



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE DE 20 AOUT 1955 SKIKDA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE PETROCHIMIE

# Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

## Master

Filière : Industries Pétrochimiques

Spécialité : Génie Pétrochimique

*Étude gravimétrique et électrochimique de la résistance à la  
corrosion des revêtements réalisés  
par projection de poudre sous faisceau LASER*

**Réalisé par:**

❖ Zaabat Chaima

**Encadré par:**

❖ Dr. E. BOUSSAHA

Année universitaire 2024-2025

# Remerciements

Avant toute chose, je rends grâce à Dieu, Le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la santé, la patience et la volonté nécessaires à l'accomplissement de ce mémoire.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **Dr. Boussaha**, mon encadreur, pour la qualité de son accompagnement, sa rigueur scientifique, sa disponibilité et son soutien constant tout au long de cette expérience. Son encadrement a été pour moi une source précieuse d'enrichissement personnel et professionnel.

J'adresse également mes remerciements sincères aux membres du jury, pour l'intérêt porté à mon travail, ainsi que pour le temps et l'attention qu'ils lui ont consacrés.

Ma reconnaissance va aussi à l'ingénieur de laboratoire de l'Université **Karim Djilani**, dont l'aide pratique, les conseils avisés et le soutien moral ont grandement facilité l'avancement de ce mémoire.

Je n'oublie pas **M. Haroun Zermani** pour son accompagnement et son aide précieuse tout au long de mon stage, qui ont grandement contribué à la richesse de ce travail. Enfin, je remercie du fond du cœur toutes les personnes qui m'ont soutenu, encouragé ou inspirée de près ou de loin, et qui ont cru en moi tout au long de ce parcours.



## *DEDICACE*

*Je dédie ce travail*

*À ma chère mère,  
À mon cher père,*

*Pour leurs prières, leur patience, et leur soutien indéfectible  
tout au long de mon parcours.*

*À mes frères, Oussama et Yasser,*

*À ma sœur, Lina,*

*Pour leur affection et leur présence discrète mais précieuse.*

*À mes chères amies : Salsbail, Batoul, Amani, Lina, Aya, Et  
toutes mes camarades dans la classe*

*Merci pour votre soutien, vos mots doux et votre présence  
dans les moments durs comme dans les plus doux.*

*À toute ma famille,*

*Pour leur amour constant et leur énergie positive.*

*Chaima*

## المخلص

تلعب هندسة الأسطح دورًا محوريًا في تعزيز أداء ومتانة المواد المعدنية المستخدمة في البيئات القاسية، لاسيما وتعد آليات التآكل والاهتراء من بين أبرز. في قطاعات حيوية مثل الطاقة، النقل، والصناعات التحويلية العوامل المؤثرة في عمر الخدمة لهذه المكونات، مما يستدعي تبني تقنيات معالجة سطحية متقدمة لتحسين مقاومتها.

رغم الانتشار الواسع لتقنيات مثل اللحام بالقوس الكهربائي، الرش الحراري، والرش بالبلازما، إلا أنها غالبًا ما تُعاني من قيود بنيوية مثل ضعف الارتباط الميتالورجي، المسامية العالية، وتشوهات حرارية غير مرغوب فيها، بالإضافة إلى ضعف التحكم الدقيق في المنطقة المتأثرة حراريًا.

كخيار تكنولوجي واعد، حيث تُمكن من ترسيب طبقات في هذا السياق، تبرز تقنية إعادة شحن السطح بالليزر طلاء عالية الكثافة وذات ترابط ميتالورجي متين، عبر إذابة مواد مضافة معدنية أو مركبة باستخدام شعاع ليزر وتتميز هذه الطبقات ببنية مجهرية دقيقة، ونسبة مسامية منخفضة، وتركيبية كيميائية محسنة، مما يعلو الطاقة يُعزّز من مقاومتها للتآكل الميكانيكي والكيميائي.

إضافة إلى ذلك، تستجيب هذه التقنية لمتطلبات الاستدامة الصناعية والكفاءة البيئية، بفضل قدرتها على تقليل استهلاك المواد الخام، وإمكانية الأتمتة والتطبيق الموضعي الدقيق في المراحل النهائية من التصنيع.

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل أداء الطلاء الليزري عند استخدامه لمعالجة مشكلة صناعية حقيقية، مع التركيز على تقييم مقاومة التآكل، دراسة جودة الطبقات المترسبة، واستكشاف الظواهر الفيزيائية المصاحبة لهذه العملية، إضافة إلى التحديات التقنية المرتبطة بها.

## Résumé

L'ingénierie des surfaces joue un rôle essentiel dans l'amélioration de la durabilité et des performances des matériaux métalliques exposés à des environnements sévères, en particulier dans les secteurs de l'énergie, du transport et des industries de transformation. Les mécanismes de corrosion et d'usure figurent parmi les principales causes de dégradation, ce qui impose le recours à des techniques avancées de traitement de surface.

Bien que des procédés tels que le soudage à l'arc, la projection thermique, ou la projection plasma soient largement utilisés, ils présentent souvent des limites structurelles telles qu'un faible lien métallurgique, une porosité élevée, et des distorsions thermiques, ainsi qu'un contrôle limité sur la zone affectée thermiquement.

Dans ce contexte, la recharge laser apparaît comme une alternative technologique prometteuse. Elle consiste à fondre un matériau d'apport sur la surface du substrat à l'aide d'un faisceau laser à haute énergie, permettant la formation de couches denses, homogènes, et métallurgiquement liées au substrat, avec un diluement minimal. Ces couches se distinguent par une microstructure fine, une faible porosité, et une composition chimique optimisée, améliorant ainsi leur résistance à la corrosion.

En plus de ses avantages techniques, cette technologie répond aux exigences de durabilité industrielle et d'efficacité environnementale, grâce à une réduction de la consommation de matériaux, la possibilité d'automatisation, et la réalisation de traitements localisés en phase finale de production.

Cette étude vise à évaluer les performances du revêtement laser appliqué à une problématique industrielle réelle, en analysant la qualité des couches déposées, leur résistance à la corrosion, ainsi que les phénomènes physiques associés et les défis techniques rencontrés.

## Abstract

Surface engineering plays a vital role in enhancing the durability and performance of metallic materials subjected to harsh operational conditions, particularly in key sectors such as energy, transportation, and manufacturing industries. Corrosion and wear mechanisms are among the main causes of material degradation, necessitating the use of advanced surface treatment techniques.

While traditional methods such as arc welding, thermal spraying, and plasma spraying are widely used, they often suffer from structural limitations including weak metallurgical bonding, high porosity, and thermal distortions, in addition to limited control over the heat-affected zone.

In this context, laser cladding emerges as a promising advanced technology. It involves melting an added material onto the surface of the substrate using a high-energy laser beam, resulting in dense, homogeneous coatings that are metallurgically bonded to the base material with minimal dilution. These coatings exhibit a fine microstructure, low porosity, and optimized chemical composition, significantly improving their corrosion resistance.

Beyond its technical benefits, the laser coating process aligns with modern industrial sustainability and environmental efficiency goals, by reducing raw material consumption, enabling automation, and allowing localized treatment during final manufacturing stages.

This study aims to evaluate the feasibility and performance of laser cladding in solving a specific industrial challenge, by analyzing the quality of the deposited layers, their corrosion resistance, and exploring the associated physical phenomena and technical challenges involved.

## Remerciements

### Dédicaces

- Résumés
- Liste des figures
- Liste des tableaux
- Liste des abréviations

# Table des matières

## Introduction générale

<b>Chapitre I</b>	
<b>Généralités sur la corrosion</b>	
<b>I.1. Introduction</b>	<b>5</b>
<b>I.2. Définition</b>	<b>5</b>
<b>I.3. L'origine de la corrosion</b>	<b>5</b>
<b>I.4. Les différents processus de la corrosion</b>	<b>6</b>
<b>I.4.1. Corrosion chimique</b>	<b>6</b>
<b>I.4.2. Corrosion biochimique</b>	<b>7</b>
<b>I.4.3. Corrosion par érosion et cavitation</b>	<b>7</b>
<b>I.4.4. Corrosion électrochimique</b>	<b>7</b>
<b>I.5. Le mécanisme de corrosion</b>	<b>8</b>
<b>I.5.1. Réaction anodique</b>	<b>9</b>
<b>I.5.2. Réaction cathodique</b>	<b>9</b>
<b>I.6. Les différents types de la corrosion</b>	<b>10</b>
<b>I.6.1. Corrosion uniforme</b>	<b>10</b>
<b>I.6.2. Corrosion par piqures</b>	<b>11</b>
<b>I.6.3. Corrosion caravaneuse</b>	<b>11</b>
<b>I.6.4. Corrosion intergranulaire</b>	<b>12</b>
<b>I.6.5. Corrosion sous contrainte</b>	<b>12</b>
<b>I.6.6. Corrosion galvanique</b>	<b>13</b>
<b>I.6.7. Corrosion filiforme</b>	<b>13</b>
<b>I.6.8. Corrosion par érosion</b>	<b>14</b>
<b>I.6.9. Corrosion par contact</b>	<b>14</b>
<b>I.6.10. Exfoliation</b>	<b>15</b>
<b>I.6.11. Fatigue corrosion</b>	<b>15</b>
<b>I.7. Facteurs de la corrosion</b>	<b>16</b>

<b>I.7.1. Effet de la température</b>	<b>16</b>
<b>I.7.2. L'humidité</b>	<b>16</b>
<b>I.7.3. La salinité</b>	<b>17</b>
<b>I.7.4. L'acidité</b>	<b>17</b>
<b>I.8. Conséquences de la corrosion</b>	<b>18</b>
<b>I.8.1. Impact sur la résistance et la longévité des matériaux</b>	<b>18</b>
<b>I.8.2. Impact à long terme et durabilité</b>	<b>18</b>
<b>I.9. Moyens de protection contre la corrosion</b>	<b>19</b>
<b>I.9.1. Méthodes de protection contre la corrosion</b>	<b>20</b>
<b>I.10. Conclusion</b>	<b>25</b>
<b>Chapitre II L'interaction Laser-matière</b>	
<b>II.1. Introduction</b>	<b>27</b>
<b>II.2. Historique des lasers</b>	<b>27</b>
<b>II.3. Physique des lasers</b>	<b>28</b>
<b>II.3.1. Interactions photon-électron</b>	<b>28</b>
<b>II.3.2. Composition et fonctionnement du Laser</b>	<b>30</b>
<b>II.3.3. Caractéristiques fondamentales du faisceau Laser</b>	<b>32</b>
<b>II.4. Paramètres de l'interaction Laser-matière</b>	<b>33</b>
<b>II.4.1. Paramètres fondamentaux</b>	<b>34</b>
<b>II.5. Effets de l'interaction Laser matière</b>	<b>40</b>
<b>II.5.1. Un effet thermique</b>	<b>40</b>
<b>II.5.2. Un effet photochimique</b>	<b>40</b>
<b>II.5.3. Un effet mécanique</b>	<b>41</b>
<b>II.6. Modes d'émission des Lasers</b>	<b>42</b>
<b>II.7. Principaux types de Lasers industriels</b>	<b>43</b>
<b>II.8. Modifications de microstructure avec apport de matière</b>	<b>44</b>
<b>II.8.1. Traitements thermiques avec apport de matière</b>	<b>44</b>
<b>II.8.2. Formations d'un composite superficiel</b>	<b>44</b>
<b>II.8.3. Formation d'un alliage superficiel</b>	<b>45</b>
<b>II.8.4. Formation d'un revêtement</b>	<b>45</b>
<b>II.9. Domaines d'application du Laser</b>	<b>46</b>
<b>II.10. Les défis futures des Lasers</b>	<b>48</b>
<b>II.11. Conclusion</b>	<b>49</b>
<b>Chapitre III Partie expérimentale</b>	
<b>III.1 Introduction</b>	<b>51</b>
<b>III.2 Objectif de l'étude</b>	<b>51</b>
<b>III.3 Matériaux utilisés</b>	<b>51</b>
<b>III.3.1 Nature des matériaux utilisés</b>	<b>51</b>

<b>III.3.2 Préparation des échantillons</b>	<b>52</b>
<b>III.3.3 Procédé de laser revêtement</b>	<b>55</b>
<b>III.4 Produits chimiques et préparation des solutions</b>	<b>56</b>
<b>III.4.1 Produits chimiques utilisé</b>	<b>56</b>
<b>III.4.2 Préparation des solutions</b>	<b>58</b>
<b>III.4.3 Conditions de conservation</b>	<b>60</b>
<b>III.4.4 Précautions de sécurité</b>	<b>60</b>
<b>III.5 Méthodes d'analyse</b>	<b>61</b>
<b>III.5.1 Méthode gravimétrique</b>	<b>61</b>
<b>III.5.1.1 Principe</b>	<b>61</b>
<b>III.5.1.2 Procédure expérimentale</b>	<b>61</b>
<b>III.5.1.3 Résultats expérimentaux et discussions</b>	<b>62</b>
<b>III.5.2 Méthode électrochimique</b>	<b>66</b>
<b>III.5.2.1 Principe</b>	<b>66</b>
<b>III.5.2.2 Dispositif expérimental</b>	<b>66</b>
<b>III.5.2.3 Résultat et discussion</b>	<b>68</b>
<b>Conclusion générale</b>	<b>74</b>
<b>Reference bibliographique</b>	<b>79</b>

## Liste des figures

N°	Titre des figures	Page
<b>Chapitre I</b> <b>Généralités sur la corrosion</b>		
<b>Figure I.1</b>	<b>La nature des paramètres de la corrosion</b>	<b>6</b>
<b>Figure I.2</b>	<b>La corrosion des matériaux métalliques en eau de mer</b>	<b>7</b>
<b>Figure I.3</b>	<b>Une cellule électrochimique</b>	<b>9</b>
<b>Figure I.4</b>	<b>Schéma des types courants de corrosion</b>	<b>10</b>
<b>Figure I.5</b>	<b>Corrosion uniforme</b>	<b>11</b>
<b>Figure I.6</b>	<b>Les types de corrosion par piqures</b>	<b>11</b>
<b>Figure I.7</b>	<b>Corrosion caverneuse localisé</b>	<b>12</b>
<b>Figure I.8</b>	<b>Corrosion inter-granulaire hors ZF</b>	<b>12</b>
<b>Figure I.9</b>	<b>Corrosion sous contrainte</b>	<b>13</b>
<b>Figure I.10</b>	<b>Corrosion galvanique d'un joint plomb/cuivre</b>	<b>13</b>
<b>Figure I.11</b>	<b>La corrosion filiforme</b>	<b>14</b>
<b>Figure I.12</b>	<b>Corrosion par érosion dans les systèmes d'eau</b>	<b>14</b>
<b>Figure I.13</b>	<b>Le processus de formation de la corrosion par frottement</b>	<b>15</b>
<b>Figure I.14</b>	<b>Exfoliation corrosion</b>	<b>15</b>
<b>Figure I.15</b>	<b>Fatigue corrosion</b>	<b>16</b>
<b>Figure I.16</b>	<b>Comparaison de la durabilité par rapport aux couts de matériaux</b>	<b>19</b>
<b>Figure I.17</b>	<b>Les moyens de protection contre la corrosion</b>	<b>20</b>
<b>Figure I.18</b>	<b>Principe de la protection anodique d'un métal passivables</b>	<b>21</b>
<b>Figure I.19</b>	<b>Principe de la protection cathodique</b>	<b>22</b>
<b>Figure I.20</b>	<b>Corrosion en présence de revêtements métalliques</b>	<b>25</b>
<b>Chapitre II</b> <b>L'interaction Laser-matière</b>		
<b>FigureII.1</b>	<b>Theodore Harold Maiman et son premier laser « laser rubis »</b>	<b>27</b>

<b>FigureII.2</b>	<b>Absorption des photons</b>	<b>28</b>
<b>FigureII.3</b>	<b>Emission spontanée</b>	<b>29</b>
<b>FigureII.4</b>	<b>Emission stimulée</b>	<b>29</b>
<b>FigureII.5</b>	<b>Schéma illustratif du Laser</b>	<b>30</b>
<b>FigureII.6</b>	<b>Système de pompage à 4 niveaux</b>	<b>31</b>
<b>FigureII.7</b>	<b>Schéma de principe de la cavité résonante</b>	<b>31</b>
<b>FigureII.8</b>	<b>Schéma de principe d'un laser</b>	<b>32</b>
<b>FigureII.9</b>	<b>Ce schéma indique que le faisceau Laser est directif</b>	<b>32</b>
<b>FigureII.10</b>	<b>Structure d'un système de revêtements Laser</b>	<b>33</b>
<b>FigureII.11</b>	<b>Schéma d'un système commun de traitement des matériaux par laser dans lequel chacun des 10 paramètres clés d'un système laser est indiqué par son numéro correspondant.</b>	<b>35</b>
<b>FigureII.12</b>	<b>Représentation visuelle de la relation entre l'énergie d'impulsion, le taux de répétition et la puissance moyenne des lasers pulsés.</b>	<b>36</b>
<b>FigureII.13</b>	<b>Les impulsions d'un laser pulsé sont séparées dans le temps par l'inverse du taux de répétition.</b>	<b>37</b>
<b>FigureII.14</b>	<b>Etapes de la photo-ablation</b>	<b>41</b>
<b>FigureII.15</b>	<b>Coefficient de réflexion en fonction de la longueur d'onde pour différents métaux sous incidence normale</b>	<b>42</b>
<b>FigureII.16</b>	<b>interaction laser-polymère dans le régime d'absorption linéaire</b>	<b>43</b>
<b>FigureII.17</b>	<b>Formation d'un composite superficiel</b>	<b>44</b>
<b>FigureII.18</b>	<b>Formation d'un alliage de surface à partir d'un pré-dépôt d'éléments d'addition</b>	<b>45</b>
<b>FigureII.19</b>	<b>Formation d'un revêtement de surface avec pré-dépôt d'un matériau d'apport.</b>	<b>46</b>
<b>Chapitre III</b>		
<b>Partie expérimentale</b>		
<b>FigureIII.1</b>	<b>Echantillon acier revêtu</b>	<b>51</b>
<b>FigureIII.2</b>	<b>Echantillon à base d'aluminium revêtu</b>	<b>52</b>
<b>Figure III.3</b>	<b>Echantillon à base de cuivre</b>	<b>52</b>
<b>Figure III.4</b>	<b>Machine de polissage</b>	<b>55</b>
<b>Figure III.5</b>	<b>Les échantillons au microscope</b>	<b>56</b>
<b>Figure III.6</b>	<b>Le chlorure de sodium</b>	<b>56</b>
<b>Figure III.7</b>	<b>L'acide sulfurique</b>	<b>57</b>
<b>Figure III.8</b>	<b>Les solutions préparées</b>	<b>60</b>

<b>Figure III.9</b>	<b>Les échantillons immergés dans la solution</b>	<b>61</b>
<b>Figure III.10</b>	<b>Courbe des vitesses de corrosion de l'échantillon Nu selon le milieu corrosif</b>	<b>62</b>
<b>Figure III.11</b>	<b>Courbe des vitesses de corrosion de l'échantillon acier revêtu selon le milieu corrosif</b>	<b>63</b>
<b>Figure III.12</b>	<b>Courbe des vitesses de corrosion de l'échantillon à base de cuivre selon le milieu corrosif</b>	<b>64</b>
<b>Figure III.13</b>	<b>Courbe des vitesses de corrosion de l'échantillon d'aluminium revêtu selon le milieu corrosif</b>	<b>65</b>
<b>Figure III.14</b>	<b>Chaine de corrosion.</b>	<b>66</b>
<b>Figure III.15</b>	<b>Schéma de la cellule électrochimique</b>	<b>67</b>
<b>Figure III.16</b>	<b>Enrobage des échantillons métalliques par une résine thermodurcissable pour les essais électrochimiques</b>	<b>68</b>
<b>Figure III.17</b>	<b>Courbes de Tafel des échantillons avec et sans revêtement</b>	<b>69</b>
<b>Figure III.18</b>	<b>Diagrammes d'impédance électrochimique (EIS) des échantillons avec et sans revêtement</b>	<b>70</b>
<b>Figure III.19</b>	<b>Courbes de Tafel selon le milieu corrosif pour l'échantillon revêtu</b>	<b>71</b>
<b>Figure III.20</b>	<b>Diagrammes d'impédance électrochimique (EIS) pour l'échantillon avec revêtement</b>	<b>72</b>

## Liste des tableaux

<b>N°</b>	<b>Titre des tableaux</b>	<b>Page</b>
<b>Chapitre II</b>		
<b>L'interaction Laser-matière</b>		
<b>Tableau II.1</b>	<b>Caractéristiques et applications des principaux lasers industriels (IR : infrarouge, UV : ultraviolet)</b>	<b>75</b>
<b>Chapitre III</b>		
<b>Partie expérimentale</b>		
<b>Tableau III.1</b>	<b>Composition et propriétés de L'acier C35</b>	<b>53</b>
<b>Tableau III.2</b>	<b>Composition chimique du superalliage à base de nickel</b>	<b>54</b>
<b>Tableau III.3</b>	<b>Caractéristiques de l'installation laser</b>	<b>55</b>
<b>Tableau III.4</b>	<b>Les propriétés du chlorure de sodium</b>	<b>57</b>
<b>Tableau III.5</b>	<b>Les propriétés de l'acide sulfurique</b>	<b>58</b>
<b>Tableau III.6</b>	<b>Vitesses de corrosion selon le milieu corrosif de l'échantillon Nu.</b>	<b>62</b>
<b>Tableau III.7</b>	<b>Vitesses de corrosion selon le milieu corrosif de l'échantillon acier revêtu.</b>	<b>63</b>
<b>Tableau III.8</b>	<b>Vitesses de corrosion selon le milieu corrosif de l'échantillon à base de cuivre.</b>	<b>64</b>
<b>Tableau III.9</b>	<b>Vitesses de corrosion selon le milieu corrosif de l'échantillon d'aluminium revêtu.</b>	<b>65</b>
<b>Tableau III.10</b>	<b>Paramètres de polarisation potentiodynamique pour les échantillons revêtus et non revêtus</b>	<b>68</b>
<b>Tableau III.11</b>	<b>Paramètres électrochimiques déterminés à partir des courbes de Nyquist pour des échantillons avec et sans revêtement</b>	<b>69</b>
<b>Tableau III.12</b>	<b>Paramètres de polarisation potentiodynamique pour l'échantillon revêtu</b>	<b>71</b>
<b>Tableau III.13</b>	<b>Paramètres électrochimiques déterminés à partir des courbes de Nyquist pour l'échantillon revêtu</b>	<b>72</b>

## Liste des abréviations

Symboles	Définition	Unité (SI)
<b>P.T.A</b>	Plasma Transferred Arc	-
<b>S.C.C</b>	Corrosion sous contrainte	-
<b>Z.F</b>	Zone fondue	-
<b>C.P.G</b>	Gestion des coûts globaux de possession (CPG)	-
<b>L.A.S.E.R</b>	Light Amplification by Stimulated Emission Radiation	-
<b>C.W</b>	Continuous wave	-
<b>F.W.H.M</b>	Full width at half-maximum	-
<b>L.I.D.A.R</b>	Light Detection And Ranging	-
<b>L.P.V.D</b>	Low Pressure Vapor Deposition	-
<b>C.D</b>	Compact Disc	-
<b>D.V.D</b>	Digital Versatile Disc	-
<b>E.O.C.M</b>	Electro-Optical Counter-Measures	-
<b>EIS</b>	Electrochemical Impedance Spectroscopy	$\Omega \cdot \text{cm}^2$
<b>T</b>	Température	[°C]
<b>E</b>	Potentiel de corrosion	Volt [V]
<b>N</b>	Fréquence du rayonnement	Hertz (Hz)
<b><math>\Lambda</math></b>	longueur d'onde	nm ou $\mu\text{m}$
<b>H</b>	Constante de Planck	J·s
<b><math>\Delta T</math></b>	Différence de température	[°C]

## *Introduction générale*

### Introduction Générale

Dans les environnements industriels sévères, tels que ceux rencontrés dans les secteurs pétrolier, gazier, chimique et énergétique, les matériaux métalliques sont exposés à des conditions de fonctionnement extrêmes. Parmi les facteurs de dégradation les plus critiques figure la corrosion induite par le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), également désignée sous le terme de "sweet corrosion". Cette forme de corrosion, bien que moins agressive que celle provoquée par des milieux acides ou contenant du soufre, peut néanmoins entraîner une détérioration accélérée des aciers au carbone, notamment à haute température et sous pression, conditions typiques des installations de transport ou de traitement du gaz naturel.

