ORSIM.....	10
I.6. Produits d'ORSIM.....	11
I.7. Certificat ISO.....	15
II . LES ETAPES PHYSICO-CHIMIQUES DU PROCESSUS DE PRODUCTION DE BOULONNERIE.	16
2 Recuit.....	27
3 L'étirage.....	28
4 Fabrication des Boulons.....	29
5 Pressage à froid ou à Chaud.....	30
6 Filetage par roulage.....	30
7 Traitement thermique.....	31
9 Le contrôle.....	36
Les Mécanismes d'Action :	41
Facteurs influençant la corrosion	44
Conséquences Economiques et Sécuritaires	48
Présentation Générale des Traitements	48
Critères de Comparaison :	51
Proposition d'une Stratégie HSE	51
2° Définition des eaux contaminées	53
3° Définition du traitement des eaux contaminées	53

Introduction générale

L'acier est un matériau essentiel pour fabriquer beaucoup de produits parmi eux on trouve les vis, les écrous, les rondelles...etc. mais vu sa grande réactivité avec le milieu extérieur il se détériore rapidement par l'attaque corrosive de l'environnement s'il n'est pas protégé.

La corrosion est un fléau industriel qui est jusqu'à nos jours un problème important qui n'est pas complètement résolu. Tel qu'il provoque beaucoup de pertes de matière première qui conduisent à penser à un procédé de revêtement de ce dernier. Causant par la suite une perturbation dans le secteur économique au niveau de l'entreprise.

Les entreprises algériennes sont passées brutalement d'un environnement stable, dans lequel elles étaient chargées de satisfaire la demande nationale et de participer à la réalisation des objectifs économiques et sociaux de l'état, à un environnement instable où il faut être compétitif pour survivre. Les entreprises recherchent toujours la performance, l'efficacité et l'efficience.

En effet, ce rapport présente le travail que nous avons effectué au sein de la Société des Industries Mécaniques et Accessoires ORSIM d'Oued Rhiou, wilaya de Relizane.

Notre objectif converge à la compréhension des procédés chimiques du processus de la fabrication de boulonnerie de cette entreprise.

Ce travail consiste à voir ces différents procédés qui sont réalisés dans l'industrie. Les opérations les plus utilisées dans l'entreprise sont :

- Les étapes physico-chimiques de processus
- Le traitement anticorrosion des pièces
- Le traitement des eaux usées.

Dans le domaine de traitement des eaux usées effectué dans la station d'épuration, l'équipe de cette station décontamine les eaux contaminées par les produits chimiques qui rentrent dans la production des boulons.

La décontamination des eaux usées dépend des éléments chimiques de la production comme le cyanure, le fer, le chrome...

Pour des résultats très exacts et plus clairs, toutes les analyses sont effectuées d'une

manière chronologique avec la production au niveau d'un laboratoire chimique qui se situe dans cette industrie.

Notre travail est divisé en trois parties. La première expose une présentation bien détaillée sur la société ORSIM et comment ca se fait le processus . La deuxième récapitule tous les procédés de traitements utilisés anticorrosion des pieces dans cette société. Puis comment cet entreprise s'occupe des eaux usées .

1.1. Présentation de l'entreprise ORSIM

1.1.1. Historique

L'Entreprise Nationale de Boulonnerie Coutellerie et Robinetterie sous le sigle **BCR- SPA** (Société Par Action) a été créée en 1^{er} janvier 1983 après sa séparation définitive de SONACOM (Société Nationale de Construction Mécanique) qui fait d'elle une entreprise à part entière.

L'entreprise est passée à l'autonomie en 1990 après l'assainissement financier de celle-ci, en 1991 la direction générale BCR a décidé d'effectuer des changements dans sa structure afin d'améliorer la fonction vente pour cela elle a hérité d'un patrimoine constitué de trois unités de production importantes.

1.2. Différentes unités de production de BCR

BCR est constituée maintenant de trois unités mises à part, le siège situé à Sétif, la liste nominative des unités sœurs de BCR se résume comme suit :

- ✓ **SANIAK** : Société de fabrication d'Accessoires Industriels et Sanitaires, sise à AinEl Kebira (Sétif) de 300 Km à l'est d'Alger, est une société par action (SPA) dont le capital s'élève à 790 MDA. Elle est née le 1er Janvier 2002. Elle fabrique et commercialise de la robinetterie (mélangeurs, mitigeurs, robinetterie bâtiment,...).
- ✓ **ORSIM** : Sise à Oued Rihou (Relizane) à 250 Km à l'ouest d'Alger est une société par action (SPA) est spécialisée dans la fabrication des moyens de serrage identifiés par la boulonnerie, visserie, écrous et rondelles de différents diamètres et classes de qualité, destinés à toutes applications nécessitant une fixation mécanique.
- ✓ **ORFEE** : Constituée sur le site industriel de Bordj-Menaïel (Boumerdès), elle fabrique et commercialise les articles de coutellerie, platerie, poterie et terrines dans les qualités ménage, orfèvre et argent, ainsi que les éviers en acier inoxydable.

La figure suivante présente les produits finis pour les trois unités de BCR



Figure I.1 : Les produits finis pour les trois unités de BCR.

1.3. Structure global du groupe BCR

La structure du groupe BCR est présentée dans l'organigramme ci-dessous :



Figure I.2 : Organigramme de groupe BCR.

1.4. Présentation de l'unité ORSIM

L'unité ORSIM est la filiale où on a effectué notre stage pratique de fin d'étude de Master.

La figure numéro **I.3** présente une photo de la société algérienne des industries mécaniques

et accessoires au niveau d'Oued RhiouRelizane.



Figure I.3 : La Société Algérienne des Industries Mécaniques et Accessoires.

1.4.1. Fiche technique de la société

Si dessous une fiche technique résume des informations sur la BCR.

Date de création : 1^{er} janvier 2002.

Capital : 750000000 DA.

Activité : Production et ventes d'articles de boulonnerie et visserie.

Patrimoine immobilier : Superficie globale 116877 m², couverte 40000 m².

L'organigramme de la direction industrielle d'ORSIM est présenté dans la figure suivante.

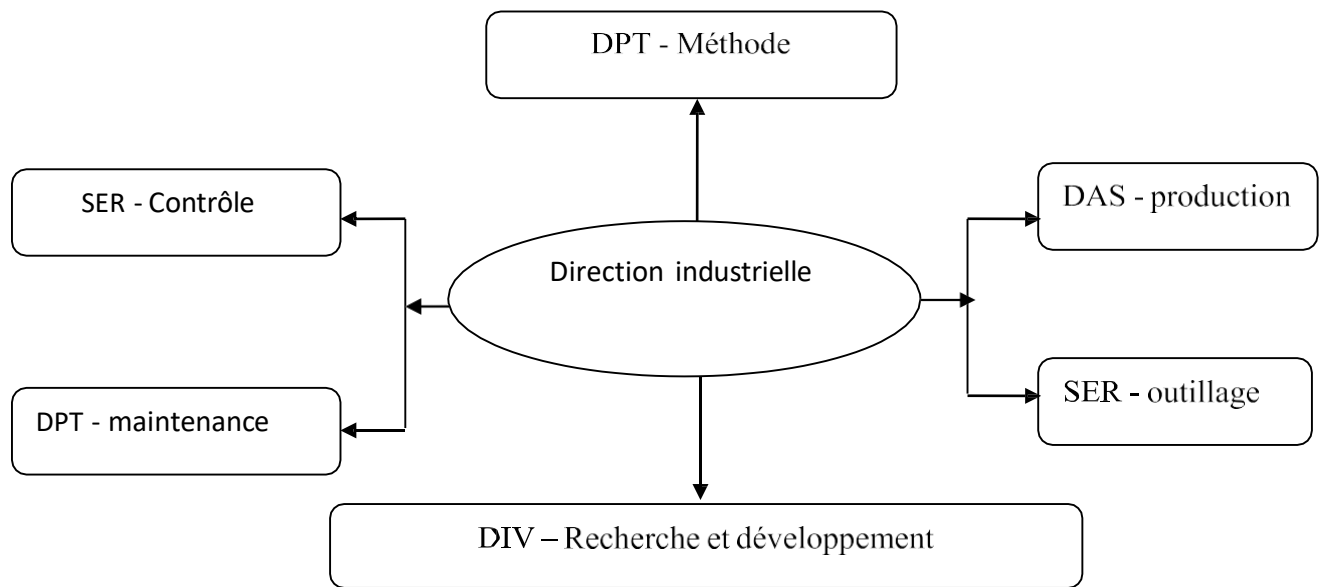


Figure I.4 : Organigramme de la direction industrielle d'ORSIM.

1.4.2. Différentes sources d'ORSIM

1.4.2.1. Les sources humaines

ORSIM Corporation a plus de 300 travailleurs expérimentés et de bonnes qualifications permettent l'activité pendant une longue période de temps étant d'activer des missions scientifiques et le processus et envoyer des travailleurs à participer à l'étranger afin de maintenir le rythme de la modernisation.

1.4.2.1.2. Les sources physiques

L'usine contient 269 machines à high-tech pour se tenir au courant de développement et sont tous de l'étranger et assure automatiser réseau de médias pour mener et développer une culture de l'information au sein de l'organisation pour faciliter le travail, la recherche et la rapidité de mise en œuvre. La société utilise environ 100 ordinateurs et dispose de 45 d'imprimantes type EPSON et tapez matériel laser et 06 programmes utilisés dans différentes langues de système réseau dans le programme SILOG.

1.5. Fonctionnement d'ORSIM

L'usine fonctionne grâce à son système de sécurité très bien organisé, un système

chargé pour contrôler toutes les sorties et les entrées du personnel et de la marchandise. Il est également chargé de :

- Prévenir tout incendie par des moyens d'alarmes, extincteurs, ambulances, camions, et bouches d'incendies ;
 - Traitement des eaux usées ;
 - Traitement biologique des rejets afin d'éviter la pollution de l'environnement. La section maintenance est dotée d'un personnel très qualifié :
 - ✓ Pour le bon fonctionnement des machines ;
 - ✓ pour l'entretien des réseaux d'éclairage ;
 - ✓ pour l'entretien des réseaux téléphoniques ;
 - ✓ pour l'entretien des fours.
- Centrale d'énergie de l'usine

L'énergie électrique, l'air comprimé, le gaz butane, l'eau potable, la vapeur, les eaux chaudes sont fournies à l'usine par cette centrale.

Capacité de production

L'unité d'Oued Rhiou produit :

Boulonneries-visserie : 10300 t/an, avec un taux d'intégration 100% ;

2400 t/an de robinetterie ;

25 t/ an de corps du complexe.

Depuis l'année 2003 il existe seulement la ligne de boulonnerie, parce que la ligne de la robinetterie a été transformée vers la filiale SANIAK.

1.5.1. Capacité de stockage

Avec 3500 m² de surface de stockage sur 5 niveaux, ORSIM a une capacité interne de plus de 2000 tonnes à laquelle viennent s'ajouter des possibilités externes à l'entreprise.

