

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI OUZOU  
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION**

*Département de génie mécanique*



**MEMOIRE de fin d'études**  
En vue de l'obtention du diplôme  
**Master en génie mécanique**  
Option : fabrication mécanique et productique

## *Thème*

---

**Etude expérimentale de l'usure d'un corps de  
pompe a boue de forage en acier 35CD4**

---

Proposé par :

*ENAFOR*

Réalisé par :

*Benchabane mustapha  
Medsana hand*

Dirigé par :

*Djerridi rachid*

*Année : 2013/2014*

# *Remerciements*

*Ce travail a été réalisé à L'entreprise nationale de forage « ENAFOR » à Hassi-Messaoud. Nous remercions vivement les responsables de l'ENAFOR, en particulier monsieur SLIMANI Abderehmane.*

*Nous remercions également notre promoteur Monsieur Djerridi.R, pour son aide et sa disponibilité.*

*Nous remercions aussi les travailleurs, de la bibliothèque GM et de Hall technologique de Oued Aïssi en particulier Monsieur Menguellet Ahcene. et Ceux de laboratoire SDM pour l'importance qu'ils donne aux étudiants.*

*Nous remercions chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger ce mémoire de fin d'études.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à :*

❖ *Mes très chers parents :*

*Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.*

*Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux.*

*Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.*

❖ *A mon frère, mes sœurs et mes neveux: Mimane, Lounes, Thiziri, Sarah et Fatima.*

❖ *A Mes oncles, mes tantes et a toute la famille BENCHABANE.*

❖ *A Tous mes amis et tous ceux que j'aime.*

❖ *A Tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce travail.*

*B. Mustapha*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à:*

- ❖ *Mes très chers parents qui m'ont toujours soutenu tout au long de ma vie, qui m'ont orienté dans le bon chemin et qui ont tout fait pour que je réussisse, que Dieu vous bénisse et vous garde ;*
- ❖ *A Mes frères et mes sœurs.*
- ❖ *A Ma grande mère à qui je souhaite une longue vie ;*
- ❖ *A toute ma famille ;*
- ❖ *A tous mes amis(es) et tous ceux que j'aime ;*
- ❖ *A toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail*

*M. Hand*

## Liste des symboles

**K<sub>v</sub>** : le taux d'usure volumétrique

**v** : la perte de volume

**F<sub>N</sub>**: la charge normale

**d** : la distance de glissement

**e<sub>f</sub><sup>\*</sup>** : l'énergie de frottement apparente

**μ** : coefficient de frottement

**Q** : la charge appliquée au contact

**H** : la dureté

**D** : la distance parcourue

**U** : le volume usé

**K** : coefficient d'usure

**E<sub>f</sub>**: la perte énergétique

**(Q<sub>si</sub>)** : source interne

**(Q<sub>i</sub>)** : débit interne

**(Q<sub>e</sub>)** : débit externe

**(Q<sub>r</sub>)** : débit de recyclage

**(Q<sub>u</sub>)** : débit d'usure

**(Q<sub>se</sub>)** : débit source externe

**Q** : charge appliquée

**T** : effort tangentiel

**t** : température

      : la contrainte

**ε** : la déformation

**V** : la vitesse

**Di** : le diamètre de la course

**x** : la distance parcourue

**ti** : le temps

**N** : nombre de tour par minute

<b>Figure</b>	<b>Nom</b>	<b>Page</b>
	<b>Chapitre I : Généralités sur le forage</b>	
<i>Fig. I.1</i>	Structure de la tour de forage	5
<i>Fig. I.2</i>	Treuil	5
<i>Fig. I.3</i>	Moufles	6
<i>Fig. I.4</i>	Table de rotation	6
<i>Fig. I.5</i>	La tête d'injection	7
<i>Fig. I.6</i>	Les Tiges	7
<i>Fig. I.7</i>	Le trépan	8
<i>Fig. I.8</i>	Pompe triplex	9
<i>Fig. I.9</i>	Pompe duplex	10
<i>Fig. I.10</i>	Les différentes parties de la pompe	11
<i>Fig. I.11</i>	Couple d'engrenage	12
<i>Fig. I.12</i>	L'embellage	12
<i>Fig. I.13</i>	Partie hydraulique	13
<i>Fig. I.14</i>	Le piston	13
<i>Fig. I.15</i>	Les chemises	13
<i>Fig. I.16</i>	Le clapet et son siège	14
<i>Fig. I.17</i>	Les corps des pompes	14
<i>Fig. I.18</i>	Système de circulation de la boue	15
	<b>Chapitre II: Généralités sur les aciers</b>	
<i>Fig. II.1</i>	Structure cristalline de Fer $\alpha$	17
<i>Fig. II.2</i>	Structure cristalline de Fer $\gamma$	17
<i>Fig. II.3</i>	diagramme fer carbone	19
<i>Fig. II.4</i>	Cycle d'un traitement thermique	23

<i>Fig. II.5</i>	Schéma de coalescence de la cémentite	26
<i>Fig. II.6</i>	Différentes pénétration de trempe d'une section ronde à différentes vitesses critiques de trempe martensitique	28
<i>Fig. II.7</i>	Essai de traction	30
<i>Fig. II.8</i>	Eprouvettes de traction	31
<i>Fig. II.9</i>	Courbe de traction	32
<i>Fig. II.10</i>	Module d'Young	33
<i>Fig. II.11</i>	Essai Brinell	35
<i>Fig. II.12</i>	Essai Rockwell	36
<i>Fig. II.13</i>	Essai Vickers	36
<b>Chapitre III : Généralité de la tribologie</b>		
<i>Fig. III.1</i>	Représentation schématique d'un tribosystème	37
<i>Fig. III.2</i>	Définition des coefficients de frottement	38
<i>Fig. III.3</i>	Classement des irrégularités de surface	39
<i>Fig. III.4</i>	Exemple de représentation tridimensionnelle de rugosité	40
<i>Fig. III.5</i>	Graphes « pression/vitesse de glissement » limite pour différents matériaux en frottement sec à température ambiante (contact conforme ; antagoniste acier pour fer et bronze frittés)	43
<i>Fig. III.6</i>	rapprochement des solides : effets et conséquences	45
<i>Fig. III.7</i>	Circuit tribologique de Berthier	45
<i>Fig. III.8</i>	définition du troisième corps au sens cinématique	47
<i>Fig. III.9</i>	Mécanisme d'usure abrasive à deux corps, d'usure abrasive à trois corps et d'usure adhésive	48
<i>Fig. III.10</i>	Mécanisme d'usure par fatigue	49
<i>Fig. III.11</i>	Usure corrosive	49
<i>Fig. III.12</i>	Mécanismes de l'érosion d'une surface par des particules solides contenues dans un fluide en mouvement	50

<b>Chapitre IV: Techniques expérimentales</b>		
<i>Fig. IV.1</i>	Le corps de pompe endommagé	52
<i>Fig. IV.2</i>	Duromètre wopert dia testor RC	54
<i>Fig. IV.3</i>	Micro Duromètre	55
<i>Fig. IV.4</i>	L'éprouvette de traction	55
<i>Fig. IV.5</i>	Scie mécanique utilisée	56
<i>Fig. IV.6</i>	Fraiseuse verticale	56
<i>Fig. IV.7</i>	Machine de traction	57
<i>Fig. IV.8</i>	Cycle d'un traitement thermique	57
<i>Fig. IV.9</i>	Four électrique utilisé	58
<i>Fig. IV.10</i>	Polisseuse à deux disques utilisée pour le dégrossissage	59
<i>Fig. IV.11</i>	Polisseuse à un disque utilisée pour la finition	59
<i>Fig. IV.12</i>	Microscope optique	59
<i>Fig. IV.13</i>	Microscope Electronique à Balayage	60
<i>Fig. IV.14</i>	Balance électronique	61
<i>Fig. IV.15</i>	La géométrie des disques	61
<i>Fig. IV.16</i>	La géométrie des pions	61
<i>Fig. IV.17</i>	Couple tribologique pion-disque	62
<i>Fig. IV.18</i>	Rugosimètre à palpeur	62
<i>Fig. IV.19</i>	Le tribomètre	63
<b>Chapitre V. résultats et discussions</b>		
<i>Fig. V.1</i>	Microstructure de l'acier de référence	64
<i>Fig. V.2</i>	Microstructure <b>35CD4</b> a l'état recuit	65
<i>Fig. V.3</i>	La microstructure de l'acier <b>35CD4</b> a l'état trempé	65
<i>Fig. V.4</i>	La courbe de traction de l'acier de référence	68
<i>Fig. V.5</i>	La courbe de traction de l'acier <b>35CD4</b> a l'état recuit	69

<i>Fig. V.6</i>	La courbe de traction pour l'acier <b>35CD4</b> trempé	70
<i>Fig. V.7</i>	Courbes de traction superposées pour les 3 états d'acier qu'en a étudié	71
<i>Fig. V.8</i>	Evolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 1,373 m/s	72
<i>Fig. V.9</i>	Evolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 1,373 m/s	73
<i>Fig. V.10</i>	Evolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 1,373 m/s	73
<i>Fig. V.11</i>	Regroupement des trois courbes des trois états d'aciers étudié d'évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 1,373 m/s	74
<i>Fig. V.12</i>	Evolution de la perte de masse en fonction de la vitesse	76
<i>Fig. V.13</i>	Evolution de la perte de masse en fonction de la vitesse	76
<i>Fig. V.14</i>	Evolution de la perte de masse en fonction de la vitesse	77
<i>Fig. V.15</i>	Regroupement des trois courbes d'évolution de la perte de masse en fonction de la vitesse	77
<i>Fig. V.16</i>	Evolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue	79
<i>Fig. V.17</i>	Evolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue	80
<i>Fig. V.18</i>	Evolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue	80
<i>Fig. V.19</i>	Regroupement des trois courbes des trois états d'acier étudié d'évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue	81
<i>Fig.V.20</i>	Observation MEB de l'échantillon en acier de référence <b>(p=39,24N, d=4942m, V=1,373m/s)</b>	81
<i>Fig.V.21</i>	Observation MEB de l'échantillon en acier 35 CD4 à l'état trempé <b>(p=39,24N, d=4942m, V=1,373m/s)</b>	82
<i>Fig.V.22</i>	Observation MEB de l'échantillon en acier 35 CD4 à l'état recuit <b>(p=39,24N, d=4942m, V=1,373m/s)</b>	82
<i>Fig.V.23</i>	Observation MEB de l'échantillon en acier de référence <b>(p=78,48N, d=4000m, V=1,38m/s, t=48min)</b>	83

<i>Fig. V.24</i>	Observation MEB de l'échantillon en acier 35 CD4 à l'état trempé ( <b>p=78,48N, d=4000m, V=1, 38m/s, t=48min</b> )	83
<i>Fig. V.25</i>	Observation MEB de l'échantillon en acier 35 CD4 à l'état recuit ( <b>p=78,48N, d=4000m, V=1, 38m/s, t=48min</b> )	84
<i>Fig. V.26</i>	Observation MEB de l'échantillon en acier de référence ( <b>p=78,48N, d=8000m, V=0,484m/s, t=275min</b> )	84
<i>Fig. V.27</i>	Observation MEB de l'échantillon en acier 35CD4 a l'état trempé ( <b>p=78,48N, d=8000m, V=0,484m/s, t=275min</b> )	85
<i>Fig. V.28</i>	Observation MEB de l'échantillon en acier 35CD4 a l'état recuit ( <b>p=78,48N, d=8000m, V=0,986m/s, t=137min</b> )	85

<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
	<b>Chapitre II: Généralités sur les aciers</b>	
<i>Tab. II.1</i>	Coefficient multiplicateur.	21
<i>Tab. II.2</i>	Durée approchée d'austénitisation dans différents types de fours	27
	<b>Chapitre IV: Techniques expérimentales</b>	
<i>Tab. IV.1</i>	La composition chimique de l'acier 34CD4	53
	<b>Chapitre V : Résultats et discussions</b>	
<i>Tab. V.1</i>	Essai brinell( <b>HB</b> ) avec une charge de <b>100 kg</b> . Pour l'acier 35CD4 à différents états	66
<i>Tab. V.2</i>	Essai de dureté( <b>HRA</b> ) avec une charge de <b>60kg</b> pour l'acier 35CD4 à différents états	66
<i>Tab. V.3</i>	Essai de dureté <b>HV</b> avec une charge de <b>30 kg</b> pour l'acier 35CD4 à différents états	66
<i>Tab. V.4</i>	L'essai de dureté <b>HV</b> avec une charge de <b>60 kg</b> pour l'acier 35CD4 trempé a la température de 850C° suivi de traitement de revenu à des températures déférentes à différents états	67
<i>Tab. V.5</i>	Résultats de l'essai de microdureté <b>HV</b>	68
<i>Tab. V.6</i>	Les résultats obtenus, la perte de masse en fonction de la charge (pression)	72
<i>Tab. V.7</i>	Les résultats obtenus, la perte de masse en fonction de la vitesse	75
<i>Tab. V.8</i>	Les résultats obtenus, la perte de masse en fonction de la distance parcourue	79

## *Sommaire*

<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur le forage</b>	
<b>I.1. Introduction .....</b>	<b>2</b>
<b>I.2. Description de l'appareil de forage .....</b>	<b>2</b>
a) Le matériel de surface .....	2
b) Le matériel de fond .....	3
<b>I.1. Principe de fonctionnement de l'appareil de forage.....</b>	<b>4</b>
✓ la structure de la tour de forage.....	5
✓ Le treuil de forage .....	5
✓ Table de rotation .....	6
✓ La tête d'injection .....	7
✓ Les Tiges .....	7
✓ Le trépan .....	8
✓ La pompe a boue.....	8
a) définition de la pompe.....	8
Triplex (3 pistons) Simple Effet .....	9
Duplex (2 pistons) Double Effet .....	9
b) Composants de chaque partie de la pompe .....	11
b.1) La partie mécanique.....	11
• Le Bâti .....	11
• Couple d'engrenage .....	11
• L'Embiellage.....	12
b.2) Partie Hydraulique.....	13
• Le piston de la pompe triplex .....	13
• Les chemises .....	13
• Le clapet et son siège .....	14
• Les corps des pompes .....	14
c) Système de circulation .....	15
<b>Conclusion.....</b>	<b>16</b>

## **Chapitre II : Généralités sur les aciers**

<b>II.1. Introduction .....</b>	<b>17</b>
<b>II.2. Constituant métallographique .....</b>	<b>17</b>
✓ Fer .....	17
✓ Le fery .....	17
✓ Le fer $\delta$ .....	18
✓ Le carbone .....	18
✓ Le graphite (G) .....	18
✓ L'austénite (A) .....	18
✓ La cémentite (C) .....	18
<b>II .3. Classification des aciers .....</b>	<b>19</b>

II.3.1. Classification des aciers selon le diagramme d'équilibre .....	19
✓ Aciers hypoeutectoïdes .....	20
✓ Aciers eutectoïdes .....	20
✓ Aciers hypereutectoïde .....	20
II.3.2. Classification des aciers selon la norme NF EN 10025-1C10-NF EN 10027 .....	20
II.3.3. Classification des aciers par composition chimique .....	21
✓ Aciers non alliés .....	21
✓ Aciers faiblement alliés .....	21
✓ Aciers fortement alliés .....	21
<b>II.4. Influence des éléments d'addition .....</b>	<b>22</b>
- Aluminium .....	22
- Bore .....	22
- Chrome .....	22
- Cobalt .....	22
- Manganèse .....	22
- Molybdène .....	22
- Nickel .....	22
- Phosphore .....	22
- Plomb .....	22
- Silicium .....	22
- Soufre .....	22
- Tungstène .....	22
<b>II.5. Les aciers et leurs traitements thermiques .....</b>	<b>23</b>
II.5.1. Cycle d'un traitement thermique .....	23
II.5.2. Principaux types de traitements thermiques .....	23
a) Le recuit .....	24
a.1) Recuit demandant des températures supérieures à Ac1 .....	24
✓ Recuit complet .....	24
✓ Le recuit d'homogénéisation .....	24
✓ Recuit de régénération (ou d'affinage structural) .....	25
a.2) Recuit demandant des températures inférieures à ac1 .....	25
✓ Recuit d'adoucissement .....	25
✓ Recuit de coalescence (ou de globalisation) .....	25
✓ Recuit de recristallisation .....	26
✓ Recuit de détente (ou de relaxation) .....	26
b) Trempe .....	26
b.1. Austénitisation .....	27
b.2. Choix du temps de maintien .....	27
b.3. Choix du milieu de trempe .....	28
b.4. Trempabilité .....	28
c) Revenu .....	29
c.1) Revenu à basse température .....	29

c.2) Revenu à température intermédiaire .....	29
c.3) Revenu à haute température .....	29
<b>II.6. Essais mécaniques .....</b>	<b>30</b>
II.6.1. Essai de traction .....	30
✓ Eprouvettes .....	31
✓ Courbe de traction .....	32
✓ Caractéristiques obtenues de l'essai de traction .....	32
<b>II.7. Essais de dureté .....</b>	<b>33</b>
II.7.1. Définition .....	33
II.7.2. Le principe de l'essai pénétration .....	34
II.7.3. Types d'essai .....	34
✓ Essai brinell .....	34
✓ Précautions opératoires .....	35
✓ Dureté Rockwell .....	35
✓ Dureté Vickers .....	36

## Chapitre III : La tribologie

<b>III.1. Introduction .....</b>	<b>37</b>
<b>III.2. Le système tribologique .....</b>	<b>37</b>
<b>III.3. Définition .....</b>	<b>38</b>
III.3.1. Adhésion .....	38
III.3.2. La force d'adhérence .....	38
III.3.3. Coefficient de frottement .....	38
✓ Formulation .....	38
✓ Coefficients de frottement statique et dynamique .....	39
✓ Origine des efforts résistants. Conséquences pratiques .....	39
<b>III.4. Contraintes résiduelles .....</b>	<b>39</b>
<b>III.5. Rugosité .....</b>	<b>39</b>
<b>III.6. Données et paramètres tribologiques .....</b>	<b>41</b>
III.6.1. Taux d'usure .....	41
III.6.2. Valeur du produit $P \times V$ .....	42
III.6.3. Densité d'énergie de frottement .....	44
<b>III.7. Surface .....</b>	<b>44</b>
<b>III.8. Circuit tribologique .....</b>	<b>45</b>
<b>III.9. Le triplet tribologique .....</b>	<b>46</b>
✓ Les premiers corps .....	47
✓ Le troisième corps .....	47
<b>III.10. Principaux mécanismes d'usure des surfaces .....</b>	<b>47</b>
III.10.1. Usure par abrasion .....	48
III.10.2. Usure par adhésion .....	48
III.10.3. Usure par fatigue .....	49
III.10.4. Usure corrosive ou tribochimique .....	49
III.10.5. Usure érosive .....	50

III.10.6.Usure par cavitation .....	50
III.10.7.Usure par fretting .....	50

## **Chapitre IV : Techniques expérimentales**

<b>IV.1.Introduction .....</b>	<b>52</b>
<b>IV.2.Problématique .....</b>	<b>52</b>
<b>IV.3.Acier utilisé.....</b>	<b>53</b>
IV.3.1.Normes européennes .....	53
IV.3.2.Emplois .....	53
<b>IV.4.Essais de dureté .....</b>	<b>53</b>
IV.4.1.Echantillons de dureté .....	53
IV.4.2.Déroulement des essais .....	53
<b>IV.5.Micro Duromètre .....</b>	<b>54</b>
<b>IV.6.Essai de traction .....</b>	<b>55</b>
IV.6.1.Eprouvettes de traction .....	55
IV.6.2.Machines utilisées pour la réalisation des éprouvettes et des échantillons .....	56
✓ Scie mécanique .....	56
✓ Usinage des éprouvettes .....	56
✓ Machine de traction .....	57
<b>IV.7.Traitement thermique effectués sur les éprouvettes .....</b>	<b>57</b>
IV.7.1.Cycle d'un traitement thermique .....	57
IV.7.2.Traitement de trempe .....	58
IV.7.3.Le revenu .....	58
IV.7.4.Le recuit .....	58
IV.7.5.Observation microscopique des échantillons.....	58
IV.7.5.1.Préparation des échantillons .....	58
✓ Le polissage .....	58
✓ Microscope .....	59
IV.7.6.Le microscope électronique à balayage .....	59
<b>IV.8.Essais d'usure .....</b>	<b>60</b>
IV.8.1.Les matériaux utilisés .....	61
✓ Le disque .....	61
✓ Les pions .....	61
✓ Le couple tribologique .....	62
IV.8.3.Mesure de l'état de surface des disques .....	62
IV.8.4.Description du tribomètre .....	62

## **Chapitre V. Résultats et discussions**

<b>V.1 Introduction .....</b>	<b>64</b>
<b>V.2.Observations métallographiques .....</b>	<b>64</b>
a) Acier de référence .....	64
b) Acier 35CD4 a l'état recuit .....	64
c) Acier trempé .....	65

V.2.Résultats de l'essai de dureté .....	66
a. Essai brinell (HB) .....	66
b. Essai de dureté Rockwell (HRA) .....	66
c. Essai de dureté Vickers (HV).....	66
c.1) Essai de dureté HV pour l'acier 35CD4 avec traitement de revenu à des températures différentes .....	67
V.2.1.Resultats de l'essai de micro dureté .....	68
<b>V.3.Résultats de l'essai de traction .....</b>	<b>68</b>
a. Acier de référence .....	68
b. Acier 35CD4 a l'état recuit .....	69
c. Acier 35CD4 a l'état trempé .....	70
<b>V.4. Etude de comportement de l'acier 35CD4 à l'usure .....</b>	<b>71</b>
4.1. L'influence de la charge appliquée (pression) .....	71
4.2. Influence de la vitesse de glissement .....	74
4.3. Influence de la distance parcourue .....	78
<b>V.5.L'observation au microscope électronique à balayage .....</b>	<b>81</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>86</b>

## Introduction générale :

Dans l'industrie pétrolière, les travaux de forage des puits de pétrole et de gaz sont les plus difficiles. Ces travaux exigent une main d'œuvre énorme nécessitant de grands investissements des capitaux.

La technologie de forage des puits de pétrole et de gaz demande l'emploi d'un matériel complexe et des outils modernes, ainsi d'une grande quantité de matériaux, tubes, ciments, réactifs chimiques, etc....

Avec l'augmentation de la profondeur de forage, le volume des travaux de forage et la consommation des pièces d'équipement, d'outils et de matériaux croient considérablement.

La pompe de forage est un équipement principal utilisé dans le forage des puits, puisque la pompe donne un grand débit et une forte pression de la boue pour réaliser un bon forage des puits. Le travail que nous présentons dans ce mémoire porte sur l'usure des corps de pompe à boue de forage triplex constitué d'un matériau en acier faiblement allié **35CD4**.

Ce mémoire est subdivisé en quatre chapitres et une conclusion générale :

- Dans ce premier chapitre, nous présentons les généralités sur le forage, et en particulier, nous sommes intéressés à la pompe à boue qui présente le sujet de notre étude.
- Le deuxième chapitre présente les généralités sur les aciers (les caractéristiques métallurgiques, mécaniques, et traitements thermiques).
- Le troisième chapitre est consacré à la tribologie et l'usure des aciers. Ces deux phénomènes sont liées par des paramètres tribologiques tels : la pression de contact, la durée de fonctionnement (la distance de glissement), la vitesse de glissement, lubrification, la rugosité des surfaces antagonistes...
- Le quatrième chapitre présente les techniques expérimentales utilisées dans ce mémoire pour caractériser notre acier **35 CD4**.
- Les résultats expérimentaux sont données en chapitre cinq. Les résultats donc discutés relativement aux paramètres tribologiques essentiels à savoir : la pression de contact, la durée de fonctionnement (la distance de glissement), la vitesse de glissement ainsi que l'effet des traitements thermiques. Nous trouvons aussi une caractérisation métallographique et mécanique de notre matériaux traité et non traité.

Nous clôturons notre travail par une perspective générale et une conclusion.

# Chapitre I : généralités sur le forage

## I-1 Introduction

Pour récupérer les hydrocarbures le sondage est le seul moyen pour atteindre le réservoir et extraire le pétrole avec un prix de revient le plus minimal possible et dans des meilleures conditions de sécurité. Pour cela plusieurs techniques, procédures, moyens et méthodes ont été élaborés à travers le temps afin de résoudre de nombreux problèmes liés au forage et à la récupération des hydrocarbures.

## I-2 Description de l'appareil de forage

Un appareil de forage doit accomplir dans les meilleures conditions techniques et de sécurité, la réalisation d'un puits reliant un gisement à la surface. Il existe toute une gamme d'appareils : légers, moyens et lourds ; appropriés aux forages.

Le chantier de forage peut être décrit sous forme de deux catégories de matériel :

### a) Le matériel de surface :

Cette catégorie est répartie en plusieurs groupes mettant en œuvre l'outil de forage et assurant la sécurité du puits. [1]

✚ *Les équipements de levage* : Ils permettent

- le contrôle du poids sur l'outil (WOB) ;
- les changements d'outils (manœuvre de garnitures) ;
- la descente des colonnes de casing (tubage) ;
- les levées et les descentes du mât

✚ *Les équipements de rotation* : Ils ont principalement composés de

- la table de rotation ;
- le carré d'entraînement ;
- la tige d'entraînement ;
- raccord d'usure de la tige d'entraînement ;
- la tête d'injection.

✚ *Les équipements de pompage et de circulation* : Ils sont principalement composés de

- Bacs à boue plus équipements ;
- Mixeurs ;
- Agitateur (hélico mélangeurs) ;
- Mitrailleuses de fond et de surface (agitateurs hydrauliques) ;
- Tamis vibrants (shak shakers) ;

- Dessableurs ;
- Mudcleaner ;
- Centrifugeuses ;
- Dégazeur ;
- Les clay-jecteurs ;
- Les goulottes ;
- Les pompes à boues plus accessoires ;
- Soupapes de décharges (ou de sécurité) ;
- Les conduites d'aspiration et vannes ;
- Le flexible d'injection.

Ces équipements assurent la fabrication, le pompage et la circulation ainsi le traitement mécanique des fluides de forage.

✚ *Les équipements de sécurité* : les équipements de sécurité sont constitués de

- La tête du puits ;
- L'accumulateur de pression ;
- Le manifold de duses ;

Ils assurent la sécurité du puits en cas de venue de gaz.

✚ *Les équipements mécaniques* : On distingue

- Les moteurs de sonde ou groupe de force ;
- Les groupes électrogènes ;
- Les compresseurs.

Ils fournissent l'énergie nécessaire au fonctionnement de la sonde de forage.

### b) Le matériel de fond :

Cette partie regroupe l'ensemble de la garniture de forage (drill stem) :

- Outil de forage ;
- Masse tige ;
- Tige de forage ;
- Raccords divers.

**I-3 Principe de fonctionnement de l'appareil de forage :**

L'outil de forage (trépan) est entraîné dans son mouvement de rotation au fond du trou par une colonne de tiges creuses vissées les unes aux autres.

A l'extrémité supérieure de ce train de tiges et à hauteur du plancher de la tour de sondage se trouve la tige d'entraînement qui est creuse également, mais de section extérieure carré ou hexagonale, et qui passe à travers la table de rotation par laquelle elle est entraînée. La table de rotation est entraînée par les moteurs par l'intermédiaire d'un ensemble de transmission par chaîne et roues dentées. L'ensemble du train de sonde est suspendu au crochet de levage par l'intermédiaire de la tête d'injection qui joue le rôle de palier de rotation pour l'ensemble de train de tiges, elle comprend une partie mobile solidaire du train de sonde et une partie fixe solidaire du crochet. Ce crochet de levage peut être manœuvré du haut en bas de la tour métallique grâce à un système de mouflage composé d'un moufle mobile auquel est suspendu le crochet et d'un moufle fixe, fixe en haut du mât de sondage.

Le brin du câble va s'enrouler sur le tambour de treuil de forage lequel est entraîné par les moteurs par l'intermédiaire d'un jeu de transmission et d'embrayages.

Une injection continue de boue dans le trou est assurée pendant toute la durée de forage.

Des pompes à boue aspire la boue des bacs et la refoule par l'intermédiaire de la colonne montante, du flexible et de la tête d'injection dans l'intérieur du train de sonde, la boue, descend ainsi jusqu'au fond du trou, sort par les événements du trépan et remonte par l'espace annulaire compris entre les tiges et le trou foré, cette boue qui remonte du fond du trou est chargée des déblais de forage. Ainsi dès son arrivée à la surface, elle passe aux tamis vibrants qui la sépare des déblais; de là, elle retourne dans les bacs d'aspiration. La boue effectue donc un circuit fermé, durant le forage.

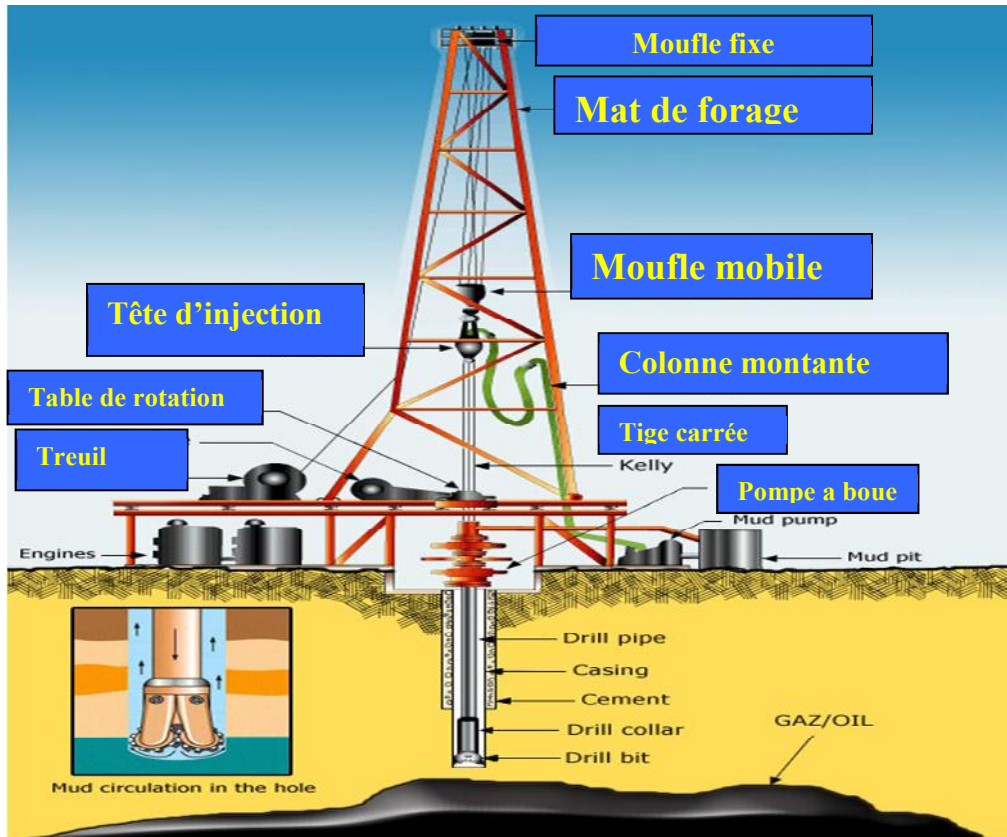
Aux deux tiers (2/3) environ du mât de forage se trouve la passerelle d'accrochage, qui sert au gerbage des tiges dans le mât lors des manœuvres de remontée ou descente.