Face à cette problématique, les approches classiques de protection telles que les traitements de surface conventionnels (galvanisation, peinture, projection thermique) ou les barrières chimiques atteignent rapidement leurs limites en termes de durabilité, d'adhérence ou de comportement à long terme dans des environnements corrosifs complexes. Dans ce contexte, l'ingénierie des surfaces se tourne vers des solutions plus avancées permettant de renforcer la résistance des matériaux tout en prolongeant leur durée de vie sans compromettre les performances mécaniques.

Parmi ces solutions, le rechargement laser (ou laser cladding) émerge comme une technologie de choix. Ce procédé consiste à déposer, à l'aide d'un faisceau laser de haute puissance, une fine couche de matériau d'apport sur un substrat métallique, en générant une fusion localisée et un métallurgiquement fort lien entre les deux. Cette technique présente plusieurs avantages déterminants : faible dilution, porosité réduite, microstructure fine, déformations thermiques minimales, et excellent contrôle du procédé. Elle permet de réaliser des revêtements fonctionnels durables, même sur des géométries complexes ou en fin de chaîne de production.

Par ailleurs, le choix du matériau d'apport est un facteur clé pour assurer l'efficacité du revêtement dans un environnement riche en  $\text{CO}_2$ . Les alliages à base de nickel se distinguent par leur résistance exceptionnelle à la corrosion, leur stabilité thermique et leur aptitude au traitement laser. Ces alliages forment des couches passives stables et

## **Introduction générale**

---

peuvent intégrer des éléments tels que le chrome, le molybdène ou le fer pour renforcer leur comportement en milieu acide ou CO<sub>2</sub>-saturé.

La présente étude vise donc à explorer la faisabilité et l'efficacité du rechargement laser à base de nickel pour la protection de substrats métalliques soumis à la corrosion par CO<sub>2</sub>. Elle s'articule autour de plusieurs objectifs :

- évaluer la qualité métallurgique des dépôts réalisés (microstructure, porosité, adhérence),
- caractériser leur résistance à la corrosion dans des conditions simulant un environnement CO<sub>2</sub>,
- identifier les paramètres de procédé influençant les performances obtenues,
- proposer des pistes d'optimisation pour des applications industrielles concrètes.

Cette démarche s'inscrit dans une perspective à la fois technologique et environnementale, en visant la réduction des coûts de maintenance, l'augmentation de la durée de vie des équipements, et une meilleure durabilité globale des installations exposées.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur la corrosion**

## **I.1. Introduction**

En 2024, la corrosion continue d'affecter une part importante de la production mondiale d'acier. Entre 25 et 33 % de l'acier produit chaque année est perdu à cause de la corrosion, soit environ 450 à 600 millions de tonnes, en fonction des prévisions de production mondiale qui dépassent 1,8 milliard de tonnes cette année. Ce chiffre est nettement supérieur aux estimations précédentes de 150 millions de tonnes, reflétant une augmentation constante de la production d'acier dans le monde.

De plus, la production d'acier, en particulier en raison du remplacement de l'acier corrodé, contribue de manière significative aux émissions de CO<sub>2</sub>, représentant entre 1,6 % et 3,4 % des émissions globales [1].

La corrosion ne touche pas uniquement l'acier, mais affecte également tous les types de métaux, les polymères et les céramiques. Elle se produit à cause d'interactions chimiques et/ou physiques entre un matériau et son environnement, entraînant sa dégradation progressive.

Voici quelques exemples de phénomènes de corrosion :

- La formation de rouille sur l'acier,
- La fissuration du laiton en présence d'ammoniaque
- L'oxydation des contacts électriques en cuivre,
- La corrosion à chaud des superalliages dans les turbines à gaz
- La dégradation du PVC par les rayons ultraviolets

Les métaux possèdent des propriétés intéressantes telles que la ductilité, la résistance mécanique et thermique, ainsi qu'une bonne conductivité. Les métaux jouent un rôle crucial dans la production de machines, d'instruments de précision, de moyens de transport, de centrales électriques et de composants électroniques en raison de leurs qualités.

Néanmoins, la résistance à la corrosion et à l'usure est la principale condition de durabilité des objets métalliques.

D'un point de vue thermodynamique, les métaux ne sont pas stables en contact avec l'air et l'eau, à quelques exceptions près. Cependant, en raison de la faible vitesse des réactions de corrosion et de la mise en place de mesures de protection adéquates (comme les traitements de surface et la protection électrochimique), les métaux peuvent être utilisés tout au long de la durée de vie prévue des applications techniques [2].

### **I.2. Définition**

Le terme « corrosion », qui provient du mot latin « corrodere » qui signifie « ronger », désigne la détérioration des matériaux en raison de leurs interactions avec l'environnement. Le fer présent dans l'acier est particulièrement touché par ce phénomène, ce qui entraîne une diminution de ses caractéristiques mécaniques essentielles comme la dureté et la résistance.

Le sous-produit le plus fréquent de la corrosion est l'oxyde de fer, également connu sous le nom de rouille. Il découle de l'oxydation du métal, notamment par l'incorporation d'oxygène, et entraîne une diminution graduelle de la masse métallique [3].

### **I.3. L'origine de la corrosion**

La corrosion est causée par de nombreuses causes complexes, qui découlent d'interactions chimiques et/ou physiques entre le matériau et son environnement. Les divers facteurs qui contribuent à la corrosion d'un matériau incluent :

- Structure et composition chimique du métal,
- Composition chimique de l'environnement,
- Conditions physiques telles que la température, l'irradiation, etc.
- Contraintes mécaniques (pressions, chocs, frottement, etc.).

Ainsi, il est possible d'affirmer que les processus de corrosion varient en fonction du matériau et de l'environnement (Fig. I.1) [4].

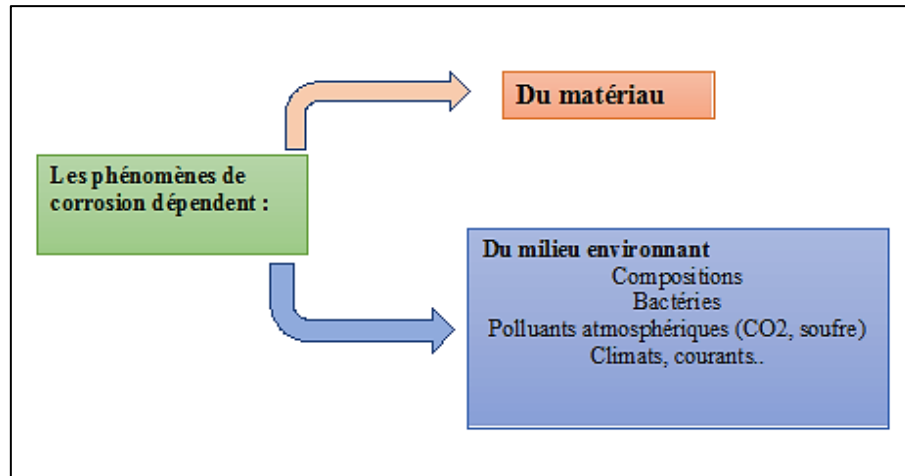


Figure I.1: La nature des paramètres de la corrosion. [5]

#### I.4. Les différents processus de corrosion

On peut classer les principaux processus de corrosion en plusieurs catégories [6]:

##### I.4.1. Corrosion chimique (sèche)

La corrosion de ce genre est due à une réaction directe entre un métal et un gaz (généralement de l'oxygène) sans l'intervention d'un électrolyte. En général, elle se produit à une température élevée et entraîne une oxydoréduction où les électrons sont échangés directement sans l'utilisation d'un courant électrique.

La réaction qui se produit est de la forme :



### I.4.2. Corrosion biochimique

Cette corrosion est causée par des bactéries, surtout dans les canalisations enterrées, d'une part par la production de substances corrosives comme le CO<sub>2</sub> ou l'H<sub>2</sub>S, d'autre part par la réduction des sulfates par les bactéries, ce qui entraîne une attaque du métal.

### I.4.3 Corrosion par érosion et cavitation

Ce phénomène survient lorsque le film protecteur formé à la surface du métal est éliminé par abrasion ou érosion, accélérant ainsi la corrosion. La cavitation, quant à elle, se produit en présence de bulles de vapeur dans un liquide, causant des micro-dommages à la surface du métal.

### I.4.4 Corrosion électrochimique (humide)

Le processus le plus courant de corrosion, il implique la formation d'une pile électrochimique entre des zones anodiques et cathodiques sur un métal immergé dans un électrolyte. Les anodes sont attaquées en raison de la dissymétrie de composition ou de la présence d'impuretés dans le métal. Pour une corrosion électrochimique on a :

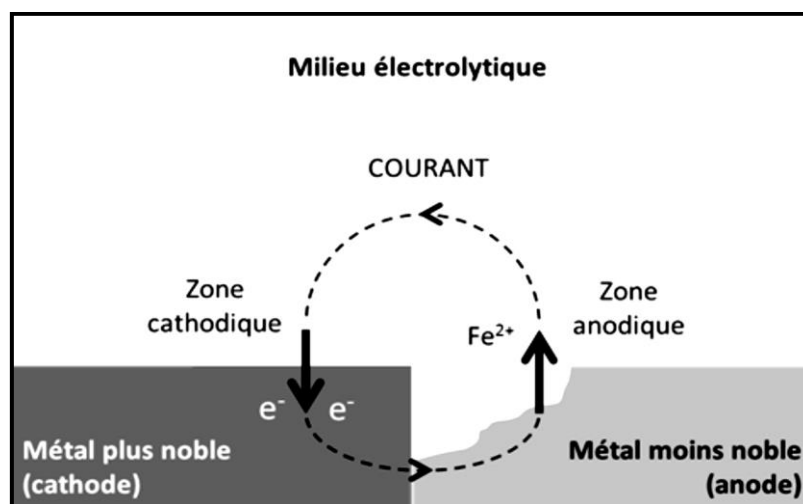


Figure I.2 : La corrosion des matériaux métalliques en eau de mer corrosion galvanique [7].

**I.5. Le mécanisme de corrosion**

La corrosion se produit par la formation d'une cellule électrochimique/corrosion (Figure I.3).

Cette cellule électrochimique particulière se compose de cinq parties :

- a) zones anodiques,
- b) zones cathodiques,
- c) contact électrique entre ces zones,
- d) un électrolyte,
- e) un réactif cathodique.

À l'intérieur de cette cellule électrochimique, les électrons passent des sites anodiques aux sites cathodiques. Les particules chargées, les ions, se déplacent à travers la solution conductrice pour équilibrer le flux d'électrons. Les anions (provenant des réactions cathodiques) se déplacent vers l'anode et les cations (provenant de l'anode elle-même) dérivent vers la cathode. En conséquence, l'anode se corrode et la cathode ne se corrode pas. Il existe également une différence de tension/potentiel entre l'anode et la cathode. De nombreuses microcellules discrètes se développent sur les surfaces métalliques en raison de la différence de phase constitutionnelle due aux variations de contrainte, aux revêtements et aux niveaux d'imperfection (comme les dislocations, les frontières de grains, les sites de pliage) ou en raison des modifications de conductivité ionique ou des changements de composition dans la solution conductrice. Le processus de corrosion est une oxydation chimiquement spontanée du métal en réaction avec le réactif cathodique. Chaque réaction de cellule similaire résulte d'une paire de réactions anodiques et cathodiques simultanées se produisant à des taux identiques sur la surface du métal.

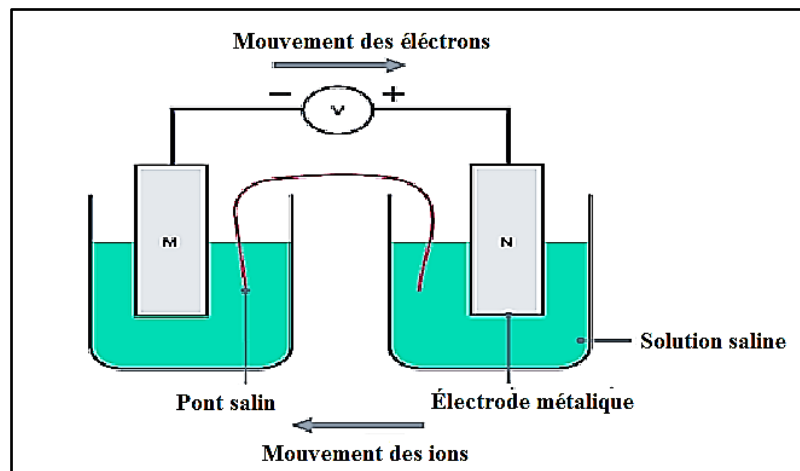
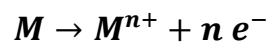


Figure I.3 : Une cellule électrochimique [8].

### I.5.1. Réaction anodique

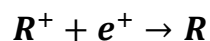
À l'anode, le métal est corrodé. À l'interface solide-liquide, la réaction anodique est l'oxydation du métal en sa forme ionique en présence d'une différence de charge électrique. En général, la réaction anodique est une ionisation du métal, qui passe dans une solution conductrice :



Où 'n' est la valence métallique, e est l'électron, M est le métal et  $M^{+n}$  est son ion métallique.

### I.5.2. Réactions Cathodiques

La réaction cathodique implique l'environnement et peut être représentée par la réaction suivante :



Où  $R$  est l'ion positif présent dans l'électrolyte,  $e$  est l'électron métallique et  $R^0$  est l'espèce réduite. Selon l'environnement, de nombreuses réactions cathodiques et réactions consommant des électrons sont possibles [9].

## I.6. Les différents types de la corrosion

La corrosion se divise en plusieurs catégories selon le matériau, l'environnement et la forme des dommages. Les matériaux soumis à la corrosion incluent les plastiques, les métaux, le caoutchouc, et des composites comme le bois et le béton. Les principales formes sont [10] :

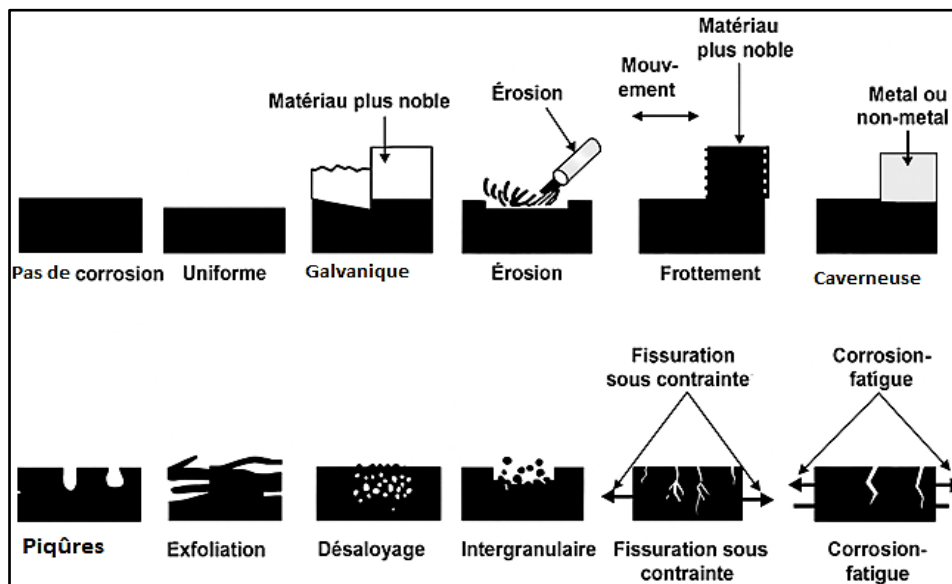


Figure I.4: Schéma des types courants de corrosion [11].

### I.6.1. Corrosion uniforme

La corrosion uniforme touche une grande surface métallique, entraînant une réduction égale de l'épaisseur. L'anode et la cathode changent de place, provoquant une corrosion répartie uniformément.



Figure I.5: Corrosion uniforme [12].

### I.6.2. Corrosion par piqûres

La corrosion par piqûres est difficile à prévoir et très destructrice. Elle forme de petites cavités localisées qui s'approfondissent verticalement et peut être causée par un dommage au film protecteur ou des irrégularités métalliques. Elle entraîne souvent une défaillance structurelle sans grande perte de métal.

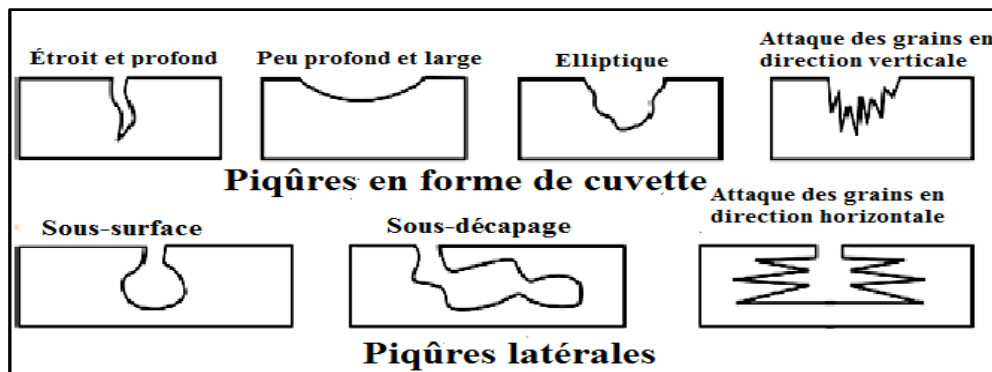
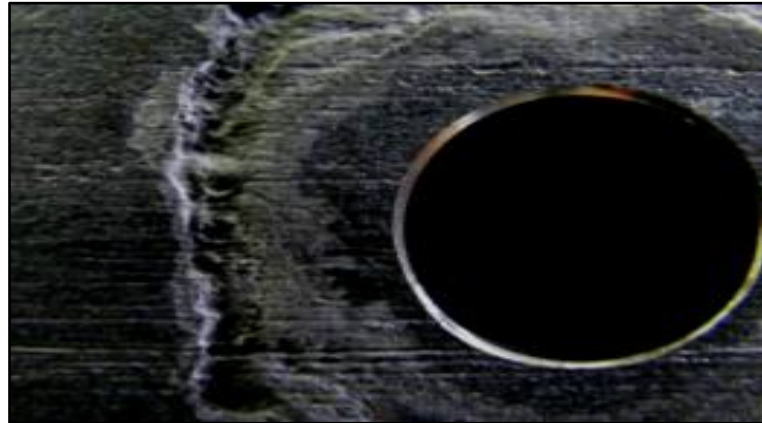


Figure I.6: Les types de corrosion par piqûres [13].

