

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté du génie de la construction
Département de génie mécanique



Mémoire de fin d'études

*En vue de l'obtention du diplôme de MASTER PROFESSIONNEL
en Génie Mécanique*

Option : Fabrication Mécanique et Productique.

Thème

*Usure abrasive et contact plan /plan avec influence des
conditions de vieillissement climatique des élastomères
chargés.*

Proposé et Dirigé par :

M^r : DJERIDI.R

Réalisé par :

M^r : CHALLAL M^{ed} CHERIF
M^{elle} : LOUNAS FAZIA

Promotion 2013

REMERCIEMENTS

*Nous remercions particulièrement notre promoteur monsieur **DJIRIDI.R** d'avoir accepté de nous encadrer et pour ses précieux conseils et orientations.*

*Nous tenons à remercier monsieur **Mr. ALMANSBA** et **Mr. OULD OUALI** pour leur soutien et leur disponibilité le long de ce travail.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à **Mr. ZAROUKI MARZAK** pour son aide apporté à ce travail.*

*Nous adressons également nos plus sincères salutations à tous les enseignants du département de génie mécanique en particulier ceux de l'option **FMP Promotion 2013**. qui ont contribué à notre formation.*

*Nos remerciements sont aussi pour tout le personnel de la bibliothèque, les techniciens du laboratoire de génie mécanique et aussi techniciens de hall **OUED AISSI** pour leur disponibilité et leur sympathie.*

Nos remerciements vont également aux membres de jury pour l'intérêt qu'ils portent à ce travail en ayant accepté la lourde tâche de l'examiner.

Dédicace

En premier lieu, nous remercions, le bon DIEU de nous avoir donné la santé, le courage et la volonté pour réaliser ce travail.

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents ainsi que mon frère Saïd et sa petite famille, à mes chères sœurs.

A tous les membres de ma famille chaque un par son nom.

A ma chère sœur Djedjigua et son mari Ahcene qui m'ont toujours soutenu, je leurs exprime ma profond gratitude, et je le dédie à leurs enfants.

A mon binôme chérif et toute sa famille.

Aussi, je le dédie à tous mes amis(es), avec qui j'ai passé d'inoubliables moments.

Et à tout ceux, et celle que je connais.

FAZIA

Dédicace

En premier lieu, nous remercions, le bon DIEU de nous avoir donné la santé, le courage et la volonté pour réaliser ce travail.

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents ainsi que mes frères et sœurs.

A ma chère sœur Fouza et son mari Youcef qui m'ont toujours soutenu, je leurs exprime ma profond gratitude, et je le dédie à leurs enfants Faiz et Manel.

A mon binôme Fazia et mon cher ami Karmoune Ali et toute leur famille.

Aussi, je le dédie à tous mes amis(es), avec qui j'ai passé d'inoubliables moments.

Et à tout ceux, et celle que je connais.

MED CHERIF

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

PARTIE THEORIQUE

I- Généralités sur les élastomères

I.1- Introduction	2
I.2- Historique	2
I.3- Le caoutchouc.....	4
I.3.1- L'arbre de l'Hévéa	4
I.3.2- Qu'est ce que le caoutchouc	4
I.4-définition des élastomères	5
I.4.1- physico-chimie des élastomères.....	5
I.4.2- Structure macromoléculaire des polymères	7
I.4.3- Structure des élastomères	9
I.4.4- Microstructure des matériaux élastomères	10
I.4.5- Les différentes familles d'élastomères	11
I.4.5.1- Les élastomères thermodurcissables.....	11
I.4.5.2- Les élastomères thermoplastiques	11
I.4.6- Vulcanisation et réticulation dans un élastomère	12
I.4.7- Température de transition vitreuse	12
I.5- Mise en œuvre d'élastomère chargé	14
I.5.1- Les additifs	14

Sommaire

I.5.1.1- Les charge.....	14
I.5.1.2- Les paramètres qui permettent de caractériser les charges.....	17
I.5.1.3- Les agents de protection	17
I.5.1.4- Les plastifiants	18
I.6- Mise en forme d'élastomère	18
I.7- Les défauts dans les élastomères	19
I.8- Propriétés mécaniques des élastomères	19
I.8.1- L'élasticité caoutchique-cristallisation sous contraintes	20
I.8.2- La viscoélasticité	22
I.8.3- L'hystérésis.....	23
I.8.4- L'amplification des déformations.....	23
I.8.5- Effet Mullins.....	24
I.8.6- Effet Payne	25
I.9- Domaines d'utilisation.....	26
I.10-Conclusion	27

II-La tribologie des élastomères

II.1-Introduction	28
II.2-Le système tribologique	29
II.3-Concept du troisième corps	29
II.3.1-Le triplet tribologique.....	29
II.3.2- Le circuit tribologique	30

Sommaire

II.4-Importance de la tribologie	31
II.5- Surface.....	32
II.6- Contacts surfacique et hertzien	33
II.6.1- Contact surfacique	33
II.6.2- Contact hertzien.....	34
II.7-Frottement des élastomères	35
II.7.1-Types de frottement	36
II.7.2-Composante adhésive de frottement.....	37
II.7.3-Coefficients de frottement	37
II.8-l'usure.....	38
II .9-Généralités sur l'usure des élastomères	38
II.9.1-Introduction	38
II.9.2-Le phénomène d'usure	39
II.9.3-Les origines d'usure	39
II.9.4-Données et paramètres tribologiques.....	39
II.9.4.1- Taux d'usure	39
II.9.4.2-Produit $p \times v$	41
II.9.4.3- Densité d'énergie de frottement.....	42
II.9.4.4-Rugosité	42
II.10-Phénomènes tribologique de base des élastomères	44
II.11. Usure par abrasion	46

Sommaire

II.12-Principaux facies d'usure des élastomères	47
II.12.1- Rouleaux d'usure.....	47
II.12.2- Cratères d'usure.....	47
II.12.3- Stries d'usure	48
II.12.4- Rides d'usure	48
II.13- Différents types d'usure	48
II.13.1-Usure par adhésive	49
II.13.2- Usure corrosive et oxydative	49
II.13.3- Usure par érosion	50
II.13.4-Usure par abrasive	51
II.13.5- Usure par fatigue	52
II.13.6-Usure par fretting	52
II.13.7- Usure par cavitation	52
II.14- quelques paramètres influent sur l'usure.....	52
II.14.1- Paramètres matériaux	52
II.14.1.1- Propriétés mécaniques, effet de la température	52
II.14.1.2- Ajout de charges renforçant au mélange	53
II.14.2- Conditions expérimentales	53
II.14.2.1- Charge appliquée	53
II.14.2.3-Lubrification	53
II .15- Conclusion.....	54

Sommaire

PARTIE PRATIQUE

III-Etude expérimentale de l'usure des élastomères

III.1- Introduction.....	55
III.2-Contact Plan/Plan.....	55
III.2.1- Procédure expérimentale.....	55
III.2.2-Dispositif expérimental	55
III.2.3-Nomenclature du banc.....	56
III.2.4-Principe de fonctionnement.....	57
III.2.5- Chaîne d'acquisition.....	57
III.2.6- Description du capteur de force	58
III.3- Identification des matériaux utilisés	59
III.3.1-Les disques	59
III.3.1.1-Matériau des disques	59
III.3.1.2-Géométrie de disque	59
III.3.2-Les pions	60
III.3.2.1-Matériau des pions.....	60
III.3.2.2-Géométrie des pions	61
III.4-Influence des conditions de vieillissement	61
III.5-Résultats des essais et discussion.....	63
III.5.1-Conditions d'essais.....	63
III.5.2- Résultats et discussion.....	64

Sommaire

III.5.2.1-Etude d'Évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue	64
III.5.2.2-Influence du poids sur l'usure	67
III.5.2.3-coefficient de frottement	69
III.6-Le microscope électronique à balayage	71
III.6.1-Présentation de la technique d'observation.....	71
III.6.2-Micrographique des pions	72
III.7- Etude expérimentale de l'usure abrasive	73
III.7.1 Procédure expérimentale	73
III.7.2-Machine utilisée-Etau limeur	73
III.7.2.1-Utilisation de l'étau limeur.....	73
III.7.2.2- Fonctionnement	74
III.7.3-Description du dispositif	77
III.7.4. Matériaux d'étude.....	79
III.8-Résultats des essais et discussion.....	80
III.8.1-Conditions d'essais.....	80
III.8.2- Résultats et discussion.....	81
III.8.2.1-Influence de l'angle de l'arrête de la lame	81
III.8.2.2-Influence de vitesse de glissement	83
III.8.2.3-Influence de durée d'utilisation (nombre de cycle).....	84
III.8.2.4-influence des charges de noir de carbone et de silice.....	85
III.9-Etude micrographique de l'usure	88

Sommaire

III.10-Simulation numérique par MEF.....	90
III.10.1-Présentation du logiciel.....	90
III.10.2-Visualisation et discussions des résultats.....	90
III.10.2.1-Contact plan-plan.....	90
III.10.2.2-Usure abrasive.....	93
III.11- Conclusion	94
Conclusion générale	95
Références bibliographique	
Annexe	

Liste des figures

I- Généralités sur les élastomères

Figure I.1 : Hévéa brasiliensis	3
Figure I.2 : Récolte du latex.....	4
Figure I.3 : Évolution du module d'YOUNG et de l'angle de perte en fonction de la température.....	6
Figure I.4 : Formule semi-développée du SBR	7
Figure I.5 : Exemple de microstructure d'un matériau élastomère observée par microscope électronique à transmission. La matrice est en gris et les charges sont en noir	10
Figure I.6 : La réticulation des élastomères	12
Figure. I.7 : Évolution du module élastique en fonction de la température pour une vitesse de refroidissement donnée	13
Figure I.8 : Etat d'un élastomère en fonction des domaines d'état structurel ou de la température.....	13
Figure I.9 : Différentes échelles de taille des charges.....	14
Figure I.10 : Différentes structures des charges.....	15
Figure. I.11 : courbe de traction a rupture.....	21
Figure I.12 : essai de traction de type charge /décharge	21
Figure I.13 : Stabilisation d'un SBR non cristallisant et d'un NR cristallisant [HMP67]	21
Figure I.14 : Cristallisation sous contrainte	22
Figure I.15 : Phénomène de relaxation	22
Figure I.16 : Courbe d'hystérésis d'un élastomère	22
FigureI.17 : Variation de l'hystérésis pour un thermoplastique en fonction de la déformation et de la température	23

Liste des figures

Figure I.18 : Effet Mullins	24
Figure I.19 : Interprétation microscopique de l'effet Mullins	24
Figure I.20 : Analyse de l'effet de Payne, évolution de propriétés mécaniques en fonction du niveau de déformation pour un élastomère SBR renforcé en silice	25
II-La tribologie des élastomères	
Figure II.1 : Principaux éléments du contact tribologique.....	29
Figure II.2 : Représentation schématique du circuit tribologique	30
Figure II.3 : rapprochement des solides : effets et conséquences	33
Figure II.4 : Surface projetée d'un palier.....	34
Figure II.5 : Définition des coefficients de frottement	36
Figure II.6 : Classement des irrégularités de surface.....	43
Figure II.7 : Exemple de représentation tridimensionnelle de rugosité.....	44
Figure II. 8 : Diagramme présentant les relations entre le frottement des élastomères et leurs mécanismes d'usure	45
Figure II.9 : Principales composantes de coefficient de frottement	45
Figure II.10 : Schéma d'une lame tirant un simple sillon sous une force d'abrasion \vec{F} montrant la propagation de fissure suivant un angle θ par rapport à la surface	46
Figure II.11 : Micrographie d'un sillon formé sur un spécimen SBR	46
Figure II.12 : principaux facies d'usure des élastomères. Stries d'usure (a) ; rides d'usure (b) rouleaux d'usure(c) ; cratères d'usure(d)	47
Figure II.13 : Processus physique de frottement de rouleaux d'usure	49
Figure II.14 : Mécanisme d'usure érosive en présence d'un 3eme corps pour un impact unidirectionnel.....	51

Liste des figures

Figure II.15 : Schéma des déformations et du cisaillement de la surface de l'élastomère par une « aiguille » [à « sec » (« dry abrasion »)	51
Figure II.16 : Lissage du substrat en présence de lubrification	54

III-Etude expérimentale de l'usure des élastomères

Figure III.1 : Photographie du tribomètre (pion/disque)	56
Figure III.2 : Chaîne d'acquisition	57
Figure III. 3 : Corps d'épreuve du capteur et les zones d'emplacement des jauges.....	59
Figure III.4 : Géométrie du disque	60
Figure III.5 : schéma du rouleau et conditions d'expositions.....	61
Figure III.6 : Photographie des pions	61
Figure III.7 : Photographie montrant l'état de la structure des échantillons	62
Figure III.8 : Balance électronique	63
Figure III.9 : évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la charge de 10N.....	64
Figure III.10 : évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la charge de 10 N.....	65
Figure III.11 : évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la charge de 10 N.....	66
Figure III.12 : Influence des conditions de vieillissement climatique sur le comportement à l'usure des élastomères chargés	66
Figure III.13 : évolution de la perte de masse de la classe 1 en fonction de la charge normale pour une distance parcourue de 400 m	67

Liste des figures

Figure III.14: évolution de la perte de masse de la classe 2 en fonction de la charge normale pour une distance parcourue de 400 m	68
Figure III.15: évolution de la perte de masse en fonction de la charge normale pour une distance parcourue de 400 m.....	68
Figure III.16: Influence des conditions de vieillissement climatique sur le comportement à l'usure des élastomères chargés	69
Figure III.17 : Coefficient de frottement des classes des matériaux vieillis.....	70
Figure III.18 : Microscope Electronique a Balayage.....	71
Figure III.19 : Micrographies de l'influence de vieillissement sur la forme de la surface usée.....	72
Figure III.20 : Micrographies de l'influence de la pression de contact.....	72
Figure III.21 : Etau limeur.....	74
Figure III.22: Schema illustrant un eteau limeur.....	74
Figure III .23 : Montage d'étude de mécanisme d'usure abrasive	77
Figure III.24 : les éléments de mécanisme d'étude d'usure abrasive.....	79
Figure III.25: Outil lame	79
Figure III.26 : Mécanisme de fixation.....	79
Figure III.27: évolution de la perte de masse en fonction de l'angle d'inclinaison de la lame d'abrasion	82
Figure III.28: évolution de la perte de masse en fonction de la vitesse de glissement.....	83
Figure III.29: évolution de la perte de masse en fonction du nombre de cycles parcouru...	84
Figure III.30 : Influence de taux de noir de carbone sur l'usure abrasive des Elastomères...	86

Liste des figures

Figure III.31 : Influence de taux de silicium sur l'usure abrasive des élastomères.....	87
Figure III.32 : Micrographie de l'influence de nombre de cycles	89
Figure III.33 : Micrographie de l'influence de l'angle d'abrasion	89
Figure III.34 : Micrographie de l'influence de la vitesse de glissement	90
Figure III.35 : a)-modèle numérique 2D du contact plan-plan. b)-état de contrainte de Van Mises c)-Légende des contraintes	91
Figure III.36 : a)-Modèle numérique 3D du contact plan-plan. b)-Etat de contrainte de Van Mises. c)-Légende des contraintes	92
Figure III.37 :a)-Modèle numérique 3D du contact plan-plan. b)-Etat de contrainte de Van Mises. c)-Légende des contraintes	92
Figure III.38 : a)-modèle numérique 2D d'usure abrasive. b)-état de contrainte de Van Mises c)-Légende des contraintes.....	93
Figure III.39 : a)-modèle numérique 2Dd'usure abrasive. b)- Etat de contrainte de Van Mises c)-Légende des contraintes.....	94

Liste des tableaux

I- Généralités sur les élastomères

Tableau I.1 : Composition du latex indépendamment du lieu de plantation	5
Tableau I.2 : Familles d'élastomères	7
Tableau I.3 : Propriétés des principaux types de polymères	9
Tableau I.4 : Utilisations des élastomères	27

II-La tribologie des élastomères

Tableau II.1 : Impacts de la tribologie sur la société	32
Tableau II.2 : Ordre de grandeur du coefficient de frottement (glissement)	38

III-Etude expérimentale de l'usure des élastomères

Tableau III.1 : composition chimique en charges des éprouvettes	79
--	----

Liste des symboles

T_g : Température de transition vitreuse

T_f : La température de fusion

T_d : La température de dégradation

E : Module de Young

σ : contrainte

λ_i : Extensions principales

t : Temps

T : effort tangentiel

Q : charge appliquée

P : pression

S : surface

D : diamètre

L : longueur

μ : coefficient de frottement

C : couple

R : rayon

H : distance d'application la charge

V : la perte de volume

K : Le taux d'usure

F_N : force normale

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

Liste des symboles

v : vitesse de déplacement

E_f : La perte énergétique

V_g : vitesse de glissement

F_{ad} : force d'adhésion

F_{hys} : force d'hystérésis

Θ : angle de direction de fissuration

a et n : sont des fonctions de formulation de l'élastomère et la nature de la surface

T_e : la valeur de signale

J : Les jauges

N : fréquence des vitesses de glissement

U : déplacement

C_i : constante de modèle d'arruda boyce

D : densité du matériau

Introduction générale

Introduction générale

Les élastomères couvrent un large domaine d'utilisation dans l'industrie telle que l'industrie aéronautique, l'automobile, bâtiment et génie civil en vue de leurs propriétés mécaniques unique d'élasticités, d'extensibilités et leurs capacités à dissiper de l'énergie. Des études s'intéressent à comprendre le comportement des élastomères afin de pouvoir améliorer et accroître ces propriétés. Les nombreuses formulations possibles offrent la possibilité de mettre en œuvre des matériaux très spécifiques en fonction de l'application désirée. Dans ces formulations interviennent les conditions d'élaboration et les charges de renforcement du matériau en particulier.

L'objectif de notre travail est d'étudier l'usure des pions d'élastomères vieillis et des pions d'élastomères chargés. Cette étude se résume dans trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré à la description des élastomères d'un point de vue physicochimique et mécanique, leur mise en œuvre ainsi l'ajout des charges renforçantes, leur comportement en statique et en dynamique.

Le second chapitre se divise en deux parties distinctes : une première partie se porte sur le système tribologique, la seconde partie caractérise d'une manière générale les différentes modes d'usure (abrasion, adhésion, fatigue ...).

Le troisième chapitre contient l'aspect tribologique de notre étude. Nous étudions expérimentalement l'influence des paramètres tribologiques sur l'usure par perte de masse d'un élastomère chargé. Nous focalisant notre étude sur l'influence des conditions environnementales de vieillissement sur l'usure d'un élastomère de type SBR ayant un contacte plan / plan avec un disque en acier XC48 en premier lieu. Nous étudions aussi l'usure des élastomères le plus prépondérant à savoir l'usure abrasive. Ce type d'usure est étudié en réalisant un mécanisme d'étude approprié. Le contact est linéaire obtenu en utilisant une lame d'abrasion. L'influence des paramètres tribologiques et composition chimique des élastomères chargés(vitesse de glissement, angle de la lame au contact, nombre de cycle et taux de charges de noir de carbone et de silice) sont mises en évidence.

Une conclusion générale clôt ce mémoire en faisant ressortir les principaux résultats de l'étude.

Chapitre I

Généralités sur les élastomères

I.1- Introduction

Les élastomères appelés communément « caoutchouc » sont des matériaux qui couvrent un large domaine d'application (colle, étanchéité, semelle de chaussures, article sportif, automobile et particulièrement celui des pneumatiques).

Cela s'explique par les propriétés mécaniques uniques d'élasticité, d'extensibilité et leur capacité à dissiper de l'énergie. Les nombreuses formulations possibles offrent la possibilité de mettre en œuvre des matériaux très spécifiques en fonction de l'application désirée et l'obtention des formes les plus complexes. Dans ces formulations interviennent des charges qui pour leur majorité améliorent considérablement les propriétés d'usage et plus particulièrement les propriétés mécaniques (rigidité ; résistance à la rupture, dissipation d'énergies).

I.2- Historique

C'est la découverte du nouveau monde qui introduit le caoutchouc en Europe. Celui-ci est cependant connu par les indiens depuis longtemps. Le terme caoutchouc tire ses origines du mot indien " caa-o-chu" qui signifie "l'arbre qui pleure". L'image du latex (dispersion colloïdale de caoutchouc dans une solution aqueuse) coulant de l'arbre a été associée par de nombreuses civilisations au sang coulant d'un corps d'un humain blessé, d'où son caractère sacré chez les Incas, les Mayas, les Olmèques et les Aztèques. En dehors des pratiques religieuses, le caoutchouc possédait de nombreuses vertus thérapeutiques (toux chronique, maux de dents) et été utilisé pour la fabrication d'objets courants obtenus par moulage sur argile (bouteilles, seringues, bottes). Toutes ces connaissances furent perdues lors de la découverte du nouveau monde par Christophe Colomb.

Les premières applications du caoutchouc en Europe voient le jour en 1735, lorsque Charles Marie de la Condamine redécouvre, lors d'un tour du monde, la substance élastique dont il francise le nom: "caoutchouc". Il en expédie un échantillon à l'Académie des sciences de Paris. Grâce au latex, il crée des parapluies, bouteilles et seringues. En 1791, Peal dépose le premier brevet relatif au caoutchouc : l'imperméabilisation des vêtements. Faraday est le premier à déterminer le rapport carbone/hydrogène $C_{10}H_{16}$ du caoutchouc brut. Des analyses plus précises confirmeront cette formule : $(C_5H_8)_n$.

Au début du XIX^{ème} siècle, la première fabrication de caoutchouc est créée à Paris. Elle produit des bandes pour jarretières et bretelles mais qui ont pour inconvénient de devenir poisseux par temps chaud et cassantes par temps froid. L'origine de la manufacture de Michelin date de 1830 avec la construction d'un atelier de confection de balles pour enfants.

Neuf ans plus tard, son futur rival américain Goodyear s'aperçoit de l'action de la chaleur sur un mélange " caoutchouc/soufre ". Un Maintient à 150°C durant 45 minutes permet de fixer l'élasticité de la gomme tout en supprimant son adhésivité. Hancock déposera un brevet nommant ce procédé vulcanisation. C'est en 1888 que voit le jour l'industrie la plus consommatrice de caoutchouc : celle du pneumatique. Les bicyclettes sont les premières à profiter des pneumatiques développés par John Dunlop et les frères Michelin qui équiperont très rapidement tous les types de véhicules. Les deux guerres mondiales ont eu pour conséquence d'étendre les zones de production vers d'autres plantations que celles de l'Hévéa (Figure I.1), afin d'éviter les manques d'approvisionnement, mais également de développer les recherches vers des caoutchoucs synthétiques. Entre 1941 et 1945, la production de SBR (Copolymère Styrène Butadiène) passe de 230 à 731000 tonnes. Les deux chocs pétroliers de 1973 et 1979 vinrent donner un coup d'arrêt au développement exponentiel des caoutchoucs synthétiques (une hausse de 10% du prix du baril donnant une hausse de l'ordre de 5% sur celui du SBR). Il s'ensuit un véritable regain d'intérêt pour le caoutchouc naturel et de nouvelles opportunités commerciales et technologiques [1].



Figure I.1 : *Hévéa brasiliensis* [4] .