1.6. Produits d'ORSIM

L'entreprise ORSIM a deux lignes de fabrication :

1.6.1. Ligne standard

Cette ligne est destinée à la fabrication des produits suivants : Les vis

Les figures si dessous présentes des photos sur les différentes vis produites par la société.



Figure I.5 : a .Vis métriques à tête hexagonale, b. Vis métriques à tête cylindrique.



Figure I.6 : a. Vis à tôle, b. Vis à bois.



Figure I.7 : **a.** Vis à têtes diverses à six pans creux, **b.** Vis métriques, **c.** Vis auto perceuses.

A. Les écrous et rondelles

Les figures suivantes présentes des photos sur les écrous et les rondelles construits par BCR.



Figure I.8 : **a.** Ecrous de différentes mesures, **b.** Rondelles de différentes mesures.

B. Les tiges

La figure I.9 présente des images sur les différentes tiges de la société.



-a-



-b-

Figure I.9 : a. Tige filetée, b. Tige d'ancrage.

C. Les goujons et les rivets

La figure si dessous montre des photos des goujons et rivets.



-a-



-b-

Figure I.10 : a. Goujon., b. Rivet.

1.6.2. La ligne spécifique

Cette ligne fabrique des produits dont la fabrication est moins fréquente et dépend du choix du client.

Les différents produits spécifiques construits par l'usine sont présenté dans la figure numéro **I.11**.



Figure I.11 : Les différents produits spécifiques

1.7. Certificat ISO

ORSIM est certifiée ISO 9001 version 2008 Management de la qualité, et ISO 14001 version 2004 Management environnemental. Elle se prépare pour lancer la certification selon le référentiel OSHAS 18001 Sécurité et Santé de travail.



1.8. LES ETAPES PHYSICO-CHIMIQUES DU PROCESSUS DE PRODUCTION DE BOULONNERIE.

1.8.1. La matière première d'ORSIM

La matière première à l'industrie de boulonnerie change d'un lieu à un autre, d'un fournisseur à un autre, d'une entreprise à une autre, et ça dépend le besoin, la demande, le marché (la disponibilité de la matière à la demande du produit). À la boulonnerie ORSIM un fournisseur allemand garantit la matière première. Elle est en général de l'acier avec différentes nuances normalisées et différents diamètres. Cette matière est sous forme de

rouleau, elle est stockée et lassée puis posée à la boulonnerie par l'ordre du service d'ordonnancement si elle est en grand quantité. Le tableau 1 présente les types de cette dernière et ses conditions de travail.

La figure si dessous présente le stockage de la matière première.



Figure II.1: Stockage de la matière première.

Le tableau suivant englobe les différents types de la matière première et ses conditions de travail.

Tableau II.1: Types de la matière première et ses conditions de travail.

Matière	Diamètre	Préchauffé e	Chauffag e	Temps de refroidissemen t 100°C
Q F t 34	φ 3,4-5,5	400°C	730°C	2-5 min
C 22B	φ 14 -22,5	400°C	760-700°C	2-5 min
35 B 2	φ 08-φ 23	400°C	730-680°C	3-6 min
41 Cr 4	φ 10-φ 14	400°C	760-680°C	6-14 min

1.8.2. Différents étapes de fabrication

La figure suivante présente l'organigramme de la ligne boulonnerie.

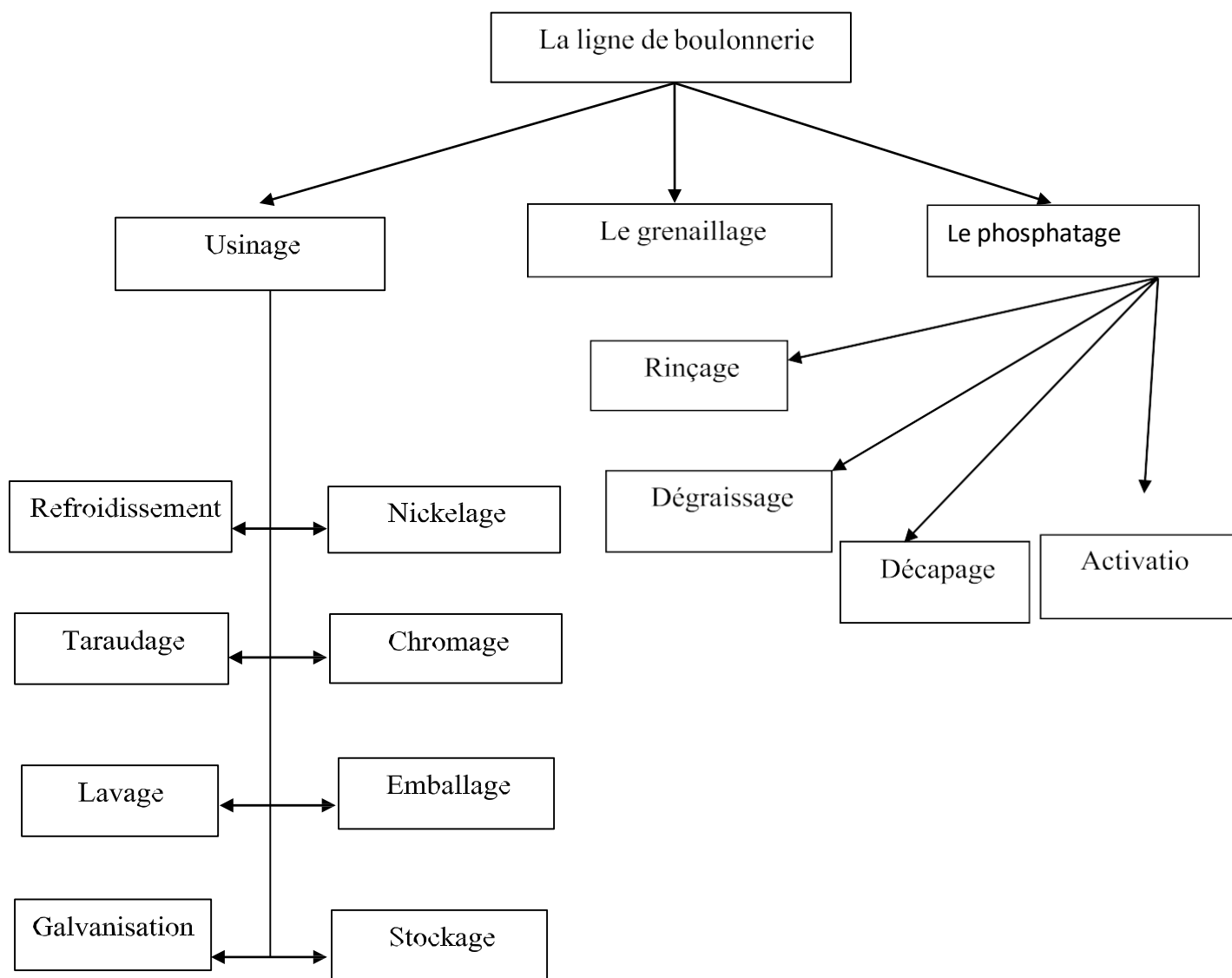


Figure II.2: Organigramme de la ligne boulonnerie.

1.8.3. Traitement de surface des métaux

L'entreprise d'ORSIM s'intéresse au traitement de surface car elle est concernée par la protection des aciers contre la corrosion par dépôts métalliques suite à une polarisation de la pièce à protéger de manière à ce que son potentiel se situe dans une zone dite de passivité dont la phosphatation, le zingage et autres procédés anticorrosifs.

Un traitement de surface désigne toute opération mécanique, chimique,

électrochimique ou physique qui a pour conséquence de modifier l'aspect ou la fonction de la surface des matériaux afin de l'adapter à des conditions d'utilisation données.

Les traitements de surfaces les plus connues sont les traitements anodiques, cathodiques, les dépôts métalliques ainsi que les traitements par effet mécanique.

La grande variété des caractéristiques des dépôts obtenus suivant la formulation et les conditions de dépôt de ce revêtement anticorrosif incontournable dans de nombreuses applications : tôles destinées à l'automobile ou à l'électroménager.

Outre l'électrolyse, ce traitement nécessite un procédé d'élaboration dont le choix dépend du type de produit traité. Trois familles principales d'application sont proposées à savoir:

- Le traitement en vrac (dit «au tonneau ») : destiné aux petites et moyennes pièces ne craignant pas les chocs;
- Le traitement unitaire : dédié aux pièces de plus grandes dimensions, fragiles exigeant un aspect parfait ;
- Le traitement en continu (dit « au défilé » ou « à grande vitesse ») réservé aux tôles, tubes soufés.

Préparation des surfaces métalliques

Avant tout traitement, le nettoyage des surfaces est une phase essentielle qui a pour objet d'enlever les souillures existant à la surface des pièces. Il faut donc supprimer tous les corps étrangers qui proviennent du mode de fabrication, transport et du stockage. Ces polluants peuvent être classés en deux catégories :

- ✓ Les corps gras (huiles, graisses) éliminés lors de dégraissage ;
- ✓ Les oxydes (calamines, rouilles) éliminés lors du décapage ;

Donc la préparation de surface d'un métal avant revêtement a pour but de garantir une protection contre la corrosion et une décoration (aspect esthétique).

Les principales étapes de préparation de surface des métaux sont :

A: Dégraissage

C'est le fait d'éliminer les traces de graisse et les diverses salissures et souillures. Le dégraissage est une étape préparatoire indispensable à une opération de traitement thermique ou de traitement de surface telle que le nickelage et la phosphatation.

B: Rinçage

- a) Rinçage après dégraissage: Rinçage à l'eau fait, en général, au dégraissage basique, le dégraissant change des produits de dégradation des huiles et graisses ;
- b) Rinçage après décapage: Excepté pour la galvanisation "humide", les pièces après décapage acide doivent être rincées pour éliminer avant fluxage l'acide chlorhydrique, des sels de fer et autres impuretés importées (solubles ou insolubles). Le rinçage

Supprime donc les produits de dégraissage, évite l'entraînement de produits dans le bain de décapage c'est-à-dire évite la pollution du flux par le bain de décapage.

C: Décapage

C'est un procédé qui consiste à éliminer une couche de matière déposée sur la surface d'une autre matière ;

Généralement, il s'agit d'une élimination des oxydes formés sur l'acier (des traces de corrosion) avant toute opération de transformation à froid ou de revêtements métalliques ou non métalliques. Des techniques mécaniques, chimiques ou thermiques peuvent être utilisées dans ce procédé ;

Les réactions chimiques lors de décapage :

- L'action de l'acide sulfurique

L'hydrogène réduit les sels ferriques Fe_2O_3 qui sont peu solubles ;

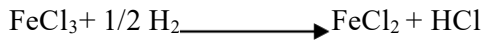


Le bain en activité contient donc : $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{FeSO}_4$ + boues

Boues = Fe_2SO_4 + acide + eau + sulfate de fer ;

- L'action de l'acide chlorhydrique

Le chlorure ferrique FeCl_3 en présence d'hydrogène dégagé et en présence de fer à nu et réduit en chlorure ferreux ;



Le bain en activité contient donc : $\text{HCl} + \text{FeCl}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Boues}$.

Boues = oxyde de fer + acide + H_2O .