### I.6.3. Corrosion caverneuse

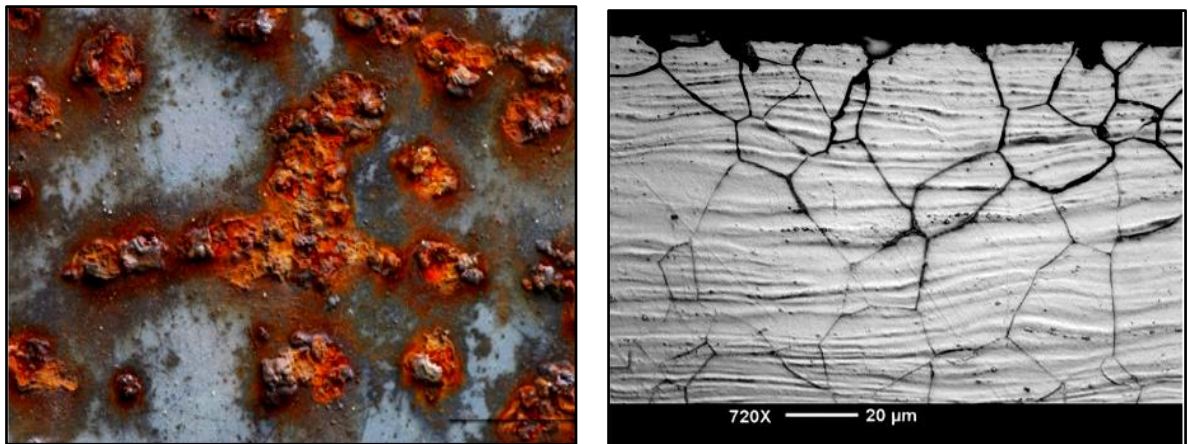
Cette corrosion survient dans des zones confinées, avec peu d'oxygène, entraînant un déséquilibre chimique qui accélère la corrosion. Elle se développe souvent à basse température et peut être réduite par un bon design des joints.



**Figure I.7:** corrosion caverneuse localisé [14].

#### I.6.4. Corrosion intergranulaire

Elle se produit aux limites des grains métalliques en raison d'impuretés ou de déséquilibres d'éléments d'alliage, comme la précipitation de carbures dans les aciers inoxydables, ce qui affaiblit le métal.



**Figure I.8:** Corrosion inter-granulaire hors ZF [15].

#### I.6.5. Corrosion sous contrainte (SCC)

Elle résulte d'une combinaison de contraintes mécaniques et d'un environnement corrosif, causant des fissures invisibles. Choisir des matériaux appropriés aide à prévenir ces fissures.

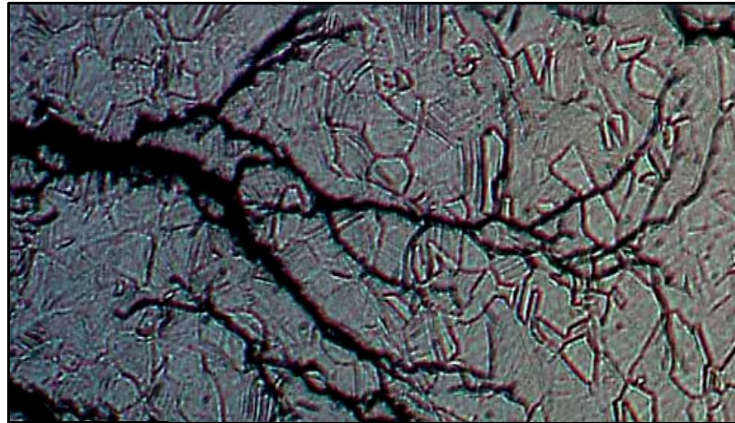


Figure I.9: Corrosion sous contrainte [16].

### I.6.6. Corrosion galvanique

Elle se produit lorsque deux métaux différents sont en contact électrique dans un environnement électrolytique. Des choix judicieux de matériaux proches dans la série galvanique réduisent ce risque [14].

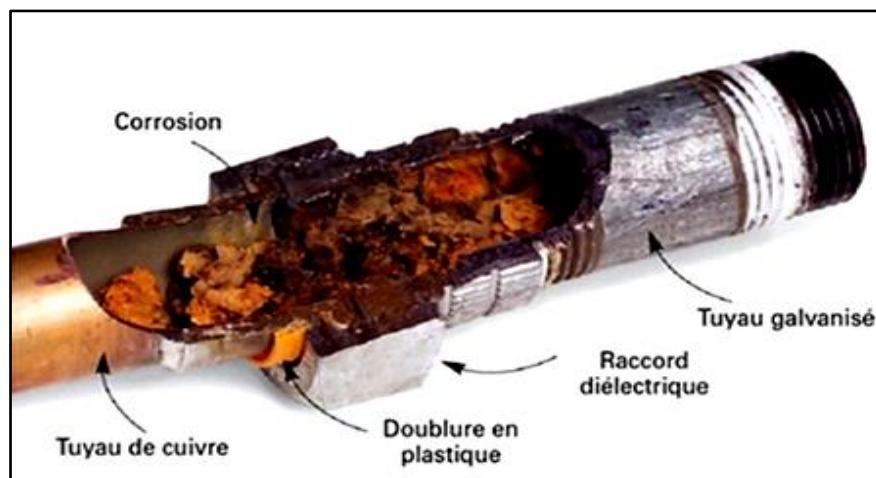
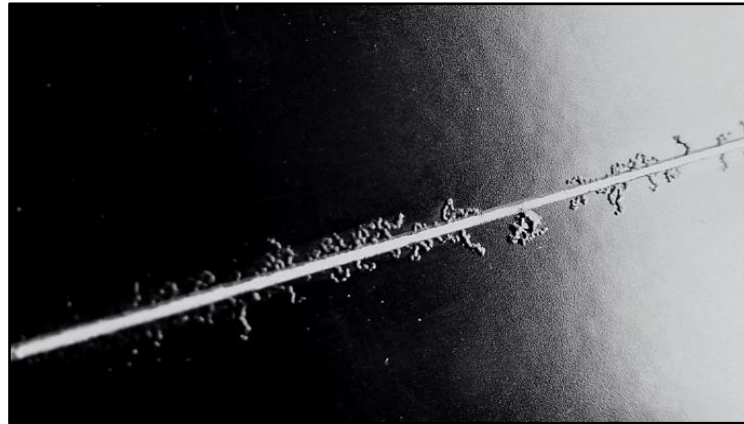


Figure I.10 : Corrosion galvanique d'un joint plomb/cuivre [17].

### I.6.7. Corrosion filiforme

Ce type de corrosion peut être observé sur l'acier, l'aluminium, les structures d'avions en milieu humide, les brides, les canettes, les joints et les zones de soudure. Des lignes irrégulières, parfois des filaments de corrosion, apparaissent sous la peinture, le vernis, le caoutchouc, l'argent, l'étain, l'émail et le papier.

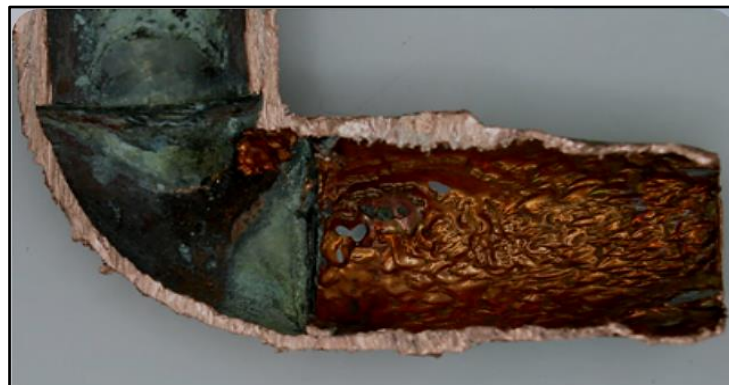
Bien que la perte de matériau soit minimale, la surface se détériore. Le cuivre, l'acier inoxydable et les alliages de titane sont résistants à ce type de corrosion.



**Figure I.11** : La corrosion filiforme [18].

#### **I.6.8. Corrosion par érosion**

L'électrolyte rapide et la turbulence causent l'érosion du métal, souvent dans les zones restreintes. Réduire la turbulence, baisser la vitesse et utiliser des matériaux résistants à la corrosion aident à limiter ce phénomène.



**Figure I.12** : Corrosion par érosion dans les systèmes d'eau [19].

#### **I.6.9. Corrosion par contact**

Un léger glissement entre deux surfaces provoque la corrosion. Cela survient en cas de vibrations ou de fluctuations de pression. L'inspection régulière et la lubrification préventive sont des solutions.

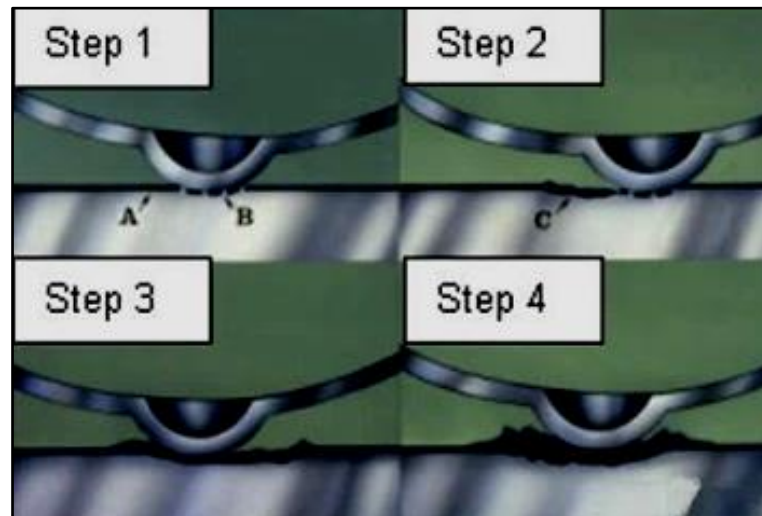


Figure I.13 : Le processus de formation de la corrosion par frottement [20].

### I.6.10. Exfoliation

Les produits de corrosion détachent des couches de métal aux limites des grains. Les alliages d'aluminium sont les plus touchés. Utiliser des revêtements et des traitements thermiques aide à prévenir ce type de corrosion.

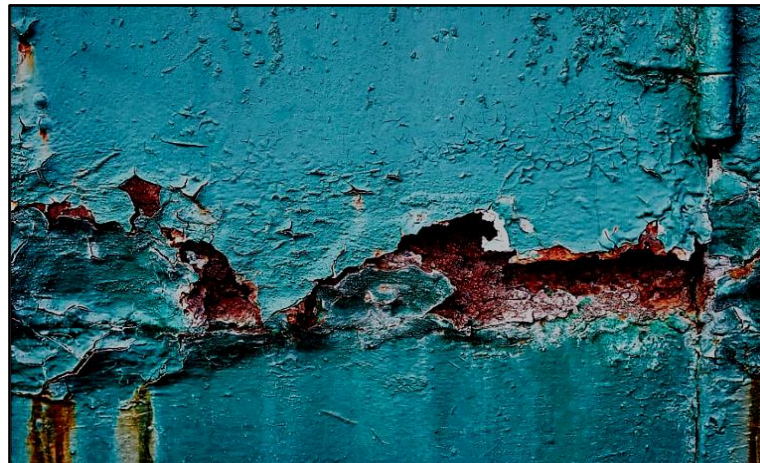


Figure I.14: Exfoliation Corrosion [21].

### I.6.11. Fatigue corrosion

La fatigue par corrosion survient lorsque la corrosion et les contraintes cycliques agissent ensemble, provoquant des fissures.

Les contraintes fluctuantes sous la limite de traction en sont souvent la cause. Cela peut être évité avec des alliages d'haute performance et des revêtements pour retarder l'apparition des fissures.



**Figure I.15 :** Fatigue –corrosion [22].

## **I.7 Facteurs de la corrosion**

### **I.7.1. Effet de la température**

La température a un impact essentiel sur la rapidité de la corrosion. La hausse de la température favorise généralement les réactions chimiques et électrochimiques à la surface des matériaux, ce qui entraîne une augmentation du taux de corrosion.

L'augmentation de la température a pour effets principaux :

- Une mobilité accrue des ions dans les électrolytes.
- Une accélération des réactions d'oxydation et de réduction.
- La formation plus rapide de produits corrosifs (rouille sur l'acier).

Toutefois, dans certaines situations, une température extrêmement élevée peut provoquer la création d'une couche d'oxydes protectrice qui ralentit la corrosion (par exemple : passivation de certains métaux tels que l'aluminium).

### **I.7.2. L'humidité**

L'humidité joue un rôle crucial dans les milieux où la corrosion se manifeste. Le risque de corrosion augmente avec l'humidité, car elle favorise la formation de films d'eau sur les surfaces métalliques, qui servent d'électrolyte pour les réactions électrochimiques.

Quelques éléments essentiels :

- Dans les milieux humides, l'existence de films d'eau encourage la corrosion homogène ou la corrosion par plaques.
- Les niveaux élevés d'humidité, en particulier lorsqu'ils dépassent 60 %, accroissent considérablement le risque de corrosion dans l'air.
- Une faible quantité d'humidité peut diminuer la corrosion, mais même de faibles niveaux d'humidité peuvent déclencher des processus corrosifs en présence de substances polluantes.

### **I.7.3. La salinité**

La corrosion est accélérée par la salinité, ou la présence de sels dans l'environnement, notamment en milieu marin ou dans des atmosphères contaminées par des chlorures. Les substances dissoutes, telles que le chlorure de sodium (NaCl), encouragent la conductivité de l'eau et accroissent la diffusion des ions corrosifs. Effectifs majeurs :

- Les couches passives des métaux sont attrapées par les ions chlorure, ce qui entraîne la corrosion par piqûres.
- Les environnements salins peuvent entraîner une augmentation de la corrosion galvanique en raison du contact entre des métaux similaires.
- En présence d'eau de mer ou de brouillard salin, la corrosion se produit plus rapidement en raison de la forte concentration de chlorures.

### **I.7.4. L'acidité**

La vitesse de la corrosion est directement influencée par le pH d'un environnement : une acidité plus élevée (pH bas) favorise la corrosion, étant donné que les ions hydrogène (H<sup>+</sup>) accélèrent les réactions électrochimiques. Points clés :

- En milieu acide, les matériaux réagissent plus rapidement en se dissolvant ou en formant des oxydes solubles.

- Des environnements acides sont souvent liés à une corrosion sévère des métaux tels que l'acier, l'aluminium et le zinc.
- Les solutions fortement acides favorisent la corrosion uniforme, tandis que les solutions modérément acides peuvent entraîner des formes localisées, comme la corrosion par piqûres ou par fissures [23] [24].

## **I.8. Conséquences de la corrosion**

### **I.8.1. Impact sur la résistance et la longévité des matériaux**

La résistance à la corrosion est un facteur crucial dans les applications industrielles et constitue une préoccupation pour de nombreuses industries. La corrosion est un processus naturel qui provoque la détérioration progressive des matériaux en raison de réactions chimiques avec l'environnement. Cela peut entraîner des dommages structurels, une durée de vie réduite des équipements, voire des pannes catastrophiques. Par conséquent, le développement de matériaux à haute résistance à la corrosion est essentiel pour la longévité des équipements et infrastructures industrielles [25].

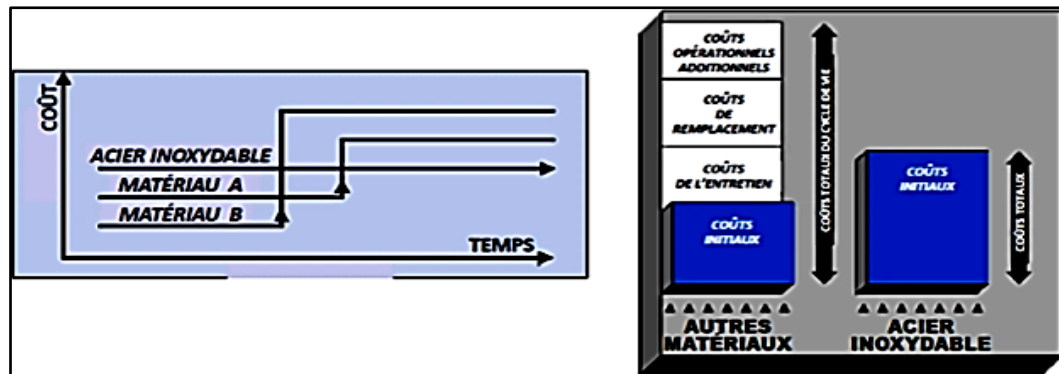
### **I.8.2. Impact à long terme et durabilité**

L'impact de la corrosion dépasse largement les dépenses immédiates de réparation et de remplacement des matériaux. Il implique des coûts directs et indirects qui influencent de manière significative l'économie globale et les stratégies d'investissement à long terme.

De plus, la corrosion favorise la contamination de l'environnement par des métaux et d'autres substances toxiques.

Les stratégies de mitigation sont nécessaires pour répondre à ces enjeux et minimiser l'impact économique et environnemental de la corrosion.

Pour reprendre la gestion des coûts globaux de possession (CPG), l'acier inoxydable peut être relativement intéressant puisque les coûts restent constants durant la vie tandis que pour d'autres, ce sont les traitements anti corrosion qui impactent le long terme. Il est donc important de ne pas oublier les coûts futurs de l'équipement [27].



**Figure I .16:** Comparaison de la durabilité par rapport aux coûts de matériaux (Source B. Normand, 2004) [28].

### I.9.Moyens de protection contre la corrosion

Les moyens de protection contre la corrosion consistent en un ensemble de stratégies pour limiter, ralentir ou éliminer les effets corrosifs sur les matériaux, principalement les métaux. Ces méthodes sont choisies en fonction des conditions environnementales, du type de matériau à protéger, et de l'application [29].

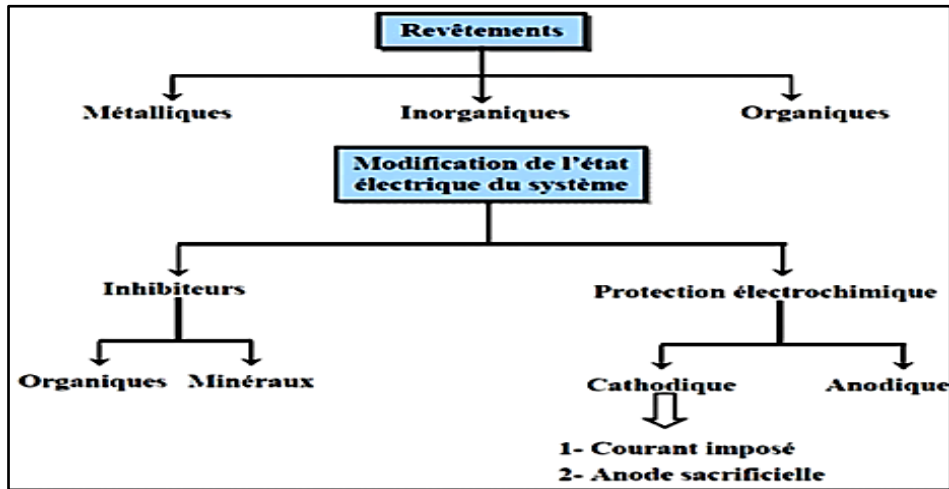


Figure I.17 : Les moyens de protection contre la corrosion [30].

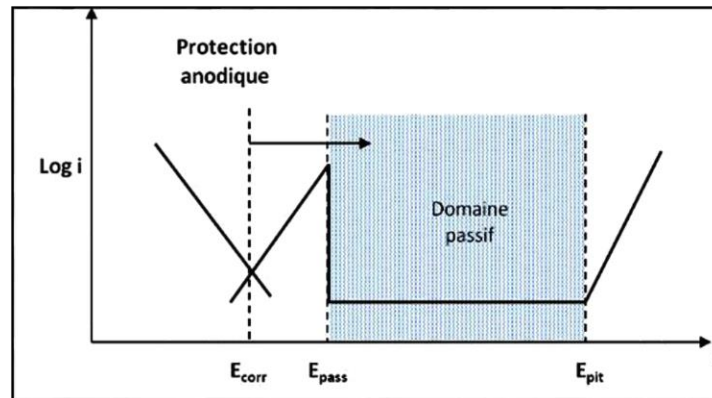
### I.9.1. Méthodes de protection contre la corrosion

#### A. Protection anodique et cathodique

Ces deux types de protection impliquent la modification du potentiel du métal. Dans ces méthodes, le potentiel du métal à protéger est décalé, par application d'un à partir d'une source d'énergie.

##### ➤ La protection anodique

On l'utilise uniquement pour les métaux passivables dont le potentiel de corrosion est dans le domaine actif ( $E_{corr} < E_p$ ). Le potentiel est déplacé dans le domaine passif grâce à une polarisation anodique. La consommation de courant requise pour maintenir le métal à l'état passif est extrêmement faible (égale à  $i$  passif). La protection anodique ne requiert que peu de courant pour être maintenue. En revanche, la densité de courant appliquée est considérablement plus élevée car elle doit dépasser celle de passivation.



