

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERI, Tizi-Ouzou



Faculté de Génie de la construction
Département de Génie Mécanique

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme

Master académique en Génie Mécanique
Option : Construction mécanique

Thème

**Etude expérimentale de l'usure d'un élastomère
SBR utilisé dans la pneumatique**

Proposé par :

M^r : DJERRIDI Rachid

Présenté par :

M^r : SENNANE Ammar

Promotion 2012

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je remercie particulièrement mon promoteur monsieur D.J.R.D.J.R d'avoir accepté de me diriger, et à tous ses conseils précieux dont il a su me faire profiter.

Ma reconnaissance s'adresse à Monsieur M.OULD OUALI pour son soutien et encadrement efficaces le long de ce travail, il a su être toujours disponible pour moi afin de me permettre d'acquérir l'assurance nécessaire pour évoluer dans le domaine de la modélisation

D'autre part, mes plus vifs remerciements vont aux membres de jury pour l'intérêt qu'ils portent à ce travail en ayant accepté la lourde tâche de l'examiner.

J'adresse également mes plus sincères salutations à tous les enseignants du département de génie mécanique en particulier ceux qui ont contribué à ma formation, et à tout le personnel de la bibliothèque.

Mes remerciements sont aussi pour les techniciens du laboratoire de Génie mécanique et aussi techniciens hall oued aussi pour leur disponibilité et leur sympathie.

Enfin je tiens particulièrement à adresser un grand merci à masha. Sans qui la réalisation de ce mémoire serait plus pénible que les événements qui me sont arrivés durant cette période.

À mes compagnons de paillasse, et tous ceux qui ont contribué par leur humour et leur sympathie à rendre mon parcours universitaire mémorable et qui sont à présent plus que de simples collègues :

Ammar, marzak, malek, makhoul, djaafar, ouali, amirouche, boukhalfa.

DEDICACES

Je tiens à dédier ce travail à mes parents qui n'ont jamais cessé de croire en moi :

Merci à mon père et à ma mère pour les valeurs d'audace, de persévérance et de modestie qu'ils m'ont transmis. Ce diplôme du master, ainsi que tout espoir et fierté qui peuvent éventuellement en jaillir, sont aussi et tout naturellement les leurs.

J'adresse ma gratitude toute particulière et éternelle à ma famille, à mes frères et sœurs (saadi, madjid, karim, chafik, nassima, karima, lyndaet, et les cher petits louiza, hécine, fucuzi, kenza) à toutes leurs familles, et qui m'ont toujours épaulé moralement et financièrement pendant toutes ces années d'étude, malgré un système scolaire défaillant dans sa capacité à juger du réel potentiel d'un enfant à partir de simples bulletins de notes.

Du temps de l'Antique Empire Romain, un esclave murmurait : "souviens-toi que tu es mortel" à l'oreille de l'empereur lors de chaque triomphe... Une belle leçon d'humilité que certaines personnes devraient méditer.

Table de matière

Introduction générale

Chapitre I : Généralités sur les élastomères	2
1 INTRODUCTION	2
2) physico-chimie des élastomères	2
2.1) Définition des élastomères	2
2.2) Structure macromoléculaire des polymères	4
2.3) Structure des élastomères	6
2.4) Température de transition vitreuse.....	7
3) propriétés mécaniques des élastomères	8
3.1) L'élasticité caoutchouc-cristallisation sous contraintes	8
3.2) La viscoélasticité :	11
3.3) L'hystérésis :	12
3.4) L'effet Mullins	12
3.4.1) Hypothèse d'isotropie :.....	13
3.4.2) Recouvrance du phénomène	14
3.4.3) Explication du phénomène	14
3.5) L'effet Payne	15
3.6) L'amplification des déformations	15
3.7) Compressibilité	17
3.8) Charges : Natures, rôles et effet	18

4) conclusion.....	19
Chapitre II) généralité de la tribologie des élastomères :	21
1) Introduction :	21
2) Problématique de l'étude de l'usure :	21
3) Définition	22
3.1) Adhésion.....	22
3.2) Coefficient de frottement	22
3.2)1. Formulation	22
3.2)2. Coefficients de frottement statique et dynamique.....	23
3.3) Origine des efforts résistants. Conséquences pratiques.....	23
3.4) Ordres de grandeur du coefficient de frottement	23
3.5) Contraintes résiduelles.....	24
3.6) Rugosité	24
4. Données et paramètres tribologiques	26
4.1) Taux d'usure.....	26
4.2) Valeur du produit $P \times V$	27
4.3) Densité d'énergie de frottement.....	29
5) Surface :	29
6) Outils conceptuels en tribologie des interfaces :	30
6.1) Le triplet tribologique et la notion de troisième corps :	30
6.2) Accommodation de vitesse :	32
6.3) Circuit tribologique :	33
7) L'usure des élastomères :	34
7.1) Principaux faciès d'usure :	34
7.1.1) Rouleaux d'usure :	35
7.1.2) Cratères d'usure :	35
7.1.3) Stries d'usure :	35
7.1.4) Rides d'usure:.....	35

7.2) Principaux modes d'usure :	36
7.2.1) Usure par érosion :	36
7.2.2) Usure par cavitation :	37
7.2.3) Usure par fatigue :	37
7.2.4) Usure par adhésive –formation de rouleaux d'usure :	38
7.2.5) Usure par abrasive :	40
7.2.6) Usure par soudage :	40
7.2.7) Usure par corrosive et oxydative :	41
7.2.8) Usure par fretting :	41
8) quelques paramètres influent sur l'usure :	41
8.1) Paramètres matériaux :	41
8.1.1) Propriétés mécaniques, effet de la température :	41
8.1.2) Ajout de charges renforçant au mélange :	41
8.2) Conditions expérimentales :	42
8.2.1) Charge appliquée :	42
8.2.2) Composition de l'atmosphère :	42
8.2.3) Lubrification :	42
9. Conclusion	43
CHAPITRE III LA PARTIE EXPERIMENTALE	44
INTRODUCTION	44
Partie A : dispositif et moyenne utilise	44
1. Procédure expérimentale	44
1.1. Dispositif expérimental	44
1.2. Nomenclature du banc	45
1.3. Principe de fonctionnement	45

2. Chaîne d'acquisition	45
3. Description du capteur de force	46
4. Identification des matériaux utilisés	47
4.1. Matériau des disques.....	47
4.2. Matériaux des pions	47
4.2.1. Généralités sur les pneumatiques	47
4.2.1 Fonction du pneu	47
4.2.2 Différent technologies de Pneus	48
4.2.3 Architecture d'un pneu radial	48
4.2.3.1 La bande de roulement et sa sculpture	49
4.2.3.2 Gomme intérieur d'étanchéité	49
4.2.3.3 La nappe carcasse	49
4.2.3.4 Les tringles	49
4.2.3.5 Les flancs.....	50
4.2.3.6 Les nappe de ceinture acier	50
4.2.3.7 Les nappe de ceinture nylon	50
4.2.4. Marquage d'un pneu	50
4.2.5. Matériaux constitutifs d'un pneu	51
5. Présentation des couples tribologiques.....	52
5.1. Les disques	52
5.1.1. Géométrie des disques	52
5.2. Les pions.....	53
6. Traitement thermique.....	53
6.1. Introduction	53
6.2. Cycle d'un traitement thermique	53
6.3. Traitements thermiques appliqués:	54
6.3.1. Trempe:	54

6.3.2. Le revenu.....	55
7. Examen métallographique:	55
7.1. Introduction	55
7.2. Déroulement de l'essai	55
7.3. Observation microscopique de l'acier XC48 avant traitement thermique.....	56
7.4. Microscopie Optique	56
7.5. Observation microscopique de l'acier XC48 après traitement thermique	58
8. Essai de dureté.....	58
8.1. Introduction	58
8.2. Déroulement des essais:	59
9. Mesure de l'état de surface des disques:	60
Partie B. résultats et discussions:	62
1. Mode opératoire:	62
2. Résultats et discussions des essais tribologiques:	62
2.1. Résultats:	62
2.1.1. Etude d'Évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue:	62
2.1.2. Etude d'Évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale :	68
2.1.3. Etude d'Évolution de la perte de masse en fonction de puissance de glissement P*V:	74
2.1.4. Etude d'Évolution de la perte de masse en fonction de la vitesse:	79
2.1.5. Etude d'Évolution de la perte de masse en fonction de la rugosité:	80
2.2. Discussions:.....	81
Conclusion:	83
Conclusion générale.....	84

Liste des figures

Figure 1.1 Évolution du module d'YOUNG et de l'angle de perte en fonction de la température.....	3
Figure. I.2 : Propriétés des principaux types de polymères	6
Figure I.3 : Molécules de polyéthylène	7
Figure I.4 : Molécules de polyisoprène (caoutchouc naturel).....	7
Figure I.5 : Molécules du nylon	7
Figure. I.6 : Évolution du module élastique en fonction de la température pour une vitesse de refroidissement e donnée	8
Figure. I.7 : Etat d'un élastomère en fonction des domaines d'état structurel ou de la température	8
Figure. I.8 : essai de traction de type charge /décharge	10
Figure. I.9 : courbe de traction a rupture.....	10
Figure I.10. Stabilisation d'un SBR non cristallisant et d'un NR cristallisant [HMP67]. La courbe en pointillés représente le comportement du matériau non-cyclé.	10
FIGURE I.11. Contribution de l'entropie et de l'énergie interne à la force de traction en fonction de l'élongation	11
Figure. I.12 : Cristallisation sous contrainte	11
Figure. I.13 : Phénomène de relaxation :	11
Figure. I.14 : Courbe d'hystérésis d'un élastomère.....	11
Figure I.15. Variation de l'hystérésis pour un thermoplastique en fonction de la déformation et de la température	12

Figure I.16. Effet Mullins.....	13
Figure. I.17 : Pourcentage de recouvrement de l'effet Mullins pour un caoutchouc naturel vulcanisé, en fonction de la température et du temps	14
Figure. I.18 : Analyse de l'effet de Payne, évolution de propriétés mécaniques en fonction du niveau de déformation pour un élastomère SBR renforcé en silice	15
Figure. I.19 : Phénomène d'amplification de déformation	16
Figure I.20 Compression hydrostatique sur un caoutchouc cellulaire.	1
Figure I.21. Echelles d'interactions entre des particules de type NDC ou silice et la matrice de polymère:	19
Figure I.22. Influence du taux de noir de carbone et de son diamètre sur le comportement d.	19
Figure II.1) Définition des coefficients de frottement :.....	23
Figure II.2 Classement des irrégularités de surface	24
Figure II.3 Exemple de représentation tridimensionnelle de rugosité	25
Figure II.4 : Graphe « pression/vitesse de glissement » limite pour différents matériaux en frottement sec à température ambiante (contact conforme ; antagoniste acier pour fer et bronze frittés	29
Figure II.5 : rapprochement des solides : effets et conséquences.	30
Figure II.6 : le triplet tribologique de Godet et le concept de troisième corps.Il se compose :	31
Figure II.7 : sites et modes d'accommodation.	32
Figure II.8 : circuit tribologique de Berthier.	33
Figure II.9 : principaux facies d'usure des élastomères [petitet, 2003]. Stries d'usure (a) ; rides d'usure (b) ; rouleaux d'usure(c) ; cratères d'usure(d).....	35
Figure II.10 : mécanisme d'usure érosive en présence d'un 3eme corps pour un impact unidirectionnel.	37
Figure II.11 : mécanisme de création de « cratères » à partir d'agglomérats. Agglomérat dans le mélange homogène avant le passage de l'indenteur(a)- déformation de l'agglomérat sous le passage de l'indenteur. Les déformations d'indentation et de rayage plastifient et changent la	

forme de l'agglomérat (b)- déformation de l'agglomérat et du mélange après le passage de l'indenteur. la relaxation des contraintes provoque un basculement de l'agglomerat en forme de cratère (c)	38
Figure II.12 : processus physique de frottement de rouleaux d'usure.	39
Figure II.13 : schéma des déformations et du cisaillement de la surface de l'élastomère par une « aiguille » [Moore, 1975] à « sec » (« dry abrasion »)	40
Figure III.1 : vue du tribomètre (pion/disque).....	45
Figure III.2 : Chaîne d'acquisition	45
Figure III. 3 : Corps d'épreuve du capteur et les zones d'emplacement des jauges	47
FIG.III.4. Les principales architecture du pneumatique (à gauche diagonal, à droite radial) .	32
FIG.III.5. architecture d'un pneu radial	48
FIG.III.6. Marquage d'un pneu	51
Figure III.7 : Géométrie du disque	52
Figure III.8 l'origine et géométrie des pions.....	53
Figure III.9 : Cycle d'un traitement thermique	54
Figure III.11: four électrique	55
Figure III.12: Microscope Optique (MO).....	57
Figure III.13 : Micrographie de l'acier XC48 à l'état recuit.....	58
Figure III.14 : Micrographie de l'acier XC48 après traitement thermique	58
Figure III.15 : duromètres de type « WOPERT DIA TESTOR RC »	59
Figure III.16 : rugosimètre a palpeur	61
Figure III.17.État de surface des disques	61
Figure III.18 : balance électronique	62
Figure III.19: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la charge normale de 22,58N charge.....	63
Figure III.20: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la normale de 16,935N.....	63
Figure III.21 : évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la charge normale de 11,29N	63

Figure III.22 évolution de la perte de masse en en fonction de la distance parcourue pour la charge normale de 5,645N	63
Figure III.23 évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour les charges normales de 22,58, 16,935, 11,29, 5,645N	64
Figure III.24: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la charge normale de 16,935N	64
Figure III.25: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la charge normale de 11,29N	64
Figure III.26: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la charge normale de 5,645N	65
Figure III.27: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour les charges normales de 16,935, 11,29, 5,645N	65
Figure III.28: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la charge normale de 16,935N	66
Figure III.29: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la charge normale de 11,29N	66
Figure III.30: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la charge normale de 5,645N	66
Figure III.31: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour les charges normales de 16,935, 11,29, 5,645N	67
Figure III.32: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la charge normale de 11,29N	67
Figure III.33: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour charge normale de 16,935N.....	67
Figure III.33: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la charge normale de 5,645N	68
Figure III.34: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour les charges normales de 16,935, 11,29, 5,645N	68
Figure III.35: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 1,26 m/s	69
Figure III.36: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 0,88 m/s	69

Figure III.37: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 0,63 m/s	69
Figure III.38: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 0,44 m/s	69
Figure III.39: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 0,32 m/s	69
Figure III.40: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 0,22 m/s	69
Figure III.41: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 0,22 0,32 0,44 0,63 0,88 1,26 m/s	70
Figure III.42: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 1,26 m/s	70
Figure III.43: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une masse en de 0,88 m/s.....	70
Figure III.44. Évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 0,63 m/s	71
Figure III.45.: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 0,63 0,88 1,26m/s	71
Figure III.46: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 1,26m/s	72
Figure III.47: évolution de la perte de une vitesse de 0,88m/s masse en fonction de la charge normale pour	72
Figure III.48: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 0,63m/s	72
Figure III.49: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 0,63 0,88 1,26m/s	73
Figure III.50: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 1,26m/s	73
Figure III.51: évolution de la perte de une vitesse de 0,88m/s masse en fonction de la charge normale pour	73
Figure III.52: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 0,63m/s	74

Figure III.53: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 0,63 0,88 1,26m/s	74
Figure III.54: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une vitesse de 1,26 m/s	74
Figure III.55: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une vitesse de 0,88 m/s	74
Figure III.56: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une vitesse de 0,63 m/s	75
Figure III.57: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une vitesse 0,44 m/s	75
Figure III.58: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une vitesse de 0,32 m/s	75
Figure III.59: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une vitesse 0,22 m/s	75
Figure III.60: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$	76
Figure II.61: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une vitesse de 1,26m/s	76
Figure III.62: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une vitesse de 0,88m/s	76
Figure III.63: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une vitesse de 0,63m/s	76
Figure III.64: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une charge de 1,26 0,88 0,63m/s	77
Figure III.65: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une vitesse de 1,26m/s	77
Figure III.66: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une vitesse de 0,88m/s	77
Figure III.67: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une vitesse de 0,63m/s	77
Figure III.68: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une charge de 1,26 0,88 0,63m/s	78

Figure III.69: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une vitesse de 1,26m/s	78
Figure III.70: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une charge de vitesse de 0,88m/s	78
Figure III.71: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une vitesse de 0,63m/s	79
Figure III.72: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une charge de 1,26 0,88 0,63m/s	79
Figure III.73: évolution de la perte de masse en fonction de la vitesse pour une distance de 1100m et de 22,58N	79
Figure III.74: évolution de la perte de masse en fonction de la vitesse pour une distance de 1100m et de 16,935N	79
Figure III.75: évolution de la perte de masse en fonction de la vitesse pour une distance de 800m et de 22,58N	80
Figure III.76: évolution de la perte de masse en fonction de la vitesse pour une distance de 800m et de 16,935N	80
Figure III.77: évolution de la perte de masse en fonction de la vitesse pour des distances de 1100 800m et des charges de 22,58 16,935N.....	80
Figure III.78: évolution de la perte de masse en fonction de la rugosité pour une charge de 16,935N	81
Figure III.79: évolution de la perte de masse en fonction de la rugosité pour une charge de 11,29 N	81
Figure III.80: évolution de la perte de masse en fonction de la rugosite pour une charge de 5,645N	81
Figure III.81: évolution de la perte de masse en fonction de la rugosite pour une charge de 5,645 11,29 16,935N	82
Figure III.82 : Micrographie des pions après l'usure	82

Liste des tableaux

Tableau I.1. Familles d'élastomères..... 4

Le tableau II. 1 présentés Les ordres de grandeur du coefficient de frottement (glissement) [9]

Tableau III.1. Constitution moyenne des pneus 52

Tableau III.2 : Résultats des essais de dureté Vickers (Hv) de l'acier XC48 à différents états
..... 60

Liste des symboles

T_g : Température de transition vitreuse

E : Module de Young

λ_i : Extensions principales

t : Temps

V : Volume déformé

V_0 : Volume initial

ρ : Densité

R : rayon de courbure de,

T : la force tangentielle parallèle au plan tangent.

K : Le taux d'usure

V la perte de volume

F_N : charge normale

L : la distance de glissement

e_f^* : la densité d'énergie de frottement apparente

μ : coefficient de frottement

(Q_{si}) : source interne

(Q_i) : débit interne

(Q_e) : débit externe

(Q_r) : débit de recyclage

(Q_u) : débit d'usure

(Q_{se}) : débit source externe

Ft : force tangentiel

J : Les jauges

215 : largeur nominale du pneu en mm

55 : Rapport de section H/L : le rapport entre la hauteur et la largeur de section du pneu; la hauteur de ce pneu équivaut à 55 % de sa largeur.

R : Type de construction : indique le type de construction de la carcasse du pneu. "R" indique un pneu de type radial. "B" signifierait un pneu de type diagonal ceinturé. "D" indiquerait un pneu de type diagonal.

16 : diamètre de la jante (en pouces)

93 : indice de charge (cf. annexe 1)

H : indice de vitesse maximale (cf. annexe 1)

H : dureté

Rm : la résistance à la traction

F : la charge appliquée

D : diagonale (moyenne de d1 et d2) de l'empreinte

Introduction générale :

Les élastomères, comme les thermodurcissables et les thermoplastique, font partie de la famille des polymères. Le terme « élastomère » est utilisé aujourd'hui pour désigner d'une façon générale tous les caoutchoucs, c'est-à-dire les substances macromoléculaires, naturelles ou synthétiques, possédant l'élasticité caoutchoutique.

Le présent travail a pour objectif d'étudier l'influence de la vitesse de glissement et l'effort normal la rugosité la distance parcouru et la puissance de glissement sur le phénomène de l'usure du couple acier XC48 traiter et l'élastomère en suite les résultats des expériences seront présentés en dernier sous forme de graphique.

Ce mémoire est partagé en deux parties :

- Etude bibliographie : se compose de deux chapitres.
 - ✓ Le premier chapitre a pour objectif de mettre en évidence les principales caractéristiques du comportement physico-chimique et mécanique des élastomères.
 - ✓ Le second chapitre est consacré pour les principales modes, faciès, et quelques paramètres qui influent sur usure des élastomères.
- Etude expérimentale présente dans Le troisième chapitre qui présente les étapes suivies pour l'élaboration des échantillons (pions et disques), les moyens expérimentaux utilisés tels que le tribomètre, la chaîne d'acquisition, le rugosimètre et le capteur.

1) Introduction

Ce premier chapitre a pour objectif de mettre en évidence les principales caractéristiques du comportement physico-chimique et mécanique des élastomères.

2) physico-chimie des élastomères

2.1) Définition des élastomères

Les élastomères appartiennent à la famille des hauts polymères. Microscopiquement, ils se présentent sous forme de macro-molécules constituées de longues chaînes de polymères, linéaires ou ramifiées, enchevêtrées les unes dans les autres. Compte-tenu de leur structure amorphe et pour des températures supérieures à leur température de transition vitreuse, les élastomères se caractérisent par une grande déformabilité et une haute élasticité caoutchoutique.

En effet, l'étude des propriétés physiques des polymères, en fonction de la température, montre l'existence de plusieurs états de la matière (Fig. I.1) :

– État vitreux :

Cet état caractérise généralement les verres organiques qui présentent une très faible déformabilité.

– État de transition :

À ce stade, on est en présence de polymères linéaires thermoplastiques de type cellulosiques, polyamides, polyesters, polyvinyliques. . . Il s'agit comme son nom l'indique d'une phase de transition significative de l'état quasi-fragile à un état de grande déformabilité.

– État caoutchoutique :

Les élastomères sont caractéristiques de cet état. Ils possèdent une grande déformabilité et un comportement visqueux.

– État d'écoulement :

Le polymère, bien que encore solide, se comporte comme un fluide nonnewtonien quasi incompressible fortement visqueux. [3]

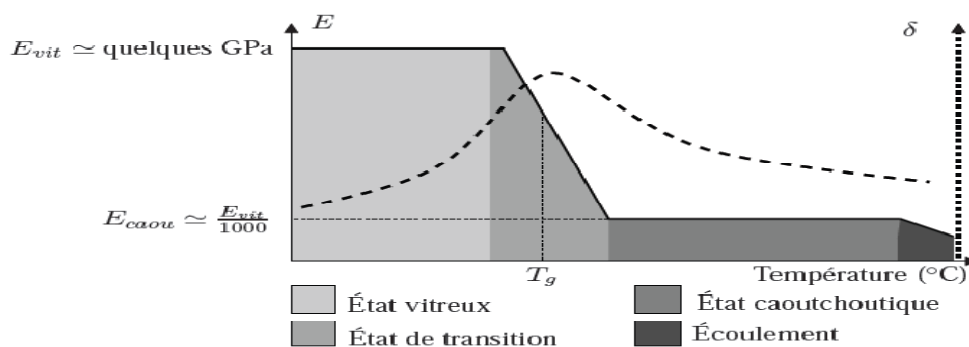


Figure I.1 – Évolution du module d'YOUNG et de l'angle de perte en fonction de la température. [3]

La classification et les propriétés caractéristiques des familles d'élastomères sont résumées dans le tableau (Tab. I.1). [3]

Famille	Nomenclature	Symbole	T _g	Propriétés caractéristiques
Caoutchoucs naturels ou Synthétiques	Caoutchouc naturel Polyisoprène	NR IR	-72°C -72°C	Bonnes propriétés mécaniques, faibles résistances à la chaleur et à l'ozone, faible tenue chimique
Caoutchoucs BUNA	Copolymère styrène-butadiène Polymère de butadiène	SBR BR	-50°C -112°C	Grande résistance à l'abrasion
Caoutchouc éthylène propylène Diène	Terpolymère éthylène-propylène-Diène	EPDM	-55°C	Excellentes propriétés élastiques, bonne tenue au vieillissement et en température, mauvaise tenue aux huiles et carburants
Caoutchouc butyle	Copolymères isobutylène-isoprène	IIR	-66°C	Très bonne résistance au vieillissement et étanchéité aux gaz.
Caoutchoucs nitriles	Copolymères butadiène-acrylonitrile (basse teneur en ACN) Copolymères butadiène-acrylonitrile (haute teneur en ACN)	NBR NBR	-45°C -20°C	Bonnes propriétés mécaniques, bonne tenue aux huiles et aux carburants, tenue en température limitée
Néoprène	Polychloroprène	CR	-45°C	Bonnes propriétés mécaniques, bonne tenue au vieillissement, tenue aux huiles modérées, tenue en température limitée
Silicones	Polydiméthylsiloxane Polydiméthyl-vinylméthylsiloxane Silicones fluorés	MQ VMQ FVMQ	-120°C -120°C -70°C	Haute résistance à la chaleur et au froid, faible tenue Mécanique

Tableau I.1 – Familles d'élastomères. [3]

2.2) Structure macromoléculaire des polymères

Les polymères organiques sont composés de longues chaînes d'atomes de carbone, sur lesquelles sont fixés des éléments propres à la chimie organique (carbone, hydrogène, oxygène, azote), plus quelques autres éléments comme le chlore, le fluor et le soufre. Ces longues chaînes moléculaires sont appelées macromolécules.

La réaction aboutit à la création de longues chaînes macroscopiques de longueurs différentes enchevêtrées de manière aléatoire.

Les polymères peuvent être divisés en 3 classes (figure I.2) :

- Les thermoplastiques : ce sont des polymères semi-cristallins ou amorphes.
- Les thermodurcissables : ce sont des polymères amorphes et ils sont formés d'un réseau tridimensionnel de macromolécules. Ils sont rigides compte tenu de leurs taux de réticulation élevés.
- Les élastomères : ce sont des polymères amorphes réticulés que nous allons décrire dans le paragraphe suivant.

Type de polymère		État des molécules	Propriétés aux températures $T > T_g$	Fusion	Remarques	Origine de l'élasticité
Thermo plastiques	Amorphe  chaîne	Linéaires (ou ramifiées)	Souplesse variable avec la cristallinité. Capacité importante d'allongement irréversible.	La phase amorphe passe à l'état fluide sans fusion par désenchevêtrement des chaînes. La phase cristalline fond sur une plage de température autour de la température moyenne de fusion T_f .	Faciles à mettre en œuvre à $T > T_g$. Solubles dans les solvants organiques. Recyclables.	Si $T < T_g$: élasticité enthalpique (déplacement des atomes hors de leur position d'équilibre comme dans les métaux, céramiques, ...). Si $T > T_g$: élasticité enthalpique pour la phase cristalline ; élasticité entropique pour la phase amorphe. (Allongement des chaînes moléculaires dans le sens de la contrainte appliquée).
	Semi-cristallin zone cristalline  zone amorphe	Linéaires (ou ramifiées)			Utilisés en général au dessous de T_g pour les amorphes.	
Elastomères	Amorphe  chaîne noeud	Linéaires avec réticulation très légère	Souplesse. Grande élasticité réversible (comportement caoutchoutique).	Ne fondent pas ; mais décomposition à haute température.	Forte extension (jusqu'à 1000 %). Difficilement recyclables. Utilisés au-dessus de T_g .	Si $T < T_g$: élasticité enthalpique Si $T > T_g$: élasticité entropique
Thermo-durcissables	Amorphe  noeud	Réseau à trois dimensions, avec réticulation forte	Souplesse moyenne. Capacité d'allongement peu élevée.	Ne fondent pas ; mais décomposition à haute température.	Insolubles dans les solvants organiques. Non recyclables. Utilisés au dessous de la température de décomposition thermique.	Si $T < T_g$: élasticité enthalpique Si $T > T_g$: élasticité entropique

Fig. I.2 Familles des polymères.[1]

2.3) Structure des élastomères

Les élastomères sont des matériaux amorphes constitués d'un ensemble de chaînes macromoléculaires de différentes longueurs. A l'état cru, c'est-à-dire sans vulcanisation, les chaînes constituant l'élastomère sont indépendantes. Sous l'application d'une contrainte extérieure, elles glissent irréversiblement les unes sur les autres et se relâchent, créant ainsi du fluage et une déformation permanente. Cette plasticité exclut toute stabilité dimensionnelle ainsi que toute possibilité d'utilisation mécanique classique du matériau d'où le besoin de vulcaniser celui-ci afin de créer des liaisons de pontages chimiques entre les chaînes élastomériques et ainsi les lier les unes aux autres. L'élastomère devient alors réticulé, mais le nombre de pontage est assez limité. Cela laisse des possibilités de mouvement des chaînes

beaucoup plus importantes que pour un polymère présentant un réseau thermodurcissable. La structure est alors celle d'un réseau tridimensionnel unique, toujours extrêmement déformable sous une sollicitation extérieure, mais stable. [1]

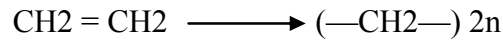


Figure I.3: Molécules de polyéthylène [2]

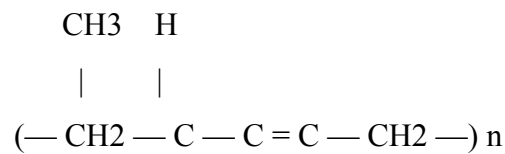


Figure I.4 : Molécules de polyisoprène (caoutchouc naturel) [2]

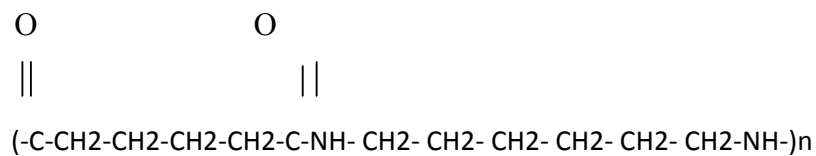


Figure I.5 : Molécules du nylon [2]

2.4) Température de transition vitreuse

La température de transition vitreuse T_g est une donnée très importante pour les polymères.