D: Fluxage

Le fluxage est la dernière opération de traitement de surface avant le revêtement qui consiste à protéger la surface de l'acier tout en assurant un bon mouillage de la pièce par le zinc liquide.

E: Séchage

C'est un procédé qui sépare un liquide d'un solide, d'un semi-solide, voire d'un liquide par évaporation. Un séchage efficace est obtenu par un séchoir ventilé afin de s'effectuer l'évaporation de l'eau de dissolution des sels de flux. Cette opération est endothermique et nécessite l'apport d'énergie thermique. Il évite en général les projections de zinc et réduit le volume des fumées ;

Chaque opération est importante lors d'absence d'une étape, il s'agit d'une étape, il s'agit d'une perturbation au traitement et donc une mauvaise qualité de la production.

1 Phosphatation :

A/ Mécanisme de phosphatation

Le métal immergé dans un bain phosphatant généralement porté à une température comprise entre 40°C et 100°C , est attaqué par les constituants acides du bain, notamment

l'acide phosphorique libre, une faible des solutions du métal entraîne un dépôt de phosphate au bout d'une durée de contact d'autant plus court que le milieu est oxydant ; le métal, initialement à la valence 0, subit une oxydation jusqu'au degré de valence selon l'acidité libre H_3O^+ du milieu, la réaction se produit plus ou moins rapidement, la dissolution du métal doit se faire à vitesse modérée pour permettre la neutralisation et la surface ;

a. L'acide phosphorique

La stabilité du pH de la solution phosphatée tient à la nature chimique particulière de l'acide ortho phosphorique et de ses dérivés. Cet acide présente en effet une aptitude à se régénérer dans des conditions d'oxydoréduction bien déterminées. Il manifeste deux particularités intéressantes :

1. Il peut donner facilement des complexes, en particulier avec les éléments de transition comme le fer ;
2. La structure tétraédrique de l'ion PO_4^{3-} (la configuration spatiale) est l'élément déterminant de la nature des cristaux élémentaire formés à la surface du métal.

a. Acidité libre

Par convention l'acidité libre représente la quantité en (ml) de solution molaire de soude ajoutée à une prise de bain, fait virer la teinte d'un indicateur coloré pour une zone de pH située de 3,1. Elle correspond à la quantité soude nécessaire pour faire passer l'acide phosphorique libre contenu dans le prélèvement à l'état de phosphate monodique ;

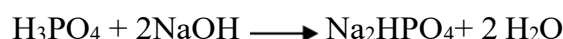


Mesurer l'acidité libre d'un bain, c'est donc connaître, en valeur relative sa concentration en acide phosphorique libre, responsable de l'attaque de métaux au phosphate.

a. Acidité totale (concentration totale)

L'acidité totale représente la quantité en (ml) de solution de soude molaire ajoutée

à une prise de bain, fait virer de teinte d'un indicateur coloré pour une zone de pH située autour de la valeur 8,2, la quantité de soude ajoutée est double de celle retenue pour la mesure de l'acidité libre puisque l'acide phosphorique libre passe à l'état de phosphate dioïque ;



Il intervient également un ensemble de réactions de double décomposition entre les sels constituants du milieu phosphatant et la soude caustique. Par convention avec: la prise de bain représente généralement 10 ml, le plus souvent une solution déci-molaire de soude est utilisée et l'acidité est exprimée en points, le point est une unité arbitraire équivalente au ml.

b. Rapport d'acidité

Les acidités totales et libres influencent la formation de la couche de phosphate. Ces deux paramètres étant deux caractéristiques importantes d'un phosphatant. Soit r le rapport de ces deux acidités:

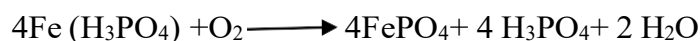
$$r = \text{acidité totale} / \text{acidité libre}$$

On a constaté du point de vue de la qualité des résultats obtenus en phosphatation que l'on obtient un revêtement homogène d'adhérent en métal de base lorsque les valeurs du rapport des deux acidités en question (r) sont comprises:

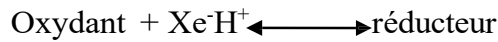
$r = 6$ à 8 pour traitement par immersion, $r = 15$ à 25 pour traitement au jet.

Les accélérateurs des bains de phosphatation des métaux

Les accélérateurs favorisent la formation de la couche de phosphate soit en freinant dégagement de H_2 produit par l'attaque du métal soit oxydés en ions F^{3+} puis sont précipités sous forme de phosphate tertiaire FePO_4 insoluble. Le taux de phosphate de fer dans la couche finale est réduit selon la réaction:



Agissant en milieu acide, les accélérateurs obéissent à la réaction d'oxydoréduction très Classique:



Les accélérateurs les plus utilisés sont les chlorates, les nitrates et les nitrites.

Les chlorates

L'ion ClO_3^- est caractérisé par une oxydation forte et sa vitesse de réaction est grande même à des températures moyennes de l'ordre 50°C à 60°C . Introduit généralement dans le bain phosphatant sous forme de chlorate de sodium, il est rapidement transformé en chlorure

.Toutefois, s'il est très efficace tant qu'accélérateur, il présente par contre le défaut de conduire à la libération croissante d'ions et d'éléments défavorables en anticorrosion.

Les nitrates et les nitrites

L'élément nitrate joue un rôle essentiel d'accélération, il est présenté dans le bain phosphatant sous forme de sels métalliques tels que le sodium zinc, nickel manganèse calcium... etc. Son caractère fondamental est présenté par l'équilibre chimique suivant :



Ainsi le nitrite NO_2^- , élément fugace produit lors de la réduction du nitrate NO_3^- au niveau des zones polarisées par attaque du métal conduit à:

Soit à l'oxydation par exemple, des ions ferreux apparus dans la solution ;



- 1) Soit à l'oxydation et à la passivation du métal par formation d'une faible couche d'oxydation en surface ;
- 2) Soit à la dépolarisation de la surface métallique en particulier au niveau des zones à forte densité électronique ;
- 3) Soit à la régénération de l'élément nitrate par :

dismutation:



Dans ces conditions le bain phosphatant aux nitrates est le siège de réactions chimiques

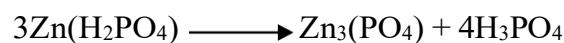
multiples et complexes.

Formation et croissance de la couche phosphatée

Les études sur la composition des couches phosphatées montrent qu'elles sont composées pour la plupart de phosphate métallique tertiaire. Or, le matériau constituant à l'origine à solution phosphatée est un phosphate primaire soluble, il en résulte l'équation fondamentale caractéristique de l'équilibre propre à tous les bains de phosphatation.

❖ Phosphate tertiaire et phosphate primaire

Cet équilibre n'est déplacé que par la libération ou l'absorption d'acide phosphorique libre. Dans le cas du traitement d'un acier dans de phosphatation ou zinc, l'équation fondamentale est la suivante:



Le taux de phosphate déposé sur un métal est en fonction avec le rapport d'activité. Si ce rapport est trop faible, il y aura une attaque excessive du substrat empêchant la formation du dépôt de phosphate. Dans le cas contraire, il s'agit d'une attaque insuffisante du métal qui entraîne une réduction très élevée sous la dépendance des facteurs suivants:

- La température de solution et le pH ;
- La concentration en acide phosphorique libre ;
- La concentration totale en phosphate sous forme libre ou combinée ;

Les sels de rinçage

Le traitement de phosphatation exige un rinçage contenant un sel affineur de couche afin de réguler la taille des cristaux et le poids de couches de revêtement;

Les sels se déposent sur les surfaces des pièces immergées dans le bain de phosphatation. Ils jouent le rôle de germinateur de la cristallisation. Ses effets ne dépendent pas de leur concentration dans le bain mais à leur nature physico-chimique.

Installations de phosphatation Bain 02 : Lavage :

1. Température de travail : 80-95°C ;
 2. Durée de traitement : 10 min.
- Bain 03 : Rinçage économique (eau).**

Bain 04 : Rinçage à froid (eau recyclée)

.Bain 05-5A : Décapage (H_2SO_4) :

1. Température de travail : 65-70°C ;
2. Durée de traitement : 10 à 30 min.

Bain 06 : Rinçage économique (eau).

Bain 07 : Rinçage à froid (eau recyclée).

Bain 08 : Activation (sel de neutralisation) :

1. Température de travail : 40-80°C ;
2. Durée de traitement : 1 min.

Bain 09 : Phosphatage (Bondérise 181 XE et XA) :

1. Température de travail : 65° / 70°C ;
2. Durée de traitement : 10 à 30 min.

Bain 10 : Rinçage économique (eau).

Bain 11 : Rinçage à froid (eau recyclée).

Bain 12 : Neutralisation .

1. Température de travail : 25-40°C ;
2. Durée de traitement : 3 min.

Bain 13 : Bonderlube 234 Bonclérisation :

1. Température de travail : 70-80°C ;

Durée de traitement : 3 min

Bain 14 : (Lavage de Bonclard) :

1. Température de travail : 80-95°C ;
2. Durée de traitement : 10 min.

Avantages de la phosphatation

- ❖ Augmentation de la vitesse de travail ;
- ❖ Possibilité de taux d'allongement plus élevé ou de réduction de nombre de passes ;
- ❖ Réduction de l'usure de l'outillage ;
- ❖ Diminution du nombre de recuits intermédiaires des aires et par conséquent des décapages ;
- ❖ Réduction des rebuts ;
- ❖ Amélioration de la qualité mécanique de produit fini ;
- ❖ Obtention d'un meilleur état de surface.

2 Recuit

Lors de la préparation matière, les étirages successifs de matière causent l'écrouissage (dureté superficielle) qu'il faut éliminer par des traitements appropriés avant la mise en œuvre de la matière sur les presses.

➤ *Recuit normalisation*

Opéré sur le fil machine avant utilisation pour fabrication visserie. Il a pour rôle :

- D'affiner la structure du métal ;
- Diminuer la dureté ;
- D'éliminer les tensions internes.

➤ *Recuit globulaire*

Nécessaire pour la fabrication de vis où des déformations importantes sont exigées et permet de :

- Diminuer la dureté du métal ;
- D'améliorer l'aptitude du métal à la déformation à froid.

➤ **Recuit détente**

Nécessaire pour obtenir certaines caractéristiques demandées sur les vis comme l'allongement de :

- Diminue donc la dureté ;
- Élimine des tensions internes.



Fig.9 : Recuit de la matière première

3 L'étirage

L'étirage est une déformation à froid dont contraintes qui influencent les conditions de travail. Cette déformation se manifeste sous l'effet de traction dans des machines appelées tréfileurs. Ces dernières réduisent le diamètre du matériau de quelques millimètres à l'aide de matrices. La plus grande matrice réduit le diamètre jusqu'à 3mm la structure de matière devient lamellaire, donc cette opération consiste en la réduction du diamètre du fil pour l'usage projeté.



Fig.10 L'étirage du fil



Fig.11 tréfileurs

4 Fabrication des Boulons

➤ *Les vis*

les vis sont fait de fil d'acier ,les vis sont forgées à froid l'acier est façonné de température ambiante ,dont les matrices à haute pression ,les machines à former redressent le fil d'acier puis on le coupe en tronçons plus longs que la vis ,l'excédent servira à la tête de la vis ;une première matrice arrondit parfaitement le tronçon ;les suivantes lui donnent progressivement la forme de la vis.