Le train de tige est donc remonté puis redescendu par éléments de deux ou trois tiges grâce au système de levage qui constituent le treuil, le câble, les moufles et le crochet.

Le mât de forage repose sur une substructure de 3m de hauteur, ce qui élève d'autant le plancher de travail et permet l'installation sur la tête du puits d'un ou plusieurs obturateurs de sécurité. [1]

L'appareil de forage national oilwell :

- ✓ la structure de la tour de forage :



*Figure I.1 : Structure de la tour de forage. [2]*

- ✓ Le treuil de forage :

Le treuil sert à manœuvrer le train de sonde (tiges ou tubages). Le câble de forage est enroulé sur le tambour du treuil qui fournit la force motrice nécessaire au levage et la descente du moufle mobile et sa charge de tiges. Le treuil est équipé aussi d'une boîte à vitesse qui donne au chef de poste le choix des vitesses de remonter des tiges.



*Figure I.2 : treuil.*

✓ Moufles et câbles :

Les moufles sont de deux (02) types : un moufle fixe, et un moufle mobile (ensemble de plusieurs poulies). Suivant l'enroulement ou le déroulement du câble sur le treuil, le moufle se déplace de la table de rotation vers le moufle fixe ou le sens inverse.



**a. Moufle Fixe.**



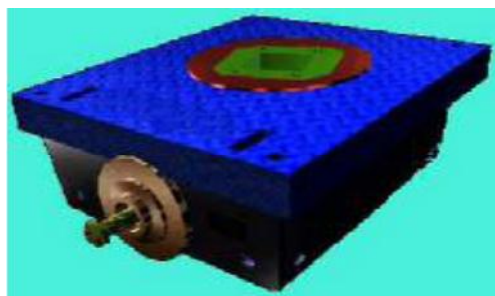
**b. Moufle Mobile.**

*Figure I.3: Moufles.*

✓ Table de rotation :

Les tables de rotations sont destinées à l'entraînement d'une colonne de forage suspendue verticalement ou bien à la réception du couple moteur à réaction de la colonne, créée par le moteur d'attaque.

Une table de rotation se compose d'un bâti fixe supportant une partie mobile intérieure reposant sur la partie fixe par l'intermédiaire d'un roulement à billes principal. [3]



*Figure I.4 : Table de rotation.*

✓ La tête d'injection :

La tête d'injection représente un mécanisme qui relie le mouflage non tournant à la partie qui tourne au cours de forage ; donc elle appartient autant à l'outillage de circulation de boue qu'à l'outillage de rotation, en effet la tête d'injection joue un double rôle :

- Permet la circulation de la boue jusqu'au trépan, animé d'un mouvement de rotation.
- Supporte le poids de la garniture pendant le forage.[3]



*Figure I.5 : La tête d'injection.*

✓ Les Tiges :

Sont des tiges en acier sans soudure, leurs extrémités portent un ronflement extérieur sur lequel on usine un filetage. L'ensemble de ses tiges est surmonté par la tige carrée.



*Figure I.6 : Les Tiges.*

✓ Le trépan:

Le trépan est entraîné dans son mouvement de rotation au fond de trou par une colonne de tiges creuses vissées les unes aux autres. [2]



*Figure I.7 : Le trépan*

✓ **La pompe à boue :**

La pompe à boue joue un rôle très important dans l'opération de forage. Comme elle est le sujet de notre étude alors il est nécessaire de connaître ses constituants et son fonctionnement.

**a) définition de la pompe :**

C'est une machine qui sert à élever le liquide ou le mélange d'un liquide avec des corps solides d'un niveau inférieur à un niveau supérieur, ou à refouler les liquides d'une région à faible pression vers une région à haute pression.

Le fonctionnement d'une pompe consiste à produire une différence de pression entre la région d'aspiration « entrée de la pompe » et la région de refoulement « sortie de la pompe ». Les pompes transmettent au liquide qu'elles véhiculent l'énergie mécanique provenant d'une source d'énergie quelconque extérieure.

Les pompes utilisées dans le domaine pétrolier sont du type :

Triplex (3pistons) Simple Effet :

Ce sont des pompes qui comportent trois cylindres dans lesquels coulisent trois pistons à simple effet. C'est-à-dire que chaque piston aspire et refoule d'un seul côté. Chaque cylindre comporte un clapet d'aspiration et un autre de refoulement à l'avant seulement. Ainsi, pendant un aller et retour du piston, c'est-à-dire un tour complet de l'arbre petite vitesse, un piston refoule une seule fois le volume de la chemise correspondant à sa course. Le même cycle se produit par les autres pistons avec un décalage de 1/3 de tour. [4]

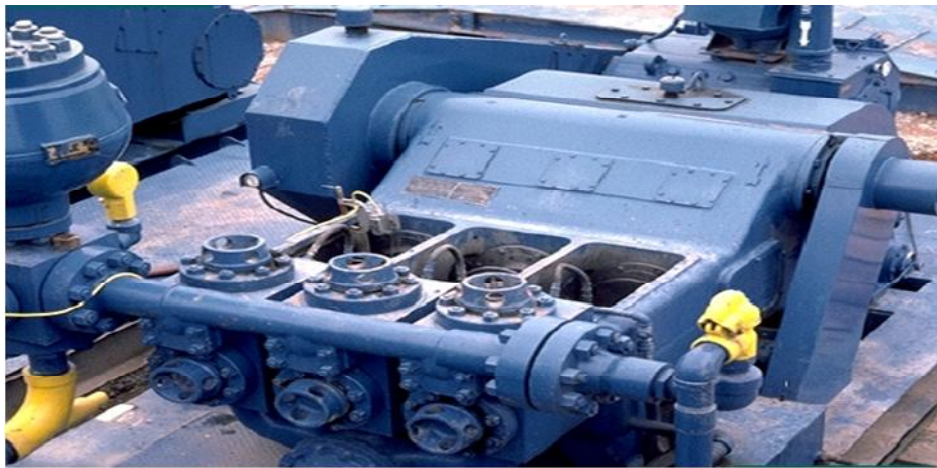


Figure I.8 : pompe triplex.

- Pistons à simple effet :



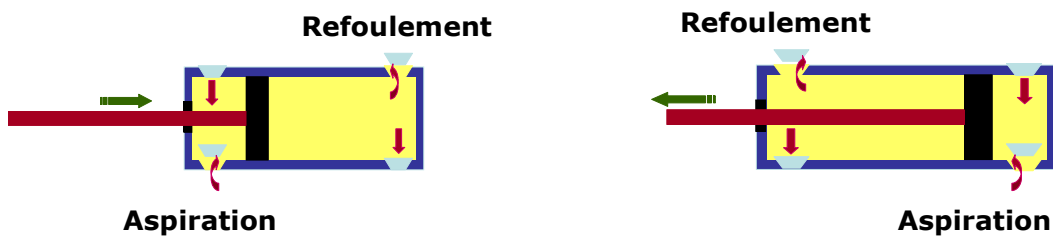
Duplex (2pistons) Double Effet :

Ce sont des pompes qui comportent deux pistons à double effet, c'est-à-dire que chaque piston aspire et refoule des deux côtés. C'est-à-dire que chaque piston aspire et refoule des deux côtés. Ainsi, pendant un aller et retour du piston, c'est-à-dire un tour complet de l'arbre petite vitesse, un piston refoule deux fois le volume de la chemise correspondant à sa course. Le même cycle se produit par l'autre piston avec un décalage de 1/4 de tour. [4]



Figure I.9 : pompe duplex

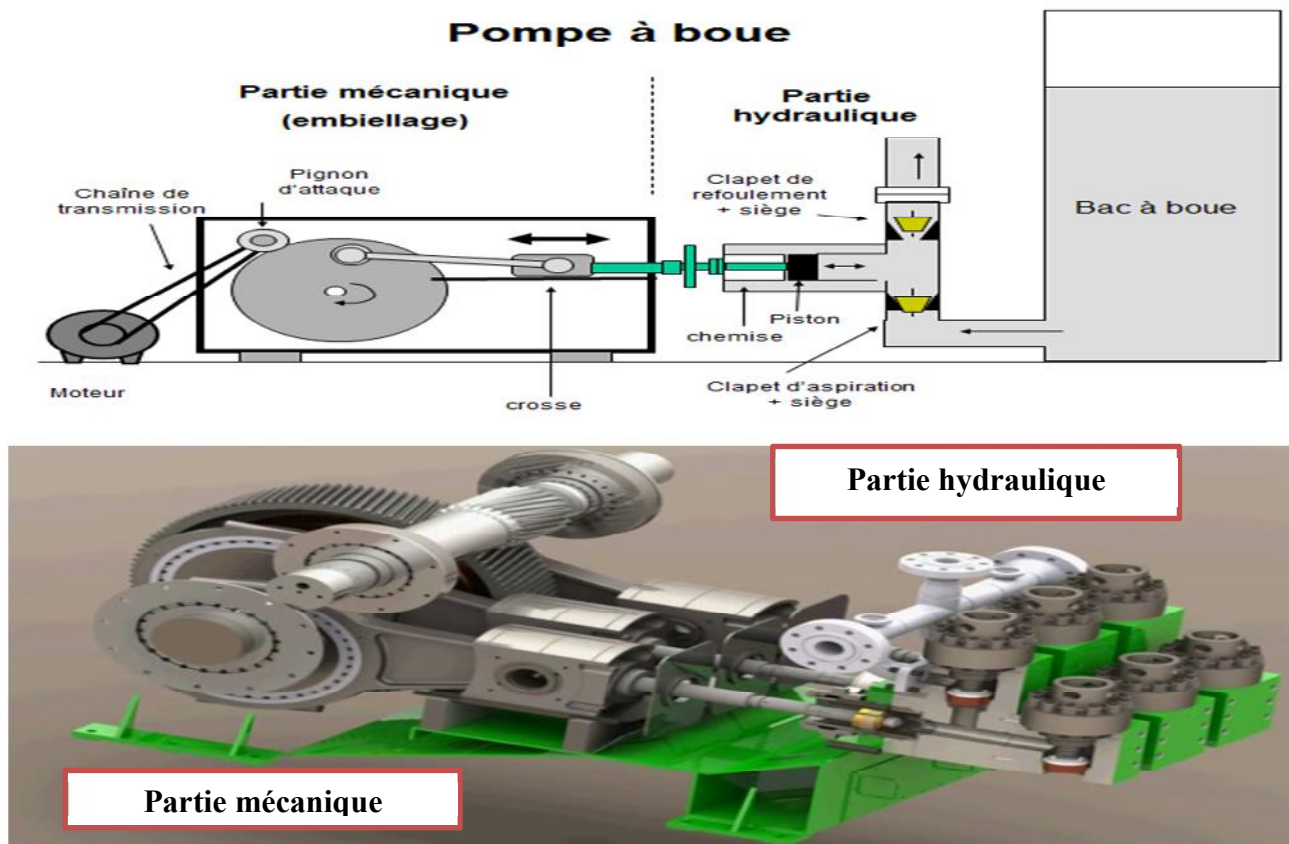
- Pistons à double effet :



Quel que soit son type, une pompe de forage est constituée de 3 parties :

- *partie électrique* : comporte le moteur d'entraînement.
- *Partie Mécanique*: C'est la partie qui assure la transmission de la puissance du moteur d'entraînement au piston de la pompe.
- *Partie Hydraulique*: Elle transforme le mouvement rotatif en un mouvement alternatif. [4]

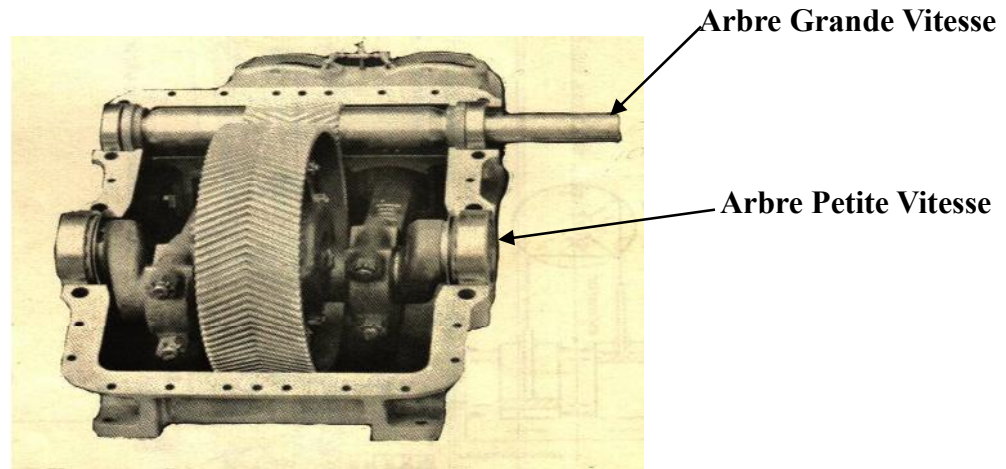
## b) Composants de chaque partie de la pompe :



*Figure I.10 : les différentes parties de la pompe [1]*

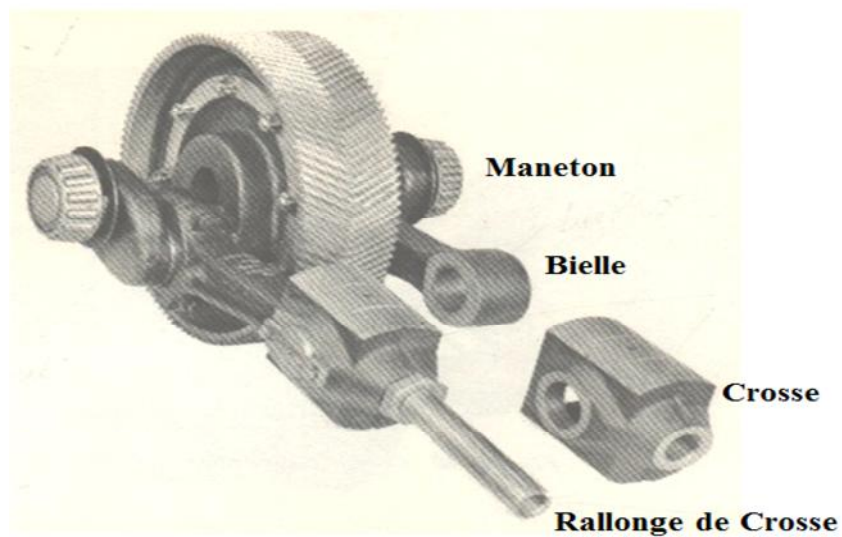
*b.1. La partie mécanique :*

- **Le Bâti :** Il est en acier moulé ou en tôles d'acier assemblées par mécano-soudure. Le bâti sert de carter pour l'huile de graissage. Un couvercle et des portières sont prévus pour permettre une inspection et une réparation rapide. [4]
- **Couple d'engrenage :**
  - Arbre grande vitesse (arbre d'attaque de la pompe)
  - Arbre petite vitesse (arbre manivelle)



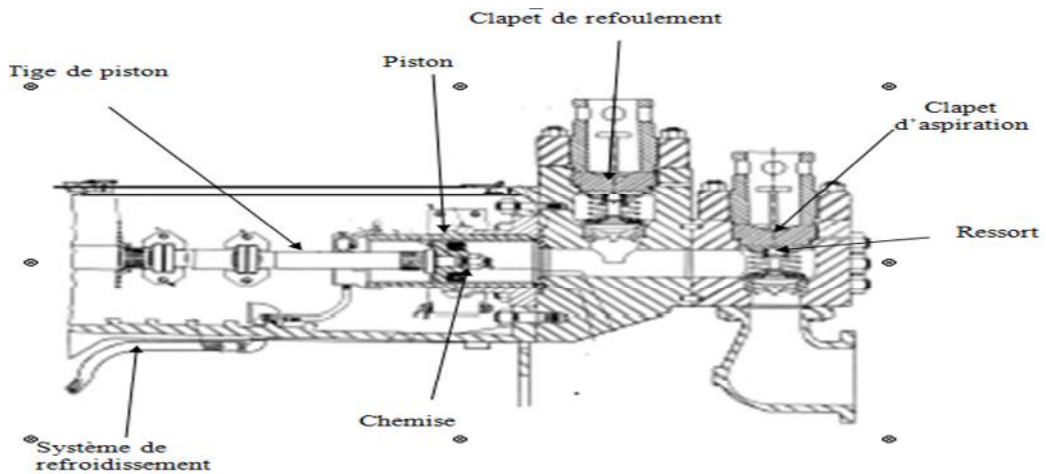
*Figure I.11 : Coupe d'engrenage.*

- **L'Embiellage** : Il comprend
  - Les manetons ou excentriques, calés sur l'arbre manivelle
  - Les bielles reliant les manetons aux crosses
  - Les crosses qui sont les guides du mouvement rectiligne
  - Les rallonges de crosses
  - Les tiges pistons
  - Les pistons



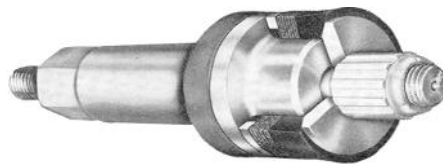
*Figure I.12 : L'Embiellage.*

b.2. *Partie Hydraulique :*



*Figure I.13 : partie hydraulique.*

- **Le piston de la pompe triplex :** comporte une seule garniture .Le corps du piston possède un alésage cylindrique qui permet un montage et un démontage aisés (un simple joint torique assure l'étanchéité). [4]



*Figure I.14 : le piston.*

- **Les chemises:**

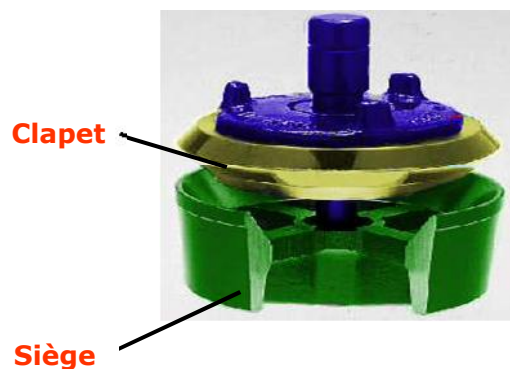
Ce sont des cylindres d'usure amovibles qui couvrent les cylindres alésés dans les corps de la pompe pour éviter leur usure. Les chemises permettent l'utilisation d'une grande gamme de diamètres de pistons (diamètre intérieur de la chemise normalisé par API) afin d'obtenir les débits et pressions exigés par le forage. Pour extraire la chemise on doit se servir d'un arrache chemise. [4]



*Figure I.15 : Les chemises*

- **Le clapet et son siège:**

L'ensemble comprend le siège et le clapet composé du corps, de la garniture et de son système de fixation, un ressort de rappel et deux guides, l'un en haut et l'autre en bas. Le fonctionnement du clapet se fait par la différence de pression et Le ressort facilite le retour du clapet sur son siège.



*Figure I.16 : Le clapet et son siège.*

- **Les corps des pompes :**

C'est à l'intérieure du corps de pompe que l'aspiration et le refoulement de la boue s'effectue. Il reste comme élément essentiel dans la partie hydraulique, mais il reste aussi le problème majeure de la pompe a boue.



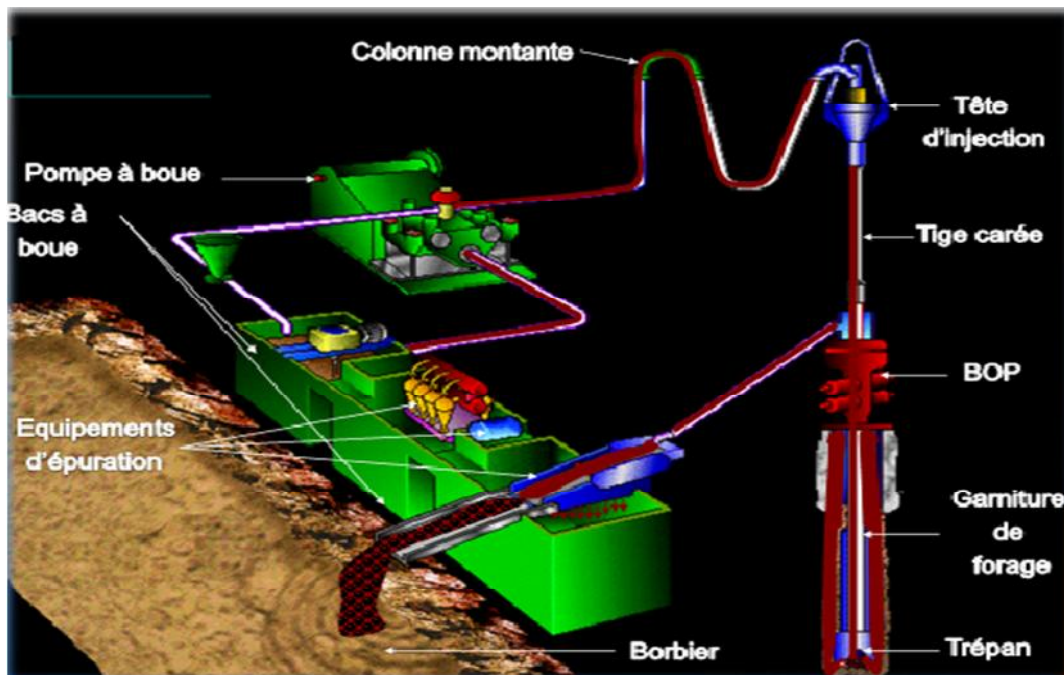
*Figure I.17 : Les corps des pompes*

c) **Système de circulation :**

Généralement, le liquide de forage circule en circuit fermé, à partir des pompes dans le puits et du puits avec les déblais de terrain vers les équipements d'épuration et de nouveau vers les pompes. Afin d'assurer la circulation du liquide, les installations de forage sont équipées d'un système de circulation qui est destiné à amener le liquide de forage sous pression à partir des pompes vers la tête d'injection. Le déplaçant de haut en bas va renvoyer le liquide de tête de puits dans les réservoirs de recueil des pompes, à éliminer les déblais du liquide et à préparer un nouveau liquide de forage. Dans la plus part des cas, les liquides de forage sont préparés directement sur les installations de forage.

Les composants principaux du liquide de forage sont l'argile et l'eau ; les autres réactifs y sont ajoutés en quantités relativement insignifiantes.

Les systèmes de circulation comprennent une ligne de refoulement, une ligne auxiliaire et un système de vidange. La ligne de refoulement se compose de la conduite à haut pression par laquelle le liquide est amené des pompes à la tour de forage, au tube d'équilibre de pression hydraulique et au flexible. Le système de vidange comprend les dispositifs pour épurer et préparer le liquide de forage, réservoirs de recueil de pompe, conduites d'aspiration, filtres, vannes et réservoirs de stockage de liquide de forage. [5]



*Figure I.18 : Système de circulation de la boue.*

**Conclusion :**

Dans l'installation de forage on trouve le système de circulation de la boue de différentes natures afin d'absorber la chaleur dégagée lors du frottement de l'outil de forage avec les roches et de faire monter les déblais des roches vers la surface par circulation en recyclage. Cette circulation nécessite l'utilisation d'un équipement qui est la pompe à boue qui assure un débit important et avec une grande pression.

Pour assurer cette fonction il est impératif de la maintenir en bon fonctionnement qu'est le but de notre étude.

Le but de notre mémoire c'est d'étudier l'usure des corps des pompes. Cette usure est due la présence des particules grains de silice (troisième corps) entre le corps de la pompe et le siège de clapet.

# Chapitre II : généralités sur les aciers

### II.1. Introduction :

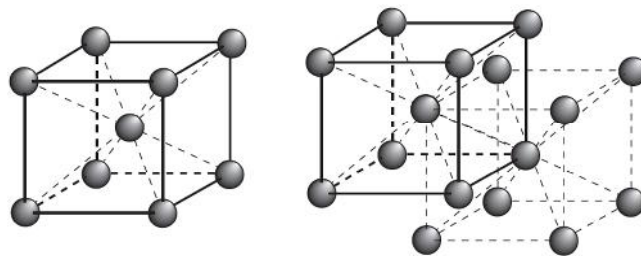
L'acier est un alliage métallique utilisé dans les domaines de la construction métallique et de la construction mécanique. Il est constitué d'au moins deux éléments, le fer, très majoritaire, et le carbone, dans des proportions comprises entre 0,02 % et 2 % en masse.

C'est essentiellement la teneur en carbone qui confère à l'alliage les propriétés du métal qu'on appelle « acier ». Parmi ces matériaux, nous nous attachons dans ce travail à l'acier **35CD4**.

### II.2. Constituant métallographique :

✓ *Fer  $\alpha$* :

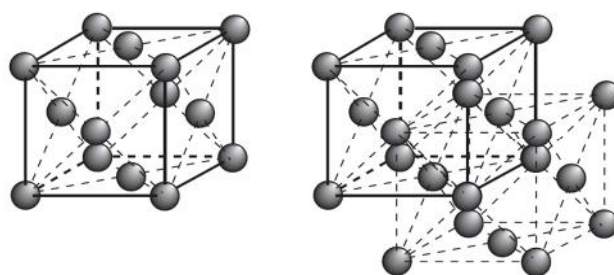
Cette variété existe entre la température ambiante et 912°C. Sa structure est cubique centré (CC) à la température 912°C. Son paramètre cristallin ( $a$ ) = 0.287nm.



**Figure II.1 :** Structure cristalline de *Fer  $\alpha$* .

✓ *Fer  $\gamma$* :

Cette forme existe entre la température 912°C et 1401°C, le fer cristallise dans le réseau cubique à face centrées (cfc) son paramètre cristallin varie entre 0.364 et 0.368 nm.



**Figure II.2 :** Structure cristalline de *Fer  $\gamma$* .

✓ *Fer  $\delta$  :*

Cette forme existe entre la température 1401°C et 1538°C température à la quelle fusionne le fer, sa structure est cubique centres (cc) .son paramètre cristallin varie entre 0.2926 et 0.2935 nm.

✓ *Le carbone :*

C'est un élément polymorphe. Dans les conditions ordinaires, il se trouve sous la forme d'une variété de graphite, mais il peut exister également sous la forme d'une variété métastable de diamant. Le carbone est soluble dans le fer à l'état liquide et solide, mais peut aussi former une combinaison chimique, la cémentite Fe<sub>3</sub>C.

✓ *Le graphite (G) :*

C'est de carbone pur ; il possède un réseau hexagonal. Sa température de fusion est de 3550°C.

En plus de ces diverses forme d'alliage ; entre le fer et le carbone peut se former des solutions solides. Parmi ces solutions solides on cite :

✓ *L'austénite (A) :*

C'est une solution solide de carbone et d'autres inclusions dans le fer  $\gamma$ , La solubilité limite du carbone dans le fer  $\gamma$  est de 2,14 %. L'austénite est stable à haute température, elle est peu dure est relativement malléable (HB = 300). La microstructure de l'austénite est composée de gains polyédriques. Elle peut exister à la température ambiante que dans un état métastable. Elle est antiferromagnétique.

✓ *La cémentite (C) :*

La cémentite ou carbone de fer (Fe<sub>3</sub>C) est une combinaison chimique de fer et de carbone dont la teneur en carbone peut atteindre 6,67 %. Elle est magnétique jusqu'à 210°C et très dure (HB = 700) mais fragile. Elle se cristallise dans un réseau rhomboédrique, sa température de fusion est de 1550°C. La microstructure de la cémentite peut se présenter dans les aciers sous les formes suivantes :

- Lamellaire dans la perlite lamellaire.
- Grains dans les aciers ayant subi un traitement thermique de recuit.
- Précipites inter-granulaires dans les aciers ayant un pourcentage de carbone supérieur à 0,8 %.

Selon le diagramme Fe-Fe<sub>3</sub>C et lors du refroidissement, la cémentite peut exister sous trois différentes formes de liaisons mais avec la même composition chimique. [6]

**II .3.Classification des aciers :** Les aciers sont classés comme suit

*II.3.1. Classification des aciers selon le diagramme d'équilibre :*

D'après le diagramme d'équilibre fer-carbone, on distingue trois types d'aciers :  
 Aciers hypoeutectoïdes, Aciers eutectoïdes, Aciers hypereutectoïdes.