En dessous de T_g , les liaisons secondaires relient les molécules pour former un solide amorphe alors qu'au-dessus de T_g , ces liaisons commencent à fondre, ce qui permet aux molécules de se déplacer.

A partir de T_g un polymère devient d'abord viscoélastique puis caoutchoutique, capable de subir de grandes déformations élastiques sans rompre (figure I.6) (figure I.7). Les élastomères sont des polymères avec une température de transition vitreuse inférieure à la température ambiante.

- La température de transition vitreuse T_g caractérise le passage du matériau de l'état vitreux à l'état caoutchoutique.

- La température de fusion T_f caractérise la fusion des cristaux (pour un polymère cristallin ou semi-cristallin).
- La température de dégradation T_d où les liaisons covalentes des macromolécules commencent à se rompre sous l'action de la chaleur.

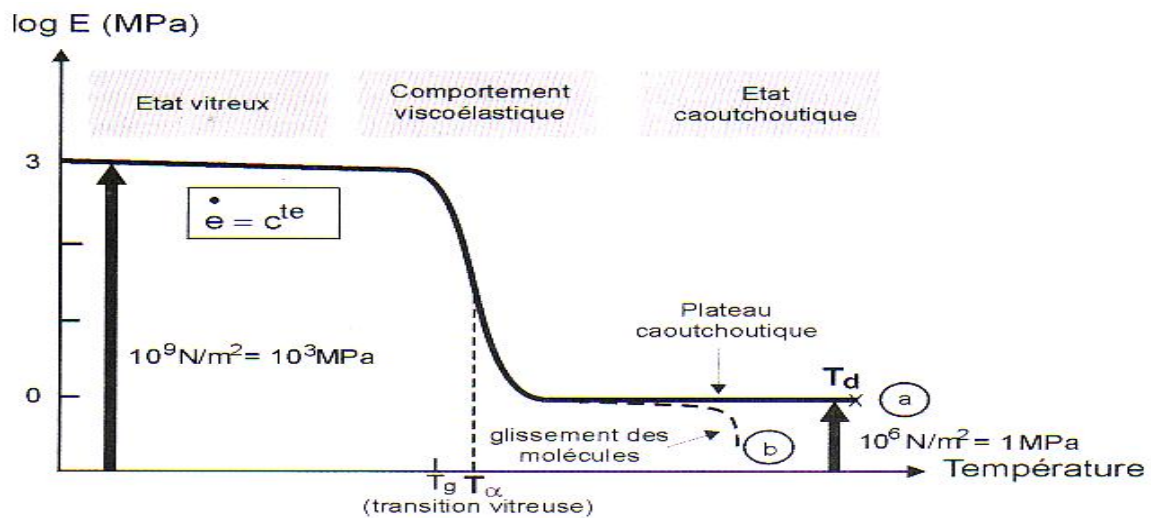


Figure. I.6 : Évolution du module élastique en fonction de la température pour une vitesse de refroidissement donnée [1].

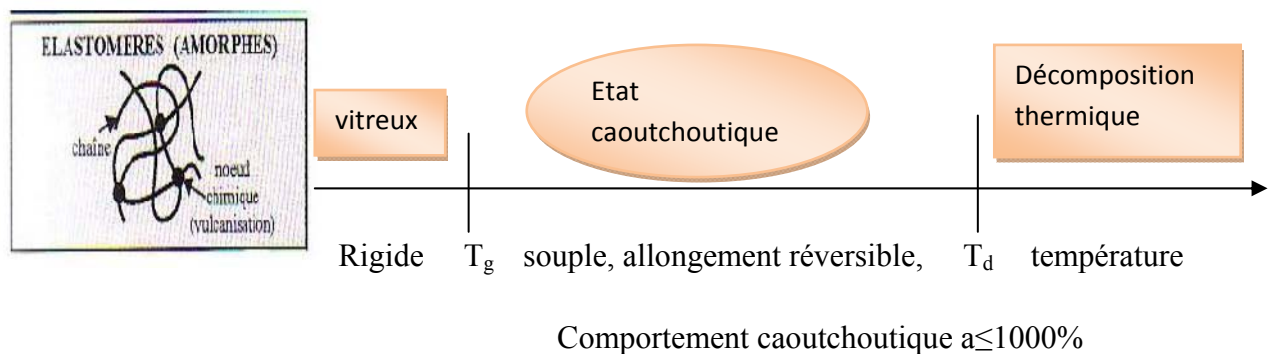


Figure. I.7 : Etat d'un élastomère en fonction des domaines d'état structurel ou de la température [1].

3) propriétés mécaniques des élastomères

3.1) L'élasticité caoutchutic-cristallisation sous contraintes

Les élastomères sont caractérisés par trois comportements essentiels.

➤ Comportement d'élasticité caoutchoutique

A cause de cette propriété les élastomères ont la capacité de retrouver leur géométrie initiale presque intégralement. Cependant, ceci n'est vrai que pour les élastomères non chargés et soumis à de faibles déformations. La figure I.8 représente un essai de traction du type charge/décharge sur le matériau - chargé au noir de carbone - de cette étude. Les déformations rémanentes sont d'environ 15% pour une déformation maximale atteinte de 300%, ce qui reste relativement faible. En revanche, les trajets de charge et de décharge sont très différents ; le matériau s'adoucit de façon non négligeable. Ainsi, on constate que l'hypothèse de réversibilité est discutable dans ce cas.

➤ Résistance à des grandes déformations et un retour rapide

Un élastomère est capable de supporter des déformations très importantes qui peuvent atteindre 600% à 1000% selon la composition et les conditions d'utilisation. La figure I.9 représente un essai de traction à rupture sur un élastomère naturel chargé de noir de carbone. Sa déformation à rupture est d'environ 600%.

➤ Comportement non linéarité

Le comportement hyperélastique est défini par un comportement élastique dérivant d'une énergie potentielle de déformation W permettant d'écrire la loi de comportement sous forme :

➤ cristallisation sous contraintes

On peut vérifier un matériau que ne se cristallise pas sous contrainte, on réalise un essai plusieurs cycles d'amplitude croissante. Si le comportement du matériau rejoint la courbe de comportement du matériau non-cyclé alors le matériau est non cristallisant (figure I.10) sinon il est cristallisant.

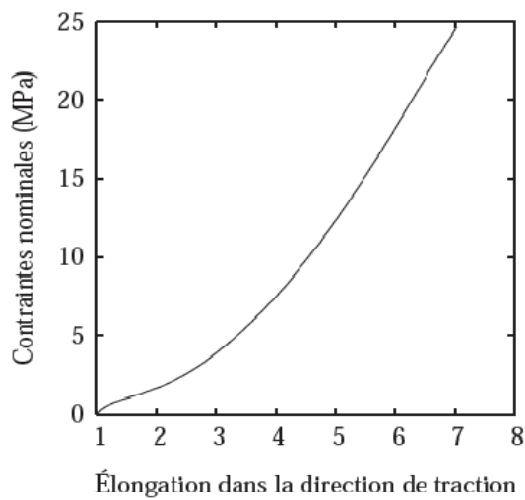


Figure. I.9 : courbe de traction a rupture charge /décharge [5]

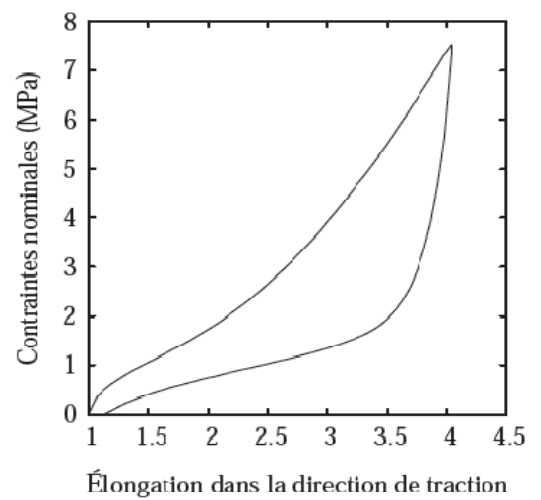


Figure. I.8 : essai de traction de type [5]

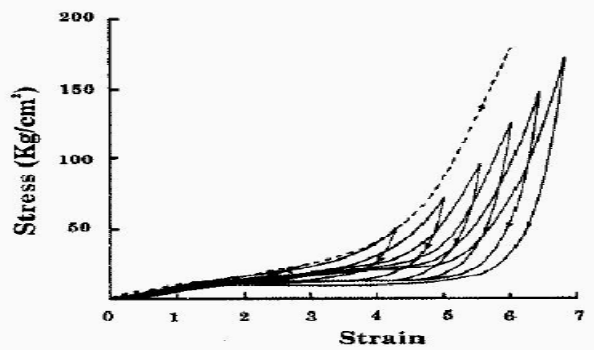
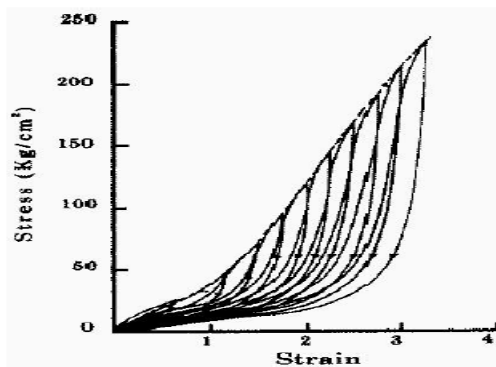


Figure I.10– Stabilisation d'un SBR non cristallisant et d'un NR cristallisant [HMP67]. La courbe en pointillés représente le comportement du matériau non-cyclé. [3]

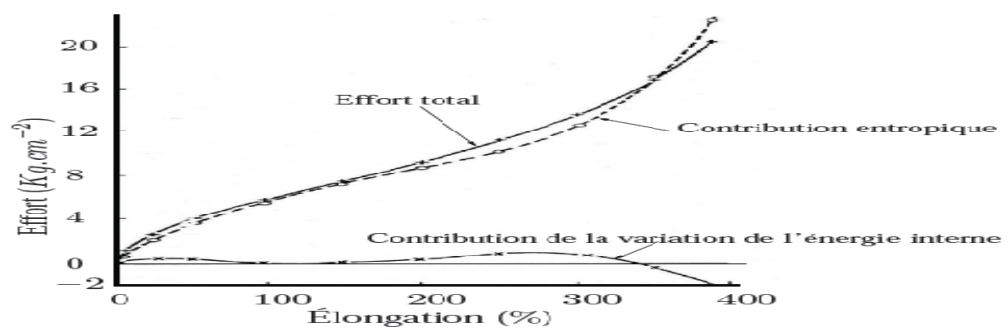


Figure I.11 – Contribution de l'entropie et de l'énergie interne à la force de traction en fonction de l'élongation [8]



Figure. I.12 : Cristallisation sous contrainte [5].

3.2) La viscoélasticité :

Le comportement des élastomères diffère avec l'échelle de temps considérée. L'élasticité concerne les temps courts alors que la viscoélasticité intervient avec des temps intermédiaires.

Les deux essais classiques permettant de mettre en évidence cette dépendance au temps sont :

Le premier, à long terme, est le fluage sous déformation constante, tel que l'illustre la figure I.13.

Le second, à court terme, est un comportement hystérétique sous chargement cyclique comme le montre la figure I.14.

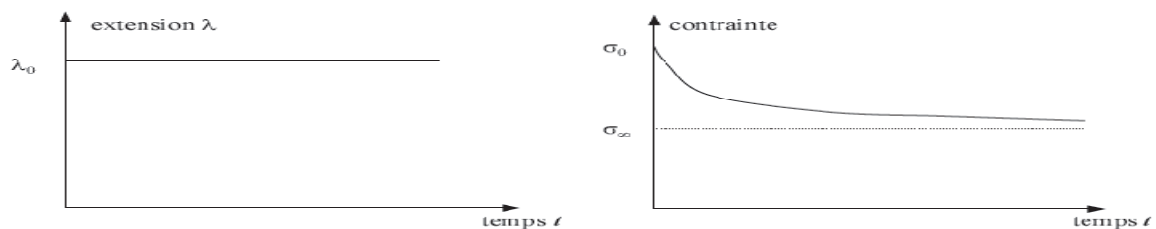


Figure. I.13 : Phénomène de relaxation [2]

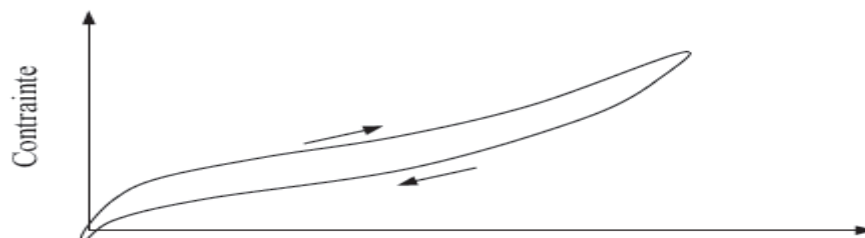


Figure. I.14 : Courbe d'hystérésis d'un élastomère [2]

N.B. : Notons que pour les élastomères, la loi de comportement dépend également de la température et qu'il existe des équivalences entre la dépendance au temps et à la température (principe de WLF) [2].

3.3) L'hystérésis :

Si l'on trace sur un même diagramme force/déplacement la réponse à faible vitesse d'une éprouvette en caoutchouc, la courbe de retour ne se superpose pas à la courbe allée.

Il y a hystérésis, mettant en évidence l'existence de frottements internes dans le matériau. Les éléments libres des chaînes moléculaires glissent les uns sur les autres, entraînant un frottement sec interne générateur de perte d'énergie.

Une étude de l'hystérésis en fonction de la température, du taux d'élongation et de l'énergie de déformation, à vitesse de déformation constante, pour un élastomère thermoplastique, est présentée dans. Il est montré que l'hystérésis croît lorsque la température diminue ou lorsque la déformation augmente (figure I.15). Ce phénomène dissipatif est donc fonction de la structure du matériau (taux de cristallisation, nombre de liaisons secondaires, ...). [3]

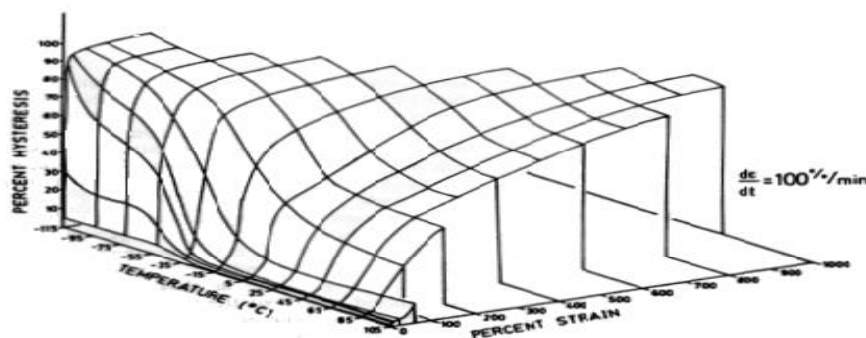


Figure I.15 – Variation de l'hystérésis pour un thermoplastique en fonction de la déformation et de la température [3].

3.4) L'effet Mullins

Lorsqu'un élastomère est sollicité de façon cyclique, une diminution de la charge nécessaire pour obtenir la même élongation est observée [7]. Ce phénomène plus ou moins réversible, connu sous le nom d'adoucissement sous contrainte ("stress-softening") ou d'effet Mullins, a été l'objet de nombreuses recherches. Après un certain nombre de cycles, ce nombre pouvant dépendre de l'amplitude de la déformation, la réponse du matériau se stabilise.

En 1947, Mullins réalise plusieurs campagnes expérimentales, sur cinq mélanges différents, pour tenter de mieux comprendre et d'expliquer ce phénomène qui porte actuellement son nom. Ses principales remarques furent les suivantes :

- tous les élastomères, vulcanisés et non réticulés, chargés et non chargés présentent ce phénomène d'adoucissement avec une importance plus grande pour les élastomères contenant des charges ;
- le "module" d'un élastomère, i.e. la contrainte pour une élongation donnée, diminue après un premier cycle pour les déformations inférieures ou égales à la déformation maximale imposée lors du premier cycle ;
- lorsque la déformation est supérieure aux cycles précédents, le matériau n'est pas adouci (figure I.16) ;
- le plus grand pourcentage de l'adoucissement est obtenu lors du premier cycle avec une stabilisation du comportement après 3 ou 4 cycles suivant les élongations imposées. Plus l'élongation est grande, plus le nombre de cycles permettant la stabilisation du matériau est important. [3]

Considérons un élastomère soumis à une histoire de déformation uniaxiale quasi-statique telle que celle illustrée par le graphe de gauche de la figure I.16. Le matériau vierge de toute déformation. Les contraintes correspondantes suivent alors la courbe sur le graphe de droite de la figure I.16.

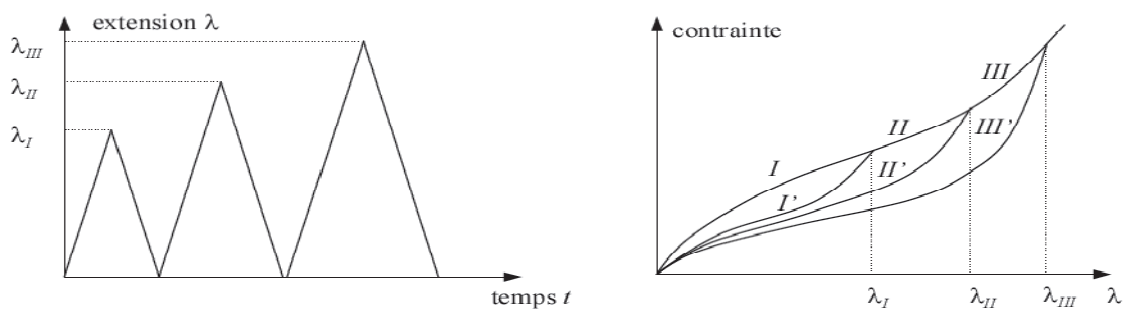


Figure I.16 Effet mullins [2]

3.4.1) Hypothèse d'isotropie :

L'analyse de l'isotropie se fait en appliquant le chargement dans différentes directions du repère géométrique. Pour enrichir l'analyse, on a également appliqué le même chargement mais sur une configuration initiale tournée d'un certain angle.

Comme dans le cas précédent, nous considérons un taux de charge de 40% et un rapport de raideur de 10. Cette étude est réalisée en déformations planes, et pour deux types de chargement :

Extension et glissement simple. Dans le cas bidimensionnel et pour un chargement de cisaillement, Les réponses mécaniques globales du VER semblent être identiques pour les différentes directions de chargement.

Les réponses en traction sont légèrement différentes au fur et à mesure qu'on varie la direction de sollicitation. [3]

3.4.2) Recouvrance du phénomène

Mullins étudie le recouvrement des propriétés en traction initiale après un premier cycle. Les courbes I.17 montrent le pourcentage de récupération pour un caoutchouc naturel vulcanisé en fonction de la température.

Il en déduit que le phénomène d'adoucissement est plus ou moins réversible.

Après un certain temps, le matériau préalablement cyclé présente à nouveau un effet Mullins. Le fait de chauffer le matériau permet une récupération plus rapide et plus importante [3]

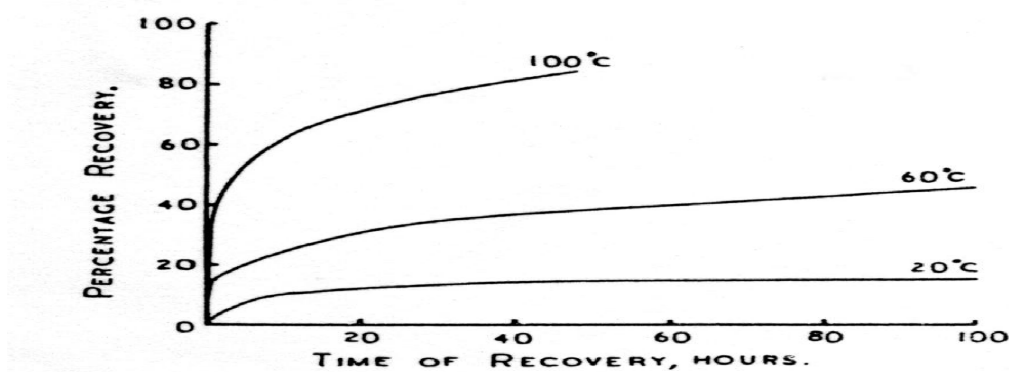


Figure. I.17 Pourcentage de recouvrement de l'effet Mullins pour un caoutchouc naturel vulcanisé, en fonction de la température et du temps [3].

3.4.3) Explication du phénomène

Comme il a été remarqué précédemment, le phénomène d'adoucissement est plus marqué sur les élastomères chargés que sur les gommes, d'où l'idée d'expliquer l'effet Mullins par la destruction du rôle renforçant des charges ou par la réorganisation de la répartition des charges.

Plusieurs auteurs tels que Blanchard et Parkinson, Mullins et Tobin, Bueche ou Houwink ont tenté de modéliser le phénomène par des approches moléculaires ou phénoménologiques mais aucune d'entre elles n'a été validée pour la totalité des élastomères et pour toute sollicitation. Les études de Johnson et Beatty généralisent un modèle pour l'effet Mullins en traction uniaxiale à la traction équibiaxiale en réalisant des essais de "gonflement" d'un ballon en latex.

Une présentation de ces différents modèles est décrite dans l'article de Mullins et la thèse de Laraba [3]

3.5) L'effet Payne

Ce phénomène étudie la variation du module complexe en fonction de l'amplitude de déformation et de la proportion de charges dans la matrice. Il est désigné sous le terme d'effet Payne.

Ce phénomène est surtout étudié dans le domaine vibratoire.

L'introduction de charge conduit à un non linéarité du comportement (Figure I.18), c'est l'effet de Payne. Aux faibles déformations, on observe un plateau correspondant au plateau caoutchoutique. Le module complexe E' diminue lorsque la déformation augmente jusqu'à une valeur stabilisée. Cette décroissance est associée à un maximum du module de perte traduisant une dissipation d'énergie d'autant plus grande que la chute de E' est élevée. L'effet de Payne est interprété comme le processus de désagrégation ou de rupture du réseau des charges ou par des mécanismes de frottement mis en jeu à l'interface charge/matrice [4]

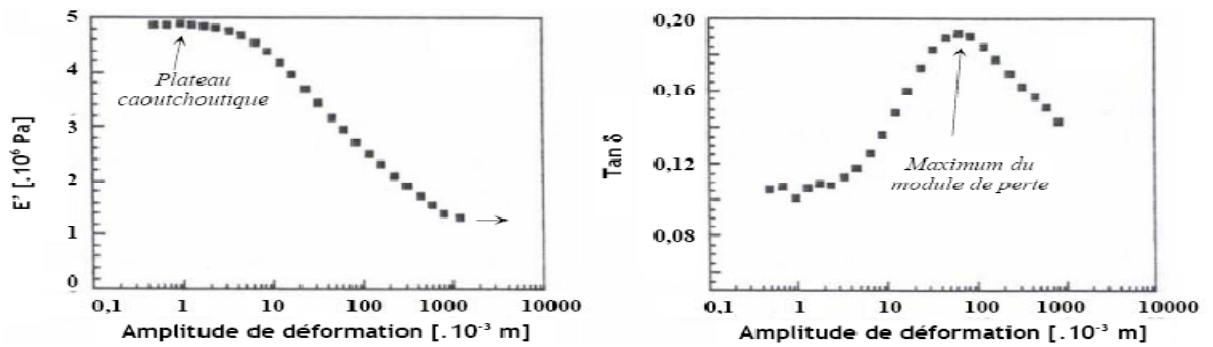


Figure. I.18 : Analyse de l'effet de Payne, évolution de propriétés mécaniques en fonction du niveau de déformation pour un élastomère SBR renforcé en silice [4].

3.6) L'amplification des déformations

La présence de noirs de carbone peut provoquer des amplifications de déformations par effet composite.

La plupart de ces théories dérivent des travaux d'Einstein sur les particules en suspension dans un liquide. Elles considèrent que les déformations macroscopiques peuvent être décomposées en déformation de la matrice et en déformations des charges.

Les charges (noirs de carbone) étant infiniment rigides devant la matrice polymérique, l'extension des charges λ_f est considérée égale à 1. La loi de comportement de la matrice étant supposée connue, trouver le comportement du matériau chargé revient à connaître les déformations réelles de la matrice (λ_r) en fonction des déformations macroscopiques λ du matériau chargé et du taux volumique de charge ν . On peut remarquer que λ_r est nécessairement supérieur à λ puisque les charges sont considérées indéformables. Il y a donc bien amplification des déformations dans la matrice. Kilian et al proposent un modèle suivant cette approche et permettant de reproduire avec une bonne corrélation la tendance du matériau à se renforcer en fonction du taux de charges [3].

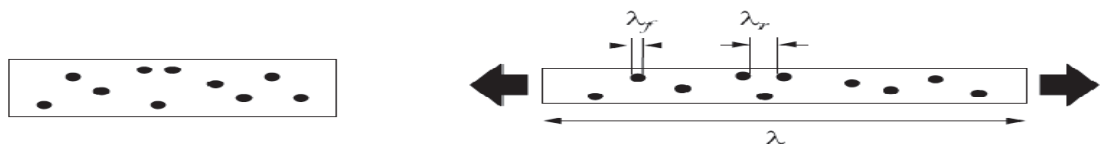


Figure. I.19 : Phénomène d'amplification de déformation [3]

3.7) Compressibilité

L'hypothèse classique de matériau incompressible pour les élastomères compacts est présente dans beaucoup d'ouvrages. Toutefois, pour le dimensionnement de certaines pièces ou structures qui travaillent dans un environnement confiné (support de machine, joint, ...) cette hypothèse restrictive peut entraîner des résultats de calcul erronés.

Pour l'étude de la compressibilité volumique, il faut distinguer deux classes d'élastomères :

- les caoutchoucs cellulaires, dont le module de compressibilité est de l'ordre de 1 MPa ;
- les caoutchoucs compacts ayant un module de compressibilité de l'ordre de 2000 MPa.

Remarque : en élasticité le coefficient de Poisson ν , le module de cisaillement μ et le module de compressibilité K peuvent être reliés par l'expression

$$\nu = \frac{1}{2} \left[\frac{3 - 2\mu/K}{3 - \mu/K} \right]$$

De plus, en traction uniaxiale et petites déformations la variation de volume sur le volume initial s'écrit :

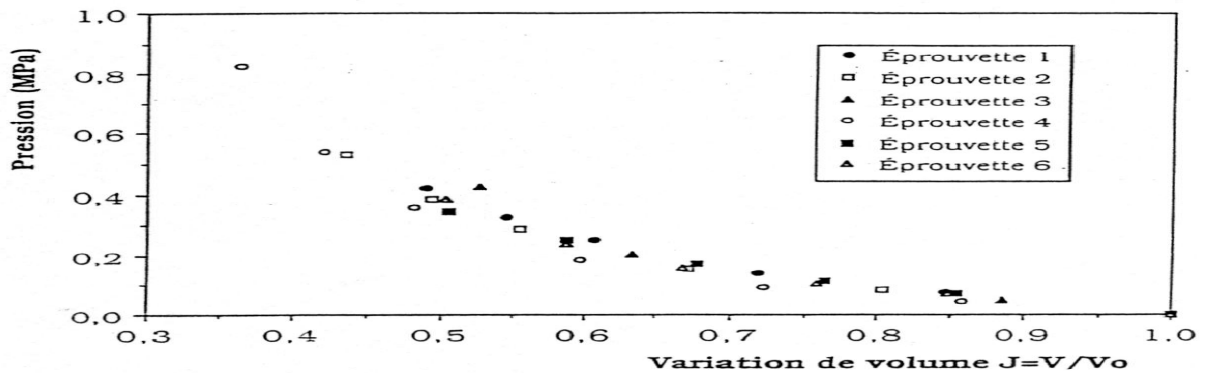
$$\frac{\Delta V}{V_0} = (1 - 2\nu)\varepsilon = \frac{3\mu/K}{3 + \mu/K} \varepsilon \sim \frac{\mu}{K} \varepsilon$$

La variation de volume est donc de l'ordre de μ/K .