**Figure I.18** : Principe de la protection anodique d'un métal passivable  
(Déplacement du potentiel) [31].

$E_{pass}$ : Potentiel de passivation;

$E_{pit}$ : Potentiel de dépassivation ou dépiqûration

Dans le domaine passif correspondant à:  $E_{pass} < E < E_{pit}$

### ➤ Protection électrochimique (cathodique)

La protection cathodique est une méthode qui a pour objectif de diminuer la vitesse de corrosion d'un matériau métallique en présence d'un milieu aqueux, en réduisant le potentiel de corrosion du métal (d'où le terme protection cathodique). On place alors l'ouvrage métallique à protéger à un potentiel où la vitesse de corrosion devient acceptable sur toute la surface du métal en contact avec l'environnement aqueux. Ainsi, un courant électrique est émis entre une anode auxiliaire et le matériau à protéger, qui est la cathode. Il est donc ajusté de manière à ce que ce courant circule du milieu vers le métal, afin d'atteindre une valeur de potentiel telle que la vitesse de corrosion du métal devienne très basse. Cette sécurité concerne toute structure métallique qui entre en contact avec un milieu aqueux, tels que les constructions en acier au carbone enterrées ou immergées, les surfaces internes de capacités métalliques contenant un électrolyte, ainsi que les armatures en béton.

Il est fréquent d'associer cette protection à des méthodes de prévention de la corrosion comme les revêtements (peintures, polymères...).

Deux options sont généralement employées :

- La protection cathodique par courant imposé implique l'utilisation d'un générateur externe au système métal/solution qui générera un courant continu. Dans la solution, ce courant "sortira" d'une pièce anodique appelée déversoir afin de pénétrer dans le métal à protéger et de le rendre fonctionnel.
- La protection cathodique est assurée par l'utilisation d'une anode sacrificielle ou d'une anode galvanique, où le métal est connecté électriquement à un autre métal moins noble que lui, c'est-à-dire dont le potentiel dans la solution est plus faible. Ce métal de moins grande valeur.

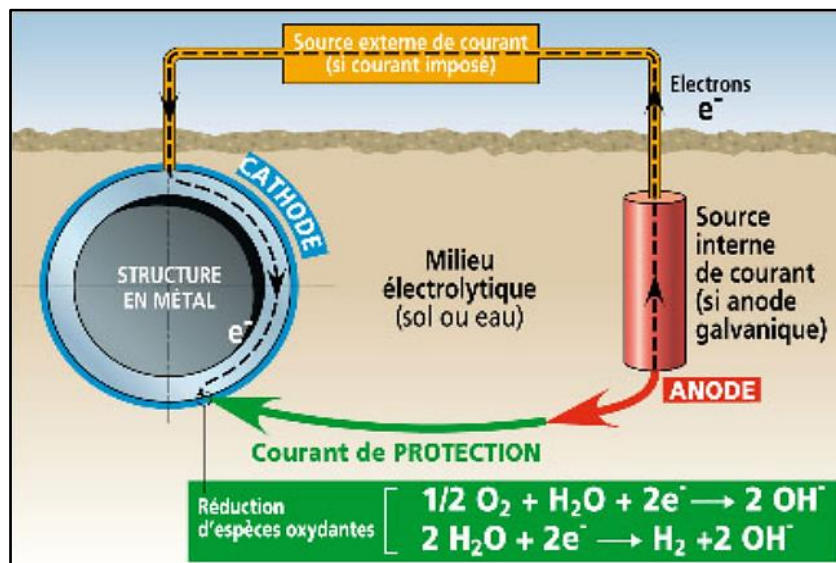


Fig. I.19 : Principe de la protection cathodique [32].

### B. Protection par inhibiteurs :

Il s'agit de substances qui, ajoutées en très petite quantité dans le milieu corrosif diminuent son agressivité vis-à-vis du métal. Il est possible de distinguer :

#### ➤ Inhibiteurs d'adsorption

Il s'agit d'inhibiteurs filmant qui s'adsorbent à la surface pour donner un film protecteur. Ces sont des substances organiques du type monoamines ou polyamines.

➤ **Poisons contrôlant le dégagement cathodique**

Certaines substances tels les ions arsenic, bismuth et antimoine retardent le dégagement d'hydrogène et peuvent dans certains cas être utiles pour inhiber la corrosion.

➤ **Suppresseurs d'oxygène**

Ils enlèvent l'oxygène dissous contenu dans les solutions (sulfite de sodium, hydrazine)

➤ **Inhibiteurs oxydants**

Il s'agit des chromates, des nitrites, des sels ferriques, etc. Ces substances élèvent le potentiel de corrosion dans la zone de passivation. Les phosphates nécessitent de l'oxygène dissous pour avoir une action efficace.

### **C. Protection par revêtement barrière**

Les revêtements barrière sont conçus pour protéger les matériaux sous-jacents de l'humidité, des graisses et d'autres contaminants. Par exemple, certains revêtements époxy tolérants à l'humidité peuvent offrir une protection anticorrosion sur des surfaces exposées à des substances comme l'eau et le pétrole. Grâce à leur grande élasticité, ces revêtements peuvent également tolérer les mouvements et les fissures du support sans se détériorer.

➤ **Revêtements inorganiques non métalliques**

Les revêtements inorganiques non métalliques sont utilisés comme une barrière physique pour protéger les matériaux contre la corrosion. Contrairement aux revêtements métalliques, ils ne participent pas à la protection cathodique, mais offrent une couche imperméable qui empêche les agents corrosifs, comme l'eau et les ions, de pénétrer jusqu'au substrat. Ils sont largement utilisés dans des environnements industriels, marins et chimiques en raison de leur résistance élevée aux températures et aux produits chimiques.

- **Types de revêtements inorganiques non métalliques**

Céramiques : Connues pour leur haute résistance à la chaleur et aux produits chimiques. Elles sont souvent utilisées dans les applications à haute température.

Verre : Offre une surface dure et résistante à l'abrasion, bien que fragile.

Revêtements à base de silicates : Utilisés pour des barrières imperméables à l'humidité et aux gaz.

Oxydes métalliques : Ces revêtements (comme l'oxyde de titane ou d'aluminium) créent une couche résistante à la corrosion sans être métalliques.

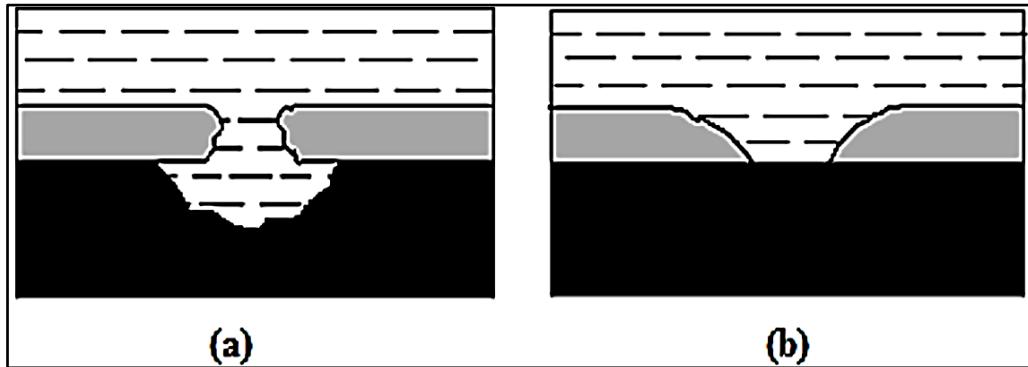
- **Protection par revêtements métalliques**

Les revêtements métalliques sont couramment employés pour protéger l'acier contre la corrosion atmosphérique. Selon leur comportement à la corrosion par rapport à substrat, on distingue deux types de revêtements métalliques :

- Ceux plus nobles que le substrat cathodique.
- Ceux moins nobles que le substrat anodique.

Le chrome, le nickel ou le cuivre forment des revêtements plus nobles qu'un substrat en acier, contrairement au zinc, au cadmium ou l'aluminium. Dans les deux cas, la couche forme une barrière entre le métal de base et le milieu corrosif. Par contre, la différence se remarque à partir des pores par exemple. Un revêtement plus noble corrode localement le substrat qui joue le rôle d'anode. Les revêtements plus nobles que le substrat donc ne contiennent aucun défaut.

En revanche, lorsque le dépôt est moins noble que le substrat, le phénomène s'inverse. Le dépôt joue le rôle de l'anode et se détériore, alors que le substrat cathode, reste protégé. En plus, il faut noter que la durée de vie du revêtement est proportionnelle à son épaisseur.



**Figure I.20** : Corrosion en présence de revêtements métalliques plus nobles (a) , et moins nobles (b) que le substrat [33]

### ➤ Protection par revêtements organiques

Ils forment une barrière plus ou moins imperméable entre le substrat métallique et le milieu, et on les classe en trois familles :

- Revêtements en bitumes,
- Revêtements polymériques,
- Peintures et vernis. [34][35][36]

### I.10 Conclusion

En conclusion, la corrosion est un phénomène complexe influencé par divers facteurs environnementaux et matériels. La compréhension des différents types de corrosion, tels que la corrosion uniforme et galvanique, est essentielle pour élaborer des stratégies de prévention efficaces. Ce chapitre a souligné l'importance d'une approche proactive pour minimiser l'impact de la corrosion, ouvrant ainsi la voie à des recherches futures sur les techniques de protection [37].

## **Chapitre II**

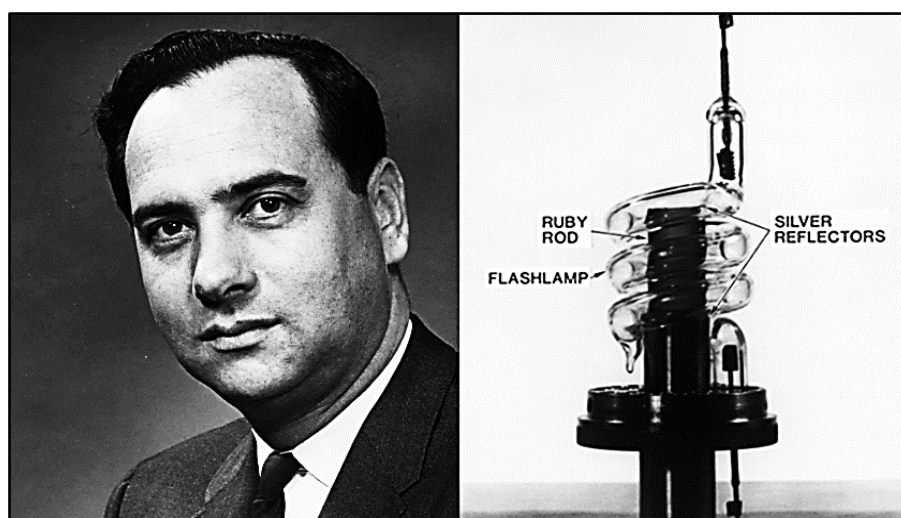
# **L'interaction laser – matière**

## II.1 Introduction

Le mot Laser est un acronyme qui signifie (*Light Amplification by Stimulated Emission Radiation*), c'est-à-dire l'amplification de la lumière par émission stimulée du rayonnement. Ce sont des oscillateurs optiques basés sur l'amplification d'un signal lumineux, réalisée par l'émission stimulée de l'atome du milieu actif. Le laser émet de la lumière en micro-onde, en infrarouge, dans l'ultraviolet et même dans les rayons X [38].

## II.2 Historique des lasers

Le concept fondamental de l'émission stimulée a été proposé par Albert Einstein en 1917, jetant ainsi les bases théoriques du fonctionnement du laser. En 1954, les scientifiques américains Charles Townes et Joseph Gordon ont développé le MASER, un dispositif utilisant ce principe pour amplifier les micro-ondes. Ce succès a conduit à la création du premier LASER optique en 1960 par Theodore Maiman, utilisant un cristal de rubis comme milieu actif. Depuis, les lasers ont connu une évolution rapide, diversifiant leurs sources, leurs longueurs d'onde et leurs domaines d'application [27].

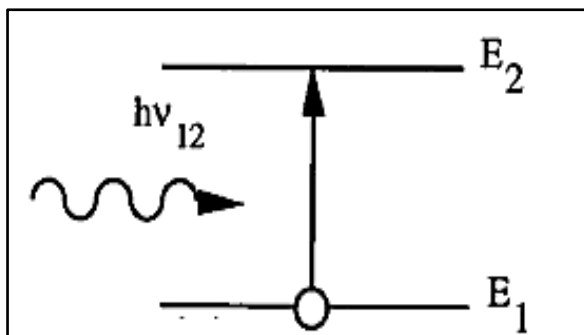


**Figure II.1** : Theodore Harold Maiman et son premier laser « laser rubis » [39].

### II.3. Physique des lasers

#### II.3.1 Interactions photon-électron

##### A .Absorption des photons



**Figure II.2** : Absorption des photons [40].

Les électrons dans un atome occupent des orbites définies. Lorsque l'électron s'éloigne du noyau, l'énergie interne de l'atome augmente. L'état d'énergie minimale est appelé état fondamental, tandis que les états d'énergie supérieure sont dits états excités.

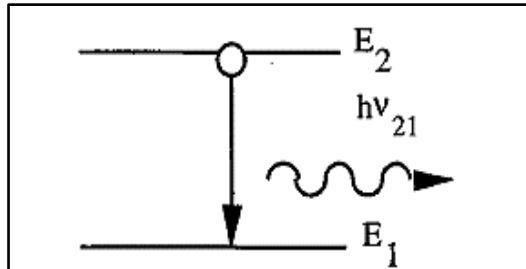
Le passage d'un état à un autre se fait par excitation thermique ou radiative, qui peut être cinétique (chocs de particules) ou électromagnétique (absorption de rayonnement).

L'énergie absorbée par un photon suit la relation:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h \nu \quad (\text{II.1})$$

Où  $E_1$  et  $E_2$  sont les énergies des niveaux initial et final,  $\nu$  est la fréquence du rayonnement, et  $h$  est la constante de Planck ( $h = 6.62 \times 10^{-34}$  J.s).

- **Emission spontanée**



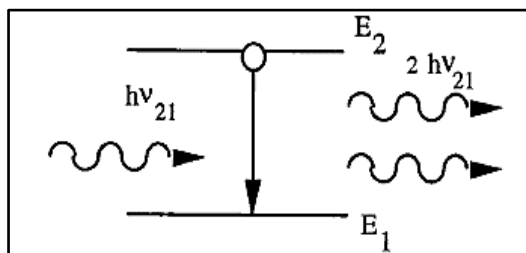
**Figure II.3** : Emission spontanée [41].

L'énergie acquise par un atome excité peut être perdue spontanément. En revenant à un niveau d'énergie inférieur, l'atome libère cet excédent sous forme d'énergie cinétique (ce qui augmente la température) ou d'émission de rayonnement électromagnétique.

- **L'émission spontanée (ou fluorescence) est incohérente**

Chaque atome émet indépendamment des autres, à un moment aléatoire, dans toutes les directions, sans synchronisation de phase, direction ou polarisation. La fréquence du rayonnement dépend de la différence d'énergie entre les niveaux impliqués.

- **Emission stimulée**



**Figure II.4** : Emission stimulée [42].

Il se produit lorsqu'un photon, ayant la même énergie que celle libérée par un atome excité revenant à un niveau inférieur, provoque la libération d'un deuxième photon.

Contrairement à l'émission spontanée, l'émission stimulée a des propriétés spécifiques : le photon induit et le photon incident sont parfaitement identiques en fréquence, phase, polarisation et direction. . Il est impossible de les distinguer, ce qui crée une amplification cohérente du rayonnement. Cette base physique est le principe fondamental du fonctionnement des lasers [43].

### II.3.2 Composition et fonctionnement du laser

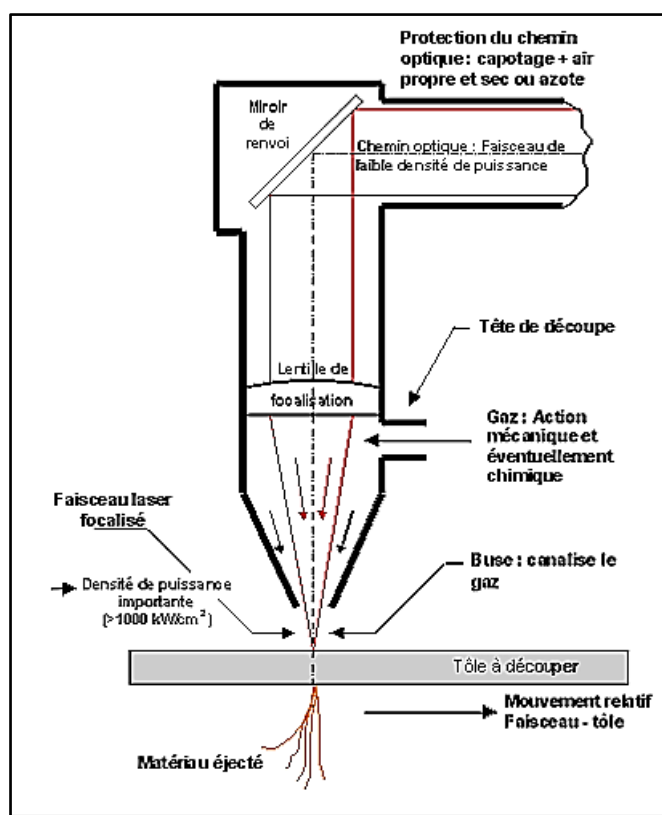


Figure II.5 : Schéma illustratif du laser [44].

Un laser est constitué de trois éléments principaux :

- **Un milieu active** (gaz, solide, liquide, cristal, etc.) qui permet d'amplifier le rayonnement lumineux lorsqu'il est excité.
- **Le processus de pompage** destiné à exciter les atomes du milieu actif. Il peut être : optique, électrique, chimique, selon le type de laser.

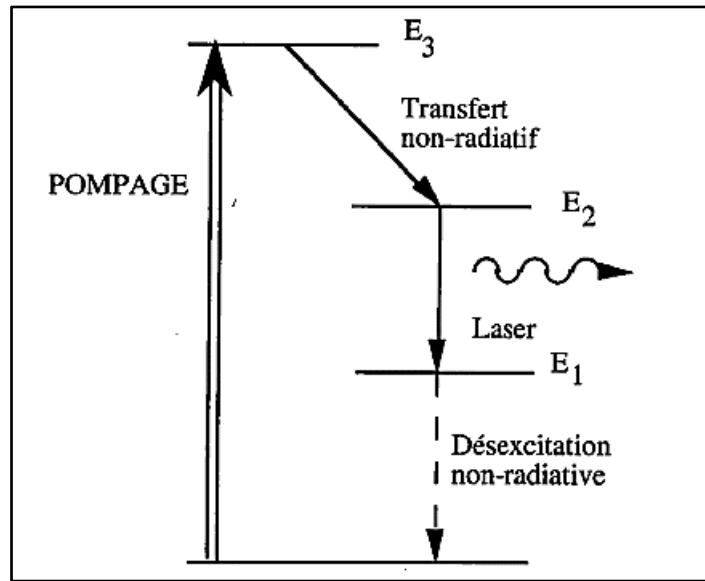


Figure II.6 : Système de pompage à 4 niveaux [45].

- **Une cavité optique** ou **résonateur** qui permet le passage du faisceau lumineux plusieurs fois par le milieu amplificateur [46].

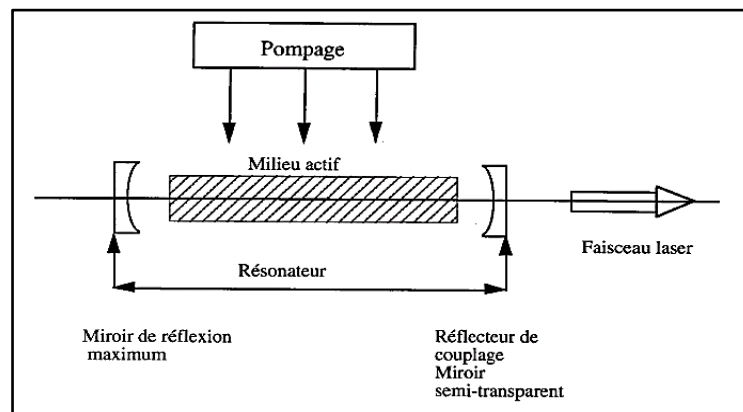


Figure II.7 : Schéma de principe de la cavité résonante [47].

## II.3.3 Caractéristiques fondamentales du faisceau laser

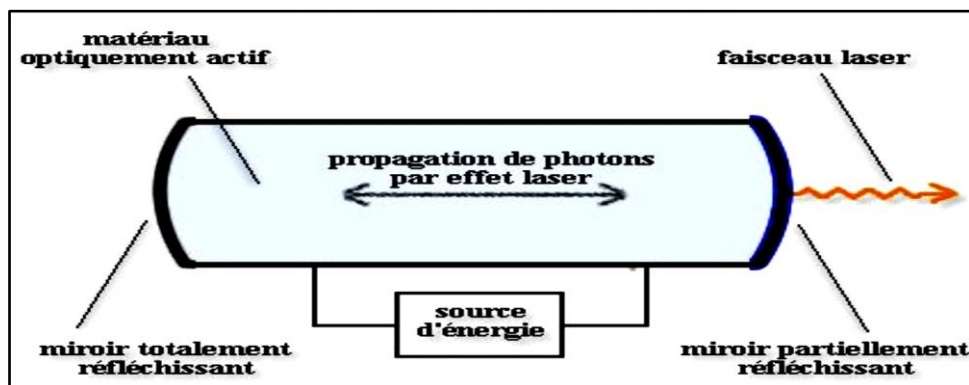


Figure II.8 : schéma de principe d'un laser [48].

Le faisceau laser est différent d'une source classique par ce qu'il est :

- **A.monochromatique**

Contrairement à la lumière blanche, le laser n'émet qu'une seule longueur d'onde c'est –à –dire une seule couleur et cela est dû à l'émission stimulée qui produit des photons identiques (même phase et fréquence)

- **B.directif**

Le faisceau laser apparaît souvent comme un fil lumineux très fin (figure.II-9), ce faisceau filiforme prend sa forme à partir de la géométrie des miroirs qui confinent le rayonnement lors des réflexions multiples, ce qui donne un effet de collimation élevée.