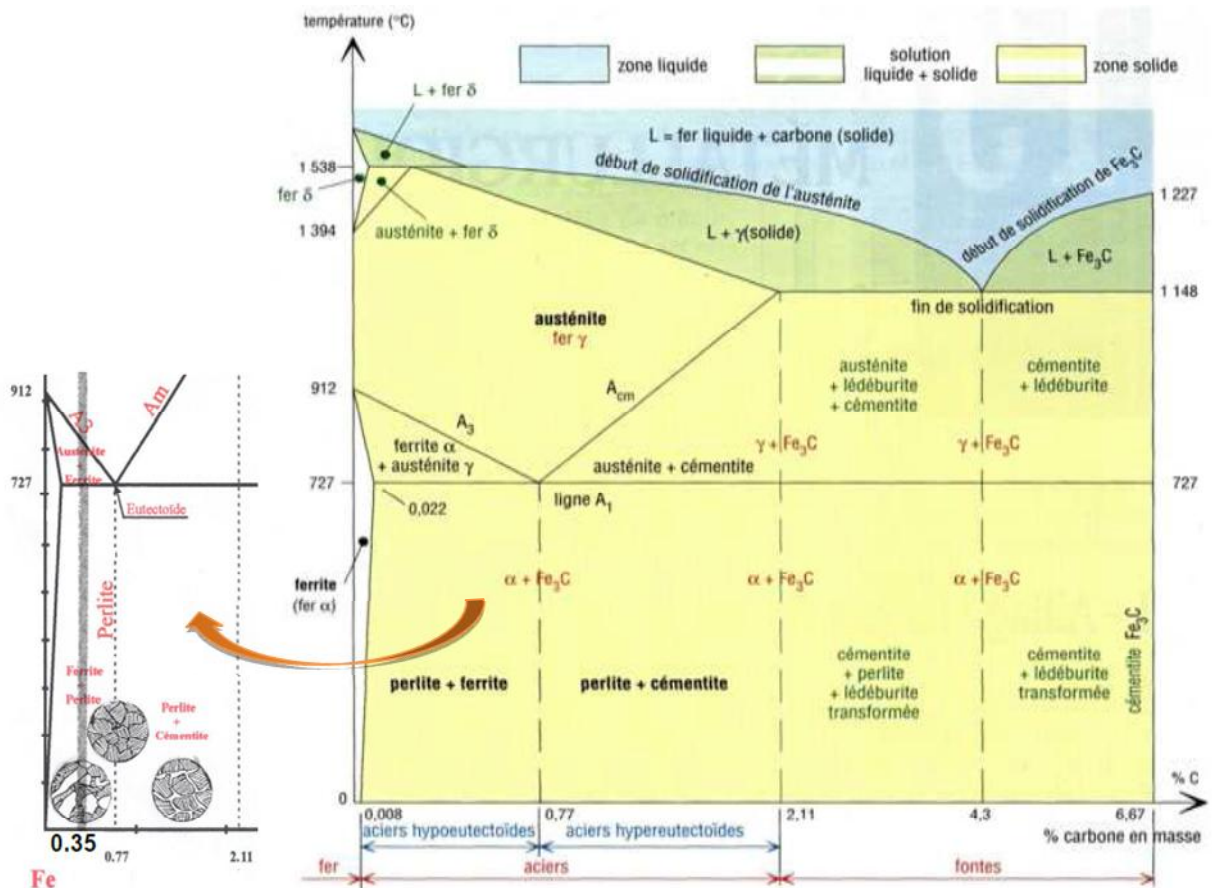


Figure II.3: diagramme fer carbone. [7]

✓ Aciers hypoeutectoïdes :

Ces aciers ont une teneur en carbone inférieure à 0,77%, leur structure est constituée de grains de ferrite et d'agrégats de perlite. Selon les propriétés mécaniques, on peut scinder les aciers hypoeutectoïdes en cinq sous-groupes :

- *Aciers extra-doux* : sont des aciers dont la teneur en carbone est comprise entre 0,05 et 0,1%. Ils contiennent uniquement de la ferrite et une faible quantité de perlite et de cémentite tertiaire.
- *Aciers doux* : la teneur en carbone de ces aciers est comprise entre 0,1 et 0,25%.
- *Aciers mi-doux* : leur teneur en carbone est comprise entre 0,25 et 0,4%.
- *Aciers mi-durs* : leur teneur en carbone est comprise entre 0,4% et 0,6%.
- *Aciers durs* : leur teneur en carbone est comprise entre 0,6% et 0,77%.

✓ Aciers eutectoïdes :

Ce sont des aciers dont la teneur en carbone est égale à 0,77% à la température de 727°C. Leur structure métallographique est constituée de lamelles alternées de ferrite et de cémentite c.à.d. 100 % de perlite.

✓ Aciers hypereutectoïdes :

La teneur en carbone de ce type d'acier est comprise entre 0,77 et 2,11%. Ils présentent une structure constituée de plages de perlite séparées par des lisières de cémentite.

Parmi ces aciers, on distingue les deux sous-groupes :

- *Aciers durs* : leur teneur en carbone est comprise entre 0,8% et 1%.
- *Aciers extra-durs* : leur teneur en carbone varie entre 1% et 2,11%.

II. 3.2. Classification des aciers selon la norme NF EN 10025-1C10-NF EN 10027 :

La norme NF EN 10025-1C10-NF EN 10027 correspond à une désignation symbolique des aciers ou des produits en acier basée soit sur l'emploi et les caractéristiques mécaniques, soit sur la composition chimique.

*II.3.3. Classification des aciers par composition chimique :*

- ✓ Aciers non alliés : (Teneur en Manganèse  $\leq 1\%$ )

La désignation se compose de la lettre **C** suivie de pourcentage de la teneur en Carbone multiplier par 100.

*Exemple :* **C22** Acier non allié de 0.22 % de Carbone.

S'il s'agit d'un acier moulée la désignation est précédée de la lettre **G**.

*Exemple :* **GC40** Acier non allié obtenu par moulage de 0.40 % de Carbone.

*Principaux aciers non alliés :* **C22 C25** de construction mécanique

**C30, C35, C40, C45, C50, C55, C60** ces aciers conviennent aux traitements thermiques

- ✓ Aciers faiblement alliés (Teneur en manganèse  $\geq 1\%$ ).

La teneur de chaque élément d'alliage  $\leq 5\%$ . La désignation comprend dans l'ordre :  
 Un nombre entier égal à 100 fois le pourcentage de la teneur moyenne en carbone. Un ou plusieurs groupes de lettre qui sont les symboles chimiques des éléments d'addition ranger dans l'ordre des teneurs décroissantes. Une suite de nombres rangés dans le même ordre que les éléments d'alliage, et indiquant le pourcentage de la teneur moyenne de chaque élément. Les teneurs sont multipliés par un coefficient multiplicateur variable en fonction des éléments d'alliage. [8]

**Tableau II.1 :** Coefficient multiplicateur.

<b>Coefficient multiplicateur</b>			
Elément d'alliage	Coef.	Elément d'alliage	Coef.
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4	Ce, N, P, S	100
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Ta, Ti, V, Zr	10	B	1000

- ✓ Aciers fortement alliés (Teneur d'au moins un élément d'alliage  $\geq 5\%$ )

La désignation commence par la lettre **X** suivie de la même désignation que celle des aciers faiblement alliés à l'exception des valeurs des teneurs qui sont des pourcentages nominaux réels.

*Exemple : XC 30 Cr 13* Aciers fortement alliés de 0,30 % de Carbone – 13% de Chrome. [9]

*Nuances usuelles :* X 4 Cr Mo S 18, X 30 Cr 13, X 2Cr Ni 19-11, X 5 Cr Ni 18-10, X 5 Cr Ni Mo 17-12, X 6 Cr Ni Ti 18-10, X 6 Cr Ni Mo Ti 17-12.

#### **II.4. Influence des éléments d'addition :**

Ajoutés en quantité suffisante, ils augmentent plus ou moins fortement la trempabilité et ont également une influence sur les caractéristiques mécaniques (Rr, H, A%, K), la résistance à la corrosion, la soudabilité, la coulabilité, la forgeabilité, l'usinabilité, le magnétisme...

- *Aluminium* : désoxydant, il diminue le grain et augmente légèrement la trempabilité. Il est l'élément d'addition des aciers de nitruration.
- *Bore* : améliore la trempabilité des aciers à pourcentage de carbone faible et moyen.
- *Chrome* : élément qui augmente le plus la résistance à la corrosion et à l'oxydation.
- *Cobalt* : permet une grande dureté à chaud par durcissement de la ferrite.
- *Manganèse* : neutralise la fragilité engendrée par les sulfures et augmente fortement la trempabilité.
- *Molybdène* : augmente fortement la trempabilité, favorise un grain plus fin, neutralise en partie la fragilité due à la trempe, augmente la résistance et la dureté à chaud, la résistance à l'abrasion, la résistance à la corrosion des aciers inoxydables.
- *Nickel* : renforce la résistance des aciers non trempés ou recuits, rend plus résilients les aciers ferritiques-perlitiques, surtout aux basses températures, rend austénitiques les aciers ayant un pourcentage de chrome élevé.
- *Phosphore* : renforce la résistance des aciers à bas pourcentage de carbone.
- *Plomb* : (0,15 à 0,35%): améliore l'usinabilité.
- *Silicium* : utilisé comme désoxydant, c'est l'élément d'alliage des aciers évocation électrique (diminution du magnétisme). Il améliore la résistance des aciers faiblement alliés et la trempabilité des aciers sans trace de graphite.
- *Soufre* : considéré en général comme une impureté (formation de sulfure de fer entraînant des ruptures).
- *Tungstène* : entraîne la formation de particules très dures et très résistantes à l'abrasion (aciers à outil) et améliore la dureté et la résistance à température élevée. Vanadium : favorise un grain plus fin, augmente la trempabilité, s'oppose fortement à la détrempe pendant le revenu. [10]

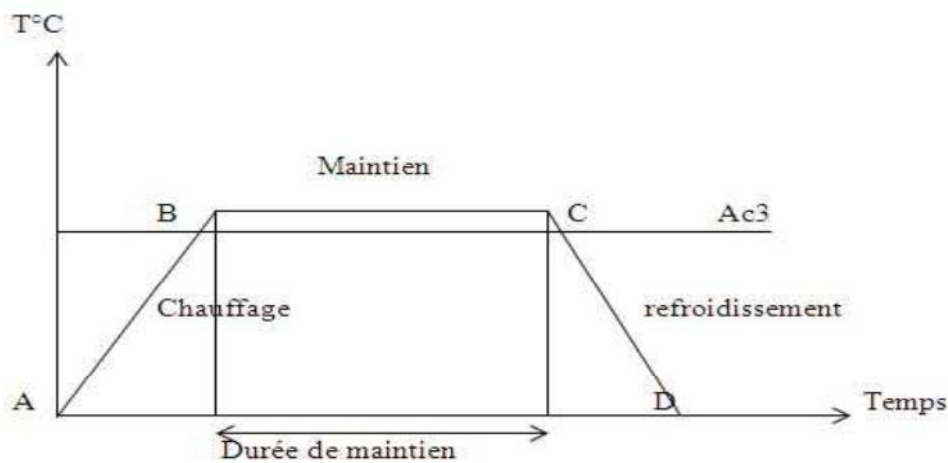
### II.5. Les aciers et leurs traitements thermiques :

Par traitement thermique, on désigne toute opération faite à chaud et destinée à modifier la microstructure d'un métal pour lui donner de nouvelles caractéristiques.

#### II.5.1. Cycle d'un traitement thermique :

En générale le traitement thermique comprend trois étapes :

- ✓ Un chauffage jusqu'à une température qui dépend de types de traitement voulu.
- ✓ Maintient isotherme à cette température de traitement.
- ✓ Un refroidissement dans un milieu préalablement défini.



**Figure. II.4 :** Cycle d'un traitement thermique.

#### II.5.2. Principaux types de traitements thermiques :

Les traitements thermiques appliqués aux aciers peuvent être classés en trois types principaux :

- ✓ Les traitements d'homogénéisation, généralement appliqués sur les produits coulés avant leurs transformations ou également sur les produits déjà corroyés.
- ✓ Les traitements d'adoucissements par recuit ou restauration généralement appliqués en cours ou en fin de transformation.
- ✓ Les traitements de trempe structurale comportent :
  - une mise en solution.
  - une trempe.
  - une maturation ou /et un revenu produisant le durcissement.

**a)Le recuit :**

Le recuit amène les alliages en équilibre physico-chimique et mécanique. Il tend à réaliser l'équilibre structural en faisant disparaître les états hors d'équilibre résultant des traitements thermiques et mécaniques antérieurs.

Le recuit correspond aux valeurs maximales des caractéristiques de ductilité (résilience et allongement) et aux valeurs minimales des caractéristiques de résistance (dureté, limite élastique, charge à la rupture). Le recuit a pour but de:

- diminuer la dureté d'un acier trempé.
- obtenir le maximum d'adoucissement pour faciliter l'usinage ou les traitements mécaniques.
- régénérer un métal écroui ou surchauffé.
- homogénéiser les textures hétérogènes.
- réduire les contraintes internes.

*Le cycle thermique d'un recuit comprend:*

- Un chauffage jusqu'à une température dite de recuit qui dépend du type de recuit à réaliser.
- Un maintien isotherme à la température de recuit ou des oscillations autour de cette température.
- Un refroidissement très lent généralement à l'air calme. La vitesse de refroidissement doit être inférieure à la vitesse critique de recuit.

*a.1. Recuit demandant des températures supérieur à  $ac1$  :*

✓ Recuit complet :

Il comporte un chauffage et un maintien vers ( $Ac3 + 50^{\circ}C$ ) suivis d'un refroidissement au four à de faible degrés de surfusion afin d'assurer la décomposition de l'austénite et de parer à la formation de structures à grande dureté (martensite, bainite). Ce recuit s'effectue sur des pièces ayant subies des traitements thermiques et mécaniques variés afin de faciliter leur usinage ou leur déformation à froid. C'est ce qu'on désigne généralement sous le terme "recuit".

✓ Le recuit d'homogénéisation :

S'applique aux aciers bruts de coulée pour lesquels la solidification a entraîné l'hétérogénéité de composition chimique (ségrégation). Il s'obtient en maintenant l'acier dans le domaine austénitique (solution solide  $\gamma$ ) à une température aux alentours de  $1000^{\circ}C$  afin

d'accélérer la diffusion du carbone et celle des autres éléments d'alliage. Une température plus élevée risque d'engendrer un grossissement de grains excessifs.

- ✓ Recuit de régénération (ou d'affinage structural) : Le recuit de régénération comprend
  - Un chauffage sans maintien prolongé à une température légèrement supérieure à  $Ac_3$  de manière à obtenir une austénite à grains fins.
  - Un refroidissement à une vitesse convenable conduisant à une structure ferrito-perlitique fine (cas des aciers hypoeutectoïdes).

Ce recuit est appliqué aux pièces qui ont souvent des structures surchauffées telles que:

- celles ayant subi un traitement d'homogénéisation par diffusion.
- Les pièces moulées.
- Les zones voisines des joints de soudure.
- Les pièces forgées à haute température, etc.....

*a.2) Recuit demandant des températures inférieures à  $ac_1$  :*

- ✓ Recuit d'adoucissement :

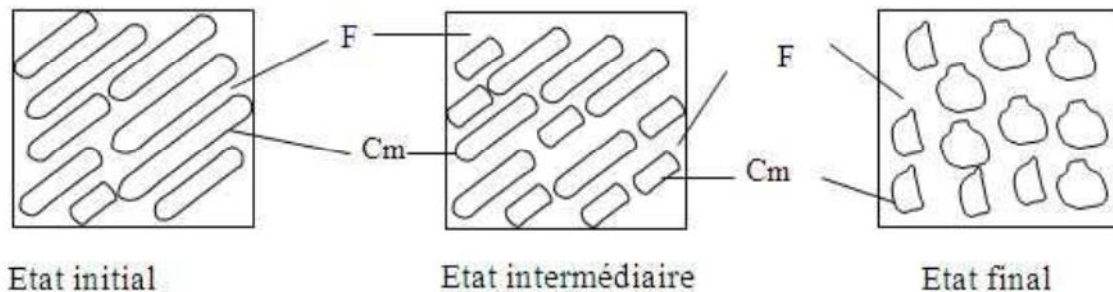
C'est un recuit qui est réalisé à quelques dizaines de degrés en dessous d' $Ac_1$  (650-680°C) suivi d'un refroidissement lent afin d'obtenir un état suffisamment stable et, si possible exempt de contraintes. Ce traitement a pour but d'améliorer l'usinabilité ou l'aptitude à la déformation à froid. Pour les aciers hautement alliés, il est le seul traitement qui détruit les structures hors d'équilibre et qui réduit la dureté. [8]

- ✓ Recuit de coalescence (ou de globalisation) :

Ce traitement est utilisé pour améliorer l'aptitude à la déformation à froid de l'acier (filage par exemple), et où on cherche en général à obtenir une structure globulisée de la cémentite. Ce recuit a pour but d'améliorer l'usinabilité des aciers en rendant possible l'application de grandes vitesses de coupe et en assurant un très bon état de surface. Le cycle thermique comprend:

- un chauffage juste au-dessous d' $Ac_1$ ,
- un maintien prolongé à cette température, ou une oscillation autour.
- un refroidissement lent pour obtenir la coalescence de la cémentite.

La figure II.5, montre le processus schématisé de sphéroïdisation de la cémentite à partir d'une perlite lamellaire. Rappelons que la coalescence peut être obtenue aussi par un revenu à haute température d'une structure initialement martensitique. [8]



**Figure II.5 :** Schéma de coalescence de la cémentite.

- ✓ Recuit de recristallisation :

Le travail à froid d'un métal par déformation plastique (laminage, tréfilage...) conduit à un écrouissage. Une structure écrouie est caractérisée par une forte déformation orientée des grains et une grande densité de défauts cristallins. La structure devient fragile et s'accompagne d'un accroissement des propriétés de résistance et d'une réduction des propriétés plastiques. Ce recuit s'effectue dans la zone de recristallisation située au-dessus d'une température qui dépend de la nuance de l'acier et de son degré d'écrouissage. Il y a germination de nouveaux grains puis croissance jusqu'à contact mutuel. [8]

- ✓ Recuit de détente (ou de relaxation) :

Ce recuit a pour but le relâchement plus ou moins complet des contraintes résiduelles dues au moulage, soudage, usinage. Il s'effectue généralement pendant 1 heure vers (600 + 650°C), mais souvent beaucoup plus bas pour les aciers alliés après déformation plastique à froid. [8]

### **b. Trempe :**

C'est un traitement thermique qui consiste à chauffer le métal et le refroidir à une grande vitesse. Il permet de donner le maximum de dureté et le minimum de résilience grâce à l'obtention d'une structure martensitique.

La trempe n'est pas un traitement thermique définitif. Pour diminuer la fragilité et les contraintes qu'elle produit et obtenir de bonnes propriétés mécaniques.

*b.1. Austénitisation :*

Durant l'austénitisation, la structure de l'acier s'homogénéise en transformant les éléments microstructuraux ferritiques (cc) en austénite (cfc) et en dissolvant la cémentite et les carbures dans l'austénite.

L'austénite consiste :

- A chauffer l'acier à au moins quelques degrés (30-50) °C au-dessus de son point de transformation.
- Le maintenir pendant environ 30 minutes dans son domaine austénitique. [6]

*b. 2. Choix du temps de maintien :*

Le maintien du métal à la température de trempe doit assurer le chauffage à cœur et l'achèvement des transformations de phase, sans qu'il soit trop lent pour éviter le grossissement des grains et la décarburation des couches superficielles des pièces.

La durée totale du chauffage  $t_t$  dépend:

- du temps d'échauffement à cœur " $t_{ec}$ " jusqu'à la température demandée. Ce temps dépend de la forme et des dimensions des pièces, de la nuance de métal, du type de fours, ...etc.
- du temps de maintien isotherme " $t_{mi}$ " qui dépend de la composition et de l'état initial de métal.

Donc:  $t_t = t_{ec} + t_{mi}$

En réalité pour déterminer  $t_t$ , on se réfère aux données expérimentales. Le tableau résume la durée moyenne rapportée à 1 mm d'épaisseur dans différents types de fours.

**Tableau II.2 :** *Durée approchée d'austénitisation dans différents types de fours.*

Moyen de chauffage	Durée en (s/mm) d'épaisseur de pièce		
	Ronde	carrée	Rectangulaire
Four électrique	40-50	50-60	60-75
Four à flamme	35-40	45-50	55-60
Bain de sel	12-15	15-18	18-22
Bain de plomb	6-8	8-10	10-12

*b. 3. Choix du milieu de trempe :*

Le milieu de trempe doit assurer le refroidissement dans toute la section des pièces, et l'obtention d'une structure martensitique sans produire de défauts tels que tapures, déformations, gauchissements, contraintes résiduelles ...etc. Le meilleur refroidissement est celui qui se fait à grande vitesse dans l'intervalle de température A1. Ceci permet d'étouffer la décomposition de l'austénite sur fusionnée dans le domaine des transformations: perlitique et intermédiaire.

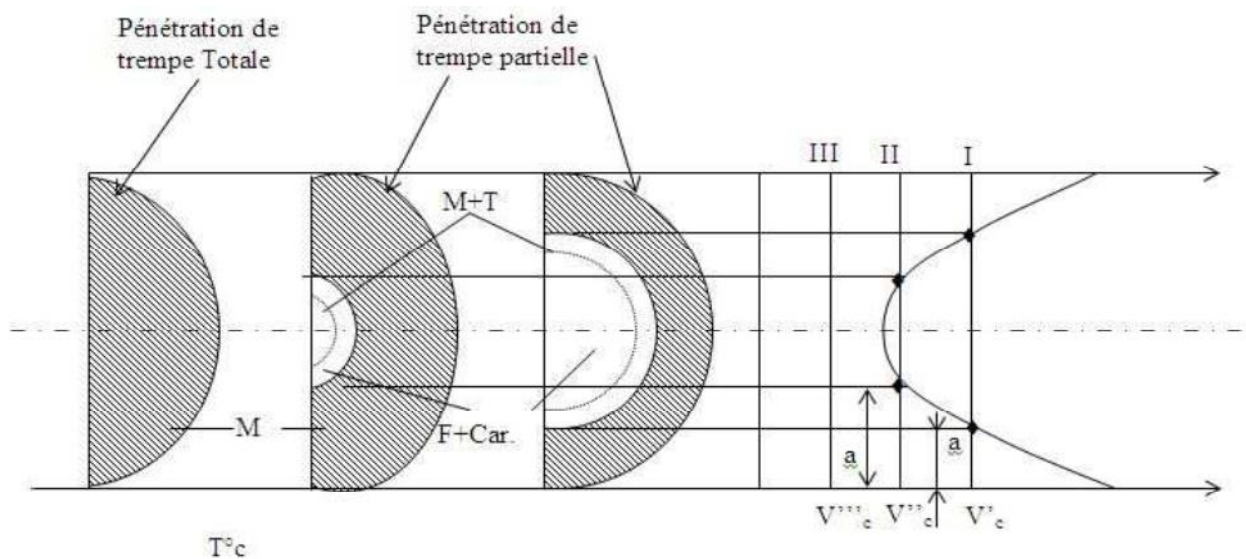
Ce refroidissement est ralenti vers les basses températures dans le domaine de la transformation martensitique. Une grande vitesse de refroidissement dans l'intervalle martensitique est indésirable car elle accroît les contraintes résiduelles et produit des tapures.

Généralement, on utilise pour les bains de trempe des liquides qui peuvent bouillir: eau, solutions aqueuses de sels et d'alcalis, huiles. La trempe par ces agents passe par une étape de refroidissement pelliculaire (ou caléfaction) où une gaine de vapeur protège les pièces et empêche le refroidissement. [6]

Une fois que l'agent refroidissant se met en ébullition, la gaine se rompt et l'évacuation de la chaleur s'accélère.

Pour les aciers au carbone, on utilise le plus souvent de l'eau comme milieu de trempe: alors que pour les aciers alliés on utilise soit de l'huile, soit un bain de sel.

*b.4. Trempabilité :*



**Figure II.6:** Différentes pénétration de trempe d'une section ronde à différentes vitesse critiques de trempe martensitique.

**c. Revenu :**

Le revenu est une opération finale du traitement thermique qui a pour but de corriger les défauts causés par la trempe. Il consiste à chauffer le métal trempé à une température inférieure à  $A_{c1}$ , à le maintenir à cette température et enfin à le refroidir jusqu'à la température ambiante. Le revenu provoque une évolution de la structure du matériau vers un état plus proche de l'état physico chimique d'équilibre, sans toutefois l'atteindre.

La vitesse de refroidissement après revenu a une influence très faible sur l'état des contraintes résiduelles. Néanmoins plus le refroidissement est lent, plus les contraintes résiduelles sont faibles.

Du point de vue applications industrielles, on distingue trois types de revenu:

**c.1) Revenu à basse température :**

Il s'effectue avec un chauffage vers  $250^{\circ}\text{C}$  et permet de diminuer les contraintes internes. Il transforme la martensite de trempe en martensite de revenu. Ce revenu augmente la résistance et améliore la ductilité sans altérer sensiblement la dureté ( $58 + 63 \text{ HRC}$ ), d'où une bonne tenue à l'usure. Il s'applique aux outils de coupe et aux instruments de mesure en acier au carbone et faiblement alliés.

La durée de ce revenu varie de 1 à 3 heures.

**c.2) Revenu à température intermédiaire :**

Il se réalise entre  $350$  et  $500^{\circ}\text{C}$  et s'emploie pour les ressorts variés et les étapes. Il permet d'obtenir une limite élastique et une résistance à la fatigue élevées. La structure est de type troostite de revenu ou troostite - martensite dont les duretés varient de  $40$  à  $50 \text{ HRC}$ . Le refroidissement après revenu à  $400$  ou  $450^{\circ}\text{C}$  se fait à l'eau, ce qui contribue à la formation en surface de contraintes de compression résiduelles qui élèvent la limite de fatigue des ressorts.

**c.3) Revenu à haute température :**

Il se fait entre  $500$  et  $680^{\circ}\text{C}$ . Il donne à l'acier la structure s'orbite de revenu. Ce type de revenu crée un meilleur rapport entre la résistance et la ductilité de l'acier. La trempe suivie de revenu à haute température (ce traitement double est appelé amélioration) améliore par rapport à l'état normalisé ou recuit les limites de rupture et d'élasticité. La striction et surtout la résilience. L'amélioration est appliquée surtout aux aciers de construction à moyen carbone ( $0,3 + 0,5\%$ ).

## II.6. Essais mécaniques :

Les essais mécaniques ont pour but de déterminer un certain nombre de caractéristiques des métaux et des alliages.

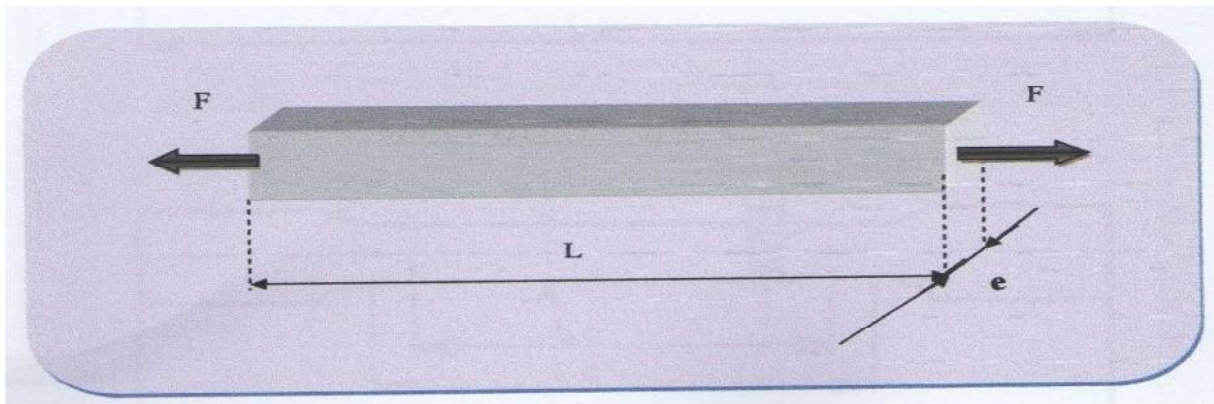
Aptitude à la déformation par traction ou compression, résistance à la pénétration d'une pièce soumise à un effort constant, etc.

Parmi ces essais en trouve :

### II.6.1. Essai de traction :

L'essai de traction est l'un des essais mécaniques les plus fréquents. Il sert, comme nous le verrons, à déterminer avec certitude plusieurs propriétés mécaniques des matériaux.

On déforme graduellement une éprouvette, habituellement jusqu'à la rupture, en appliquant le long de son axe une force qui croît graduellement. La figure ci-dessous représente une éprouvette d'essai de traction (normalement la section transversale est circulaire mais on utilise aussi des éprouvettes à section transversale rectangulaire).



**Figure II.7 :** Essai de traction.

Pendant l'essai on relève un diagramme au sont enregistrés les allongements en fonction des charges, ensuite on peut calculer plusieurs caractéristiques mécaniques :

- La limite élastique et de la rupture ;
- Le module de Young et la contrainte maximale de traction ;
- Le coefficient de poisson.

✓ Epreuves :

Les éprouvettes comportent généralement deux têtes d'amarrage et une partie calibrée soigneusement polie de section constante comportant deux repères distants d'une longueur  $L_0$ , la partie calibrée est raccordée aux extrémités par des congés de rayon  $R$ , et les têtes d'amarrage sont adaptées aux mâchoires de la machine de traction.

La section droite de l'éprouvette peut être circulaire, carrée, rectangulaire ou hexagonale.

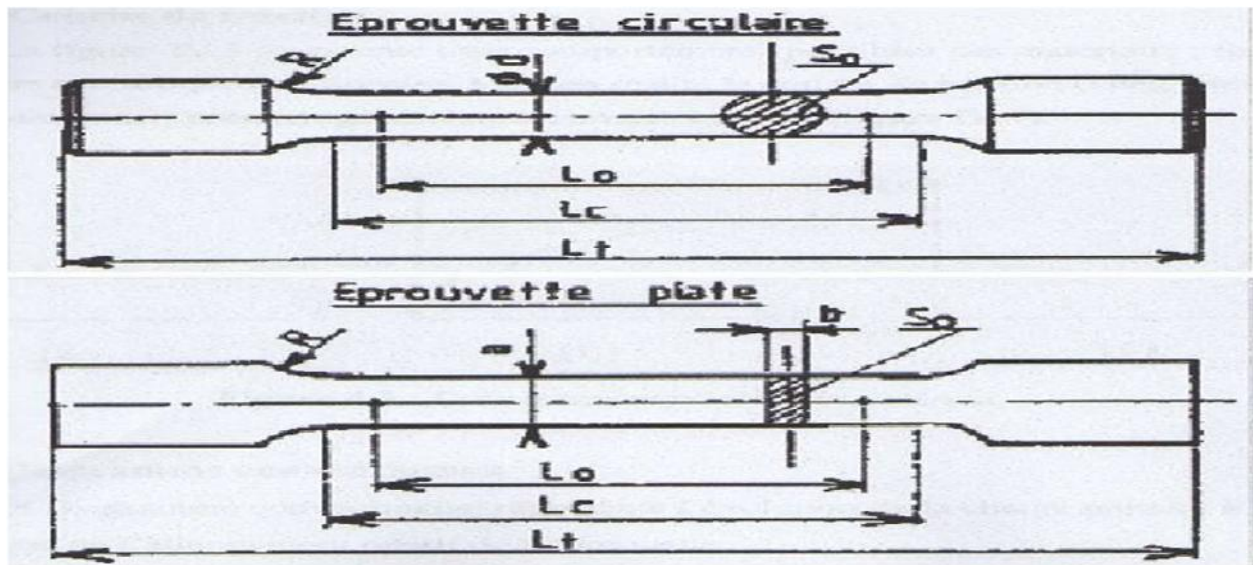


Figure II.8: Epreuves de traction.

**a** : Epaisseur de l'éprouvette plate

**b** : Largeur de l'éprouvette plate

**So**: Section initiale de l'éprouvette

**Lc**: Longueur de la partie calibrée

**Lt** : Longueur totale de l'éprouvette

**Lo**: Longueur initiale entre repères : il s'agit de la longueur utilisée pour l'étude de l'allongement.

Les dimensions des éprouvettes sont fixées par des normes en fonction du type d'alliage (acier, fonte, aluminium...), de la forme (rond, plate, fil..) et des dimensions des sections.