La principale propriété des mousses de caoutchoucs est leur compressibilité. Des courbes expérimentales réalisées par Hutchinson [1] sur des caoutchoucs cellulaires et pour des pressions n'excédant pas 10 bars, illustrent ce phénomène de compressibilité avec un V/V_0 pouvant atteindre 0.4 (figure I.19).

Les élastomères compacts sont quant à eux souvent considérés comme des matériaux incompressibles. En effet, le module de compressibilité volumique K est de beaucoup supérieur, d'un facteur supérieur à mille, à μ . En conséquence, les variations de volume qui accompagnent la déformation sont très faibles, de l'ordre de $\mu/K \sim 10^{-3}$.

En 1930, Adams et Gibson réalisent des essais de compressibilité à hautes pressions sur des caoutchoucs compacts à 252C. Ils déterminent l'évolution de la pression hydrostatique en fonction de la variation de volume. Pour des pressions allant jusqu'à 12000 bars, ils montrent que la variation de volume peut dépasser les 10% (figure I.20). [3]



FigurI.20– Compression hydrostatique sur un caoutchouc cellulaire [3].

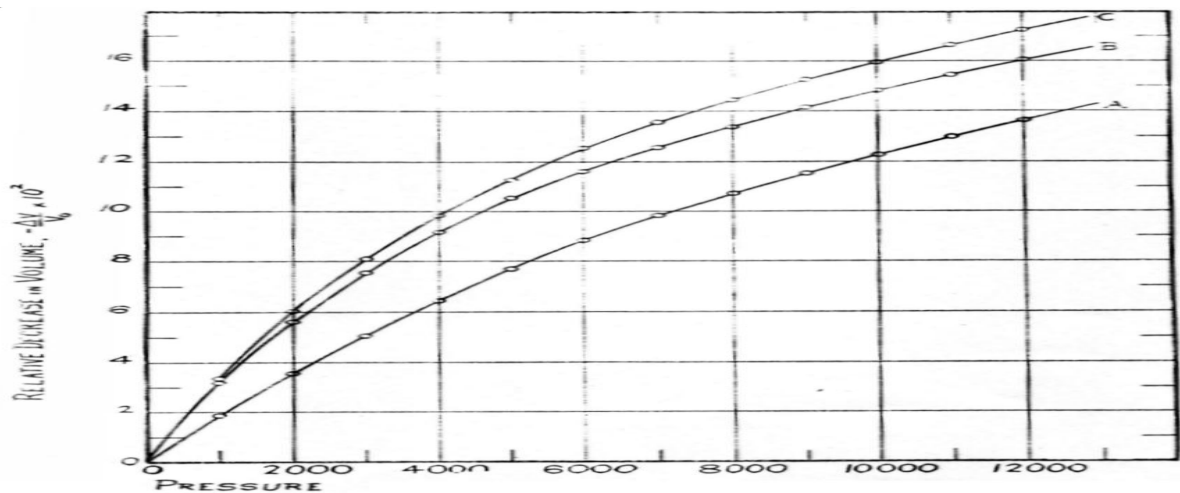


Figure I.20 – Pourcentage de variation de volume en fonction de la pression (en bars) pour trois sortes de caoutchoucs compacts [3].

3.8) Charges : Natures, rôles et effet

Le renforcement des élastomères sera important par certaines particules minérales comme les noirs de carbone (NDC) ou encore l'ensemble des charges dites « claires » i.e., silices, kaolins, carbonates de calcium.....etc.

L'effet de l'addition de ces particules conduit une diminution du cout des pièces fabriquée et une amélioration des propriétés du matériau (résistance a la brasons au cisaillement, a la rupture, dureté et la rigidité).

Le pourcentage du noir de carbone introduit dans un matériau permet donc d'en modifier ses propriétés mécaniques (figure I.22).

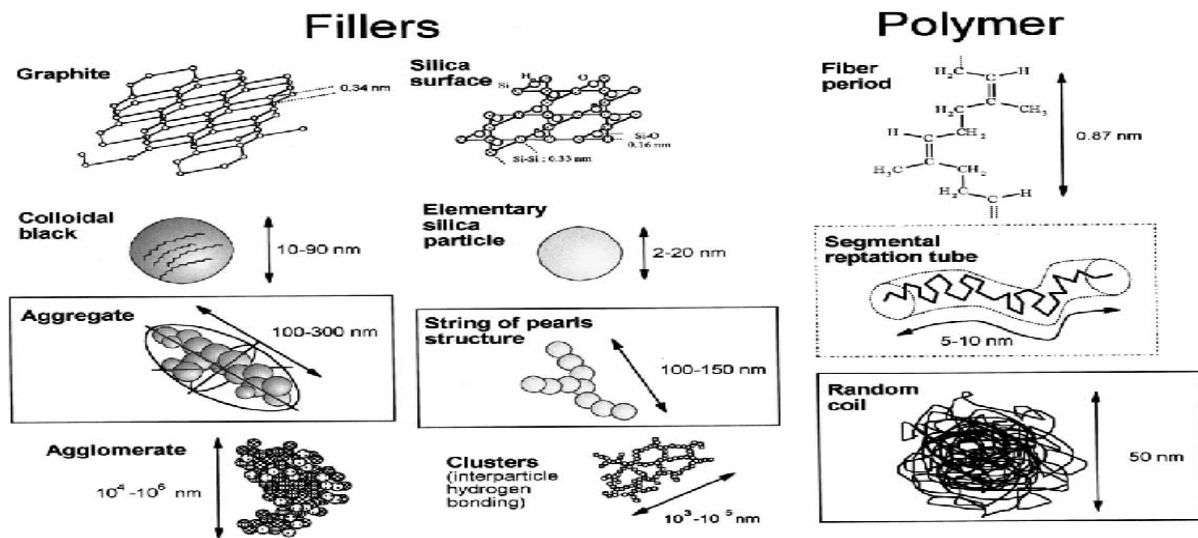


Figure (I.21) Echelles d'interactions entre des particules de type NDC ou silice et la matrice de polymère [6].

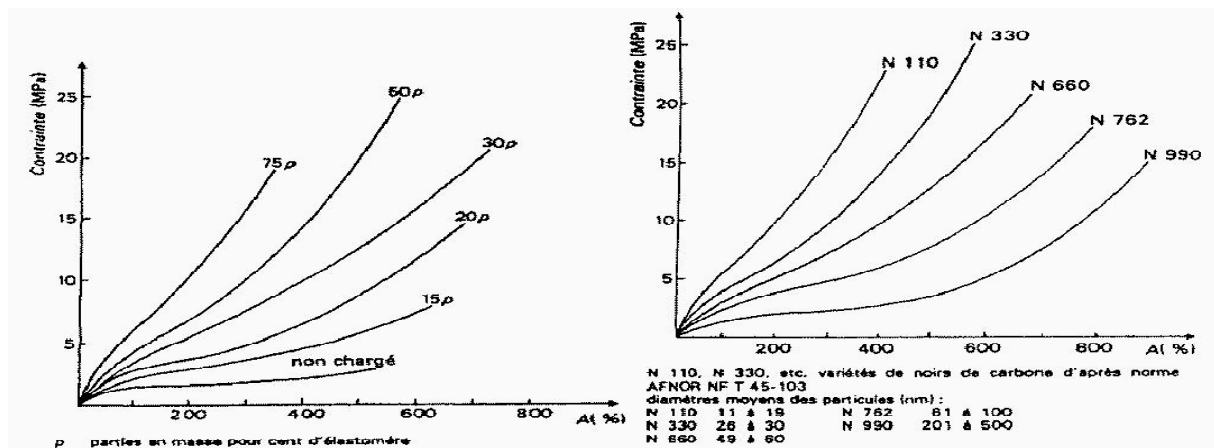


Figure I.22 – Influence du taux de noir de carbone et de son diamètre sur le comportement du NR [6].

4) conclusion

Nous venons de présenté d'une manière brève les notions générales du comportement physicochimique et mécaniques des élastomères.

La complexité des liaisons et des mécanismes (compressibilité, hysteresis, effet Mullins,...) intervenant lors de la déformation des ces matériaux explique qu'il n'existe pas encore actuellement de modèle unique permettant de simuler une pièce en élastomères.

1) Introduction :

Ce 2^{ème} chapitre a pour objectif de mettre en évidence les principales modes, facies, et quelques paramètres qui influent sur le mécanisme de l'usure des élastomères.

2) Problématique de l'étude de l'usure :

Les différents types de phénomènes d'usure, appartiennent à deux groupes de facteurs :

- **effets du contact** proprement dit : interactions mécaniques, chimiques, métallurgiques, entre les deux corps en présence ;
- **effets de l'environnement** (atmosphère, lubrifiant...) : actions physicochimiques dues à la composition du milieu, actions mécaniques induites par la nature, la propreté de ce milieu (caractère abrasif d'une ambiance polluée par exemple).

La tribologie n'étant pas une science exacte, il s'ensuit également que :

- la résolution des problèmes de frottement-usure ne repose que sur des lois générales, souvent empiriques ;
- l'étude de ces problèmes, même au stade de l'approche industrielle (sélection, validation des solutions...), fait largement appel à l'expérimentation ;
- les résultats d'expérience sont difficilement extrapolables d'une situation à l'autre.

Les paramètres du contact, dont l'étude fait appel à des disciplines aussi diverses que la mécanique, la métallurgie, la physique du solide, la chimie, sont très nombreux et sont liés par un réseau de relations complexes. Aussi, les propriétés tribologiques, telles que les caractéristiques de frottement, la résistance à l'usure, ne peuvent s'exprimer par des critères et valeurs simples, ni se modéliser facilement, contrairement à certains domaines telles que la résistance des matériaux.

Malgré sa complexité, l'analyse du système tribologique constitue l'outil de référence d'aide à la définition et à l'étude d'une configuration de frottement. Cette analyse doit permettre en particulier :

- d'exprimer rationnellement le cahier des charges du problème à résoudre, condition préalable à l'étape de recherche et de sélection des solutions possibles ;
- d'identifier les situations à risques, les probabilités d'incidents, pour arrêter certains choix de conception ;

- d'appréhender les implications liées à telle ou telle option technologique (conception géométrique, cinématique...). [9]

3) Définition

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...

3.2) Coefficient de frottement

3.2.1) 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 II.1. a). [9]

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 II.1. b). [9]

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 II.1.c). [9]

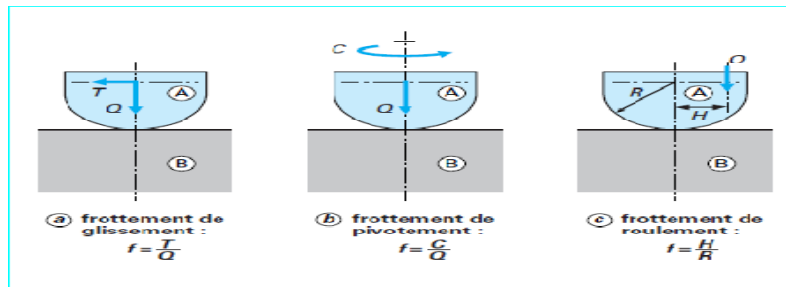


Figure II.1) Définition des coefficients de frottement [9]

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

3.2.2) Coefficients de frottement statique et dynamique

Les forces tangentielles T (figure II.1 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.

3.3) 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 interfaciales et forces d'adhérence entre les deux corps en présence.

3.4) Ordres de grandeur du coefficient de frottement

Le tableau II. 1 présentés Les ordres de grandeur du coefficient de frottement (glissement) [9]

Tableau 1 – Ordres de grandeur du coefficient de frottement	
Type de frottement	Ordre de grandeur de f
Frottement sur film gazeux	10^{-4}
Roulement (billes-aiguilles)	10^{-3}
Lubrification hydrodynamique	10^{-3} à 10^{-2}
Lubrification à la graisse	10^{-2}
Frottement à sec	10^{-1}
• matériaux de freinage	$\approx 5 \cdot 10^{-1}$
• matériaux autolubrifiants à base de lubrifiants solides	$< 1 \cdot 10^{-1}$
• lubrifiants solides les plus performants	$\approx 5 \cdot 10^{-2}$

3.5) Contraintes résiduelles

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

3.6) 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 II.2**).

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...). [9]

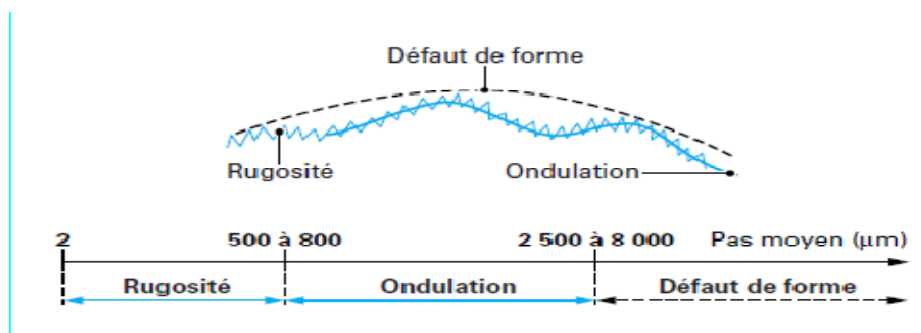


Figure 6 - Classement des irrégularités de surface

Figure II.2 Classement des irrégularités de surface [9]

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 II.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, microdéfauts...) ou au mode de croissance des revêtements.

[9]

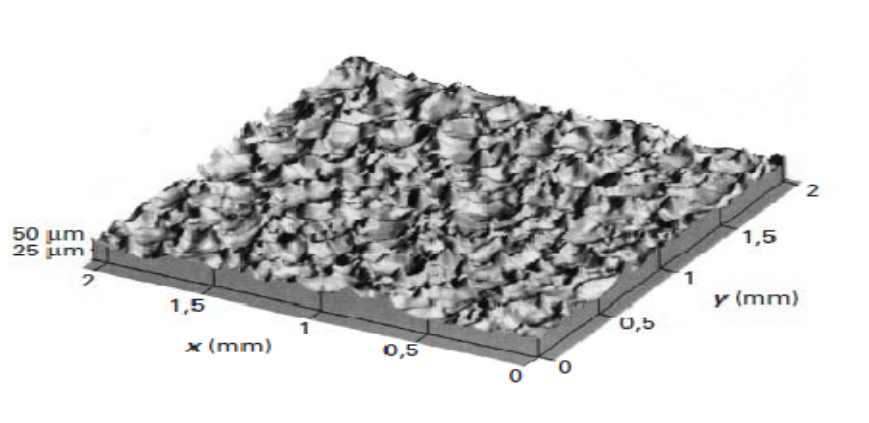


Figure 7 - Exemple de représentation tridimensionnelle de rugosité

Figure II.3 Exemple de représentation tridimensionnelle de rugosité [9]

4) Données et paramètres tribologiques

4.1) 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 **L** parcourue.

$$V = k V FN$$

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 limité, 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 mm^2/kgf ou en mm^2/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 ef^* , c'est-à-dire en première approximation que le taux d'usure k est proportionnel au coefficient de frottement μ , soit $k = ef^*\mu$ [9]

4.2) 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 tribosystème. 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 $\text{MPa} \cdot \text{m/s}$ (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 : $p_v\mu$ (W/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...).

Les températures éclair des surfaces sont peu prises en compte, car difficiles à calculer par manque de données sur les grandeurs thermo physiques, et leur évolution avec la température T , et sur la micro géométrie des aspérités des pièces. Elles ont toutefois une forte influence en frottement sec où l'augmentation de la vitesse amène la température de surface des pièces à des valeurs proches de la température de fusion ou de transition vitreuse du matériau (polymère).

Les domaines d'usure (douce ou sévère) des matériaux sont donc définis par des graphes dans le plan (p, v) (**voir figure II.4**) : on note que la nature du matériau modifie largement la valeur limite du produit $p v$ à prendre en considération :

- les matériaux présentés dans la figure 1 possèdent tous un domaine de faible taux d'usure, mais pour des valeurs de p et v sensiblement différentes ;
- en dehors de ce domaine, le taux d'usure dépend fortement de la valeur du produit $p v$ et il importe de le déterminer si on souhaite travailler dans ce domaine. [9]

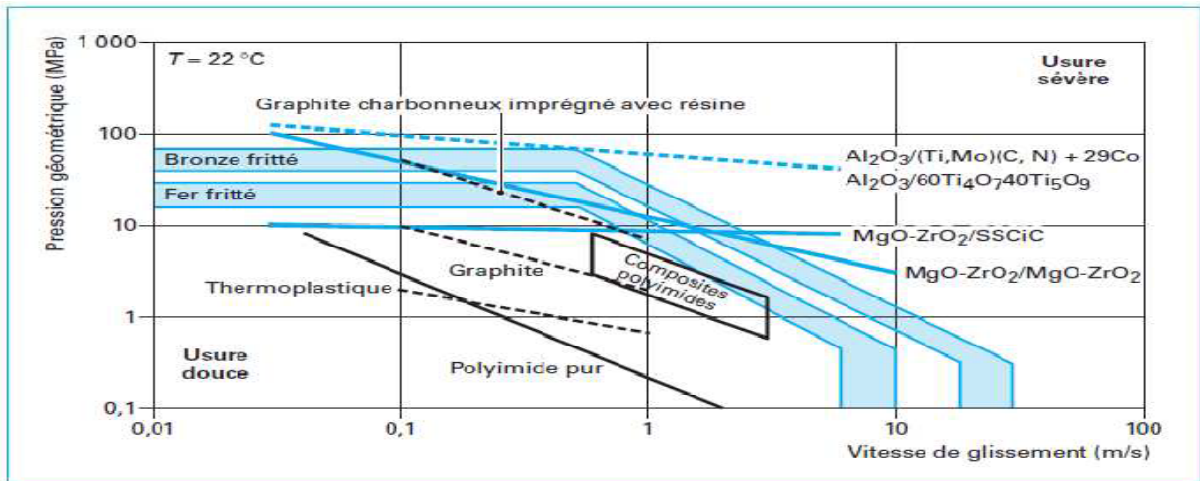


Figure II.4 : Graphe « pression/vitesse de glissement » limite pour différents matériaux en frottement sec à température ambiante (contact conforme ; antagoniste acier pour fer et bronze frittés [9].

4.3) 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 :

$$E_f = \mu F_N L$$

Avec μ coefficient de frottement de Coulomb

Le produit μF_N 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 ef^* de densité d'énergie de frottement apparente et à supposer que le volume d'usure est proportionnel à l'énergie de frottement par :

$$ef^* = \frac{E_f}{V} = \frac{\mu}{K}$$

La densité d'énergie de frottement apparente ef^* correspond au potentiel d'énergie total contenu dans un tribosystème. [9]

5) 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 II.5**).

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. [10]

Effets		Schématisation du contact [rugosité, défauts de forme...]	Incidences prévisibles sur le frottement
Imbrication			- Résistance au déplacement - Déformations, ruptures... des aspérités
Déformations élastiques, plastiques	Cas général		- Modification de la topographie : rugosité, portance... - Ecroutissements
	Pénétration (dureté de A > dureté de B)		- Résistance au déplacement - Labourage de B par A - Transfert de B sur A
Adhésion			- Résistance au déplacement

Figure II.5 : rapprochement des solides : effets et conséquences. [10]

6) Outils conceptuels en tribologie des interfaces :

L'approche de la tribologie à travers le contact à trois corps constitue le cadre actuellement le plus général pour analyser et structurer une situation tribologique.

6.1) Le triplet tribologique et la notion de troisième corps :

Le concept du triplet tribologique (mécanisme, premiers corps, troisième corps) introduit par Godet et Berthier, implique la superposition de phénomènes à trois échelles différentes.

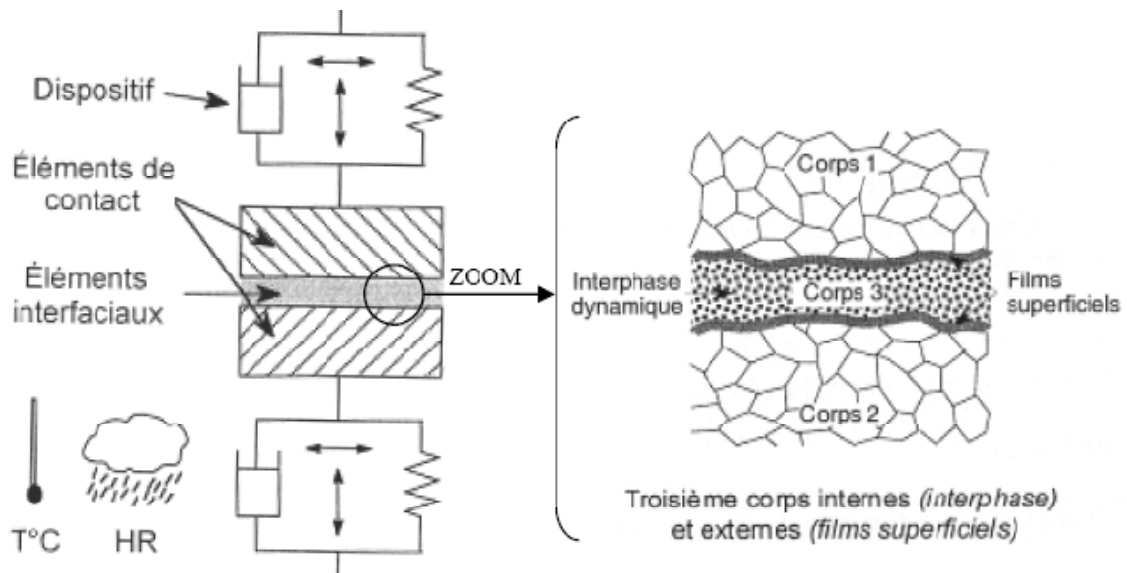


Figure II.6 : le triplet tribologique de Godet et le concept de troisième corps.

Il se compose : [10]

Un chargement (F), une cinématique (v), un environnement de frottement, deux corps constitués par les matériaux en contact qui supportent les sollicitations imposées par le mécanisme, Le troisième corps est l'élément intercalaire systématiquement présent dans le contact et qui transmet la charge.

Le troisième corps est composé :

- De films superficiels (contaminants, molécules absorbées, films d'oxydes...), induits par la réactivité des surfaces,
- De particules détachées (débris) s'accumulant lors du frottement, induits par les processus de dégradation des surfaces.

L'ordre de grandeur caractéristique du troisième corps est le micromètre, alors que les écrans ont une épaisseur de quelques nanomètres.

Ces derniers sont composés de dépôts artificiels ou de couches naturelles physisorbées, chimisorbées, oxydées, dépendant de l'historique de préparation des surfaces des premiers corps en contact (**figures II.6 et II.7**). [10]

6.2) Accommodation de vitesse :

Berthier, considère que l'étude du frottement et de l'usure passe par l'identification des mécanismes d'accommodation de vitesse activés dans le contact ou aux interfaces. Ces mécanismes d'accommodation notés $S_i M_j$, sont définis par des sites S_i et des modes M_j qui indiquent respectivement le lieu d'accommodation de vitesse et la manière dont celle-ci s'effectue (**figure II.7**).

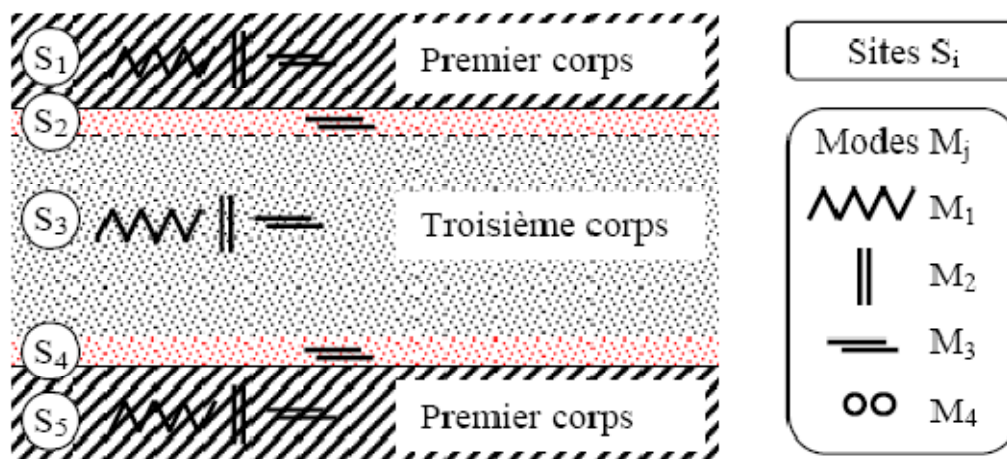


Figure II.7 : sites et modes d'accommodation. [10]

Les premiers corps sont notés S_1 et S_5 , la partie volumique du troisième corps constitue le site S_3 . La notion d'écrans notés S_2 et S_4 .

Les modes élémentaires d'accommodation sont répertoriés selon quatre types de comportements mécaniques : la déformation élastique M_1 , la fissuration ou rupture normale M_2 , le cisaillement M_3 , et le roulement M_4 .

Si nous définissons donc un mécanisme d'accommodation comme étant l'association d'un site et d'un mode d'accommodation, nous voyons qu'ils sont au nombre de vingt pouvant être activés en différents points de contact.

Il faut garder à l'esprit le fait que tous ces mécanismes ne sont pas clairement identifiables (modes élastiques dans le premier corps) bien qu'activés avec certitude. Ils

n'aboutissent pas à la formation de débris et ne contribuent donc pas tous à un taux d'usure correspondant à l'évacuation définitive de particules issues des débris hors du contact. [10]

6.3) Circuit tribologique :

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 II.8**).

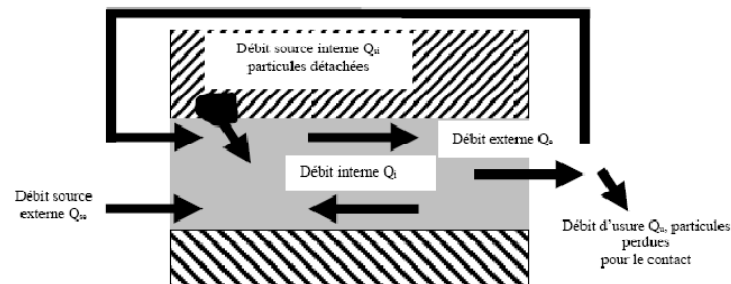


Figure II.8 : circuit tribologique de Berthier. [10]

Le détachement de particules ou débit source interne (Q_{si}) 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_{se}).

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 $Q_{se}=0$, 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) : [10]

- Circuit ouvert :
$$\begin{cases} Q_i = Q_s - Q_e \\ Q_u = Q_e \end{cases} \quad \text{soit} \quad \begin{cases} Q_i = Q_s - Q_u \\ Q_u = Q_e \end{cases}$$
- Circuit fermé :
$$\begin{cases} Q_i = Q_s - Q_e + Q_r \\ Q_u = Q_e - Q_r \end{cases} \quad \text{soit} \quad \begin{cases} Q_i = Q_s - Q_u \\ Q_u = Q_e - Q_r \end{cases}$$

7) L'usure des élastomères :

7.1) Principaux faciès d'usure :

Il existe principalement quatre faciès peuvent être identifiés (**figure II.9**).

- Les stries.
- Les rides.
- Les rouleaux.
- Les cratères.