La machine peut frapper jusqu'à 300 vis à la minute ; le vis prend sa forme dans la machine dans quatre stations :

1. **1^{er} station récolement.**
2. **2^{ème} station la finition :** forme sorte de la colle
3. **3^{ème} station pousseuse :** transforme en tête ronde
4. **4^{ème} station ébarbage :** cette dernière forme une forme hexagonale, la forme la



plus connue.

Ensuite en faire un chanfrein a le vis cette chanfrein est faire dont la vis est fixé et l'outil tournant.

Il faut fileter la vis pour pouvoir visser un écrou, celle-ci se fait par forgeage à froid, des rouleaux a haut pression presse le motif de filetage ; la machine peut fileter jusqu'à 300vis à la minute

➤ *Les écrous*

Les écrous sont fait de fil d'acier, les écrous sont forgés à chaude on coupe des barres d'acier en petits morceaux quand les chauffé a 1000oC pour les rendre malléable ; les marteaux batteurs hydraulique modèle les pions en hexagone tendu que une matrice perce le trou, la taraudeuse creuse le filetage a l'intérieure (taraudage) de l'écrou à l'aide de lubrifiant ; de pions a hexagone a écrou.

5 Pressage à froid ou à Chaud

Si le produit est de forme susceptible d'être obtenue à froid, c'est cette technique qui est privilégiée car elle présente les avantages suivants : précision plus élevée ne nécessitant pas de reprise d'usinage, caractéristiques mécaniques égales ou supérieures par rapport au forgeage à chaud, gain substantiel d'énergie, coût de revient moindre (15 % minimum de gain de métal).



Fig.12 Machine de pressage à froid



Fig.13 Machine de pressage à chaud

6 Filetage par roulage

Cette technique basée sur le fluage du métal (par pression au-delà de la limite d'élasticité) permet d'obtenir des filets constitués de fibres de métal épousant la forme du filet et non

cassés comme par enlèvement de copeaux. Cela confère à la vis une résistance plus élevée.

7 Traitement thermique

Ce traitement se fait sur le produit fini en fin de processus pour lui conférer les caractéristiques mécaniques demandées.

Il s'agit généralement d'une trempe à l'eau ou à l'huile suivie d'un revenu.



Fig.17 Station de traitement thermique

➤ *Trempe*

La trempe est un procédé de traitement d'un matériau. Ce traitement peut être thermique (refroidissement rapide) ou chimique (immersion dans un bain de sel fondu), il peut aussi être dans la masse du matériau ou uniquement à sa surface.

➤ *Revenu*

Un acier trempé est dur, mais généralement beaucoup trop fragile pour être utilisé directement. Le revenu consiste à chauffer une pièce qui vient d'être trempée à une température inférieure au point de transformation, à la maintenir à cette température, puis à la refroidir généralement à l'air, parfois à l'eau. Le revenu a pour but d'éliminer les contraintes résiduelles provenant de la trempe et d'augmenter la ténacité. L'augmentation de la ténacité s'obtient malheureusement toujours plus ou moins au détriment de la dureté et de la limite d'élasticité. Les contraintes résiduelles se forment en raison des grandes différences de température entre le cœur et la surface de la pièce lors de la trempe. La dilatation thermique provoque des contraintes qui dépassent la limite d'écoulement plastique et parfois même la

résistance à la rupture (fissures de trempe). D'autres contraintes résiduelles, qui varient fortement d'un grain à l'autre, prennent naissance lors de la transformation martensitique et ont pour origine le changement de la forme et le changement de volume qu'entraîne cette transformation.

8 Zingage

A/ Principe physico-chimique du zingage

Le zingage électrolytique est un procédé qui consiste à revêtir des pièces métalliques par électrolyse d'une solution aqueuse contenant des sels métalliques et non métalliques dont la nature dépend de l'application envisagée et des propriétés souhaitées du revêtement (généralement la soude caustique) ;

Ce procédé est basé sur un principe qui conjugue les deux types de protection contre la corrosion: physique par enrobage de la pièce, et chimique par apport d'un métal sacrificiel (le zinc) ;

La pièce zinguée s'oxyde rapidement en rouille blanche. C'est la raison pour laquelle elle doit être passivée ou chromatée (finition). Elle reçoit ensuite éventuellement un vernis pour renforcer sa tenue à la corrosion.

B/ Cycle de zingage

- a.** Dégraissage chimique ;
- b.** Rinçage économique ;
- c.** Rinçage à l'eau ;
- d.** Dégraissage électrolytique. Rinçage économique ;
- e.** Rinçage à l'eau ;
- f.** Décapage chimique HCl ;
- g.** Rinçage économique ;
- h.** Rinçage à l'eau ;

- i. Zingage acide ;
- j. Neutralisation HCl ou HNO₃ ;
- k. Rinçage économique ;
- l. Passivation (bleu ou jaune) ;
- m. Séchage ;
- n. Emballage.

C/ Installation de zingage

Bain 04

1. Passivation jaune : est un sel de passivation jaune s'emploie dans de l'eau à présent de 30 g/l, en cas de présence d'impuretés il est préférable de changer de bain que d'essayer de la corriger (par HNO₃ ou NaOH diluée) ;
2. Température de travail ambiante, pH = 1.5 – 2 ;
3. Durée de traitement 30 à 60 secondes ;
4. Renouvellement : selon aspect non satisfaisant des pièces.

Bain 07 :

1. Passivation bleu(AQUAZUR) : est un sel pur pour la passivation d'aspect bleu très brillant ;
2. Température de travail : 18-25°C, pH = 1.4 – 2 ;
3. Concentrations : 7 à 8 g/l solution bleue, 10 à 15 g/l acide nitrique concentré ;
4. Durée de traitement : 5-30 secondes selon évolution du pH.

Bain 09 :

1. Bain de zingage qui permet de travailler avec de concentration de KCl comprise entre 200 et 400 gr/l ;
2. Température de travail : de (Zeta plus à 20-50°C optimal 35°C, zinc à 20 à 45°C) ;

3. Durée de traitement : 42 min ;
4. Tension de service : 8-12 volts, produits pour le travail en tonneaux ;
5. Contrôle des bains : deux fois moins ;
6. Enrichissement : selon analyse du laboratoire ;
7. Composition et concentration de bain :
 - Zinc : 3538 gr/l ;
 - pH = 4.8 -5.2 ;
 - Acide : 23-25 gr/l ;
 - Brillanteur (zincal 500) 1.22.21/10.000 AH ;
 - Bas zincal 01:1-0.41/10.000AH ;
 - Bas Zeta : 0.3-0.51/10.000AH ;

Bain 10 :

1. Après le zingage : les produits sont lavés dans un bain d'eau morte N° 11 et un bain deneutralisation N° 12.
2. Dégraissage chimique par PRESOL 7050, produit alcalin enlevant les huiles provenant au traitement des aciers ;
3. Température de travail : 50-60c ;
4. Concentration : 50Kg/1000 l'eau ;
5. Durée de traitement : 2-10 min selon l'état de surface du produit à laver ;
6. Renouvellement : toutes les deux semaines ;
7. Après dégraissage les produits sont rincés dans deux bains de rinçage: un bain d'eau morte N°11 et un bain recycle N°12.

Bains 13 et 14 :

1. Bains de décapage acide chlorhydrique HCl 50 pour décapage de produit

même fortement oxydé ;

2. Température de travail : à froid ;
3. Concentration : acide chlorhydrique à 10% ;
4. Durée de traitement : 2-30 min selon l'état du produit à décaper ;
5. Après décapage les produits sont rincés dans un bain d'eau morte N°11 et un bain d'eau recyclé N°12 ;
6. Renouvellement : selon les analyses chimiques.

Bain 15 :

1. Dégraissage électrolytique PRESOL 7030 : dégraissage alcalin ;
2. Travaillant canoniquement pour faire le dégraissage chimique ;
3. Température de travail : 20-50°C ;
4. Electrification : 6-8 V ;
5. Renouvellement : selon le besoin.

La figure suivante présente le procédé de zingage électrolytique acide.

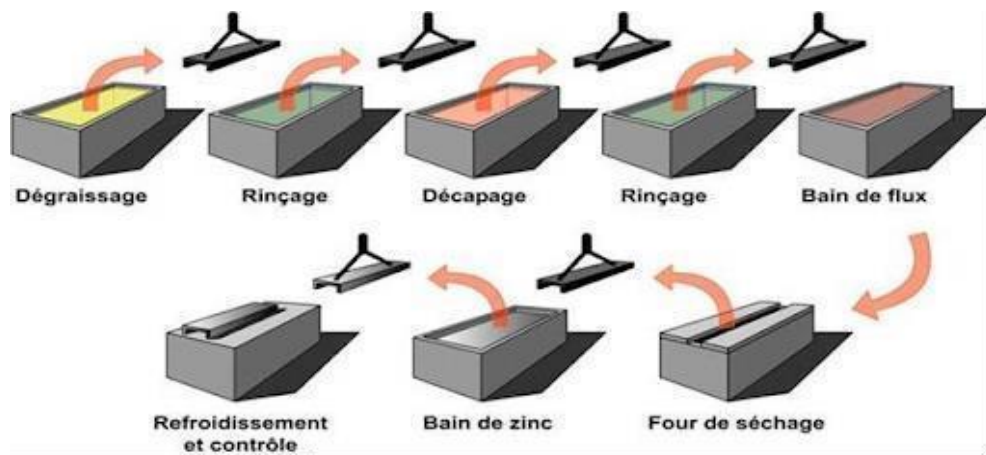


Figure II.5: Procédé de zingage électrolytique acide.

D / Avantages de zingage électrolytique

- ❖ Une durée de vie exceptionnelle ;

- ❖ Une grande résistance aux chocs ;
- ❖ Dépôt brillant et ductile, même à forte épaisseur ;
- ❖ Excellent pouvoir anticorrosif rassurant une protection totale et économique.

9 Le contrôle

Cette opération se fait l'aide des appareils et des moyennes spécifiques pour vérifie si le produit (y compris, services, documents, code source) contrôlé est conforme ou non à ses spécifications ou exigences préétablies et incluant une décision d'acceptation, de rejet ou de retouche.

i. **Contrôle dimensionnelle**

Ce contrôle se fait au niveau de l'atelier par pied à coulisse et des bagues étalon, ce type de contrôle est fait après étirage, pressage et passivation.

1.8.4. Contrôle des caractéristiques mécaniques et compositions chimiques

Le Contrôle se fait au niveau De laboratoire (essaie mécanique et composition chimique), est fait a le fil machine, après le recuit et pour le produit finie.

En utilisant des appareils spéciaux de contrôle de qualité situé au-dessus :

1. Essai de traction :
2. Essai de dureté
3. Essai de traction-torsion
4. Essai de résilience
5. Décarburation superficielle

➤ ***Les phases de contrôle***

a) Contrôle de réception

L'ensemble des matières destinées à la fabrication des produits de boulonnerie font l'objet d'analyses pour vérifier la conformité des nuances livrées.