Pour les aciers de forme ( $d$  ou  $b > 0,3$  mm), la norme est NF A 03-251 et le dimensionnement normalisé est :  $L_0 + d/2 < L_c < L_0 + 2d$ . [11]

✓ Courbe de traction :

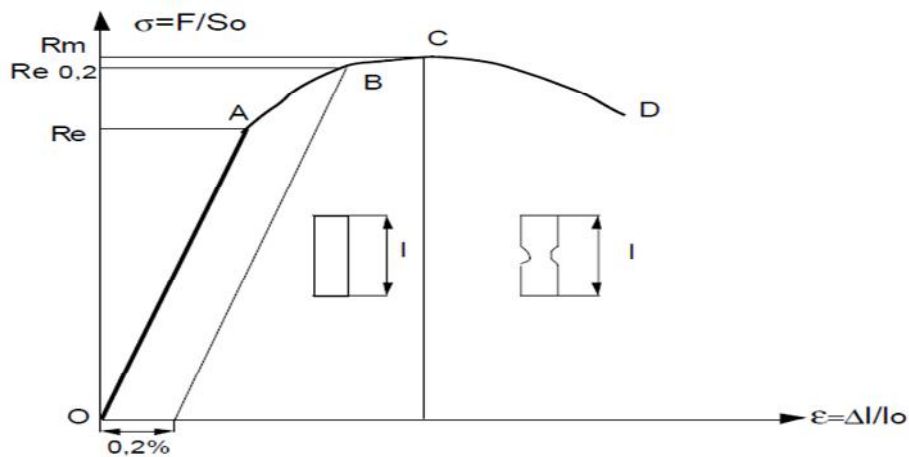


Figure. II.9 : courbe de traction.

✓ Caractéristiques obtenues de l'essai de traction :

La droite **OA** correspond à la déformation élastique réversible.

La courbe **AC** est le domaine de déformation plastique homogène: si on supprime la force de traction, il y a un retour élastique suivant une parallèle à **OA** et il reste une déformation permanente.

Pour **CD**, la force nécessaire pour déformer le matériau diminue alors que l'allongement continue d'augmenter : cette instabilité est appelée instabilité plastique. La striction apparaît.

En **D** il y a rupture de l'éprouvette.

**Re** (MPa) est la limite de proportionnalité ou **limite élastique**. Elle est bien marquée pour les matériaux ductiles. Re correspond au seuil d'écoulement plastique.

**Rm** est la **résistance limite** à la traction. Cette valeur est utilisée pour estimer la limite d'endurance à la fatigue.

Re est atteint quand on observe la première chute de l'effort lors de l'essai. En l'absence de ce phénomène, quand OA n'est pas rectiligne, on doit utiliser la limite conventionnelle d'élasticité

**Re0,2** qui correspond à un allongement plastique de 0,2%.

-**Allongement à la rupture A%** est le rapport : [12]

$$A\% = \frac{Lu - L_0}{L_0} \cdot 100$$

Ou:

**Lu** : est la longueur de l'éprouvette reconstituée après rupture.

-Coefficient de striction  $Z\%$

$$Z\% = \frac{S_o - S_u}{S_o} \cdot 100$$

-Module d'Young  $E$

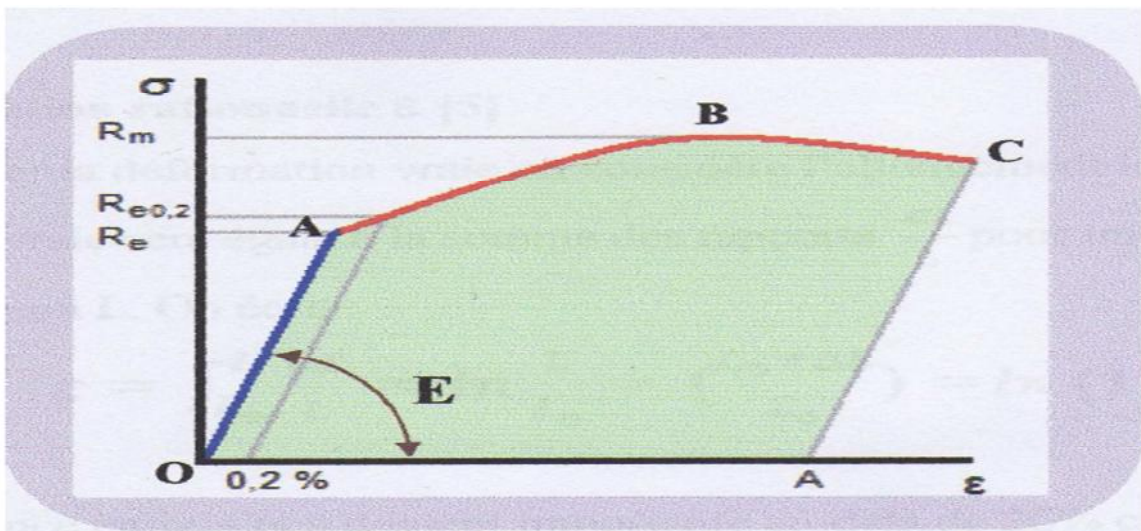
Est la pente de la partie linéaire  $OA$  représente le module d'Young  $E$  ou module l'élasticité, exprimée en (MPa ou GPa). On appelle **loi de HOOK** la relation :  $\sigma = E \cdot \varepsilon$

Avec :

$\sigma$  : est la contrainte

$E$ : est le module de Young

$\varepsilon$ : est la déformation



*Figure II.10: Module d' Young.*

## II.7. Essais de dureté:

### II.7.1. Définition :

La dureté d'un métal est la résistance qui l'oppose à la pénétration d'un autre métal plus dur que lui, plusieurs types d'essais de dureté sont couramment utilisés, leurs principe est le même, ils ne diffèrent que par la forme de pénétrateur. Elle peut s'exprimer par la résistance mécanique qu'un corps oppose à la pénétration d'un autre corps plus dure. L'essai de dureté est très simple et très rapide, ne demande pas d'outillage important.

### II.7.2. Le principe de l'essai de pénétration :

Il consiste à enfoncer une pénétration dans le métal à essayer. L'empreinte est d'autant plus grande quand le métal est moins dur.

La dureté H s'exprime par le rapport de la force sur la surface de l'empreinte :

$$H = \frac{F}{S} \quad \text{avec :}$$

**H** : symbole de dureté, en **MP**

**F** : charge d'essai, en **N**

**S** : surface de l'empreinte, en **mm<sup>2</sup>**

### II.7.3. Types d'essai :

#### ✓ Essai brinell :

Dans l'essai proposé par Brinell, le pénétrateur est une bille polie en acier trempé ou en carbure de tungstène. Son diamètre **D** vaut normalement **10 mm**, mais aussi **5 mm**, **2,5 mm** et **1 mm**. Elle est appliquée sur le métal avec une charge **F** (au plus **29 420 N**).

Après suppression de la charge, elle laisse dans le métal une empreinte circulaire permanente dont on mesure le diamètre **d**, d'autant plus grand que la bille a pénétré plus profondément dans le métal.

Cette mesure peut se faire à **0,05 mm** près soit à l'aide d'une règle spéciale dite règle Le Chatelier, soit, beaucoup plus souvent, avec une lunette à oculaire micrométrique d'un grossissement de l'ordre de **20**. Le diamètre **d** est la moyenne de deux mesures effectuées à **90 °** l'une de l'autre. [12]

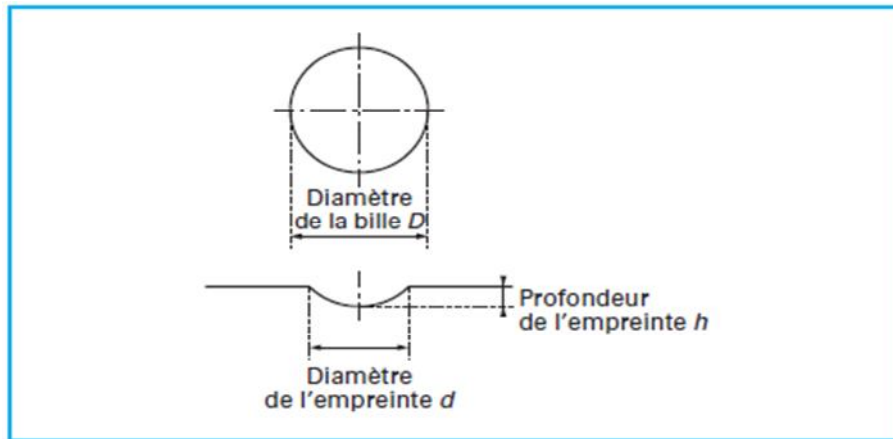
La dureté Brinell s'exprime par le rapport de la charge **F** à la surface **S** de la calotte sphérique imprimée dans le métal :

$$HBW = 0,102 \frac{F}{S} = 0,102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Avec : **F** (N) charge,

**D** (mm) diamètre de la bille,

**d**(mm) diamètre de l'empreinte.



*Figure II.11. Essai Brinell. [12]*

- Précautions opératoires :
  - L'exécution de l'essai Brinell demande une surface plane, usinée ou meulée. Son état de surface doit permettre une lecture aisée du diamètre de l'empreinte.
  - On applique la charge normalement à la surface et sans choc, en la faisant croître progressivement, de manière à atteindre en 15 s la charge fixée. On la maintient pendant 10 à 15 s, on décharge et l'on mesure le diamètre de l'empreinte.
  - On vérifie que l'empreinte est parfaitement circulaire en mesurant deux diamètres perpendiculaires. Si l'empreinte n'est pas circulaire, ce qui pourrait arriver si la surface n'était pas plane.
  - Pour éviter une déformation de la pièce : la distance du centre de l'empreinte au bord de la pièce ne doit pas être inférieure à  $2,5 d$  et la distance entre les centres de deux empreintes voisines doit dépasser quatre fois leur diamètre.
  - L'épaisseur de la pièce doit être d'au moins huit fois la profondeur de l'empreinte pour qu'aucune déformation ne soit visible sur la face opposée. [12]

✓ Dureté Rockwell :

L'essai consiste à mesurer l'enfoncement rémanent d'un pénétrateur, appuyé sous faible charge sur la surface à essayer, après application d'une surcharge dans des conditions bien précisées.

Le pénétrateur employé est :

- Un cône de diamant de section circulaire, d'angle au sommet  $120^\circ$ , à pointe arrondie sphérique (rayon de 0,2 mm) ;
- Une bille d'acier trempée, polie, de diamètre 1,587 mm (1/16 de pouce) ou 3,175 mm (1/8 de pouce).

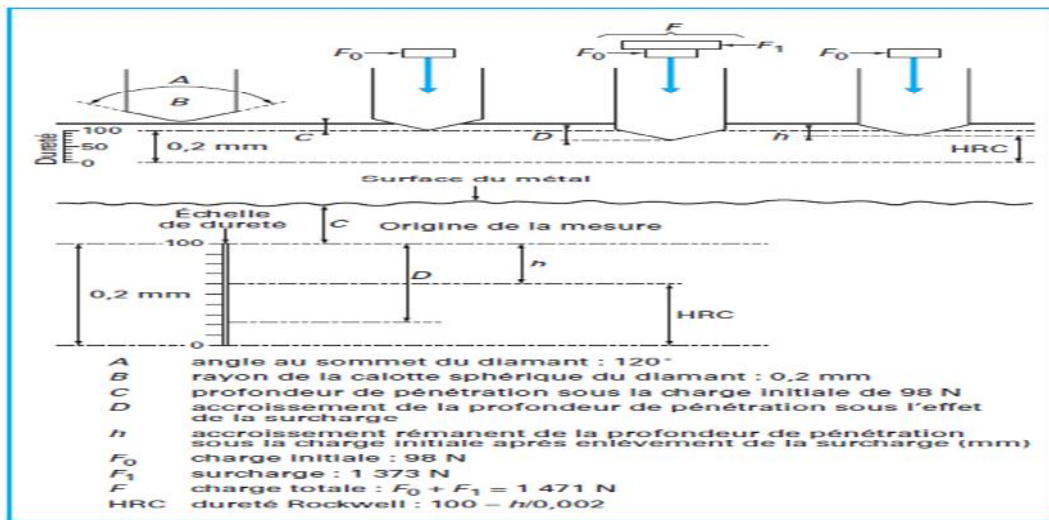


Figure II.12. Essai Rockwell.

✓ Dureté Vickers :

Elle est caractérisée par l'empreinte faite par un indenteur sous une charge donnée durant 15 secondes. L'indenteur est formé d'une pyramide endiamant à base carrée dont les faces opposées font un angle de  $136^\circ$ . La charge appliquée est comprise entre 1 et 120 kgf. Le côté de l'empreinte est de l'ordre de 0,5 mm, la mesure s'effectuant à l'aide d'un microscope.

La dureté Vickers (HV) est calculée e à l'aide de la formule suivante :

$$HV = \frac{1.854F}{D^2}$$

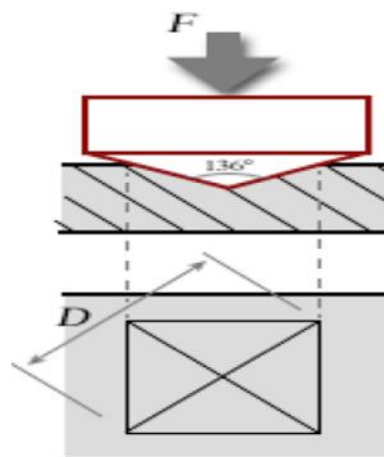


Figure II.13 : Essai Vickers.

# Chapitre III : la tribologie

### III.1. Introduction :

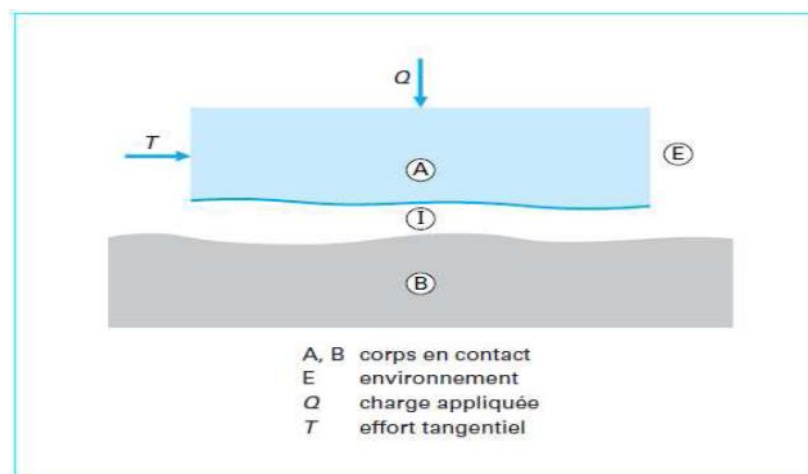
La tribologie s'intéresse à l'étude et à l'interprétation scientifique des faits expérimentaux, elle entre en jeu de façon significative dans de nombreux domaines industriels. La connaissance de la tribologie est devenue une nécessité pour de multiples raisons comme :

- Assurer le bon fonctionnement et la fiabilité des machines.
- Améliorer le rendement et la longévité des machines.
- Assurer la sécurité des biens et des personnes.

### III.2. Le système tribologique :

La tribologie des interfaces concerne le milieu inter facial entre les deux corps en contact. On définit ainsi un contact tribologique ou tribo-système comme étant composé de trois éléments principaux (Figure III.1) : deux solides (A) et (B) en contact (premiers corps) et le milieu inter facial (I) désigné sous le terme de troisième corps.

Ce troisième corps sépare partiellement ou totalement les deux matériaux en contact et possède des propriétés différentes de celles des premiers corps. L'origine de ce milieu inter facial peut être externe (solide ou liquide) ou interne par formation in situ (détachement de particules des premiers corps). Ce tribo-système se trouve dans un environnement (E) qui constitue l'ambiance de fonctionnement du contact. Des interactions entre cet environnement et le contact peuvent ainsi avoir lieu en fonction de sa composition, sa température, sa pollution éventuelle...



**Figure III.1 :** Représentation schématique d'un tribo-système. [13]

## III.3. Les définitions :

III.3.1. Adhésion :

L'adhésion entre deux corps en contact peut avoir de multiples origines, allant des attractions purement électrostatiques (entre charges électriques opposées) jusqu'aux liaisons de nature mécanique, chimique ou métallurgique. Ces dernières incluent toutes les interactions qui contribuent à la cohésion des solides telles que liaisons métalliques, covalentes, ioniques. L'adhésion dépend donc de la nature des matériaux antagonistes, mais aussi, pour du matériau donné, des conditions dans lesquelles s'effectue le contact : présence d'« écrans de contamination », ou de films superficiels, rapprochement plus ou moins intime des pièces... [13]

III.3.2. La force d'adhérence :

Correspond à la force nécessaire à la séparation des corps. Elle dépend notamment de la nature de la liaison, de la vitesse de séparation, de la géométrie du contact, des propriétés rhéologiques de l'interface.

III.3.3. Coefficient de frottement :

L'effet de la vitesse sur le coefficient de frottement est plus particulièrement notable en régime lubrifié, où ce facteur conditionne les possibilités de portance hydrodynamique.

✓ Formulation :

Soient deux corps A et B appuyant l'un sur l'autre avec une force  $Q$ , et se mouvant l'un par rapport à l'autre en restant en contact. Le cas le plus général est celui du « frottement de glissement » (figure III.2. a).

Lorsqu'il s'agit de « frottement de pivotement », c'est-à-dire lorsqu'il existe un point de A qui coïncide pendant tout le mouvement avec un point de B, le mouvement s'obtient en exerçant un couple  $C$  (figure III.2. b).

Lorsqu'il s'agit d'un « frottement de roulement », c'est-à-dire lorsqu'un point ou une ligne de contact de A et de B joue le rôle de centre instantané de rotation, le mouvement peut s'obtenir en déplaçant la direction de la force  $Q$  parallèlement à elle-même d'une longueur  $H$  (figure III.2.c). [13]

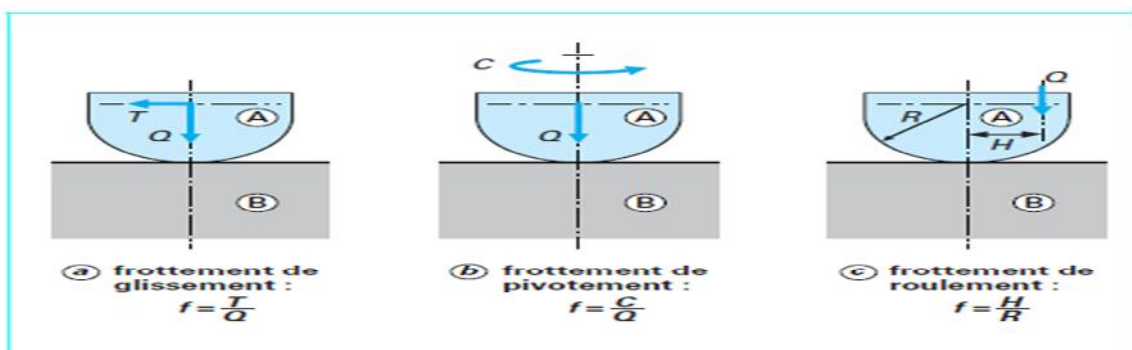


Figure III. 2 : Définition des coefficients de frottement

Avec R rayon de courbure de A, T la force tangentielle parallèle au plan tangent.

✓ Coefficients de frottement statique et dynamique

Les forces tangentielles T (figure III.2. a) prises en compte pour calculer les coefficients de frottement statique et dynamique correspondent respectivement :

- aux efforts résistants à vaincre pour provoquer le mouvement ;
- aux efforts résistants à vaincre pour maintenir le mouvement à vitesse constante.

✓ Origine des efforts résistants. Conséquences pratiques

Les forces tangentielles opposées au déplacement trouvent leur origine dans deux groupes de phénomènes qui agissent conjointement dans la plupart des situations :

- les phénomènes mécaniques : déformation des surfaces à échelle microscopique (rugosités) ou macroscopique (aire de contact) ;
- les phénomènes physicochimiques : liaisons inter faciales et forces d'adhérence entre les deux corps en présence. [13]

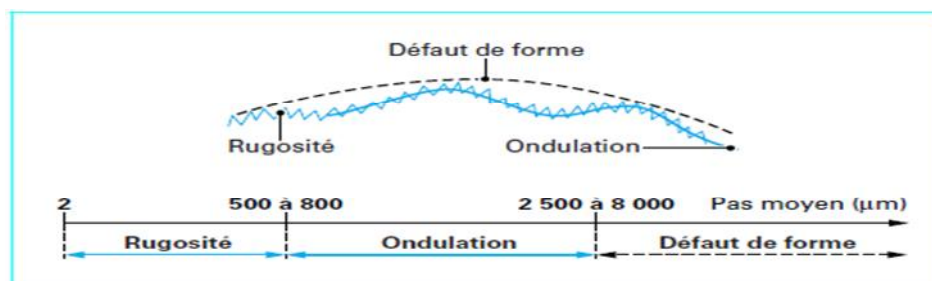
### III.4. Contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles sont les contraintes existant dans une pièce au repos en l'absence de toute force extérieure ou d'inertie.

### III.5. Rugosité :

Les irrégularités d'une surface peuvent être classées en trois niveaux, en fonction de leur longueur d'onde, celles relevant plus précisément de la rugosité ayant une largeur ou un pas moyen compris entre 2 mm et 500 mm à 800 mm (figure III.3).

La rugosité est la représentation des motifs géométriques élémentaires à caractère répétitif. Ces motifs correspondent par exemple aux traces d'outils générées par l'usinage, aux impacts des projectiles sur une surface grenailée, à la morphologie de certains revêtements (structure, porosités...). [13]



*Figure III.3 : Classement des irrégularités de surface.*

La mesure de rugosité permet de :

- **quantifier** la grandeur des écarts géométriques (par rapport à la surface théorique), la forme des motifs de surface et leur répartition.
- **prévoir** quelle sera l'évolution la plus probable de la surface de contact avec celle de la hauteur des aspérités (effets du rodage...).

Les paramètres d'état de surface sont obtenus au moyen d'appareils dont le plus utilisé est le rugosimètre à palpeur ou profilomètre, qui délivre, à partir de l'exploration suivant une ligne de contact :

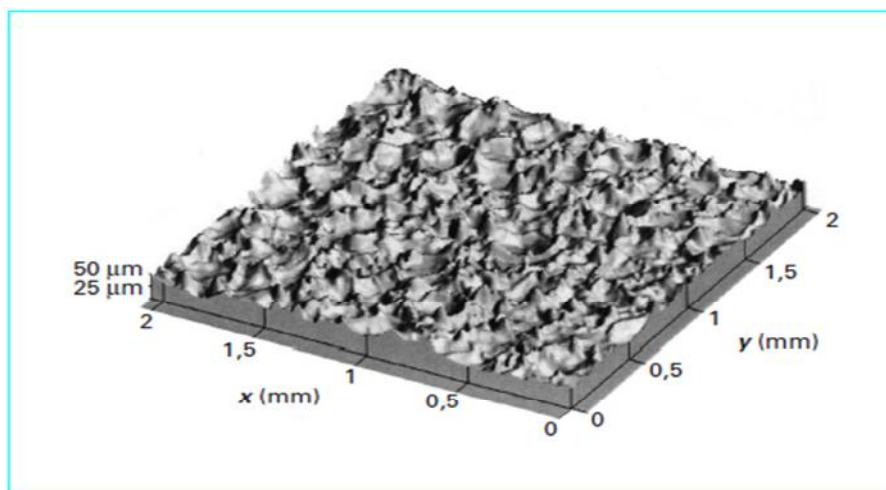
- un enregistrement de profil ;
- une évaluation des écarts géométriques correspondants.

Pour avoir une visualisation plus large des facteurs de forme, de l'orientation des rugosités entre autres, une représentation en trois dimensions de la surface peut être obtenue. Celle-ci procure :

- la restitution sous forme de visualisation tridimensionnelle de la surface à analyser (figure III.3).
- l'évaluation multidirectionnelle des écarts géométriques.

La **microrugosité** prend plus précisément en compte les caractéristiques topographiques dont la mesure et la caractérisation échappent aux méthodes et critères conventionnels de rugosité.

Accessibles, par exemple, à l'examen en microscopie électronique à balayage, ces caractéristiques concernent les propriétés morphologiques des surfaces comme celles liées à la structure des matériaux (porosité, micro défauts...) ou au mode de croissance des revêtements. [13]



*Figure III.4 : Exemple de représentation tridimensionnelle de rugosité*

**III.6. Données et paramètres tribologiques :***III.6.1. Taux d'usure :*

Selon la norme DIN EN 50321, l'usure peut être caractérisée par n'importe quel changement de longueur, volume ou masse et être normalisée selon les conditions de sollicitation, de vie ou de débit. Dans cet esprit la norme DIN EN 50324 (ASTM G99) définit le taux d'usure comme « le volume perdu divisé par la charge normale et la distance »

Le taux d'usure  $k$  (ou rapport de proportionnalité, voir DIN EN 50321) est dérivé de la loi d'Archard, en éliminant la dureté comme paramètre, et suppose que la perte de volume  $V$  est proportionnelle à la charge normale  $FN$  et à la distance de glissement  $d$  parcourue.

$$V = k_v FN d \quad (1)$$

Cette formule caractérise bien la phase stationnaire de perte de matière après le rodage initial et avant l'apparition d'un mécanisme secondaire comme par exemple la fatigue, qui dépend fortement de la topographie des pièces usinées.

Les différentes écoles tribologiques soulignent toujours que la notion de taux d'usure pose divers problèmes et doit être précisée pour chaque mécanisme d'usure.

Toutefois le taux d'usure est aujourd'hui utilisé couramment dans le monde entier et décrit l'évolution du niveau d'usure d'un couple de matériaux avec la sollicitation.

Il faut toutefois noter que le taux d'usure ne traduit pas directement une propriété intrinsèque des matériaux en contact ou du tribosystème.

En ce qui concerne la quantification de l'usure, il faut bien admettre que l'application de lois ou de modèles d'usure à l'usage général est très limitée, en général par manque de connaissance des propriétés des matériaux et de leur évolution avec la température ; mais la modélisation de l'usure ou la prévision d'un taux d'usure sont des sciences qui débutent.

Quoi qu'il en soit, pour une application industrielle, l'usure et, juste après, le frottement restent les deux grandeurs les plus déterminantes de par leurs implications économiques, et la connaissance de la nature exacte des différents mécanismes d'usure contribuant à un taux d'usure est un problème moins important.

Demeurent deux questions :

- Comment peut-on alors intégrer le taux d'usure dans une approche industrielle ou technique et écarter les réserves des scientifiques ?
- Comment valoriser par leur utilisation les dizaines de milliers de résultats tribologiques obtenus chaque année ?

Il n'y a aucun doute, que tous les tribosystèmes, que ce soit dans une application industrielle ou une machine d'essai, possèdent un taux d'usure, qui est défini par le couple de matériaux, la configuration du système et la sollicitation et qu'on peut le déterminer en fin de vie. Le taux d'usure est la « réponse » du tribosystème à une sollicitation.

Le taux d'usure volumétrique  $k_v$  s'exprime le plus souvent en  $\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$  et se calcule à partir du volume d'usure ou de la perte de volume (ou de masse), de la charge normale et de la distance de glissement parcourue. Ces trois valeurs sont parfois difficiles à déterminer ou simplement à connaître. Notons que certains auteurs l'expriment en  $\text{mm}^2/\text{kgf}$  ou en  $\text{mm}^2/\text{N}$ .

D'autres utilisateurs raisonnent un peu différemment. Par exemple, dans l'industrie des systèmes de freinage, on définit le taux d'usure comme la perte de matière en masse ou en volume par mégajoule (MJ) d'énergie dissipée par le couple de matériaux, ce qui revient à supposer que le volume perdu est proportionnel à la densité d'énergie de frottement apparente  $e_{f,c}^*$ , c'est-à-dire en première approximation que le taux d'usure  $k$  est proportionnel au coefficient de frottement  $\mu$ , soit  $K_v = e_{f,c}^* \mu$ . [14]

### III.6.2. Lois d'usure :

Dans de nombreuses situations industrielles, les utilisateurs et les concepteurs désirent disposer de lois d'usure afin de prédire le comportement et la durée de vie d'un système. Cette question est très délicate car les lois permettant de décrire quantitativement l'usure sont très imprécises et peu fiables. Ces approches sont par ailleurs en général très fortement critiquées par les scientifiques qui peuvent mettre en avant de nombreux contre-exemples.

Malgré cela, il est utile de disposer de certaines lois que l'on sait être imprécise mais qui permettent néanmoins d'analyser des situations de façon très grossière.

Dans ce sens, Archard a établi une loi d'usure en considérant comme paramètres tribologiques la charge appliquée au contact  $Q$ , la dureté  $H$  du corps auquel on s'intéresse et la distance parcourue  $D$ . Le volume usé  $U$  est donné par la relation :

$$U = K \frac{Q \cdot D}{H}$$

Avec :  $K$  coefficient d'usure.