I.3- Le caoutchouc

I.3.1- L'arbre de l'Hévéa

Dans son milieu naturel en Amazonie, l'Hévéa brasiliensis est un arbre pouvant atteindre fréquemment plus de 30 m de hauteur pour une circonférence de 1 m. L'hévéa a une écorce vert grisâtre. Les feuilles sont composées de trois folioles disposées à l'extrémité d'un pétiole. L'hévéa perd ses feuilles et les renouvelle chaque année. Les feuilles se forment périodiquement, par étage à l'extrémité des unités de croissance. Les fleurs sont petites, jaune clair et rassemblées en grappes. Les fruits sont composés d'une capsule à trois loges contenant chacune une graine de 2 cm environ, ovales, de couleur brune décoré de tâches blanchâtres. On dit de ce fruit qu'il est déhiscent.



Figure I.2 : Récolte du latex [4].

I.3.2- Qu'est ce que le caoutchouc ?

Dans ce paragraphe, on décrit le processus d'élaboration du matériau. Le caoutchouc naturel (NR) est extrait d'un arbre nommé l'Hévéa Brasiliensis. Il est obtenu à partir du latex après avoir réalisé des saignées profondes dans l'écorce de l'arbre (Figure I.2). Le caoutchouc est extrait du latex après coagulation par une solution acide. On obtient des plaques qui peuvent être vendues comme latex concentré. Les zones humides et à basses altitudes où il y a de fortes précipitations constituent un cadre idéal pour la culture du latex. Utiliser ce matériau à base de latex à l'état brut pose certains problèmes d'écoulement à la température ambiante. La composition du latex est décrite par le (tableau I.1).

Le caoutchouc représente une concentration égale à 36% dans une solution aqueuse comportant des protéines, des glucides, des résines et des sels. Dans la littérature on cite deux procédés d'obtention du caoutchouc naturel à partir du latex. Le choix du procédé dépend du type de produit fabriqué :

- l'ajout de l'acide formique ou de l'acide acétique permet la coagulation de globules de caoutchouc qui peuvent être extraits de la solution aqueuse, ils font ensuite l'objet d'un traitement spécifique avant la mise en forme ;

– les moules de certains produits sont plongés dans le latex. L'ajout d'ammoniaque stabilise le latex dans son état liquide pour être traité avant le moulage.

Des travaux de recherche ont permis d'aboutir à un procédé permettant de stabiliser le matériau : c'est le procédé dit la vulcanisation. La découverte de ce procédé est à la base du développement d'un secteur industriel important. Les industriels cherchent à optimiser la composition du matériau en fonction des applications. Après le mélangeage qui consiste à ajouter les différents additifs à la gomme, des procédés de mise en forme peuvent être utilisés. Parmi ceux-ci, on cite le moulage par injection, l'extrusion de profilés et le calandrage pour l'obtention des plaques minces. [2].

Caoutchouc	36%
Protéine	1,5%
Glucides, résines, et sels	2,5%
Eau	60%

Tableau I.1 : Composition du latex indépendamment du lieu de plantation [2].

I.4- Définition des élastomères

L'élastomère présente la troisième famille des polymères, il est issu du caoutchouc naturel pour lequel on ajoute des charges et des additifs.

I.4.1- physico-chimie des élastomères

Les élastomères sont des polymères dont la température de transition vitreuse (T_g) est proche de l'ambiante. Leurs longues chaînes macromoléculaires sont typiquement reliées entre elles par des enchevêtrements, des nœuds de réticulation ou des liaisons polaires avec des charges minérales. Elles forment un réseau. Une fois réticulés, les élastomères se caractérisent par leur très grande déformabilité. Ils peuvent subir de grandes déformations réversibles avant rupture (jusqu'à 1000%). De plus, ils restent élastiques sur une gamme beaucoup plus étendue de température (-50°C à 150°C , voir même plus) comparée à celle des polymères thermoplastiques. [5].

En effet, l'étude des propriétés physiques des polymères, en fonction de la température, montre l'existence de plusieurs états de la matière (Figure. I.3) :

- **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, polyvinylyes ...etc. 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 non newtonien quasi incompressible fortement visqueux. [6]

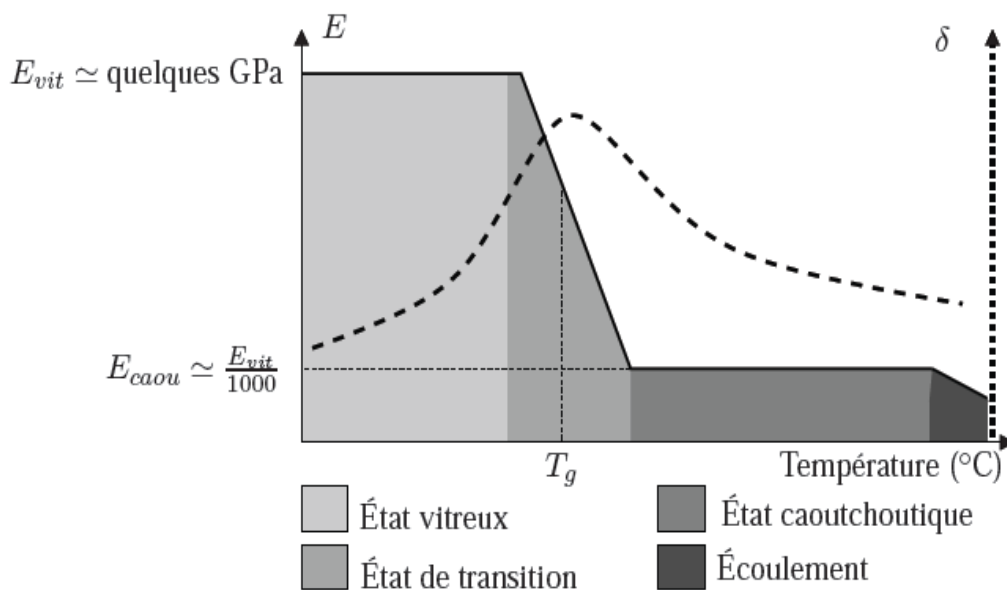


Figure I.3 : Évolution du module d'YOUNG et de l'angle de perte en fonction de la température. [6].

La classification et les propriétés caractéristiques des familles d'élastomères sont résumés dans le tableau I.2.

Famille	Nomenclature	Symbole	Tg	Propriétés caractéristiques
Caoutchoucs naturels ou Synthétiques	Caoutchouc naturel Polyisoprène	NR IR	-72oC -72oC	Bonnes propriétés mécaniques, faibles résistance à la chaleur et à l'ozone, faible tenue chimique
Caoutchoucs BUNA	Copolymère styrène-butadiène Polymère de butadiène	SBR BR	-50oC -112oC	Grande résistance à l'abrasion
Caoutchouc éthylène propylène Diène	Terpolymère éthylène-propylène-Diène	EPDM	-55oC	Excellentes propriétés élastiques, bonne tenue au vieillissement et en température, mauvaise tenue aux huiles et carburants
Caoutchouc butyle	Copolymères isobutylène-isoprène	IIR	-66oC	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	-45oC -20oC	Bonnes propriétés mécaniques, bonne tenue aux huiles et aux carburants, tenue en température limitée
Néoprène	Polychloroprène	CR	-45oC	Bonnes propriétés mécaniques, bonne tenue au vieillissement, tenue aux huiles modérées, tenue en température limitée
Silicones	Polydiméthylsiloxane Polydiméthyl-vinylméthylsiloxane Silicones fluorés	MQ VMQ FVMQ	-120oC -120oC -70oC	Haute résistance à la chaleur et au froid, faible tenue Mécanique

Tableau I.2 : Familles d'élastomères

I.4.2- Structure macromoléculaire des polymères

Les polymères (dont les élastomères font partie) sont obtenus par polymérisation de molécules à base organique identiques (les monomères). Cette réaction en chaîne consiste en l'ouverture des doubles liaisons carbone-carbone (C=C) des monomères, et la formation de nouvelles liaisons simples (C-C) entre des nouvelles molécules proches, par enchainements successifs de motifs mis bout à bout.

Par exemple :

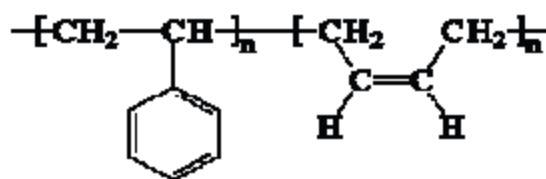


Figure I.4: Formule semi-développée du SBR

La réaction aboutit à la création de longues chaînes macroscopiques de longueurs différentes enchevêtrées de manière aléatoire. Ces chaînes forment ainsi une pelote (ou plat de spaghetti).

Les statisticiens évaluent alors que la distance entre les deux extrémités d'une même chaîne est de l'ordre de 5 à 10% de la longueur totale de la chaîne. Cet enchevêtrement physique contribue en partie à la cohésion de l'ensemble.

Une manière d'améliorer la cohésion du matériau consiste à provoquer une réticulation.

En effet, le procédé de polymérisation est en général accompagné du procédé de vulcanisation mis au point par Goodyear en 1839. Ce procédé consiste à ajouter au mélange initial des agents vulcanisants qui peuvent être du soufre, des peroxydes ou des oxydes métalliques. [7].

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

- 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 faiblement réticulés que les thermodurcissables.


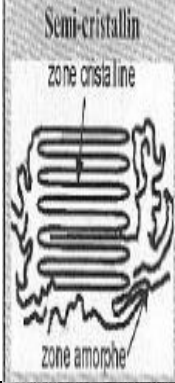
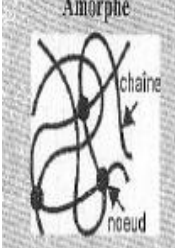

Type de polymère	Etat des molécules	Propriétés aux températures $T > T_g$	Fusion	Remarques	Origine de l'élasticité	
Thermo plastiques	 <p>Amorphe</p> <p>chaîne</p>	Linéaires (ramifiées)	<p>Souplesse variable avec la cristallinité.</p> <p>capacité importante d'allongement irréversible.</p>	<p>La phase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

Tableau I.3 : Propriétés des principaux types de polymères [8]

I.4.3- 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. [8]

I.4.4- Microstructure des matériaux élastomères

Un élastomère est un matériau hétérogène dans lequel cohabitent deux grandes familles de constituants, la matrice élastomère et les inclusions (charges, etc.). Le comportement mécanique macroscopique résulte ainsi des caractéristiques intrinsèques de chaque constituant ainsi que des interactions entre ceux-ci. Pour comprendre ce comportement, il faut donc connaître la microstructure de ces constituants.

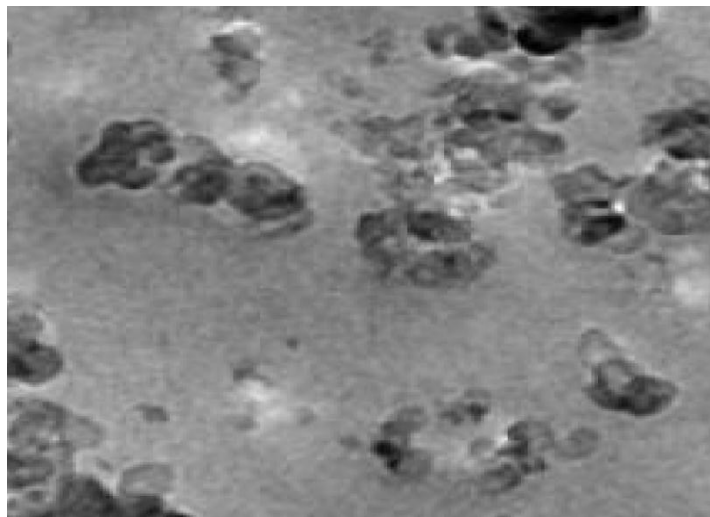


Figure I.5 : Exemple de microstructure d'un matériau élastomère observée par microscope électronique à transmission. La matrice est en gris et les charges sont en noir. [9].

I.4.5- Les différentes familles d'élastomères**I.4.5.1- Les élastomères thermodurcissables**

Sont caractérisés par l'irréversibilité des propriétés acquises, réticulables à température ambiante ou en présence de chaleur avec un catalyseur synthétique ou naturel. Ils peuvent être classés en trois familles principales :

– Les élastomères à usage général

Caractérisés par leurs propriétés élastiques, il s'agit essentiellement des caoutchoucs naturels ou synthétiques (NR ou IR), des SBR, des polymères de butadiène (BR). Ils sont utilisés pour diverses applications dans l'industrie automobile telles que les pneumatiques, supports moteurs, balais d'essuie-glaces ; ou pour le bâtiment (étanchéité de toitures, câblerie, adhésifs, tuyaux...) ; ou encore pour le grand public telles que gants de ménage et de chirurgie, tétines, préservatifs, tapis de sol...

– Les élastomères à usages spéciaux

Pour des applications requérant des propriétés particulières telles que la résistance aux liquides agressifs (solvants, acides, huiles...), une stabilité vis-à-vis des hautes et basses températures et une bonne tenue au vieillissement. Ils sont utilisés dans divers secteurs d'activités (industrie pharmaceutique, nucléaire, automobile, aéronautique...)

– Les élastomères à usages très spéciaux

Qui présentent d'excellentes tenues chimiques et thermiques, essentiellement utilisés en industries aéronautiques et spatiales, ainsi que dans l'industrie chimique.

I.4.5.2- Les élastomères thermoplastiques

Sont constitués d'une phase souple, un élastomère associé chimiquement à une phase rigide, un thermoplastique (Ex : Polyéthylène, polystyrène, polyuréthane ou polyester). Pour leur mise en œuvre, ils ont un comportement similaire à celui des matières plastiques (déformables à chaud), avec les mêmes avantages tels que la facilité de transformation et la récupération des déchets et rebuts [13].

I.4.6- Vulcanisation et réticulation dans un élastomère

Les chaînes macromoléculaires sont liées entre elles par des liaisons secondaires de type van der Waals d'énergie faible. De ce fait, le caoutchouc naturel a un caractère de fluide très visqueux.

A l'état naturel et suite à une sollicitation, l'écoulement des chaînes les unes par rapport aux autres est inévitable. La découverte de Ch. Good Year (1839) du procédé de réticulation par le soufre, appelé vulcanisation, a permis la stabilisation du caoutchouc naturel afin de rendre son utilisation possible dans diverses applications.

Des agents accélérateurs de vulcanisation sont aussi utilisés avec le soufre tels que les amines ou les guanidines. La réticulation permet la création de liaisons chimiques fortes entre les chaînes macromoléculaires donnant naissance à un réseau tridimensionnel stable. La vulcanisation et les enchevêtrements moléculaires assurent la cohésion du matériau permettant aussi d'éviter le glissement entre chaînes tout en conservant leur flexibilité. La distance moyenne entre deux jonctions est un paramètre qui peut aussi donner une idée sur le taux de réticulation. Plus cette distance est faible, plus le nombre de ponts de jonction est important. La vulcanisation s'effectue à une température entre 150 et 200 degrés pendant une faible durée. C'est après la vulcanisation qu'on aboutit à un réseau tridimensionnel. [10].

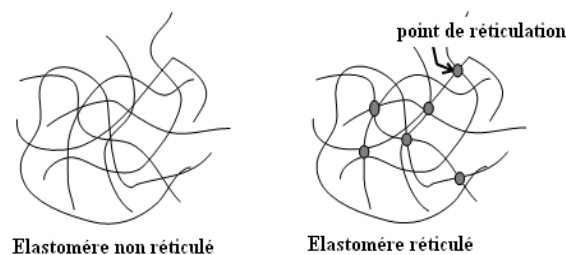


Figure I.6 : La réticulation des élastomères [10]

I.4.7- Température de transition vitreuse

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

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.7).

Les élastomères sont des polymères avec une température de transition vitreuse inférieure à la température ambiante.

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.

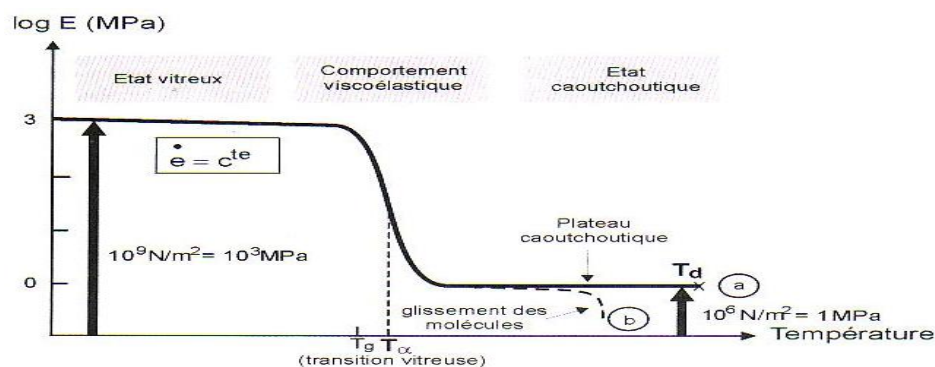


Figure I.7 : Évolution du module élastique en fonction de la température pour une vitesse de refroidissement donnée [8].

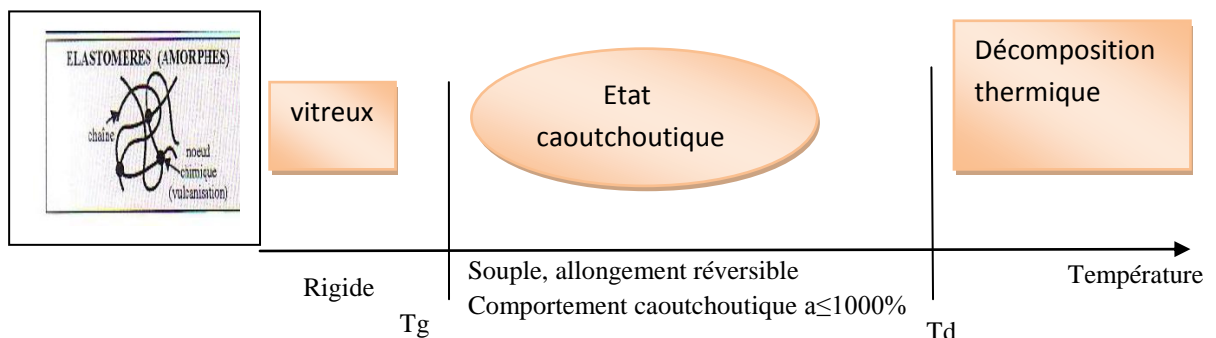


Figure I.8: Etat d'un élastomère en fonction des domaines d'état structural ou de la température [8].

I.5- Mise en œuvre d'élastomère chargé

I.5.1- Les additifs

I.5.1.1- Les charges

Les charges jouent un rôle prépondérant pour l'utilisation des élastomères. Ce sont des particules capables de diminuer le coût du matériau, mais aussi et surtout d'améliorer ses performances (en termes de comportement mécanique). Cette amélioration résulte des interactions entre les charges et la matrice, mais aussi des caractéristiques intrinsèques des charges (taille, morphologie, surface spécifique, activité chimique de surface). Il existe sur le marché plusieurs dizaines de familles de charges, subdivisées en un nombre important de variétés, d'origines, de compositions et de traitements différents.

On peut cependant classer ces charges en trois grandes catégories :

- **les charges renforçantes** : le noir de carbone et la silice (notées respectivement NdC et si par la suite).
- **les charges semi-renforçantes** : le kaolin, le noir de carbone sous forme d'agrégats de grande taille, etc.
- **les charges de dilution (ou charges inertes)** : la craie, le talc, etc.

De ces trois grandes familles, les charges renforçantes sont les plus utilisées.

Elles peuvent se trouver dans la matière sous différentes tailles caractéristiques (figure I.9) qui n'ont pas le même rôle renforçant sur le comportement. Plus la particule est de petite dimension, plus son caractère renforçant est marqué (la surface spécifique est inversement proportionnelle à la taille des particules). [9].

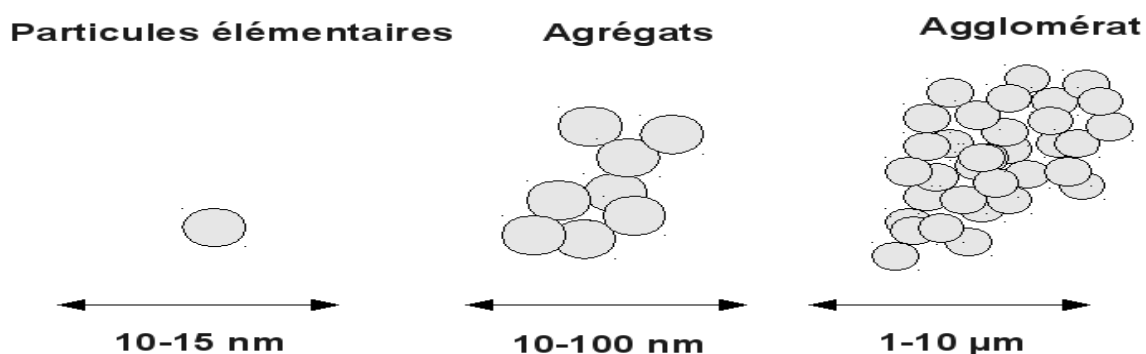


Figure I.9 : Différentes échelles de taille des charges [10].

- Les charges de silice

On distingue deux catégories : la silice naturelle et synthétique. La silice naturelle est issue des roches formées par sédimentation d'organismes variés. Dans le cas synthétique, on trouve essentiellement deux familles de silice :

- la silice précipitée obtenue en milieu aqueux par l'action d'un acide. C'est la plus répandue dans le renforcement des élastomères ;
- la silice thermique obtenue par réduction à haute température du tétrachlorure de silicium et oxydation du silicium de silice.

Le procédé de réduction chimique à haute température permet d'obtenir des silices ayant différentes caractéristiques du point de vue surface spécifique, taille des particules et présence d'agglomération en agissant sur la concentration en tétrachlorure de silicium, la température de fusion et le temps de la réaction. [10]

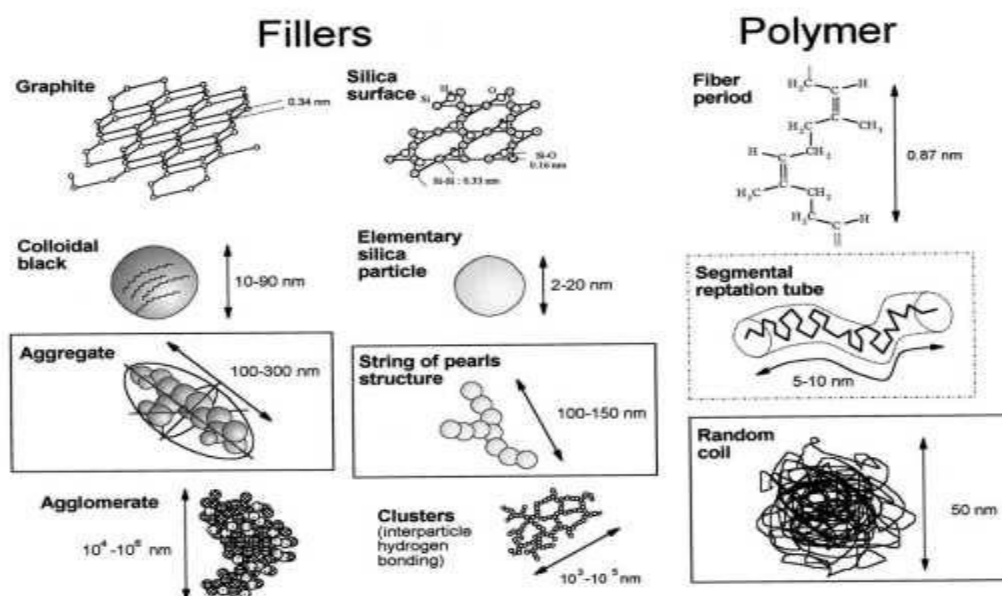


Figure I.10 : Différentes structures des charges [10].