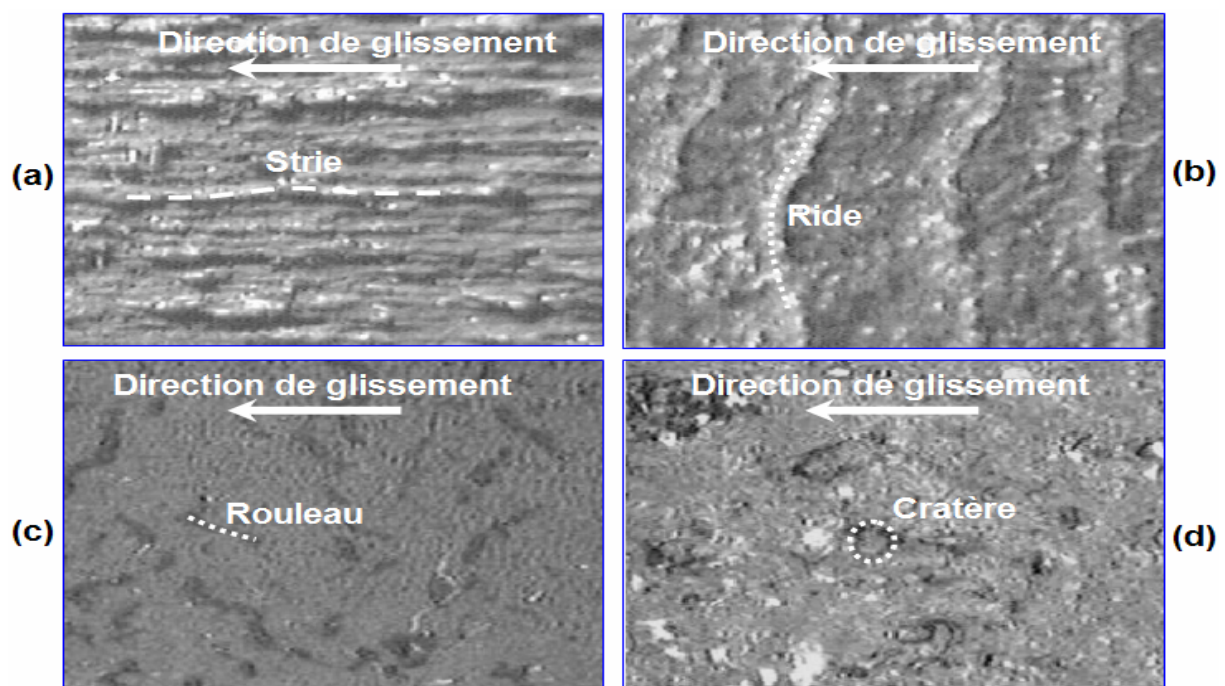


Figure II.9 : principaux faciès d'usure des élastomères. Stries d'usure (a) ; rides d'usure (b) ; rouleaux d'usure(c) ; cratères d'usure(d).[11]

7.1.1) Rouleaux d'usure :

Ils ont été étudiés par quelques chercheurs.

Les rouleaux d'usure sont des débris d'usure adhérents à la surface usée.

Les rouleaux ne constituent pas en soi un faciès d'usure, mais un troisième corps, ce sont les signes les plus évidents d'un type d'usure. [11]

7.1.2) Cratères d'usure :

Se sont des trous circulaires sur la surface qui apparaît lisse à l'œil nu.

Quel que soit le matériau le cratère a une dimension assez homogène. Leur diamètre moyen est de l'ordre de la centaine de micromètre et sa profondeur du dixième du diamètre.

Généralement sont observés sur pneumatique, sont associés à un faible taux d'usure.

Il n'existe actuellement aucun article traitant de ce faciès. [11]

7.1.3) Stries d'usure :

Sont des bandes parallèles à la direction de glissement. Leur largeur et hauteur varient du millimètre au micromètre, par contre leur longueur de la centaine de micromètre au centimètre, ces faciès sont associés à des conditions d'usure très sévères qui ne se rencontrent que dans des cas extrêmes.

Ces faciès ne font l'objet que de peu de publications.

7.1.4) Rides d'usure:

Se sont des faciès perpendiculairement à la direction de glissement, elles ont une forme dite « toit d'usine » ou « dent de scie ».

La partie la plus pentue s'oppose au glissement.

Les rides ont une longueur variant de la centaine de micromètre à plusieurs millimètres. Leur longueur de l'ordre de dix fois leur hauteur.

Les rides d'usure constituent l'essentiel des publications sur l'usure des élastomères

7.2) Principaux modes d'usure :

Pour étudier le phénomène d'usure des élastomères il faut d'abord rappeler les principaux modes observés sur les matériaux métallique ou non métallique.

En distingue plusieurs modes d'usure :

Par abrasive, érosion, cavitation, fatigue et délamination, soudage, corrosive et oxydative, fretting, et par adhésive-formation de rouleaux d'usure (figure III-6 et III-7).

Elle permettra d'introduire les notions de base utilisées en tribologie ainsi que les grandeurs importantes.

Elle fournira également des éléments de réflexion pour la présente étude.

7.2.1) Usure par érosion :

L'usure par érosion est causée par des impacts de particules solides ou liquides contre la surface d'un solide.

Ce mécanisme d'usure dépend des propriétés des matériaux présence, de l'angle d'impact, de la vitesse d'impact et de la taille de la particule.

L'érosion à faible angle d'incidence provoque un enlèvement de matière par la formation de copeaux.

Lorsque l'angle augmente, à faible vitesse, des impacts répétés peuvent provoquer une propagation lente de fissures dans le matériau.

Si la vitesse est plus importante des déformations plastiques apparaissent, le bourrelet ainsi formé est ensuite enlevé par l'impact d'autres particules.

Dans les mêmes conditions, en fonction de propriétés du matériau érodé, la fissuration peut engendrer l'enlèvement de matière.

A grande vitesse et grand angle d'incidence, la particule peut fusionner avec le matériau érodé.

Dans des cas extrêmes-comme la collision d'une météorite avec une planète-et pour des matériaux particuliers, la particule incidente fusionne même avec le solide érodé et provoque des projections de débris au voisinage de l'impact.

À l'échelle atomique, l'impact entre un atome et un atome d'un cristal peut provoquer l'enlèvement de ce dernier.

L'usure par érosion possède donc beaucoup de similitude avec l'usure abrasive.[11]

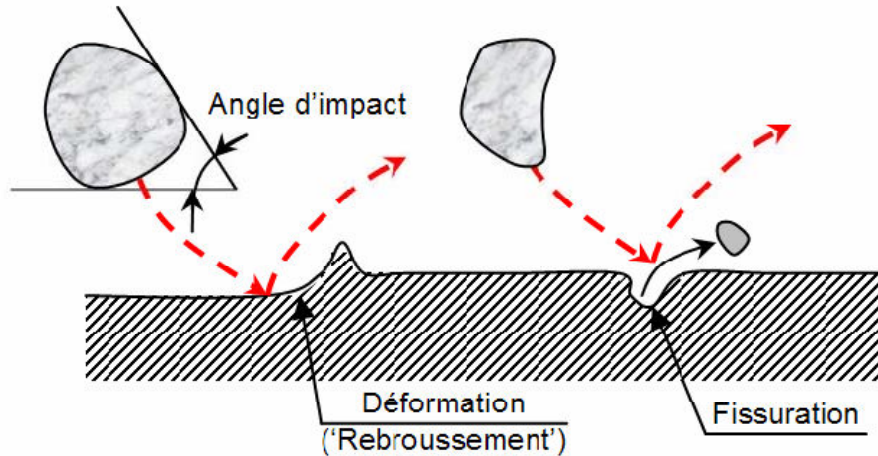


Figure II.10 : mécanisme d'usure érosive en présence d'un 3ème corps pour un impact unidirectionnel. [11]

7.2.2) 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. [11]

7.2.3) Usure par fatigue :

Le passage répété d'un solide sur des surfaces lisses ou rugueuses provoque la propagation de fissures par fatigue et, in fine, un arrachement de matière.

Les fissures s'initient au niveau de défauts dans le matériau.

Pour les métaux [suh1973] explique que les défauts initiateurs ne se situent pas en surface ou en extrême surface du matériau, car ils sont éliminés par l'action des efforts sur la surface.

Du plus, une couche d'oxyde aux propriétés mécaniques plus élevées protège la surface. Ainsi les fissures se propagent dans un premier temps en sous-couche pour remonter

ultérieurement à la surface et provoque l'enlèvement d'un débris (taille des débris de 1 à 5 μm) d'usure et de l'usure par délamination.

De type d'usure varie d'un part en fonction de conditions comme la force normale appliqué. La vitesse de glissement et autres paramètres relatifs aux conditions tribologiques.

Il est d'autres parts influencés par la géométrie de la surface (rugosités) et la résistance en fatigue de l'élastomère. [11]

Remarque :

L'usure par fatigue augmente lorsque la surface normale et le module d'Young de l'élastomère augmente alors qu'elle diminue si la contrainte limite à la rupture de celui-ci diminue.

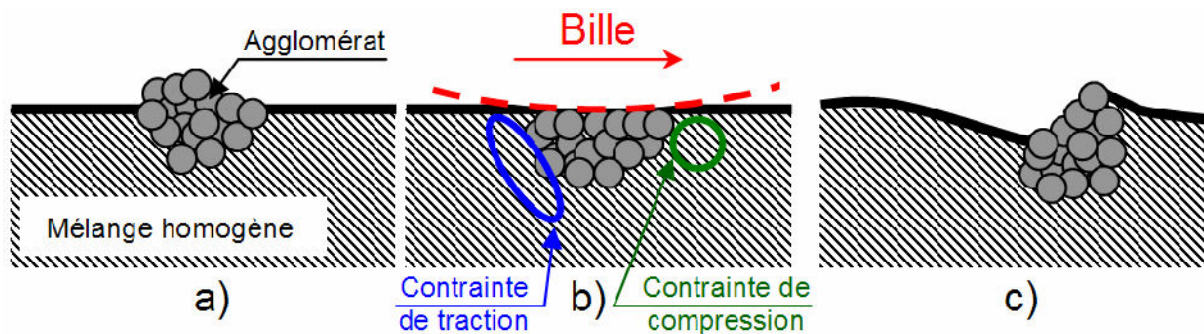


Figure II.11 : mécanisme de création de « cratères » à partir d'agglomérats. Agglomérat dans le mélange homogène avant le passage de l'indenteur(a)- déformation de l'agglomérat sous le passage de l'indenteur. Les déformations d'indentation et de rayage plastifient et changent la forme de l'agglomérat (b)- déformation de l'agglomérat et du mélange après le passage de l'indenteur. la relaxation des contraintes provoque un basculement de l'agglomerat en forme de cratère (c). [11]

7.2.4) Usure par adhésive –formation de rouleaux d'usure :

Si un élastomère glisse sur une surface de très faible rugosité et possède une faible résistance au cisaillement l'usure se présentera généralement sous la forme de rouleaux d'usure.

Ce mode d'usure correspond à une combinaison précise entre les propriétés de l'élastomère et les conditions tribologique et le rend très peu fréquent spécialement dans le cas de NBR chargés NDC qui possèdent une limite d'élasticité à rupture correcte.

Les forces de frottement à l'interface correspondent à une forte adhésion entre les deux solides, elles donnent lieu à de fortes déformations de l'élastomère au cours cisaillement provenant de glissement relatif des deux surfaces.

Une fois parvenue à la contrainte à la rupture de l'aspérité et/ou à une taille critique, une partie de l'élastomère, sous forme d'un rouleau, se sépare de la surface. (**figure II.12**) [11]

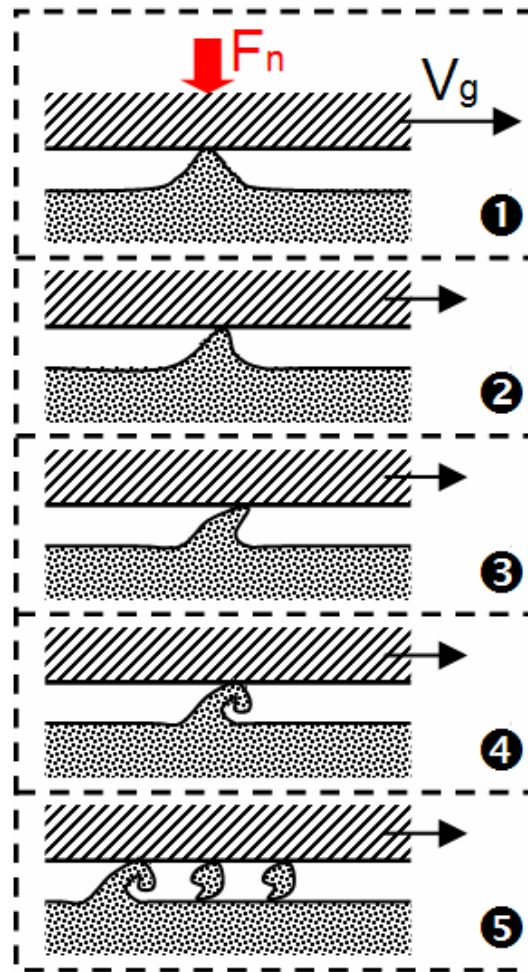


Figure II.12 : processus physique de frottement de rouleaux d'usure. [11]

7.2.5) Usure par abrasive :

Lors d'un glissement unidirectionnel [14] de la surface se présentant généralement sous forme de « rides » et pour condition sévères à des « stries » (**figure II.9 a et b**).

Celle-ci peut se faire également pour des conditions dites à « sec » (« dry abrasion ») ou en présence d'un liquide à l'interface donc « humide » (« wet abrasion »).

Lorsque l'un des deux solides présente une forte rugosité pour des conditions d'usure « abrasive » à sec et de faibles force de frottement, la surface de l'élastomère présente alors des interactions spécifiques qui rendent la surface « collante » (forte adhésion) et n'entraînent pas une usure importante de l'élastomère .cette usure est assimilée à une usure dite « douce » (« oil abrasion »)[Zhang, 1984]. [11]

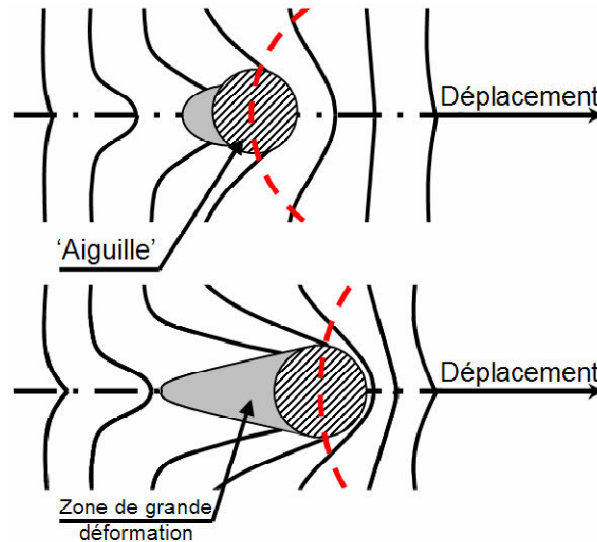


Figure II.13 : schéma des déformations et du cisaillement de la surface de l'élastomère par une « aiguille » [à « sec » (« dry abrasion »)].[11]

7.2.6) Usure par soudage :

Lorsque que deux solides sont en mouvement l'un par rapport à l'autre il se produit un échauffement dans le contact qui peut provoques des soudures locales entres les matériaux en présence et en cendrer de l'usure.

Ce mécanisme est l'expression la plus sévère de l'usure adhésive.

7.2.7) Usure par corrosive et oxydative :

L'usure corrosive et oxydative est due à l'effet de réactions chimiques entre usée et son milieu environnant.

7.2.8) Usure par fretting :

Le fretting est un mouvement oxillatoire la faible amplitude qui peut se produire entre deux surfaces en contact celui-ci engendre différents formes de dégradation pouvant conduire à la perte de fonctionnalité.

Le contact est souvent en glissement partiel, c'est-à-dire que les deux solides n'ont pas le mouvement relatif dans la partie centrale du contact, mais ils glissent sur un anneau en périphérie du contact.

Les cycles de sollicitation provoquent la fissuration des matériaux et la formation de débris qui peuvent accélérer l'usure lorsqu'ils restent confinés dans le contact. [11]

8) quelques paramètres influent sur l'usure :

8.1) Paramètres matériaux :

8.1.1) Propriétés mécaniques, effet de la température :

Les propriétés viscoélastiques des élastomères dépendent fortement de la fréquence et de la température de sollicitation.

Grosch et Schallamach montrent que pour obtenir un faible taux d'usure, il est nécessaire de se placer au voisinage de la température de transition vitreuse T_g .

8.1.2) Ajout de charges renforçant au mélange :

L'effet des charges renforçant à un élastomère non négligeables sur les propriétés mécaniques du mélange lorsque la dureté et la résistance à la rupture augmentées, la vitesse d'usure est fortement diminuée (NDC par exemple).

Remarque :

Il existait un taux critique de charges à partir duquel le taux d'usure augmentait considérablement.

8.2) Conditions expérimentales :

8.2.1) Charge appliquée :

Grosch et Schallamach ont trouvé la relation [14] :

$V = aP^n$ où a et n sont des fonctions de formulation de l'élastomère et la nature de la surface.

V : le volume par unité d'aire de contact et par unité de distance glisse.

P : la pression.

Cette relation valable qu'à faible charge.

8.2.2) Composition de l'atmosphère :

La composition de l'atmosphère influence l'usure des élastomères charges.

8.2.3) Lubrification :

La formation principale d'un lubrifiant est de diminuer la vitesse d'abrasion on facilitant le glissement entre les deux surfaces.

Il permet part ailleurs de refroidis le système en absorbant les calories.

Il sert de protection contre l'oxydation.

Il permet d'évacuer les particules d'usure créées. Il peut prendre les formes : liquide (huile), solide (graphite).....En générale l'épaisseur du film de lubrifiant est relativement importante (supérieure aux dimensions des aspérités, pour éviter les interactions entre aspérités).

9. Conclusion

Nous venons de présenté d'une manière brève les notions générales d'usure des élastomères.

De même, ce chapitre on a donné une vue claire sur l'usure des élastomères. Aussi, il est évoqué l'effet de ce phénomène et sa manifestation aux surfaces des caoutchoucs.

les différentes modes d'usures (facies) sont directement liées aux paramètres tribologiques fixés aux cours des essais. Les paramètres qui influent sur le phénomène d'usure, à étudier, sont :

- Effort de pression au contact
- Vitesse de glissement au contact
- Lubrification de contact (coefficient de frottement)
- Rugosité de la surface de contact
- La distance parcourue
- Le taux de charge dans l'élastomère

Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les étapes suivies pour l'élaboration des échantillons (pions et disques), les moyens expérimentaux utilisés tels que le tribomètre, la chaîne d'acquisition, le rugosimètre et le capteur....

Le présent travail a pour objectif d'étudier l'influence de la vitesse de glissement et de l'effort normal de contact la rugosité la distance parcouru et la puissance de glissement sur le comportement à l'usure du couple acier XC48 traiter (HV579) et l'élastomère en suite les résultats des expériences seront présentés en dernier sous forme de graphique.

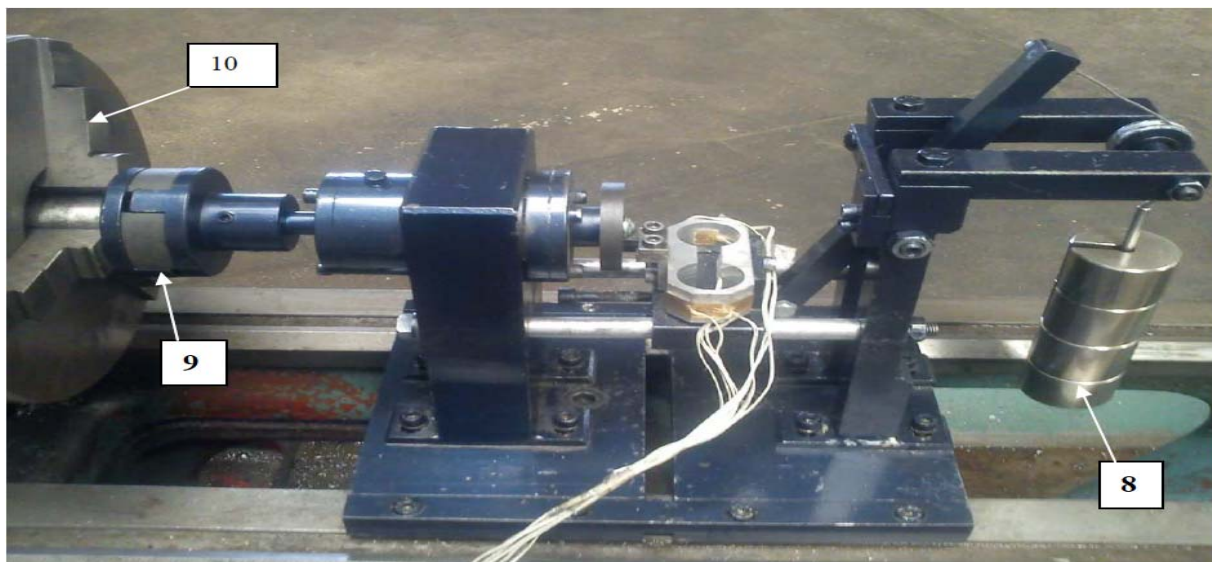
Partie A : dispositif et moyenne utilise

1. Procédure expérimentale

1.1. Dispositif expérimental

Les essais tribologiques ont été effectués sur un tribomètre (pion/disque) (figureIII.1).

Ce dispositif nous permet d'étudier l'usure des matériaux, il mesure les efforts normal et tangentiel. La détermination du coefficient de frottement, du taux d'usure et de la perte de masse pour un couple de matériaux donne se fait après dépouillement des résultats des mesures par le biais du tableur Excel.



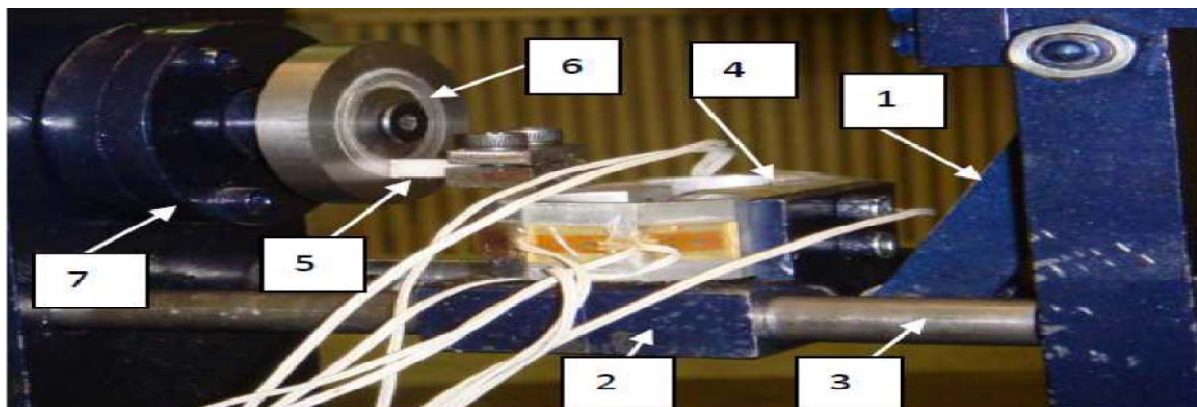


Figure III.1 : vue du tribomètre (pion/disque)

1.2. Nomenclature du banc

1-levier, 2-support du capteur, 3-glissière, 4-capteur, 5-pion (éprouvette), 6- disque (éprouvette), 8-masses, 9-accouplement élastique, 10- mandrin du tour.

1.3. Principe de fonctionnement

Le dispositif, se monte sur les glissières d'un tour. Le mouvement de rotation est transmis au disque (6) via un accouplement élastique(9). L'effort normal est appliqué en continu pendant le processus de frottement entre le pion (5) et le disque (6) grâce au levier (1) sur lequel on monte les masses mortes (8).

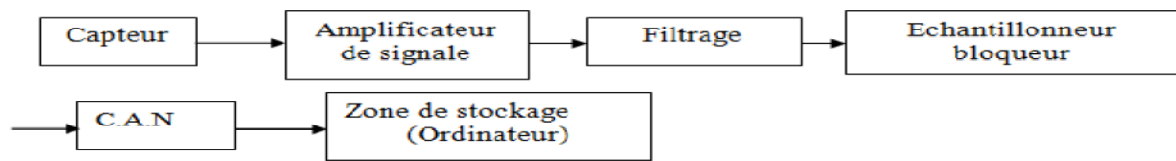
La force tangentielle F_t induite par le contact (pion /disque) et l'effort normal F_N sont mesurés en temps réel et simultanément par le capteur de force (4) qui est relié à une chaîne d'acquisition qui traite et enregistre les données.

2. Chaîne d'acquisition



Figure III.2 : Chaîne d'acquisition

Une chaîne d'acquisition numérique peut se représenter par la figure suivante :



- Amplificateur du signal : cette étape permet d'adapter le niveau du signal issu du capteur à la chaîne globale d'acquisition.
- Filtre d'entrée : ce filtre est communément appelé filtre anti-repliement. Ainsi il élimine les parasites. C'est un filtre passe bas que l'on caractérise par sa fréquence de coupure et son ordre.
- L'échantillonneur bloqueur : son rôle est de prélever à chaque période d'échantillonnage (T_e) la valeur du signal. On l'associe de manière quasi-systématique d'un bloqueur. Le bloqueur va figer l'échantillon pendant le temps nécessaire à la conversion. Ainsi dans la phase de numérisation, la valeur de la tension de l'échantillon reste constante assurant une conversion aussi juste que possible.
- Le convertisseur analogique numérique (CAN) : il transforme la tension de l'échantillon (analogique) en un code binaire (numérique).
- La zone de stockage : elle peut être un support de traitement (ordinateur), un élément de sauvegarde (RAM, disque dur).

La chaîne d'acquisition utilisée dans notre étude est de type **COTROLS** représentée dans la figure III.2 dont les caractéristiques sont les suivantes :

Un clavier de 16 boutons.

Un port série RS232 pour la communication des données à une unité de traitement et de stockage.

Port série RS484/CAN.

(8) canaux indépendants possédant chaque un six connecteurs femelles, pour la connexion du transducteur et délivrant une tension d'alimentation de 2V.

A l'aide de deux connecteurs, on branche les deux ponts du capteur aux deux canaux.

On procède à l'étalonnage du capteur, et on connecte la chaîne à un ordinateur pour enregistrer et traiter les données en utilisant une connexion hyper terminal.

3. Description du capteur de force

Pour capter les deux forces normale et tangentielle due aux frottements simultanément et sans interférence nous nous sommes inspirés du capteur utilisé par une entreprise américaine .Pour mesuré les efforts d'un outil de coupe.

Le détail de montage des jauges de contraintes sur l'élément capteur (4) fixé sur le coulisseau(2) et guidé à l'aide des glissières(3) est visible sur la (figure III.3).

Les jauges J1, J2, J3 et J4 arrangées en pont complet de Wheatstone permettent de mesurer l'effort normal et les jauges J5, J6, J7 et J8 arrangées aussi en pont complet de Wheatstone permettent de mesurer l'effort tangential. La compensation en température des deux ponts est donc ainsi assurée, la variation des résistances des jauges sous l'effet de la température s'annule directement dans le circuit du pont. Le signal de sortie du pont représentera donc l'effort appliqué sur le pion.

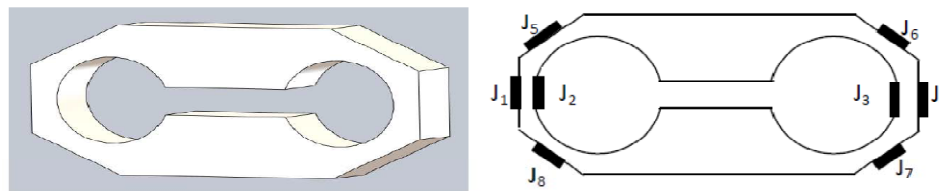


Figure III. 3 : Corps d'épreuve du capteur et les zones d'emplacement des jauges

4. Identification des matériaux utilisés

4.1. Matériau des disques

Nous avons utilisé l'acier XC48 qui est un acier de construction mécanique non allié pour traitement thermique défini essentiellement par sa composition chimique (0.45 à 0.51% de carbone), du manganèse, du silicium, du soufre et du phosphore Norme NFA356554 . Il est largement utilisé dans la fabrication des bielles, essieux, tiges de piston, vilebrequins, arbres moyeux, galets des ponts roulants, ...etc. Il est employé lorsque les caractéristiques mécaniques demandées sont sévères et nécessitent des transformations de structure par traitements thermiques.

4.2. Matériaux des pions

4.2.1. Généralités sur les pneumatiques

4.2.1 Fonction du pneu

Excepté les forces aérodynamiques, toutes les forces de contrôle et de perturbations agissant sur le véhicule passent par les contacts roue-sol.