- ↗ Visuel (aspect général matière).
- ↗ Dimensionnel (dimension, rectitude,...).
- ↗ Compositions chimiques (analyse spectrale).

⇒ Caractéristiques physiques (duretés, résistance à la traction, allongement,...).

b) Contrôle au cours de la production

1 Préparation matière

Les contrôles effectués sur la matière portent sur la qualité du revêtement après phosphatation, structure du métal et sa dureté (recuit) avant son passage sur presse, absence de décarburation profonde sur la matière destinée aux produits de classe 8.8 et 10.9.

2 Pressage à chaud et à froid

Les contrôles cycliques effectués sur les produits portent sur les côtes dimensionnelles afin d'éviter les défauts inhérents à la fiabilité du réglage et des machines utilisées : concentricité, perpendicularité,... le respect strict des tolérances du diamètre de roulage afin de garantir l'obtention d'un filetage normalisé.

Toutes les sections de production sont dotées d'un marbre équipé de dispositifs et instruments de contrôle.

3 Traitement thermique

Après traitement thermique des produits, par échantillonnage et pour chaque charge selon une AQL arrêtée, des échantillons subissent les épreuves de résistance à la traction (pour toutes les classes de qualité), d'allongement, de dureté si nécessaire, de vérification d'absence de décarburation sur les filets et autres défauts (fissures, replis, ...)

4 Traitement de surface

Après dépôt de la couche de protection (brunissage, zingage), les épaisseurs de couche sont vérifiées afin de garantir la longévité attendue.

1.8.5. Stockage et Emballage des produits finis :

Avec 3 500 m² de surface de stockage sur 5 niveaux, ORSIM-BCR a une capacité interne de plus de 2000 tonnes à laquelle viennent s'ajouter des possibilités externes à l'entreprise.



Fig.20 Emballage



Fig.21 Stockage des produits finis

Chapitre 2 : Traitement anti - corrosion

Introduction

D'après Landolt, la corrosion est « la réaction interfaciale irréversible d'un matériau avec son environnement, qui implique une consommation du matériau ou une dissolution dans le matériau d'une composante de l'environnement ». Véritable fléau mondial, elle est responsable de la perte de plusieurs millions de tonnes de matière par an et touche de très nombreux secteurs comme l'infrastructure publique, les équipements de production, l'énergie, les transports, etc... D'après l'organisation mondiale de la corrosion, elle coûte aujourd'hui dans le monde 3 à 4 % du PIB des pays industrialisés, sans même prendre en compte les dommages environnementaux ou humains qui y sont liés. L'industrie aéronautique qui utilise encore beaucoup d'alliages à base d'aluminium est un exemple de secteur particulièrement touché par cette problématique. En effet, les matériaux métalliques comme l'alliage d'aluminium 2024 T3, utilisés pour leur légèreté et leurs bonnes propriétés mécaniques possèdent une microstructure hétérogène les rendant particulièrement sensibles à la corrosion^{3,4}. Afin de prolonger la durée de vie des avions, différents revêtements protecteurs ont été mis au point et les systèmes aujourd'hui utilisés sont composés de trois couches organiques, dans lesquelles sont introduits des composés à base de CrVI. S'il s'agit de l'inhibiteur de corrosion le plus performant connu à ce jour, son utilisation est très réglementée depuis les années 2000 en raison de son caractère cancérigène, mutagène et reprotoxique (CMR)⁵. Faute d'avoir trouvé un meilleur compromis, l'industrie aéronautique est l'une des dernières à toujours l'utiliser mais son remplacement devient de plus en plus urgent. Dans cette optique, de nombreux groupes de recherche se sont concentrés sur la synthèse de nouveaux revêtements protecteurs^{6,7}. Un certain nombre se sont intéressés aux matériaux « passifs » ayant pour rôle d'empêcher l'initiation de la corrosion en jouant un rôle barrière contre la diffusion des espèces corrosives comme H₂O, O₂, Cl⁻. D'autres se sont plutôt penchés sur le développement de nouveaux revêtements « actifs » contenant des inhibiteurs de corrosion susceptibles de limiter la propagation de la corrosion tout en étant moins toxiques que les chromates^{8,9}. Malgré les très nombreuses études dans ce domaine de recherche, l'adhésion des revêtements sur le substrat¹⁰, les relations entre microstructure et diffusion¹¹, l'interaction entre les inhibiteurs et la matrice¹²,... sont autant de problématiques auxquelles il est indispensable de trouver des réponses, tout en gardant à l'esprit la processabilité au niveau industriel. C'est dans ce contexte que s'inscrit cette thèse,

réalisée entre le Laboratoire de Chimie de la Matière Condensée de Paris (LCMP) et le Laboratoire Interface et Systèmes Electrochimiques (LISE). Le premier objectif de ce travail a été de synthétiser des revêtements anticorrosion par voie sol gel. Pour cela, deux approches ont été développées en parallèle. Tout d'abord, la synthèse de revêtements mésostructurés susceptibles de jouer le rôle de réservoir pour les inhibiteurs de corrosion et de faciliter leur diffusion à l'intérieur du revêtement a été explorée. La porosité de ces derniers les rendant intrinsèquement sensible à la pénétration d'espèces corrosives, un second type de revêtement, dense et hydrophobe a été mis au point afin de protéger dans un système bicouche le film mésostructuré. Le développement de revêtements les plus performants possibles nécessite une caractérisation précise des matériaux, de leur évolution et de leur comportement vis-à-vis de la corrosion. L'ellipsométrie, basée sur l'interaction de la lumière avec le revêtement donne accès à ses propriétés optiques (indice de réfraction) et à son épaisseur. Des analyses in situ en cellule environnementale permettent de plus de suivre l'évolution des matériaux dans différents milieux. La spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) permet quant à elle une caractérisation précise des phénomènes de corrosion se déroulant à l'interface avec le métal. Sensibles et permettant un suivi temporel de l'évolution des systèmes, ces deux techniques possèdent cependant leurs limites. Le second objectif de cette thèse a donc été de caractériser les revêtements mis au point tout en déterminant dans quelle mesure l'ellipsométrie et la spectroscopie d'impédance électrochimique peuvent être complémentaires .

2.1. Généralités sur la Corrosion :

2.1.1. Définitions:

La corrosion est un phénomène naturel affectant principalement les matériaux métalliques lorsqu'ils sont exposés à des milieux agressifs (humidité, salinité, acides, bases, etc.). Ce processus entraîne une dégradation progressive des propriétés mécaniques, esthétiques et fonctionnelles des pièces concernées.

Dans les industries où la sécurité, la fiabilité et la durabilité des équipements sont cruciales (comme le pétrole, le gaz, la chimie ou la construction), la maîtrise de la corrosion devient un enjeu prioritaire.

Ainsi, il devient indispensable d'adopter des méthodes de protection efficaces, parmi lesquelles l'utilisation de revêtements métalliques ou non métalliques constitue une solution couramment appliquée pour prolonger la durée de vie des composants.

Concept et principe :

La corrosion est le résultat d'une réaction chimique ou électrochimique qui se produit entre un matériau (souvent un métal) et son environnement. Elle est caractérisée par une perte de matière, pouvant conduire à des défaillances structurelles si elle n'est pas contrôlée.

2.1.2. Les Mécanismes d'Action :

La corrosion se manifeste essentiellement par des réactions d'oxydoréduction. On distinguera, entre autres, le phénomène galvanique, la corrosion par piqûres ou encore la corrosion intergranulaire. Ces mécanismes sont influencés par des facteurs environnementaux, notamment l'humidité, la température et la composition chimique de l'atmosphère. La corrosion se manifeste essentiellement par des réactions d'oxydoréduction. On distinguera, entre autres, le phénomène galvanique, la corrosion par piqûres ou encore la corrosion intergranulaire. Ces mécanismes sont influencés par des facteurs environnementaux, notamment l'humidité, la température et la composition chimique de l'atmosphère.

2.1.3. Les Types de la Corrosion :

On distingue tout d'abord la corrosion généralisée (ou uniforme) de la corrosion localisée^{2,13,14}. Comme il est possible de le voir sur la Figure 7, la corrosion localisée peut s'exprimer de plusieurs manières. Elle peut résulter de la présence d'espèces agressives comme les chlorures, de la composition hétérogène de l'alliage provoquant un couplage galvanique au sein même du matériau ou à l'environnement (contraintes mécaniques, variations de pH, etc.). Cette partie qui n'est pas spécifique aux alliages d'aluminium a donc pour objectif de présenter succinctement les différentes formes que peut prendre la corrosion.

La corrosion généralisée :

Visible à l'œil nu, elle se traduit par une diminution d'épaisseur uniforme et régulière sur toute la surface du métal, il est donc possible d'évaluer la vitesse de corrosion généralisée par mesure de perte de masse par exemple. Comme le montre la Figure 6, le film d'oxyde d'aluminium est soluble en milieux acide et basique. La corrosion généralisée se produit donc pour les matériaux exposés à ce type de milieu. La vitesse peut varier de quelques μm par heure à quelques μm par an en fonction de la nature de la base ou de l'acide. Ce phénomène peut être volontairement mis à profit pour décaper les surfaces avant dépôt.

La corrosion galvanique :

C'est l'une des formes les plus courantes de corrosion en milieu aqueux. Elle résulte de la formation d'une pile et induit donc une hétérogénéité de l'attaque. Quand deux métaux de nature différente Chapitre 1 II. La corrosion 26 sont mis au contact dans un milieu assurant la conduction ionique et électrique, ils forment un couple galvanique qui produit du courant en consommant le métal le moins noble. Ce phénomène peut toutefois être mis à profit pour protéger un matériau de la corrosion. Une anode sacrificielle au contact du métal à protéger se corrodera préférentiellement, évitant ainsi au reste de la structure (siège de la réaction cathodique) de se dégrader: c'est la protection cathodique.

La corrosion par piqûres :

Cette forme de corrosion localisée se caractérise par la formation de nombreuses piqûres à la surface de l'échantillon ; leur nombre et leur profondeur varient en fonction des matériaux et des conditions de service. Elle est généralement associée à une perte locale du pouvoir protecteur du film passif, se produisant en présence d'anions agressifs comme les chlorures. La quantité de métal corrodé est souvent faible donc contrairement à la corrosion uniforme, une analyse par perte de masse ne permet pas de la quantifier. C'est cependant une forme de corrosion particulièrement problématique pouvant rapidement conduire à la perforation des pièces. Dans les milieux naturels dont le pH est voisin de la neutralité et en présence de chlorures, l'aluminium est très sensible à la corrosion par piqûre.

La corrosion inter-granulaire :

Elle se propage généralement à partir des piqûres et progresse à l'intérieur du métal le long des joints de grains¹⁹. La corrosion inter-granulaire est due à la différence de potentiel électrochimique (d'au moins 100 mV) entre le grain et la zone des joints de grains où ont généralement précipité des particules intermétalliques. Un traitement thermique approprié permet aux alliages de contrôler la microstructure et donc de limiter ce type de corrosion.