Selon le procédé de mise en œuvre, les particules de silice peuvent former différentes structures à différentes échelles. On peut trouver la particule de silice comme structure primaire, ou comme agrégat dont la taille peut aller de 40nm à 100nm.

Le regroupement de ces agrégats donne naissance à un agglomérat. Les agrégats sont liés entre eux par des liaisons faibles de type van der Waals. La taille d'un agglomérat varie de quelques centaines de nanomètres à 200 micromètres. (Voir figure I.10).

Quand les interactions entre les particules formant l'agrégat sont très fortes, on n'obtient pas une bonne dispersion de la silice dans la matrice. Les charges de silice peuvent faire l'objet d'un traitement de surface durant lequel on recourt parfois à des agents de couplage pour créer des liaisons covalentes de type matrice-charge. Ce traitement influe essentiellement sur les interactions charge-charge et charge-matrice.

Un moyen pour traduire le niveau d'interaction matrice-charge est de déterminer le taux de l'élastomère lié (cette notion est définie par la suite). La morphologie de la silice est très proche de celle du noir de carbone, c'est la nature chimique qui les distingue. L'interaction du noir de carbone avec la matrice élastomérique est spontanée alors qu'il faut un agent de couplage dans le cas de silice. Le silane est l'agent de couplage communément utilisé pour assurer la compatibilité entre les propriétés surfaciques de la silice et les chaînes d'élastomère.

- Les charges de noir de carbone

Les charges de noirs de carbone sont très utilisées pour les pneumatiques, elles sont obtenues par combustion incomplète d'hydrocarbures. Comme pour la silice, ces charges se présentent sous différentes formes : particules, agrégats et agglomérats. La particule de noir de carbone peut être assimilée à une sphère dont la taille varie de 10 à 45nm. Généralement, une particule de noir de carbone a tendance à interagir avec une autre particule pour former un agrégat.

Cette interaction entre les particules au sein d'un agrégat dépend essentiellement du procédé de fabrication (mélangeage).

La taille d'un agrégat de noir de carbone varie entre 100 et 200nm. Le nombre de particules par agrégat varie entre 20 et 200 particules.

Les propriétés chimiques du noir de carbone et de la matrice élastomérique sont similaires de sorte que l'incorporation de ces charges dans la matrice est aisée [11].

I.5.1.2- Les paramètres qui permettent de caractériser les charges

- **La surface spécifique** : C'est la surface développée de la charge par unité de masse. Plus la taille de la particule est petite, plus la surface spécifique est grande. Elle est de 10 à 40m²/g pour les kaolins, de quelques m²/g à 150m²/g pour les noirs de carbone et elle peut atteindre 400m²/g pour certaines silices. De manière général, plus la surface spécifique est grande, plus le renforcement potentiel est important.

- **La structure** : Elle se définit selon les différentes échelles de taille. La structure primaire de la plupart des charges nanométriques découle du regroupement lors de la synthèse de particules élémentaires sous forme d'agrégat indivisible. Une attraction plus faible existe aussi entre les agrégats conduisant à la formation d'une structure secondaire sous forme d'agglomérats. La structure secondaire est destructible sous l'effet d'une action mécanique comme par exemple lors du malaxage ou au cours de sollicitations.

- **L'activité chimique de la surface** : Elle permet de contrôler la compatibilité (dispersion et formations d'interactions) entre la charge et la matrice. L'énergie de surface détermine les interactions charge-charge et polymère-charge. Les noirs de carbone s'incorporent très facilement dans les élastomères hydrocarbonés du fait de leurs natures chimiques proches, comme la silice dans les silicones. Dans le cas de la silice, son incorporation au sein d'élastomères hydrocarbonés nécessite généralement l'utilisation d'un traitement de surface afin d'améliorer leur compatibilité.

Ces trois paramètres caractéristiques des charges vont être déterminants lors de l'incorporation et la dispersion de la charge au sein de la matrice. Ainsi, dans le cas de charges avec une grande surface spécifique et une structure élevée, une bonne dispersion nécessite un très fort cisaillement du mélange lors de la mise en œuvre.

I.5.1.3- Les agents de protection

Les agents de protection ont pour but d'éviter toute dégradation prématurée de l'élastomère qui pourrait engendrer une modification des propriétés du matériau au cours de l'utilisation ou du stockage, ainsi qu'une modification de l'aspect du produit (apparition de craquelures, changement de teinte).

Ils peuvent être de nature chimique ou physique. Le rôle des agents chimiques est de réagir avec les produits dégradants (comme les amines aromatiques et dérivés phénoliques pour l'O₂ ou les paraphénylènes diamines pour l'O₃) ou d'interférer dans la réaction en chaîne qui conduirait à la dégradation du matériau (comme les dérivés aminés ou les phénols pour l'O₂). Celui des agents physiques est de migrer en surface du matériau afin d'agir en tant que barrière à l'attaque des produits dégradants (comme les cires pour l'O₃). L'action d'un agent peut être très spécifique vis-à-vis de la source de dégradation (oxygène, ozone, rayonnement UV, etc.), ce qui conduit généralement à utiliser plusieurs agents de protection [9].

I.5.1.4- Les plastifiants

Les plastifiants ont pour but d'améliorer l'opération de mélangeage des différents constituants du matériau et/ou de faciliter la mise en œuvre du produit en augmentant la mobilité des chaînes macromoléculaires (diminuer la viscosité du mélange).

Ils servent également à ajuster les propriétés du matériau puisque leur influence se fait sentir sur le comportement mécanique, en particulier sur la température de transition vitreuse et la raideur du matériau (elle diminue à mesure que l'on augmente la teneur en plastifiants).

Ils peuvent en revanche dégrader la tenue au vieillissement du mélange. En fonction de leur compatibilité avec la matrice et de l'environnement dans lequel se trouve le matériau, les plastifiants peuvent exsuder du mélange et donner un aspect huileux à la surface de la pièce [9].

I.6- Mise en forme d'élastomère

Une fois réalisés, les mélanges sont ensuite mis en forme pour la vulcanisation. Cette mise en forme est souvent réalisée par moulage de type :

- **compression** : où le mélange est placé dans une empreinte puis comprimé par la fermeture du moule.
- **transfert** : où la matière est placée dans un volume auxiliaire puis poussé, lors de la fermeture du moule, pour prendre la forme de l'empreinte ;

– **injection** : où la matière est réchauffée par passage dans une extrudeuse et injectée dans le moule fermé.

D'autres techniques de mise en forme sont utilisées selon la nature des produits manufacturés, nous pouvons citer :

– **l'extrusion** : adaptée aux profilés de grandes longueurs. Elle consiste à faire passer la matière sous forte pression dans une filière dont la section interne conditionne la forme du profilé.

– **le calandrage** : destiné à la production de feuilles continues, est relativement similaire au procédé de laminage des métaux. [13].

I.7- Les défauts dans les élastomères

La fabrication des pièces en caoutchouc résulte d'un ensemble de processus rarement automatisé alors que l'assurance qualité nécessite un contrôle et une stabilité rigoureuse des conditions de fabrication une modification de la durée ou de la température de vulcanisation ,une erreur dans la pesée ou dans la chronologie d'introduction des ingrédients, un non respect du poids minimum des ébauches, une préparation insuffisante des subjectiles peuvent se révéler très préjudiciables au comportement de la pièce en service .la rédaction à la commande d'un cahier des charges décrivant les conditions d'exploitation des pièces , ainsi que les propriétés exigées, permet au façonnier de mieux répondre à la demande et de prévoir les conditions adéquates de fabrication.

L'attention sera portée sur les moyens de détection des défauts en relation avec les dysfonctionnements à la mise en œuvre ; elle comprend ici tout ce qui concerne les opérations de fabrication (mélange, moulage), elle ne remet pas en cause la définition du produit résultant d'une qualification antérieure répondant aux exigences de fonctionnement [3].

I.8- Propriétés mécaniques des élastomères

Les élastomères se distinguent par cinq grands phénomènes mécaniques macroscopiques dont les origines ne sont toujours pas clairement identifiées.

Ces phénomènes sont : l'effet Mullins, l'élasticité caoutchouteuse, la viscoélasticité, l'amplification des déformations et l'effet payne.

Nous ne rentrerons pas en détails dans ces phénomènes, nous allons juste les définir.

I.8.1- L'élasticité caoutchique-cristallisation sous contraintes

Les élastomères sont caractérisés par trois comportements essentiels :

➤ **Resistance a 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.11) 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 d'élasticité caoutchoutique**

Grasse à 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.12) représente un essai de traction du type charge/décharge sur le matériau chargé au noir de carbone. 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.

➤ **cristallisation sous contraintes**

On peut vérifier qu'un matériau ne se cristallise pas sous contrainte, en réalisant des essais avec plusieurs cycles d'amplitude croissante : si le comportement du matériau rejoignent la courbe de comportement du matériau non-cyclé alors le matériau est non cristallisant (figure I.13 et figure I.14) sinon il est cristallisant.

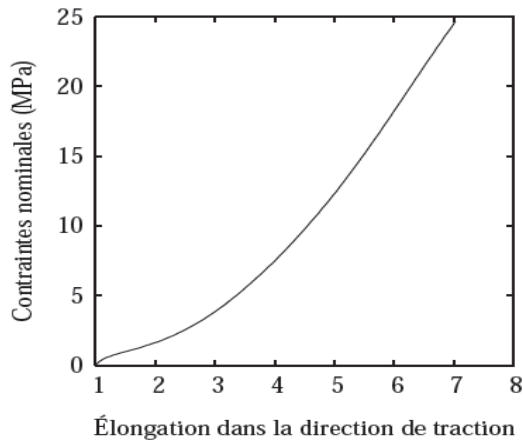


Figure I.11 : courbe de traction a rupture [6].

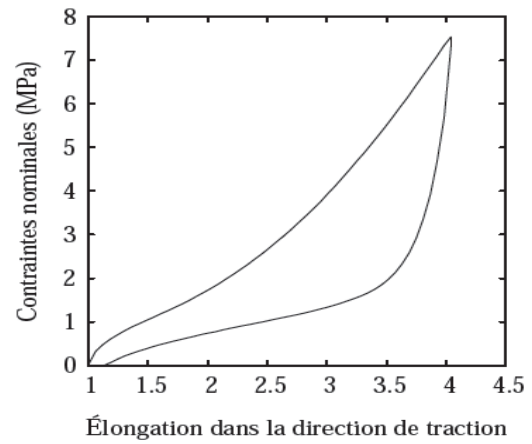


Figure I.12 : essai de traction de type charge /décharge [6].

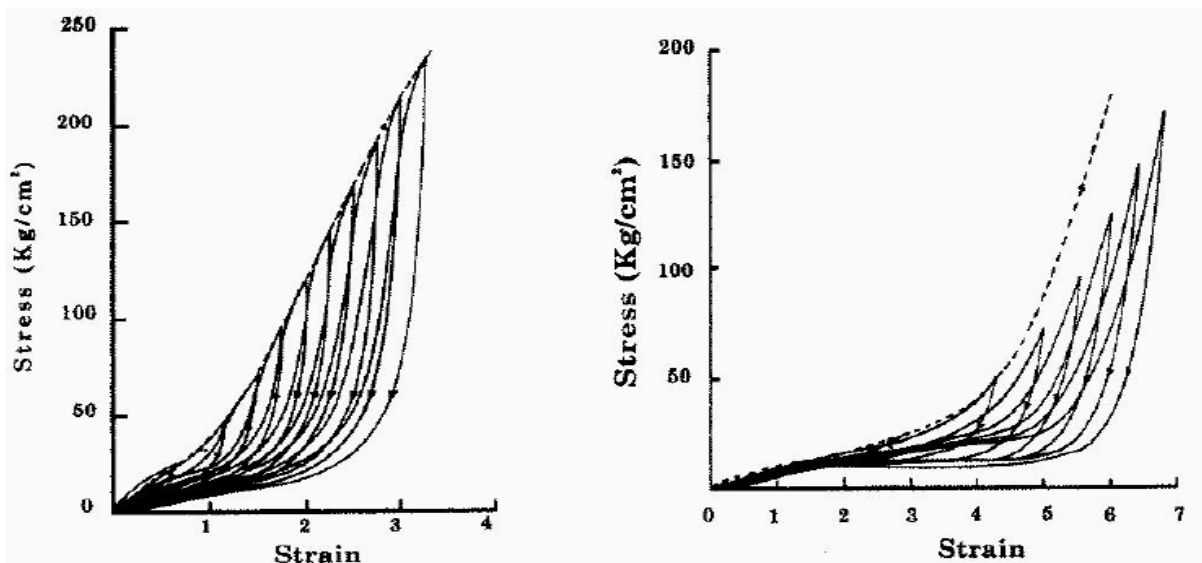


Figure I.13– Stabilisation d'un SBR non cristallisant et d'un NR cristallisant [HMP67]. La courbe en pointillés représente le comportement du matériau non-cyclé. [6]

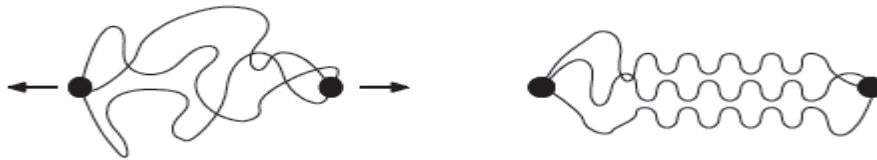


Figure. I.14 : Crystallisation sous contrainte [14].

I.8.2- 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.15).
- Le second, à court terme, est un comportement hystérétique sous chargement cyclique comme le montre la (figure I.16).

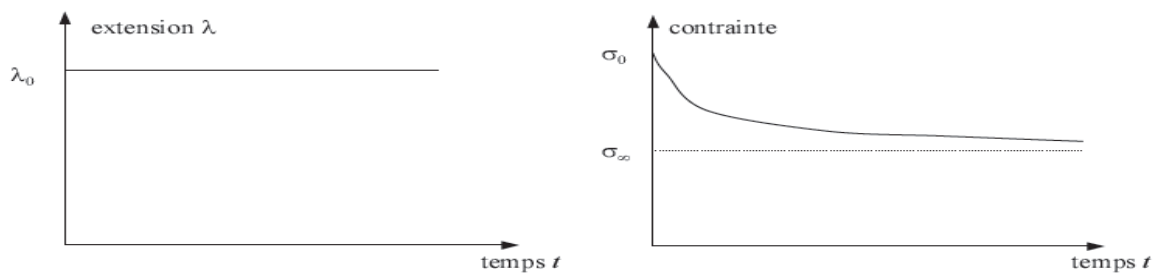


Figure I.15 : Phénomène de relaxation [7]

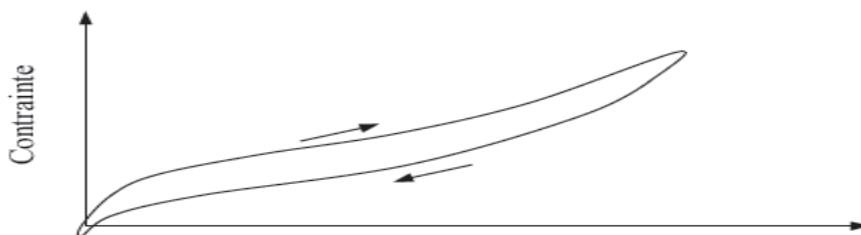


Figure I.16 : Courbe d'hystérésis d'un élastomère [7]

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 [7].

I.8.3- L'hystérésis

L'hystérésis est le retard que présente le matériau pour retrouver sa géométrie initiale.

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 la (figure I.17). Il est montré que l'hystérésis croît lorsque la température diminue ou lorsque la déformation augmente. Ce phénomène dissipatif est aussi en fonction de la structure du matériau (taux de cristallisation, nombre de liaisons secondaires, ...). [8].

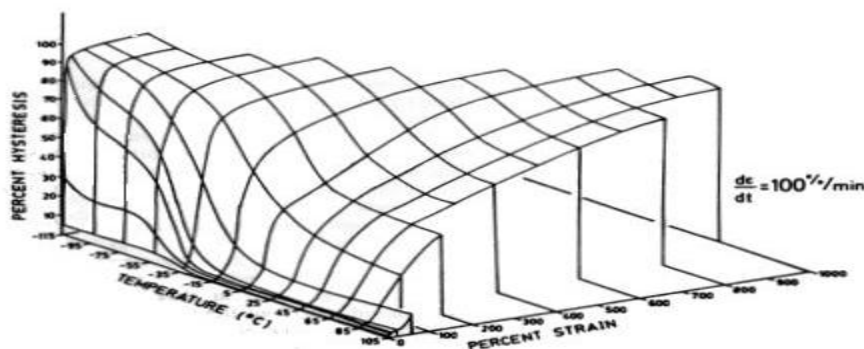


Figure I.17 : Variation de l'hystérésis pour un thermoplastique en fonction de la déformation et de la température [8].

I.8.4- L'amplification des déformations

Comme nous l'avons signalé plus haut, la présence de noirs de carbone peut provoquer des amplifications de déformations par effet composite.

La plupart des théories dérivent des travaux d'Einstein [EIN 06] sur les particules en suspension dans un liquide.

Elles considèrent que les déformations macroscopiques peuvent être décomposées en déformations des charges. [7].

I.8.5- Effet Mullins

Après une première sollicitation sur le matériau on remarque un adoucissement de son comportement. Une autre terminologie est utilisée pour désigner ce phénomène : l'accommodation. Dès le premier cycle de chargement, l'adoucissement apparaît. Il se stabilise après trois ou quatre cycles (voir figure I.18). Ce phénomène a été étudié pour la première fois par Mullins (1947).

L'effet Mullins se manifeste plus ou moins fortement pour tous les élastomères chargés ou non chargés. Diverses explications sont proposées. Certains l'associent à un endommagement des liaisons entre les chaînes ou une rupture des liaisons à faible énergie. D'autres proposent des modèles phénoménologiques sans interprétation micromécanique. (La figure I.19) est une schématisation traduisant à l'échelle microscopique l'origine de l'effet Mullins. [10].

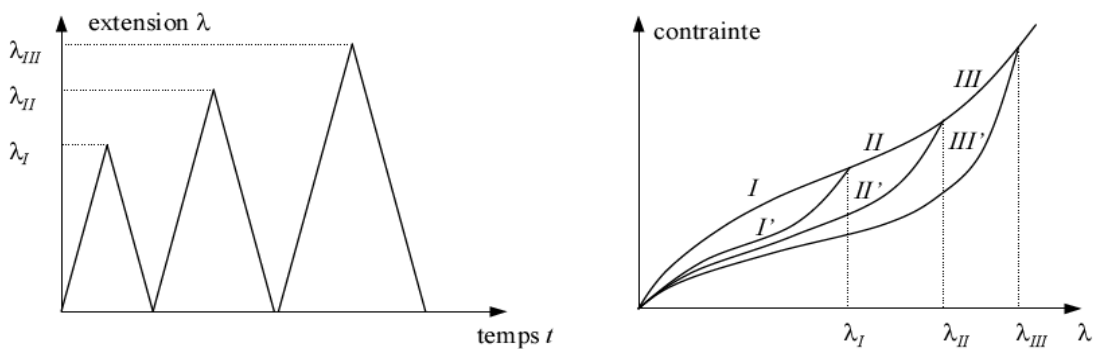


Figure I.18 : Effet Mullins

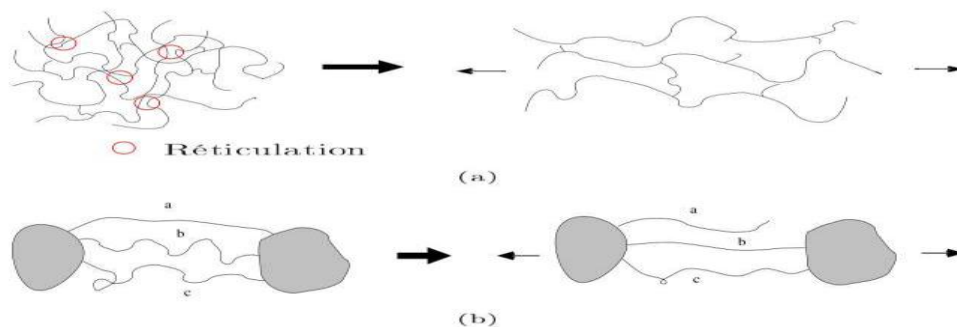


Figure I.19 : Interprétation microscopique de l'effet Mullins [10].

La transformation d'une phase dite « dure » en une phase dite « molle » dans l'élastomère est à l'origine de cet adoucissement de contraintes dès les premiers cycles de chargement.

Ce phénomène peut être expliqué également par le glissement des chaînes d'élastomère au niveau de la surface des charges.

I.8.6 -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 de l'élastomère. 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.20), 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 [2].

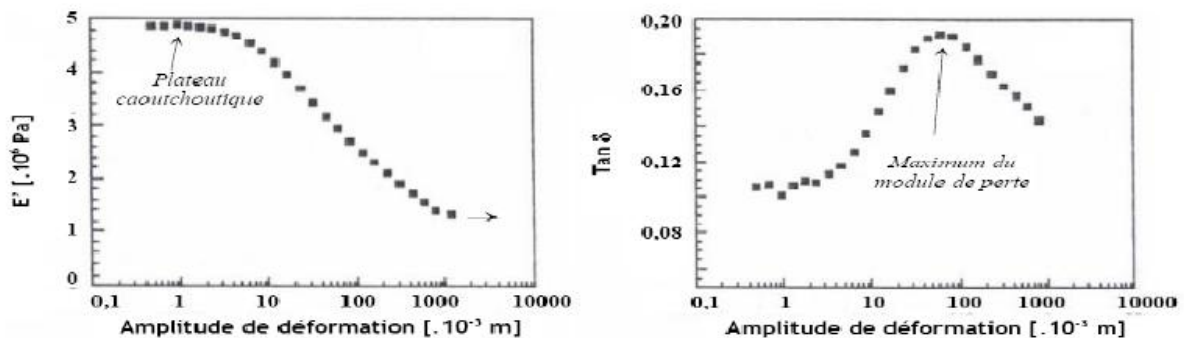


Figure. I.20 : Analyse de l'effet de Payne, évolution de propriétés mécaniques en fonction du niveau de déformation pour un élastomère SBR renforcé en silice [2].