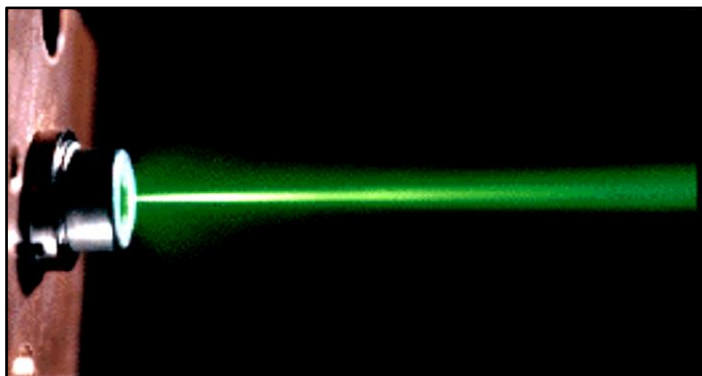


Figure II.9: Ce schéma indique que le faisceau laser est directif [49].

- *C. Cohérent*

La source laser est cohérente par ce qu'elle émet des fronts d'onde dont les amplitudes et les phases sont identiques, en raison du principe de l'émission stimulée associée à la présence de la cavité optique résonante. Il est naturel de définir la cohérence à partir des franges d'interférence observées par les instruments les plus souvent utilisés dans la mesure appelés interféromètres. Ces franges d'interférences sont caractérisées par leur visibilité :

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (II-2)$$

La cohérence est présente sous deux aspects :

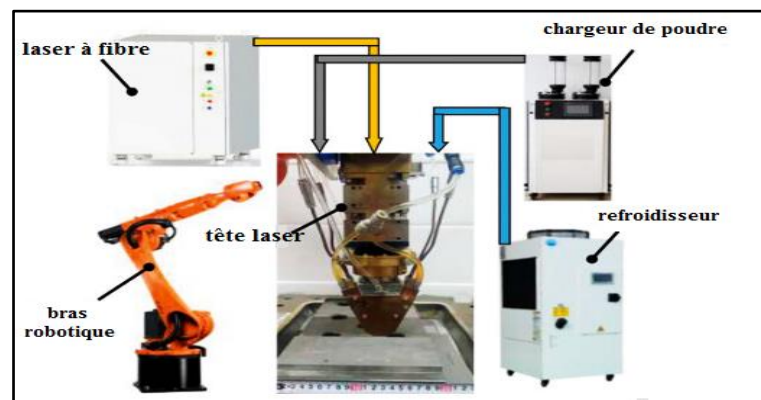
- *cohérence temporelle*

La lumière est considérée cohérente temporellement, si la phase à un instant donné le long d'un front d'onde en mouvement est identique à celle que possède l'onde après avoir traversé une distance L en un temps L/c, quel que soit L.

- *cohérence spatiale*

Si, à chaque instant, la lumière possède la même phase aux différents points de son front d'onde [50].

## II.4 Paramètres de l'interaction Laser-matière



**Figure II.10** : structure d'un système de revêtement laser [51].

Les paramètres régissant l'interaction laser-matière sont nombreux. Les effets produits dépendent :

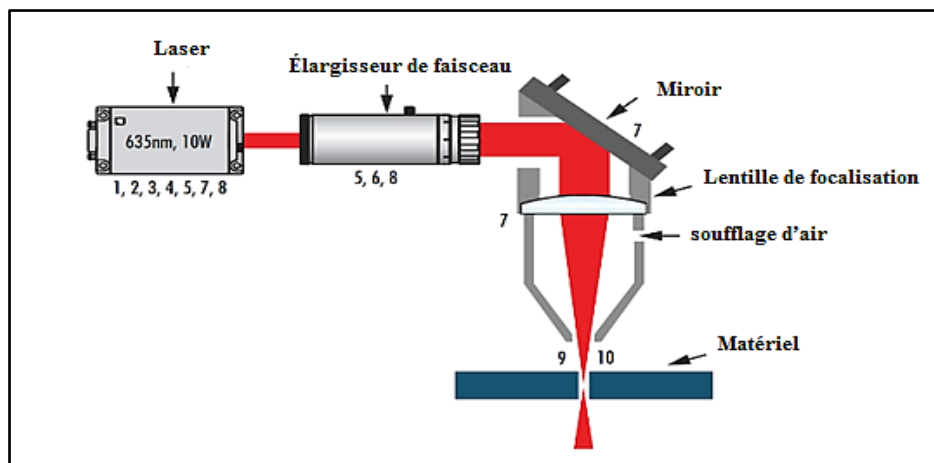
-De la source laser (longueur d'onde, temps d'interaction, densité de puissance délivrée)

-Du matériau [nature (métal, semi-conducteur, diélectrique), phase (solide, liquide ou gazeuse), propriétés physiques (optiques, thermiques), état de surface (nature chimique, rugosité)].

-De l'environnement (nature et pression de l'atmosphère de traitement) : par exemple La température peut affecter la manière dont l'énergie du laser est absorbée par le matériau, influençant ainsi l'efficacité de l'interaction. Elle modifie la conductivité thermique et la réflectivité du matériau, ce qui peut influencer la fusion ou l'évaporation du matériau traité [52].

### II.4.1 Paramètres fondamentaux

Les paramètres fondamentaux qui suivent constituent les concepts les plus élémentaires des systèmes laser et sont essentiels à la compréhension de sujets plus avancés.



**Figure II.11:** Schéma d'un système commun de traitement des matériaux par laser dans lequel chacun des 10 paramètres clés d'un système laser est indiqué par son numéro correspondant [53].

- **Nomenclature du système commun de traitement**

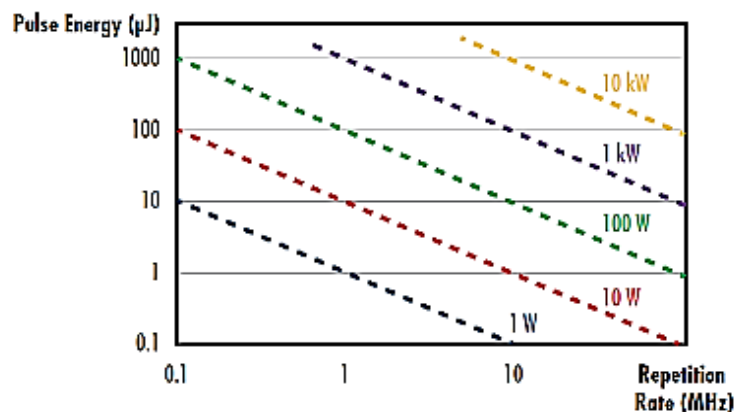
**1 : La longueur d'onde (unités typiques : du nm au  $\mu\text{m}$ )**

La longueur d'onde d'un laser détermine la manière dont l'onde lumineuse interagit avec la matière. Chaque matériau absorbe différemment selon la longueur d'onde, ce qui influence l'efficacité du traitement. Les lasers à courtes longueurs d'onde permettent des travaux très précis avec peu de chaleur diffuse, mais ils sont plus coûteux et fragiles que ceux à grandes longueurs d'onde.

**2 : La puissance et l'énergie (unités typiques : le W ou le J)**

La puissance d'un laser est mesurée en watts (W) et sert à décrire soit la sortie de puissance optique d'un laser à onde continue (ou CW pour « continuous wave »), soit la puissance moyenne d'un laser pulsé. Les lasers pulsés se distinguent également par leur énergie d'impulsion, directement proportionnelle à la puissance moyenne et inversement proportionnelle au taux de répétition du laser (Figure 2). L'énergie se mesure en joules (J).

$$\text{Energie d'impulsion} = \frac{\text{Puissance moyenne}}{\text{Taux de répétition}} \quad (\text{II.3})$$

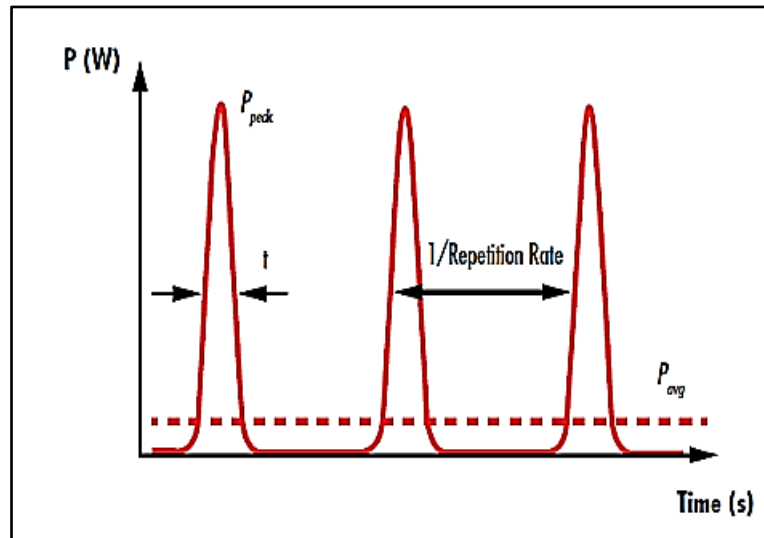


**Figure II.12 :** Représentation visuelle de la relation entre l'énergie d'impulsion, le taux de répétition et la puissance moyenne des lasers pulsés [54].

Les lasers de puissance et d'énergie supérieure sont généralement plus chers et génèrent plus de chaleur perdue. Plus la puissance et l'énergie augmentent, plus il est difficile de conserver un faisceau de haute qualité.

### 3 : La durée d'impulsion (unités typiques : de la fs à la ms)

La durée d'impulsion laser, ou largeur d'impulsion, est généralement définie comme étant la largeur à mi-hauteur (ou FWHM pour full width at half-maximum) de la puissance optique du laser en fonction du temps (*Figure II.12*). Les lasers ultrarapides, qui présentent de nombreux avantages pour tout un ensemble d'applications comme le traitement de matériaux précis ou les lasers médicaux, sont caractérisés par des durées d'impulsion très courtes, de l'ordre de la picoseconde ( $10^{-12}$  s) à l'attoseconde ( $10^{-18}$  s).



**Figure II.13** : Les impulsions d'un laser pulsé sont séparées dans le temps par l'inverse du taux de répétition [55].

#### 4 : Le taux de répétition (unités typiques : de l'Hz au MHz)

La fréquence de répétition d'un laser pulsé correspond au nombre d'impulsions émises par seconde. Elle est inversement liée à l'énergie d'impulsion et directement liée à la puissance moyenne. Un taux élevé réduit le temps de refroidissement entre les impulsions, provoquant un réchauffement plus rapide du matériau.

#### 5 : La longueur de cohérence (unités typiques : du mm au m)

La lumière laser est cohérente, ce qui signifie qu'il existe une relation fixe entre les valeurs de phase du champ électrique à différents points dans le temps ou dans l'espace. Ceci est dû au fait que la lumière laser est produite par émission stimulée, contrairement à la plupart des autres types de sources de lumière. La cohérence se dégrade au cours de la propagation et la longueur de cohérence d'un laser définit une distance sur laquelle sa cohérence temporelle est maintenue à une certaine qualité.

**6 : La polarisation**

La polarisation définit l'orientation du champ électrique des ondes lumineuses, qui est toujours perpendiculaire à la direction de la propagation. La plupart du temps, la lumière laser sera polarisée linéairement, ce qui signifie que les champs électriques émis pointent toujours dans la même direction. La lumière non polarisée aurait des champs électriques pointant dans de nombreuses directions différentes.

**7 : Le diamètre du faisceau (unités typiques : du mm au cm)**

Le diamètre d'un faisceau laser correspond à sa taille perpendiculaire à sa direction. Il est souvent mesuré au point où l'intensité chute à 13,5 % de la valeur maximale (niveau  $1/e^2$ ). Un faisceau plus large demande des optiques plus grandes, donc plus coûteuses. Un faisceau trop étroit, lui, augmente la densité d'énergie, ce qui peut être problématique.

**8 : La densité de puissance ou d'énergie (unités typiques :  $W/cm^2$  au  $MW/cm^2$ , ou du  $\mu J/cm^2$  au  $J/cm^2$ )**

Le diamètre du faisceau influence la densité de puissance : plus le faisceau est large, plus cette densité diminue. Une faible densité est utile à l'intérieur du système pour éviter les dommages, tandis qu'une densité élevée est recherchée à la sortie (par ex. pour la découpe ou le soudage). On utilise donc souvent des extenseurs pour élargir le faisceau et réduire la densité, sans dépasser les limites du système pour éviter les pertes.

**9 : Le profil du faisceau**

Le profil d'un faisceau laser décrit l'intensité de distribution à une section transversale du faisceau. Les profils de faisceaux communs comprennent les faisceaux gaussiens et les faisceaux à sommet plat, dont les profils de faisceaux suivent les fonctions gaussiennes et à sommet plat, respectivement. Cependant, aucun laser ne peut produire

un faisceau parfaitement gaussien ou à sommet parfaitement plat dont le profil correspond parfaitement à sa fonction caractéristique, car il y a toujours un certain nombre de points chauds ou de fluctuations à l'intérieur d'un laser. La différence entre le profil réel du faisceau d'un laser et celui d'un faisceau idéal est souvent décrite par le biais de mesures, dont le facteur  $M^2$  d'un laser.

### **10 : La divergence (unité typique : le mrad)**

Bien que l'on suppose souvent que les faisceaux laser sont collimatés, ils présentent toujours une certaine divergence, qui décrit l'étendue du faisceau sur une distance croissante à partir de la taille du faisceau laser, en raison de la diffraction. La divergence devient un problème particulièrement important dans les applications avec une longue distance de travail, comme les systèmes LIDAR où un objet peut se trouver à des centaines de mètres du système laser. La divergence du faisceau est typiquement définie par le demi-angle du laser, et la divergence ( $\theta$ ) d'un faisceau gaussien est définie par l'équation :

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (\text{II.4})$$

Où  $\lambda$  correspond à la longueur d'onde du laser et  $w_0$  à la taille du faisceau laser. La divergence peut être diminuée afin d'augmenter le diamètre du faisceau.

### **11 : La taille du spot (unité typique : le $\mu\text{m}$ )**

La taille du spot d'un faisceau laser focalisé caractérise le diamètre de ce faisceau au point focal d'un système de lentille de focalisation. Dans beaucoup d'applications telles que le traitement des matériaux et la chirurgie médicale, l'objectif est de minimiser la taille du spot. Ceci maximise la densité de puissance et permet la création de fonctionnalités particulièrement précises. Des lentilles asphériques sont souvent utilisées à la place des lentilles sphériques conventionnelles afin de réduire les aberrations sphériques et de produire des spots focaux plus petits. Certains types de

systèmes laser ne se limitent pas à focaliser le laser sur un point, auquel cas ce paramètre n'est pas applicable.

### **12 : La distance de travail (unités typiques : du $\mu\text{m}$ au m)**

La distance de travail d'un système laser est communément définie comme étant la distance physique entre l'élément optique final (généralement, une lentille de focalisation) et l'objet ou la surface sur laquelle est focalisé le laser. Certaines applications, telles que les lasers médicaux, cherchent souvent à minimiser la distance de travail, tandis que d'autres applications, comme la télédétection, visent souvent à maximiser leur portée [56].

#### **II.5. Effets de l'interaction laser-matière**

L'interaction laser-matière a pour conséquence l'excitation des électrons au voisinage de la surface du matériau par absorption des photons incidents suivie de la relaxation en un temps très court (10–12 s) de ces électrons induisant trois effets.

##### **II.5.1 Un effet thermique**

Selon la densité de puissance ( $10^2$  à  $10^8$  W/cm<sup>2</sup>) et le temps d'interaction ( $\mu$  s à s), la chaleur peut chauffer, fondre ou vaporiser le matériau. Ces effets thermiques sont utilisés pour la découpe, le soudage, le perçage ou les traitements de surface. À faible énergie, ils servent au nettoyage, décapage ou dépôt (LPVD).

##### **II.5.2 Un effet photochimique**

Il provoquant des perturbations des liaisons interatomiques pouvant altérer les propriétés chimiques du solide, du gaz ou l'interface solide-gaz. Dans le cas où l'énergie des photons est de l'ordre de l'énergie de liaison du solide, le traitement pourra induire des ruptures de liaison en surface (traitement des polymères ou gravure du silicium en présence de chlore par laser excimère). Ces effets font principalement l'objet d'étude en

laboratoire. Les principales applications concernent les secteurs de la microélectronique et de l'optoélectronique (dépôt et gravure avec des résolutions spatiales submicroniques).

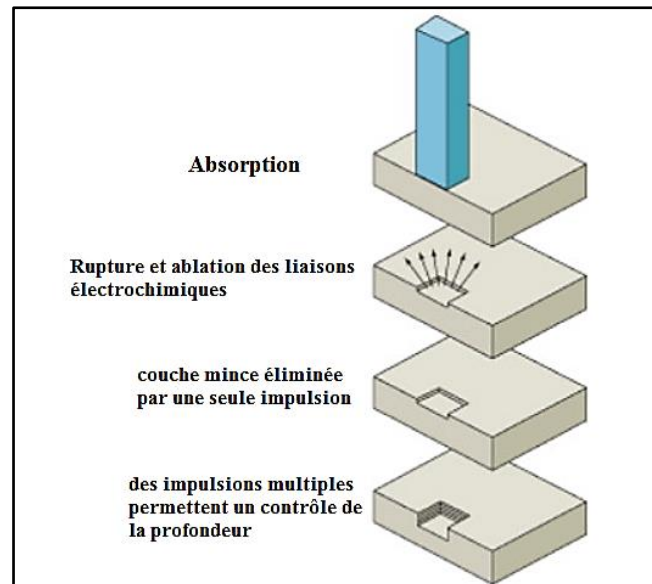
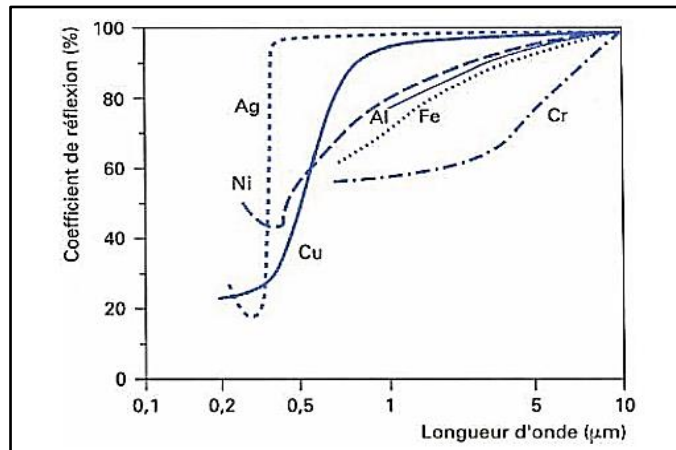


Figure 18. Étapes de la photo-ablation ou « ablation à froid ». Les bords des défauts tissulaires causés par le laser correspondent à la forme du faisceau laser incident [57].

### II.5.3 Un effet mécanique

Avec des impulsions de quelques nanosecondes et des intensités de quelques  $\text{GW}/\text{cm}^2$ , un plasma se forme et génère une onde de choc qui provoque une déformation plastique, améliorant la résistance à la fatigue. En ajoutant un matériau transparent (confinement), on augmente la pression sur la surface. Celle-ci peut atteindre plusieurs dizaines de Kbars, mais au-delà de  $10 \text{ GW}/\text{cm}^2$ , le matériau de confinement devient absorbant [58].



**Figure II.15 :** Coefficient de réflexion en fonction de la longueur d'onde pour différents métaux sous incidence normale [59].

## II.6. Modes d'émission des lasers

Les deux principaux modes d'émission laser sont :

- **Le mode continu** : la puissance du rayonnement reste constante tout au long du temps de l'émission.
- **Le mode impulsionnel** : la lumière laser est produite de manière discontinue, par impulsions brèves et intenses.

Les lasers impulsionnels se déclinent en plusieurs catégories selon la durée des impulsions :

- **Lasers à impulsions ultracourtes** (femtoseconde et picoseconde)

Les impulsions vont de la femtoseconde ( $10^{-15}$  s) à la dizaine de picosecondes, permettant des traitements à froid, sans effet thermique notable sur la matière.

- **Lasers à impulsions courtes** (nanoseconde)

Des durées d'impulsion de quelques dizaines à quelques centaines de nanosecondes, induisant une augmentation de la température de la surface qui modifie la topographie, la microstructure et la composition chimique superficielle. Ils sont utilisés pour le marquage et le micro-usinage de précision [60].

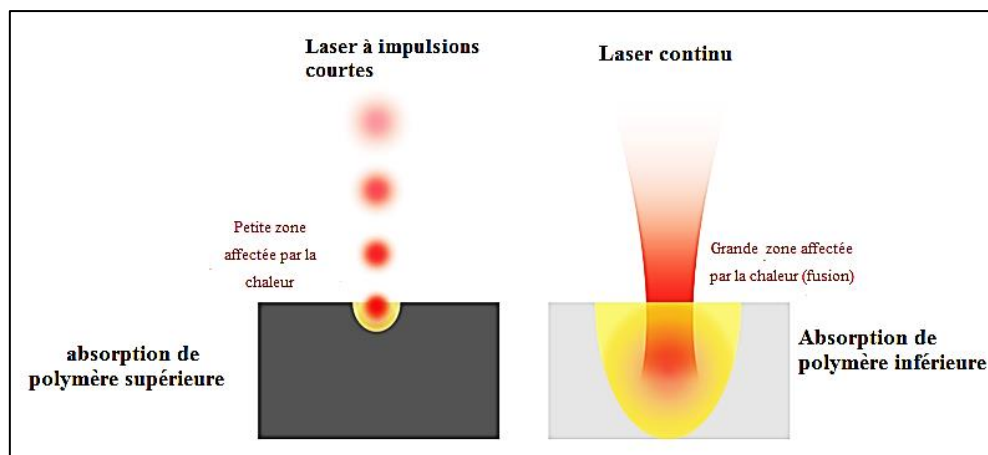


Figure II.16: interaction laser-polymère dans le régime d'absorption linéaire [61].