La corrosion sous contrainte :

Elle résulte de l'action simultanée d'une contrainte mécanique et d'un milieu corrosif. Les mécanismes impliqués sont complexes et malgré les nombreuses études sur le sujet, ils ne sont pas encore parfaitement compris. Quelques propositions ont cependant été faites afin d'expliquer la propagation des fissures. Pour certains matériaux, elle peut être assimilée à la corrosion intergranulaire, accélérée et orientée par la contrainte. Dans d'autres cas, ce serait plutôt la dissolution préférentielle de la zone anodique en pointe de fissure qui expliquerait ce phénomène. Pour les alliages de la série 7000 qui ne sont pas sensibles à la corrosion intergranulaire en l'absence de contrainte, un mécanisme de fragilisation par l'hydrogène est aussi envisagé .

Le laminage et le filage orientent les grains de l'alliage. La corrosion sous contrainte se propageant entre les grains, la sensibilité des métaux dépend de la direction d'application de la contrainte.

La corrosion feuilletante ou exfoliante :

Suivant souvent la corrosion inter granulaire, elle se propage sélectivement suivant les plans parallèles à la direction du laminage ou du filage. Les feuillets de métal qui subsistent entre ces plans sans être attaqués sont écartés les uns des autres par les produits de corrosion comme les feuilles d'un livre. La sensibilité des alliages dépend principalement de leurs conditions de préparation (traitements thermiques, etc.)

La corrosion filiforme :

Elle est spécifique aux métaux peints. Elle s'initie aux défauts du revêtement et se propage à l'interface entre le métal et la couche protectrice sous forme de filaments étroits (environ 0,1 mm de large et quelques mm de longueur). Le métal ne subit qu'une attaque superficielle mais ce sont les produits de corrosion qui déforment la couche de peinture.

La corrosion caverneuse :

Ce type de corrosion est localisé dans les zones confinées. Au fur et à mesure que les réactions chimiques y ont lieu, la composition de la solution au contact du métal évolue : la zone s'appauvrit en oxygène dissous. La pile d'aération différentielle entre la crevasse et la solution extérieure ainsi créée a donc tendance à provoquer l'acidification de la solution.

L'érosion :

Elle se produit lorsqu'un fluide en mouvement est au contact du métal. La vitesse de corrosion est donc un paramètre important. Elle se caractérise par un amincissement orienté du métal au niveau du passage du fluide (formation de rayures, ravinements, ondulations, etc.) Phénomène connu depuis la découverte des métaux ce n'est pourtant que dans les années 1930 que la nature électrochimique de la corrosion est apparue¹³. Afin d'utiliser les matériaux adaptés à chaque application, d'optimiser leur forme ou encore de développer des revêtements protecteurs performants, il est primordial de comprendre les réactions mises en jeu. Plus précise qu'une caractérisation visuelle (faciès, cause des dommages,...) l'électrochimie est devenue depuis quelques années un outil de choix permettant d'appréhender de manière de plus en plus précise ce phénomène parfois complexe qu'est la corrosion.

2.1.4. Facteurs influençant la corrosion

La vitesse et l'intensité de la corrosion dépendent de plusieurs facteurs intrinsèques et extrinsèques liés au matériau, à l'environnement et aux conditions d'exploitation. Une bonne compréhension de ces facteurs est essentielle pour choisir une stratégie de protection anticorrosion adaptée.

La nature du métal ou de l'alliage

Chaque métal possède un potentiel électrochimique propre. Les métaux peu nobles comme le fer, le zinc ou l'aluminium sont plus sujets à la corrosion que les métaux nobles comme l'or ou le platine. De plus, la composition des alliages peut influencer leur résistance : par exemple, l'ajout de chrome dans les aciers inoxydables améliore significativement leur tenue à la corrosion.

L'environnement (milieu corrosif)

Le type de milieu auquel le métal est exposé joue un rôle déterminant. Les environnements marins, industriels ou acides sont particulièrement agressifs. Les milieux humides favorisent la formation de couches électrolytiques propices aux réactions électrochimiques.

La température

Une augmentation de la température accélère les réactions chimiques et électrochimiques, ce qui accroît généralement la vitesse de corrosion. Toutefois, certains métaux peuvent former à haute température une couche d'oxyde protectrice qui ralentit le phénomène (ex : aluminium).

Le pH du milieu

Le caractère acide ou basique d'un environnement peut influencer la corrosion. En général, les milieux très acides ou très basiques sont plus agressifs que les milieux neutres. La corrosion est souvent plus rapide dans un pH inférieur à 4 ou supérieur à 9.

La présence de substances corrosives

Des éléments comme les ions chlorure (Cl^-), le dioxyde de soufre (SO_2), ou encore le sulfure d'hydrogène (H_2S) sont particulièrement agressifs. Les chlorures, par exemple, peuvent provoquer la corrosion localisée (piqûration) même sur des aciers inoxydables.

L'aération

La quantité d'oxygène disponible dans l'environnement influence également le mécanisme de corrosion. Un excès d'oxygène favorise la réaction de réduction au niveau de la cathode, accélérant ainsi le processus. Toutefois, un manque d'oxygène dans certaines zones peut entraîner une corrosion différentielle (cellules d'aération).

La vitesse de circulation du fluide

Dans les installations industrielles, la corrosion peut être influencée par le débit des fluides. Un écoulement rapide peut entraîner une usure mécanique combinée à la corrosion, appelée **érosion-corrosion**.

2.2. Les Traitements Anticorrosion :

Protection contre la corrosion :

La durée de vie des avions civils est d'environ trente ans. Durant cette période, ils sont exposés à des conditions agressives (froid, humidité, chocs, ...) propices à leur dégradation. Afin de limiter les phénomènes de corrosion, il est donc indispensable de mettre en place des moyens de protection efficaces, durables et résistants aux conditions auxquelles les avions

sont soumis. Pour que le métal se corrode, il faut que les espèces comme H_2O , O_2 , Cl^- , ... traversent le revêtement jusqu'à sa surface. Afin d'empêcher l'initiation de la corrosion, une partie de la recherche dans ce domaine s'est concentrée sur l'amélioration des propriétés barrières des revêtements afin de limiter la diffusion de ces espèces corrosives. Ces revêtements dits « passifs » sont généralement des films denses (résines polymères,...) résistants à l'hydrolyse. Cependant un revêtement 100% imperméable n'existe pas et dans les conditions de stress (mécanique, chimique,...) auxquelles ils sont soumis, ils sont susceptibles de se rompre. Dans ce cas, même la meilleure barrière devient inefficace. C'est pourquoi de nombreuses études ont aussi porté sur le développement de revêtements dits « actifs » qui ont pour rôle de limiter la propagation de la corrosion généralement grâce à l'utilisation d'espèces inhibitrices (le plus souvent incorporées dans des films barrières). Ces dernières, insérées dans le film protecteur peuvent diffuser vers la surface du métal pour le protéger en cas de pénétration d'eau ou de rupture du revêtement. L'immense diversité de matériaux, de fonctions chimiques ou de procédés de dépôts rend impossible leur présentation exhaustive. Il est cependant possible de noter quelques points importants qui orientent normalement le développement de revêtements anticorrosion :

Protection efficace : bonnes propriétés barrières

Protection durable : bonnes propriétés mécaniques, utilisation d'inhibiteurs de corrosion

Bonne adhésion sur le substrat

Bonne adhésion des couches supérieures en cas de système multicouches

Processabilité au niveau industriel

Coût et toxicité limités

Pour développer de manière réfléchie un matériau performant, il est important de comprendre les phénomènes mis en jeu. Afin d'introduire la philosophie de ce travail de thèse, j'ai donc choisi de porter dans le début de ce chapitre une attention particulière aux phénomènes de diffusion des espèces agressives à l'intérieur d'un film barrière. Comme leur rôle est primordial dans la protection contre la corrosion, quelques inhibiteurs et leurs mécanismes d'actions seront ensuite présentés.

Finalement, ce chapitre se poursuivra par une présentation des revêtements développés et utilisés par l'industrie aéronautique avant de se terminer par les options envisagées dans cette thèse pour le développement de nouveaux matériaux performants

2.2.1. Les revêtements passifs – propriétés barrières :

Pour que la corrosion soit initiée, il faut que les espèces corrosives liquides, ioniques et gazeuses (H_2O , O_2 , Cl^-) atteignent la surface du métal. L'évaluation de la perméabilité est donc indispensable pour améliorer les propriétés barrières des matériaux⁴¹. Plusieurs modèles ont été développés pour tenter d'expliquer la perméabilité. Le premier, assez simple est celui de Graham (1886) qui décrit la perméation comme une succession de 3 étapes⁴² :

1. Adsorption des molécules dans le polymère
2. Diffusion de la zone la plus concentrée à la moins concentrée
3. Désorption des molécules de l'autre côté du film

La perméabilité (P) est donc proportionnelle au coefficient de diffusion (D) et à celui de solubilité (S) : $P \propto D.S$

Bien que ce modèle ait été amélioré depuis pour s'adapter à des systèmes plus complexes⁴², il permet d'appréhender les phénomènes mis en jeux.

Les études sur les revêtements protecteurs portent sur de nombreux matériaux comme les oxydes ou les polymères organiques. Ces derniers, peu chers et dont la diversité des précurseurs permet une grande variabilité des propriétés sont au cœur de la recherche sur les films barrières et les phénomènes de diffusion. Comme pointé du doigt dans la revue de Sangaj⁴³ les relations entre la perméabilité des polymères et les propriétés anticorrosion sont cependant encore assez mal comprises car les systèmes développés sont souvent très complexes :

La composition des revêtements est souvent très hétérogène (matrice, pigments, inhibiteurs de corrosion, charges inorganiques,...). La combinaison de ces composants, associée à la diversité des précurseurs moléculaires pouvant être utilisés pour la matrice polymérique a forcément une influence sur la perméabilité.

L'eau, les ions ou les produits de corrosion qui diffusent inévitablement dans le matériau au cours du temps peuvent le modifier et donc altérer ses propriétés.

Lors de la préparation et du dépôt des revêtements, de nombreuses techniques peuvent être utilisées. Le séchage, l'évaporation du solvant, les traitements thermiques ou photochimiques,... influent sur la microstructure.

L'adhésion est un critère important, parfois difficile à décorrélérer des propriétés barrières lors des études de durabilité. Cependant les fonctions chimiques conduisant à une bonne adhésion (plutôt à caractère hydrophile pour interagir avec l'oxyde ou le métal) sont souvent incompatibles avec des barrières à l'eau (plutôt à caractère hydrophobe).

La corrosion dépend de la présence d'eau, d'oxygène et d'ions agressifs comme les chlorures à la surface du métal. La taille, la polarité, les interactions de ces derniers avec les matériaux sont différentes. Il est donc nécessaire d'identifier quels sont ceux qui interviennent dans l'étape cinétiquement déterminante de la corrosion et de trouver des compromis dans la synthèse des revêtements.

Même s'ils ne sont pas exhaustifs, les quelques critères évoqués ci dessus illustrent bien la complexité de ces systèmes et le lien fondamental qu'il peut exister entre la composition, la microstructure et les propriétés barrières.