I.9- Domaines d'utilisation

L'industrie de transformation des élastomères occupe une place de plus en plus importante dans l'économie mondiale. La production annuelle des caoutchoucs naturels ou synthétique dépasse les 20 millions de tonnes dans le monde, dont 24% en Europe. Grâce à leurs propriétés d'élasticité, d'imperméabilité et d'amortissement, l'utilisation des élastomères s'est donc généralisée à divers secteurs de l'industrie, tels que :

- **L'industrie automobile** : représente plus de 75% de la consommation mondiale d'élastomères, avec les joints extrudés, les courroies de transmissions, les durites, les supports moteurs, les balais d'essuie-glace... et surtout la production de pneumatiques qui consomme à elle seule 63% de la production mondiale d'élastomères ;
- **L'industrie aéronautique et spatiale** : pour des pièces techniques, généralement composites et jouant le rôle de liaisons élastiques et/ou systèmes antivibratoires, comme par exemple : les butées spheriflex (structures lamifiés élastomère-métal) et/ou les amortisseurs de traînée pour les rotors d'hélicoptères, ainsi que les systèmes lamifiés DIAS reliant les boosters au corps central de la fusée Ariane V.
- **Le secteur BTP** : avec les appuis de pont et les systèmes d'isolation antisismiques, utilisés notamment dans la construction des centrales nucléaires.
- **L'habillement, et en particulier l'industrie des chaussures** : (bottes, semelles, chaussures de sport...) qui, avec un siècle et demi d'existence, reste l'une des premières applications du caoutchouc.
- **Dans les domaines de l'industrie médicale et pharmaceutique** : on utilise d'une part, des élastomères répondant à des exigences de pureté et biocompatibilité (principalement les silicones et les polyuréthanes, pour la conception d'articles tels que les prothèses, les éléments d'organes artificiels) et d'autre part, pour le conditionnement avec des critères d'élasticité et d'inertie chimique (caoutchoucs naturels et caoutchoucs butyles).
- **Dans d'autres secteurs** : pour l'étanchéité, les revêtements anti-corrosion, tubes et tuyaux, les colles et mastics... [13]

Catégorie	Élastomères	Caractéristiques	Secteur	Applications
Élastomères à usages généraux	NR, IR, SBR, BR...	Excellentes propriétés élastiques, Résistance chimique	Automobile Bâtiments Public	Pneumatiques, Support moteurs, balais d'essuie glaces.. Étanchéité de toitures, câblerie, adhésifs, tuyaux. gants de ménage et de chirurgie, tétines, préservatifs, tapis de sol...
Élastomères à usages spéciaux	EPDM, IIR, CR, NBR...	Résistance aux liquides agressifs, stabilité vis-à-vis de la température, bonne tenue au vieillissement.	Automobile BTP Pharmacie.. Aéronautique	Amortisseurs, joints de vitrage, courroies, durites. Joints, tuyaux, isolations de câbles. Bouchons. Réservoirs souples.
Élastomères à usages très spéciaux	Silicone, Élastomères Fluorés	Excellentes tenues chimiques et thermiques.	Automobile Aéronautique	Fils d'allumage, bagues d'étanchéité Joints, pièces techniques

Tableau I.4 : Utilisations des élastomères [13].

I.10- Conclusion

De par leur composition et leur élaboration (relevant bien souvent du secret industriel) les matériaux élastomères sont constitués d'une microstructure complexe et représentent un panel complet de comportements mécaniques : de l'élasticité, de la viscosité, de la plasticité, de l'endommagement... Ceux-ci peuvent être plus ou moins accentués en fonction du chargement mécanique et de l'environnement (température, atmosphère...).

Chapitre II

La tribologie des élastomères

II.1-Introduction

La « tribologie » s'intéresse aux contacts entre les surfaces en interactions statiques ou dynamiques, au frottement, à l'usure. Elle a été officialisée en 1967 par un comité de « l'Organisation pour la Coopération et le Développement Economique » qui a été, en quelque sorte, un précurseur du développement durable.

En effet, l'une des motivations principales du regroupement des connaissances et activités portant sur les sujets cités ci-dessus en une discipline unique a été déclenchée par des analyses sur l'impact économique du frottement et de l'usure.

L'usure est l'une des causes majeures de la destruction des matériaux et des pertes de performances mécaniques des équipements. Toute réduction de l'usure peut non seulement conduire à des économies importantes de matières, mais également à contribuer d'une part à la protection de l'environnement en limitant les émissions de particules contenant des éléments nocifs et d'autre part à limiter la dispersion d'équipements hors service...corrélativement, les réductions d'usure auront un impact direct sur la fiabilité et la longévité des mécanismes, ce qui engendre à la fois une meilleure sûreté de fonctionnement et une réduction d'énergie en allongeant les période de renouvellement des composants usagés.

Le frottement, de son côté, est l'une des principales causes d'usure et de dissipation d'énergies dans les systèmes mécaniques. Une meilleure maîtrise du frottement peut permettre des économies importantes d'énergies. On estime, en effet, qu'un tiers environ de l'énergie utilisée dans le monde est mis en œuvre pour vaincre les frottements sous une forme ou une autre.

La lubrification est l'un des moyens les plus efficaces actuellement connus pour réduire le frottement et contrôler l'usure, elle consiste à créer entre les surfaces en mouvement un film mince (entre 0.1et 100 μ m en général) de gaz ,liquide, ou solide ayant une résistance au cisaillement la plus faible possible, ce film assurera la séparation des surfaces et facilitera le mouvement en dépensant le minimum d'énergie possible et en prévenant les endommagement.

La mise en œuvre et le contrôle de ces couches constitue un champ d'intervention important de la tribologie.

II.2-Le système tribologique

Un système tribologique se définit comme un système mécanique, formé de deux matériaux antagonistes en contact A et B (premiers corps) animés d'un mouvement relatif, et le milieu inter facial I désigné sous forme de troisième corps. Ce troisième corps sépare partiellement ou totalement les deux matériaux en contact et possède des propriétés différentes de celles de ces deux derniers.

L'origine de ce milieu inter facial peut être externe (lubrifiant solide ou liquide) ou interne par formation de débris (détachement de particules des premiers corps).

Ce tribosystème se trouve dans un environnement E (Figure II.1) qui constitue l'ambiance de fonctionnement.

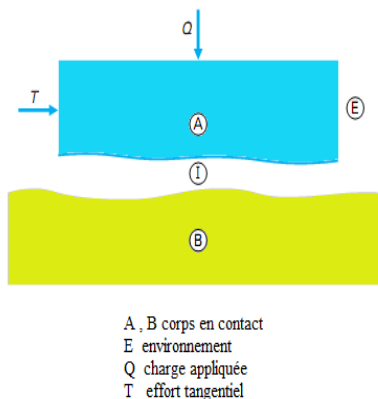


Figure II.1: Principaux éléments du contact tribologique [19].

II.3- Concept du troisième corps

Le concept du troisième corps en tribologie a été introduit par [Godet] au cours des années 70 élaboré suite à des observations expérimentales. Le troisième corps est un opérateur séparant les deux premiers corps et transmet les efforts en accommodant la plus grande partie de leur différence en vitesse.

II.3.1-Le triplet tribologique

Le triplet tribologique est constitué par trois éléments, le mécanisme, les deux premiers corps et le troisième corps. Il permet de décrire les interactions entre les différents éléments qui entourent le contact. [15]

- Le mécanisme

C'est l'ensemble du système mécanique qui impose les conditions de fonctionnement des contacts en leur transmettant les charges statiques ou dynamiques et en leur imposant la cinématique et l'ambiance contenant le mécanisme.

- Les premiers corps

Ce sont les matériaux délimitant le contact et à travers lesquels les efforts sont transmis. Ils interviennent par leurs structures et leurs propriétés thermomécaniques, en induisant des déformations qui à leur tour définissent la zone de contact élémentaire.

- Le troisième corps

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

II.3.2- Le circuit tribologique

Le circuit tribologique décrit les différents écoulements du troisième corps dans un contact. C'est un concept proposé par Berthier pour comprendre la relation entre le troisième corps et l'usure dans un contact donné.

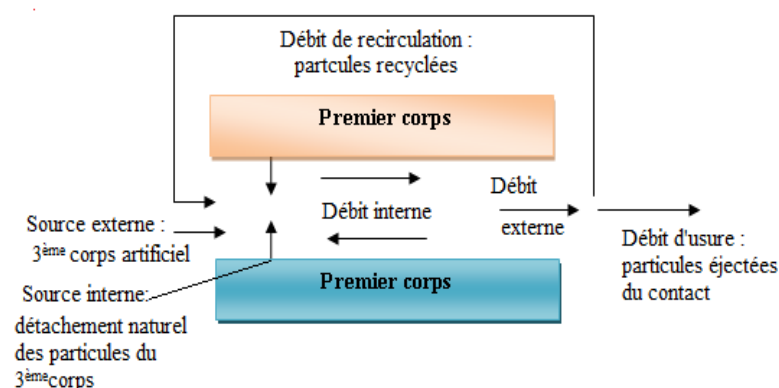


Figure II.2: Représentation schématique du circuit tribologique

Le détachement de particules des premiers corps (débit source interne) du fait de leur dégradation alimente le contact en troisième corps dont le mouvement se traduit par le débit interne.

Dans le cas de la lubrification liquide ou solide (troisième corps artificiel), il faut tenir compte de l'élément artificiel apporté au système tribologique que l'on traduit par le débit source externe.

Les particules peuvent être piégées dans le contact, on parlera alors de débit interne ou éjectées du contact alors c'est le débit externe qui se partage à son tour en un débit de recyclage qui permet la réalimentation du contact et un débit d'usure qui concerne les particules définitivement perdues par le système tribologique.

Dans cette approche, Elle est représentée par la sortie des particules hors du contact, qui deviennent alors des particules (débris) d'usure. Tant que les particules restent dans le contact, elles peuvent avoir un rôle actif à jouer (supporter les charges, accommoder les vitesses,...).

II.4-Importance de la tribologie

On observe des phénomènes de frottement dans tous les systèmes mécaniques, et cette composante tribologique est décisive dans les domaines d'application variés qui vont de la mécanique industrielle aux systèmes du vivant.

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

- Assurer le bon fonctionnement et la fiabilité des machines.
- Diminuer le coût d'obtention des surfaces frottantes.
- Améliorer le rendement et la longévité des machines.
- Assurer la sécurité des biens et des personnes, particulièrement dans le domaine de transport.
- Contribuer à la santé publique et au confort, par exemple en diminuant les bruits, très nombreux, liés aux contacts mécaniques.

Le tableau I.1 suivant montre que la tribologie trouve ses applications dans deux grands domaines: celui des systèmes mécaniques et celui de la mise en œuvre des matériaux.

Systèmes mécaniques	Mise en œuvre des matériaux
<p>Vivant: animal, homme - Membranes biologiques, Prothèses biomécaniques Cartilages, Dentisterie</p> <p>Organes de machines - Paliers, roulements, Segments, Cames, engrenages, freins, Joints, Systèmes électriques, Systèmes magnétiques</p> <p>Terre Génie civil, Mouvements des sols, Tremblements de terre, Ecoulement des glaciers, Ski</p> <p>Maintenance Fiabilité, Durée de vie</p>	<p>Types de matériaux - Artificiels: métaux, polymères - Céramiques, Composites - Naturels</p> <p>Adhérence, collage - Composites, textiles, fibres matrices</p> <p>Déformations plastiques - Laminage, filage, extrusion - Emboutissage, découpage - Outillages de coupe, polissage</p> <p>Lubrifiants</p> <p>Traitements des surfaces</p>

Tableau II.1: Impacts de la tribologie sur la société [16].

II.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 3).

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

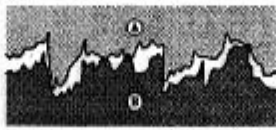
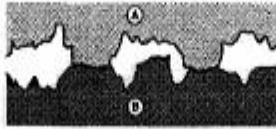
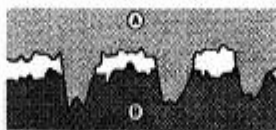

Effets		Schématisation du contact (rugosité, défauts de forme...)	Incidences prévisibles sur le frottement
Imbrication			<ul style="list-style-type: none"> - Résistance au déplacement - Déformations, ruptures... des aspérités
Déformations élastiques, plastiques	Cas général		<ul style="list-style-type: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

Figure II.3 : rapprochement des solides : effets et conséquences [17].

II.6- Contacts surfacique et hertzien

II.6.1- Contact surfacique

Le contact surfacique met en œuvre des surfaces en conformité, telles que plan sur plan, cylindre dans cylindre. Le calcul de la pression de contact p repose dans ce cas sur l'utilisation du rapport simple entre la charge Q et l'aire d'appui S :

$$p = \frac{Q}{S} \tag{II.1}$$

Dans le cas particulier d'un contact surfacique non plan (paliers cylindriques, rotules...), la surface prise en compte est la surface dite « projetée » ; dans ces exemples, elle correspond respectivement à :

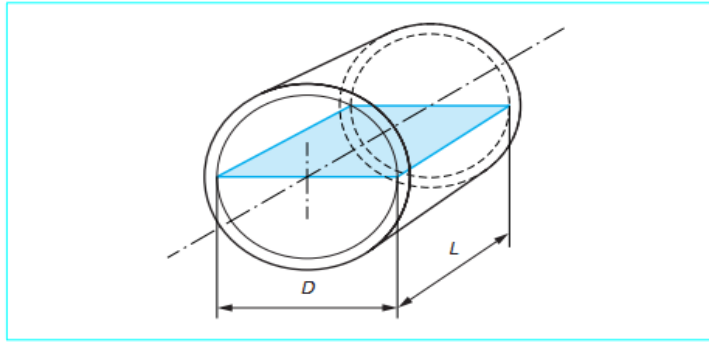


Figure II.4 : Surface projetée d'un palier [19].

$$D \cdot L \text{ Ou } \frac{\pi D^2}{4} \quad (\text{VII.2})$$

Avec : D diamètre du palier ou de la rotule

L longueur du palier.

Ce calcul ne donne qu'une vision très approximative des choses puisqu'il ne prend pas en compte :

- les défauts géométriques de forme, qui conduisent en fait à un petit nombre de points de contact.
- le jeu réel de fonctionnement dans le cas particulier des paliers et rotules.

II.6.2- Contact hertzien

- Le contact hertzien concerne toutes les situations où les contacts ne sont pas « surfaciques », c'est-à-dire où l'aire (théorique) d'appui est limitée à un point, une génératrice... Il s'agit par exemple des contacts mettant en jeu les géométries suivantes : bille/plan, cylindre/plan, cylindre/cylindre.

Il s'applique également aux cas des paliers, rotules qui ne peuvent plus être considérés comme

« Surfaciques » dès lors que le jeu fonctionnel dépasse un certain seuil.

- Sous l'effet du chargement, les solides en présence se déforment élastiquement, l'aire de contact pouvant être :

- elliptique (cas général des surfaces de forme quelconque).

- rectangulaire (contacts cylindre/plan – cylindre/cylindre à axes parallèles).
- circulaire (contact bille/plan) [19].

II.7-Frottement des élastomères

Le frottement des élastomères diffère de nombreuses façons du frottement des autres solides. Ceci s'explique notamment par leur très faible module élastique et leur frottement interne ($\tan \delta$) élevé sur une large gamme de fréquence [Person.2001].

En effet les élastomères n'obéissent que très rarement aux lois classiques de frottement, établie par coulomb en 1785, décrites ci-dessous :

- La force de frottement est indépendante de la forme et de la superficie de la zone apparente de contact.

La grande souplesse des élastomères leur confère la propriété d'épouser la quasi-totalité des rugosités des surfaces solides antagonistes. l'aire réelle de contact (dont dépend le coefficient de frottement) est très proche de la surface apparente. et donc l'indépendance de cette surface avec la force de frottement n'est plus vérifiée. Comme l'a démontre Schallamach [Schallamach.1957/58].

- La résistance à l'avancement est proportionnelle à la force normale d'appui.

Concernant le coefficient de frottement, la nature physico-chimique des élastomères a des conséquences importantes. Les effets des forces d'attraction moléculaire modifient considérablement le comportement du coefficient de frottement.

- La force tangentielle nécessaire pour amorcer et maintenir le glissement est indépendante de la vitesse relative des solides en contact.

Cette règle n'est jamais vérifiée puisque cette résistance à l'avancement est directement relie aux pertes viscoélastiques.

Il n'existe donc pas de parallélisme très net entre le comportement tribologique des solides rigides usuels et celui des élastomères, l'influence des différents paramètres conditionnant ces propriétés de frottement ne pouvant guère être comprise que par référence aux propriétés mécanique et thermodynamique de ce type de matériau.

De nombreuses théories ont été proposées pour expliquer le frottement des élastomères : théories moléculaires [Schallamach.1963], [BARTENEV et ELKIN.1968], théorie macroscopique [SAVKOOR.1965], [LUDEMA et TABOR.1966].

Cependant des ambiguïtés subsistent du fait du comportement particulier de ces matériaux ; par exemple, le frottement sur une surface sèche, rigide et lisse se produit généralement sans arrachement ni déformation permanente appréciable.

Enfin il faut tout de même préciser ici que, aujourd'hui, tous les auteurs accordent à dire que le frottement est une propriété intrinsèque des matériaux. [18]

II.7.1-Types de frottement

-Frottement de glissement

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 (figure 5 a). [19]

-Frottement de pivotement

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 5 b). [19]

-Frottement de roulement

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 5 c). [19]

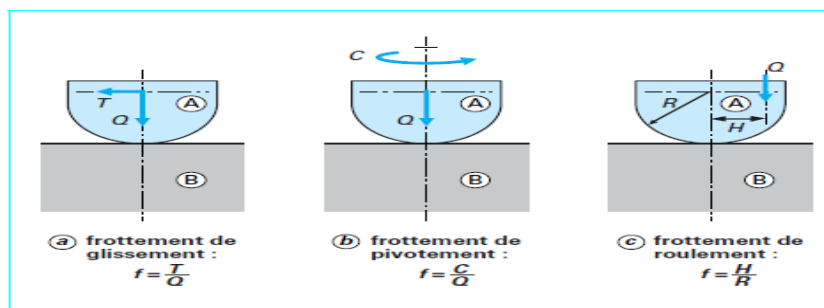


Figure II.5 : Définition des coefficients de frottement [19].

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

II.7.2-Composante adhésive de frottement

Quand on étudie le frottement d'un élastomère sur une surface propre et lisse, seul la part adhésive joue un rôle dans la résistance au glissement. La courbe de frottement obtenue est similaire pour tous les polymères : elle est symétrique autour d'un unique maximum.

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... [18]

II.7.3-Coefficients de frottement

Le coefficient de frottement entre deux surface est le rapport entre la force nécessaire pour bouger les surfaces l'une par rapport a l'autre et le total des forces mettant en pression ces deux surfaces.

Si T est la force pour le mouvement et Q la force de pression, le coefficient de frottement f est donne par :

$$F = \frac{T}{Q} \quad (\text{II.3})$$

- **Ordres de grandeur du coefficient de frottement**

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	$\approx 5 \cdot 10^{-2}$

Le tableau II.2: Ordre de grandeur du coefficient de frottement (glissement) [19]

II.8-l'usure

L'usure est la perte de matériaux sur la surface de contact entre deux solides en mouvement relatif. Elle est généralement dommageable, mais peut aussi être bénéfique, par exemple lors du rodage, l'affûtage de l'outil, la finition d'une surface par rectification.

L'usure d'un mécanisme ne ressort pas uniquement du rôle joué par le lubrifiant, mais relève aussi de nombreux autres facteurs tels que la technologie de l'ensemble et de chaque pièce prise séparément, de leur métallurgie et en particulier des traitements de surface, de leurs tolérances de fabrication des conditions d'utilisation, d'environnement climatique telles que la température ambiante, l'humidité de l'air, la corrosivité (air marin, SO₂) ou l'abrasivité de l'atmosphère (poussière).

On classe les modèles d'usure selon les principaux mécanismes qui les génèrent: l'adhérence, l'abrasion, l'érosion, la fatigue et le fretting. [16]

II .9-Généralités sur l'usure des élastomères

II.9.1-Introduction

Le terme usure, dans son acception la plus large, exprime la détérioration des composants due à l'usage. L'usure est générée par plusieurs mécanismes physiques, chimiques ou mécaniques indépendants ou non. En fait, l'usure considérée comme un phénomène global est

très difficile à décrire du point de vue quantitatif. Il en résulte que les différentes approches théoriques sont faites à partir d'hypothèses simplificatrices tendant à dissocier les processus mis en jeu pour mieux les appréhender.

II.9.2-Le phénomène d'usure

La détérioration d'une matière produit des déchets. Qu'on appelle l'usure, c'est la conséquence du frottement et se produit au niveau de la zone de contact.

Les paramètres qui influent sur le taux d'usure sont: [21]

- La force de contact.
- Les conditions opératoires : la charge, la température, la vitesse, la pression,
- L'aire de contact.
- L'état physico-chimique des surfaces frottantes (la rugosité),
- Les propriétés mécaniques des matériaux (dureté),
- L'absence ou la présence d'un lubrifiant.

II.9.3-Les origines d'usure

- La fissuration,
- Les transformations physico-chimiques des surfaces,
- Adhésion : transfert à l'échelle atomique, grippage, micro grippage. [21]

II.9.4-Données et paramètres tribologiques

II.9.4.1- 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'Achard, en éliminant la dureté comme paramètre, et suppose que la perte de volume V est proportionnelle à la charge normale F_N et à la distance de glissement L parcourue.

$$V = k V F_N \quad (\text{II.4})$$

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

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

Toutefois le taux d'usure est aujourd'hui utilisé couramment dans le monde entier et décrit l'évolution du niveau d'usure d'un couple de matériaux avec la sollicitation. Il faut toutefois noter que le taux d'usure ne traduit pas directement une propriété intrinsèque des matériaux en contact ou du tribosystème.

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

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

-Comment peut-on alors intégrer le taux d'usure dans une approche industrielle ou technique et écarter les réserves des scientifiques?

- Comment valoriser par leur utilisation les dizaines de milliers de résultats tribologiques obtenus chaque année ?

Il n'y a aucun doute, que tous les tribosystèmes, que ce soit dans une application industrielle ou une machine d'essai, possèdent un taux d'usure, qui est défini par le couple de matériaux, la

configuration du système et la sollicitation et qu'on peut le déterminer en fin de vie. Le taux d'usure est la « réponse » du tribosystème à une sollicitation.

Le taux d'usure volumétrique kV 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 $k = ef^*\mu$ [20].

II.9.4.2-Produit $p \times v$

L'énergie mise en jeu dans le contact est de la forme :

$$E = Q \cdot v \cdot f \quad (\text{II.4})$$

Avec :

- Q : charge appliquée au contact ;
- v : vitesse de déplacement ;
- f : coefficient de frottement.

Cette énergie donne une représentation approximative de la quantité de chaleur générée par frottement.

Le critère de « $p \times v$ (pression \times vitesse) admissible » est un référentiel généralement employé pour estimer les conditions limites d'utilisation de matériaux à usage tribologique tels que polymères, lubrifiants solides, frittés autolubrifiants [19].

II.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 :

$$E_f = \mu FN L \quad (\text{II.5})$$

Tel que :

- μ : coefficient de frottement de Coulomb.

Le produit μFN 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 :

$$ef^* = E_f / V = \mu / k \quad (\text{II.6})$$

La densité d'énergie de frottement apparente ef^* correspond au potentiel d'énergie total contenu dans un tribosystème [20].

II.9.4.4-Rugosité

Le lecteur pourra aussi se reporter à l'article Tolérances et écarts dimensionnels, géométriques et d'états de surface [B 7 010] de ce traité.

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.6).

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 granulée, à la morphologie de certains revêtements (structure, porosités...).