Le pneu a essentiellement 3 fonctions:

- Supporter la charge verticale tout en assurant un premier amortissement des sollicitations venant de la route
- Assurer la transmission des couples d'accélération et de freinage
- Développer des forces latérales permettant de tourner [12]

4.2.2 Différent technologies de Pneus

Il existe actuellement deux technologies de pneus (figure III.4), le pneu à architecture diagonale et le pneu à architecture radiale. Le pneu de type radial breveté en 1946 par Michelin et le standard d'aujourd'hui. Le pneu de type diagonal a tendance à surchauffer avec la vitesse et a une tenue latérale médiocre (forts glissements latéraux et usure rapide sur routes sinueuses). Le pneu de type radial permet une surface de contact avec le sol maximum en permanence, un échauffement limité et un confort accru. C'est ce type de pneu que nous considérerons dans ce qui suit. [12]



FIG.III.4. Les principales architecture du pneumatique (à gauche diagonal, à droite radial)
[12]

4.2.3 Architecture d'un pneu radial

Simple en apparence, le pneu radial s'avère d'une architecture complexe. En effet, « un pneu est une structure composite, c'est-à-dire un assemblage solidaire de matériaux aux propriétés très diverses » devant assurer une structure souple est rigide à la fois.

La figure III.5 montre les principaux composants d'un pneu [13]

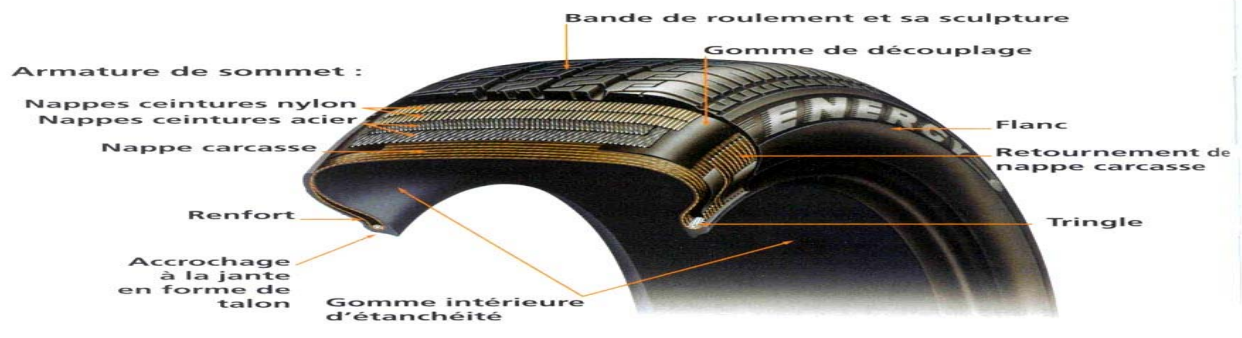


FIG.III.5. architecture d'un pneu radial [13]

4.2.3.1 La bande de roulement et sa sculpture

La bande de roulement, superposée aux nappes sommet, est la zone du pneu qui contient les sculptures. Puisqu'elle est en contact avec le sol, la bande de roulement doit garantir un faible échauffement, une bonne résistance à l'usure et à l'abrasion, une bonne adhérence dans diverses conditions climatiques ou de sols. Il s'agit d'un caoutchouc synthétique dans le cas des pneus de voiture de tourisme.

Les larges et profondes sculptures sont là pour évacuer l'eau et éviter le phénomène d'aquaplanage. Ce phénomène, qu'il ne faut pas confondre avec le dérapage, se produit à grande vitesse lorsque la pression spécifique au sol ne suffit plus pour enfoncer la couche d'eau ; le pneu plane alors sur l'eau comme un bateau ou une planche à voile qui déjauge. Etant donné que les roues arrière suivent le sillage dégagé par les roues avant, l'aquaplaning se produit à l'avant. [13]

C'est pourquoi il est préférable de monter les pneus les moins usés à l'avant.

4.2.3.2 Gomme intérieur d'étanchéité

Cette enveloppe étanche fait office de chambre à air.

4.2.3.3 La nappe carcasse

Située entre la gomme intérieure et le sommet, la nappe carcasse permet au pneu de résister à la pression interne. Les matériaux de renfort utilisés pour la carcasse incluent également des fibres textiles comme le polyester.

4.2.3.4 Les tringles

Faites d'un acier à haute résistance en tension, les tringles servent à serrer le pneu sur la jante

4.2.3.5 Les flancs

Sur les flancs, une couche de caoutchouc souple protège le pneu des chocs que peut subir le pneu (trottoirs par exemple)

4.2.3.6 Les nappes de ceinture acier

Les nappes de sommet sont généralement constituées de « couches de câbles d'acier orientées les unes par rapport aux autres selon un angle de 20° environ ». Le croisement des fils avec ceux de la carcasse créent des triangles indéformables permettant de rigidifier le sommet. Les nappes doivent être rigides aussi bien dans le sens circonférentiel du pneu pour ne pas s'étirer sous l'effet de la centrifugation que dans le sens transversal pour résister aux efforts de dérive.

Elles empêchent ainsi la déformation de la bande de roulement en la rendant plus rigide. Elles doivent également être souples dans les sens vertical pour absorber les déformations de la chaussée.

4.2.3.7 Les nappes de ceinture nylon

« Ces nappes permettent de conserver un profil stable sous l'effet de la vitesse et ainsi, de réduire les échauffements ». Il s'agit de nappes armées de câbles en nylon, sous forme de fil unitaire ou de bande de tissu inextensible perpendiculaire à la nappe carcasse.

Le nylon est généralement utilisé pour les nappes de ceinture puisqu'il se contracte lorsqu'il est chaud, assurant ainsi l'intégrité des ceintures du pneu.

4.2.4. Marquage d'un pneu

Le marquage du pneu correspond aux indications inscrites sur le flanc du pneu. On y retrouve diverses indications comme la largeur du pneu, la structure, l'indice de performance, l'indice de charge, l'indice de vitesse, etc... [13]

A titre d'exemple, prenons un pneu sur lequel est inscrite l'indication : **215/55 R 16 93** (**figure III.6**). Cette notation correspond au marquage légal standardisé.

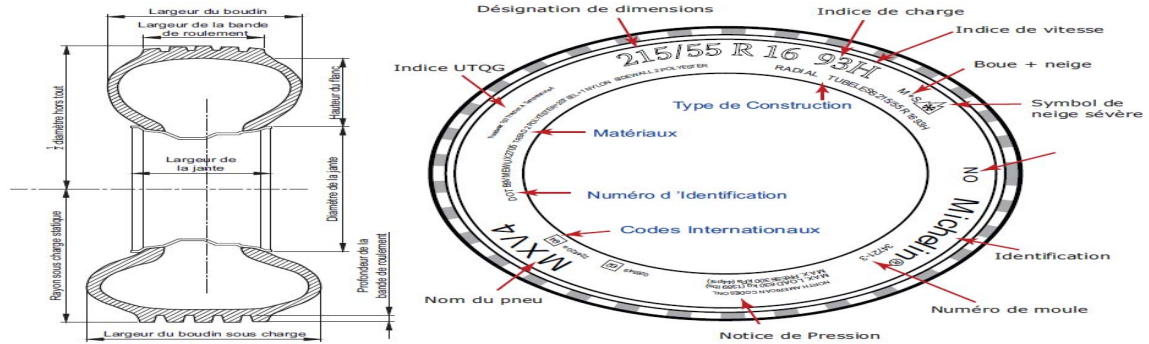


FIG.III.6. Marquage d'un pneu [13]

Les différents chiffres et lettres font référence aux informations suivantes :

215 : largeur nominale du pneu en mm

55 : Rapport de section H/L : le rapport entre la hauteur et la largeur de section du pneu; la hauteur de ce pneu équivaut à 55 % de sa largeur.

R : Type de construction : indique le type de construction de la carcasse du pneu. "R" indique un pneu de type radial. "B" signifierait un pneu de type diagonal ceinturé. "D" indiquerait un pneu de type diagonal.

16 : diamètre de la jante (en pouces)

93 : indice de charge (cf. annexe 1)

H : indice de vitesse maximale (cf. annexe 1)

4.2.5. Matériaux constitutifs d'un pneu

Un pneu est un assemblage de près de deux cent matériaux. Les propriétés de chacun de ces matériaux influent sur le comportement et les performances du pneu. Le choix de ces matériaux dépend de la composante du pneu où le matériau sera utilisé, de l'utilisation souhaitée du pneu et varie selon le fabricant. [13]

Le pneu est constitué principalement de caoutchouc. Sa constitution varie peu entre les pneus tourisme et poids lourd (tableau III.1).

Matériaux	Pneu Tourisme	Pneu Poids lourd
Elastomère	47 %	43 %
Noir de carbone	21,5 %	21 %
Acier	16,5 %	27 %
Textile	5,5 %	0%
Oxyde de zinc	1%	2 %
Soufre	1%	1%
Autres	7,5 %	6 %

Tableau III.1 – Constitution moyenne des pneus [13]

5. Présentation des couples tribologiques

5.1. Les disques

5.1.1. Géométrie des disques

Les disques (figure III.7), de diamètre 60 mm et d'épaisseur 8mm, il possède un trou au centre, ce dernier permet la fixation du disque à l'aide d'une vis sur le support du tribomètre, ont été réalisés en tournage à partir des barres rondes laminées à chaud et recuit en XC48, avec les mêmes paramètres d'usinage.

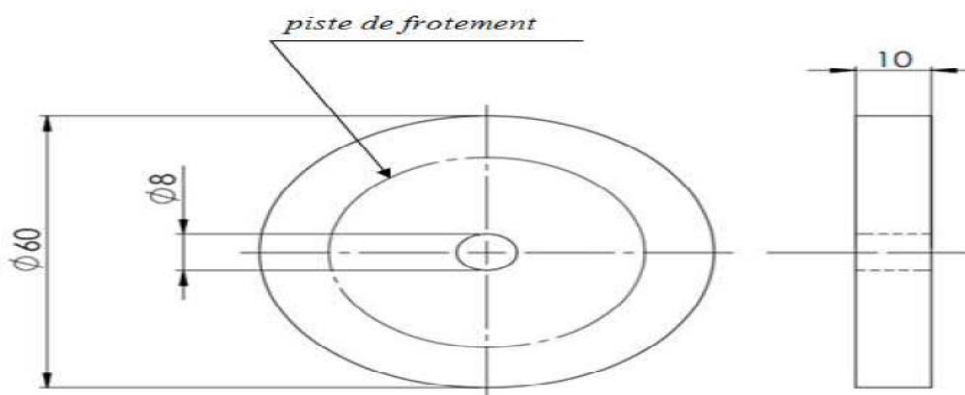


Figure III.7 : Géométrie du disque

5.2. Les pions

Les pions (Figure III.8) obtenus à partir des dents du pneu d'un tracteur coupe à l'aide d'une scie manuel sous forme de morceaux de géométrie déformée puis a l'aide d'un quôteur on obtient la forme des pions de section carrée 6x6 mm² et de longueur 11mm.



Figure III.8 l'origine et géométrie des pions

6. Traitement thermique

6.1. Introduction

Techniquement, un traitement thermique est défini par la variation de la température du métal en fonction du temps.

D'une façon générale, les traitements thermiques ne modifient pas la composition Chimique de l'alliage, mais ils permettent de modifier (en général améliorer) les caractéristiques des matériaux suivantes :

- . Résistance à l'usure.
- . Résistance à la corrosion.
- . Résistances mécaniques, telles que la dureté (H), la résistance à la traction (R_m), la résilience (K) et l'élasticité $A\%$.

De très nombreux alliages métalliques peuvent subir des traitements thermiques, les aciers représentent le domaine d'application le plus vaste.

6.2. 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.

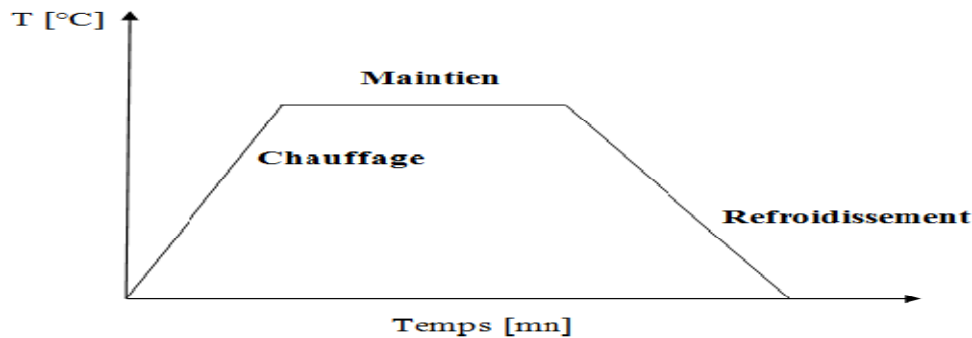


Figure III.9 : Cycle d'un traitement thermique

6.3. Traitements thermiques appliqués

Les traitements thermiques ont été réalisés au laboratoire de sciences des matériaux du département de génie mécanique

.

6.3.1. Trempe

Le rôle d'une trempe est généralement, à l'inverse des recuits, de permettre d'obtenir des structures hors d'équilibre dans les conditions où on les rencontre, à l'échelle aussi bien cristalline que micrographique.

La trempe est utilisée pour augmenter la dureté, la résistance à la rupture mais diminue la résilience et l'allongement.

On a mis les échantillons dans un four électrique (figure III.11) de puissance 11 kw dont la température maximale est 1200°C. Le mécanisme de la trempe est comme suit :

- Les disques ont été chauffés à une température de 850°C.
- maintient à cette température pendant une heure et trente minutes (1h30) pour permettre la dissolution des carbures
- refroidissement rapide dans l'eau froide.



Figure III.11: four électrique

6.3.2. Le revenu

Un revenu a pour rôle essentiel de faire évoluer une structure hors d'équilibre, obtenue par trempe, vers un état proche de l'équilibre.

Le revenu s'effectue à température modérée inférieure à la température de trempe et à celle de recuit, pendant des durées limitées.

Le processus opératoire du revenu est le suivant :

- Chauffage à une température de 250°C.
- maintien à cette température pendant quarante minutes (40mn).
- refroidissement à l'air ambiant.

7. Examen métallographique

7.1. Introduction

L'examen métallographique a pour but de mettre en évidence les constituants des produits métallurgiques (métaux purs, combinaisons, solutions solides, eutectiques et eutectoïdes) de la structure de l'échantillon.

7.2. Déroulement de l'essai

La procédure commence tout d'abord par polir la surface qu'on veut observer et la rendre parfaitement plane que possible. Ensuite on utilise des papiers abrasifs de plus en plus fins. On ne cesse d'utiliser l'un d'eux que lorsque les stries provenant du papier précédent ont disparu. La pièce est lavée de façon à ne laisser aucune trace. Il faut obtenir une surface polie analogue à celui d'un miroir. Pour cela on utilise des tourets commandant des feutres. Ces feutres sont recouverts d'un abrasif très fin constitué par de l'alumine Al_2O_3 en suspension dans l'eau.

L'échantillon poli est observé au microscope afin de se rendre compte du fini du polissage.

On passe après à l'attaque chimique des échantillons. Elle se fait à l'aide de réactifs appropriés qui permettent de différencier les constituants. Le réactif chimique utilisé pour nos échantillons est le nital qui est une solution composée de l'acide nitrique dans l'alcool éthylique (4ml d'acide nitrique avec 100 ml d'éthanol), on injecte sur la surface poli cette solution, un temps de maintien de 2 à 5 seconds suivi d'une opération de nettoyage à l'eau et d'un séchage par flux d'air sur la surface traitée.

L'examen micrographique a été fait à l'aide d'un microscope métallographique de type « OLYMPIS PME3 », équipé d'un système de prise de photos, qui permet l'observation des échantillons, avec un grossissement pouvant atteindre 400 fois. Nous avons pris des micrographies des échantillons avant et après les traitements thermiques.

7.3. Observation microscopique de l'acier XC48 avant traitement thermique

7.4. Microscopie Optique

L'observation métallographique sur les surfaces préparées des échantillons calorisés, a été réalisée à l'aide d'un microscope optique.

L'échantillon est posé sur la platine qui peut se déplacer dans trois directions. La lumière fournie par la lampe est transmise horizontalement sur le prisme qui la réfléchit verticalement. Le faisceau de lumière est focalisé sur l'échantillon par la lentille de l'objectif.

La lumière est réfléchiée par la surface du métal à analyser et transmise vers le haut à partir des mêmes lentilles et tombe sur un miroir semi transparent qui la renvoie par la suite sur la lentille oculaire. De cette façon, l'image agrandie peut être visualisée. La figure III.12 illustre le microscope optique utilisé dans notre travail.

01	Emplacement de la camera
02	Lampe pour observation par réflexion
03	Bouton de mise au point de l'image
04	Bouton pour déplacement longitudinal de l'échantillon
05	Bouton pour déplacement transversal d l'échantillon
06	Potentiomètre de réglage de l'intensité de lumière
07	Oculaires avec des agrandissements de 10 fois
08	Porte objectifs
09	Objectifs de grandissements
10	Porte échantillon
11	Platine
12	Lampe pour utilisation de transmission

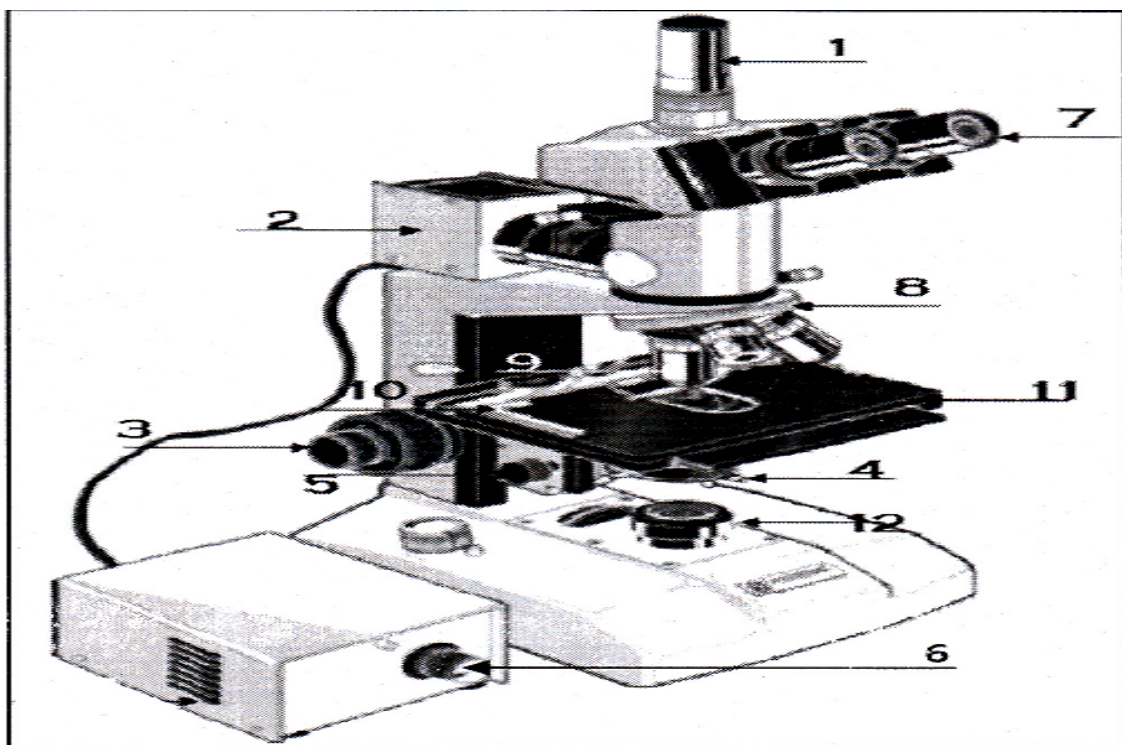
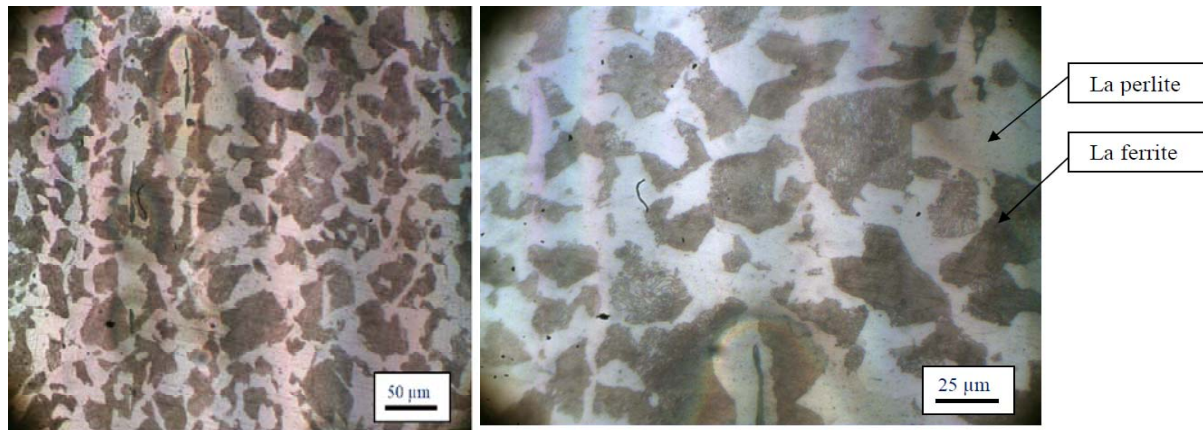


Figure III.12: Microscope Optique (MO).



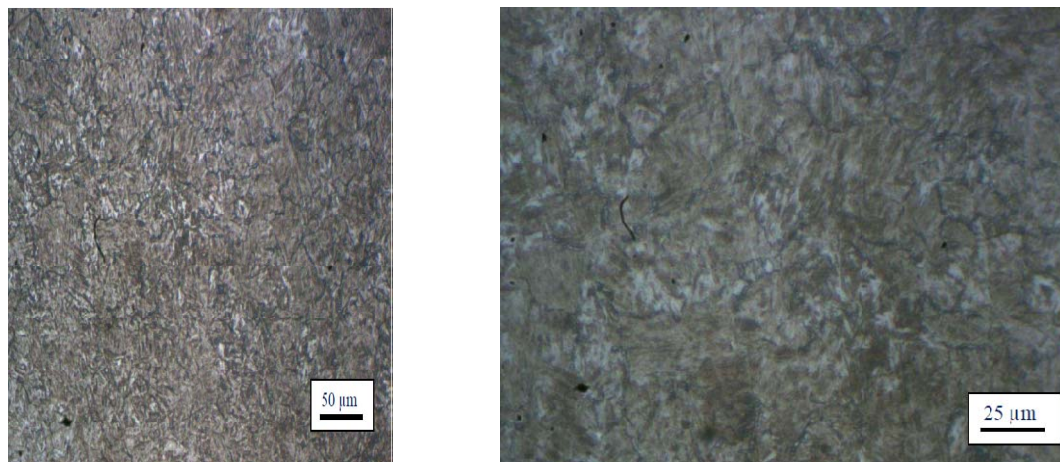
Grossissement x200

Grossissement x400

Figure III.13 : Micrographie de l'acier XC48 à l'état recuit

L'analyse a montré que la structure est cellulaire de la ferrite et de la perlite lamellaire avec une grande proportion volumique de la perlite, les grains ferritiques se trouvent au niveau des joints du grain perlitique, c'est une structure qui a subi un recuit de normalisation.

7.5. Observation microscopique de l'acier XC48 après traitement thermique



Grossissement x 200

Grossissement x400

Figure III.14 : Micrographie de l'acier XC48 après traitement thermique

La micrographie de l'acier XC48 après trempe et revenu montre que la structure générale est composée essentiellement de martensite fine et de grains fins de cémentite

8. Essai de dureté

8.1. Introduction

La dureté d'un matériau caractérise sa résistance à la pénétration : un pénétrateur de géométrie connue est appliqué sur la surface du matériau à tester avec une force connue pendant un temps donné. Plus l'empreinte laissée est petite, plus le matériau est dur. Bien que la dureté ne soit pas une propriété simple à définir, les essais de dureté sont très utilisés en raison de leur simplicité et de leur caractère peu destructif.

Leur résultat donne un aperçu synthétique des propriétés mécaniques du matériau testé.

8.2. Déroulement des essais

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

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

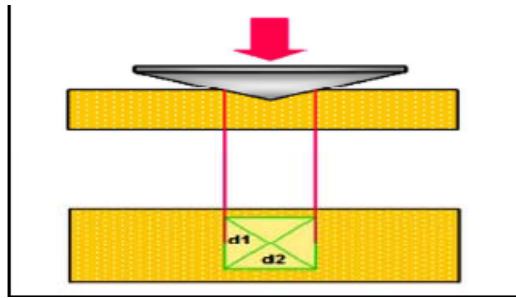
- la première est la partie d'essai nous permet d'effectuer l'essai de type VICKERS qui consiste à appliquer une charge de (588 N) sur un pénétrateur en forme de pyramide à base carrée.
- la deuxième partie qui nous permet de mesurer l'empreinte de la pyramide avec un agrandissement de 70 fois sur l'écran de verre dépoli.



Figure III.15 : duromètres de type « WOPERT DIA TESTOR RC »

Nous avons réalisé les essais de dureté Vickers(HV) pour des échantillons de l'acier XC48 sous les deux états de la matière .une filiation de cinq mesures de dureté pour chaque état a été réalisée .la valeur moyenne est ensuite calculée.

La formule qui nous permet de calculer la dureté (HV) est la suivante :



$$H_v = 0.189 * F/D^2$$

Avec :

F : la charge appliquée (588N)

D : diagonale (moyenne de d1 et d2) de l'empreinte en mm

Le tableau suivant résume les valeurs trouvées.

Essais	1	2	3	4	5	moyenne
Etat recuit	192,55	214,37	182,66	178,06	214,37	196,40
T+R250°C	574,03	630	548,8	584,8	525,19	579,76

Tableau III.2 : Résultats des essais de dureté Vickers (Hv) de l'acier XC48 à différents états

9. Mesure de l'état de surface des disques

Avant de réaliser les essais tribologiques, les paramètres de rugosité des disques ont été mesurés à l'aide d'un appareil **Mitu Toyo SJ.201** (figure III.16) qui est un rugosimètre à palpeur, qui délivre à partir de l'exploration suivant une ligne de contact.

Avant de commencer les mesures on doit étalonner l'appareil, on mesure la rugosité d'une pièce de référence (étalon de rugosité) et on règle la différence potentielle entre la valeur mesurée et la valeur de référence.

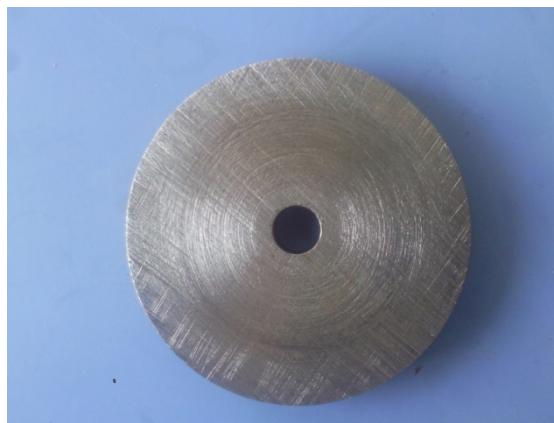
L'opération de mesure se fait à l'aide d'un palpeur (stylet) installé sur l'unité de détection (échenillant) qui se déplace sur une distance choisit dans un intervalle de 0,25 à 12,5 mm qui permet de détecter les irrégularités infime présente sur la surface de la pièce, les résultats sont affichés sur l'écran de l'unité d'affichage.