Une question se pose donc : peut-on quantifier et caractériser les hétérogénéités (taille, quantité, distribution dans le matériau,...), qu'elles soient de nature chimique ou morphologique afin d'appréhender les mécanismes de perméation à l'intérieur de ces matériaux ? En effet, les interactions entre les espèces agressives et la matrice ne sont pas encore parfaitement comprises et les techniques de caractérisation actuelles ne permettent pas de séparer facilement les phénomènes mis en jeu : s'agit-il d'adsorption, d'absorption, de condensation capillaire dans les pores résiduels, etc. ?

En élargissant les recherches à d'autres domaines que la corrosion comme les membranes de désalinisation ou le packaging, il est cependant possible d'obtenir quelques pistes permettant de rationaliser la synthèse de films barrières performants⁴⁴.

Conséquences Economiques et Sécuritaires

La corrosion engendre des coûts de maintenance élevés, des interruptions de service et peut même entraîner des catastrophes industrielles. Sur le plan sécuritaire, la défaillance prématurée des équipements expose non seulement l'environnement de travail à des risques, mais affecte également la fiabilité et la sécurité des installations.

Présentation Générale des Traitements

Les traitements anticorrosion visent à protéger les pièces contre les agressions de l'environnement. Deux grandes familles se distinguent :

- Les revêtements métalliques : offrent une barrière physique et, dans certains cas, une action cathodique.
- Les revêtements non métalliques : souvent basés sur des polymères ou des peintures spéciales qui limitent l'accès des agents corrosifs à la surface du métal.

.Revêtements métalliques

1) Galvanisation :

- ✓ Zincage par immersion à chaud.
- ✓ Protection par cathodique
- ✓ Employée pour les structures extérieures, ossatures, etc.

2) Électrodéposition

- ✓ Nickelage, chromage, cuivrage
- ✓ Amélioration de l'apparence et de la résistance à la corrosion.
- ✓ Processus fondé sur des bains électrolytiques.

3) Métallisation

- ✓ Projection thermique d'aluminium ou de zinc.
- ✓ Particulièrement efficace dans les environnements marins ou industriels.

4) Processus de Sherardisation

- ✓ Diffusion du zinc à haute température
- ✓ Conçue pour les pièces de dimensions réduites.

Revêtement Non métallique

a. Peintures anti-corrosives

- ✓ Peintures époxy et polyuréthane
- ✓ Barrière matérielle contre l'humidité et l'oxygène.
- ✓ Application en plusieurs strates : de base, intermédiaire, finition.

I. Revêtements polymères

- ✓ PTFE, PVC, PVD
- ✓ Résistance chimique et thermique élevée.
- ✓ Employés dans le domaine industriel et chimique.

II. Procédés chimiques

- ✓ Phosphatation : préparation de surface avant application de peinture.
- ✓ Anodisation : processus destiné à l'aluminium, consistant à former une couche d'oxyde protectrice.

III. Critère pour sélectionner une méthode de protection anticorrosion

- ✓ Nature du matériau.
- ✓ Conditions d'emploi
- ✓ Durée de vie souhaitée
- ✓ Frais d'implémentation et de maintenance
- ✓ Esthétique

IV. Comparaison des méthodes

Méthode	Cout	Efficacité	Durée de vie	Complexité d'application
Galvanisation	Moyenne	★★★★	10-20 ans	Faible
Peinture époxy	Faible	★★★	5-10 ans	Moyenne
Électrodéposition	Élevé	★★★★	5-15 ans	Élevée
Métallisation	Élevé	★★★★★	15-25 ans	Moyenne
Revêtements PTFE	Très Élevé	★★★★★	10-20 ans	Spécialisée

V. Etude de cas

- ✓ Tuyauterie en environnement salin : galvanisation et application de peinture.
- ✓ Secteur chimique : enrobage PTFE ou peinture époxy
- ✓ Composants mécaniques précis : nickelage ou chromage.
- ✓ Structures en aluminium : processus d'anodisation

2.3. Étude Comparative des Revêtements :

2.3.1. Critères de Comparaison :

Pour une analyse rigoureuse, nous avons identifié plusieurs critères essentiels :

- **Durabilité** : durée pendant laquelle le revêtement conserve ses propriétés protectrices.
- **Coût économique** : investissement initial et frais de maintenance.
- **Facilité d'application** : contraintes techniques et conditions de réalisation.
- **Résistance aux agressions** : capacité du revêtement à résister aux facteurs chimiques et mécaniques.

2.4. Proposition de la Meilleure Méthode Anticorrosive :

2.4.1. Synthèse Comparative

À l'issue de l'analyse, il apparaît que la méthode la plus efficace dépend du compromis entre coût, durabilité et facilité d'application. La comparaison entre revêtements métalliques et non métalliques suggère que, dans une application industrielle typique, une approche hybride serait avantageuse. Cette approche consisterait à appliquer une couche de protection métallisée renforcée par un revêtement non métallique afin d'assurer une double barrière contre la corrosion.

2.4.2. Proposition d'une Stratégie HSE

Fort de cette analyse, la proposition se décline en plusieurs recommandations pratiques :

- **Adoption d'un traitement hybride** : combinant galvanisation et revêtement polymère afin de maximiser la durabilité.
- **Mise en place de protocoles d'inspection réguliers** pour évaluer l'état des revêtements.

- **Formation continue du personnel** en charge de l'entretien et de l'application des traitements.
- **Établissement d'un cahier des charges précis** en fonction des environnements opérationnels et des contraintes économiques.

Ces recommandations visent à optimiser la performance anticorrosive tout en réduisant les coûts de maintenance et les risques pour la sécurité.

L'étude comparative met en exergue que l'efficacité des revêtements anticorrosion repose sur une approche intégrée prenant en compte les spécificités techniques et économiques. Les résultats montrent que la méthode hybride s'avère prometteuse lorsque la protection doit être assurée dans des environnements variés et soumis à de fortes agressions.

La discussion porte également sur l'importance de la veille technologique dans le domaine des revêtements et la nécessité d'adapter les solutions en fonction des évolutions industrielles.

Conclusion :

En conclusion, ce Chapitre a permis de comparer en profondeur les revêtements métalliques et non métalliques pour le traitement anticorrosion. L'analyse a démontré que, bien qu'aucune solution ne soit parfaite en soi, une approche combinant les atouts de chaque technique offre la meilleure protection.

Les recommandations formulées incitent à une politique HSE proactive, intégrant des inspections régulières et une formation rigoureuse du personnel. Par ailleurs, des recherches supplémentaires pourraient approfondir l'étude de nouvelles technologies de revêtement et leur application dans des environnements extrêmes.

Ce travail apporte ainsi une contribution pertinente à la prévention des risques industriels et offre des perspectives prometteuses pour l'amélioration des techniques de protection anticorrosion

CHAPITRE 3 :

3.1. LES EAUX CONTAMINEES :

Au cours du traitement de surface, les concentrations des différents ions dans les bains de phosphatation et de zingage augmentent avec le temps, et l'eau va être contaminé et ça influe sur la qualité du matériau, donc elle doit rejeter mais avant de son rejet il faut la traité.

3.2. Définition des eaux contaminées

Les eaux contaminées sont des eaux qui contiennent des substances polluantes ou nuisibles, d'origine chimique, biologique ou physique, et qui peuvent représenter un danger pour la santé humaine, l'environnement ou les installations industrielles. Ces eaux peuvent provenir de divers processus industriels, agricoles ou domestiques, et contiennent généralement des métaux lourds, des hydrocarbures, des résidus chimiques, des boues, ou encore des micro-organismes pathogènes.

Dans un contexte industriel comme celui de l'usine ORSIM BCR, les eaux contaminées résultent principalement des étapes de transformation, de nettoyage des équipements ou du rejet des sous-produits.

Définition du traitement des eaux contaminées

Le traitement des eaux contaminées désigne l'ensemble des méthodes physiques, chimiques et biologiques utilisées pour éliminer ou réduire les polluants présents dans les eaux usées.

L'objectif principal est de rendre ces eaux conformes aux normes environnementales avant leur rejet dans le milieu naturel ou leur réutilisation.

Ce traitement vise à retirer ou neutraliser :

- Les matières en suspension (MES),
- Les substances toxiques (comme les métaux lourds ou hydrocarbures),
- Les agents pathogènes (bactéries, virus),
- Et divers produits chimiques issus des activités industrielles.

Dans le contexte industriel, comme celui de l'usine ORSIM BCR, le traitement des eaux contaminées est une étape cruciale de la gestion environnementale. Il permet :

- La préservation de la ressource en eau,

- La protection de la santé publique,
- Le respect de la réglementation environnementale,
- Et la réduction de l'impact écologique de l'activité industrielle.

3.3. Etapes de traitement des eaux contaminées

Température et pH

La température doit être inférieure ou égale **30°C** ($T \leq 30^\circ\text{C}$). Toutes ces eaux sont donc mélangées, et leurs **pH** seront amenés à une valeur comprise entre **(7,0-8,5max)**. Par ajout de soude ou d'acide.

La plupart des métaux précipitent sous forme d'hydroxyde et les eaux claires restantes peuvent être rejetées après filtration .

Réduction des chromates

Les bains contiennent le chrome hexa valent, ce dernier est très toxique, si il dépasse la norme ($[\text{Cr}^{6+}] \geq 0,5 \text{ mg/l}$) on le réduit en chrome trivalent par l'agent traité bisulfite de sodium (NaHSO_3) en milieu acide ($\text{pH} \leq 2,5$).

Très important : la réaction est pratiquement instantanée pour pH inférieures à 2,5 mais la vitesse de réaction diminue très rapidement lorsque le **pH** augmente (seuil critique **pH=3,5**)

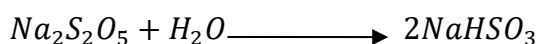
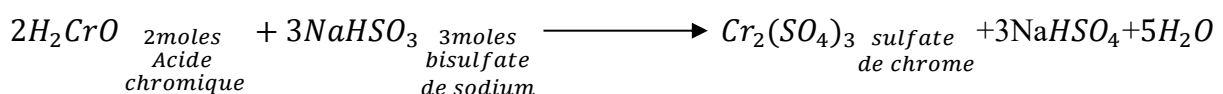
Et la consommation en réactifs ne suit. Plus la réaction stœchiométrique car un important excès de bisulfite est nécessaire. La réaction consomme les ions H^+ , C'est pourquoi il faut surveiller le pH et le maintenir entre 1 et **2,5** par ajout d'acide chlorhydrique concentré.

Le temps de réaction doit être respecté ainsi que le **pH**.