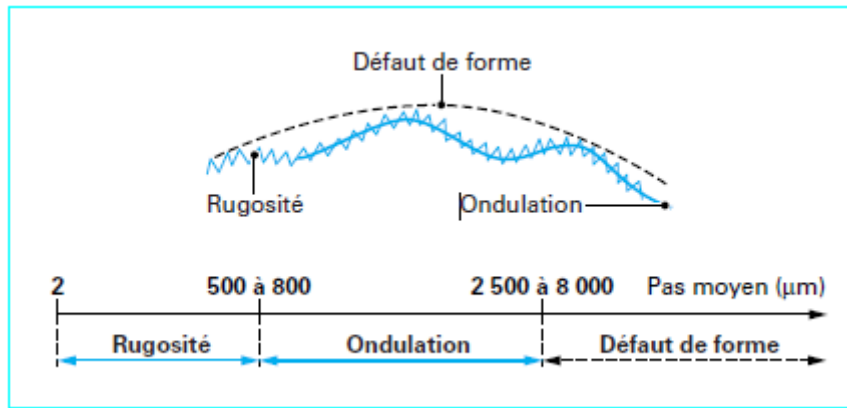


Figure II.6: Classement des irrégularités de surface [19].

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.7)
- 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 [19].

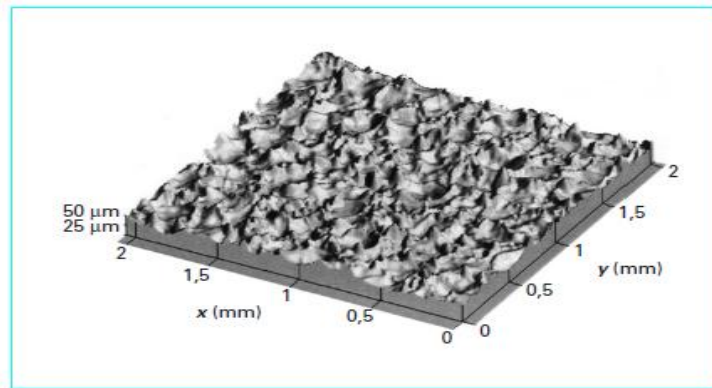


Figure II.7 : Exemple de représentation tridimensionnelle de rugosité [19].

II.10. Phénomènes tribologique de base des élastomères

Les lois classiques de friction comme il a été décrit par les travaux de di Vinci, Amontons et Coulomb peuvent être résumés comme suit [24] :

- La force de friction est proportionnelle à la charge ;
- Le coefficient de frottement est indépendant de l'aire de contact apparente ;
- Le coefficient de frottement statique est largement supérieur au coefficient cinématique ;
- Le coefficient de frottement est indépendant de vitesse de glissement.

Lorsque deux solides sont en contact, ils peuvent être soumis à quatre phénomènes élémentaires : de l'adhésion ; de la déformation plastique ; des fissures ; et transformations physico-chimiques. Dans son approche unifiée du frottement et de l'usure des élastomères Moore présente un diagramme des principaux mécanismes de dégradation (Figure II.8).

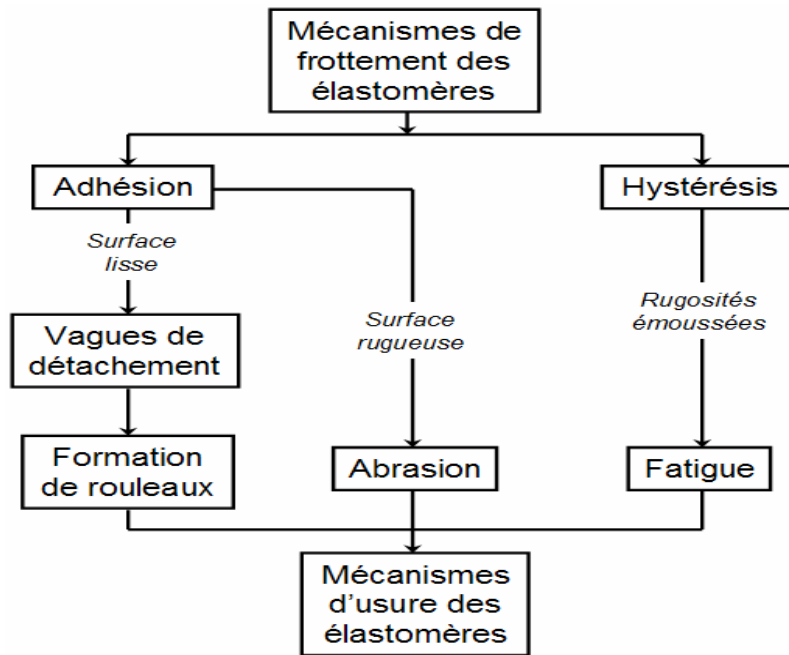


Figure II. 8 : Diagramme présentant les relations entre le frottement des élastomères et leurs mécanismes d'usure [25].

Le schéma de la figure montre que deux principaux paramètres tribologiques définissent l'importance des composantes de frottement adhésive et hystérésis : la vitesse de glissement et l'état de surface ou la rugosité de la surface.

Quand on étudie le frottement d'un élastomère sur une surface propre et lisse, seule la part adhésive joue un rôle dans la résistance au glissement. La courbe de frottement obtenue est similaire pour tous les polymères : elle est symétrique autour d'un maximum.

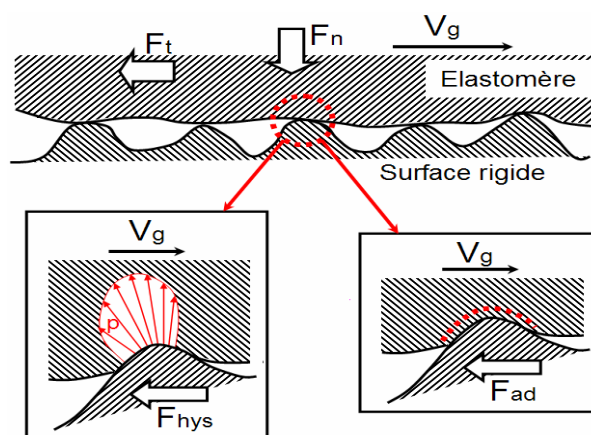


Figure II.9: Principales composantes de coefficient de frottement

II.11. Usure par abrasion

L'abrasion continue dans une simple direction mène à la formation d'une surface caractéristique de mode par abrasion. Typiquement, ceci apparaît comme séries de périodique sillons parallèles et perpendiculaires à la direction de glissement. Le mode abrasion se forme sur une surface moulé initialement lisse après certains nombre de passages de l'abraseur. L'espacement et la hauteur des sillons sont caractéristiques d'un processus d'abrasion spécifique. Comme procédés d'abrasion, les sillons sont inclinés en arrière de l'abraseur qui protège la surface juste derrière la forme de l'abrasion favorisé. L'abrasion se concentre à la racine des sillons. Les fissures se propagent dans cette région et le mode d'abrasion affecte la surface avec un angle, θ (Figure II.10).

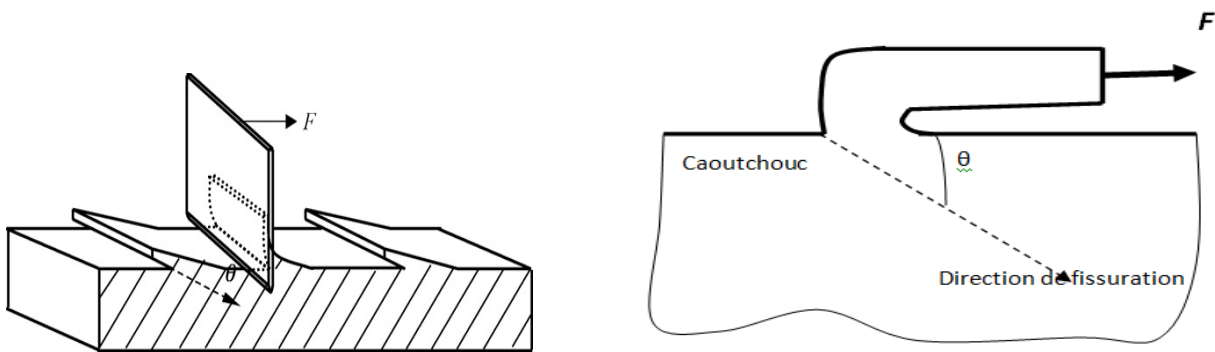


Figure II.10 : Schéma d'une lame tirant un simple sillon sous une force d'abrasion \vec{F} montrant la propagation de fissure suivant un angle θ par rapport à la surface.

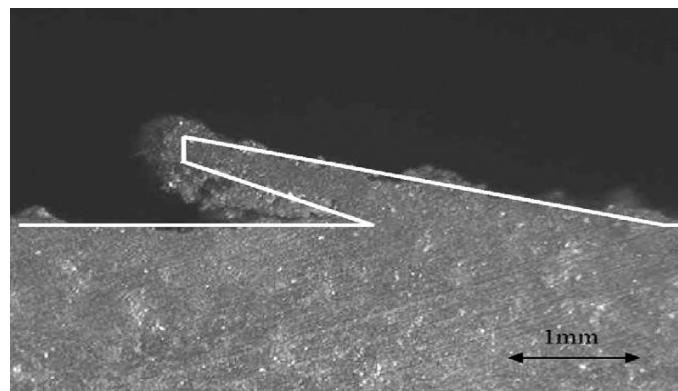


Figure II.11 : Micrographie d'un sillon formé sur un spécimen SBR [26].

II.12-Principaux faciès d'usure des élastomères

Il existe principalement quatre faciès peuvent être identifiés (Figure II.12) : Les stries, les rides, les rouleaux et les cratères.

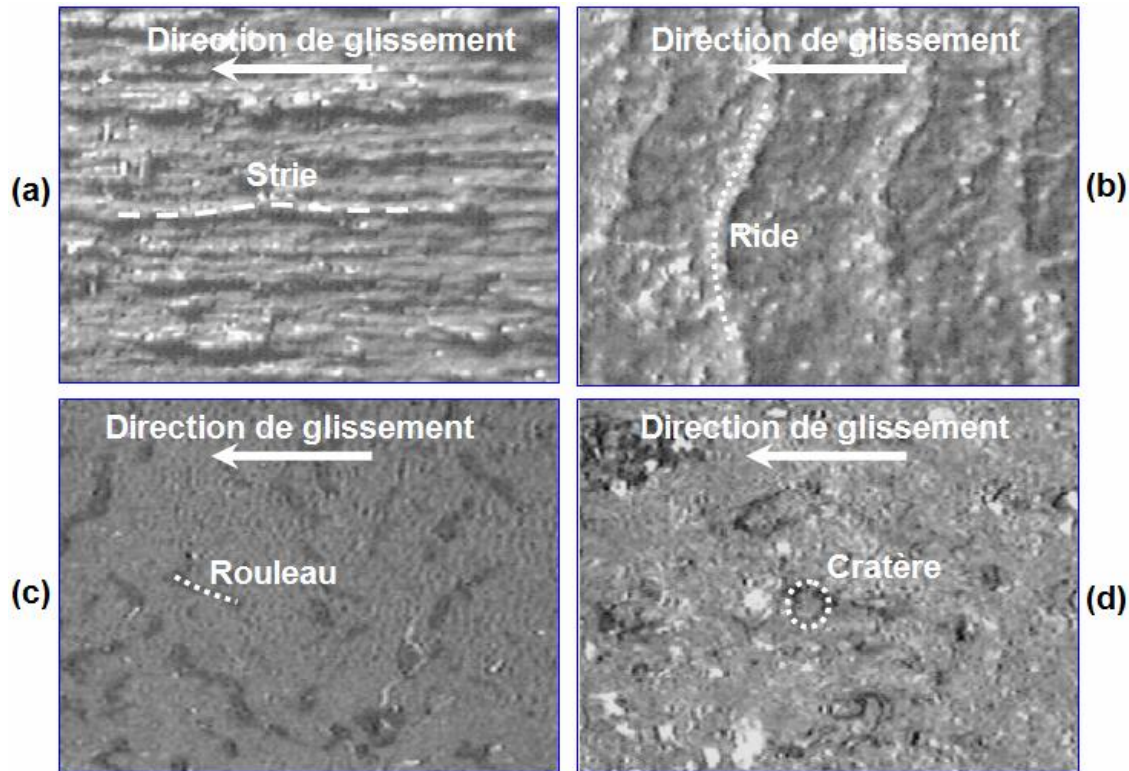


Figure II.12: principaux faciès d'usure des élastomères. Stries d'usure (a) ; rides d'usure (b) ; rouleaux d'usure(c) ; cratères d'usure(d) [22].

II.12.1- 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 [22].

II.12.2- 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 à 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 [18].

II.12.3- Stries d'usure

Sont des bandes parallèles à la direction de glissement. Leur largeur et hauteur variante du millimètre au micromètre, par contre leur longueur de la centaine de micromètre au centimètre, ces faciès est associé 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. [18].

II.12.4- 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 [18].

II.13- Différents types d'usure

Les mécanismes de dégradation des surfaces rencontrés sont nombreux. L'usure correspondant à l'ensemble des phénomènes conduisant à des pertes de masse ou à des évolutions géométriques significatives du contact pouvant s'accompagner d'effets secondaires liés au jeu dans le mécanisme en mouvement, à la perte de cote, à l'émission de débris, à l'endommagement de surfaces.

II.13.1-Usure par adhésive

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.13) [22].

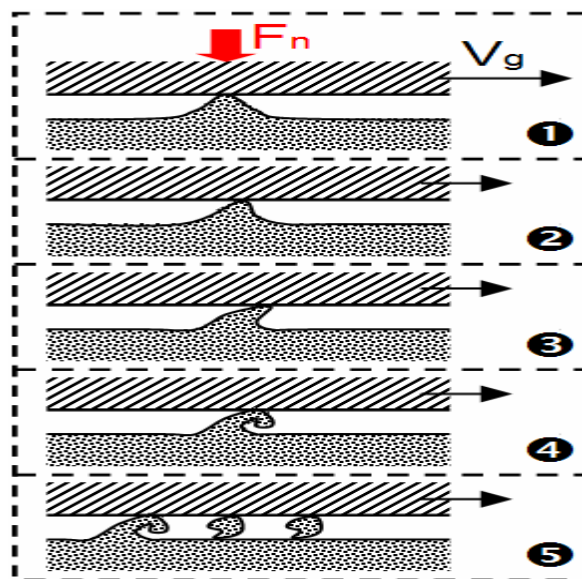


Figure II.13: Processus physique de frottement de rouleaux d'usure [22].

II.13.2- Usure corrosive et oxydative

L'usure corrosive et oxydative est due à l'effet de réactions chimiques entre la surface usée et son milieu environnant [18].

II.13.3- 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.

A 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 [22].

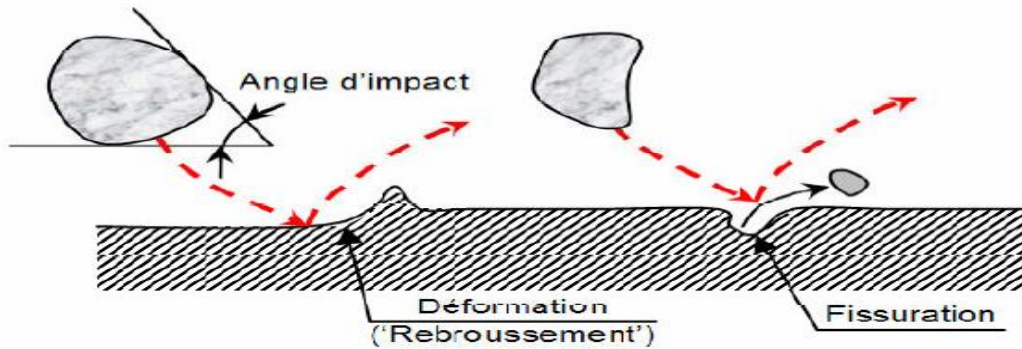


Figure II.14 : Mécanisme d'usure érosive en présence d'un 3ème corps pour un impact unidirectionnel [22].

II.13.4-Usure par abrasive

Lors d'un glissement unidirectionnel de la surface se présentant généralement sous forme de « rides » et pour condition sévères à des « stries » (Figure II.12 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] [22].

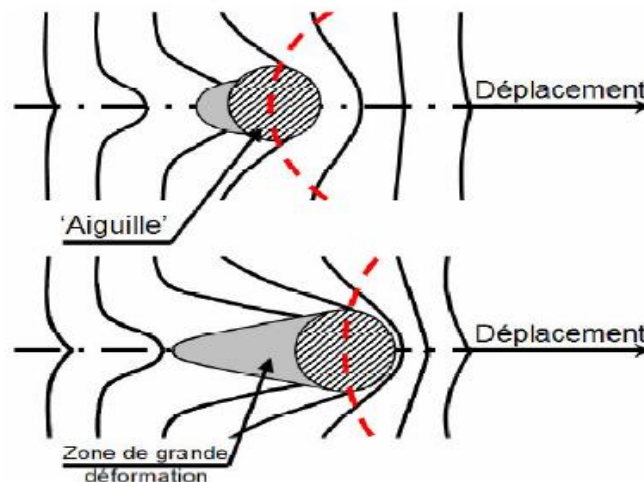


Figure II.15 : Schéma des déformations et du cisaillement de la surface de l'élastomère par une « aiguille » [à « sec » « dry abrasion »] [22].

II.13.5- Usure par fatigue

L'usure par fatigue concerne par définition la perte de matière du polymère frottant sur un antagoniste de faible rugosité où la déformation du polymère est essentiellement de type microélastique. Comme pour l'usure abrasive engendrée par un antagoniste rugueux, l'environnement, liquide ou gazeux, peut modifier les propriétés de rupture du polymère dans ces conditions et ainsi avoir une forte influence sur la vitesse d'usure. Un autre phénomène peut jouer : l'action lubrifiante des liquides favorisée par la faible rugosité de l'antagoniste et qui tend à limiter le frottement et les phénomènes de transfert [23].

II.13.6-Usure par fretting

Le fretting est un mouvement oscillatoire la faible amplitude qui peut se produire entre deux surfaces en contact celui-ci engendre différentes 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 [22].

II.13.7- Usure par cavitation

La cavitation apparaît lorsque le liquide atteint, au voisinage d'une surface, sa pression de vapeur saturante. Il se crée alors une cavité ne pouvant rester stable dans le milieu. Elle produit donc 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 [22].

II.14- quelques paramètres influent sur l'usure

II.14.1- Paramètres matériaux

II.14.1.1- 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 .

II.14.1.2- 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 augmentent, 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.

II.14.2- Conditions expérimentales

II.14.2.1- Charge appliquée

Grosch et Schallamach ont trouvé la relation :

$$V=aP^n \quad (II.7)$$

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.

II.14.2.2- Composition de l'atmosphère

La composition de l'atmosphère influe sur l'usure des élastomères chargés.

II.14.2.3-Lubrification

La fonction principale d'un lubrifiant est de diminuer la vitesse d'abrasion en facilitant le glissement entre les deux surfaces. Il permet par ailleurs de refroidir le système en absorbant les

calories. Il sert aussi de protection contre l'oxydation. Enfin, il permet d'évacuer les particules d'usure créées. Il peut prendre de nombreuses formes : liquide (huile), solide (graphite), ... En général, l'épaisseur du film de lubrifiant est relativement importante (supérieure aux dimensions des aspérités, de manière à éviter les interactions entre aspérités) [18].

La lubrification diminue l'aire de contact réelle entre l'élastomère et la counterface rigide par conséquence une diminution de coefficient de frottement. La présence de fluide entre l'élastomère et un substrat rigide ne réduit pas seulement l'adhésion mais aussi la composante flaques mare d'hystérésis de friction. Avec lubrifiant, les vallées se transforment en flaques de fluide emprisonné qui contribue un lissage effectif de la surface du substrat (Figure 16). Ce phénomène de lissage réduit la déformation viscoélastique causé par les aspérités de la surface et ceci réduit la friction de l'élastomère [27].

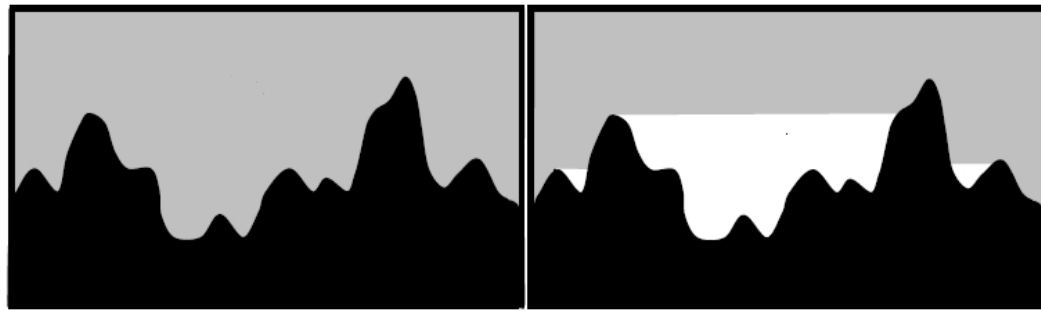


Figure II.16: lissage du substrat en présence de lubrification

II.15- Conclusion

Tout au long de cette étude bibliographique sur la tribologie des élastomères chargés, nous devons nous attacher à prendre en compte le fait de diversité de paramètres qui influent sur le comportement en frottement et en usure des matériaux élastomériques tel que les conditions de sollicitation (type de contact, la lubrification), la composition chimique complexe de l'élastomère qui conduit à des faciès d'usure différents, ce qui explique la difficulté d'étudier et de modéliser ce phénomène tribologique .

Chapitre III

Etude expérimentale de l'usure des élastomères

III.1- Introduction

L'objectif de notre travail est d'étudier l'influence de paramètres tribologiques tels que : La nature de contact et de mouvement, sollicitations (charge ou pression de contact, vitesse de glissement, durée de fonctionnement ou nombre de cycles et l'environnement. (Propriétés physiques, température) et l'angle d'abrasion sur le comportement au frottement et à l'usure des pions d'élastomère de type SBR. Cette étude comporte deux parties : la première est consacrée à l'étude de l'usure des pions en contact plan l'autre porte sur l'usure abrasive. Les deux types d'usure diffèrent par leurs mécanismes et leurs techniques d'étude expérimentale (voir chapitre2). Nous présentons ces deux techniques d'études expérimentales et aussi les résultats liées aux deux modes d'usure.

III.2-Contact Plan/Plan

III.2.1- Procédure expérimentale

Nous étudions le comportement à l'usure d'un élastomère SBR avec des lois classiques de l'usure adoptées. Avec ces derniers, l'influence des paramètres tribologiques, peuvent être mise en évidence et analysés. L'exposition d'un élastomère SBR aux conditions d'intempéries naturelles marines et climatiques, considérés comme paramètres de vieillissement pour le matériau d'étude, font varier le mécanisme d'usure de notre élastomère vierge. L'usure peut constituer un critère de vieillissement. L'intensité de l'influence des intempéries peut être modélisée en introduisant des paramètres relatifs aux conditions d'utilisations d'élastomères SBR.

III.2.2-Dispositif expérimental

Les essais tribologiques ont été effectués sur un tribomètre (pion/disque) (Figure III.1) qui a fait l'objet d'une étude de conception au sein de l'université MOULOUD MAMMARI, par des étudiants dans le cadre de leur projet de fin d'étude, en utilisant la méthode de l'analyse de la valeur.