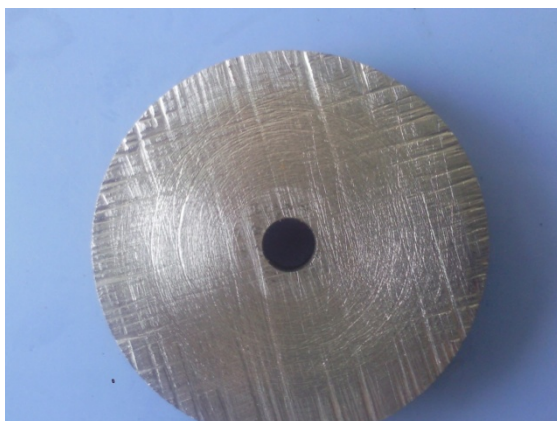
Figure III.16 : rugosimètre a palpeur



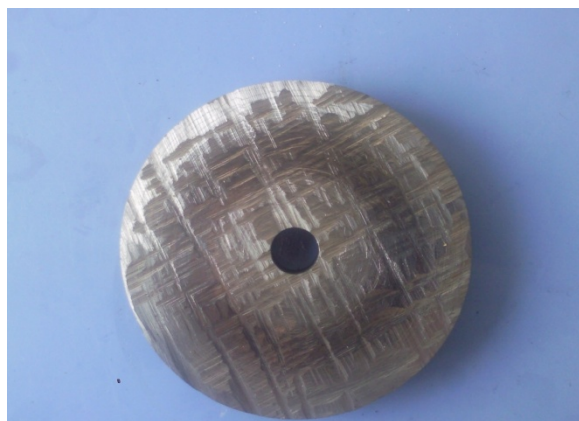
Le 1^{er} disque avec un état lisse d'une rugosité 2,18 micromètre



Le 2^{ème} disque obtenu avec la lime d'une rugosité 6,03



Le 3^{ème} disque obtenu avec la scie ton manuel d'une rugosité 7,63



Le 4^{ème} disque obtenu avec une transennes d'une rugosité 9,57

Figure III.17.État de surface des disques

Partie B. résultats et discussions

1. Mode opératoire

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

Pour chacune des compositions, nous avons effectué des essais d'usure à trois vitesses de glissement (0.037, 0.52 et 0.74 m/s) et trois efforts normaux (5,645, 11, 29 et 16,935N).

Avant chaque essai, les échantillons (pions et disques) sont nettoyés à l'acétone puis séchés et un contrôle de rugosité est effectué.

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 III.18) dotée d'une précision de 10^{-4} g.



Figure III.18 : balance électronique

2. Résultats et discussions des essais tribologiques

2.1. Résultats

2.1.1. Etude d'Évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue

1^{er} disque

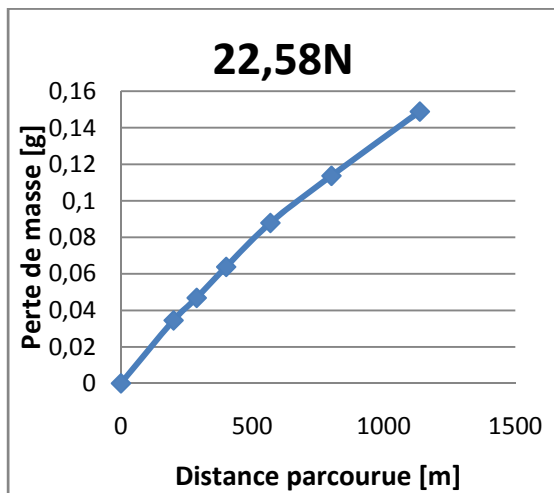


Figure III.19: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la charge normale de 22,58N

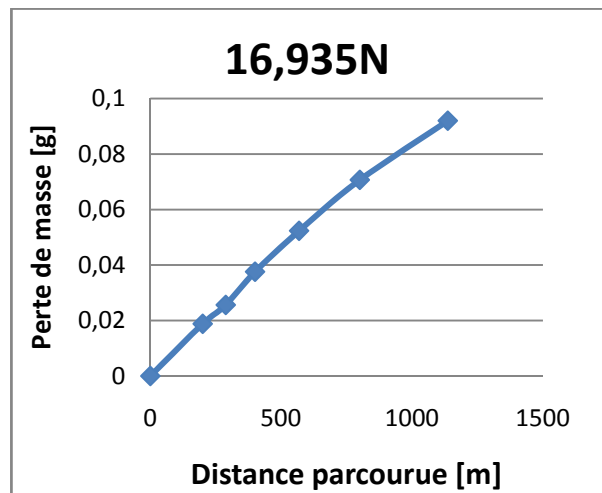


Figure III.20: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la normale de 16,935N

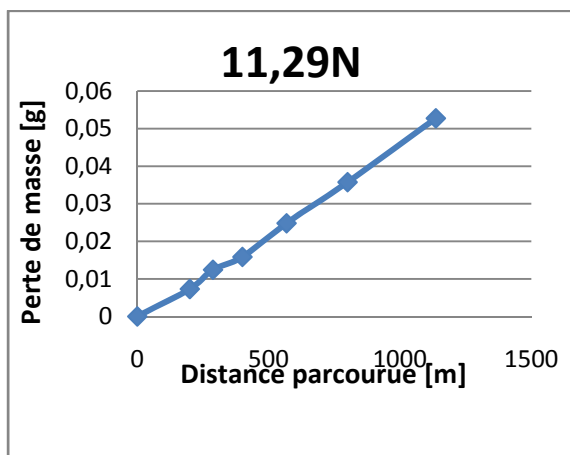


Figure III.21 : évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la charge normale de 11,29N

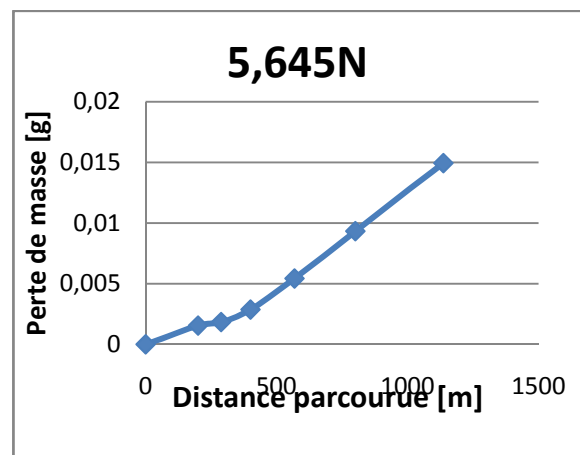


Figure III.22 évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la charge normale de 5,645N

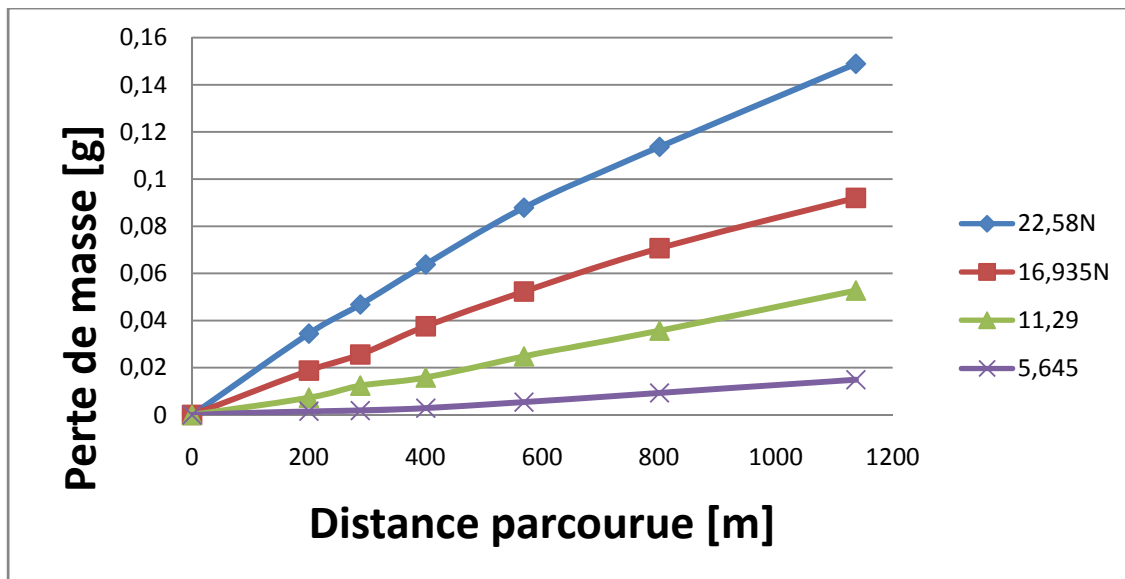


Figure III.23 évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour les charges normales de 22,58, 16,935, 11,29, 5,645N

2^{ème} disque

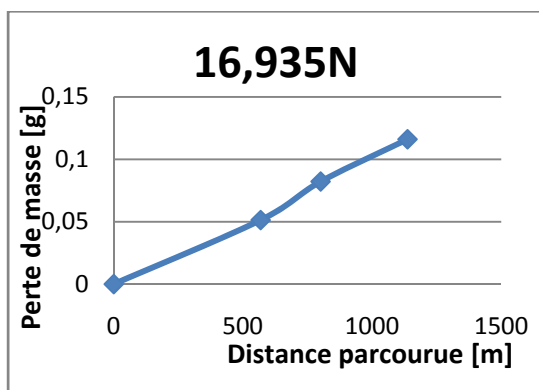


Figure III.24: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la charge normale de 16,935N

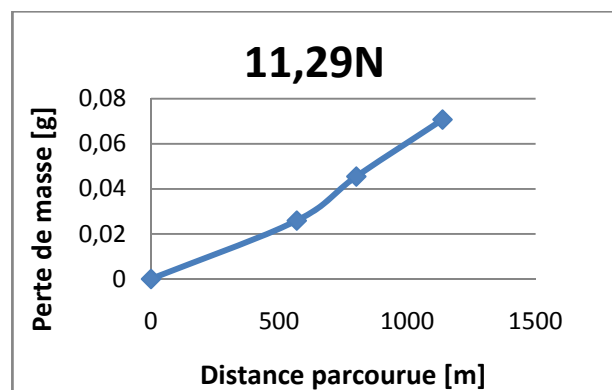


Figure III.25: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la charge normale de 11,29N

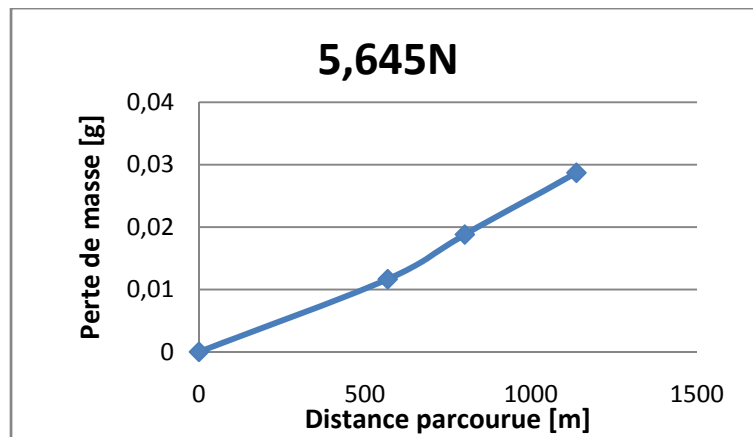


Figure III.26: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la charge normale de 5,645N

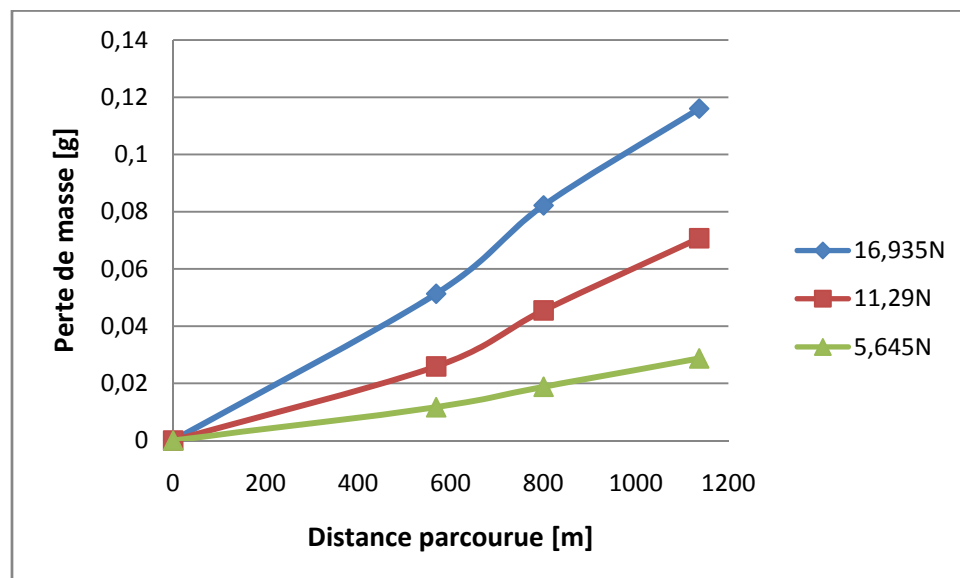


Figure III.27: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour les charges normales de 16,935, 11,29, 5,645N

3^{ème} disque

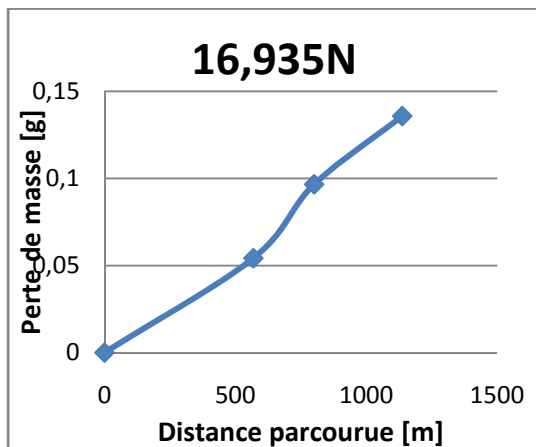


Figure III.28: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la charge normale de 16,935N

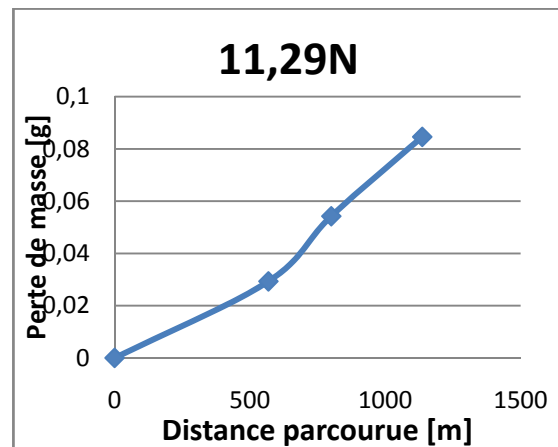


Figure III.29: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la charge normale de 11,29N

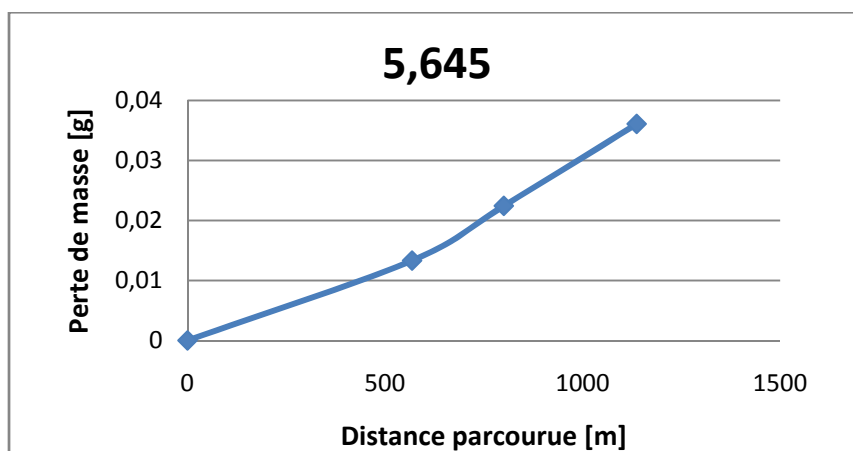


Figure III.30: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la charge normale de 5,645N

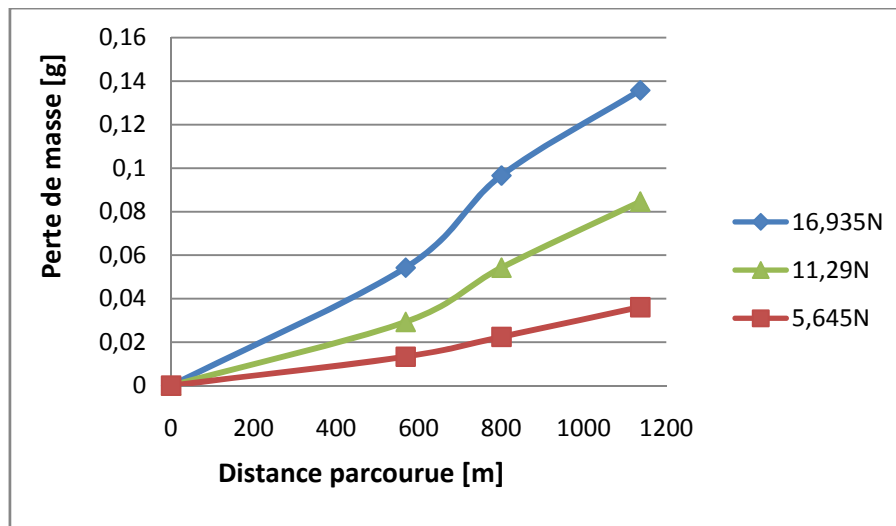


Figure III.31: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour les charges normales de 16,935, 11,29, 5,645N

4^{eme} disque

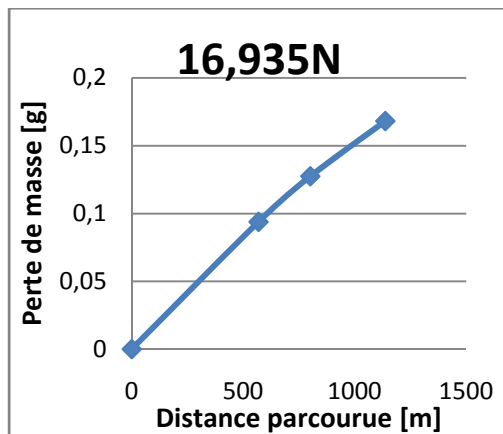


Figure III.33: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la charge normale de 16,935N

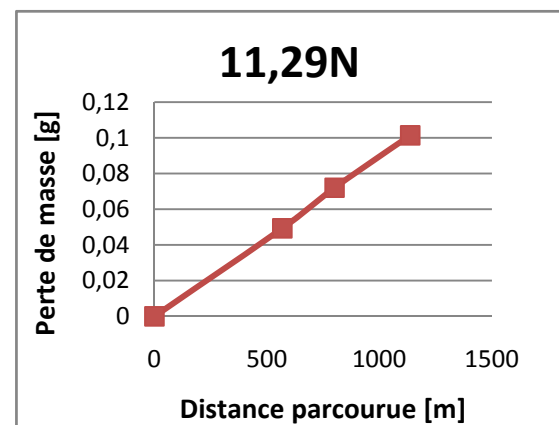


Figure III.32: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la charge normale de 11,29N

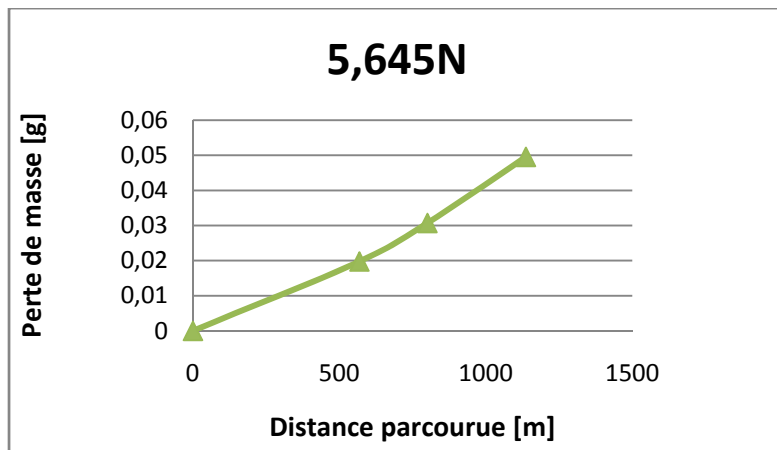


Figure III.33: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la charge normale de 5,645N

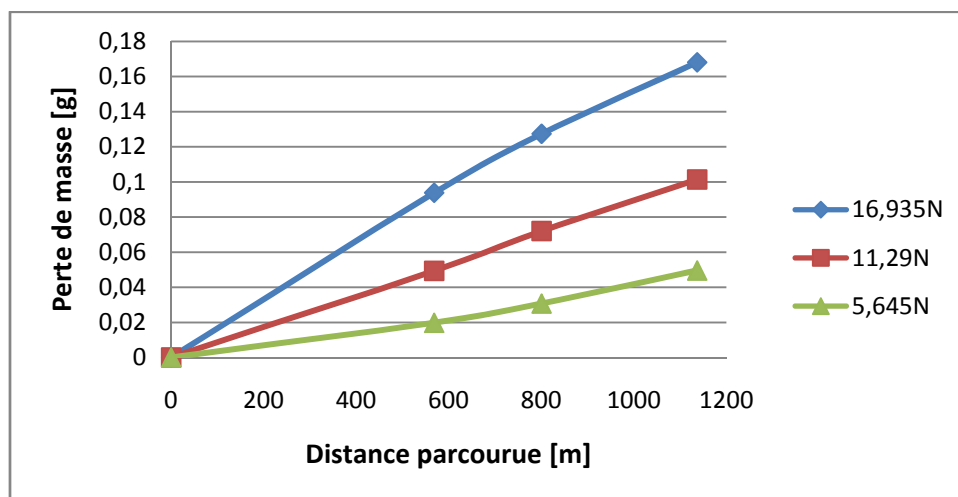


Figure III.34: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour les charges normales de 16,935, 11,29, 5,645N

2.1.2. Etude d'Évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale

1^{er} disque

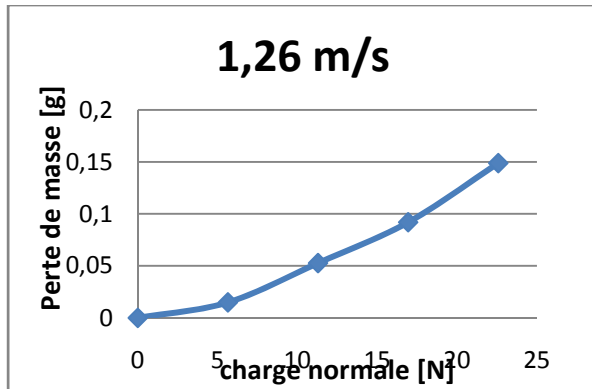


Figure III.35: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 1,26 m/s

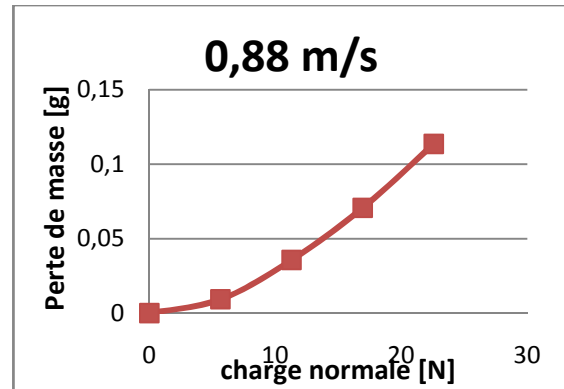


Figure III.36: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 0,88 m/s

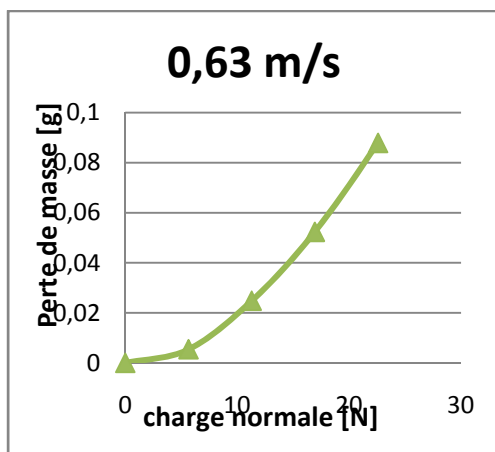


Figure III.37: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 0,63 m/s

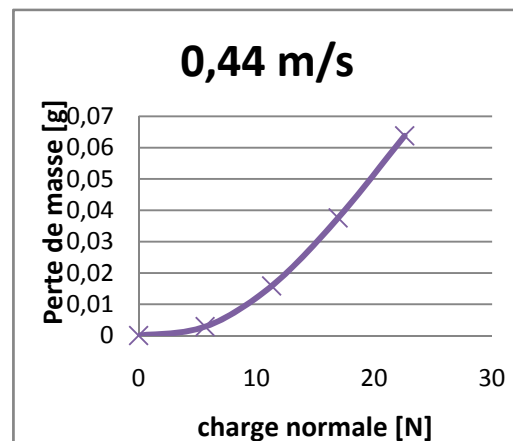


Figure III.38: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 0,44 m/s

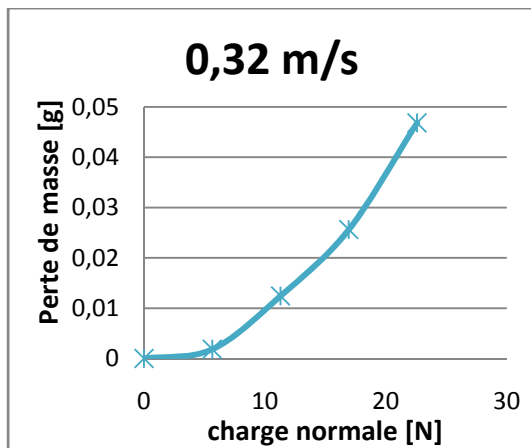


Figure III.39: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 0,32 m/s

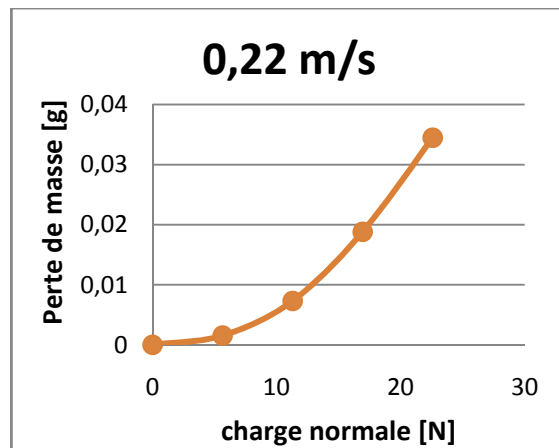


Figure III.40: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 0,22 m/s

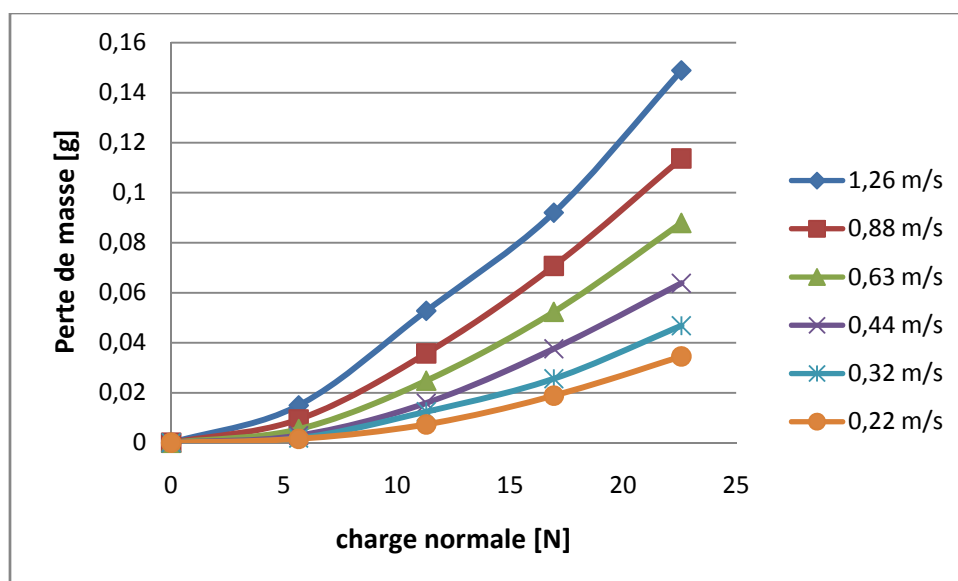


Figure III.41: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 0,22 0,32 0,44 0,63 0,88 1,26 m/s

2^{ème} disque

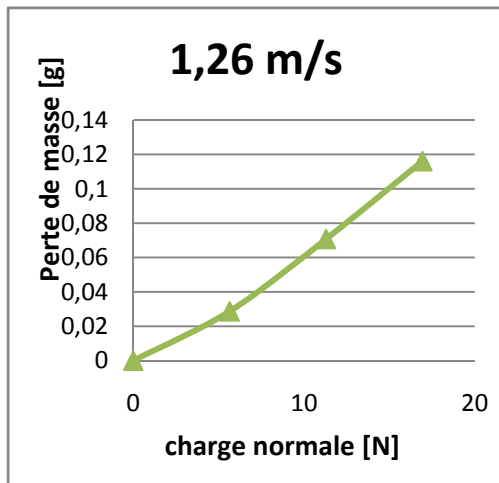


Figure III.42: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour vitesse de 1,26 m/s