### III.6.3. Valeur du produit $P \times V$ :

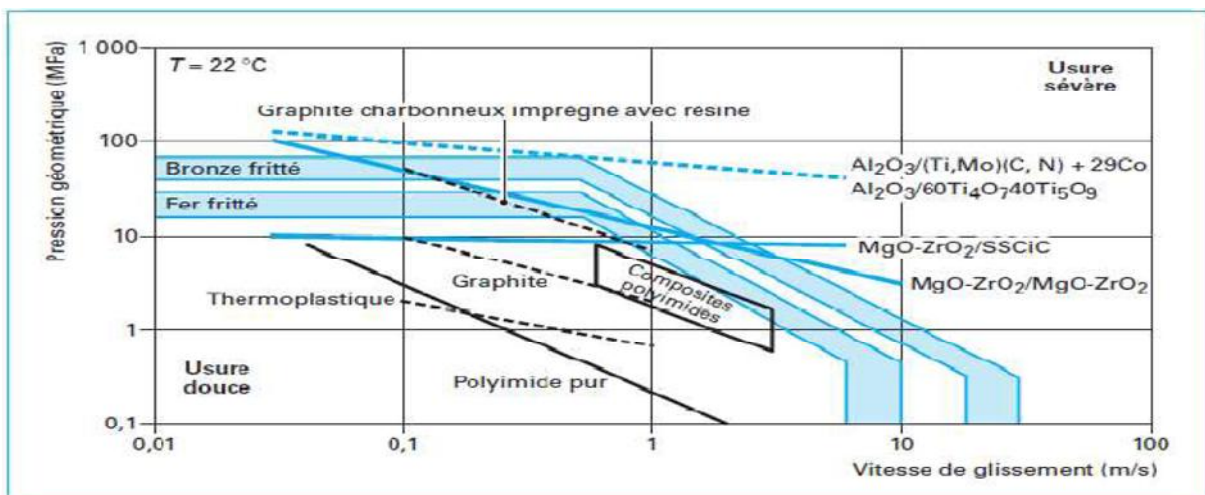
La pression de contact et la vitesse de glissement sont les deux paramètres clefs de la sollicitation des matériaux dans un tribo-système. Elles interviennent de diverses manières, et d'abord de manière globale. En effet, les valeurs du produit  $p v$  sont fréquemment utilisées dans les fiches des producteurs de matériaux pour préciser les limites d'utilisation des matériaux et couples de matériaux. La valeur  $p v$  en MPa. m/s (pour les anglo-saxons en psi.ft/min) est le produit de la pression de contact par la vitesse de glissement et caractérise la sollicitation énergétique du

tribosystème/contact. Selon les configurations, la pression est la pression hertzienne de contact (contact non conforme, bille/plan par exemple) ou la pression apparente (contact conforme, plan/plan par exemple). La valeur  $p_v$  multipliée par le coefficient de frottement :  $p_v \mu$  ( $\text{W}/\text{mm}^2$ ),

Détermine la puissance dissipée sous forme de chaleur (énergie de frottement) sur l'aire apparente de contact A (Friction Power Intensité) ; cette énergie est évacuée principalement par conduction thermique, uniformément dans les deux corps, une faible partie étant véhiculée par le lubrifiant. Elle correspond à la puissance thermique générée par frottement et la température de volume des pièces en est une fonction croissante.

L'effet de la pression et de la vitesse ne dépend pas que de la valeur de leur produit : quand l'une de ces grandeurs dépasse une valeur limite, il peut y avoir transition d'un mode d'usure douce (k faible) à un mode d'usure sévère (k élevé), car les matériaux ou le lubrifiant ne peuvent plus supporter les sollicitations thermiques ou mécaniques et « Répondent » par un changement de mécanisme d'usure qui peut aller jusqu'au grippage :

- ✓ **La pression de contact** détermine directement la sollicitation mécanique de la pièce (effet de plastification locale, fatigue...) et de ses couches superficielles (rupture des films superficiels...) : avec le coefficient de frottement, elle détermine les contraintes de traction arrière qui peuvent provoquer la fissuration des couches superficielles fragiles.
- ✓ **La vitesse de glissement** est le facteur le plus influent sur les températures éclair, (flash température) c'est-à-dire les températures transitoires, mais très élevées sur les aires réelles de contact, où les deux corps ne sont séparés que par des films très minces, comme en frottement sec ou en régime mixte. L'élévation locale de la température de contact est susceptible de modifier la nature et les propriétés des surfaces (transitions de phase, ramollissement excessif, fusion... !) ainsi que la rhéologie de l'interface et surtout du lubrifiant liquide, et la réactivité chimique des pièces et du lubrifiant (oxydation...).



**Figure III.5.** Graphe « pression/vitesse de glissement » limite pour différents matériaux en frottement sec à température ambiante (contact conforme ; antagoniste acier pour fer et bronze frittés. [14]

III.6.4. Densité d'énergie de frottement

Le modèle initialement développé par Fleischer utilise des formules simples. La perte énergétique  $E_f$  due au frottement s'écrit :

$$E_f = \mu FN d \quad \text{Avec } \mu \text{ coefficient de frottement de Coulomb.} \quad (2)$$

Le produit  $\mu FN$  représente la force de frottement. La grande similitude entre la formule (1) (expression de l'usure) et la formule (2) (expression de l'énergie de frottement) est évidente ; elle a conduit Fleischer à introduire le paramètre  $e_f$  de densité d'énergie de frottement apparente et à supposer que le volume d'usure est proportionnel à l'énergie de frottement par :  $e_f = \frac{E_f}{v} = \frac{u}{k}$

La densité d'énergie de frottement apparente  $e_f^*$  correspond au potentiel d'énergie total contenu dans un tribo-système. [14]

**III.7. Surface :**

La notion de surface est définie par l'ensemble des propriétés physico-chimiques et mécaniques des matériaux en présence mais aussi par les caractéristiques géométriques du contact. Citons par exemple l'énergie superficielle : elle influe sur les propriétés de frottement à sec des matériaux au travers des forces d'adhésion mais aussi sur le comportement du contact en régime lubrifié au travers des phénomènes de mouillage et d'étalement.

La topographie est une caractéristique géométrique de grande importance (figure III.6).

La rugosité joue un rôle essentiel puisqu'elle détermine l'aire effective de contact et donc la distribution des pressions superficielles. Il faut aussi garder à l'esprit qu'un état poli miroir ne correspond pas forcément à la rugosité idéale des surfaces pour conférer une vie saine au système tribologique. Par exemple, dans le cas de deux matériaux frottant de dureté différente, la diminution de la rugosité du corps le plus dur est une bonne solution pour diminuer le frottement et l'usure par abrasion alors qu'une certaine rugosité du corps le moins dur facilite la rétention d'un lubrifiant et limite également le frottement et l'usure par adhésion.





Effets		Schématisation du contact [rugosité, défauts de forme...]	Incidences prévisibles sur le frottement
Imbrication			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Résistance au déplacement</li> <li>- Déformations, ruptures... des aspérités</li> </ul>
Déformations élastiques, plastiques	Cas général		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modification de la topographie : rugosité, portance...</li> <li>- Ecoulements</li> </ul>
	Pénétration (dureté de A > dureté de B)		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Résistance au déplacement</li> <li>- Labourage de B par A</li> <li>- Transfert de B sur A</li> </ul>
Adhésion			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Résistance au déplacement</li> </ul>

Figure III.6 : rapprochement des solides : effets et conséquences

III.8.Circuit tribologique :

L'ensemble des détériorations de la surface et la perte de matériau donnent les caractéristiques de l'usure. Ce processus se traduit par un enchaînement d'événements liés essentiellement à la présence du troisième corps : détachement des particules, piégeage et formation de débris pour aboutir à l'établissement d'un régime stationnaire traduisant l'équilibre entre détachement et élimination des particules.

Cet enchaînement demande de ne pas confondre particules détachées et particules d'usure, et est fortement influencé par la géométrie des premiers corps et la rigidité du mécanisme.

Le gradient de vitesse auquel sont soumis les débris qui constituent le troisième corps (adhérent ou non après ouverture du contact) peut se traduire en termes de débits, dont les différentes composantes participent au processus d'usure défini comme le circuit tribologique de Berthier (figure III.7). [15]

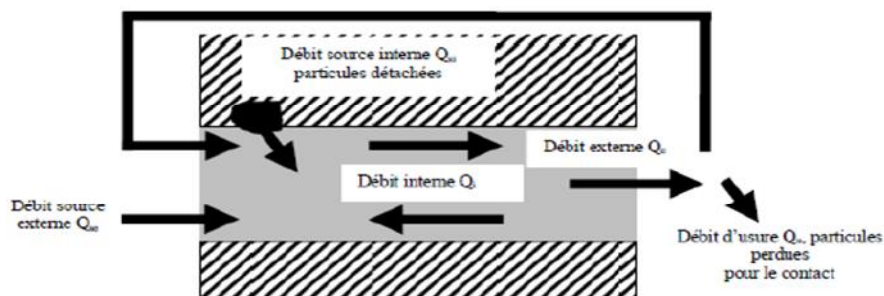


Figure III-7 : Circuit tribologique de Berthier

Le détachement de particules ou débit source interne ( $Q_{s,i}$ ) alimente le contact en troisième corps dont le mouvement se traduit par le débit interne ( $Q_i$ ). Les particules éjectées du contact constituent le débit externe ( $Q_e$ ) qui se partage à son tour en un débit de recyclage ( $Q_r$ ) qui permet la réalimentation du contact et un débit d'usure ( $Q_u$ ) qui concerne les particules définitivement perdues par le système tribologique.

Dans le cas de la lubrification liquide ou solide, il faut tenir compte de l'élément artificiel apporté au système tribologique que l'on traduit par le débit source externe ( $Q_{s,e}$ ). Il apparaît ainsi, qu'en aucun cas la mesure du volume de dégradation des premiers corps n'est représentative de l'usure du couple tribologique testé. Si aucun lubrifiant n'est apporté au contact ce qui se traduit par  $Q_{s,e}=0$ , le terme de débit source ( $Q$ ) ne représente que le débit source interne. O. Dalverny écrit ainsi les relations d'équilibre des débits pour différents types de circuits tribologiques (conservation de la quantité de matière) :

$$\begin{array}{l}
 \text{Circuit ouvert :} \left\{ \begin{array}{l} Q_i = Q_s - Q_e \\ Q_u = Q_e \end{array} \right. \quad \text{soit} \quad \left\{ \begin{array}{l} Q_i = Q_s - Q_u \\ Q_u = Q_e \end{array} \right. \\
 \\
 \text{Circuit fermé :} \left\{ \begin{array}{l} Q_i = Q_s - Q_e + Q_r \\ Q_u = Q_e - Q_r \end{array} \right. \quad \text{soit} \quad \left\{ \begin{array}{l} Q_i = Q_s - Q_u \\ Q_u = Q_e - Q_r \end{array} \right.
 \end{array}$$

**III.9. Le triplet tribologique :**

Le triplet tribologique est constitué par le mécanisme, les deux premiers corps et le troisième corps. Il permet de décrire les interactions entre les différents éléments qui entourent le contact, c'est-à-dire la 'boucle' (ou circuit) qui représente l'équilibre des forces extérieures au contact. Le mécanisme c'est l'ensemble du système mécanique qui impose les conditions de fonctionnement et via l'équilibre de forces internes (aspect mécanique) et via l'environnement ambiant (aspect physicochimique).

## ✓ Les premiers corps :

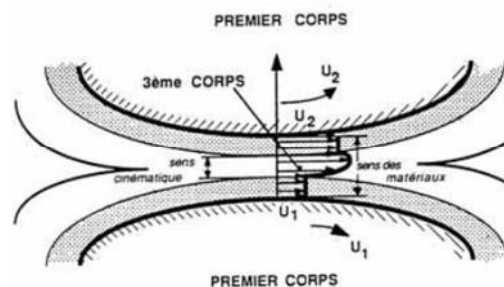
Ce sont les matériaux délimitant le contact et à travers lesquels les efforts sont transmis. Ils interviennent par leurs structures et leurs propriétés thermomécaniques, en induisant des déformations qui à leur tour définissent la zone de contact élémentaire. Les contraintes locales sont générées par le chargement normal et le déplacement tangentiel imposé, et affectent le volume du matériau. La profondeur (pénétration) affectée par ces contraintes locales avoisine en général  $50\mu\text{m}$ .

## ✓ Le troisième corps :

C'est le volume de matière séparant les premiers corps, des particules élémentaires sont détachées d'un ou des deux premiers corps et s'agglomèrent cet agglomération de particules constitue le troisième corps et ces particules peuvent être piégées ou refoulées du contact.

Berthier a défini le troisième corps selon deux aspects :

- au sens matériaux, comme étant la zone qui marque une nette discontinuité de composition très près de la surface. Cette zone comprend des 'écrans' de faible épaisseur ainsi que des particules solides circulant dans le contact pour former un film continu ou discontinu.
- au sens cinématique, comme étant l'épaisseur au travers de laquelle la différence de vitesse entre les deux premiers corps est accommodée. Le troisième corps est dit 'naturel' lorsqu'il est formé par l'un ou les deux premiers corps. On peut injecter un troisième corps dit artificiel comme le graphite par exemple. [16]



*Figure III.8: définition du troisième corps au sens cinématique.*

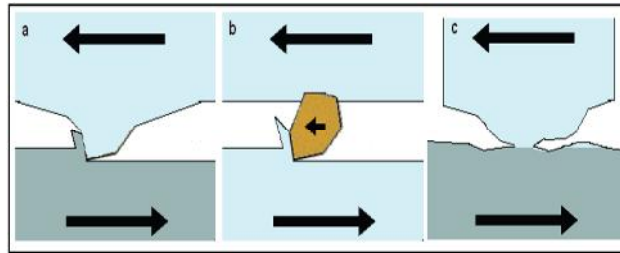
### III.10. Principaux mécanismes d'usure des surfaces :

L'usure est un ensemble complexe des phénomènes difficiles à interpréter, amenant une émission des débris avec perte de masse, de côtes, de forme, et s'accompagnant des transformations physiques et chimiques des surfaces.

Ci-après on va présenter les mécanismes élémentaires responsables de l'endommagement des surfaces.

### III.10.1. Usure par abrasion :

L'usure abrasive est définie comme étant l'usure par déplacement de matière, produite par des particules dures ou des protubérances dures. Les particules dures peuvent se trouver encastrées dans l'une des surfaces (voir Figure III. 10 a) ou être entre les deux surfaces en mouvement relatif (voir Figure III.10 b). [17]



**Figure III.9:** Mécanisme d'usure abrasive à deux corps, d'usure abrasive à trois corps et d'usure adhésive.

Les surfaces endommagées par abrasion présentent des sillons de profondeur variable, parallèles au déplacement. L'usure est assez constante au cours du temps, le volume des débris croît linéairement avec la charge appliquée et la distance parcourue.

La perte de matière dépend à la fois du matériau usé et de l'antagoniste.

La dureté et la ductilité d'un matériau jouent un rôle important sur sa résistance à l'usure abrasive. Pour créer un sillon ou une rainure, il suffit que la dureté de l'antagoniste soit seulement de 20 % supérieure à celle de la surface rayée. Quant à la ductilité, elle caractérise l'aptitude du matériau à se déformer sans décohésion c'est à dire sans émission des débris.

### III.10.2. Usure par adhésion :

Le mécanisme d'adhésion (voir Figure III.10 c) est une usure par transfert de matière d'une surface sur l'autre pendant leur mouvement relatif, due à un processus de soudure en phase solide.

La matière d'une pièce est transférée sur l'autre pendant le mouvement, par soudage en phase solide.

Les métaux, s'ils sont mutuellement solubles, forment des alliages par diffusion.

-Si l'interface est moins solide que les pièces, les jonctions se cisailent par rupture adhésive, l'usure est modérée ou quasi nulle.

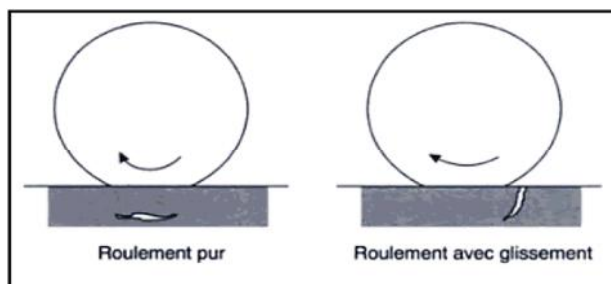
-Si l'interface est plus solide qu'une des pièces, il y a rupture cohésive, usure sévère, voire grippage. L'interface se fixe sur la pièce la plus résistante ou se détache sous forme de particules qui, écrouies et oxydées, peuvent contribuer à l'adhésion.

On sait calculer ou mesurer la force d'attraction entre deux matériaux mais pas la force de décohésion une fois le contact établi. La séparation par décohésion ne se fait pas d'un coup mais se propage comme une fissure ; le frottement vient de la force requise pour cisailer les jonctions.

### III.10.3. *Usure par fatigue* :

L'endommagement des surfaces par fatigue de contact se manifeste lorsque les couches superficielles sont soumises à des contraintes répétées ou alternées qui conduisent à l'amorçage des fissures. Ces sollicitations peuvent être d'origine mécanique ou thermique.

Les dégradations apparaissent sous forme des piqûres, fissures, écaillage et s'accompagnent des modifications structurales. Les avaries par fatigue ou petits débattements se rattachent à ce type de mécanisme. [17]

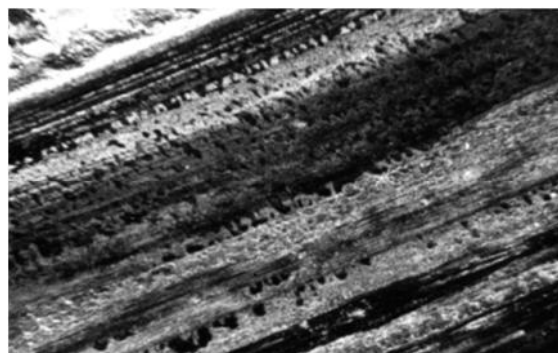


**Figure III.10:** Mécanisme d'usure par fatigue

Sous l'effet d'un roulement pur, on observe des fissures parralles à la surface (contraintes de cisaillement maximales) ; en présence d'un glissement, on observe des fissures superficielles perpendiculaires à la surface (contraintes de traction maximale, voir Figure III.11).

### III.10.4. *Usure corrosive ou tribo-chimique* :

Cette forme d'usure intervient lorsque le frottement se produit dans un environnement réactif (atmosphère, lubrifiant...) pour les matériaux en présence. Dans ce type de situation, l'usure peut être initiée ou accentuée par la réaction chimique entre l'environnement et les surfaces frottantes. Cette réaction, qui peut être créée ou activée par l'énergie dissipée en frottement dans l'interface, conduit à la formation d'une couche superficielle (film réactionnel) solide, non soluble dans l'environnement, de faible épaisseur, adhérente aux substrats, qui protège généralement les surfaces de l'usure adhésive. L'usure se manifeste alors lorsque les sollicitations de frottement au contact conduisent à l'élimination des couches formées (figure III.12). [13]

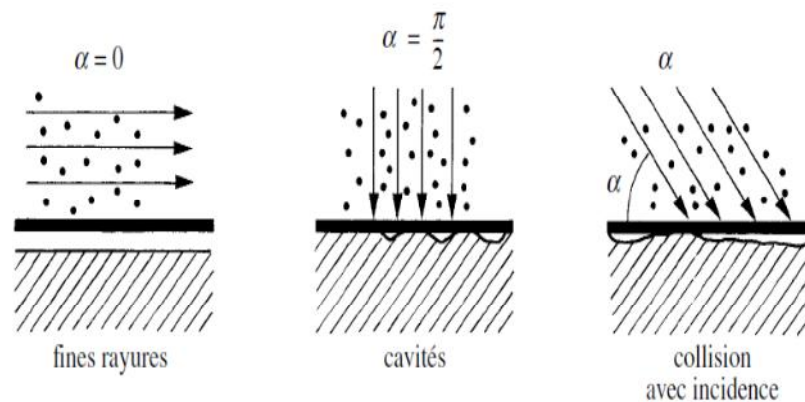


**Figure III.11 :** Usure corrosive

*III.10.5. Usure érosive :*

L'**usure érosive** se définit comme la perte de matière provoquée par l'action de particules contenues dans un fluide en mouvement et qui viennent heurter une surface solide. Comme dans le cas de l'usure abrasive plusieurs paramètres influencent ce mode d'usure:

- La taille, le nombre, la morphologie et la vitesse des particules.
- L'angle d'impact qui définit le faciès des endommagements observés (fig. III.13). Un faible angle d'incidence favorise l'effet de coupe alors qu'une incidence normale entraîne plus de déformation. L'intensité des endommagements dépend de plus du comportement des matériaux. Les résultats montrent que l'érosion est maximale pour de faibles angles d'attaque dans le cas des matériaux à caractère ductile et qu'au contraire, elle est maximale sous incidence normale avec des matériaux fragiles.



**Figure III.12 :** Mécanismes de l'érosion d'une surface par des particules solides contenues dans un fluide en mouvement.

*III.10.6. Usure par cavitation :*

La cavitation apparaît lorsque le liquide atteint, au voisinage d'une surface, sa pression de vapeur saturante. Il crée alors une cavité ne pouvant rester stable dans le milieu. Elle implose donc et produit une onde de choc créant sur la surface des contraintes très élevées qui se traduisent souvent par l'apparition de faciès en forme de cratère.

*III.10.7. Usure par fretting :*

Une situation d'usure en fretting correspond au contact de deux corps soumis à un déplacement relatif de faible amplitude, générant des débris et/ou des dégradations de surfaces à l'intérieur du contact par des processus mécaniques, adhésifs... Dans certains cas, des fissures orientées perpendiculairement à la surface de frottement peuvent apparaître à l'extérieur du contact, pour un nombre de cycles élevé aussi bien pour des matériaux ductiles que fragiles (phénomène de

fatigue de surface). Si les débris d'usure générés dans l'interface ne peuvent pas être évacués rapidement à l'extérieur, ils peuvent créer des dysfonctionnements ou des dégradations particulières (difficulté de démontage des assemblages due au colmatage des interfaces, usure abrasive...). [13]

# Chapitre IV : techniques expérimentales

**IV.1.Introduction :**

Dans ce chapitre, nous allons présenter les techniques et les équipements expérimentaux employer pour la caractérisation mécanique et métallographique ainsi que les essais de l'usure pour l'acier utilisé dans notre étude.

**IV.2.Problématique :**

La présence des débris (sable ou de rouille...) qui sont parfois de nature silice (matière très dur qui dépasse dans quelques cas la dureté des aciers) entre le siège et le corps de pompe créent des sillons ou des rainures lors de montage sur la surface de ce dernier, ce qui provoque l'usure entre les deux.

La boue qui s'écoule dans les conduites soit d'aspiration ou de refoulement avec un débit important et une pression élevée procure à ces particules une énergie importante, l'ors de la fermeture du clapet, la pression s'accroît ce qui permet à la boue de trouvé des failles entre le siège et le corps de pompe qui sont dû au sillons causer par les déblais. La vitesse des particules augmente et le phénomène de sifflage (formation de petits jets très fins et bruyants) qui arrache la matière s'accroît.

Puisque le problème est dans le corps de pompe qu'est en acier (35CD4), nous avons opérés des traitements thermiques, essais mécanique et l'essai tribologique, afin de trouvé des solutions.



*Figure IV.1: Le corps de pompe endommagé .*

**IV.3. Acier utilisé :**

Acier pour traitement thermique faiblement allié au chrome et au molybdène 35CD4.

*IV.3.1. Normes européennes :*

- Symbolique : 34CrMo4
- Numérique : 1.7220

Le tableau récapitule la composition chimique de l'acier 35CD4 :

**Tableau IV.1.** la composition chimique de l'acier 34CD4.

	C	Mn	Si	S	P	Cr	Mo
Max	0.33	0.6	0.1	0.035	0.035	0.85	0.15
Mini	0.39	0.9	0.4			1.15	0.30

*IV.3.2. Emplois :*

Cet acier de Traitements thermiques, permet de réaliser des pièces de moyennes et grosses sections soumises à des contraintes élevées. Il permet d'obtenir une dureté élevée ainsi qu'une bonne résistance à l'usure.

**IV.4. Essais de dureté :***IV.4.1. Echantillons de duretés :*

Nous avons usiné des échantillons et à partir de ces trois états d'aciers utilisés dans notre étude à savoir :

- ✓ *Acier de référence (acier de corps de pompe).*
- ✓ *Acier 35CD4 à l'état recuit :* l'acier de référence est chauffé à une température de 850°C. le temps de maintien est d'une heure, suivi d'un refroidissement lent (plus de 24 h).
- ✓ *Acier 35CD4 trempé :* l'acier de référence est chauffé à une température de 850°C. Le temps de maintien est d'une heure, suivi d'un refroidissement à l'huile. Le traitement de trempé est suivi d'un traitement de revenu à 450°C avec un refroidissement à l'air.

*IV.4.2. Déroulement des essais :*

La pratique de dureté nécessite une préparation des échantillons sur la face qui fait l'objet de l'essai. Cette préparation consiste tout d'abord à faire un polissage.

Les mesures de dureté des échantillons ont été effectuées à l'aide des duromètres de type « WOPERT DIA TESTOR RC » (figure V.11), constitué de deux parties :

- La première est la partie d'essai nous permettant d'effectuer les trois types d'essais Rockwell, Vickers, et Brinell. Il est muni d'un sélecteur de charge et d'un plateau ou table sur laquelle les éprouvettes sont posées.
- La deuxième partie nous permet de mesurer l'empreinte des billes ou des pyramides à un grossissement de 70 fois sur l'écran de verre dépoli. Ce duromètre est alimenté par une tension de 220V de fréquence de 50Hz.



*Figure IV.2. Duromètre wopert dia testor RC*

#### **IV.5. Micro Duromètre :**

Comme son nom l'indique, cet appareil a pour le but de calculer la microdureté à l'échelle microscopique. Le résultat du diamètre de l'empreinte ainsi que sa microdureté sera affichés automatiquement par le micro duromètre.



*Figure IV.3. Micro Duromètre.*

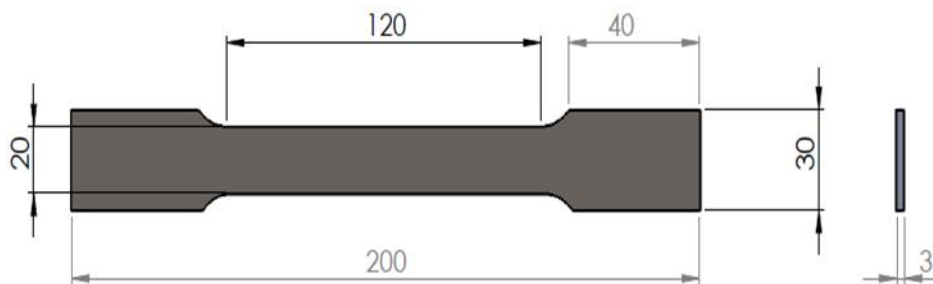
#### **IV.6.Essai de traction :**

##### *IV.6.1.Eprouvettes de traction :*

Les éprouvettes de traction que nous avons réalisées sont des éprouvettes plates.

Les dimensions des éprouvettes sont fixées par des normes en fonction du type d'alliage.

Pour les aciers de forme ( $d$  ou  $b > 0,3$  mm), la norme est NF A 03-251 et le dimensionnement normalisé est :  $L_0 + d/2 < L_c < L_0 + 2d$ .



*Figure IV.4: L'éprouvette de traction*

*IV.6.2. Machines utilisées pour la réalisation des éprouvettes et des échantillons :*

- ✓ Scie mécanique :

La Scie mécanique nous a servi pour le découpage des échantillons utilisé pour les essais de traction.



*Figure IV.5 : Scie mécanique utilisée.*

- ✓ Usinage des éprouvettes :

Après le découpage, une fraiseuse verticale de type ALMO a été utilisée pour usiner ces éprouvettes de traction.

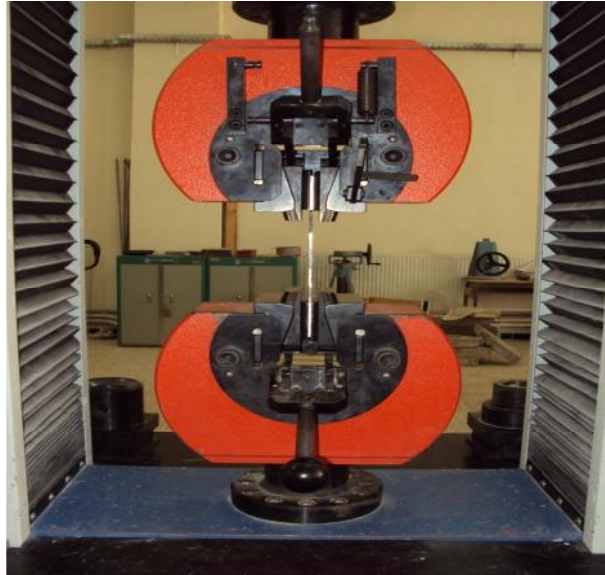
Lors de l'usinage de ces éprouvettes sur la fraiseuse, des brides ont été utilisées pour fixer les échantillons sur la machine, montage entre brides.



*Figure IV.6: Fraiseuse verticale.*

- ✓ Machine de traction :

Une machine de traction à commande numérique de type IBERTEST, a été utilisée pour réaliser les essais de traction.



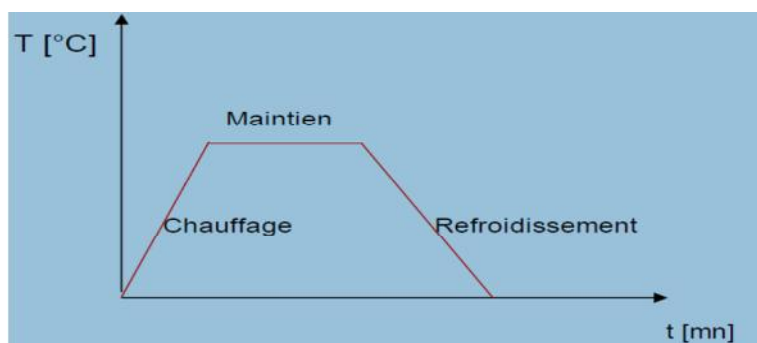
*Figure IV.7: Machine de traction.*

#### **IV.7.Traitement thermique effectués sur les éprouvettes :**

##### *IV.7.1.Cycle d'un traitement thermique :*

Généralement, un traitement thermique comprend trois étapes :

- Un chauffage à une température dépendant du type de traitement voulu.
- Maintien isotherme à cette température de traitement.
- Un refroidissement dans un milieu préalablement défini.



*Figure IV.8: Cycle d'un traitement thermique.*

*IV.7.2. Traitement de trempe :*

- La trempe est utilisée pour augmenter la dureté.
- Le mécanisme de la trempe est comme suit :

On a mis les échantillons dans un four électrique.

Chauffage à une température d'austénitisation. Dans notre cas on a chauffé les échantillons à une température de 850 °C puis on les a maintenus à cette température pendant 1 heure.



*Figure IV.9: Four électrique utilisé.*

*IV.7.3. Le revenu :*

Le revenu se pratique après le traitement de trempe .nous avons chauffé notre matériau à une température inférieure à celle d'austénitisation à 450°C. Le temps de maintien est de 1 heure et le refroidissement à l'air.

*IV.7.4. Le recuit :*

Nous avons choisi 850°C comme température d'austénitisation, une durée d'une heure comme temps de maintien, et un refroidissement lent (plus de 24 h).

**IV.7.5. Observation microscopique des échantillons :***IV.7.5.1. Préparation des échantillons :*

- ✓ Le polissage :

La microscopie métallographique nécessite une préparation des échantillons à observer, cette préparation consiste à rendre la surface de l'échantillon plane, bien dégraissée et sans déformation gênante à l'aide d'une polisseuse de type « Struers » alimentée sous une tension de 220 V.

La vitesse de rotation du disque varie de (150 tr/mn à 300tr/mn).

Pour l'opération de polissage, nous avons utilisé un papier verre de différentes numérotations.