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

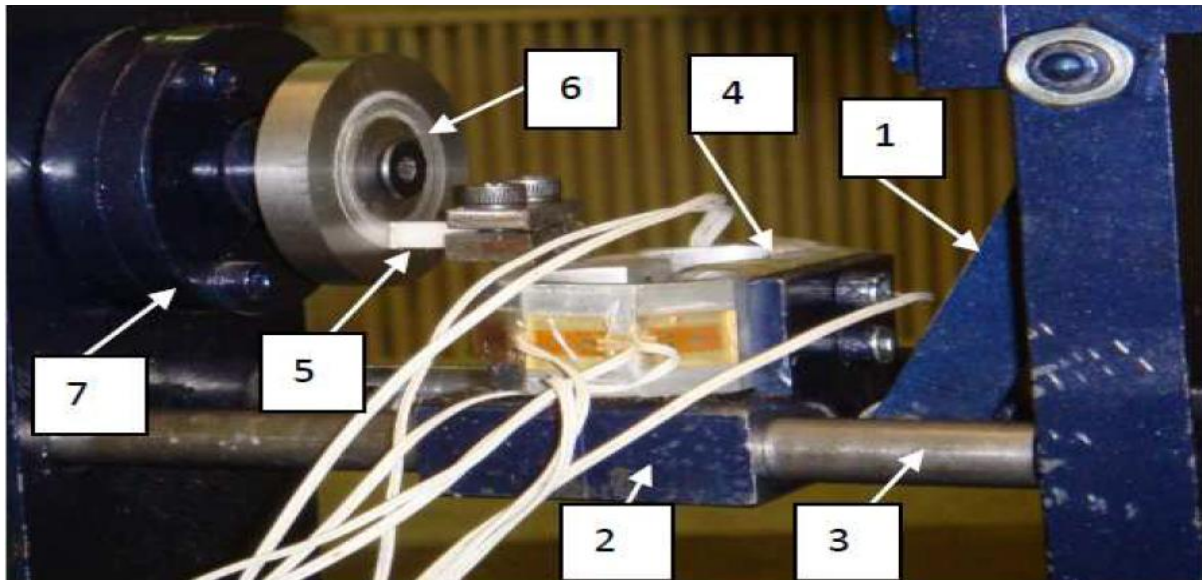


Figure III.1 : Photographie du tribomètre (pion/disque)

III.2.3-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.

III.2.4-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 (8).

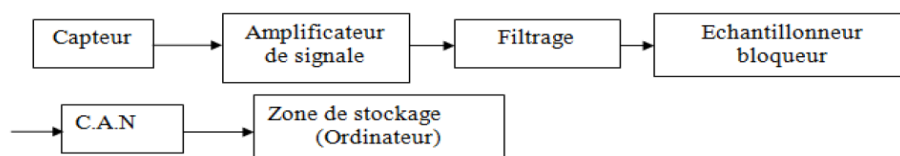
La force tangentielle F_t induite par le contact (pion /disque) et l'effort normal F_N sont mesurés en temps réel et simultanément par le capteur de force (4) qui est relié à une chaîne d'acquisition qui traite et enregistre les données.

III.2.5- 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 de capteur, et on connecte la chaîne à un ordinateur pour enregistrer et traiter les données en utilisant une connexion hyper terminal.

III.2.6- 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 tangentiel. 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.

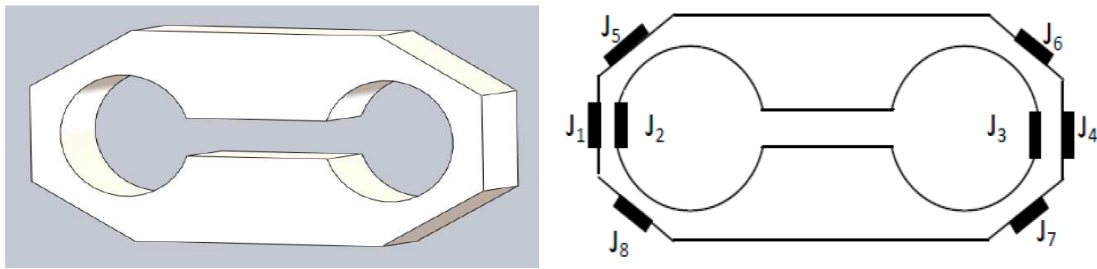


Figure III.3 : Corps d'épreuve du capteur et les zones d'emplacement des jauges.

III.3- Identification des matériaux utilisés

III.3.1-Les disques

III.3.1.1-Matériau des disques

Pour réaliser notre essai on a fait recours à l'acier XC48 qui est un acier de construction mécanique non allié pour traitement thermique définie essentiellement par sa composition chimique (0.45 à 0.51% de carbone), du manganèse, du silicium, du soufre et du phosphore Norme NFA356554. Ce type d'acier est largement utilisé dans la fabrication des bielles, essieux, tiges de piston, vilebrequins, arbres moyens, galets des ponts roulants. Il est employé lorsque les caractéristiques mécaniques demandées sont sévères et nécessitent des transformations de structure par traitements thermiques.

III.3.1.2-Géométrie de disque

Un disque de diamètre 60mm et d'épaisseur de 10mm, possédant un perçage au centre, le trou réalisé est de 8mm de diamètre afin de permettre la fixation du disque sur le support du tribomètre par une vis.

Le disque est réalisé en tournage a partir des barres rondes laminées a chaud et recuit en XC48, avec les mêmes paramètres d'usinage. la rugosité de disque est de 2.18micrometre.

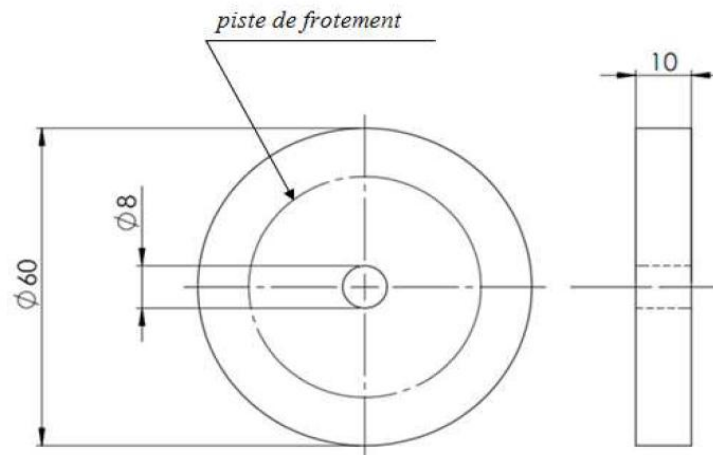


Figure III.4 : Géométrie du disque

La piste de frottement représentée dans la figure III 4, a pour axe le cercle de diamètre 17mm passant par le centre de la section du pion.

III.3.2-Les pions

III.3.2.1-Matériau des pions

On procède à un prélèvement des différents types d'échantillons le long de rouleau (figure III 5). Ces échantillons sont classés selon leurs positions dans ce dernier. Cette position est définie par trois classes :

- **Classe 1** : un élastomère de synthèse de type SBR sans aucune charge (état vierge) ;
- **Classe 2** : dans cette classe l'élastomère est influé par les rayons solaires, le pion est devenu plus dur et moins déformable ;
- **Classe 3** : pour cette fois –ci, l'élastomère est soumis a l'effet de l'eau de mer qui a causé des dégradations dans les caractéristiques mécaniques du pion, apparition des fissures sur le long de la surface du pion.

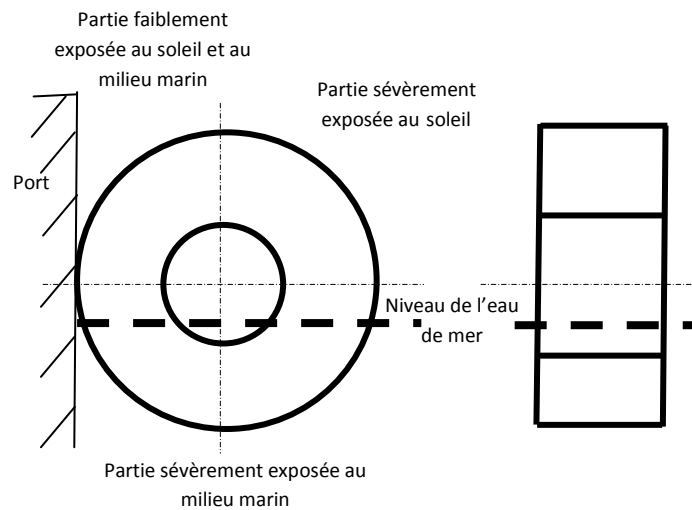


Figure III.5 : schéma du rouleau et conditions d'expositions

III.3.2.2-Géométrie des pions

Les pions sont obtenus à partir d'élastomères chargés, coupés à l'aide d'un quôteur sous forme de parallélépipède de section carrée (6x6) mm et de longueur de 11 mm.



Figure III.6 : Photographie des pions

III.4-Influence des conditions de vieillissement

L'influence des conditions de vieillissement sur l'élastomère SBR sont présentés en (Figure III.6).

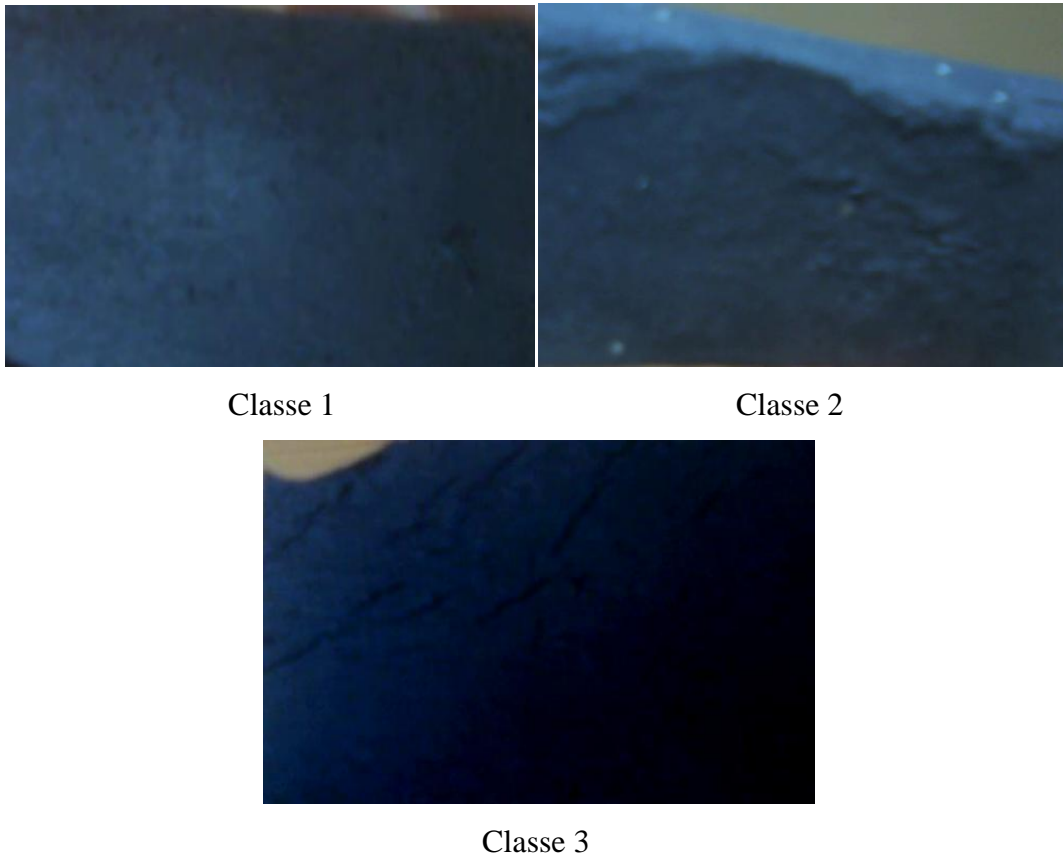


Figure III.7 : Photographie montrant l'état de la structure des échantillons.

L'étude micrographique permet de constater l'état de dégradation causé par les différentes conditions de vieillissement. On note une rupture de la structure de matériau de classe 3 et qui n'est pas le cas pour le matériau de classe 2. Ce qui paraît, donc, que le milieu marin est très agressif et peut entraîner une dégradation intense au niveau de la structure du matériau, Les photographies (classe 3) montre des fissures à la surface du matériau ,ces fissures sont de 1mm à 2mm de profondeur et de l'ordre de centimètre de longueurs et qui sont de même direction. Dans certains cas de vieillissement et dans certaines zones on constate la présence des pores à la surface de l'élastomère SBR qui ont tendance à connectés entre eux et par la suite se propager et forme des fissures.

Alors que l'exposition au soleil fait changer la microstructure par l'attaque de charges de carbone ainsi qu'un durcissement du matériau (le matériau devient moins élastique).

III.5-Résultats des essais et discussion

III.5.1-Conditions d'essais

Tous les essais ont été réalisés dans les mêmes conditions soit de la température ambiante et de pression atmosphérique sensiblement identique.

Dans cette première partie d'étude expérimentale, nous avons effectuée des essais d'usure dans des conditions, comme suit:

- En variant la distance parcourue (200-300-400-600-800-1200)m;
- Puis le poids exercé (8,33-12-17,41-21,41) N sur les trois premières classes ;
- Pour une distance de glissement fixée ($d=600$ m) et une pression de contact égale à 12N, nous étudions l'influence de pourcentage de noir de carbone qui augmente la rigidité des pions et par conséquence, influe sur la tenue à l'usure du matériau.

N.B : tous les essais ont été réalisés sans lubrification.

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 8) dotée d'une précision de 10^{-5} g.



Figure III.8 : Balance électronique

III.5.2- Résultats et discussion

III.5.2.1-Etude d'Évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue

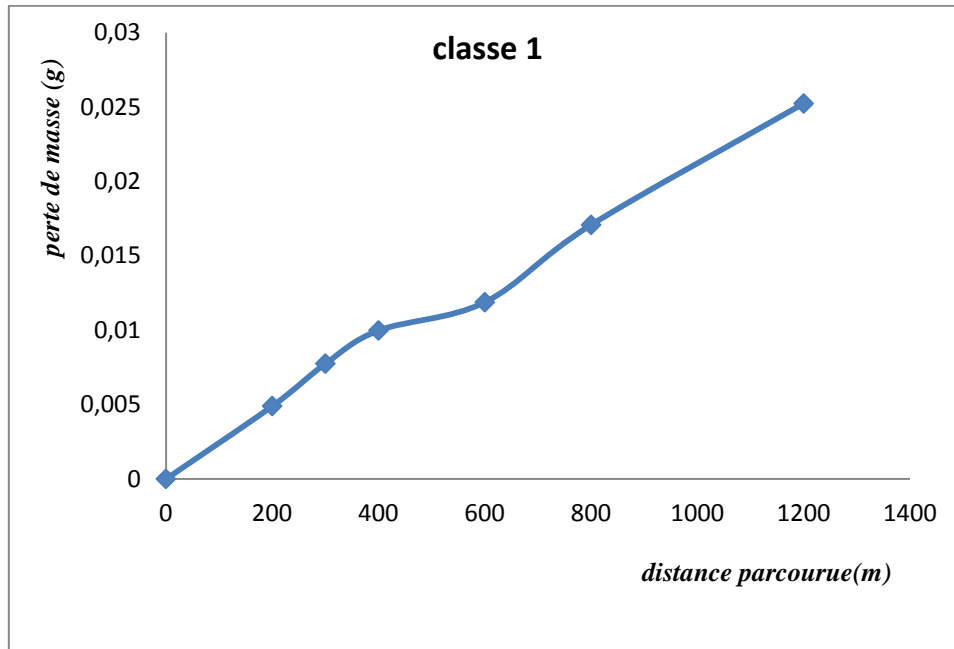


Figure III.9: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la charge de 10N

Par l'effet que l'élastomère présenté est très élastique dans son état vierge et avec un poids de 10 N seulement et une distance parcourue de 300 m ; l'élastomère se déforme et fléchit suivant le sens de mouvement, ce qui ramène l'usure vers une autre surface que la surface de contact initiale. La perte de masse augmente avec la distance de glissement et suit une loi linéaire. La pente de droite a tendance à augmenter pour les efforts normaux importants signe d'une usure par abrasion plus importante (Figure III.9).

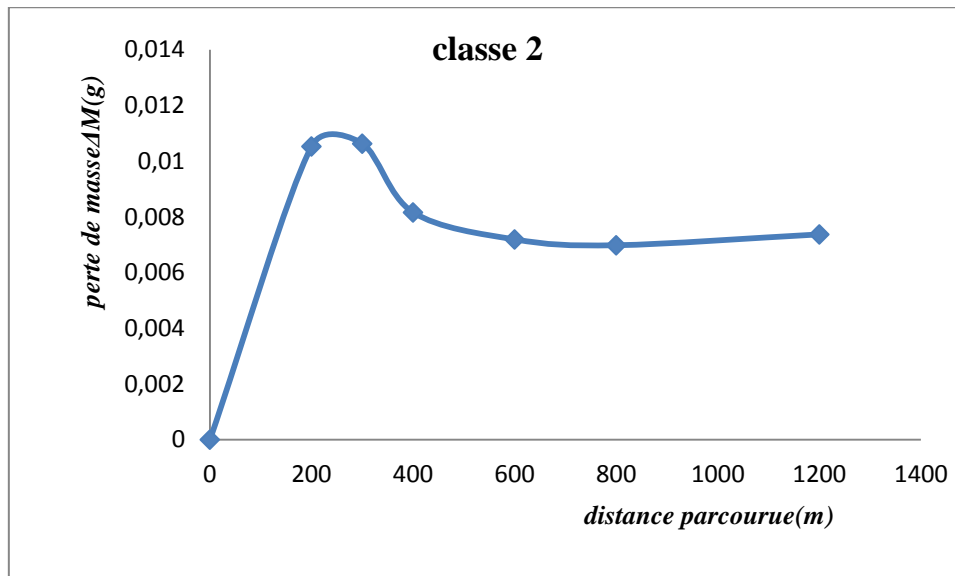


Figure III.10: évolution de la perte de masse en

fonction de la distance parcourue pour la charge de 10

Par l'effet de l'exposition aux rayons solaires, les pions acquièrent un durcissement qui les rend moins élastique. Ce durcissement rend l'arrachement de la matière plus difficile. Au bout d'une distance parcourue on remarque une condensation de la matière sur la surface de contact de l'échantillon ce qui provoque un glissement ainsi une diminution de la perte de masse qui tend à se stabiliser (Figure III.10) :

(0 → 600) m

Mouvement → Contact → Frottement → Usure.

(800 → 1200) m

Mouvement → Contact → Condensation → Glissement.

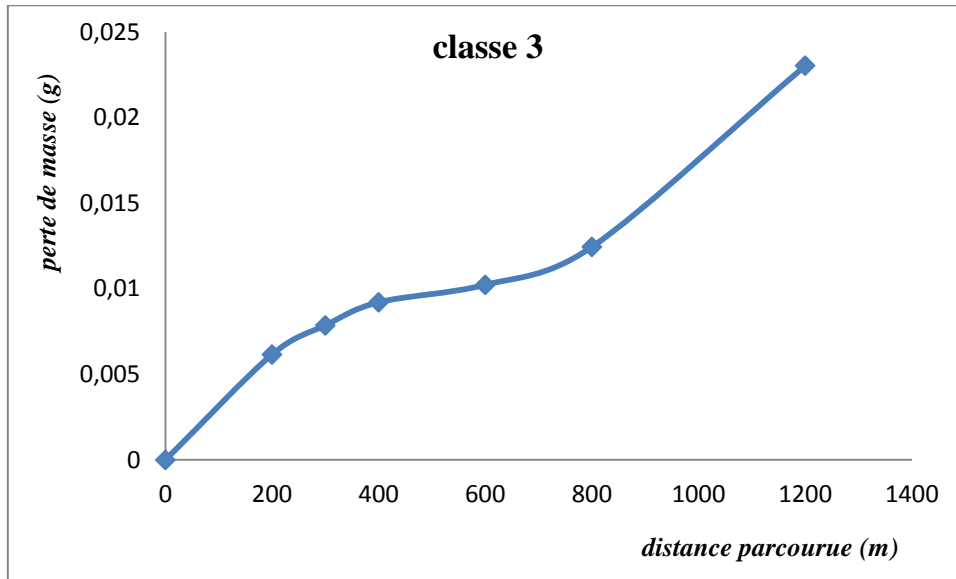


Figure III.11 : évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour la charge de 10N

Les fissures qui sont due à l'effet de l'eau de mer ont provoqué un fléchissement rapide de l'échantillon pour ramener l'usure vers la zone fissurée au bout d'une distance de glissement de 200 m. l'usure dans cette classe est moindre car les échantillons sont devenus fermes (Figure III.11).

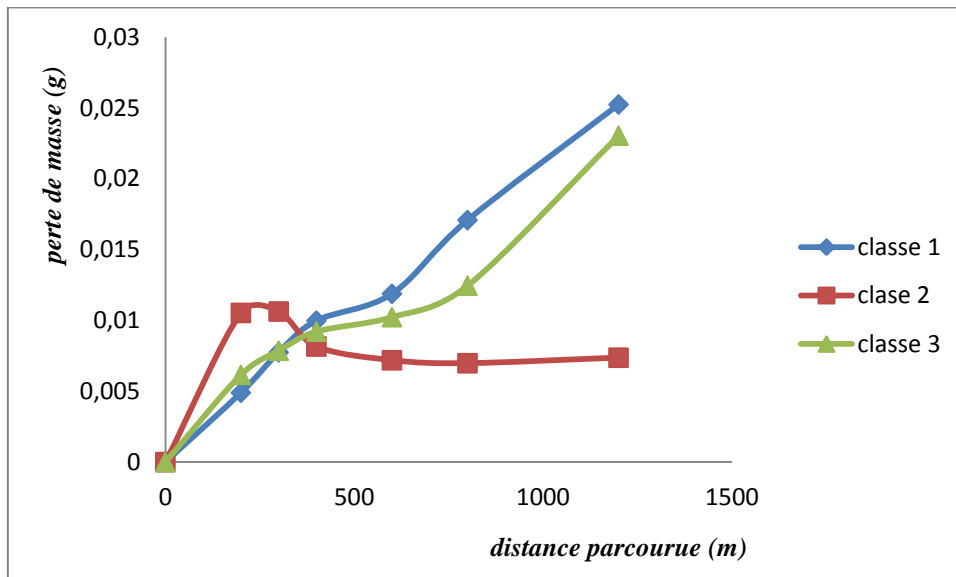


Figure III.12: Influence des conditions de vieillissement climatique sur le comportement à l'usure des élastomères chargés.

Nous constatons que l'allure de la variation de perte de masse en fonction de la distance parcourue par l'échantillon reste la même pour les matériaux vierge, et soumis au milieu marin. Alors que le matériau sévèrement soumis aux rayons solaire présente un comportement particulier. Nous nous constatons que l'usure de cette dernière classe augmente d'une même façon linéaire que les trois autres types d'élastomère puis diminue jusqu'à atteindre une valeur limite ou l'usure se stabilise (Figure III.12).