## II.7.Principaux types de lasers industriels

Dans le domaine des traitements de surface, les principales sources laser rencontrées sont :

- **Lasers à CO<sub>2</sub>**
- **Lasers à solide Nd-YAG**
- **Lasers à fibre dopée**
- **Lasers à excimères**

Les caractéristiques et les applications des principaux lasers industriels sont présentées en Annexe 1 [62].

## II.8. Modification de microstructure avec apport de matière

### II.8.1 Traitements thermiques avec apport de matière

Le traitement de fusion superficielle par irradiation laser avec ajout de matière vise à améliorer les caractéristiques de surface du matériau en modifiant sa composition chimique. Afin d'élaborer des revêtements ou bien des composites ou alliages superficiel son ajoute avant ou en cours de traitement, d'autres matériaux ou éléments d'apport soit à l'état gazeux en atmosphère contrôlée, soit sous forme solide. Pendant la procédure, le substrat est conservé en état solide ou liquide. Le laser est alors employé soit pour chauffer principalement le substrat, soit pour fusionner le substrat et le matériau d'apport, soit pour vaporiser une cible à déposer sur le substrat.

### II.8.2. Formation d'un composite superficiel

Des particules de renfort sont injectées sans fusion dans le métal fondu superficiellement, ce qui les incruste dans le bain de fusion. Après solidification, les particules de type carbure ou nitrure augmentent sensiblement de la dureté dans la zone traitée par fusion (Figure. II. 15).

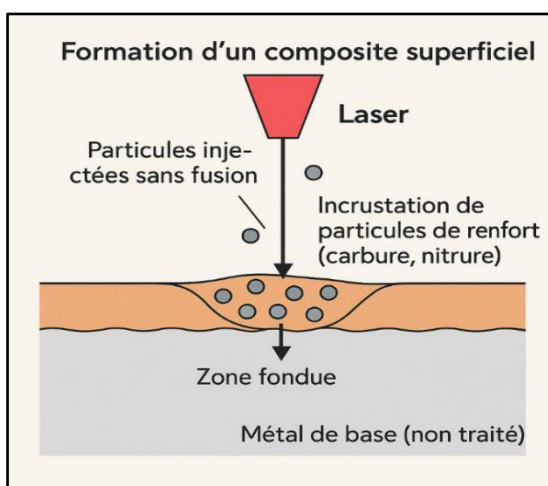
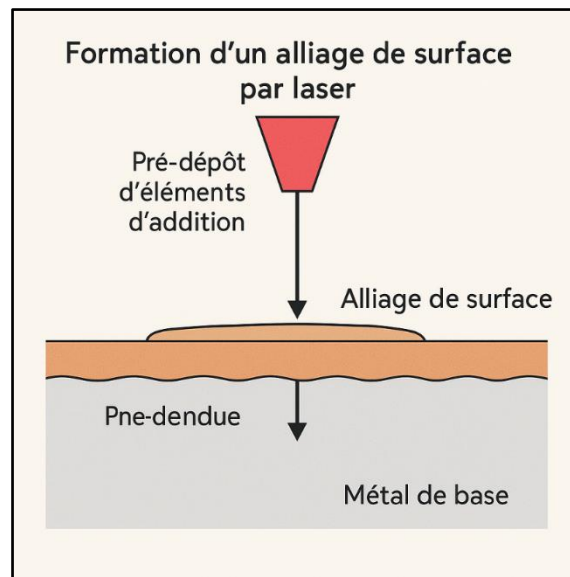


Figure II.17 : Formation d'un composite superficiel [63].

### II.8.3. Formation d'un alliage superficiel

Le procédé est le même que dans le cas de la formation d'un revêtement, sauf que pour la formation d'un alliage superficiel la fusion d'une couche relativement épaisse du substrat est souhaitée. Trois cas sont présentés intégration de gaz ou l'élément d'addition injecté sous le faisceau (Figure II.16).

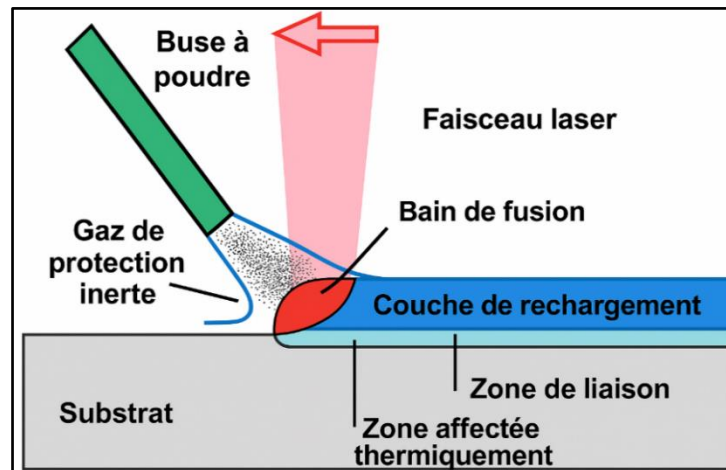


**Figure II.18 :** Formation d'un alliage de surface à partir d'un pré-dépôt d'éléments d'addition [64].

### II.8.4 Formation d'un revêtement

C'est un procédé au cours duquel est incorporé au substrat superficiellement fondu, un autre matériau, afin de modifier et améliorer les propriétés de surface du substrat initial (résistance à l'usure, à la corrosion...). L'élaboration d'un revêtement par fusion laser, exige que les matériaux d'apport soient portés à l'état liquide sans provoquer la fusion du substrat sur une épaisseur significative. Ceci est crucial pour minimiser la dissolution du matériau du substrat dans le bain de fusion et pour limiter au maximum l'altération du revêtement.

Les matériaux d'apport sont injectés à l'état de poudre dans le bain de fusion (c'est le cas qui sera détaillé au cours de notre étude), ou déposés préalablement sur le matériau à revêtir (Figure. II.17). Ce procédé a été introduit plus récemment dans l'industrie de grande série pour le stellitage de soupapes ou le revêtement des sièges de soupapes directement sur bloc moteur [65].



**Figure II.19 :** Formation d'un revêtement de surface avec pré-dépôt d'un matériau d'apport [66]

## II.9 Domaines d'application du laser

Les applications des lasers vont de l'utilisation domestique de petits lasers à diode microscopiques à l'utilisation industrielle et de recherche de lasers en verre au néodyme, aussi grands qu'un terrain de football, utilisés pour la fusion par confinement inertiel, dans la recherche sur les armes nucléaires et d'autres expériences de physique des hautes densités d'énergie. Les lasers se trouvent presque partout autour de nous. Les lecteurs de codes-barres, les lecteurs de disques laser et les imprimantes laser comptent parmi les premières applications des lasers. Certaines des principales applications des lasers sont résumées comme suit :

- **Lasers dans le domaine du divertissement**

Disques optiques, par exemple les CD, DVD, etc. ; spectacles de lumière laser ; affichages lumineux au laser.

- **Lasers dans le développement de produits/commercial**

Imprimantes laser, scanners de codes-barres, thermomètres, pointeurs laser et hologrammes.

- **Lasers en défense**

Les lasers sont utilisés dans l'armement. L'utilisation d'un faisceau laser pour atteindre une cible provoque de graves ondes de choc qui endommagent la cible. Les lasers sont également utilisés dans les armes et missiles guidés par laser : pour le marquage des cibles, le guidage des munitions, les contre-mesures électro-optiques (EOCM), comme alternative au radar et pour aveugler les troupes. Les lasers sont également utilisés pour la détection des empreintes digitales latentes dans le cadre des enquêtes médico-légales.

- **Lasers dans la communication**

Ils sont utilisés pour la télémétrie et les outils de précision, la communication numérique, dans les télescopes optiques comme élargisseurs de faisceaux pour l'exploration spatiale. Les fibres optiques pour les téléphones mobiles et l'internet font également partie des applications des lasers dans les télécommunications.

- **Lasers en médecine**

Pour les chirurgies et les procédures médicales telles que : la cicatrisation au laser, les traitements chirurgicaux, le traitement du cancer, le traitement des calculs rénaux et en dentisterie. Les lasers servent également à cautériser les vaisseaux sanguins pour

corriger des problèmes tels que la chirurgie des yeux au laser, la fixation de rétines détachées et le traitement de la cataracte. Ils sont aussi utilisés pour des traitements dermatologiques comme le traitement de l'acné, la réduction de la cellulite et l'épilation au laser.

- **Lasers dans la recherche et le contrôle qualité**

Les lasers sont employés dans des applications de recherche telles que la spectroscopie, la microscopie par fluorescence, la diffusion laser, l'interférométrie laser et la métrologie.

- **Lasers dans le traitement des matériaux**

Découpage et soudage des métaux .Les propriétés des lasers, qui leur permettent d'être dirigés et focalisés avec précision, rendent possible la découpe des métaux et le soudage de métaux dissemblables. Les lasers sont aussi utilisés pour le traitement thermique, la fabrication additive (création de pièces fonctionnelles), l'ablation laser, le recuit laser et la mesure sans contact des pièces.

L'importance des lasers dans le traitement des matériaux est révolutionnaire, permettant de fabriquer des pièces impossibles à produire par d'autres procédés. La manière dont les lasers interagissent avec les matériaux sera expliquée dans la section suivante [67].

## **II.10 Les défis futurs des lasers**

Ils se concentrent sur quatre domaines clés. La fusion nucléaire par laser promet une énergie propre et illimitée. Le cyber sécurité quantique utilise les lasers pour sécuriser les communications contre les cyberattaques. En médecine, les lasers de pointe permettent des chirurgies précises et le traitement du cancer. Enfin, l'impression 4D intègre les lasers pour créer des matériaux intelligents capables de changer de forme. Ces innovations placent le laser au cœur des avancées technologiques [68].

## **II.11 Conclusion**

En conclusion, l'interaction laser-matière constitue un domaine dynamique et stratégique qui continue d'évoluer grâce à l'innovation et aux progrès technologiques. Maîtriser ces interactions et relever les défis techniques actuels permettront de repousser les limites des applications industrielles et scientifiques, consolidant ainsi le laser comme un outil incontournable dans le traitement avancé des matériaux.

# Chapitre III

*Partie expérimentale*

### III.1 Introduction

Le stage de mise en situation professionnelle a été effectué au niveau de laboratoire (hall de technologie).

Ce chapitre présente les procédures expérimentales, les produits chimiques, les méthodes analytiques utilisées au cours de cette étude.

### III.2 Objectif de l'étude

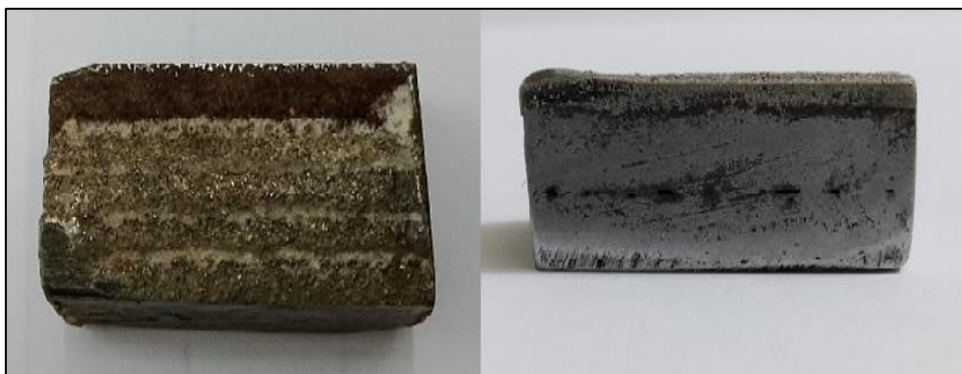
L'objectif de notre travail expérimental consiste à évaluer la résistance à la corrosion des revêtements obtenus par projection de poudre sous faisceau laser appliqué sur un substrat métallique.

Les performances de ces revêtements seront comparées à l'aide de tests **gravimétriques** et **électrochimiques** afin d'identifier le plus efficace.

### III.3 Matériaux utilisés

#### III.3.1 Nature des matériaux utilisés

La qualité et la quantité des matériaux ont été préparées en vue de la réalisation des essais de nettoyage chimique dans le cadre de ce travail.



**Figure III.1** : Echantillon acier revêtu



**Figure III.2 :** Echantillon à base d'aluminium revêtu



**Figure III.3 :** Echantillon à base de cuivre

### III.3.2 Préparation des échantillons

- **Choix des plaques :**
- **Echantillon 1 : acier 35 (≈ XC 38)**

Désignation AISI : 1035 / 1038

- Le premier chiffre 1 indique qu'il s'agit d'un acier au carbone (non allié).
- Le second chiffre 0 signifie qu'il n'y a pas eu de modification dans la composition chimique.
- Les deux derniers chiffres 35 ou 38 indiquent une teneur en carbone de 0,35 % à 0,38 %, ce qui en fait un acier mi-dur.

### Autres appellations :

- Française (AFNOR) : XC 38 H1
- Européenne (EN / NF EN) : C35E

**Tableau III.1:** Composition et propriétés de L'acier C35

Composition chimique (%)					
<b>C</b>	<b>0,35-0,39</b>	<b>Si ≤ 0,40</b>	<b>Mn 0,60</b>	<b>S* 0,030</b>	<b>Cr + Ni + Mo ≤ 0,63</b>
Propriétés de l'acier XC35					
<p>L'acier XC35 est un acier non allié à teneur moyenne en carbone (environ 0,35 %), qui présente un bon équilibre entre résistance mécanique, ténacité et usinabilité. Grâce à sa composition, il peut être traité thermiquement (trempe et revenu) pour améliorer ses propriétés, notamment en augmentant sa dureté en surface tout en conservant une bonne ductilité au cœur. Facile à usiner et à souder dans son état recuit, cet acier est couramment utilisé pour la fabrication de pièces mécaniques soumises à des contraintes modérées telles que des arbres, axes, boulons ou engrenages. Sa polyvalence en fait un matériau de choix dans de nombreuses applications industrielles</p>					

Les alliages de nickel contiennent du nickel et divers autres éléments pour obtenir les caractéristiques souhaitées, (Figure 1 et 2).

**Tableau III.2 : Composition chimique du superalliage à base de nickel**

<b>Éléments</b>	<b>Poids %</b>
Nickel	48-75%
Chrome	15-25%
Aluminium	0-6%
Titane	0-5%
Cobalt	0-15%
Molybdène	0-12%
Tungstène	0-12%
Le fer	0-10%

➤ **Polissage**

Dans cette étape on a utilisé le papier abrasif de numéro (80, 100, 120, 220, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000), on a fait le polissage manuel de notre échantillon avec une polisseuse au niveau du département du génie mécanique pour éliminer les impuretés et homogénéiser la surface des plaques, ensuite un petit lavage par l'eau distillée pour se débarrasser totalement des traces des impuretés et ensuite un séchage par un chiffon sans frottement.



**Figure III.4:** Machine de polissage

### II.3.3 Procédé de laser revêtement

**Tableau II.3 :** Caractéristiques de l'installation laser

<b>Source thermique</b>	laser CO2 continu (CI 4000) d'une puissance maximale de 3,6 KW
<b>Longueur d'onde</b>	10,6 m.
<b>Optique de focalisation</b>	Lentille en ZnSe f=254mm
<b>Système de projection de poudre</b>	Metco 4MP
<b>Amenée de poudre</b>	buse coaxiale
<b>puissance laser</b>	$1600 < P < 2500 \text{ W}$
<b>vitesse de déplacement échantillon / laser</b>	$10 < V < 20 \text{ mm/s}$
<b>distance du pt laser à la surface de la pièce</b>	$20 < F < 40 \text{ mm}$
<b>diamètre du faisceau au point d'impact</b>	$1 < d < 1,5 \text{ mm}$

débit de poudre

$25 < dp < 35g / mn$

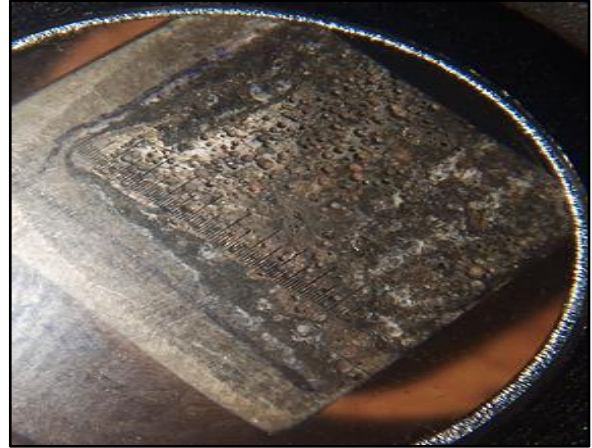
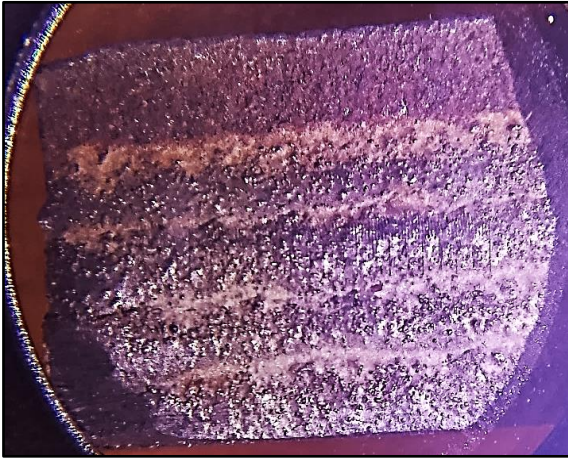


Figure III.5 : Les échantillons au microscope

### III.4 Produits chimiques et préparation des solutions

#### III.4.1 Produits chimiques utilisés

- NaCl : Le chlorure de sodium

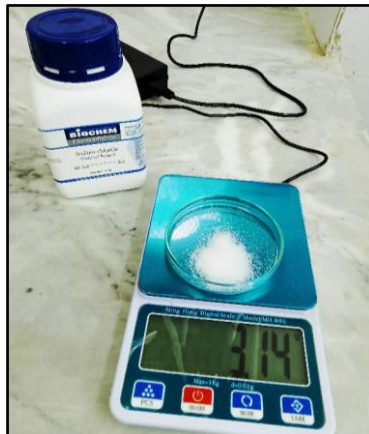


Figure III.6: Le chlorure de sodium

Le chlorure de sodium (NaCl) est un sel ionique formé par l'union d'un cation sodium ( $Na^+$ ) et d'un anion chlorure ( $Cl^-$ ). Il est connu sous le nom courant de sel de table, mais en laboratoire, il est utilisé pour préparer des solutions salines neutres, souvent pour

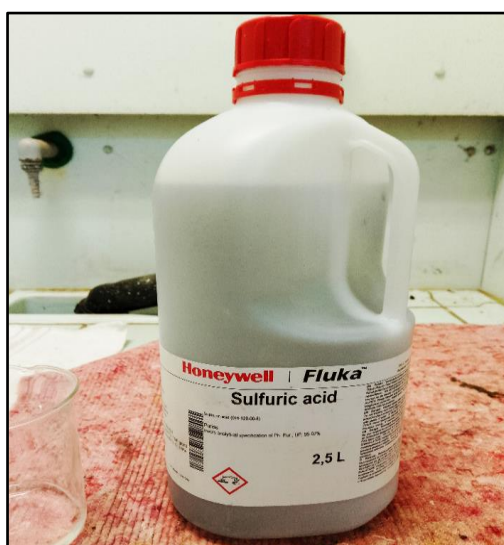
simuler des environnements corrosifs comme l'eau de mer.