**Figure IV.10:** Polisseuse à deux disques utilisée pour le dégrossissage



**Figure IV.11:** Polisseuse à un disque utilisée pour la finition.

✓ Microscope :

Pour procéder à l'observation de nos échantillons étudiés, après leur polissage et attaque chimique avec du Nital de composition chimique 4%  $\text{HNO}_3$  + 96%  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ , on a utilisé un microscope optique. et pour chaque échantillon observé on a pris des photos différentes grossissements.

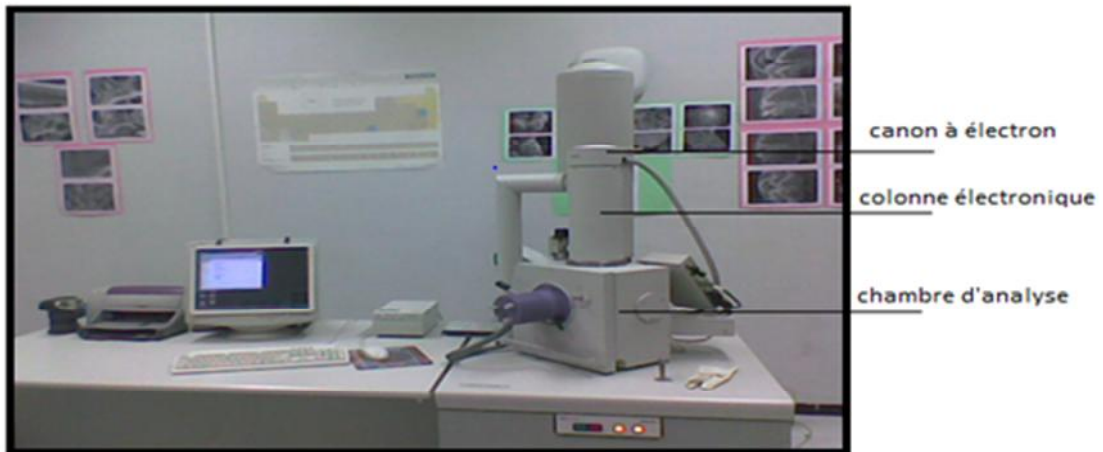


**Figure IV.12:** Microscope optique.

#### IV.7.6-Le microscope électronique à balayage :

Un microscope électronique à balayage est essentiellement composé d'un canon à électrons et d'une colonne électronique, dont la fonction est de produire une sonde électronique fine sur l'échantillon, d'une platine porte-objet permettant de déplacer l'échantillon dans les trois directions et un détecteur permettant de capter et d'analyser les rayonnements émis par l'échantillon. En outre l'appareil doit nécessairement être équipé d'un système de pompes à vide. La microscopie électronique à balayage (MEB ou SEM pour Scanning Electron Microscopy en anglais) est une technique de microscopie électronique

capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions électrons-matière.



*Figure IV.13: Microscope Electronique à Balayage.*

Le principe de fonctionnement d'un microscope électronique à balayage est le suivant : quand le faisceau d'électrons primaires balaie la surface de largeur  $l$  de l'échantillon et atteint un point de coordonnées  $(x, y)$ , il y'a émission en ce point de divers types de signaux générés par l'interaction des électrons primaires et les atomes de l'échantillon situé au point  $(x, y)$ . Un détecteur approprié recueille un de ces signaux et le pré amplifie. Le signal final alors amplifié module la brillance de point  $(x, y)$  de l'écran cathodique d'observation. En d'autres termes plus le signal émis est intense, plus le point homologue  $(x, y)$  de l'écran cathodique sera brillant. En balayant toute la surface de l'échantillon de largeur  $l$  on obtient une image agrandie de la structure sur l'écran, dont la brillance des pixels pourra passer de noir au blanc en passant par tous les niveaux de gris.

#### IV.8. Essais d'usure :

Dans cette étude on a fait varier les trois paramètres à savoir, la vitesse de glissement, la distance parcourue et la pression de contact en fonction de la perte de masse des trois états de aciers étudiés.

Pour quantifier la perte de masse et le taux d'usure, les échantillons (pions) ont été pesés avant, et après chaque expérience à l'aide d'une balance électronique (figure IV.16) dotée d'une précision de  $10^{-4}$  g.

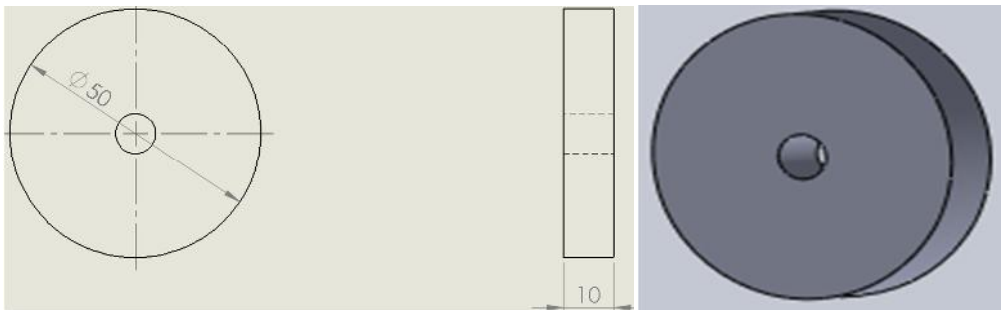


*Figure IV.14: Balance électronique.*

*IV.8.1. Les matériaux utilisés :*

- ✓ Le disque :

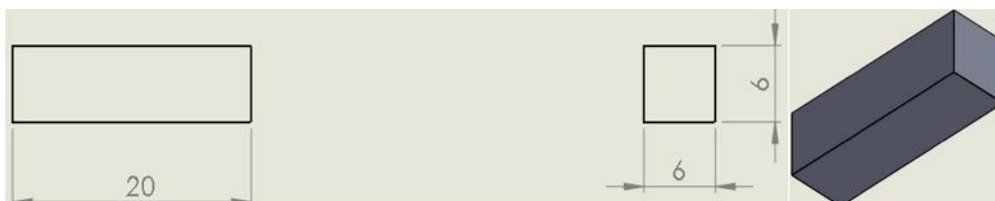
Les disques ont été réalisés en tournage à partir des barres rondes en acier **Z 200**. Après l'usinage les disques ont subi un traitement de trempe afin d'augmenter leurs duretés ainsi que leurs résistances à l'usure.



*Figure IV.15: La géométrie des disques.*

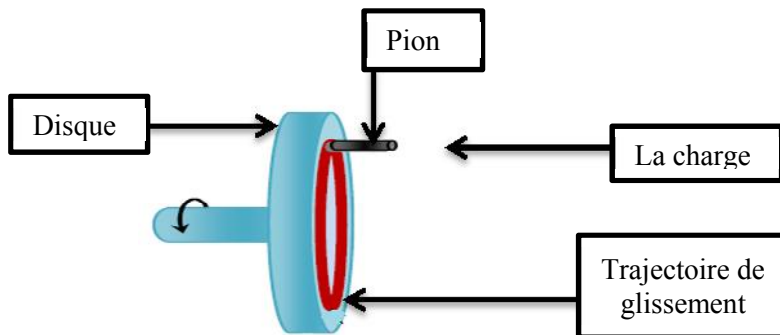
- ✓ Les pions :

Les pions ont été réalisés à partir des trois types d'aciers étudiés.



*Figure IV.16: La géométrie des pions.*

- ✓ le couple tribologique (pion-disque):



*Figure IV.17: couple tribologique pion-disque.*

#### IV.8.3. Mesure de l'état de surface des disques :

On a pris les rugosités des disques à l'aide d'un appareil **Mitutoyo SJ.201** qui est un rugosimètre à palpeur avant chaque essai.

Les rugosités des disques comprises entre 2 et 3.



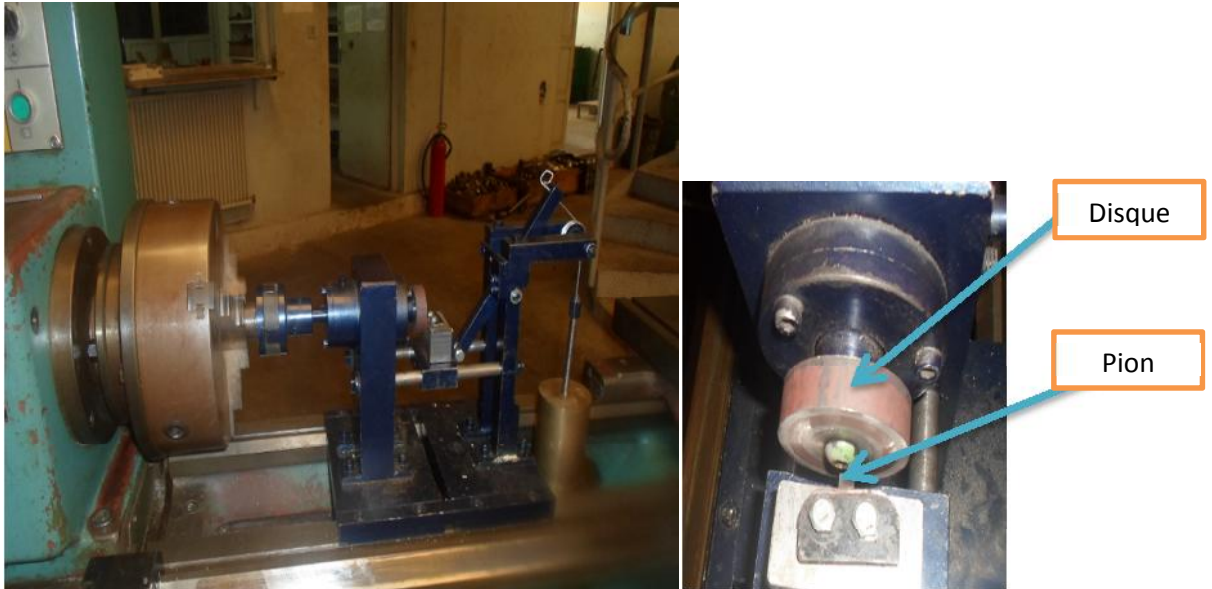
*Figure IV.18: rugosimètre à palpeur.*

#### IV.8.4. Description du tribomètre :

Le tribomètre a été conçu et réalisé à l'université MOULOUD MAMMERRI, il permet d'étudier l'usure et le frottement des matériaux. A partir des efforts normaux et tangentiels mesurés, nous déterminons le coefficient de frottement, le taux d'usure et la perte de masse pour des couples matériaux donnés.

Le tribomètre se monte sur les glissières d'un tour. Le mouvement de rotation est transmis au disque via un accouplement élastique. L'effort normal est appliqué en continu pendant le processus de frottement entre le pion et le disque.

Tous les essais ont été réalisés sans lubrification et dans les conditions de température ambiante et de pression atmosphérique sensiblement identique.

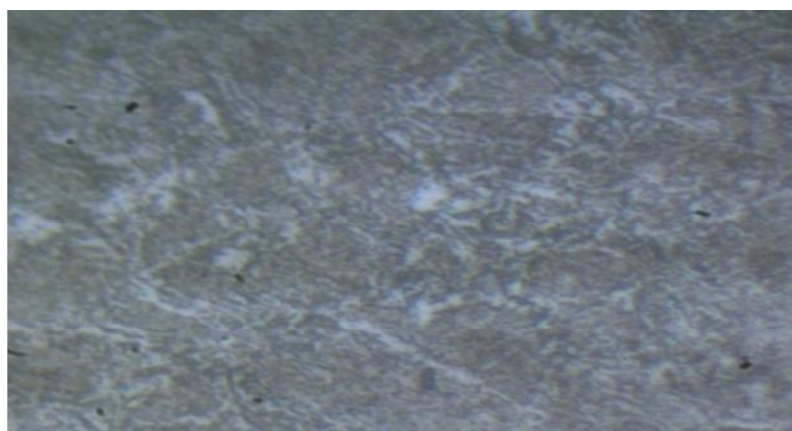


**Figure IV.19:** Le tribomètre.

# Chapitre V: résultats et discussions

**V.1. Introduction :**

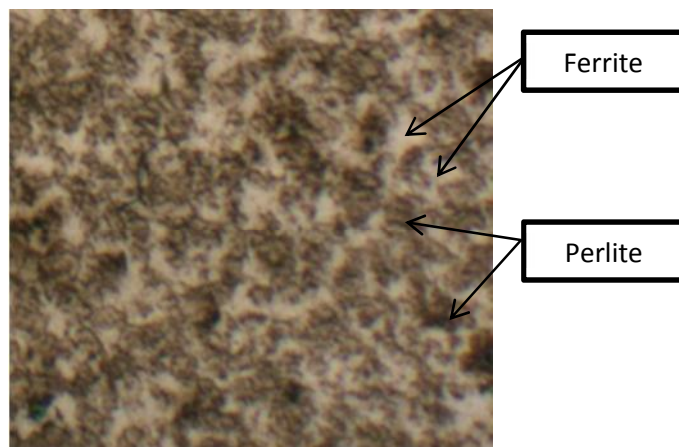
Les résultats expérimentaux sont présentés dans ce chapitre. Les résultats donc sont discutés relativement aux paramètres tribologiques essentiels à savoir : la pression de contact, la durée de fonctionnement (la distance de glissement), la vitesse de glissement ainsi que l'effet des traitements thermiques. Nous trouvons aussi une caractérisation métallographique et mécanique de notre matériaux traité et non traité.

**V.2. Observations métallographiques :****a) Acier de référence :**

Grossissement x400

*Figure V.1. microstructure de l'acier de référence.***b) Acier 35CD4 a l'état recuit :**

Grossissement x40



Grossissement x 100



Grossissement x 200



Grossissement x400

*Figure V.2. microstructure 35CD4 a l'etat recuit.***c) Acier 35 CD4 trempé :**

Grossissement x 200



grossissement x 400

*Figure V.3. la microstructure de l'acier 35CD4 a l'etat trempé.*

L'observation micrographique montre que la microstructure de l'acier est composée essentiellement de ferrite et de perlite. Les traitements thermiques influent sur ces composés. Le recuit permet d'avoir une structure plus homogène : les deux phases (perlitique et ferritique) sont distribuées en proportion très proches.

V. 3.résultats de l'essai de dureté :

a) Essai brinell (HB) :

Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux ci- dessous :

Tableau V.1.Essai brinell (HB) avec une charge de 100 kg. Pour l'acier 35CD4 à différents états.

essais aciers	1	2	3	La moyenne
Acier de référence	<b>287.25</b> D moy=0.66mm	<b>287.25</b> D moy=0.66mm	<b>278.58</b> D moy=0.67mm	<b>284.36</b>
Acier recuit	<b>159.23</b> D moy=0.88	<b>166.98</b> D moy=0.86	<b>163.04</b> D moy=0.87mm	<b>163.083</b>
Acier trempé	<b>431.7</b> D moy=0.54mm	<b>431.7</b> D moy=0.54mm	<b>431.7</b> D moy=0.54mm	<b>431.7</b>

b) Essai de dureté Rockwell (HRA) :

Tableau V.2.Essai de dureté (HRA) avec une charge de 60kg pour l'acier 35CD4 à différents états.

essais aciers	1	2	3	La moyenne
Acier de référence	64	65	63	64
Acier recuit	<b>50</b>	<b>52</b>	<b>51</b>	50
Acier trempé	<b>72</b>	<b>72</b>	<b>72</b>	72

c)Essai de dureté Vickers HV :

Tableau V.3. Essai de dureté HV avec une charge de 30 kg pour l'acier 35CD4 à différents états.

essais aciers	1	2	3	La moyenne
Acier de référence	<b>330,749108</b> D moy=0.58mm	<b>342,45614</b> D moy=0.57mm	<b>330,749108</b> D moy=0.58mm	<b>334.651452</b>
Acier recuit	<b>198,049128</b> D moy=0.53	<b>190,781893</b> D moy=0.54	<b>183,907438</b> D moy=0.55mm	<b>190.9128197</b>
Acier trempé	<b>463,406914</b> D moy=0.49mm	<b>463,406914</b> D moy=0.49mm	<b>463,406914</b> D moy=0.49mm	<b>463.406914</b>

La dureté est un paramètre essentiel pour notre étude. D'après la loi d'Archard, l'usure est inversement proportionnelle à la dureté. Les résultats obtenus par les essais de duretés (**HB**, **HRA**, **HV**) confirment que :

- la dureté de l'acier trempé est supérieure à celle de l'acier de référence. L'augmentation est très marquée : par exemple, la valeur de la dureté Brinell de l'acier trempé passe de **284.36** à la valeur égal à **431.7**. on observe le même résultat pour les autres types de dureté (dureté Rockwell et dureté Vickers).
- Le traitement thermique de recuit rend l'acier moins dur et plus ductile que l'acier de référence.

**c.1) Essai de dureté HV pour l'acier 35CD4 avec traitement de revenu à des températures différentes :**

Les résultats présentés dans ce tableau sont des résultats obtenus lors de l'essai de dureté HV pour l'acier 35CD4 trempé à la température de 850°C suivi du traitement de revenu à des températures différentes ( $t_1=200^\circ\text{C}$ ,  $t_2=300^\circ\text{C}$ ,  $t_3=400^\circ\text{C}$ ,  $t_4=500^\circ\text{C}$ ,  $t_5=550^\circ\text{C}$ ,  $t_6=650^\circ\text{C}$ ).

**Tableau V.4.** L'essai de dureté HV avec une charge de 60 kg pour l'acier 35CD4 trempé à la température de 850°C suivi de traitement de revenu à des températures différentes à différents états.

T°	200C°	300 C°	400 C°	500 C°	550 C°	650 C°
dureté						
Duretés HV	<b>HV=482.91</b> <b>HV=482.91</b> <b>HV=463.40</b>	<b>HV=525.15</b> <b>HV=482.91</b> <b>HV=482.91</b>	<b>HV=482.91</b> <b>HV=482.91</b> <b>HV=463.40</b>	<b>HV=367.81</b> <b>HV=367.81</b> <b>HV=367.81</b>	<b>HV=367.81</b> <b>HV=367.81</b> <b>HV=367.81</b>	<b>HV=267.44</b> <b>HV=263.34</b> <b>HV=263.34</b>
moyenne	<b>HV=473.15</b>	<b>HV=497</b>	<b>HV=473.15</b>	<b>HV=367.81</b>	<b>HV=367.81</b>	<b>HV=264.71</b>

Dans le but de déterminer les éventuels traitements thermiques subits par l'acier de référence, nous avons effectué plusieurs traitements thermiques sous différentes températures. Les résultats sont donnés au tableau V.4.

L'acier de référence subissant un traitement de revenu à une température située entre 550°C et 650°C après un traitement de trempe à une température 835°C-865°C. [18]. en comparant cette valeur avec les résultats obtenus (tableau V.4).

La dureté HV de l'acier de référence est de **334.65 HV**. Cette dureté est obtenue avec un traitement de trempe à 850°C suivi d'un traitement de revenu à une température située entre 550°C et 650°C.

V.2.1. résultats de l'essai de micro dureté :

Les résultats obtenus par les essais de la micro dureté sont présentés ci- dessous :

**Tableau V.5.** Résultats de l'essai de microdureté HV.

Les duretés selon les phases Type d'acier	Ferrite	La moyenne	Perlite	La moyenne
Acier de référence	D=29.1 ; HV=438 D=29.9 ; HV=415 D=30.7 ; HV=394	415.666	D=26.4 ; HV=498 D=28.1 ; HV=470 D=27.3 ; HV=532	500
Acier recuit	D=39.8 ; HV=258 D=41.9 ; HV=211 D=37.9 ; HV=234	234.333	D=34.2 ; HV=288 D=35 ; HV=303 D=35.8 ; HV=317	302.666
Acier trempé	Bainite		Martensite	
	D=25.8 ; HV=549 D=25.9 ; HV=553 D=26 ; HV=557	553	D=24 ; HV=623 D=24.5 ; HV=644 D=24.4 ; HV=618	628.333

Les résultats obtenus par la micro-dureté confirment celles des essais de duretés.

V.3. résultats de l'essai de traction :

a) Acier de référence :

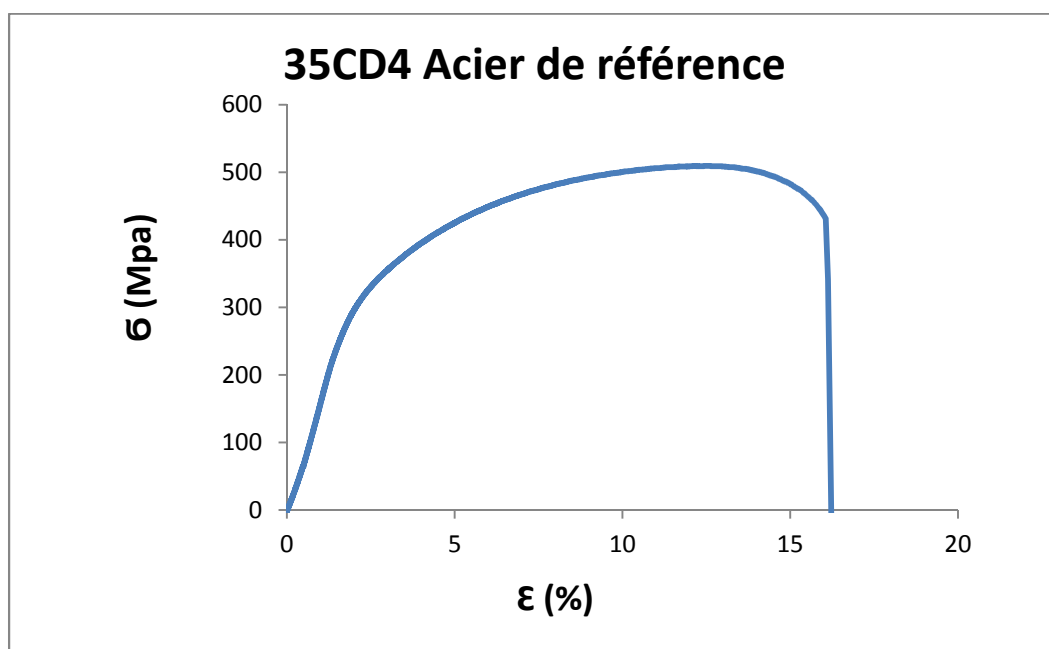
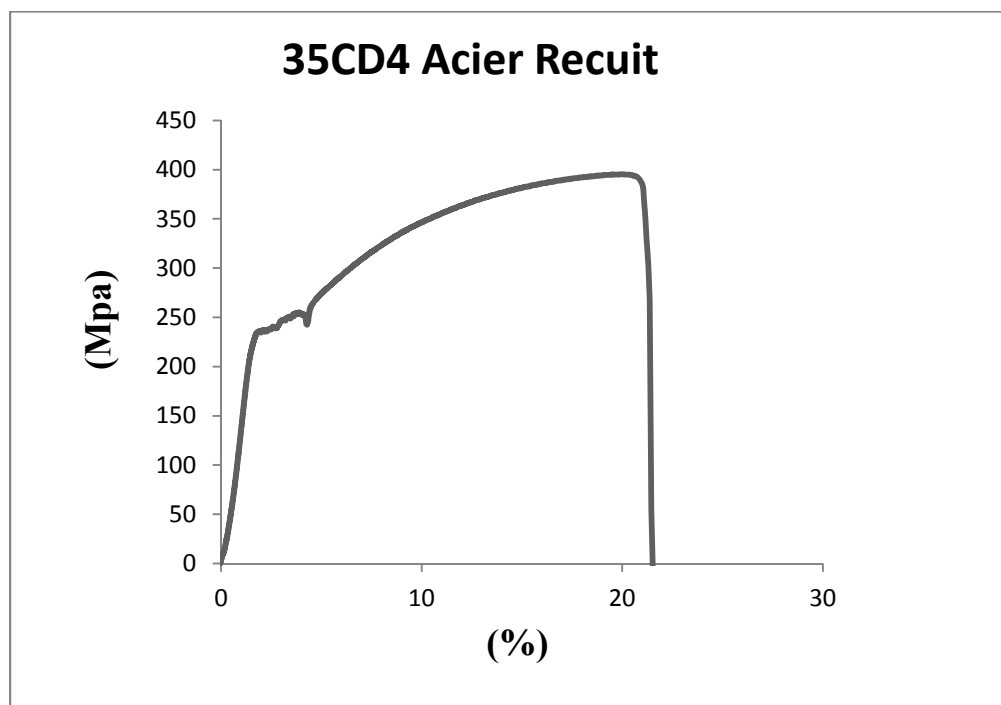


Figure V.4 : la courbe de traction de l'acier de référence.

La **figure V.4** présente la courbe de traction de l'acier 35 CD4 extrait du corps de la pompe à boue. Cette courbe met en évidence un comportement ductile du matériau. La courbe peut être divisée en 3 zones :

- la première a une pente élevée et correspond à la zone élastique (entre 0 et 250 MPa)
- la deuxième peut être qualifiée de zone d'écrouissage. elle s'étend de 300 à 504 MPa, valeur qui correspond à la résistance limite qui engendre une déformation de 13%.
- la troisième est la zone de striction. elle correspond au domaine 504 MPa jusqu'à la rupture.

**b) Acier 35CD4 a l'état recuit :**



*Figure V.5 : la courbe de traction de l'acier 35CD4 a l'état recuit.*

La figure V.5, montre la courbe de traction de l'acier 35CD4 à l'état recuit. Cette courbe présente trois domaines caractéristiques de cette droite. La valeur ainsi obtenue est de l'ordre de 177 MPa, une valeur nettement inférieure à celle des échantillons de référence et celui trempé.

La deuxième zone correspond à un palier de plastification du matériau dans un intervalle allant de (233 MPa, 2,21%) à (246 MPa, 4,68%). A la fin de ce palier, le domaine de déformation purement plastique prend place jusqu'à la striction du matériau qui intervient pour une contrainte de l'ordre 394MPa pour laquelle l'allongement relatif est de 20%.

## c) Acier 35CD4 a l'état trempé :

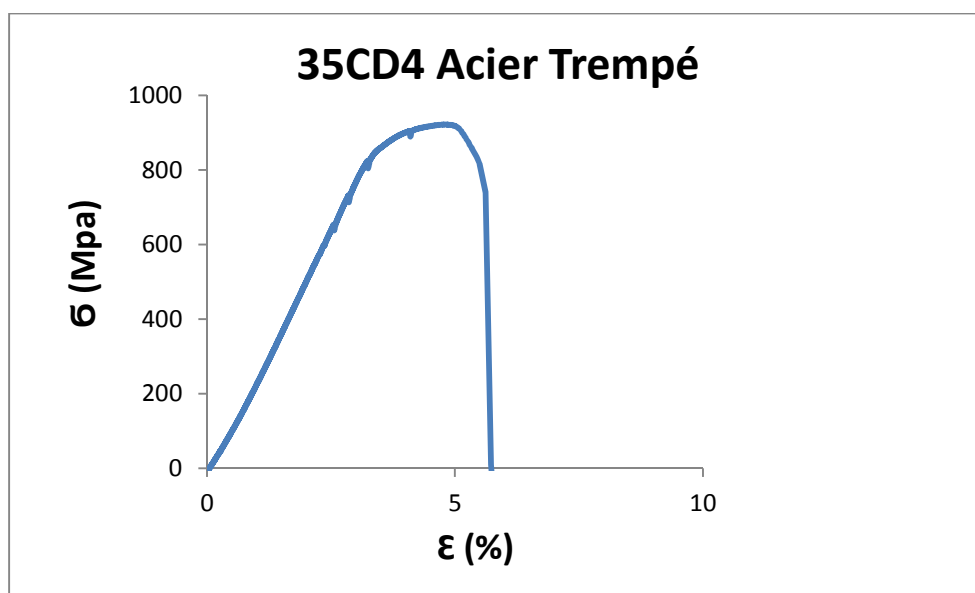


Figure V.6 : la courbe de traction pour l'acier 35CD4 trempé.

La figure V.6, montre la courbe de traction de l'acier 35CD4 à l'état trempé à 850°C dans l'huile et revenu à 450°C. On constate la disparition de la zone plastique. L'allure de la courbe montre que l'acier a un comportement fragile. En considérant les différentes zones sur la courbe de traction, nous constatons que le module de Young prend une valeur de 276 MPa environ. Cette valeur est très légèrement supérieure à celle de l'acier de référence et enregistrons une nette augmentation de la résistance à la traction de l'acier trempé. L'allongement relatif dans ce cas est très inférieur à celui de l'acier de référence.

Les courbes de traction superposées pour les 3 états d'acier étudiés sont présentées sur la figure V.7.

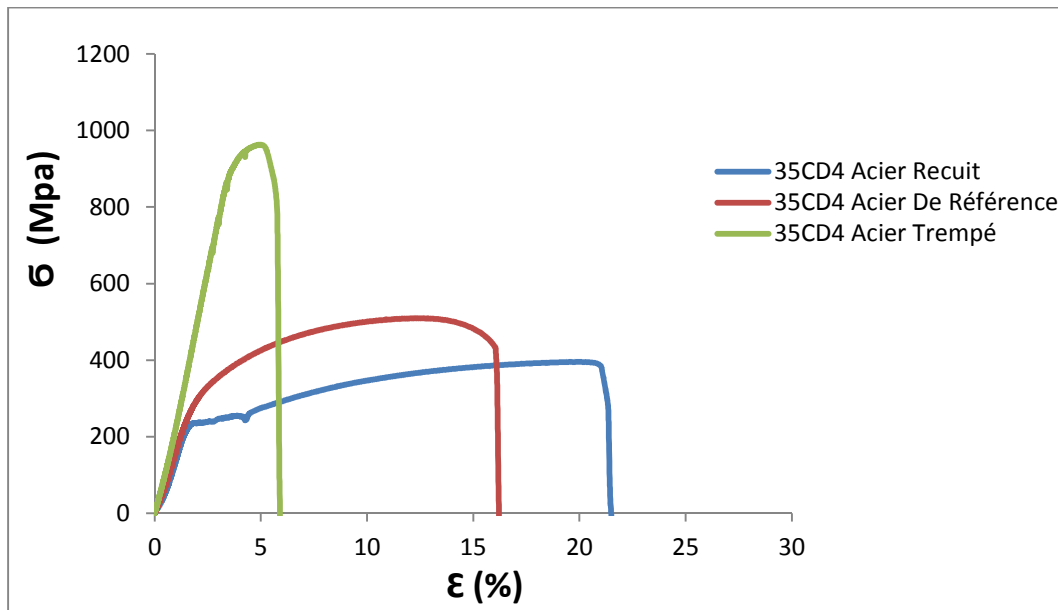


Figure V.7 : courbes de traction superposées pour les 3 états d'acier qu'on a étudié.