III.5.2.2-Influence du poids sur l'usure

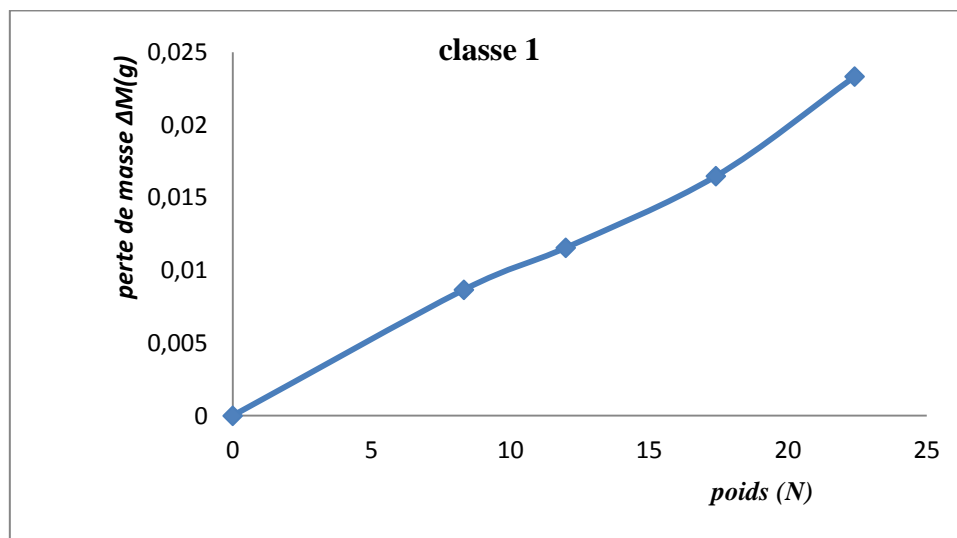


Figure III.13: évolution de la perte de masse de la classe 1 en fonction de la charge normale pour une distance parcourue de 400 m

Le même effet de l'élasticité de l'échantillon est remarqué dans cet essai, l'échantillon se déforme mais cette fois ci plus rapidement à cause de la pression exercée par le poids. Dans la Figure III.13 on constate que l'usure augmente en augmentant le poids.

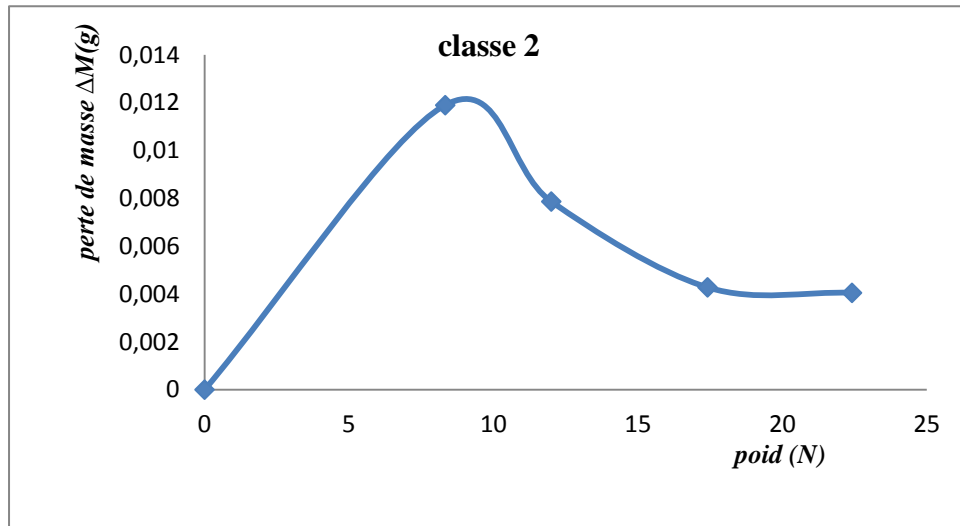


Figure III.14: évolution de la perte de masse de la classe 2 en

fonction de la charge normale pour une distance parcourue de 400 m

On constate que l'allure du graphe est la même que celle dans l'étude de la distance de glissement, le pion a le même comportement sauf que le taux de perte est un peu importante pour une charge de 8 N, à partir de 10 N la perte de masse diminue pour tendre à se stabiliser pour une charge de 12 N cela à cause du glissement du pion sur la surface du disque (Figure III.14).

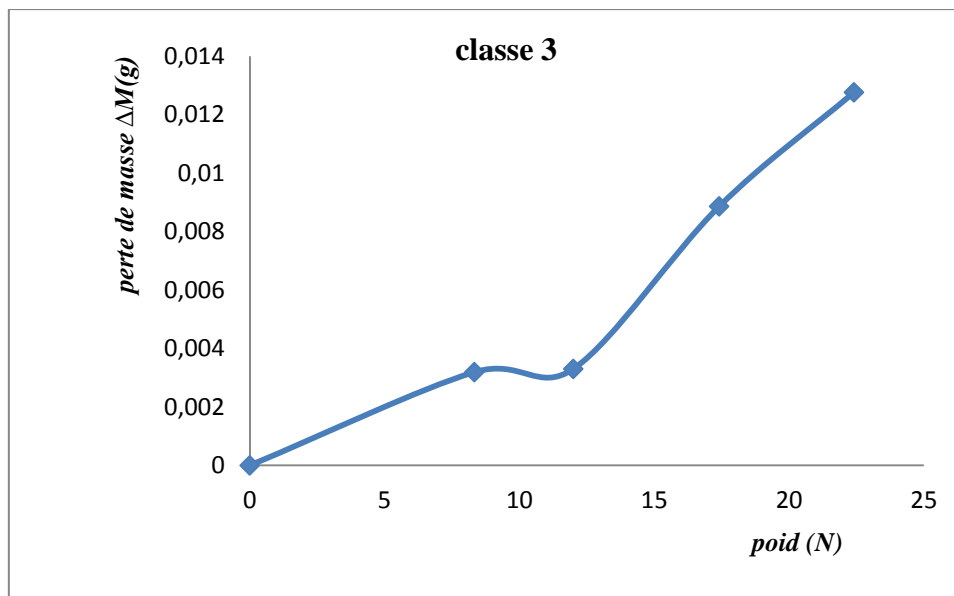


Figure III.15: évolution de la perte de masse en

fonction de la charge normale pour une distance parcourue de 400 m

Dès que l'essai a commencé, l'échantillon s'est déformé (fléchi) pour ramener l'usure à la zone fissurée et on augmentant le poids l'usure augmente (Figure III.15).

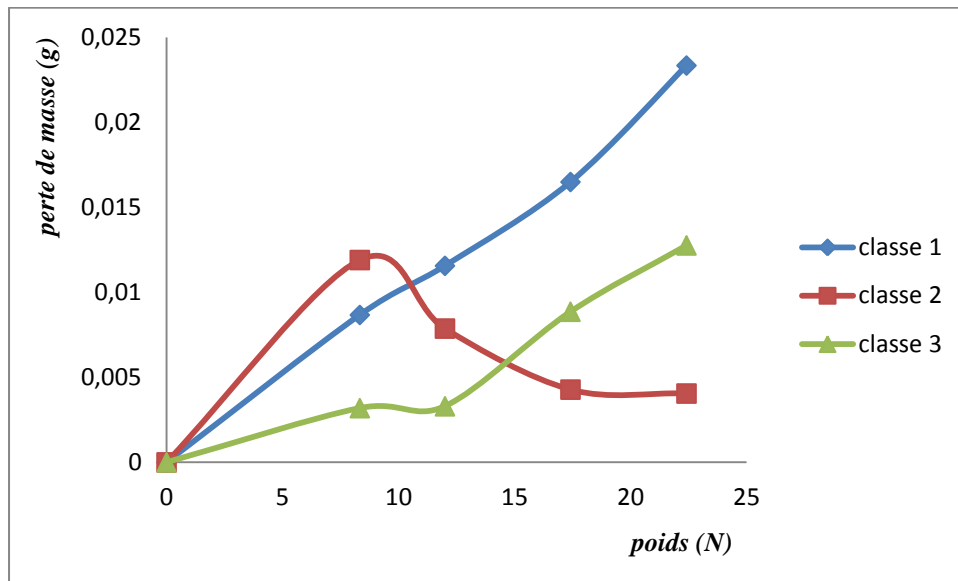


Figure III.16: Influence des conditions de vieillissement climatique sur le comportement à l'usure des élastomères chargés.

La charge augmente le taux d'usure pour les trois classes d'élastomères, la première et la troisième classe suivent le même comportement avec un taux d'usure un peu élevée dans la première classe. Cette fois-ci également, la deuxième classe garde son comportement particulier : on augmentant la charge, la condensation de la matière sur la surface du pion se passe très vite pour créer un troisième corps entre les deux surfaces de contact, puis par l'effet de la température générée par le mouvement, ce troisième corps se décompose pour créer un élément de lubrification qui limite l'usure ainsi la perte de masse.

III.5.2.3-coefficient de frottement

Nous obtenons des résultats de mesure de coefficient de frottement qui sont en accord avec ce constat (Figure III.17) : Pour le matériau de classe 3, le coefficient de frottement ($\mu = 2,9$) est légèrement supérieur au coefficient de frottement de classe 1 ($\mu = 2,6$). L'évolution de coefficient de frottement de matériau de classe 2 (matériau soumis sévèrement au rayonnement solaire) est différente des deux autres classes du matériau vieilli : le coefficient de frottement a tendance de diminuer jusqu'à atteindre une valeur égale à 0,6 après un temps égal à 400 secondes environ. La distance parcourue dans l'essai correspond à la distance pour laquelle la perte de masse se stabilise ($d = 280\text{m}$).

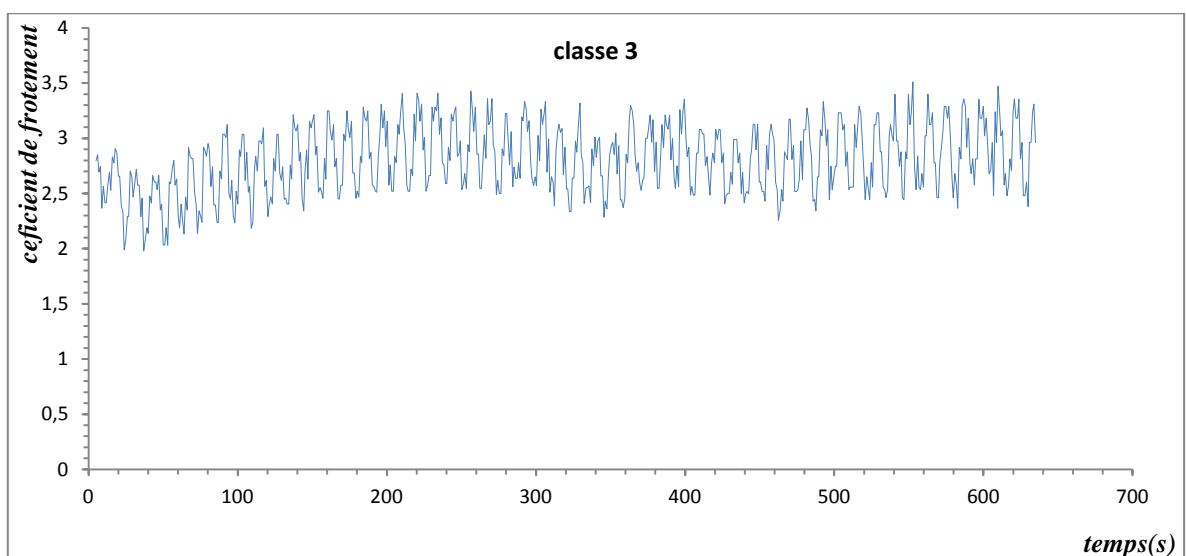
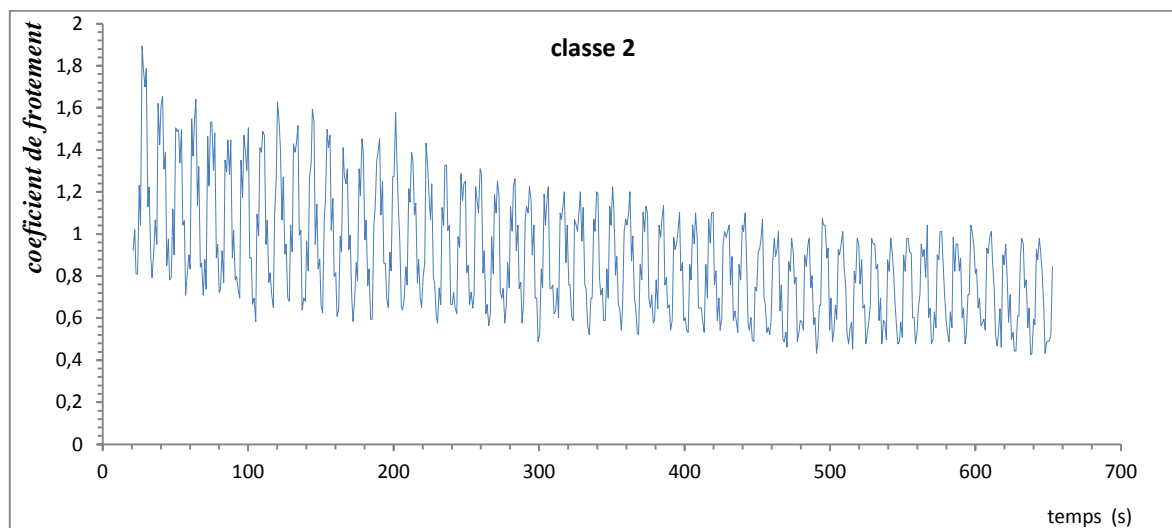
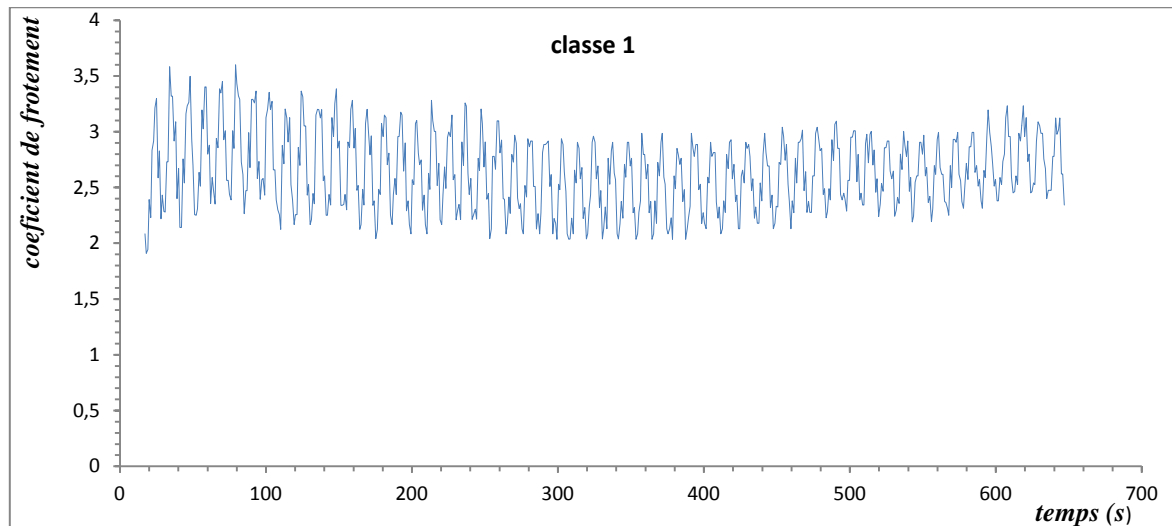


Figure III.17 : Coefficient de frottement des classes des matériaux vieillis

III.6-Le microscope électronique à balayage

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



Figure III.18 : Microscope Electronique a Balayage

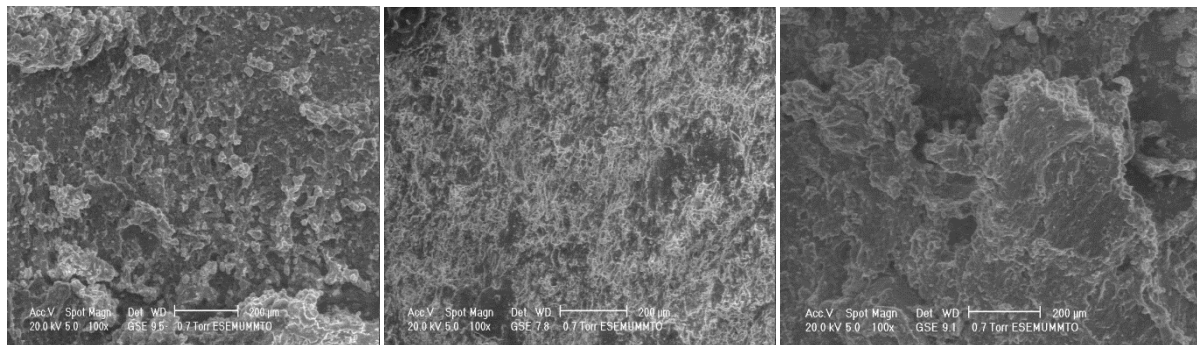
III.6.1-Présentation de la technique d'observation

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

agrandie de la structure sur l'écran, dont la brillance des pixels pourra passer de noir au blanc en passant par tout les niveaux de gris.

III.6.2-Micrographique des pions

Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé le microscope afin d'observer les faciès d'usure présent sur la surface des échantillons.

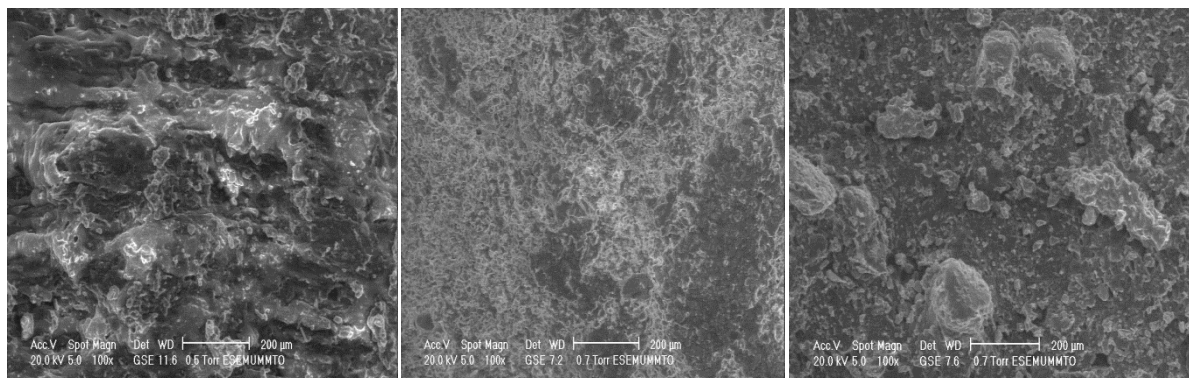


Classe 1

Classe 2

Classe 3

Figure III.19 : Micrographies de l'influence de vieillissement sur la forme de la surface usée



Classe 1

Classe 2

Classe 3

Figure III.20 : Micrographies de l'influence de la pression de contact.

Nous avons prélevés des clichés micrographiques de l'usure des échantillons dans le contact plan/plan de différentes classes de matériaux vieillis. Nous notons à travers ces micrographies l'influence de vieillissement sur la forme de la surface usée dans les mêmes conditions tribologiques en premier lieu puis en second lieu nous mettons en évidence l'influence de la pression de contact. L'arrachement micrographique de la matière est

clairement influencé par les effets des conditions de vieillissement, nous observons des dimensions d'arrachement micrographique dans l'ordre croissant suivant : classe 2, classe 3 puis classe 1. Nous tenons d'avoir même observation avec augmentation de pression de contact mais avec des dimensions d'arrachement qui est amplifiées. Nous confirmons que l'arrachement de la matière est proportionnel à la valeur de la pression de contact.

III.7- Etude expérimentale de l'usure abrasive

III.7.1 Procédure expérimentale

Dans cette étude nous avons conçus un mécanisme d'usure abrasif portant une lame monté sur un étai limeur. Le mécanisme est réalisé au niveau de hall technologique de l'université de Tizi-Ouzou. Dans la suite, nous présentons la conception du mécanisme et son utilisation ainsi que le fonctionnement qui nous permis de réaliser les essais d'usure abrasif. Ensuite, nous présentons les résultats et leurs interprétations.

III.7.2-Machine utilisée-Etai limeur

III.7.2.1-Utilisation de l'étai limeur

- L'étai limeur est utilisé pour des pièces demandant un usinage simple : surfacage, décroulage et même rainurage mais aussi pour des travaux plus complexes ayant des formes courbes (certains étaux limeurs sont munis de copieur). Par l'emploi d'outils simples identiques à ceux utilisés sur les tours à métaux, c'est une machine outil qui a un coût d'utilisation faible.
- Comme pour la table des raboteuses, l'étai limeur a vu évoluer le mouvement du coulisseau et de la table par des commandes hydrauliques.
- Le principe même du fonctionnement d'un étai limeur ne permet pas des cadences de production très importante par rapport à une fraiseuse.



Figure III.21 : Etau limeur

III.7.2.2- Fonctionnement

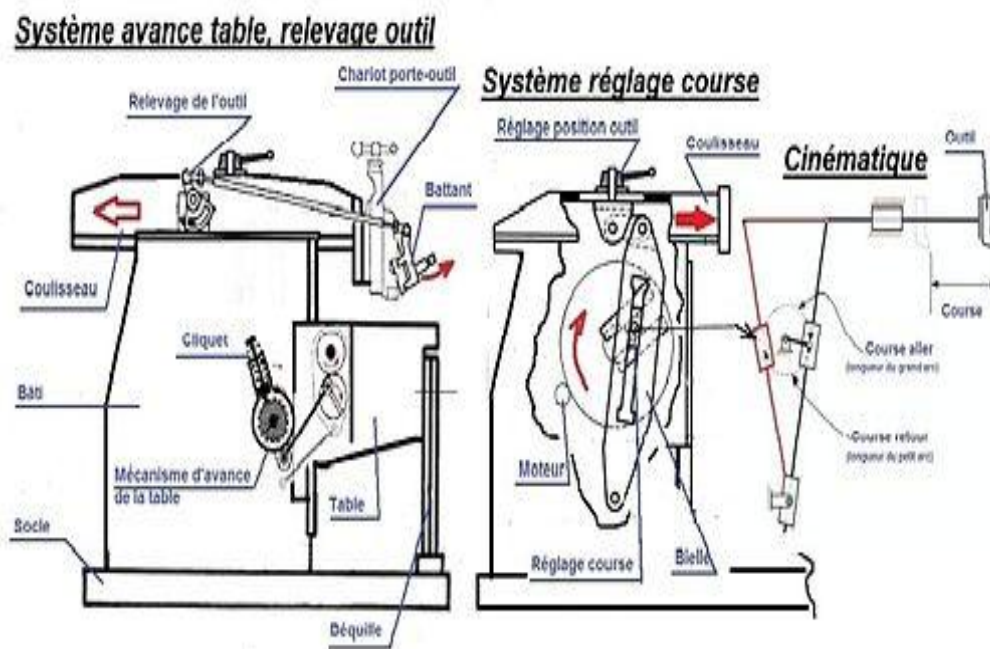


Figure III.22: Schema illustrant un eteau limeur

- Cinématique course coulisseau et avance table

L'étau limeur est une machine à raboter mais travaillant à l'inverse d'une raboteuse, dans le sens que la pièce reste immobile pendant la passe alors que l'outil effectue le mouvement de coupe rectiligne. L'architecture d'un étau limeur est constituée de :

- le bâti en fonte contenant les organes mécaniques ;

- le coulisseau qui se déplace horizontalement sur le dessus du bâti et qui porte le chariot porte-outil ;
- la table porte pièce qui coulisse sur une glissière horizontale, qui elle-même coulisse sur une autre glissière verticale. Cette table, selon les modèles, peut pivoter selon un axe parallèle à la trajectoire du coulisseau et être soutenue en bout par bretelle (ou béquille) ;
- un socle fixé au sol et supportant l'ensemble.