Si la concentration de chrome hexa valent dépasse la norme détermine

Ce traitement fait selon de mécanisme suivant :

Hydrolyse de Penta sulfate de sodium :

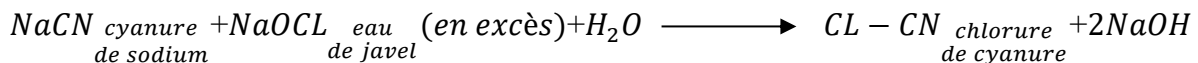
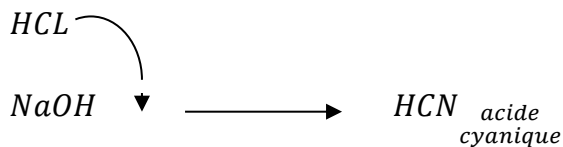
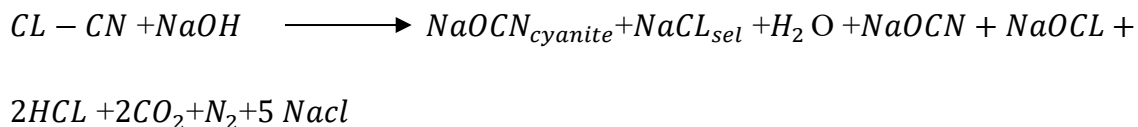


Si la concentration du chrome va être inférieure à **0,5 mg/l**, on augmente le **pH** jusqu'à **8,5** par l'ajout de **NaOH**.

Oxydation de Cyanure:

Le Cyanure est un métal conceregene surtout si il dépasse **0,1 g/l**, son traitement fait à l'aide d'un agent traité hépochlorite de sodium (eau de javel), dans un milieu basique de **pH** égale à **11**, on augmente le **pH** du bain en ajoutant **NaOH** et la température **36°C**.

Les réactions font selon le mécanisme suivant :



Si la concentration va être dans la norme on diminue le pH jusqu'à **8, 5**.

Traitement des autres ions métalliques

Les différents ions métalliques tels que le fer, le zinc, la matière en suspension, le phosphore, et le cuivre sont traitées dans un milieu basique de valeur du **pH = 11**, ils vont être précipités, et ça que le schéma précédent explique.

Le plus important est gardé le **pH** à **8,5** et la température à **30°C** après le traitement.

Après tous les traitements, on fait la filtration du bain plusieurs fois jusqu'à atteindre un meilleur résultat : l'limpidité de l'eau, le **pH** compris entre **6,5-8,5**, et la température **30°C**.

Si les résultats d'analyses des eaux traitées au niveau de la station d'épuration sont conformes aux normes internationals, l'usine peut rejeter l'eau dans l'oued.

1) EST-CE QU IL Y A EU UN PROBLEME AVEC L EAU DE TRAITEMENTS

Problème 1 :

Accumulation manuelle et épuisante des déchets avant l'achat du filtre-presse
Avant l'introduction du filtre-presse dans la station de traitement des eaux usées de l'usine ORSIM, les opérateurs étaient confrontés à une accumulation importante de boues et de déchets solides. Ce travail, effectué manuellement, nécessitait beaucoup d'efforts physiques et provoquait une fatigue excessive chez les agents chargés de la maintenance.
De plus, cette méthode manuelle était peu efficace pour séparer correctement les solides de l'eau, ce qui ralentissait le traitement et augmentait le risque de contamination secondaire.

Solution apportée :

Suite à ce constat, l'administration de l'usine a investi dans l'achat d'un filtre-presse, un équipement industriel permettant de séparer mécaniquement l'eau des boues grâce à une pression élevée. Ce dispositif a permis :

de réduire la charge de travail physique des opérateurs,

d'améliorer la qualité du traitement des eaux usées,

et d'accélérer le processus global d'épuration.

Les opérateurs se disent aujourd'hui satisfaits de cette amélioration qui a facilité leurs conditions de travail tout en optimisant les performances de la station.

Problème 2 :

Présence de graisses et d'huiles dans les eaux usées industrielles

Un autre problème rencontré dans l'usine concernait la présence de matières grasses d'huiles et d'hydrocarbures dans les eaux rejetées par certains ateliers. Ces substances forment une couche flottante à la surface de l'eau et peuvent gêner les étapes suivantes de traitement. Elles sont également nocives pour l'environnement si elles ne sont pas correctement séparées.

Solution apportée :

Pour faire face à cette problématique, les responsables ont installé un système de dégraissage en amont de la station d'épuration, comprenant :
des bacs de séparation par flottation (parfois associés à l'injection d'air ou de réactifs chimiques), et un entretien régulier des canalisations pour éviter l'accumulation.

Ce système permet de séparer efficacement les graisses avant l'entrée dans le circuit principal de traitement, garantissant ainsi un meilleur fonctionnement des équipements en aval et une conformité avec les normes de rejet.

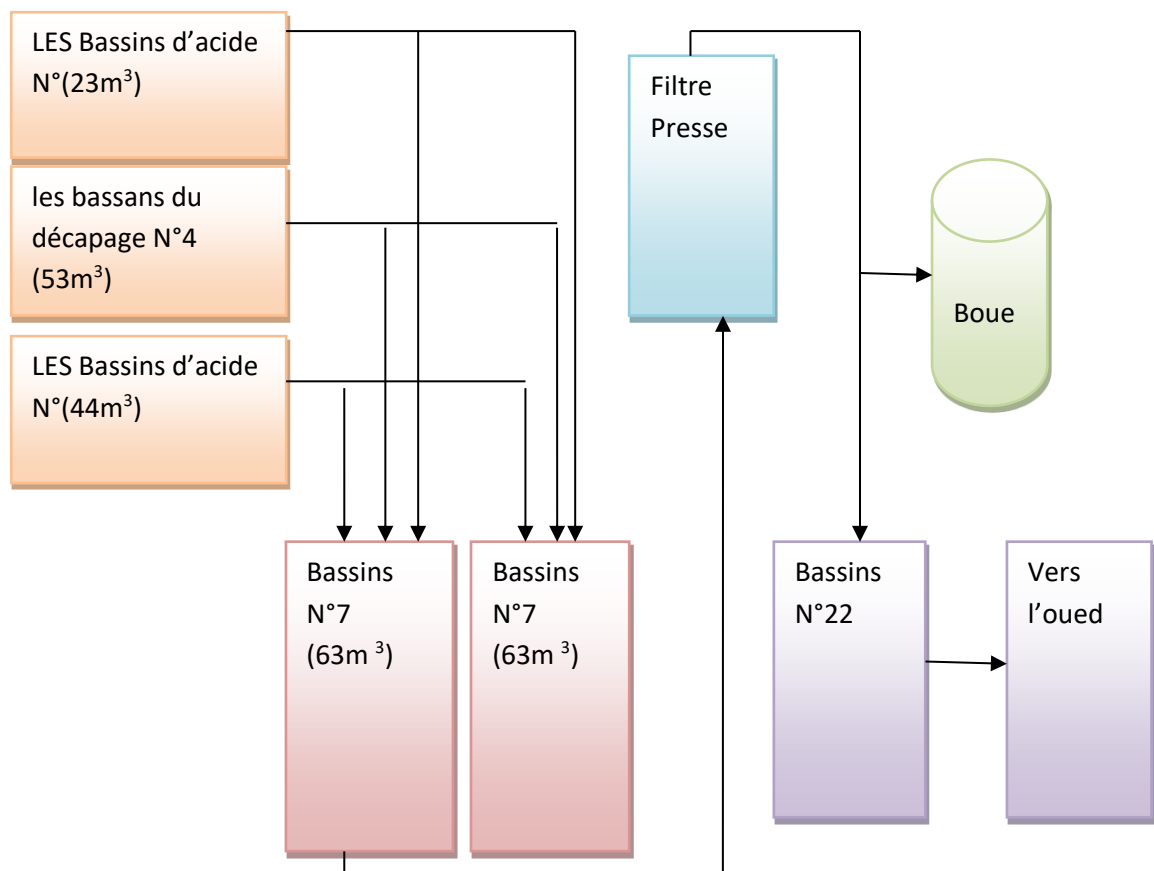


Figure 22 : les processus de station d'épuration .

Conclusion General

La problématique de la corrosion constitue un défi majeur pour de nombreuses entreprises industrielles, notamment l'entreprise ORSIM, dont les activités et les équipements sont particulièrement exposés à ce phénomène. Ce mémoire a permis d'appréhender de manière systémique les mécanismes de la corrosion, d'en identifier les causes spécifiques dans le contexte opérationnel d'ORSIM, et d'évaluer l'efficacité des stratégies mises en place pour y faire face.

L'analyse effectuée a mis en lumière l'importance d'une démarche préventive et intégrée, combinant des choix judicieux de matériaux, l'application de revêtements protecteurs adaptés, des techniques de surveillance et de maintenance avancées, ainsi que la sensibilisation continue du personnel. Il apparaît que seule une synergie entre les aspects techniques, organisationnels et humains permet de maîtriser durablement les effets de la corrosion.

Ainsi, la lutte contre la corrosion ne doit pas être perçue uniquement comme une nécessité technique, mais comme un levier stratégique de performance industrielle. En investissant dans la prévention et l'innovation dans ce domaine, l'entreprise ORSIM peut non seulement réduire ses coûts à long terme, mais également accroître la fiabilité de ses installations, assurer la sécurité des opérations et renforcer sa compétitivité sur le marché.

En conclusion, la gestion efficace de la corrosion s'impose comme une composante essentielle de la politique de durabilité et de résilience industrielle d'ORSIM, appelant à une amélioration continue et à un engagement soutenu de l'ensemble des parties prenantes.

Références

1. Landolt, D. Traité des matériaux 12. Corrosion et chimie de surfaces des métaux. (2003).
2. World Corrosion Organization. World Corrosion Organization. Available at: <http://corrosion.org/>. (Accessed: 12th March 2019)
3. Vargel, C. Corrosion de l'aluminium. (Dunod, 1999).
4. Boag, A. et al. How complex is the microstructure of AA2024-T3? Corros. Sci. 51, 1565–1568 (2009).
5. Kendig, M. W. & Buchheit, R. G. Corrosion inhibition of aluminum and aluminum alloys by soluble chromates, chromate coatings, and chromate-free coatings. Corrosion 59, 379–400 (2003).
6. Wang, D. & Bierwagen, G. P. Progress in Organic Coatings Sol – gel coatings on metals for corrosion protection. Prog. Org. Coatings 64, 327–338 (2009).
7. Figueira, R. B., Silva, C. J. R. & Pereira, E. V. Organic–inorganic hybrid sol–gel coatings for metal corrosion protection: a review of recent progress. J. Coatings Technol. Res. 12, 1–35 (2014).
8. Zheludkevich, M. L. et al. Nanostructured sol-gel coatings doped with cerium nitrate as pretreatments for AA2024-T3 Corrosion protection performance. Electrochim. Acta 51, 208–217 (2005).
9. Maia, F. et al. Corrosion protection of AA2024 by sol-gel coatings modified with MBT-loaded polyurea microcapsules. Chem. Eng. J. 283, 1108–1117 (2016).
10. Spengler, E., Margarit, I. C. P. & Mattos, O. R. On the relation between adherence of a paint film and corrosion protection. Electrochim. Acta 38, 1999–2003 (1999).
11. Sangaj, N. S. & Malshe, V. C. Permeability of polymers in protective organic coatings. Prog. Org. Coatings 50, 28–39 (2004).
12. Raps, D. et al. Electrochemical study of inhibitor-containing organic-inorganic hybrid coatings on AA2024. Corros. Sci. 51, 1012–1021 (2009).
13. <https://orsim.dz/>