En conclusion :

- les courbes de tractions montrent que la contrainte à la rupture a tendance à augmenter avec le traitement de trempé. De même, la contrainte maximum et la contrainte à la limite élastique sont plus élevées. Le traitement de trempé d'un acier faiblement allié a donc pour effet de rendre le matériau plus dur et plus fragile relativement à l'acier recuit.
- Les trois courbes de traction ont un module de Young d'environ 18 092 MPa pour l'acier de référence, 17387 MPa pour l'acier 35 CD 4 à l'état recuit et de 27094 MPa pour l'acier trempé. Ces valeurs sont moins élevées que la valeur théorique pour un métal faiblement allié (environ 200 000 MPa). Ceci est très certainement dû aux problèmes que nous avons rencontrés avec la machine (notamment le glissement des éprouvettes entre les mors pendant l'essai).

#### V.4. Etude de comportement de l'acier 35CD4 à l'usure :

##### 4.1. l'influence de la charge appliquée (pression) :

Nous avons effectué quatre essais pour les trois états du matériau utilisé dans notre étude. Nous avons utilisé quatre charges différentes pour chaque essai. La vitesse de rotation est fixée à une valeur égale à 710 t/min, ainsi que la distance parcourue ( $d = 4942$  m) soit une heure de temps.

Tableau V.6. Les résultats obtenus, la perte de masse en fonction de la charge (pression).

Types d'acier	La masse usée (g)	Les charges appliquées (kg)	Les vitesses (t/m)	Distances parcourue (temps)
Acier de référence	0.03003	2	710	1h
	0.06241	4	710	1h
	0.06829	6	710	1h
	0.08204	8	710	1h
Acier recuit	0.02544	2	710	1h
	0.05636	4	710	1h
	0.06623	6	710	1h
	0.06080	8	710	1h
Acier trempé	0.01308	2	710	1h
	0.02909	4	710	1h
	0.04196	6	710	1h
	0.05796	8	710	1h

D'après le tableau V.6, on constate que plus on augmente la charge, plus on aura une perte de masse importante qui est attribuée à l'arrachement de matière en surface de l'acier. Ce résultat est similaire pour les trois cas d'acier (l'acier de référence, l'acier recuit et celui trempé).

#### Les courbes :

- **Acier de référence :**

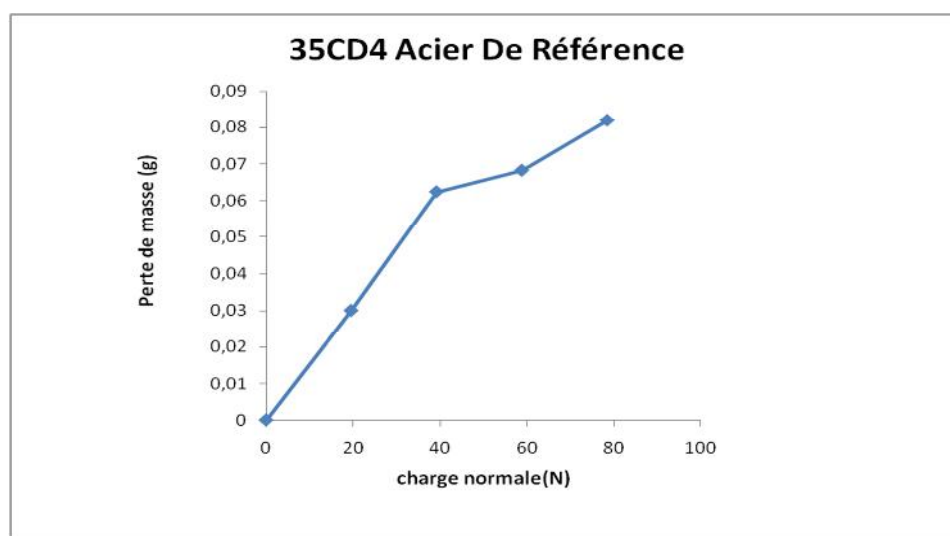
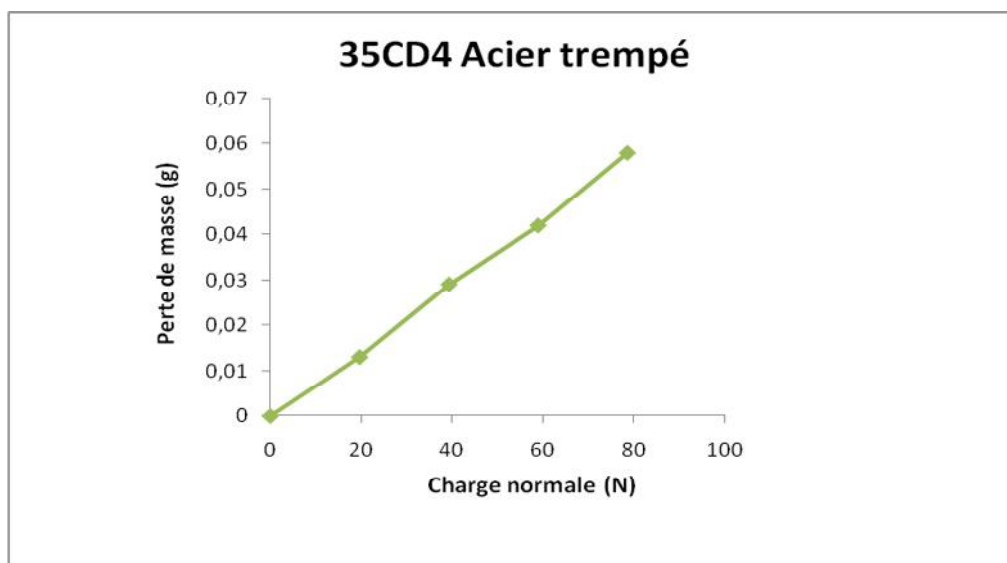


Figure V.8: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 1,373 m/s.

La figure V.8 représente l'évolution de la perte de masse en fonction de la charge appliquée pour l'acier de référence. On remarque que la perte de masse s'accroît avec l'augmentation de la charge appliquée. Cette augmentation est linéaire et peut être représenté par la loi d'Archard.

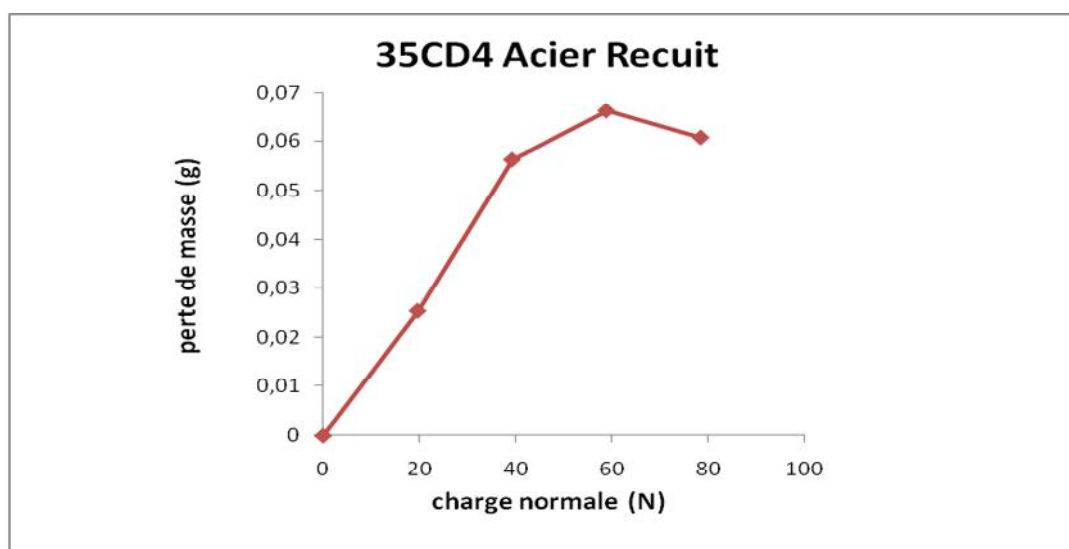
- Acier 35CD4 a l'état trempé :



*Figure V.9: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 1,373 m/s.*

Le même constat est fait pour l'acier 35 CD4 à l'état trempé. La perte de masse s'accroît avec l'accroissement de la charge appliquée et la loi d'Achard reste toujours applicable. En comparant les résultats de perte de masse pour l'acier de référence et celle de l'acier trempé, on constate que l'usure diminue avec la trempe (les valeurs maximales de perte de masse enregistré pour les deux aciers sont, 0.08204 et 0.05796 g respectivement).

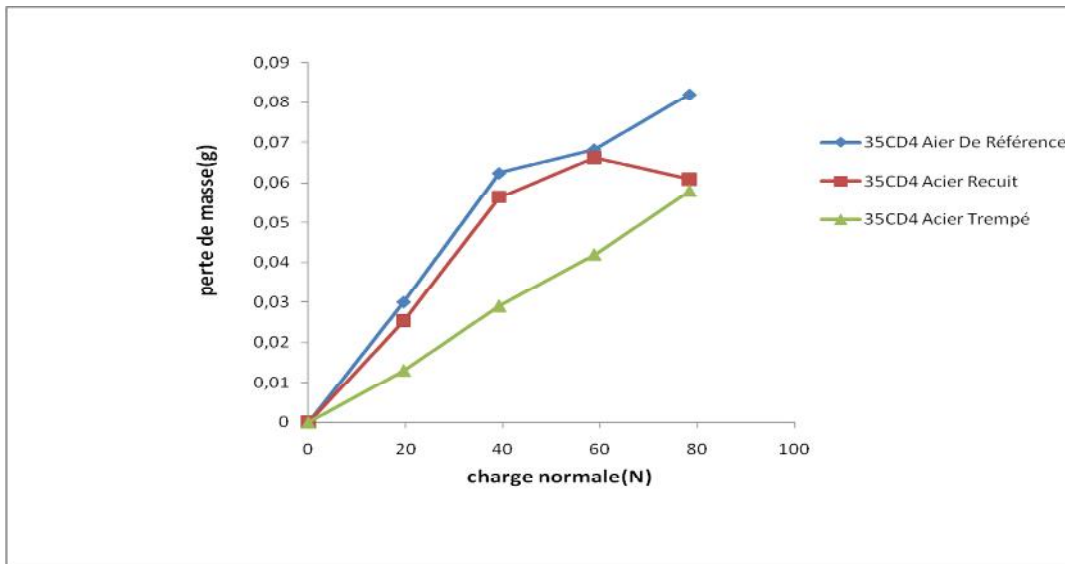
- Acier35CD4 a l'état recuit :



*Figure V.10: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 1,373 m/s.*

Sur la courbe de l'évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale (figure V.10), on constate que plus on augmente la charge, plus on aura une perte de masse importante qui est attribuée à l'arrachement de matière. A partir de la charge appliquée 6000g, on constate une diminution dans la valeur de perte de masse par usure.

La **figure V.11** donne les trois courbes de l'évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale des trois états d'aciers étudiés.



**Figure V.11:** regroupement des trois courbes des trois états d'aciers étudiier d'évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 1,373 m/s.

**4.2. Influence de la vitesse de glissement:**

Nous utilisons la même procédure que pour les essais précédents. Le paramètre tribologique étudié est la vitesse de glissement. Le tableau V. regroupe les mesures de perte de masse en fonction de la vitesse de glissement.

Nous faisons varier la vitesse de glissement. Nous fixons la charge appliqué à une valeur de 8000 g. La distance parcourue est calculé comme suite :

✓ **Les paramètres :**

$D_i=37\text{mm}$   
 $P=8000\text{g}$   
 $X=8000\text{m}$

$D_i$  : le diamètre de la course (mm).  
 $p$  : la pression (la charge) (g).  
 $x$  : la distance parcourue (m)

**En a :**  
 $V=\omega.R$

Avec

$\omega=2\pi.N$

$V=2\pi.N.\frac{D}{2}$

$v$  : la vitesse. (m/s)

Aussi :

$$V = x/t_i \implies t_i = \frac{x}{v}$$

$V_1 = 48.40 \cdot 10^{-2}$	$\implies$	$t_1 = 16529s = 4h35 \text{ min.}$
$V_2 = 96.81 \cdot 10^{-2}$	$\implies$	$t_2 = 8263s = 2h17 \text{ min.}$
$V_3 = 137.47 \cdot 10^{-2}$	$\implies$	$t_3 = 5819s = 1h37 \text{ min.}$
$V_4 = 193.63 \cdot 10^{-2}$	$\implies$	$t_4 = 4131s = 1h08 \text{ min.}$

Tableau V.7. Les résultats obtenus, la perte de masse en fonction de la vitesse.

Types d'acier	La masse usée (g)	La charge appliquée (kg)	Les vitesses (t/m)	Distances parcourue (temps)
Acier de référence	0.53539	8	250	4h35min
	0.10986		500	2h17min
	0.11487		710	1h37min
	0.02563		1000	1h08min
Acier recuit	0.10754	8	250	4h35min
	0.22453		500	2h17min
	0.13966		710	1h37min
	0.02217		1000	1h08min
Acier trempé	0.14852	8	250	4h35min
	0.04189		500	2h17min
	0.10554		710	1h37min
	0.02918		1000	1h08min

Le tableau V.7, montre une diminution de la masse usée de l'acier avec l'augmentation de la vitesse. Cet arrachement de matière augmente au début (en appliquant des petites vitesses) et au fur et à mesure que ces vitesses augmentent. La matière arrachée ne s'injecte pas à l'extérieur mais se trouve collée à la surface de l'acier suite à l'échauffement du matériau.

- ✓ Les courbes d'usure :
- Acier de référence :

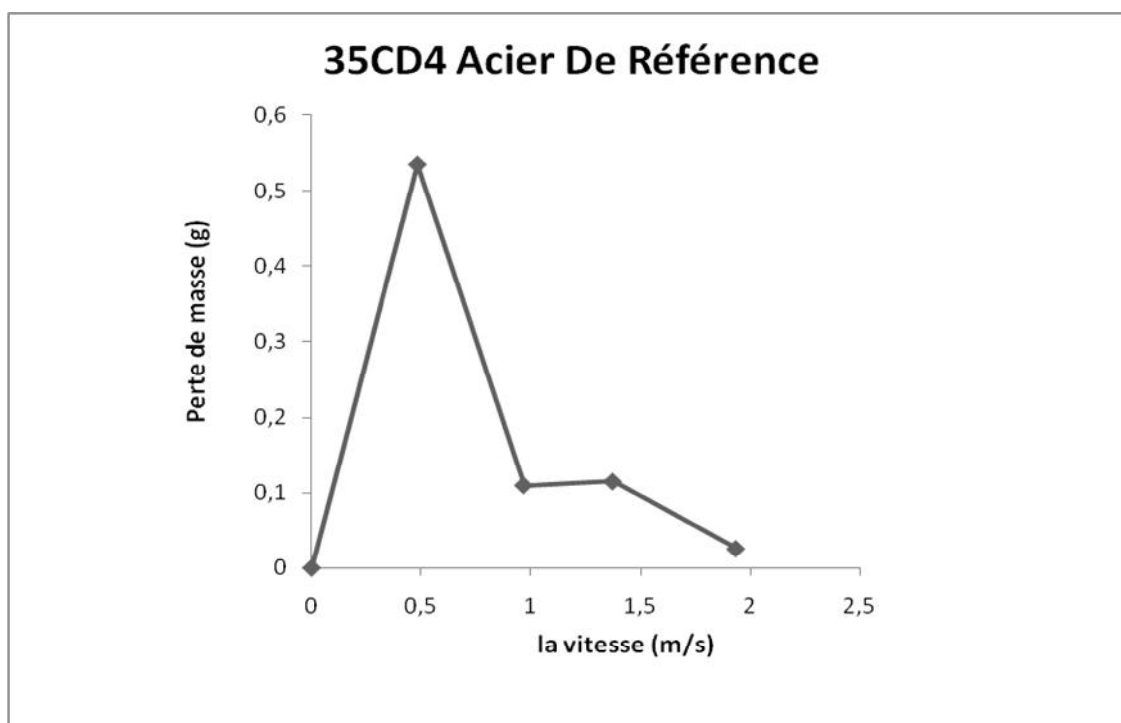


Figure V.12: évolution de la perte de masse en fonction de la vitesse de glissement.

- Acier 35 CD 4 a l'état trempé :

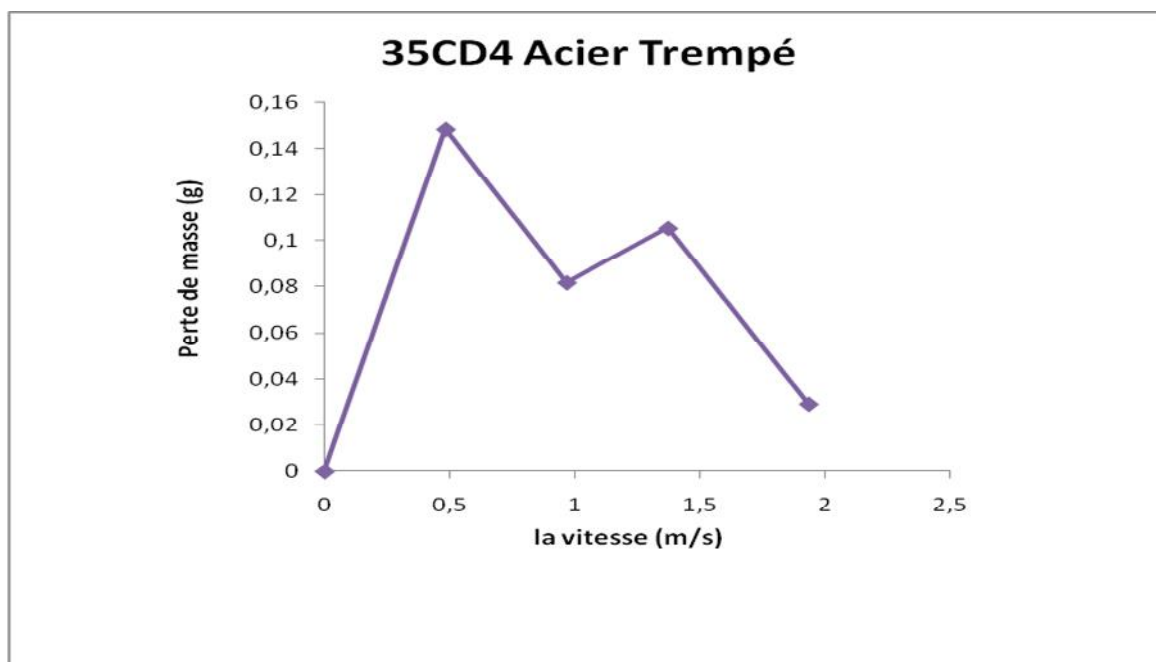


Figure V.13: évolution de la perte de masse en fonction de la vitesse de glissement.

- Acier 35 CD4 à l'état recuit:

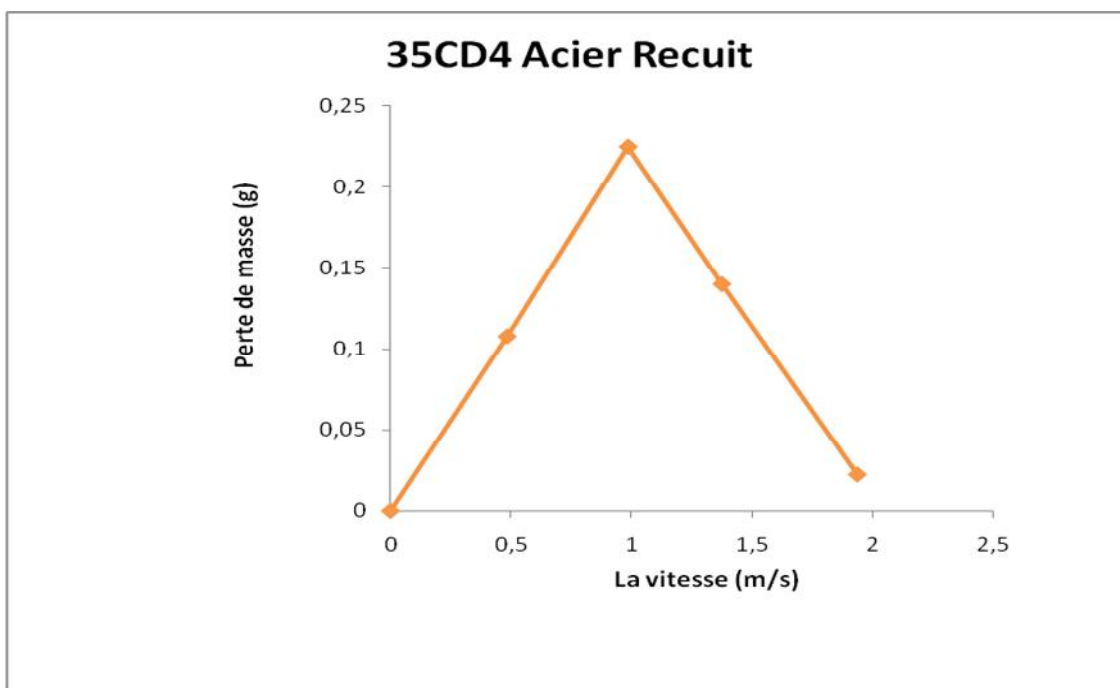


Figure V.14: évolution de la perte de masse en fonction de la vitesse de glissement.

- ✓ Regroupement des trois courbes :

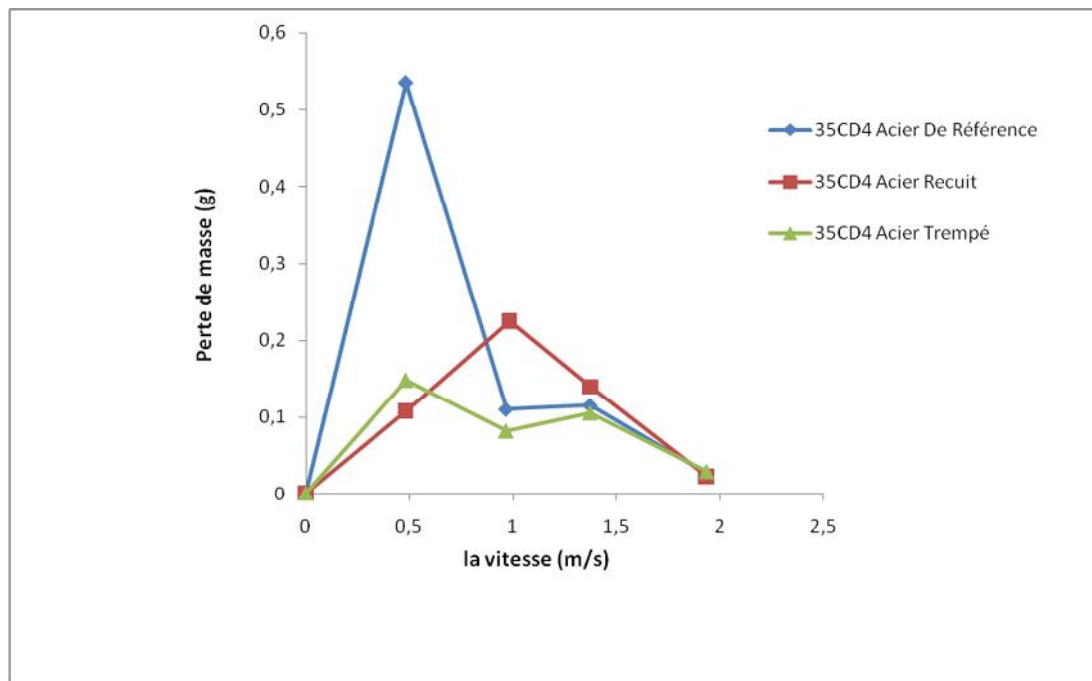


Figure V.15: regroupement des trois courbes d'évolution de la perte de masse en fonction de la vitesse de glissement.

L'analyse des courbes de variation de perte de masse en fonction de la vitesse de glissement montre l'existence d'une vitesse critique d'usure. Cette vitesse correspond à la valeur maximale d'usure sur la courbe. Cette valeur change en fonction de traitement thermique.

- Pour l'acier de référence, la valeur de la vitesse critique est 0.484m/s qui correspond à une perte de masse égale à 0.53539g.
- pour l'acier 35 CD4 a l'état recuit, la valeur de la vitesse critique est 0.986 m/s qui correspond à une perte de masse égale à 0.22453 g.
- pour l'acier 35 CD4 a l'état trempé, la valeur de la vitesse critique est 0.484 m/s qui correspond à une perte de masse égale à 0.14852 g.

### 4.3. Influence de la distance parcourue:

On a fait varier la distance parcourue pour les trois états de matériau utilisés dans les essais, et la charge appliquée est fixée 8000g. La vitesse est fixée à 710 t/m. Le temps de chaque essai est calculé comme suit :

✓ **Les données :**

$D_i = 37\text{mm}$ .

**$D_i$**  : le diamètre la course. (mm)

$N = 710\text{t/m}$ .

**$N$**  : la vitesse, (t/min)

$P = 8000\text{g}$ .

**$P$**  : la pression (la charge) (g),

En a :

$V = \omega \cdot R$  avec  $\omega = 2\pi \cdot N$

$V = 2\pi \cdot N \cdot \frac{D}{2} \implies V = 82.487\text{m/min} = 1.374\text{ m/s}$ .

Aussi :

$V = x/t_i \implies t_i = \frac{x}{v} \quad V = x/t_i$

Avec :

**$X$**  : c'est la distance à parcourir.

**Pour** : 2000 m,  $t_1 = 1455.604\text{s}$

4000m,  $t_2 = 2911.208\text{s}$

6000m,  $t_3 = 4366.812\text{s}$

8000m,  $t_4 = 5822.416\text{s}$

Tableau V.8. Les résultats obtenus, la perte de masse en fonction de la distance parcourue.

Types d'acier	La masse usée (g)	Les charges appliquées (kg)	Les vitesses (t/m)	Distances parcourue (temps)
Acier de référence	0.02737 0.05426 0.04814 0.05272	8	710	2km=24min 4km=48min 6km=72min 8km=97min
Acier recuit	0.03067 0.06147 0.05833 0.05850	8	710	2km=24min 4km=48min 6km=72min 8km=97min
Acier trempé	0.03198 0.05751 0.08758 0.16193	8	710	2km=24min 4km=48min 6km=72min 8km=97min

L'analyse des valeurs de perte de masse sur les trois classes d'acier (le tableau V.8), montre que :

- l'arrachement de matière devient important en fonction de la distance parcourue pour l'acier 35 CD 4 à l'état trempé.
- la perte de matière tend à diminuer à partir d'une distance de glissement 4000 m pour l'acier de référence et l'acier recuit.
- Pour l'acier trempé, plus que la distance parcourue augmente, plus la perte de masse est importante.

#### 4.4. Les courbes d'usure :

- Acier de référence :

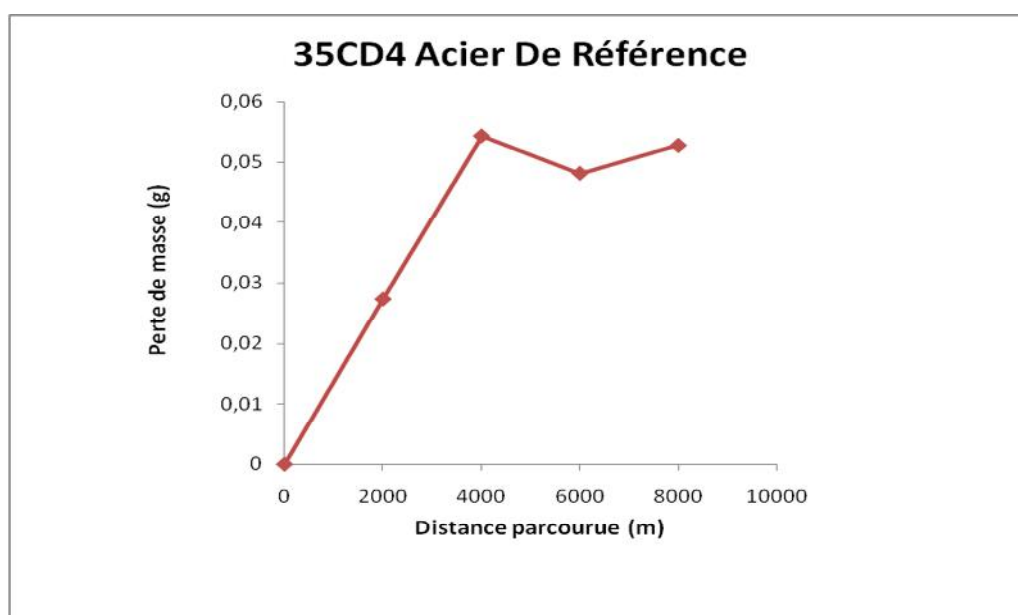
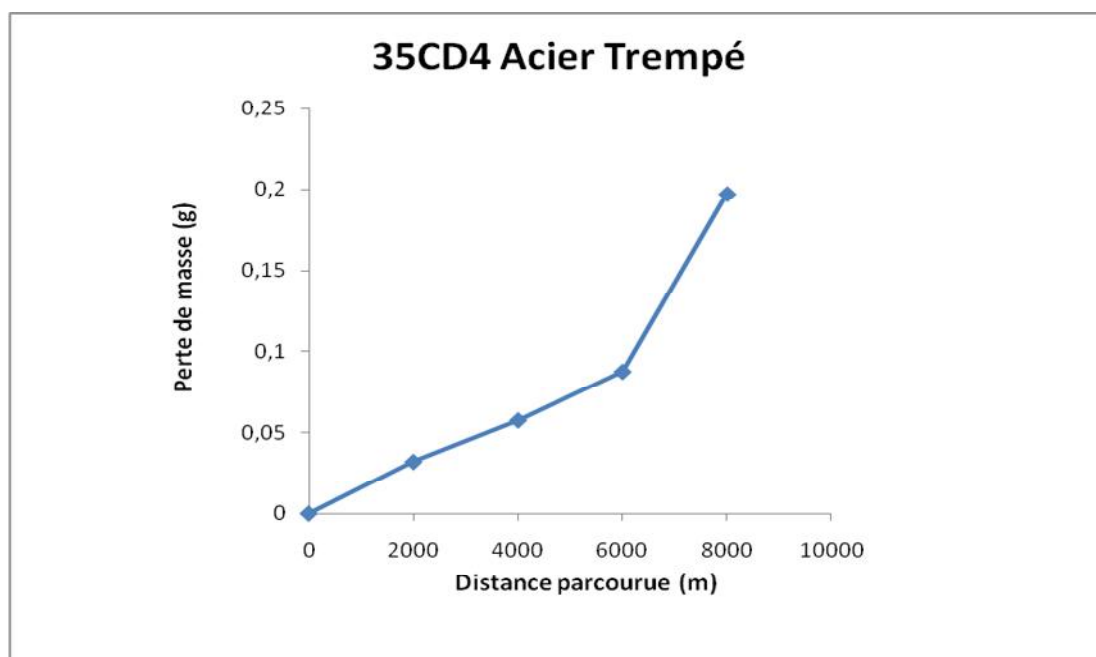


Figure. V.16: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue.