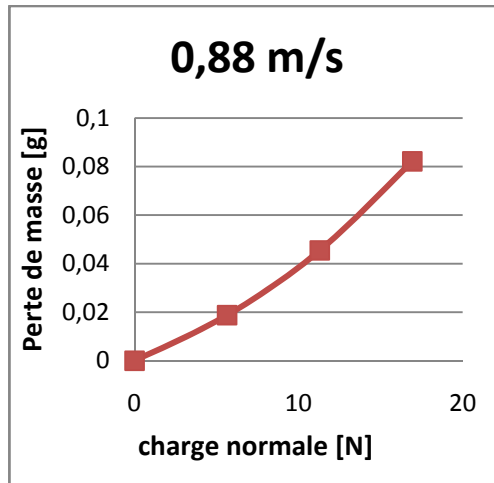


Figure III.43: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour vitesse de 0,88 m/s

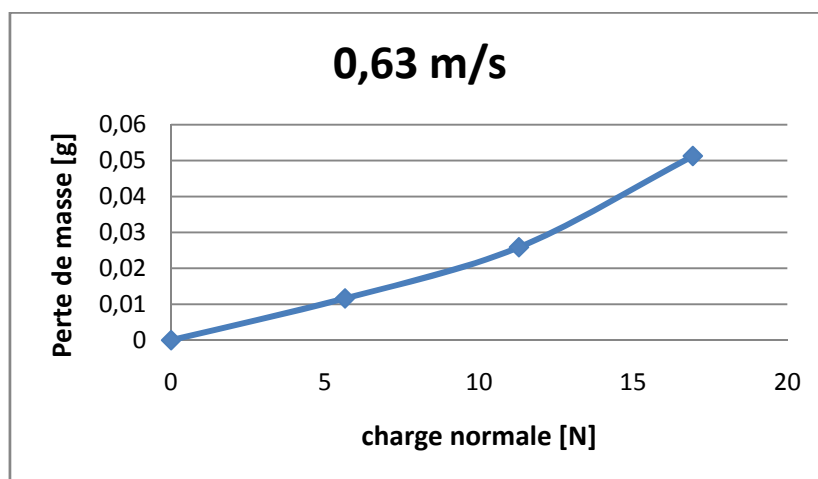


Figure III.44. Évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 0,63 m/s

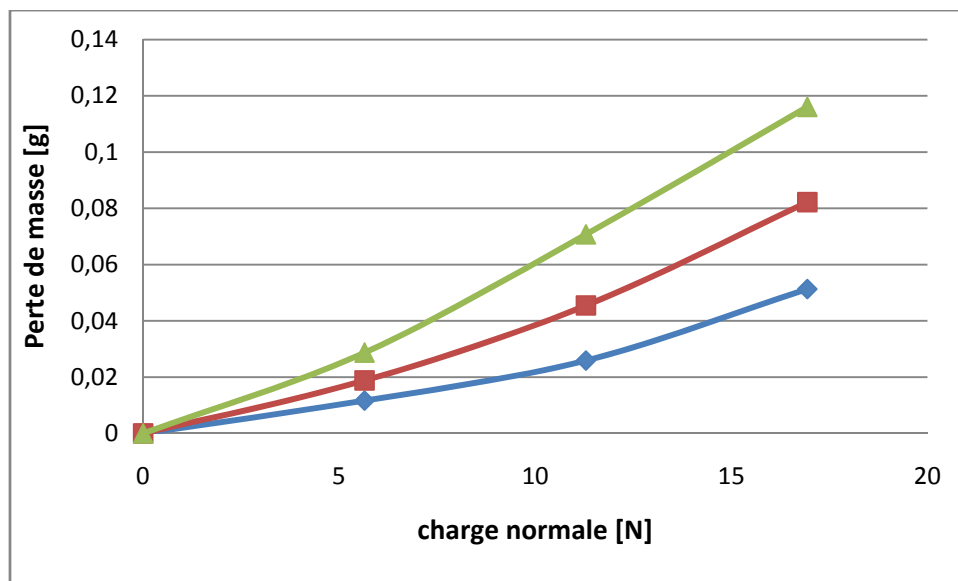


Figure III.45.: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 0,63 0,88 1,26m/s

3^{eme} disque

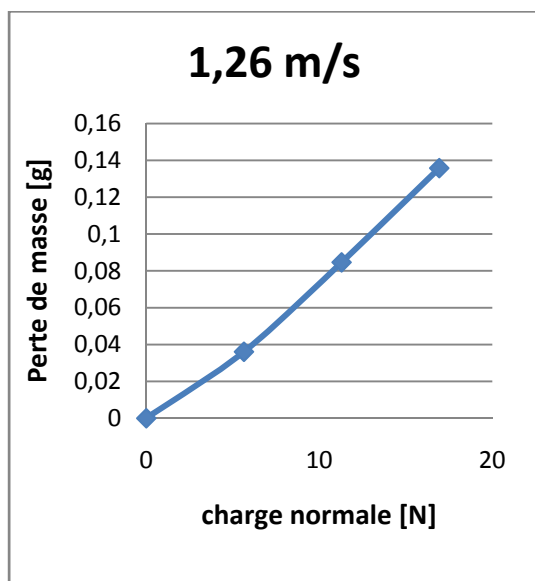


Figure III.46: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 1,26m/s

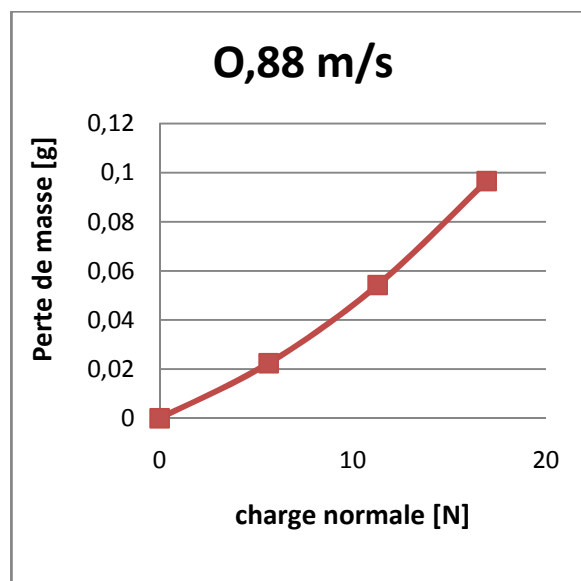


Figure III.47: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 0,88m/s

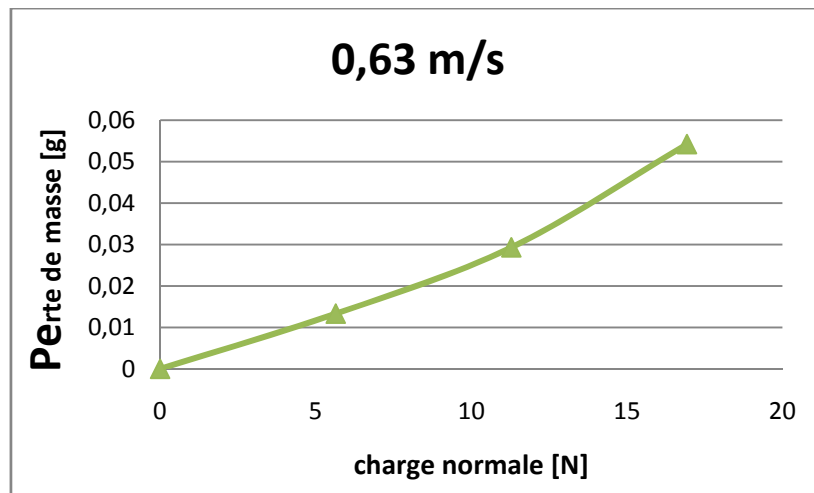


Figure III.48: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 0,63m/s

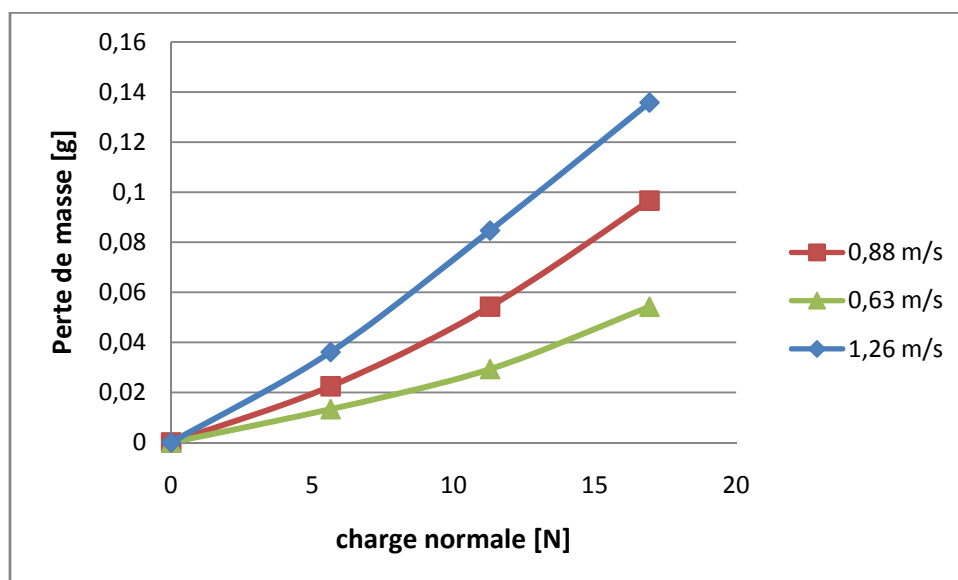


Figure III.49: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 0,63 0,88 1,26m/s

4^{ème} disque

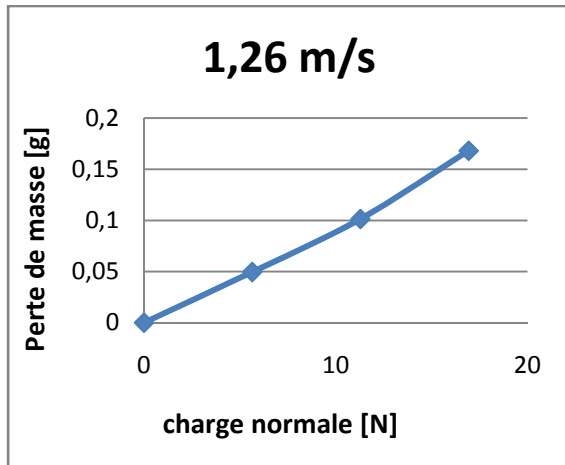


Figure III.50: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 1,26m/s

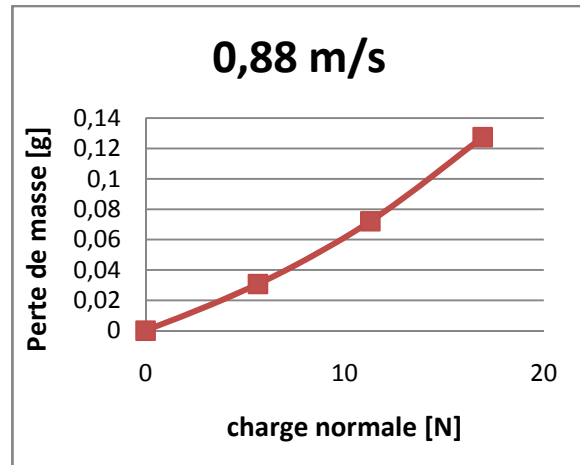


Figure III.51: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 0,88m/s

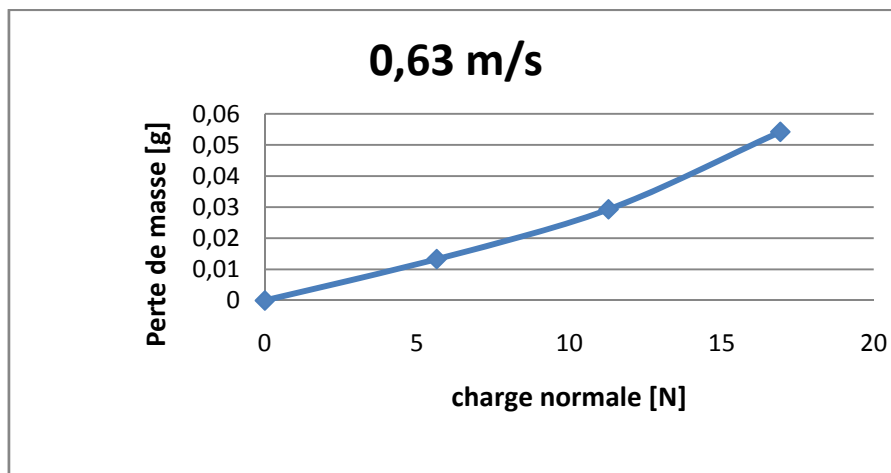


Figure III.52: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 0,63m/s

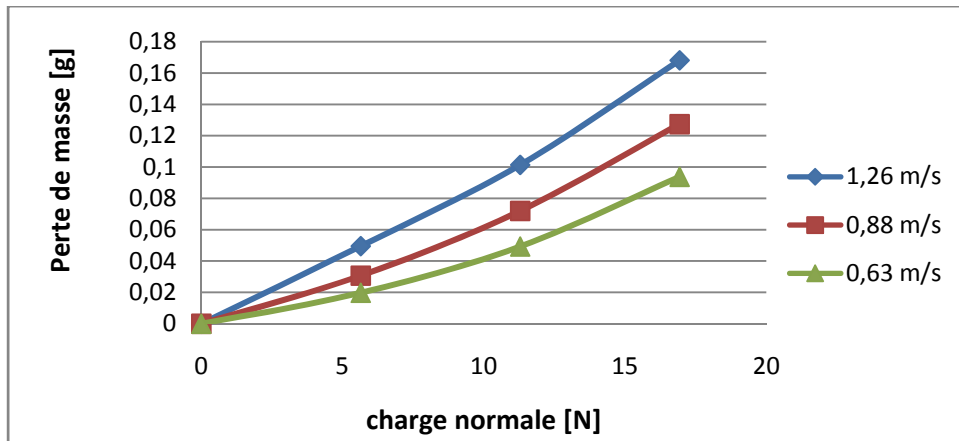


Figure III.53: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une vitesse de 0,63 0,88 1,26m/s

2.1.3. Etude d'Évolution de la perte de masse en fonction de puissance de glissement $P \cdot V$

1^{er} disque

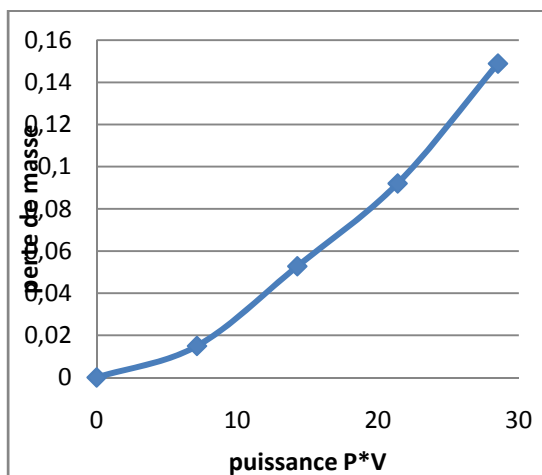


Figure III.54: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une vitesse de 1,26 m/s

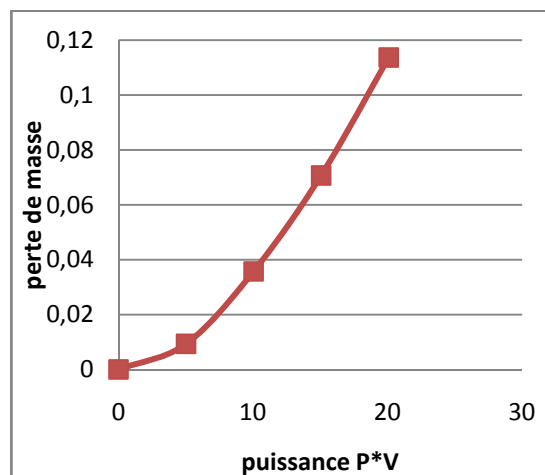


Figure III.55: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une vitesse de 0,88 m/s

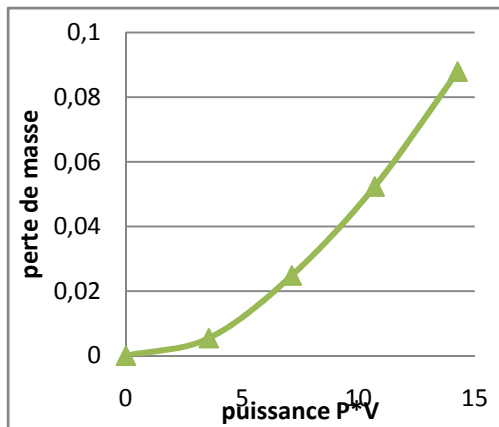


Figure III.56: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une vitesse de 0,63 m/s

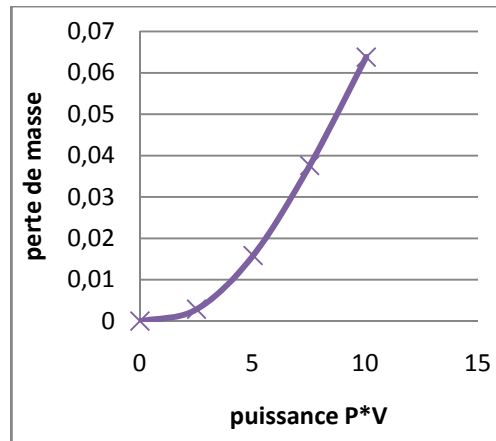


Figure III.57: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une vitesse 0,44 m/s

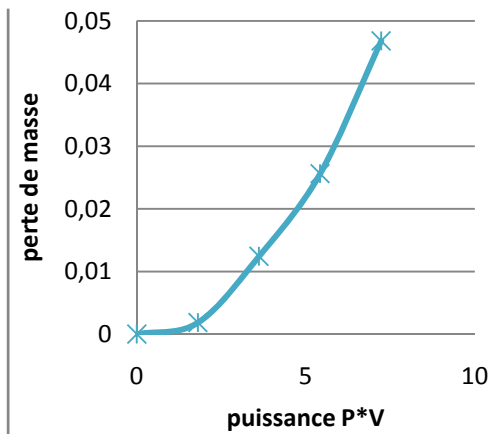


Figure III.58: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une vitesse de 0,32 m/s

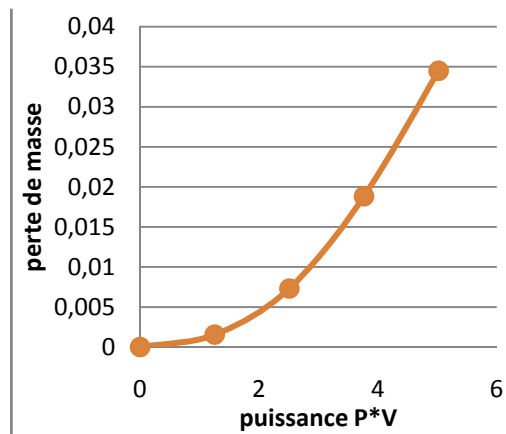


Figure III.59: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une vitesse 0,22 m/s

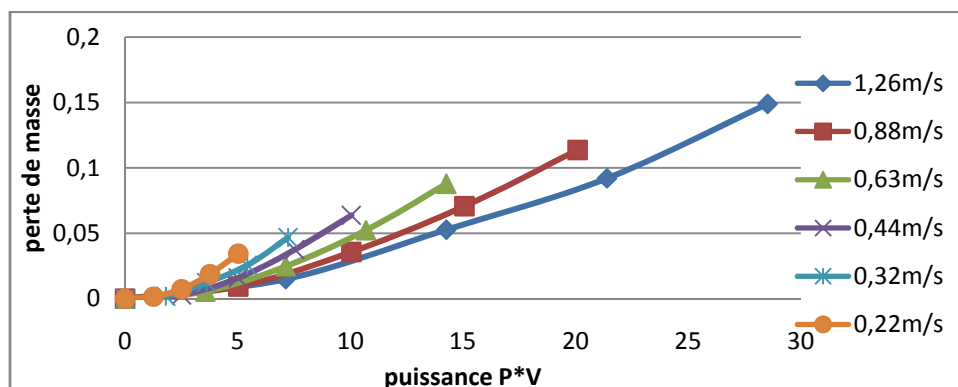


Figure III.60: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ Pour les vitesses de 1,26 0,88 0,63 0,44 0,32 0,22m/s

2^{ème} disque

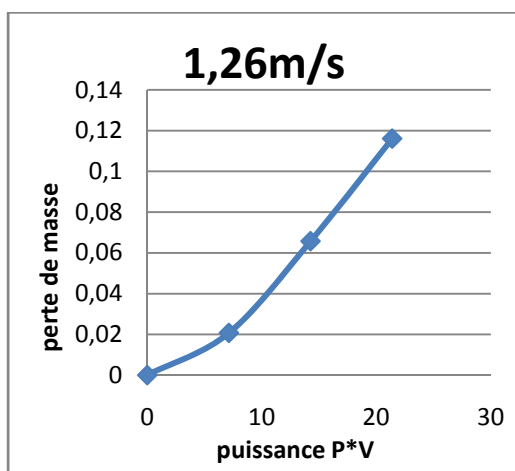


Figure II.61: évolution de la perte de masse en fonction de produit P*V pour une vitesse de 1,26m/s

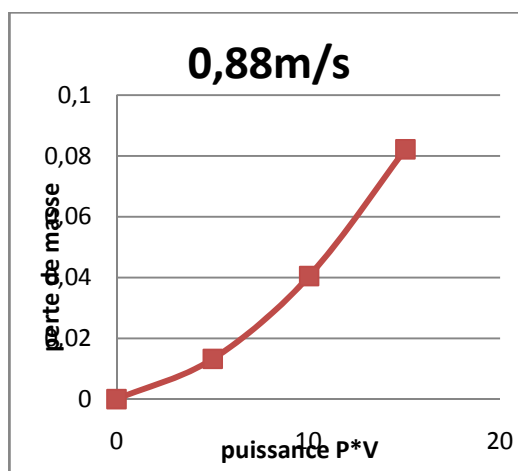


Figure III.62: évolution de la perte de masse en fonction de produit P*V pour une vitesse de 0,88m/s

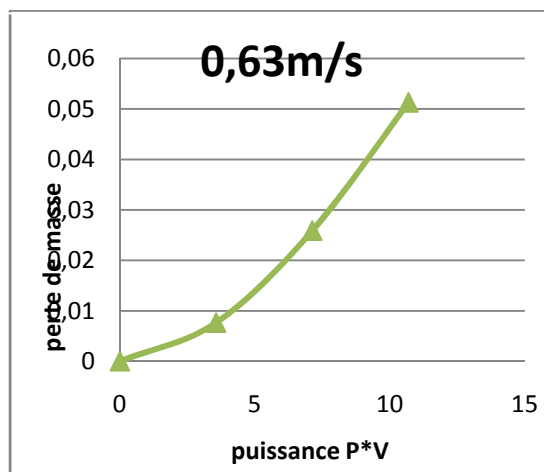


Figure III.63: évolution de la perte de masse en fonction de produit P*V pour une vitesse de 0,63m/s

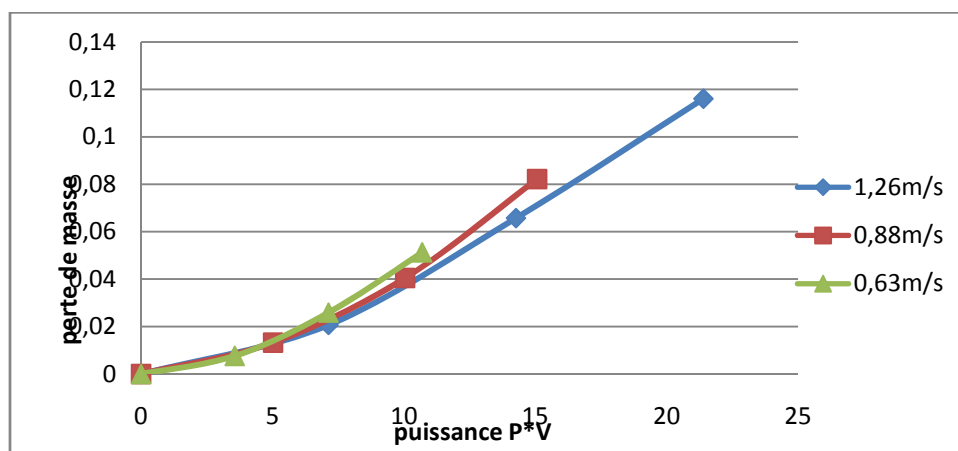


Figure III.64: évolution de la perte de masse en fonction de produit P*V pour une charge de 1,26 0,88 0,63m/s

3^{ème} disque

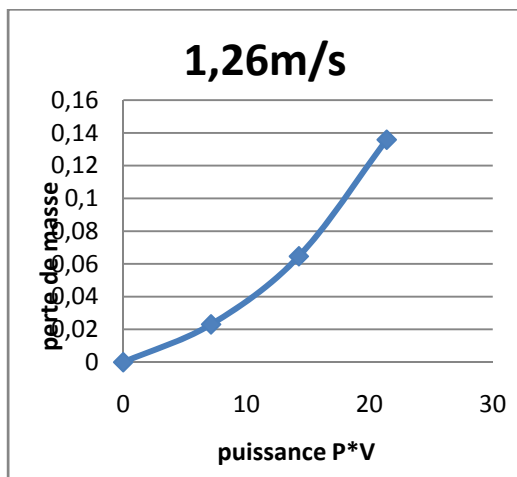


Figure III.65: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une vitesse de 1.26m/s

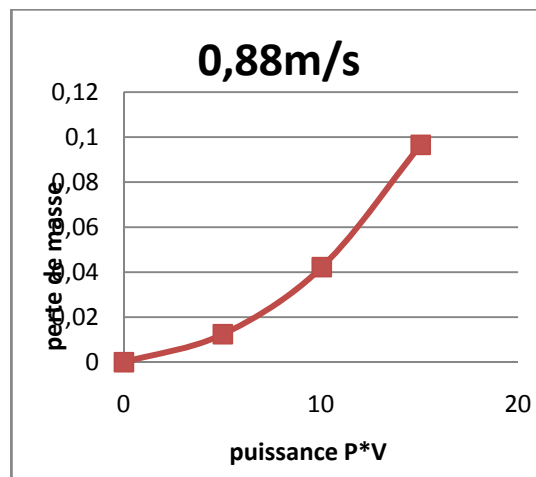


Figure III.66: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une vitesse de 0.88m/s

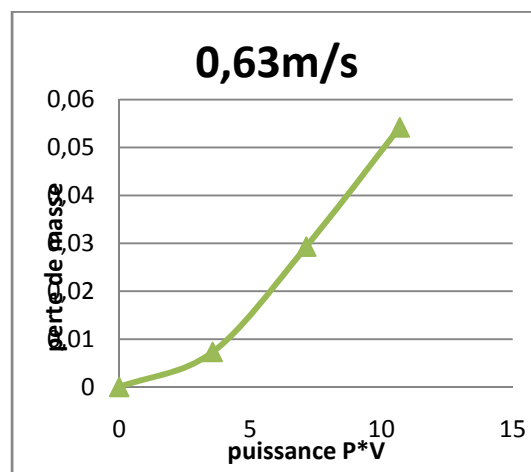


Figure III.67: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une vitesse de 0,63m/s