**Tableau III.4:** Les propriétés du chlorure de sodium

<b>Formule chimique</b>	NaCl
<b>Masse molaire</b>	58,44 g/mol
<b>Densité</b>	2,165 g/cm <sup>3</sup>
<b>Point de fusion</b>	801 °C
<b>Point d'ébullition</b>	1 465 °C
<b>Solubilité dans l'eau</b>	359 g/L (à 20 °C)
<b>Viscosité</b>	1,0 mPa.s (pour 1M mol/L et 25 °C)

➤ **H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:** l'acide sulfurique

L'acide sulfurique est un acide minéral fort, très corrosif, incolore à légèrement jaunâtre



**Figure III.7:** L'acide sulfurique

<b>Formule chimique</b>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
<b>Masse molaire</b>	98,08 g/mol
<b>Densité</b>	1,84 g/cm <sup>3</sup> (acide concentré à 98 %) à 25 °C
<b>Point de fusion</b>	10 °C
<b>Point d'ébullition</b>	337 °C
<b>Solubilité dans l'eau</b>	Très soluble (réaction exothermique)
<b>Viscosité</b>	24,2 mPa·s (pour 96 % concentration et 25 °C)

**Tableau III.5:** Les propriétés de l'acide sulfurique

### III.4.2 Préparation des solutions

- **La solution NaCl**

On a préparé 3 solutions de la solution de différente concentration

$$V1 \quad \xrightarrow{m2} \quad \rightarrow 100\%$$

$$m1 \quad \xrightarrow{C1}$$

- **solution de concentration 3% de NaCl**

$$100 \text{ ml} \quad \xrightarrow{100\text{g}} \quad \rightarrow 100\%$$

$$m1 \quad \xrightarrow{3\%}$$

$$m1 = 3\text{g}$$

- **solution de concentration 5% de NaCl**

$$100 \text{ ml} \quad \xrightarrow{100 \text{ g}} \quad \rightarrow 100\%$$

$$m1 \quad \xrightarrow{5\%}$$

$$m1 = 5\text{g}$$

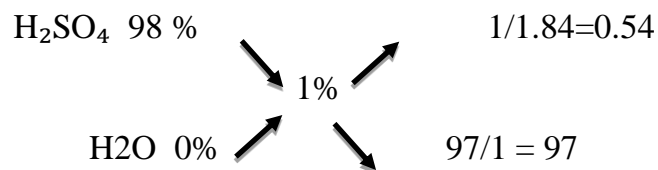
▪ **L'acide sulfurique  $\text{H}_2\text{SO}_4$**

On a préparé 3 solutions de l'acide sulfurique de différente concentration, donc on a calculé le volume de chaque concentration avec la loi suivante :

➤ **Solution de concentration 1 % d'  $\text{H}_2\text{SO}_4$**

$$V(\text{solution}) = V(\text{soluté}) + V(\text{solvant})$$

$$\rho(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1.84$$



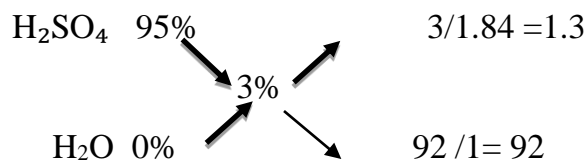
$$V(\text{solution}) = 0.54 + 97 = 97.54 \text{ ml}$$

$$0.54 \longrightarrow 97.54$$

$$X \longrightarrow 100 \text{ ml}$$

$$X = 0.55$$

➤ **Solution de concentration 3% d'  $\text{H}_2\text{SO}_4$**



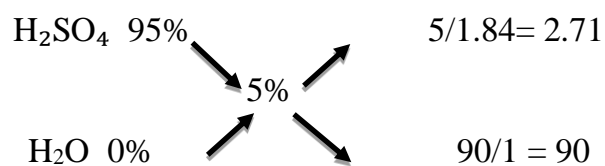
$$V(\text{solution}) = 1.3 + 92 = 93.3 \text{ ml}$$

$$1.3 \longrightarrow 92$$

$$X \longrightarrow 100 \text{ ml}$$

$$X = 1.41 \text{ ml}$$

➤ **Solution de concentration 5% d'  $\text{H}_2\text{SO}_4$**



$$V(\text{solution}) = 2.71 + 90 = 92.71 \text{ ml}$$

$$2.71 \longrightarrow 92.71$$

$$X \longrightarrow 100 \text{ ml}$$

$$X = 2.92$$



**Figure III.8 :** Les solutions préparées

### III.4.3 Conditions de conservation

- Les solutions préparées ont été conservées dans des flacons en verre résistant aux acides.
- Elles ont été stockées à température ambiante, à l'abri de la lumière directe et bien étiquetées.
- Les flacons étaient fermés hermétiquement pour éviter toute évaporation ou contamination.

### III.4.4 Précautions de sécurité

- Le port de gants, de lunettes de protection et d'un tablier de laboratoire était obligatoire pendant la manipulation des produits.
- La dilution de l'acide sulfurique a été réalisée sous hotte aspirante, en versant toujours l'acide dans l'eau et non l'inverse, pour prévenir les éclaboussures dangereuses dues à la réaction exothermique.
- Tous les récipients ont été manipulés avec soin et correctement étiquetés.

- En cas de contact accidentel, un rinçage immédiat à l'eau claire a été prévu, ainsi que la disponibilité d'une solution neutralisante (bicarbonate de soude pour  $H_2SO_4$ ).

### III.5 Méthodes d'analyse

#### III.5.1 Méthode gravimétrique

##### III.5.1.1 Principe

Son principe repose sur la mesure de la perte de masse d'un échantillon métallique soumis à une attaque corrosive. En pesant l'échantillon avant et après l'exposition à un environnement corrosif, on détermine la masse perdue chaque durée et par conséquent, la vitesse de corrosion :

$$V_{corr} = \frac{\Delta m}{t.s}$$

##### III.5.1.2 Procédure expérimentale

Solution corrosive utilisée : Acide sulfurique dilué ( $H_2SO_4$ ), solution basique (Na Cl)

Durée d'immersion : 1h, 3h, 5h ,9h pour chaque concentration 1% ,3% et5%

Température : ambiante

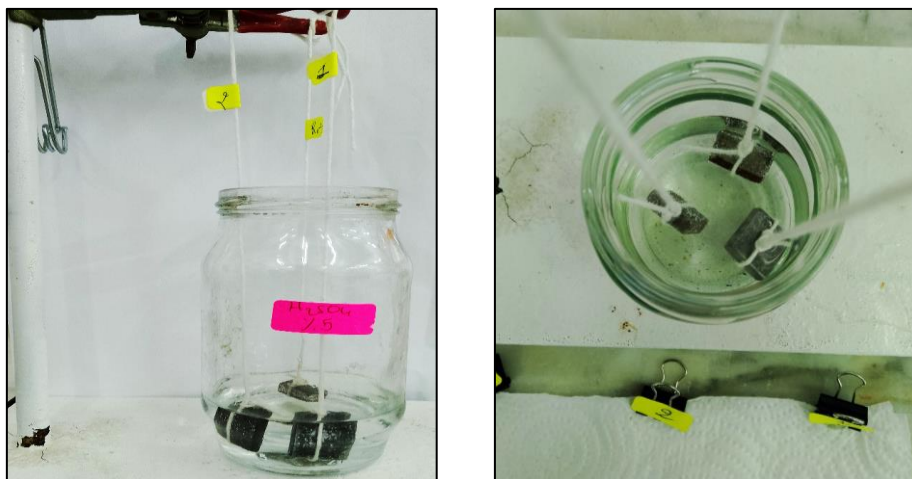


Figure III.9 : Les échantillons immergés dans la solution.

##### III.5.1.3 Résultats expérimentaux et discussions

✓ Echantillon Nu

Tableau III.6 : Vitesses de corrosion selon le milieu corrosif de l'échantillon Nu.

Solution	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		NaCl		
	1%	3%	5%	3%	5%
V <sub>corrosion</sub>					
1 h	1,3	7,11	17,57	16,27	16,53
3 h	3,4	8,8	18	17,22	17,2
5 h	4,1	11,9	20,1	17,9	18,7
7 h	5,2	13,6	21,4	18,5	20,23
9 h	7	14,7	22,1	19	21

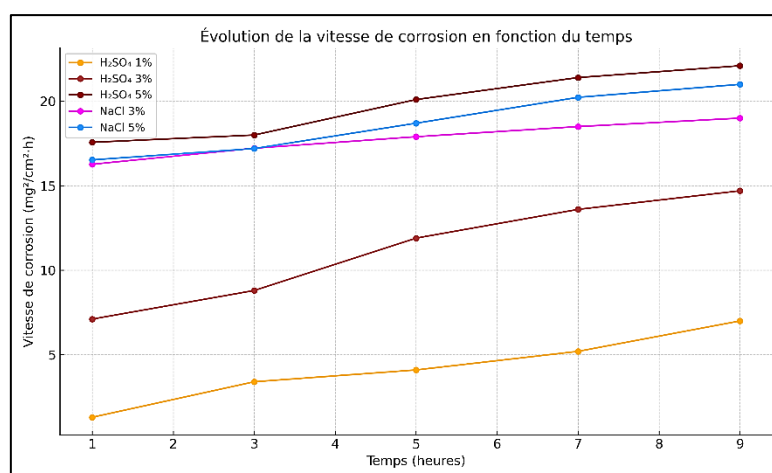


Figure III.10 : Courbe des vitesses de corrosion de l'échantillon Nu selon le milieu corrosif

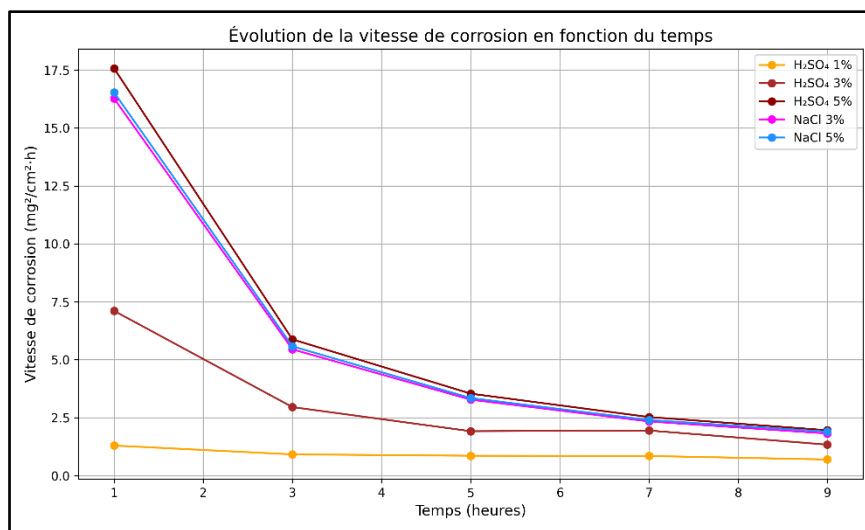
➤ **Interprétation**

- La vitesse de corrosion augmente avec le temps.
- L'acide sulfurique à 5 % est le plus corrosif, suivi du NaCl à 5 %.
- Le H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> à 1 % est le moins agressif.
- Plus la concentration est élevée, plus la corrosion est rapide.

✓ échantillon acier revêtu

**Tableau III.7 :** Vitesses de corrosion selon le milieu corrosif pour l'échantillon acier revêtu.

V <sub>corosion</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>			Na Cl	
	1%	3%	5%	3%	5%
<b>1 h</b>	1,3	7,11	17,57	16,27	16,53
<b>3 h</b>	0,92	2,96	5,88	5,45	5,58
<b>5 h</b>	0,86	1,92	3,54	3,28	3,35
<b>7 h</b>	0,85	1,95	2,53	2,34	2,4
<b>9 h</b>	0,7	1,34	1,96	1,82	1,9



**Figure III.11 :** Vitesses de corrosion de l'échantillon acier revêtu selon le milieu corrosif

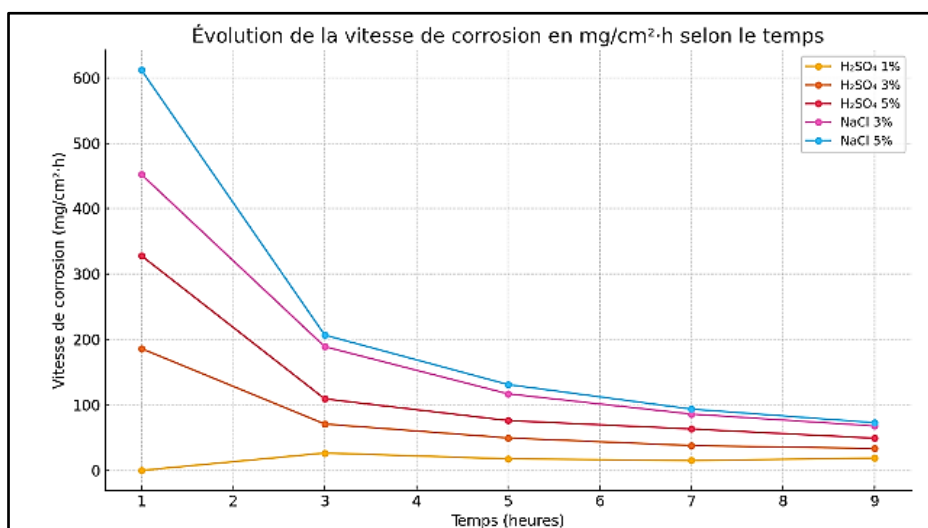
➤ **L'interprétation**

La vitesse de corrosion est élevée au début, puis elle diminue avec le temps. Cela est dû à la formation de produits de corrosion qui freinent l'attaque du métal.

✓ **Echantillon à base de cuivre**

**Tableau III.8:** Vitesses de corrosion selon le milieu corrosif pour l'échantillon à base de cuivre.

Solution	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		NaCl		
	1%	3%	5%	3%	5%
<b>1 h</b>	0	186,17	328,01	452,12	611,7
<b>3 h</b>	26,595	70,922	109,33	189,12	206,85
<b>5 h</b>	17,73	49,645	76,24	117,02	131,2
<b>7 h</b>	15,1975	38	63,32	86,11	93,71
<b>9 h</b>	18,7155	33,49	49,25	67,96	72,89



**Figure III.12:** Courbe des vitesses de corrosion de l'échantillon à base de cuivre selon le milieu corrosif.

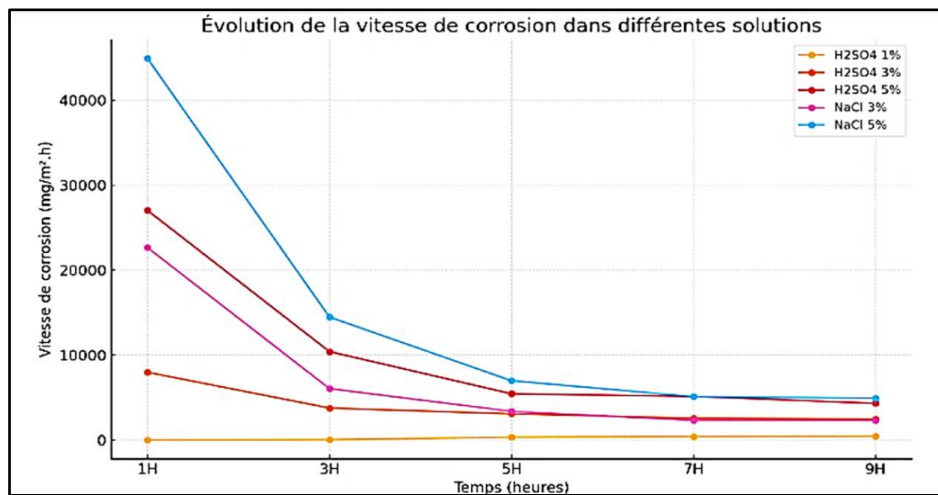
➤ **L'interprétation**

Les vitesses de corrosion sont faibles et diminuent avec le temps, ce qui est logique puisque le cuivre est plus résistant à la corrosion dans ces milieux.

✓ **Echantillon d'aluminium revêtu**

**Tableau III.9 :** Vitesses de corrosion selon le milieu corrosif pour l'échantillon d'aluminium revêtu.

Solution	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>			NaCl	
	1%	3%	5%	3%	5%
<b>1 h</b>	0	7956,2	27007,3	22627,73	44890,51
<b>3 h</b>	24,33	3746,95	10389,3	6034,06	14452,55
<b>5 h</b>	321,16	3065,7	5423,35	3357,66	6963,5
<b>7 h</b>	385,81	2544,31	5109,48	2294,05	5088,63
<b>9 h</b>	432,6	2465,53	4298,46	2290,64	4903,48



**Figure III.13 :** Vitesses de corrosion de l'échantillon d'aluminium revêtu selon le milieu corrosif

➤ **Interprétation**

- La vitesse de corrosion est très élevée au début, surtout dans les solutions NaCl concentrées.
- Elle diminue avec le temps, mais reste relativement importante.
- Le revêtement partiel ne suffit pas à protéger efficacement tout le métal.
- Une pile galvanique peut se former entre la zone revêtue et non revêtue, ce qui accélère la corrosion

## III.5.2 Méthode électrochimique

### III.5.2.1 Principe

-Cette méthode permet de mesurer la vitesse de corrosion en suivant le comportement électrochimique d'un métal immergé dans un électrolyte.

Deux types d'analyses sont effectués :

- **Courbes de Tafel** (polarisation)
- **Spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS)**

### III.5.2.2 Dispositif expérimental

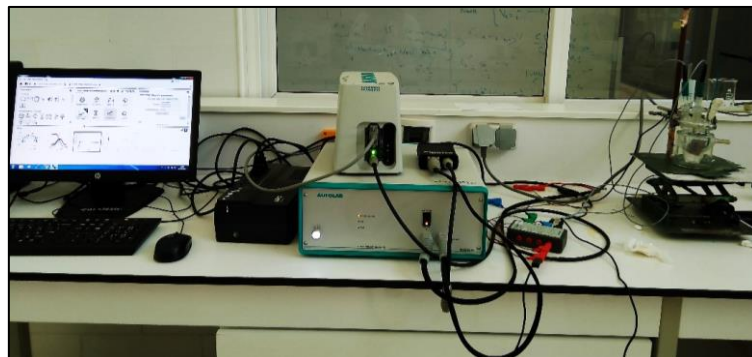
Les mesures électrochimiques ont été réalisées à l'aide d'une chaîne électrochimique de type

AUTOLAB, connectée à un ordinateur.

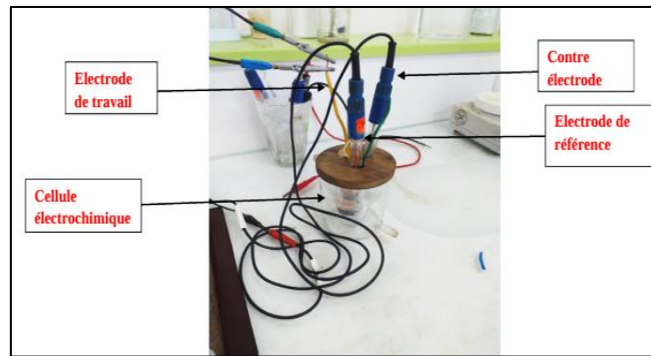
Le système comprend :

- Une électrode de travail (l'échantillon encapsulé)
- Une électrode de référence
- Une électrode auxiliaire

L'ensemble a été immergé dans une solution d'acide sulfurique  $H_2SO_4$  de concentration (1% ,3%et5%).



**Figure III.14** : Chaîne de corrosion.



**Figure III.15** : Schéma de la cellule électrochimique

➤ **Conditions d'essai**

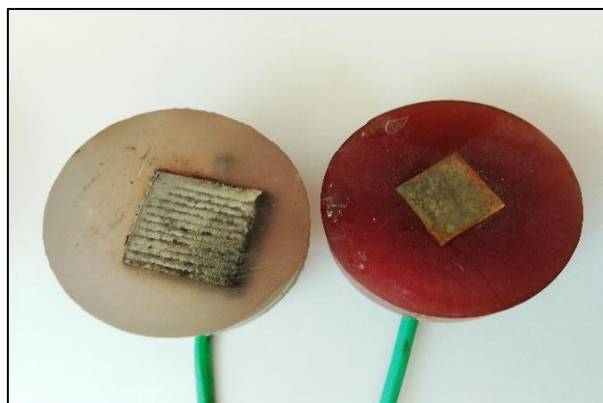
Solution utilisée : Acide sulfurique dilué ( $H_2SO_4$ )

Durée d'acquisition : 30 min

➤ **Préparation des échantillons pour les essais électrochimiques**

Pour assurer une mesure fiable et reproductible lors des tests électrochimiques, les échantillons ont été préparés comme suit :

- Un fil conducteur a été solidement fixé à l'échantillon pour assurer la connexion avec l'appareil de mesure.
- L'échantillon a été placé dans un moule en veillant à ce que seule la surface traitée par laser soit orientée vers le fond (c'est-à-dire, la future surface d'analyse).
- Une résine thermodurcissable a été préparée en mélangeant 20 ml de résine avec 8 gouttes de durcisseur, puis versée dans le moule.
- Le mélange a été laissé au repos pendant 24 heures afin que la résine devienne complètement solide.
- Une fois durcie, la résine a été retirée de moule. La surface traitée par laser, maintenant visible en bas, a été polie manuellement avec des papiers abrasifs de granulométries croissantes afin d'exposer une surface lisse et propre pour l'analyse.