D'après la figure V.12, on constate que l'arrachement de matière devient important en fonction de la distance parcourue, et en remarque qu'à partir de 4000m, la perte de matière tend à diminuer puis tend à augmenter.

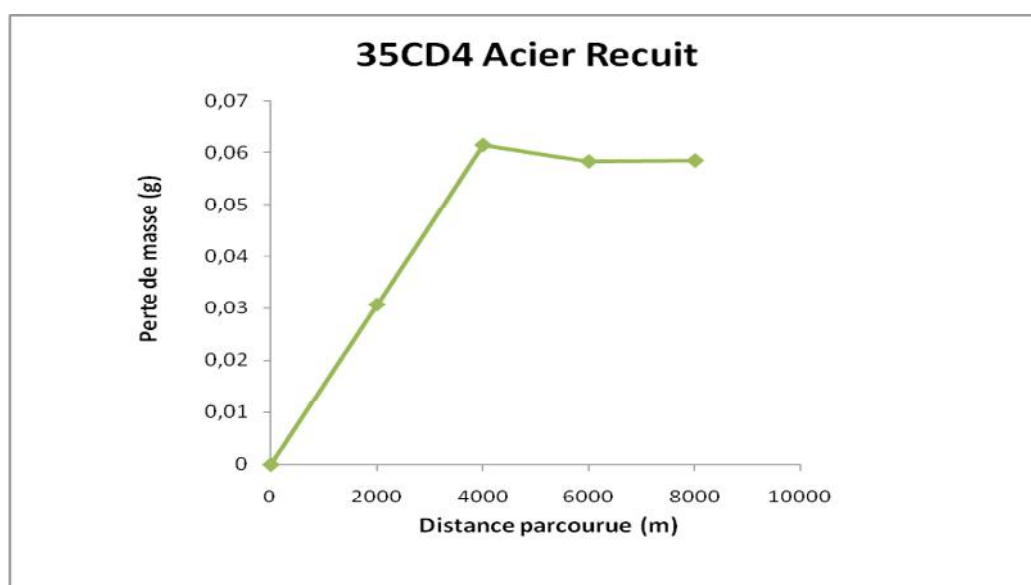
- **Acier 35CD4 a l'état trempé :**



*Figure. V.17: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue.*

Pour cette figure V.13, on remarque que la perte de masse s'accroît avec l'accroissement de la distance parcourue et la loi d'Achard reste toujours applicable.

- **Acier 35CD4 a l'état recuit :**



*Figure. V.18: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue.*

Le même constat est fait pour l'acier 35 CD4 à l'état recuit que celui de référence, sauf que dans cette courbe en remarque une certaine stabilité pour la perte de masse à partir de 4000 m.

✓ Regroupement des trois courbes

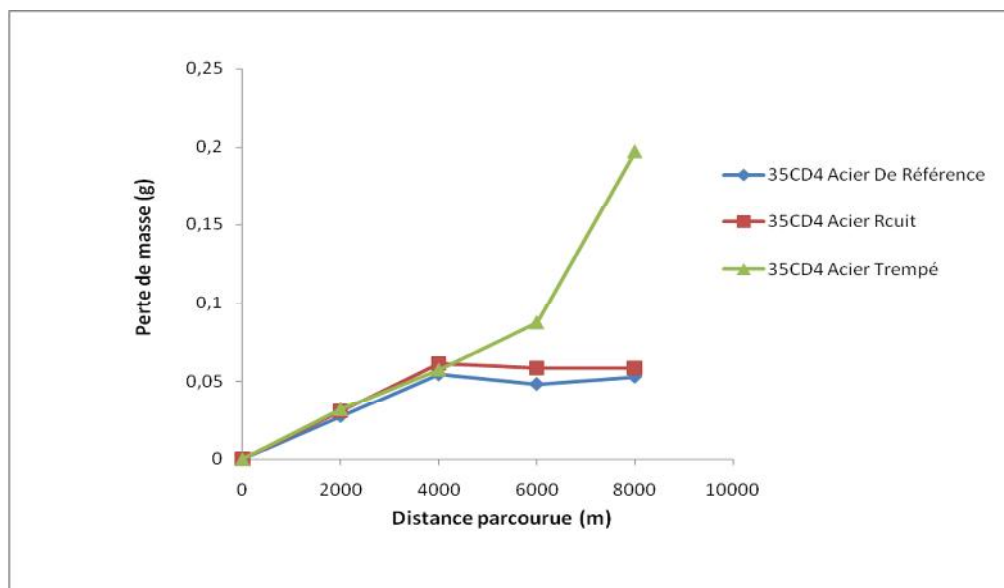


Figure. V.19: regroupement des trois courbes des trois états d'acier étudié d'évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue.

V.5.L'observation au microscope électronique à balayage :

- Acier de référence :

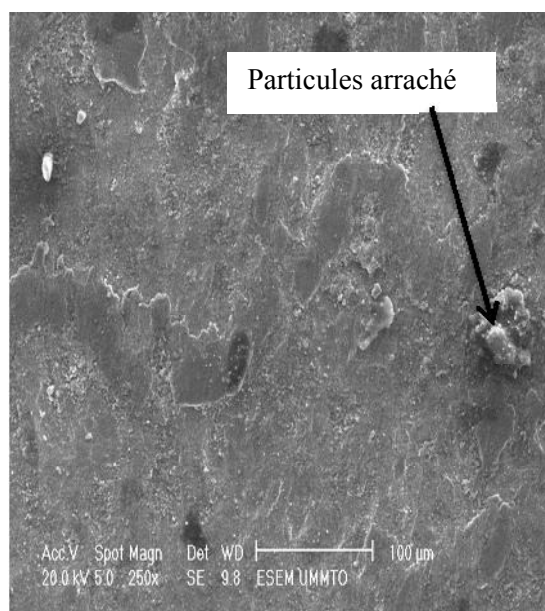
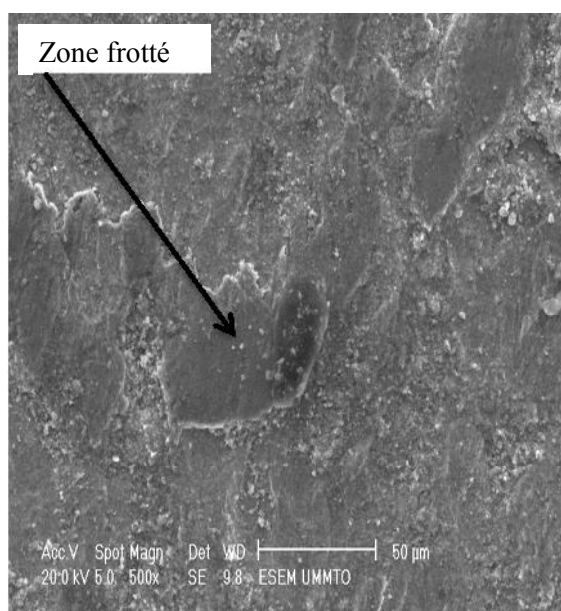
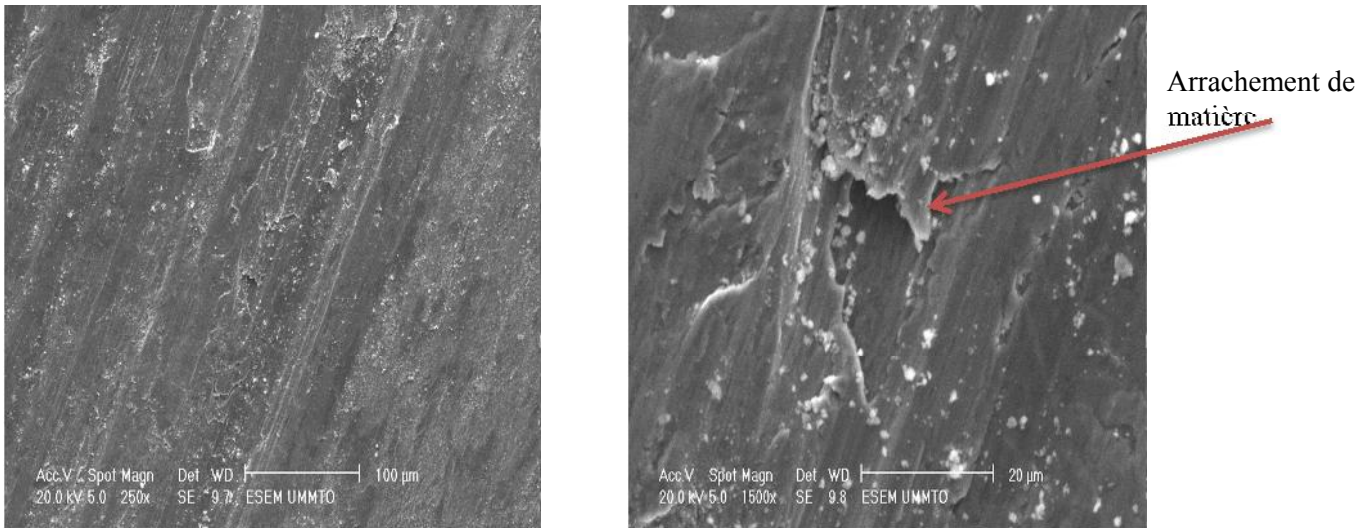


Figure V.20 : Observation MEB de l'échantillon en acier de référence ( $p=39.24N$ ,  $d=4942 m$ ,  $V=1.373 m/s$ ).

L'analyse par microscope électronique à balayage (MEB) par mode électrons secondaire (SE) (figure V.20) montre que l'arrachement de la matière n'est pas uniforme sur toute la surface de pion. Il y a des zones plus endommagées que d'autre. La présence de la matière arrachée en surface a été constatée au cours des essais.

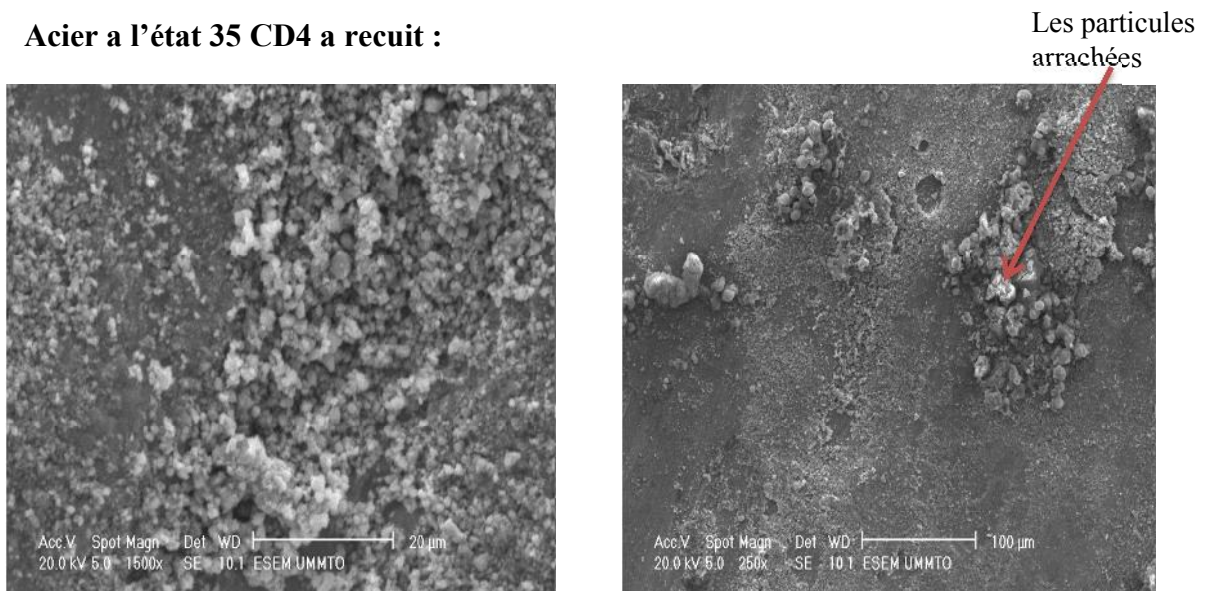
- **Acier 35 CD4 à l'état trempé :**



**Figure V.21. :** Observation MEB de l'échantillon en acier 35 CD4 à l'état trempé ( $p=39.24N$ ,  $d=4942$  m,  $V=1.373$  m/s).

La figure V.21 montre un décollement de matière au niveau de la surface de pion et la présence des particules arrachées sur cette surface.

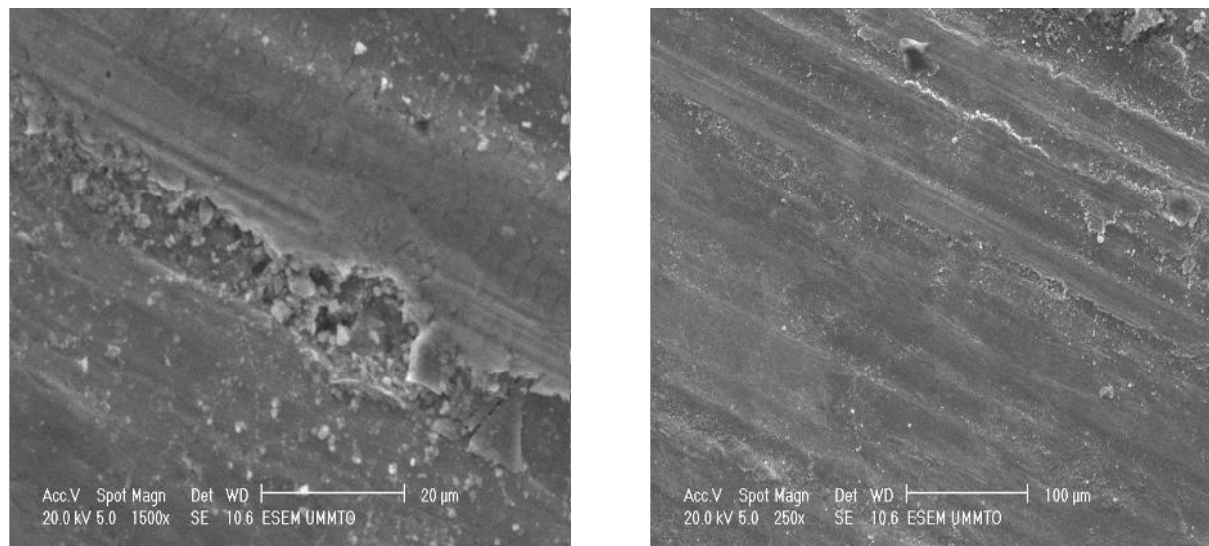
- **Acier a l'état 35 CD4 a recuit :**



**Figure V.22 :** Observation MEB de l'échantillon en acier 35 CD4 à l'état recuit ( $p=39.24N$ ,  $d=4942$  m,  $V=1.373$  m/s).

L'arrachement de matière est plu important que dans les deux cas (acier de référence et acier trempé) (figure V.22). Les particules arrachées restent collé sur la surface de pion.

- **Acier de référence :**



**Figure V.23 :** Observation MEB de l'échantillon en acier de référence

( $p=78.48N$ ,  $d=4000\text{ m}$ ,  $V=1.38\text{ m/s}$ ,  $t=48\text{ min}$ ).

D'après cette figure on constate des fissurations sur la surface et l'existence de plusieurs plans.

- **Acier 35 CD4 à l'état trempé :**

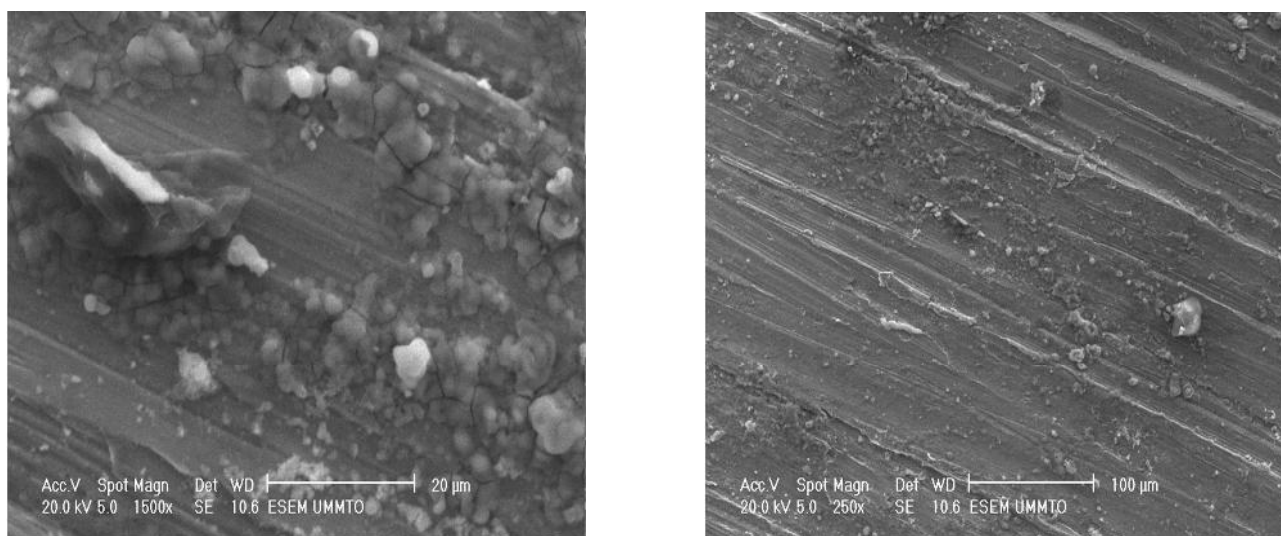


**Figure V.24. :** Observation MEB de l'échantillon en acier 35 CD4 à l'état trempé

( $p=78.48N$ ,  $d=4000\text{ m}$ ,  $V=1.38\text{ m/s}$ ,  $t=48\text{ min}$ ).

L'arrachement de matière est moins important en le comparant aux deux premiers à cause de la dureté de l'acier (trempé). Par effet de trempé, l'acier a une dureté élevée. Par conséquent, le matériau résiste plus à l'usure par arrachement de la matière.

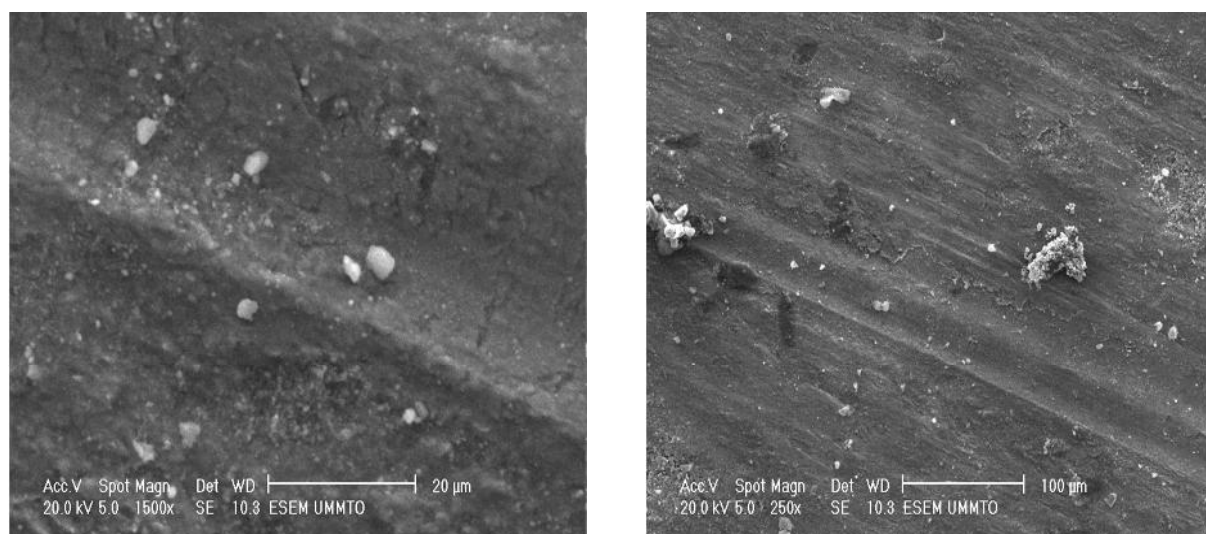
- **Acier 35CD4 a l'état recuit :**



**Figure V.25. :** Observation MEB de l'échantillon en acier 35 CD4 à l'état recuit ( $p=78.48N$ ,  $d=4000 m$ ,  $V=1.38 m/s$ ,  $t=48 min$ ).

La figure V.25 montre que la matière arrachée reste collé sur la surface de pion. Des microfissures à la surface usée sont présentes. Nous contribuons ses microfissures à l'effet de température.

- **Acier de référence :**

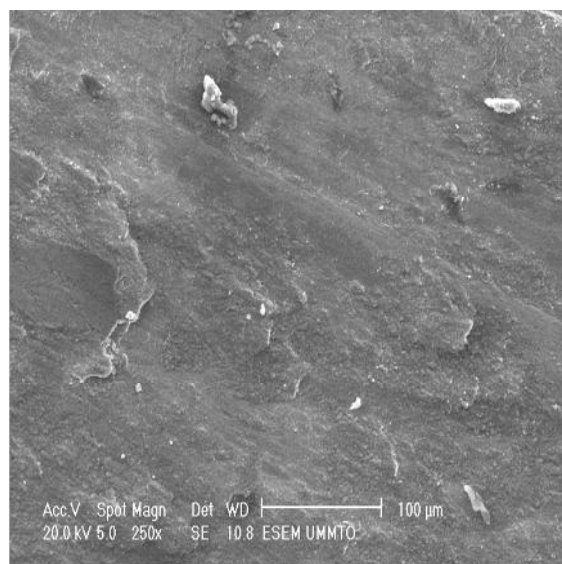
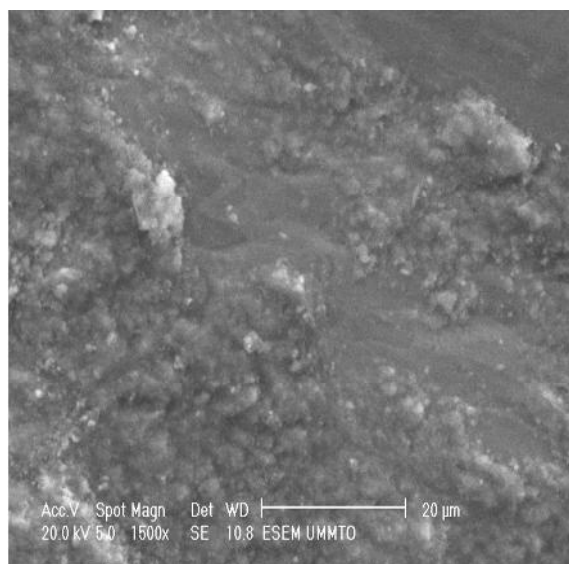


**Figure V.26. :** Observation MEB de l'échantillon en acier de référence aux coordonnées ( $p=78.48 N$ ,  $d=8000 m$ ,  $V=0.484 m/s$ ,  $t= 275 min$ ).

Dans le cas d'un échantillon en acier de référence aux coordonnées ( $p=78.48 N$ ,  $d=8000 m$ ,  $V=0.484 m/s$ ,  $t=275 min$ ).

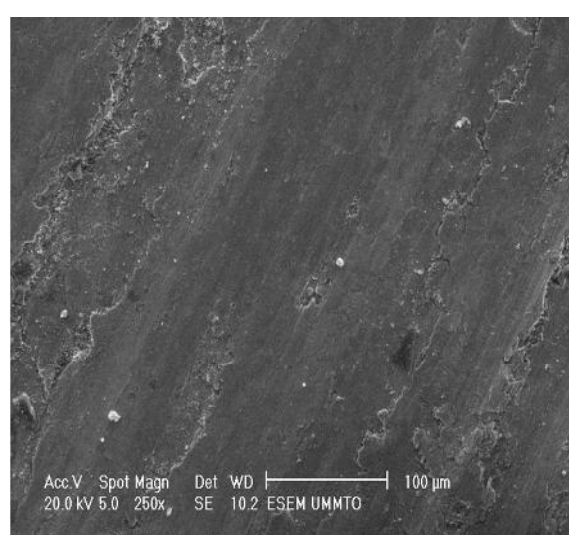
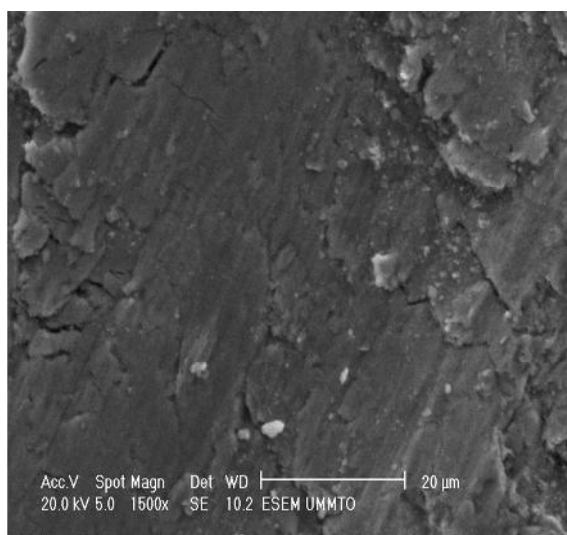
La figure V.26 montre :

- es fissurations et regroupement des particules arrachées en surface.
- l'existence de plusieurs plans.
- **Acier 35 CD4 l'état trempé :**



**Figure V.27 :** Observation MEB de l'échantillon en acier 35CD4 a l'état trempé ( $p=78.48$  N,  $d=8000$  m,  $V=0.484$  m/s,  $t=275$  min).

- **Acier 35 CD4 à l'état recuit :**



**Figure V.28:** Observation MEB de l'échantillon en acier 35CD4 a l'état recuit ( $p=78.48$  N,  $d=8000$  m,  $V=0.986$  m/s,  $t=137$  min).

D'après la figure on observe une dégradation qui se fait sous forme de feuille sur la surface ainsi que des fissurations.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

Ce travail nous a permis de découvrir la tribologie comme une science qui étudie le frottement et l'usure cette science est indispensable pour la tenue et la durée de vie des mécanismes par conséquent son impact sur l'économie est important.

Les paramètres d'usure sont intenses et interagissent dans le contact entre deux corps en mouvement relatif.

L'objectif de notre étude est double :

- ✓ le premier objectif est la caractérisation mécanique de notre matériau.
- ✓ le deuxième objectif est l'étude de la résistance à l'usure de corps de la pompe à boue de forage.

Les résultats obtenus par les essais de dureté montrent que la dureté est passée de 190.91 HV pour l'acier 35 CD4 à l'état recuit à 463.40 HV pour l'acier 35CD4 à l'état trempé avec le revenu à 450°C.

L'augmentation de la dureté, de la contrainte à la rupture, de la contrainte maximum ainsi que celle de la contrainte à la limite élastique montre que Les traitements thermiques rendent le matériau plus dur. En contrepartie, le matériau devient aussi plus fragile, c'est-à-dire que la déformation maximale supportée par l'échantillon diminue et le matériau casse plus rapidement.

La loi d'Archard reste valable pour les trois cas d'acier. La variation de l'usure en fonction de la pression de contact et la distance parcourue est linéaire.

L'étude de l'influence de la vitesse de glissement montre l'existence d'une vitesse d'usure critique. Cette vitesse correspond à l'usure maximale.

L'état de dégradation des surfaces usées est fortement lié aux paramètres tribologiques étudiés (pression de contact, vitesse de glissement, la distance parcourue et les traitements thermiques).

En fin nous espérons que ce petit travail apportera un aide à l'entreprise et servira comme guide aux étudiants.

## *Références bibliographiques*

- [1] AISSANI «mémoire de fin d'étude, d'ingénieur d'état en Mécanique des chantiers pétroliers» année 2006/2007. Université m'hamed bougara Boumerdes.
- [2] Manuel des pompes National Oil Well. Document ENAFOR Hassi Messaoud Algérie.
- [3] Jean NOUGAROU « Le Forage Rotary; Planches », Société Des Editions Technip, 1974.
- [4] documentations ^^ ENAFOR^^. Weatherford, systèmes de pompe et de fluide, E-1600 12-P-160 Mars 2013.
- [5] P.MOTARD, « Forage rotary; Les Circuits Hydraulique », Editions Technip, juin 1974.
- [6] Lakhmide, métallographie et traitement thermique des métaux, Edition mir, 1986 Moscow.
- [7] N. Bouaoudja « Matériaux métallique » édition OPU Alger.
- [8] Science et génie des matériaux modulo Editeur, 2001, 233AV Dunbar Mont Royal Québec, Canada.
- [9] H.LAPLANCHE, R. THIRON. Du choix et d'emplois des principaux aciers, fontes et alliage ferreux. Paris 1973.
- [10] TFM\_Marocetude.com\_M22\_Materiaux\_et\_traitements\_partie1-FM-TFM
- [11] G.FANCY et POMPIDOU : Précis de fonderie : métallographique, production et normalisation. 2ème édition AFNOR 1992.
- [12] Dominique FRANÇOIS, Essais de dureté. Techniques de l'Ingénieur M 4 160 de l'École Centrale de Paris.
- [13] Michel CARTIER et Philippe KAPSA, Usure des contacts mécaniques. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique BM 5 066, BM 5 067 et BM 5 065.
- [14] Mathias WOYDT. Application des données tribologiques des matériaux .Techniques de l'Ingénieur BM 7006.
- [15] Stéphane LEJEUNES ; Modélisation de structures lamifiées élastomère-métal à l'aide d'une méthode de réduction de modèles. Thèse de doctorat 2006, Université de la Méditerranée (Aix-Marseille II).
- [16] Elhadi Abdelmalek. Influence des paramètres mécaniques lors de l'endommagement par les phénomènes tribologiques des couples des matériaux xc48/xc55 et a60/xc55. Mémoire magister a Université M<sup>ed</sup> Boudiaf de M'sila 2006.
- [17] THÈSE Caractérisation des mécanismes d'usure par tribocorrosion. Présentée par Claudiu Constantin IONESCU pour l'obtention du GRADE DE DOCTEUR « ÉCOLE CENTRALE PARIS ».
- [18] CLAUD BARLIER, LIONEL GIRARDIN. Mémotech productique, matériaux et usinage. Quatrième édition.