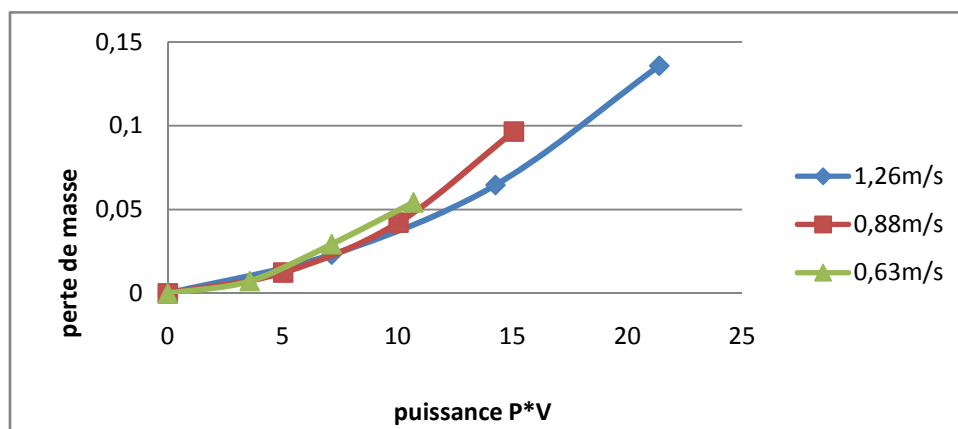


Figure III.68: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une charge de 1,26 0,88 0,63m/s

4^{eme} disque

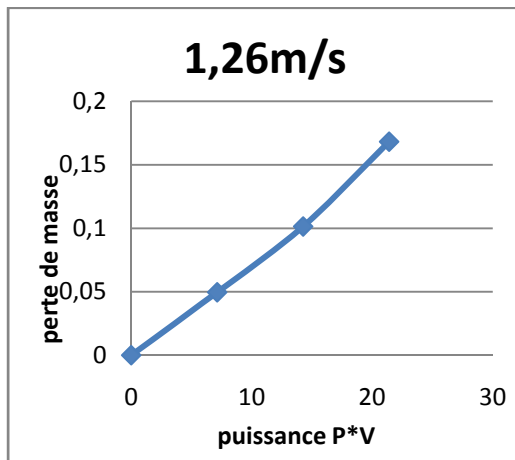


Figure III.69: évolution de la perte de masse en fonction de produit P*V pour une vitesse de 1,26m/s

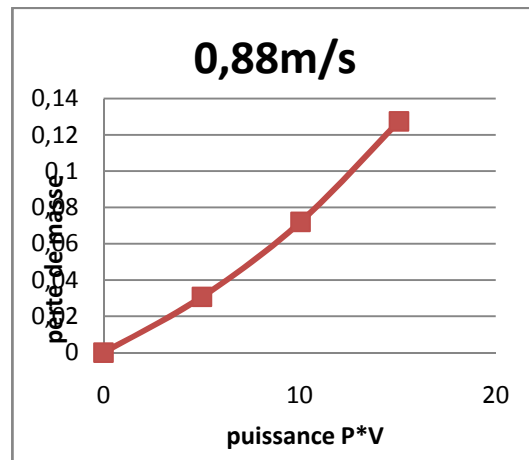


Figure III.70: évolution de la perte de masse en fonction de produit P*V pour une charge de vitesse de 0,88m/s

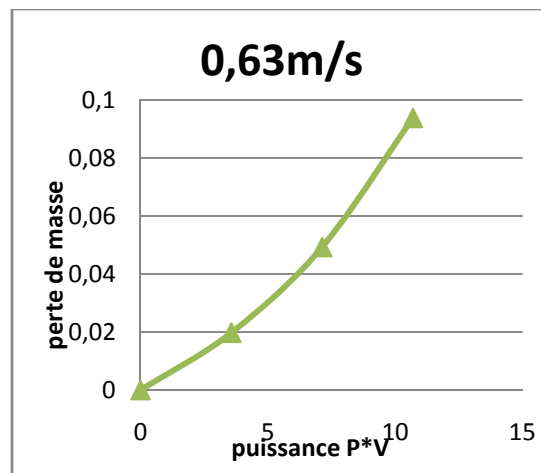


Figure III.71: évolution de la perte de masse en fonction de produit P*V pour une vitesse de 0,63m/s

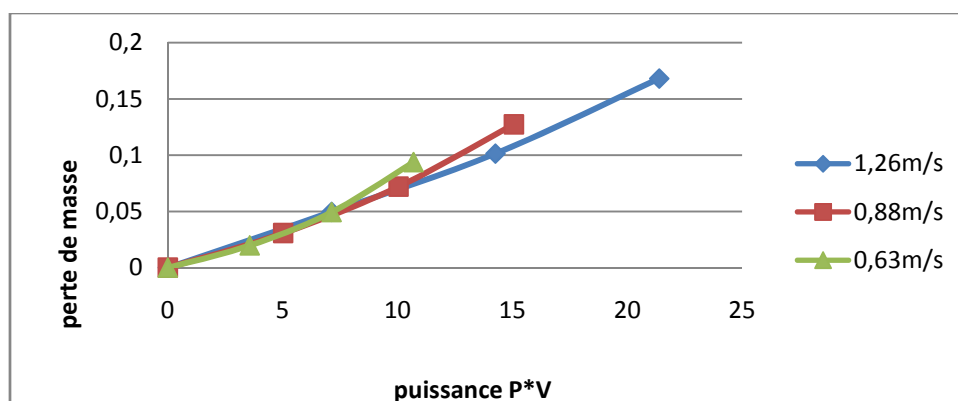


Figure III.72: évolution de la perte de masse en fonction de produit $P \cdot V$ pour une charge de 1,26 0,88 0,63m/s

2.1.4. Etude d'Évolution de la perte de masse en fonction de la vitesse

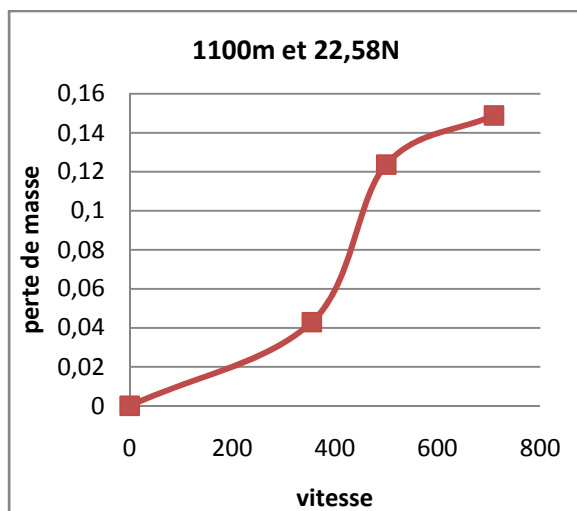


Figure III.73: évolution de la perte de masse en fonction de la vitesse pour une distance de 1100m et de 22,58N

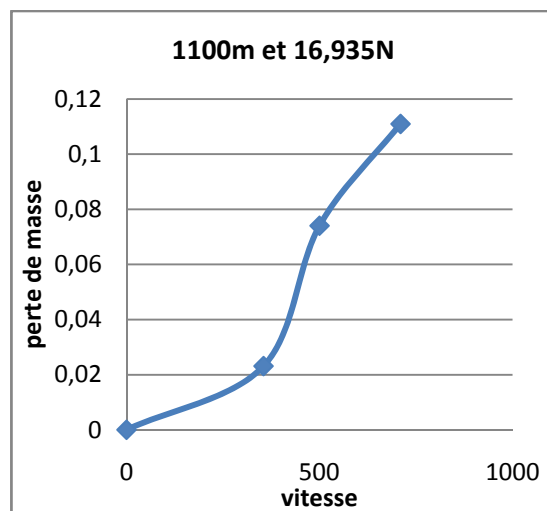


Figure III.74: évolution de la perte de masse en fonction de la vitesse pour une distance de 1100m et de 16,935N

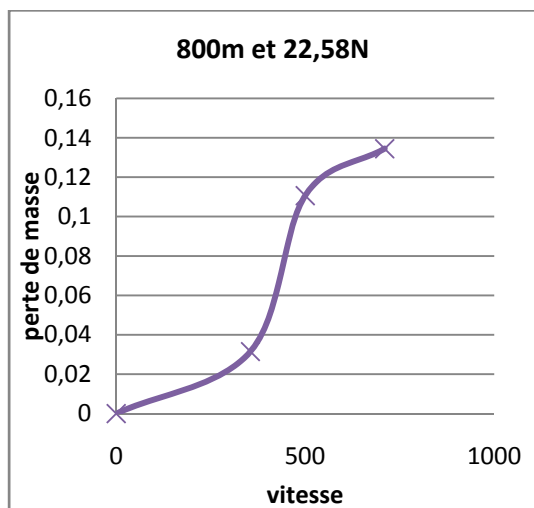


Figure III.75: évolution de la perte de masse en fonction de la vitesse pour une distance de 800m et de 22,58N

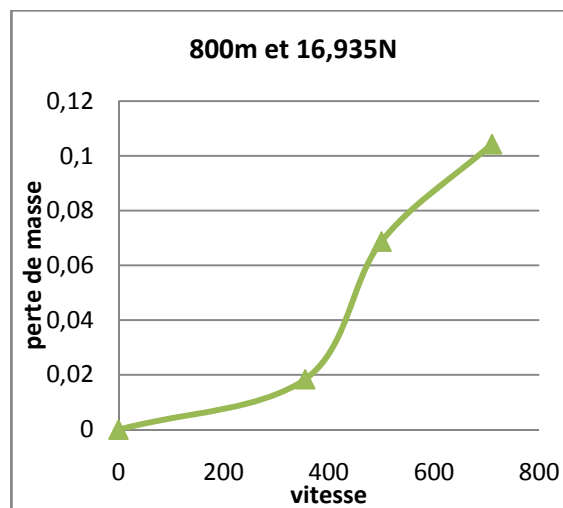


Figure III.76: évolution de la perte de masse en fonction de la vitesse pour une distance de 800m et de 16,935N

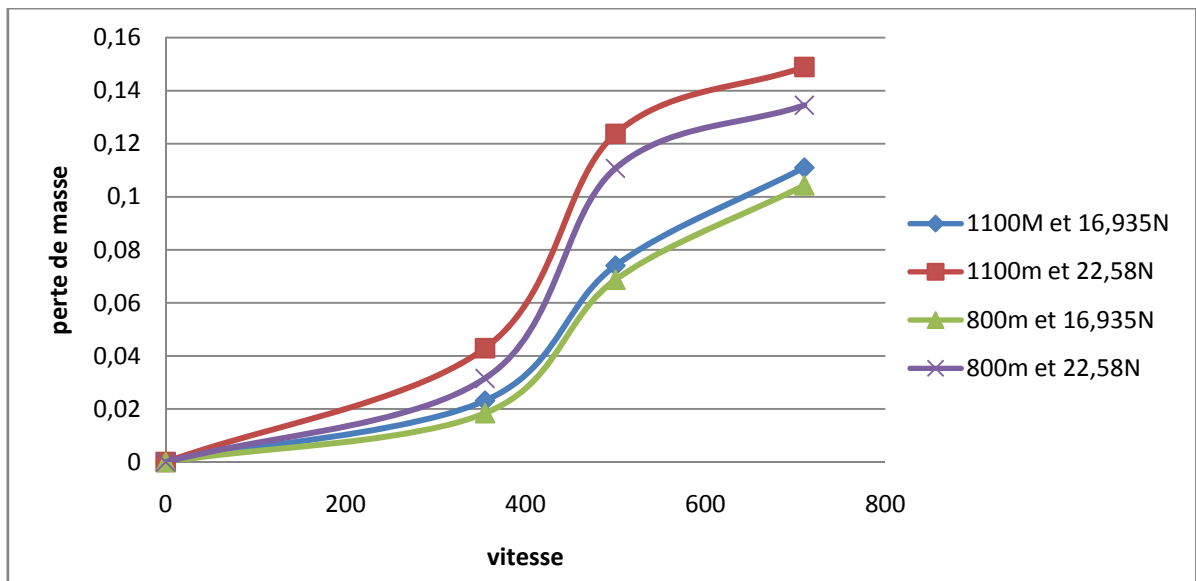


Figure III.77: évolution de la perte de masse en fonction de la vitesse pour des distances de 1100 800m et des charges de 22,58 16,935N

2.1.5. Etude d'Évolution de la perte de masse en fonction de la rugosité

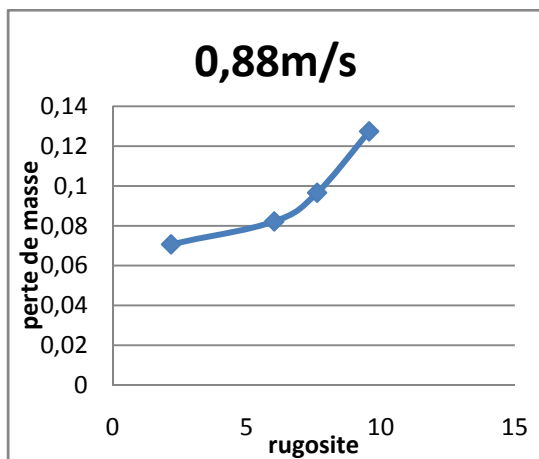


Figure III.78: évolution de la perte de masse en fonction de la rugosité pour une charge de 16,935N

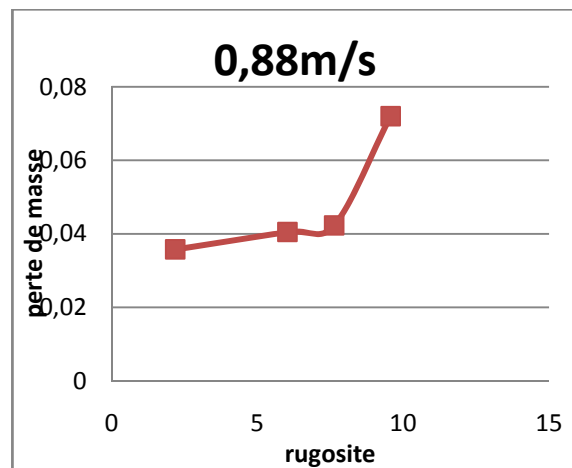


Figure III.79: évolution de la perte de masse en fonction de la rugosité pour une charge de 11,29 N

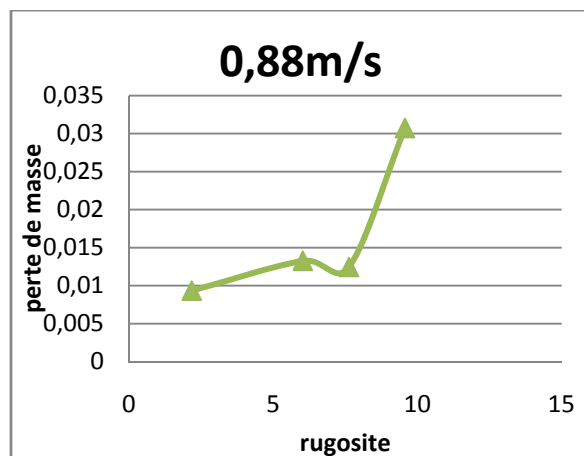


Figure III.80: évolution de la perte de masse en fonction de la rugosité pour une charge de 5,645N

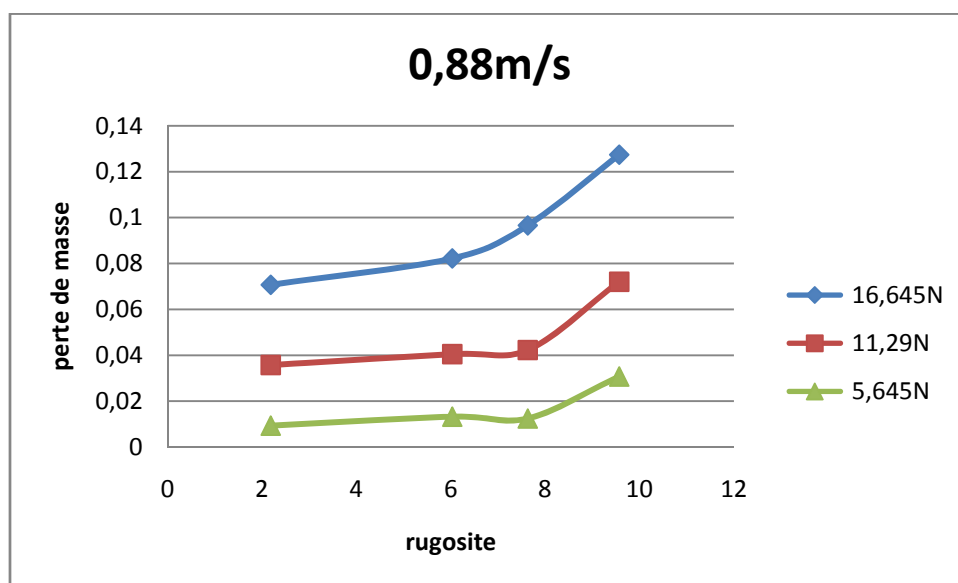


Figure III.81: évolution de la perte de masse en fonction de la rugosité pour une charge de 5,645 11,29 16,935N

2.1.6. Microstructure des pions après l'usure

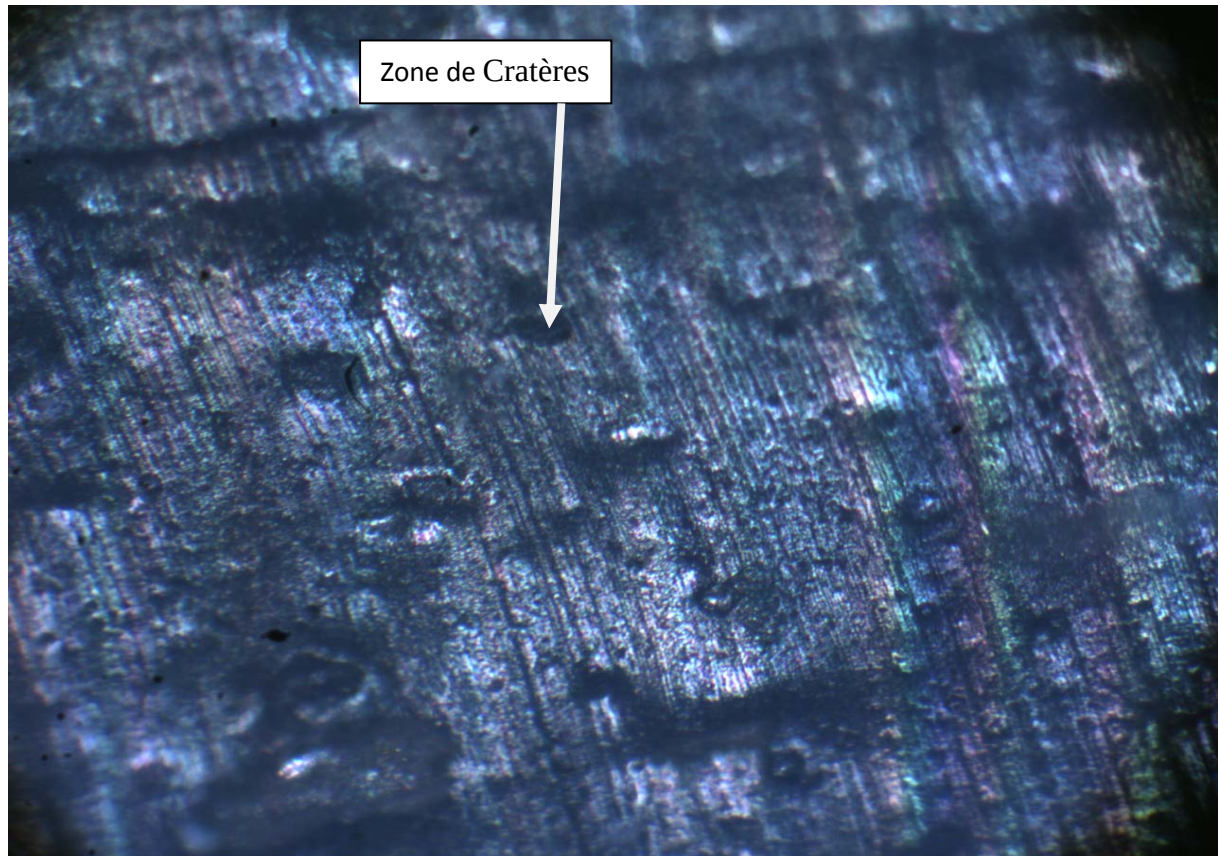


Figure III.13 : Micrographie des pions après l'usure

2.2. Discussions

Tous les essais sont réalisés pour une dureté de 900s. Sauf l'évolution de la perte de masse en fonction de la vitesse de glissement.

2.2.1. Influence de la distance parcourue sur la perte de masse

Pour chaque disque on a réalisé 3 essais pour 3 charges et 3 vitesses de glissements différents. (Figure III 19..... 34)

On fixe la charge on fait varier la vitesse de glissement.

On observe :

- Les courbes obtenues sous forme d'une droite de pente positive.

- Pour les distances importantes on a la perte de masse importante (exemple figureIII20).
- Pour les charges importantes on a la perte de masse importante (exemple figureIII23).

2.2.1. Influence de la charge normale sur la perte de masse

Pour chaque disque on a réalise 3 essais pour 3 charges et 3 vitesses de glissements différents. (Figure III 35.....53)

On fixe la vitesse de glissement on fait varie la charge.

On observe :

- Les courbes obtenues sous forme exponentielle.
- Pour les charges importantes on a la perte de masse importante (exemple figureIII40).
- Pour les vitesses importantes on a la perte de masse importante (exemple figureIII41).

2.2.3. Influence de puissance de glissement ($P \cdot V$) sur la perte de masse

Pour chaque disque on a réalise 3 essais pour 3 charges et 3 vitesses de glissements différents. (Figure III 54.....72)

On fixe la vitesse de glissement on fait varie la puissance de glissement.

On observe :

- Les courbes obtenues sous forme exponentielle.
- Pour les puissances importantes on a la perte de masse importante (exemple figureIII59).
- De 0 a 3J on a une superposition des figure ou de la les figure se séparé (exemple figureIII60).
- Pour les vitesses de glissement importantes on a une diminution de la pente de la courbe (exemple figureIII60).

2.2.4. Influence de la rugosité sur la perte de masse

On a réalise 3 essais pour 3 charges différents. (Figure III 78....81)

On fixe la vitesse de glissement on fait varie la rugosité. les résultats sont donnes aux

On observe :

- Les courbes obtenues sous forme exponentielle.
- Pour les rugosités importantes on a la perte de masse importante (exemple figureIII78).

- Pour les vitesses importantes on a la perte de masse importante (exemple figure III.81).

2.2.5. Influence de la vitesse de glissement sur la perte de masse

On a réalisé 4 essais pour 2 charges, 2 distances, 4 vitesses différents. (Figure III.73....77)

On fixe la distance et la charge on fait varier la vitesse.

On observe :

- Les courbes obtenues se décomposent en 3 paliers :
 1^{er} palier de 0 à 350 tour/min on a une augmentation linéaire de la courbe avec une pente moyenne.
 2^{ème} palier de 350 à 500 tour/min on a une augmentation accélérée de la perte de masse la courbe se présente avec une pente élevée.
 3^{ème} plus de 500 tour/min on a la perte de masse qui diminue.
- Pour les charges importantes on a la perte de masse importante (exemple figure III.78).
- Pour les vitesses importantes on a la perte de masse importante (exemple figure III.73).
- Pour les distances importantes on a la perte de masse importante (exemple figure III.78).

2.2.6. État de surface après l'usure :

La micrographie de la surface d'échantillon usé présentée sur la figure (III-82)

La surface est obtenue avec une charge 22,935 N utilisant le premier disque de rugosité de 2,17 à une vitesse de glissement 1,29 m/s et après une distance de 1100 m.

On conclut la présence de cratères de dimension variable entre $2 \text{ à } 8 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$.

Ces cratères sont notés le long de la surface dans toutes les directions.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la partie expérimentale et plus précisément le phénomène d'usure des élastomères.

Nous notons, à partir des essais expérimentaux effectués sur le sur l'élastomère de pneumatique du poids lourd, que l'usure caractérisée par la perte de masse varie plus ou moins avec les paramètres d'étude : (distance de glissement, charge normale, vitesse de glissement, puissance de glissement, et la rugosité).

Nous avons obtenue des résultats qui correspondent bien au phénomène d'usure des élastomères définie dans le chapitre II :

- Usure par abrasion qui est cause par la variation des efforts de contact on conséquence des vibrations au moment de l'essai.
- Le facies de cratères qui est causé par le matériau choisi (relatif aux taux de noir de carbone et vulgarisation).

Conclusion général

Ce travail est consacré à l'étude expérimentale de phénomène d'usure des élastomères. Nous avons choisis pour notre étude d'étudier l'influence du différent paramètre sur la perte de masse.

Nous avons fait des variations de quelque paramètre (distance de glissement, charge normale, puissance de glissement, vitesse de glissement, et la rugosité), et on a constaté que:

- la perte de masse augmente avec la distance de glissement et suit une loi linéaire. La pente de la droite augmentée pour les efforts normaux importants signe d'une usure par abrasion plus importante, et aussi la perte de masse augmentée chaque fois la rugosité augmente.
- la perte de masse augmente avec les efforts normaux et suit une loi exponentielle. La pente de la courbe augmentée pour les vitesses de glissements importantes, et aussi la perte de masse augmenter chaque fois la rugosité augmente.
- la perte de masse augmente avec la puissance de glissement et suit une loi exponentielle. La pente de la courbe à tendance à augmenter pour les vitesses de glissements importants, et aussi la perte de masse augmenter chaque fois la rugosité augmente.
- la perte de masse augmente avec la rugosité et suit une loi exponentielle. La pente de la courbe à tendance à augmenter pour les vitesses de glissements importants,
- la perte de masse augmente avec la vitesse de glissement. La pente de la courbe à tendance à augmenter pour les distances glissements et les charges normaux importants, et aussi la perte de masse augmenter chaque fois la rugosité augmente.
- On constate des vibrations intense aux cours des essais a grande vitesse et a effort de pression élevé : il ya apparition probable des rides de Schallamach.

A partir des résultats qui on a obtenu on remarque que les surfaces des pions usine présente un facies de Cratères (Se sont des trous circulaires sur la surface qui apparait lisse à l'œil nu), et aussi le types de mode qui maintien les essais on a beaucoup plus c'est l'usure par fatigue et moi important l'usure par abrasive.

En perspective, l'étude peut être complétée par l'influence d'autres paramètres (taux et type de charges, lubrification, effet de température.....). Notre étude est limitée par les moyens utilisés (tribomètre) qui ne permettent pas l'étude de ces derniers.

Références bibliographique

- [1] Aude Vandenbroucke ; Etude du comportement mécanique pour différentes températures d'un élastomère : caractérisations expérimentale et numérique. Thèse de doctorat 2010, Université de Bretagne Sud.
- [2] Gilles MARCKMANN : CONTRIBUTION A L'ETUDE DES ELASTOMERES ET DES MEMBRANES SOUFFLEES. Ecole Centrale de Nantes (Thèse de doctorat le 07/06/2004)
- [5] Ida RAOULT ; Structure élastomère sous chargement cyclique : Comportement Fatigue - Durée de vie. Thèse de doctorat 2005, École Polytechnique
- [3] Cécile MOREAU : Etude expérimentale et numérique de l'hyperélasticité avec prise en compte de la compressibilité. L'UNIVERSITE DE BRETAGNE SUD (Thèse de doctorat le 24/03/2000)
- [4] Fabrice DELEAU ; comportement tribologique et vibro acoustique d'un contact élastomère / verre. Thèse de doctorat 2009, École Centrale De Lyon.
- [6] jean-marie degrange :influence des proprietes viscoelastique sur le comportement tribologique d'elastomeres charges de type NBR.ecole centrale de lyon (Thèse de doctorat 2005)
- [7] Vanessa BOUCHART ; Eude expérimentale et modélisation micromécanique du comportement et de l'endommagement des élastomères renforcés. Thèse de doctorat 2007, Université de LILLE 1
- [8] Thomas Parenteau ; Modélisation micromécanique de composites thermoplastiques élastomères à matrice polypropylène. Thèse de doctorat 2009, Université de BRETAGNE-SUD.
- [9] technique de l'ingénieur BM 5065 et BM 7006
- [10] Stéphane LEJEUNES ; Modélisation de structures lamifiées élastomère-métal a l'aide d'une méthode de réduction de modèles. Thèse de doctorat 2006, Université de la Méditerranée (Aix-Marseille II)
- [11] gilles petitet :contibution a la comprehension des mecanismes elementaires d'usure douce des elastomeres charges reticules.ecole centrale de lyon (Thèse de doctorat le 2003)
- [12] J-P. Arliel , caoutchoucs synthétique :procedes et donnees economiques, technip,Paris,1980
- [13] institut natitonal de formation et d'enseignement professionnel du caoutouc (ifoca),synthèse,propriétés et technologie des élastomères,ifoca, vitry-sur-seine, 1984

[14] Schallamach « Abrasion of rubber II » Gummi, Asbest Kunststoffe, 9, (1), pp 63-67, 1978.