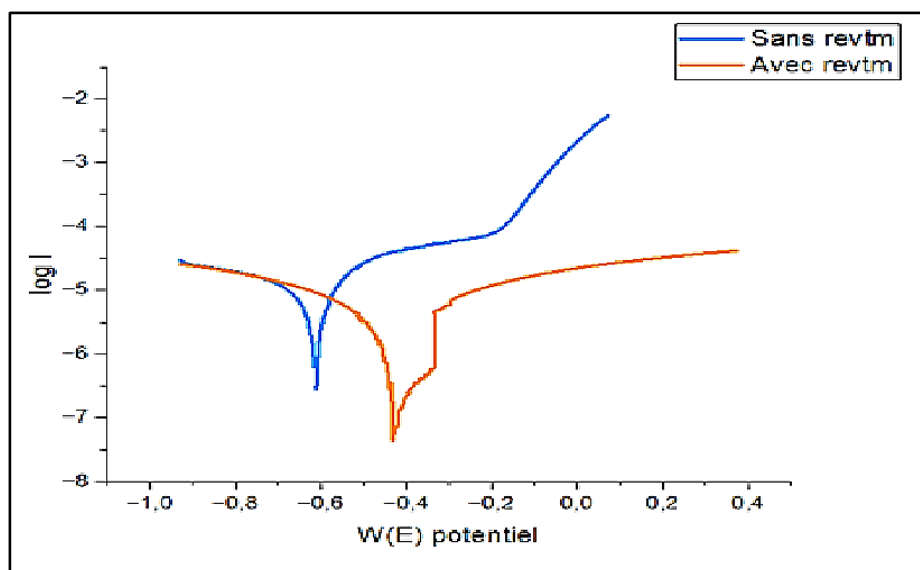
**Figure III.16 :** Enrobage des échantillons métalliques par une résine thermodurcissable pour les essais électrochimiques

### III.5.2.3 Résultats et discussions

- **Etude électrochimique comparative entre l'échantillon revêtu et Nu**

**Tableau III.10:** Paramètres de polarisation potentiodynamique pour les échantillons revêtus et non revêtu

Type d'échantillon	$E_{(I=0)}$ (mV)	$R_p$ (ohm.c m <sup>2</sup> )	$I_{corr}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$\beta_a$ , mV	$\beta_c$ , mV	$E$ (%)
Echantillon sans revêtement	-620,43	7170,8	4, 4208 E-03	0,12041	185,35	0%
Echantillon avec revêtement	-423,91	26653	3,8424 E-03	523,55	429,07	62%



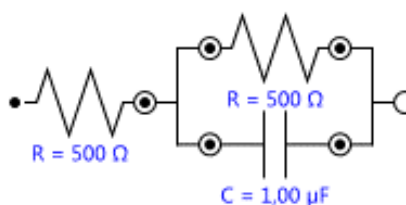
**Figure III.17 :** Courbes de Tafel des échantillons avec et sans revêtement

➤ **Interprétation**

D'après les résultats obtenus, nous pouvons faire les remarques suivantes :

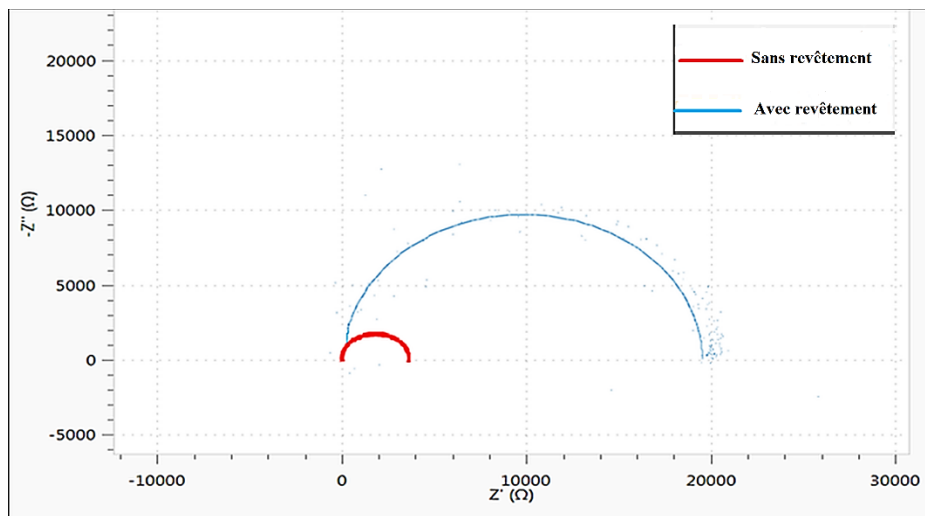
- La courbe est déplacée vers la valeur plus noble, c'est-à-dire joue le rôle d'un revêtement anodique.

➤ **Le circuit pour l'échantillon sans revêtement**



**Tableau III.11:** Paramètres électrochimiques déterminés à partir des courbes de Nyquist pour des échantillons avec et sans revêtement

Type d'échantillon	$R_s$ (Ohm)	$R_{tc}$ (Ohm)	$Q$ (F.S $^{(a-1)}$ )	E (%)
Sans revêtement	4,5198	4281,8	1,6137 E-06	0
Avec revêtement	101,56	18635	2,0647 E-05	62%



**Figure III.18 :** Diagrammes d'impédance électrochimique (EIS) des échantillons avec et sans revêtement

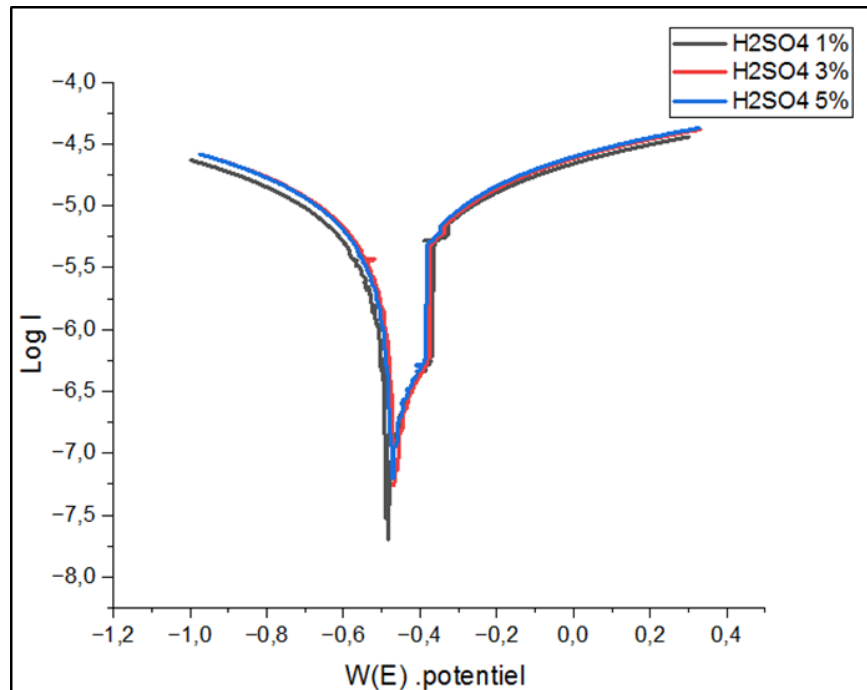
### ✓ Interprétation

Les diagrammes d'impédance en représentation de Nyquist présentés sur la figure XX tracés en l'absence et en présence d'un revêtement montrent l'existence de boucle capacitive pour les trois concentrations, ce qui indique que, le processus de corrosion a été contrôlé par un seul phénomène qui est le transfert de charge. Nous observons que la taille de la boucle capacitive augmente avec application d'un revêtement à base de nickel. L'augmentation de la taille de la boucle est liée à la formation d'une couche protectrice sur la surface de l'acier C1020.

- Etude électrochimique pour l'échantillon revêtu

**Tableau III.12:** Paramètres de polarisation potentiodynamique pour l'échantillon revêtu selon le milieu corrosif.

Concentration	$E_{(I=0)}$ (mV)	$R_p$ (ohm.c $m^2$ )	$I_{corr}$ (mA/cm $^2$ )	$\beta_a$ , mV	$\beta_c$ , mV	E (%)
1%	-642,85	29744	2,7299 E-03	420,52	333,8	64,8%
3%	-423,91	26653	3,8424 E-03	523,55	429,07	62%
5%	-637,36	26266	3,0959 E-03	415,91	340,56	60,1%

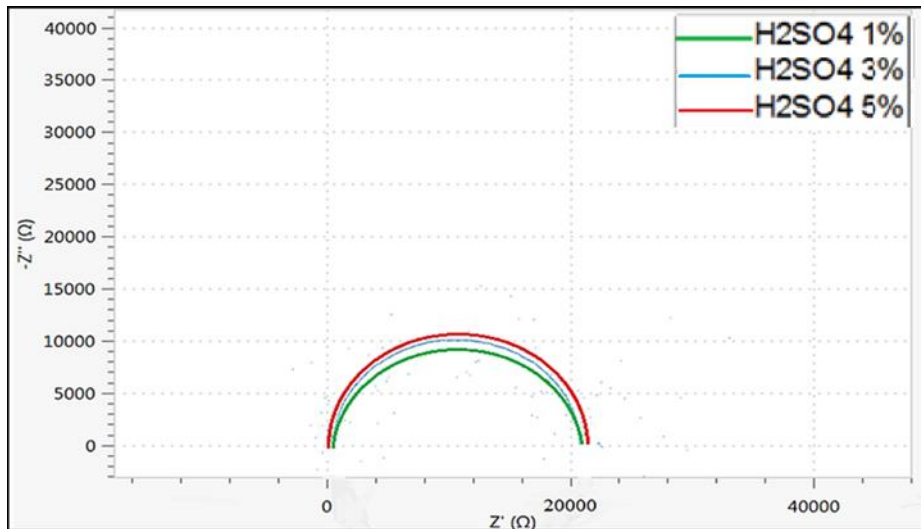


**Figure III.19 :** Courbes de Tafel selon le milieu corrosif pour l'échantillon revêtu

**Tableau III.13:** Paramètres électrochimiques déterminés à partir des courbes de Nyquist

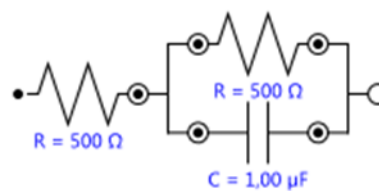
pour l'échantillon revêtu

Concentration	$R_s$ (Ohm)	$R_{tc}$ (Ohm)	$Q$ (F.S <sup>(a-1)</sup> )	E (%)
1%	101,6	20543	1,907E-06	64,8%
3%	101,56	18635	2,0647 E-05	62%
5%	101,63	19457	1,5213E-06	60,1%



**Figure III.20 :** Diagrammes d'impédance électrochimique (EIS) pour l'échantillon avec revêtement

➤ **Le Circuit pour l'échantillon avec revêtement**



**Interprétation**

-Les courbes Tafel et d'impédance montrent que même en solutions concentrées, le revêtement stabilise le comportement électrochimique prouve sa fiabilité.

## **Conclusion Générale**

---

---

## Conclusion Générale

L'ensemble des résultats obtenus à travers les deux approches, gravimétriques et électrochimique, met en évidence l'importance cruciale des revêtements dans la protection contre la corrosion des métaux. Le cuivre s'est distingué par sa grande résistance naturelle à la corrosion, tandis que les métaux plus sensibles comme l'acier C35 nécessitent une protection efficace pour assurer leur durabilité. L'analyse par spectroscopie d'impédance électrochimique a confirmé que l'application d'un revêtement à base de nickel améliore significativement le comportement électrochimique de l'acier, en augmentant la taille de la boucle capacitive et en déplaçant les potentiels vers des valeurs plus nobles. Ces observations traduisent la formation d'une barrière protectrice efficace et le rôle anodique du revêtement.

Cependant, il a également été montré que des revêtements partiels ou mal conçus peuvent aggraver la corrosion en créant des couples galvaniques.

En conclusion, pour assurer une protection optimale, le revêtement doit être homogène, complet et surtout adapté à la nature du métal et à son environnement d'exposition. Une telle approche garantit non seulement une meilleure durabilité des matériaux, mais aussi une performance fiable dans le temps.

## Annexe 1 : Principaux lasers industriels

**Tableau II.1** : Caractéristiques et applications des principaux lasers industriels (IR : infrarouge, UV : ultraviolet)

Type de laser	Milieu actif	Particules excitables	Longueur d'onde	Utilisation	Puissance	Mode d'émission	Remarque
<b>Laser à Milieu Actif semi-conducteur (laser à diode)</b>							
Diodes laser	Semi-conducteur (GaAs, GaAlAs, GaInAsP)	Électrons-trous	Rouge (780 nm)	Lecteurs graveurs de CD/DVD, lecteur de code-barres, imprimantes laser	Quelques mW	Continu ou impulsionnel	
			IR (1300 nm, 1550 nm)	Télécommunications	Dizaines de mW	Continu ou impulsionnel	via fibres optiques
			Rouge – IR	Pompage des lasers à solide	Dizaines de W	Continu ou impulsionnel	
<b>Laser à Milieu Active gazeux</b>							
Hélium – néon	Gaz hélium – neon	Atomes de néon	Rouge (633 nm)	Alignement, guidage d'outil, lecture de code-barres et enregistrement vidéo	10 mW	Continu	
				Spectacles	Quelques W	Continu	
Argon	Gaz d'argon	Ions argon	UV (364 nm)–bleu (488 nm)–vert (514 nm)	Médecine, spectacles, photographie	Quelques W	Continu	
Krypton	Gaz de krypton	Ions krypton	Rouge (647 nm)	Spectroscopie, télémétrie, microlithographie, spectacles	Jusqu'à 300 mW	Continu	
À excimères	Mélange de gaz rares et	Groupement de 2	UV (193 nm, 248 nm)	Chirurgie interne et	$10^7$ à $10^8$ en crête	Impulsionnel (qqs dizaines)	

	halogènes (ArF, KrF, XeCl ou XeF)	atomes	nm, 308 nm, 351 nm)	externe, Nettoyage, décapage et préparation de surface		à qqs centaines de nanoseconde s)	
CO <sub>2</sub>	Mélange gazeux azote- hélium- dioxyde de carbone	Molécules de CO <sub>2</sub>	IR (10600 nm)	Chirurgie interne et externe	Jusqu'à 50 kW	Continu ou impulsionnel	Puissance en fonction des applicatio ns
				Découpe, soudure, gravure des matériaux	Jusqu'à 50 kW	Continu ou impulsionnel	Puissance en fonction de l'épaisseur
<b>Laser à Milieu actif solide</b>							
Nd – YAG	Grenat d'aluminium et yttrium (YAG) dopé au néodyme (Nd)	Ions Nd	IR (1064 nm)	Chirurgie interne et externe	Jusqu'à quelques W	Continu ou impulsionnel	Puissance en fonction des applicatio ns
				Découpe, soudage des matériaux	Jusqu'à 50 kW	Continu ou impulsionnel	
				Nettoyage, décapage et préparation de surface	10 <sup>7</sup> à 10 <sup>8</sup> en crête	Impulsionnel (qqs dizaines à qqs centaines de nanoseconde s)	Puissance en fonction de l'épaisseur
À fibre	Fibre optique dopée avec des ions de terres rares (Yb ou Er)	Ions dopants	IR (1064 nm, 1550 nm)	Marquage	1 0 mW à 50 kW	Continu ou impulsionnel	Tend à remplacer les lasers Nd-YAG
OPO (Oscillateurs	Cristal non linéaire	Ions	Accordab le		Quelques W	Impulsionnel	

---

Paramétriques Optiques)							
----------------------------	--	--	--	--	--	--	--

**Références**

**Bibliographiques**

## Références Bibliographique

---

- [1]: World Steel Association « worldsteel Short Range Outlook October 2024 », Communiqué de presse, World Steel Association, 14 octobre 2024.
- [2] : Landolt Dieter « Corrosion et chimie de surface des métaux », Édition, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1993.
- [3] : Ruiz de Gordo Iban « Définition de la corrosion », Posté par Iban Ruiz de Gordo, CoverSystems, 12 janvier 2021, consulté sur coversystems.net.
- [4] [5] : Mansouri Mohamed El Mokhtar « Étude de la corrosion en utilisant les inhibiteurs », Mémoire de Master, Université (nom à préciser), 25 septembre 2020.
- [6] [8]: Bensaada Rachid « Cours sur la corrosion », Document pédagogique, Université de Biskra,
- [7] : Kherbiche Douadi & Kemer Younes « Étude des causes de la corrosion des bacs de stockage de pétrole », Mémoire de Fin d'Études – Diplôme d'Ingénieur d'État, École Nationale Supérieure des Mines et Métallurgie – Amar Laskri (Université d'Annaba), année universitaire 2019/2020 .
- [9] : StudySmarter « La pile électrochimique », Plateforme StudySmarter,
- [10] : Verma Chandrabhan & Chaudhery Mustansar Hussain « Anticorrosive Nanomaterials: Future Perspectives », Édition Elsevier, 2020.
- [11] : Solnpharma « Types of Corrosion », Site Web, 2022.
- [12] [15] [16] : Swagelok « Types of Corrosion », Guide de sélection des matériaux, Swagelok, 2025.
- [13]: Gibson Stainless & Specialty Inc. « Corrosion Types and Prevention », Blog, Gibson Stainless & Specialty Inc., 2023
- [14] : Rocardier « La corrosion intergranulaire », Cours / fiche technique, Rocardier,
- [17] : « La corrosion galvanique », Présentation Slide, SlidePlayer, consulté le 19 juin 2025.
- [18] : Grammaticopoulos Mélanie « La corrosion filiforme, qu'est-ce que c'est ? Et comment s'en prémunir ? », Article, Qualimarine, 2 juillet 2024
- [19] : h2x Engineering « Erosion-Corrosion », Article de blog, h2x Engineering, consulté le 19 juin 2025.
- [20] : KBS-Connector « Corrosion par frottement », Fiche technique, KBS-Connector, consulté le 19 juin 2025.
- [22] : Kannan M. Bobby & Raja V.S. « Stress corrosion cracking (SCC) of aluminium alloys », in Stress Corrosion Cracking, Elsevier, 2011.
- [23] : AZoM « Corrosion Fatigue – Metallic Corrosion », Article, AZoM, 22 février 2001 (mis à jour le 17 février 2020), consulté le 19 juin 2025
- [24] : Fontana M.G. « Corrosion Engineering (3<sup>e</sup> édition) », Livre, McGraw-Hill, 1986.
- [25] : Uhlig H.H. « Uhlig's Corrosion Handbook (2<sup>e</sup> édition) », Livre, Wiley, 2000.
- [26] : FasterCapital « L'importance de la résistance à la corrosion dans les applications industrielles »,

## Références Bibliographique

---

**Article**, FasterCapital, 2024 (consulté le 19 juin 2025).

[27] [28] : Easy-Inox «Le coût de la corrosion : impact économique et stratégies de mitigation », **Article**, Easy-Inox, consulté le 19 juin 2025.

[29] [30] [31] : Boumleit & Dghamna « Développement d'un revêtement anti-corrosion à base de TMOS sur l'acier doux A9 et l'acier inoxydable C0400-08 via le procédé sol-gel », Mémoire de Master, Université (à préciser), juin 2019.

[32] : Protection Cathodique «La protection cathodique », Guide technique, Protection Cathodique (ProtectionCathodique.net), mai 2025, consulté le 19 juin 2025.

[33] : Zaabar Aida «Électrodéposition, par voltampérométrie et cémentation, des métaux cuivre et zinc en présence d'extrait de la plante d'ortie (*Urtica dioica* L.). Application de l'extrait à la corrosion », Thèse, avril 2015.

[34] : Roberge Pierre R. « Corrosion Engineering », Livre, McGraw-Hill, 2008.

[35]: NACE International «Normes et recommandations sur la protection contre la corrosion en milieu industriel », Guide technique, NACE International,

[36] : ASM International « ASM Handbook, Volume 5: Surface Engineering », Manuel technique, ASM International, 1994.

[37]: Camfil « Effets de la corrosion : AirImage-COR – contrôle en temps réel », Article / fiche produit, Camfil, novembre 2023, consulté le 19 juin 2025.

[38] : Ferros Planes « Comment fonctionne un laser ? Nous l'expliquons d'une manière simple », Article, Ferros Planes, publié le 5 février 2018 (mis à jour le 28 octobre 2023)

[39] : Universal Laser Systems « Sources laser ULS : évolution des lasers CO<sub>2</sub> », Page technique, Universal Laser Systems

[40]: Jeff Hecht « Theodore Maiman's first laser removed from aluminum cylinder used during operation »

[41] [42] [43] [44]: Love Adrian « Introduction to Laser Physics », in Hollow Core Optical Fibre Based Gas Discharge Laser Systems, Springer Theses, Springer Cham, 2018

[45] : Chapitre 2 – Procédés d'obtention des pièces sans enlèvement de matière », Notes de cours, Professions in Science and Technology (Université Ibn Khaldoun Tiaret), année universitaire 2019/2020

[46] [47] [48] : Laura Selliez Optimisation de l'analyse de la matière organique à l'aide d'un nouveau spectromètre de masse basé sur le CosmOrbitrap dans un contexte de future mission spatiale, , Thèse, 2018, consulté via ResearchGate.

[49]: Sacco, Laurent "Can we build a nanometer-scale laser?", Article, Futura-Sciences, 30 Mars 2007

## Références Bibliographique

---

- [50]: French Vocabulary Illustrated (Steve Hannaford) « Faisceau », Blog, French Vocabulary Illustrated, publié le 29 juillet 2012
- [51]: Gatinel, Dr. Damien « PARTICULARITÉS DE LA LUMIÈRE LASER  
« » sur Gatinel.com.
- [52]: Fan Xi'an, Wang Congyi, Zhang Nanfeng, et al. Evaluation of welding process stability and weld formation during laser-MIG hybrid welding. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1986, No. 1, Article 012035, August 2021.
- [53] [59] [60]: Shen Daozhi, Zhang Xinquan, Zhu Limin. Laser processing for electricity generators: Physics, methods and applications. Nano Energy, Vol. 120, February 2024, Article ID: 109182.
- [54] [55] [56] [57] : Edmund Optics « Principaux paramètres d'un système laser », Note d'application, Edmund Optics – Centre de connaissances
- [58]: Leon Goldman & Renato Padilha Martins (Eds.) Lasers for Medical Applications: Diagnostics, Therapy and Surgery, Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, Publié 2013.
- [49] [50]: Ziebel Joévan « Laser operating modes : continuous and pulsed », Article, Laser Protect (centre de formation en sécurité laser), 24 août 2023
- [63] [64] [65] [66 ] : Boussaha E. « Revêtements protecteurs pour la corrosion et la tenue mécanique réalisés sous faisceau laser », Mémoire de Master, Université de Skikda, Faculté de Technologie, 10/04/2012
- [67]: Physics Girl « Applications of Laser Technology: Illuminating the Modern World », Article, Physics Girl
- [68]: Jeanne Magnin « Les futurs du laser », Blog Le Grand Public, 1<sup>er</sup> juin 2022, mis à jour le 30 janvier 2022,