- Cinématique d'un étau limeur

Mouvement de coupe

- Le coulisseau est entraîné en translation dans un mouvement alternatif par une bielle commandée par un plateau manivelle portant une couronne dentée entraînée par la boîte de vitesses.
- Le plateau manivelle comporte un tourillon à patin qui décrit un cercle de rayon variant selon le réglage qui détermine la course de l'outil (longueur d'usinage). Cette course peut être positionnée par rapport à la pièce par l'intermédiaire d'un dispositif de blocage au-dessus du coulisseau.
- Les deux mouvements alternatifs du coulisseau ont des vitesses linéaires variables dues au système bielle-manivelle et à vitesse de rotation constante :

-mouvement de coupe (aller) : l'arc de cercle décrit par le tourillon est maximal.

-mouvement retour : l'arc de cercle est mini donc, à vitesse de rotation constante, le mouvement du coulisseau est plus rapide.

Mouvements d'avance

La table porte-pièce reçoit un mouvement d'avance à chaque passe par un système vis-écrou, pendant le retour du coulisseau. Un pignon tournant à la même vitesse que le plateau-manivelle, engrène avec un autre plateau muni d'un tourillon réglable qui, à son tour, commande une bielle et un carter oscillant. Ce carter contient un système de cliquet et roue dentée (rochet) centrée sur la vis de commande de la table.

Pendant le mouvement aller, le cliquet de par sa forme biseautée, passe sur les dents du rochet et pendant le retour, le cliquet engrène une dent du rochet, qui solidaire de la vis de commande, provoque l'avance transversale de la pièce. Le cliquet peut être réversible en le faisant tourner d'un demi-tour de manière à ce que l'avance de la table se fasse dans le sens inverse.

- La pièce

La pièce peut être maintenue dans un étau ou bridée sur le dessus ou le côté de la table. Cette table, sur certaines machines, peut être inclinable selon deux axes et peut être muni d'un plateau sinus (on parle alors de table universelle). Cette table peut également posséder une avance automatique sur l'axe vertical.

-L'outil

- Un chariot porte-outil, monté en bout du coulisseau, orientable selon l'axe vertical et commandé par une vis et manivelle, permet de positionner l'outil par rapport à la pièce. Un vernier contrôle la profondeur de passe ;
- Le chariot porte-outil peut être commandé manuellement lors d'un usinage oblique ;
- Pour permettre d'éviter les chocs et frottements « outil-pièce » pendant le trajet retour (fragilité des outils en carbure métallique ou usure de l'arête d'attaque), les machines sont munies d'un dispositif de relevage qui est soit mécanique (friction ou bielle) soit obtenue par une cale articulée. Ce dispositif de dégagement d'outil est d'autant plus utile que c'est pendant la phase de retour que la table, donc la pièce, subit son mouvement d'avance ;
- Dans certain cas l'usinage se fait au retour et il est parfois nécessaire d'empêcher le relevage de l'outil.



Figure III.23 : Montage d'étude de mécanisme d'usure abrasive

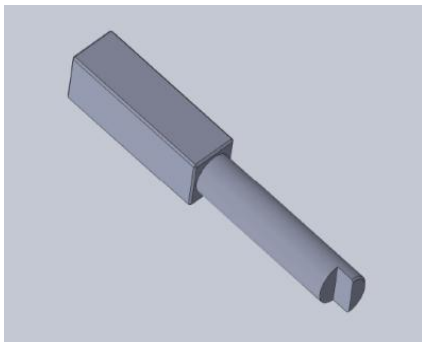
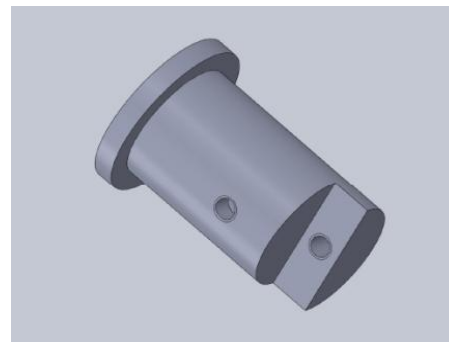
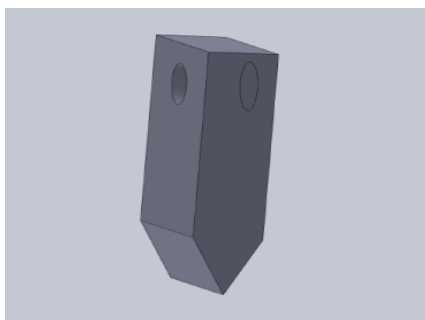
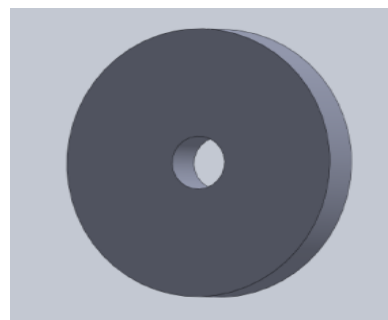
III.7.3-Description du dispositif

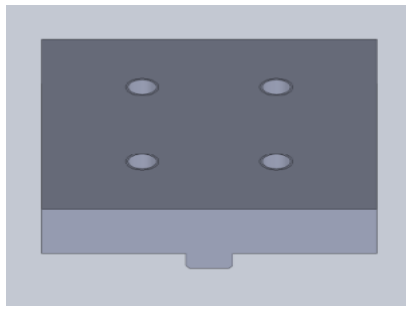
Le dispositif expérimental se compose des pièces suivantes :

- **La tige** (Figure III.24): comporte une partie parallélépipède qui sert à fixer l'outil sur l'étau limeur et une partie cylindrique d'ajustement g6 sur laquelle glisse le poids et le porte lame. Une partie méplate pour annuler la rotation du porte lame par l'intermédiaire d'une vis *CHC M6* ;
- **Le porte lame** (Figure III.24): comme son nom l'indique il sert à porter les lames, il comporte un perçage $\varnothing 20 H7$ pour glisser facilement sur la partie cylindrique de la tige, une partie cylindrique ayant un trou taraudé *M6* pour annuler sa rotation sur la tige par l'intermédiaire d'une vis. Une partie méplat menée d'un trou taraudé *M6* pour la fixation de la lame par une vis *CHC M6* ;
- **La lame** (Figure III.24): c'est l'élément actif de l'outil contient un perçage pour le passage de la vis de fixation. L'arrête de la lame est perpendiculaire sur l'axe de l'outil. On dispose en tout de 5 lames d'angle différent (15-30-45-60-75)^o ;

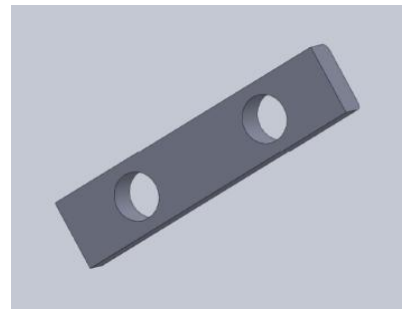
- **La charge** (Figure III.24) : un disque de diamètre 150mm et d'épaisseur 10mm percé à son centre d'un trou $\varnothing 20 H7$ pour glisser facilement sur la partie cylindrique de la tige ;
- **Le support échantillons** (Figure III.24): sur lequel on fixe l'échantillon, il comporte 4 trous taraudés M10, il se fixe sur la table de l'étau limeur avec des brides, il comporte une languette sur son dos qui sert de guidage dans la rainure de la table ;
- **La plaque** (Figure III.24): deux plaques qui servent pour la fixation de l'échantillon, chacune possède deux trous $\varnothing 11$ mm pour le passage de vis *CHC M10*.

Le mécanisme est réalisé avec précision afin d'assurer un bon fonctionnement : l'axe de l'outil étant vertical et perpendiculaire sur la surface de l'échantillon. D'autre part, le déplacement de la lame doit être parallèle à la surface d'abrasion et avec des vibrations minimales. Ceci nous impose un ajustement juste glissant entre les pièces constituant le mécanisme de travail tels que masse/tige et porte lame/tige.

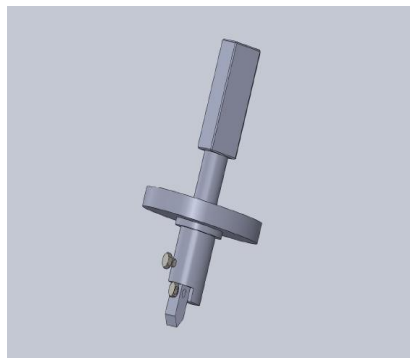
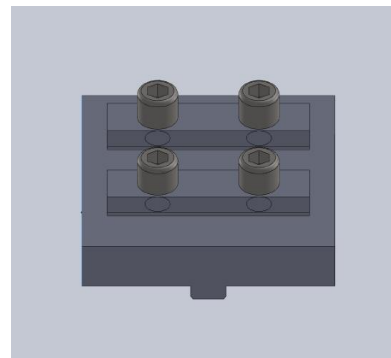
*La tige**Porte lame**La lame**La charge*



Support échantillons



Plaque

Figure III.24 : les éléments de mécanisme d'étude d'usure abrasive**Figure III.25**: Outil lame**Figure III.26** : Mécanisme de fixation

III.7.4. Matériaux d'étude

Le matériau des échantillons est de la **Classe 4** : des pions d'élastomères chargés en noir de carbone avec des pourcentages de charge différents qu'on a représenté dans les séries :

Matériaux	Gomme NR	Noir de carbone N220	Silice
1	100	50	50
2	100	50	30
3	100	50	0
4	100	50	20
5	100	100	0
6	100	80	0
7	100	60	0

Tableau III.1 : composition chimique en charges des éprouvettes (la composition est donné en gramme).

-Géométrie des pions

Les échantillons sont découpés à partir des plaquettes d'élastomères d'épaisseur 4mm. Les spécimens d'essais ont une largeur de 5 mm et une longueur de 40 mm minimum. La longueur utile de l'échantillon qui correspond à la course de la lame est de 15mm.

III.8-Résultats des essais et discussion**III.8.1-Conditions d'essais**

Dans cette partie expérimentale, nous avons met en évidence l'influence des paramètres tribologiques tels que la vitesse de glissement et l'angle d'inclinaison de la lame. La charge appliquée est égale à 7,5N. Nous utilisons des vitesses de glissement disponible sur la machine utilisée. Ces vitesses sont donc les vitesses de glissement données en coup par minute. La gamme des vitesses utilisée est N=15, 31, 55, 79 et 110 cycle/minute. La vitesse de glissement peut être calculée par la relation suivante :

$$v_g = 2LN \quad \text{en (mm/mn)} \quad (\text{III.1})$$

Les valeurs de l'angle d'inclinaison de la lame sont : 15-30-45-60-75°

Nous exploitons aussi l'influence de noir de carbone et de silicium sur l'usure abrasive de l'élastomère. Des structures micrographiques au MEB ont été prises pour des états des surfaces abrasées.

Tout les essais sont réalisés à l'ambiante et l'effet de la température est négligé. Le contact est sans lubrification.

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 de la balance électronique citée auparavant.

III.8.2- Résultats et discussion

Les paramètres essentiels pour notre étude expérimentale de l'usure abrasive de l'élastomère sont :

- Le taux de charges dans la matrice de l'élastomère ;
- La vitesse de glissement de la lame abrasive ;
- L'angle de la lame à la surface de contact avec l'élastomère ;
- Influence des charges de noir de carbone et de silice ;
- L'évolution de la surface de contact lors de l'essai d'usure abrasive.

Nous présentons les résultats pour l'influence des paramètres cité ci-dessus puis nous discutons ces résultats dans le but de contribuer dans l'étude expérimentale de l'usure abrasive des élastomères chargés.

III.8.2.1-Influence de l'angle de l'arrête de la lame

Pour étudier l'influence de l'angle d'inclinaison de la lame d'abrasion, nous avons réalisé sur une fraiseuse cinq lames d'angle différentes (15, 30,45, 60, 75)°.

Les résultats expérimentaux de cette étude sont présentés dans la figure III. 27.

L'analyse de l'ensemble de ces résultats permet de constater que la perte de masse diminue linéairement en augmentant l'angle de la lame d'abrasion.

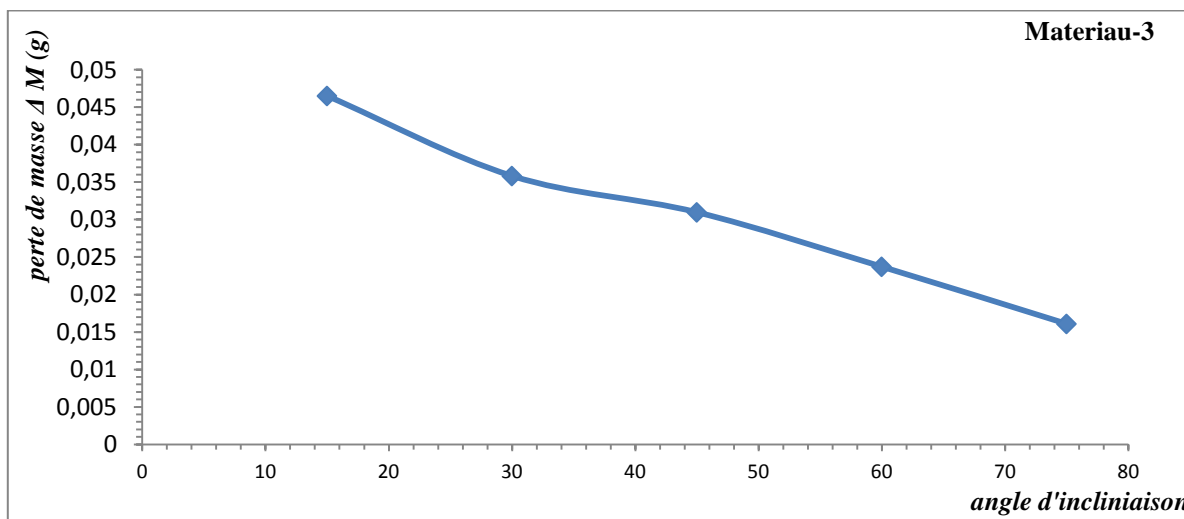
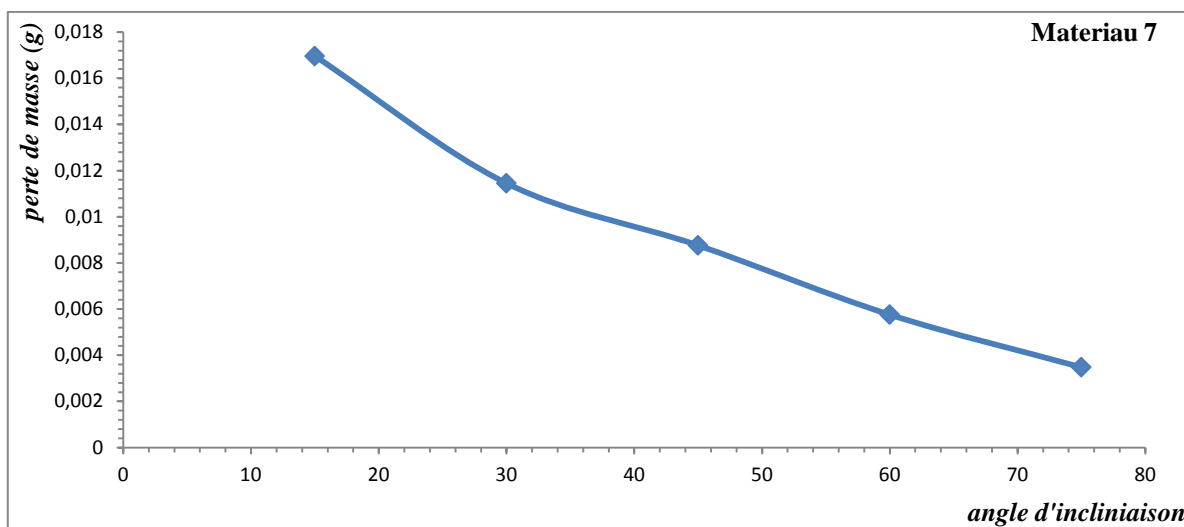
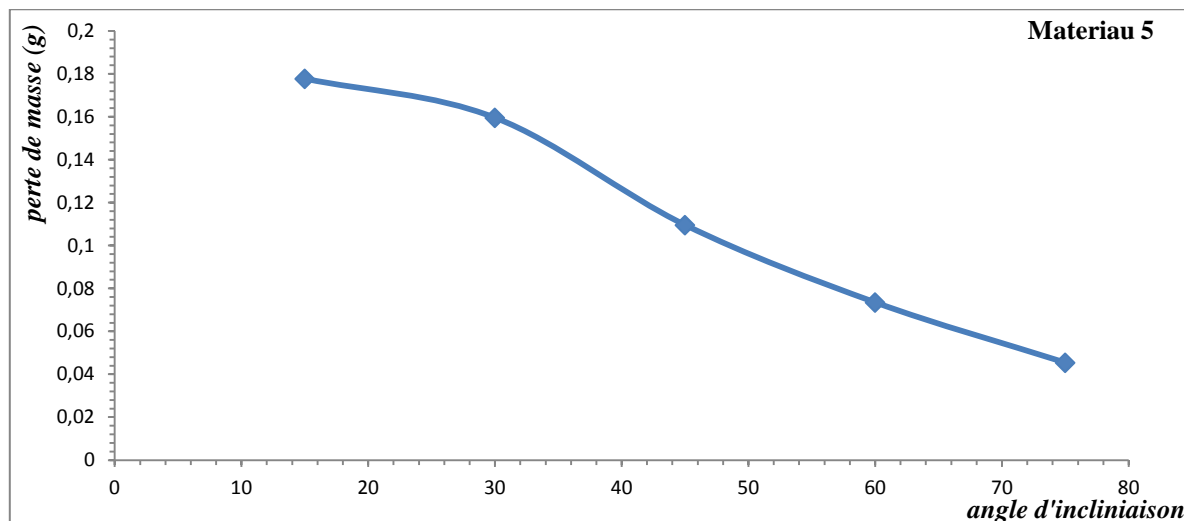


Figure III.27: évolution de la perte de masse en fonction de l'angle d'inclinaison de la lame d'abrasion.

III.8.2.2-Influence de vitesse de glissement

Nous avons étudié l'influence des vitesses de glissement en utilisant des élastomères de différentes classes (Figure III.28). Nous utilisons une charge normale égale à 8N avec les gammes de vitesses disponibles sur la machine.

L'analyse de l'ensemble des courbes de variation de perte de masse en fonction de vitesses de glissement, pour les différents matériaux avec de taux de charges différents et pour les deux types de charges, permet de constater l'existence d'un pic. Nous constatons que l'usure augmente avec l'augmentation de la vitesse jusqu'à atteindre une valeur maximale puis décroît en augmentant d'avantage la vitesse de glissement. Donc, nous suggérons l'existence d'une vitesse critique ou bien vitesse d'usure maximale.

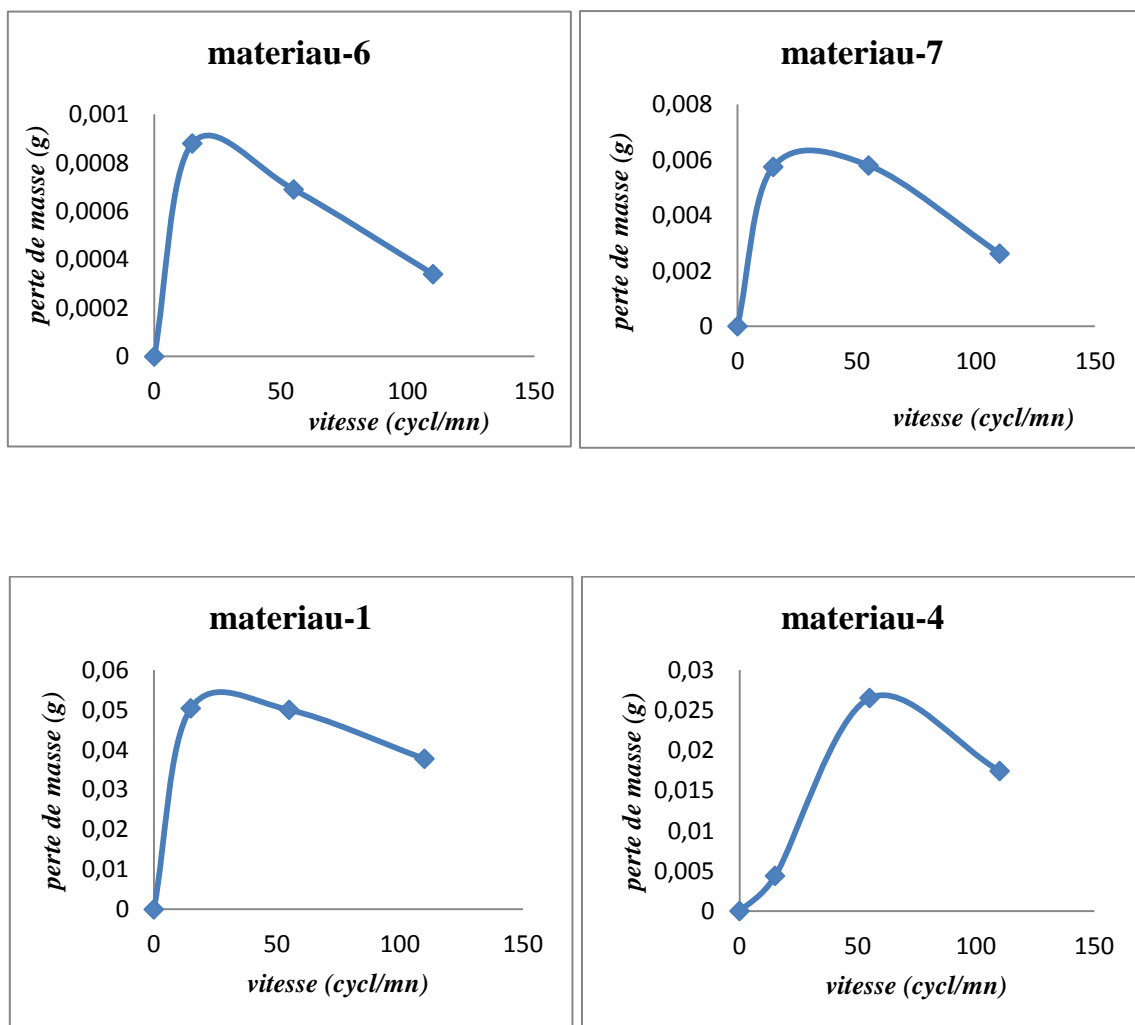


Figure III.28: évolution de la perte de masse en fonction de la vitesse de glissement

III.8.2.3-Influence de durée d'utilisation (nombre de cycle)

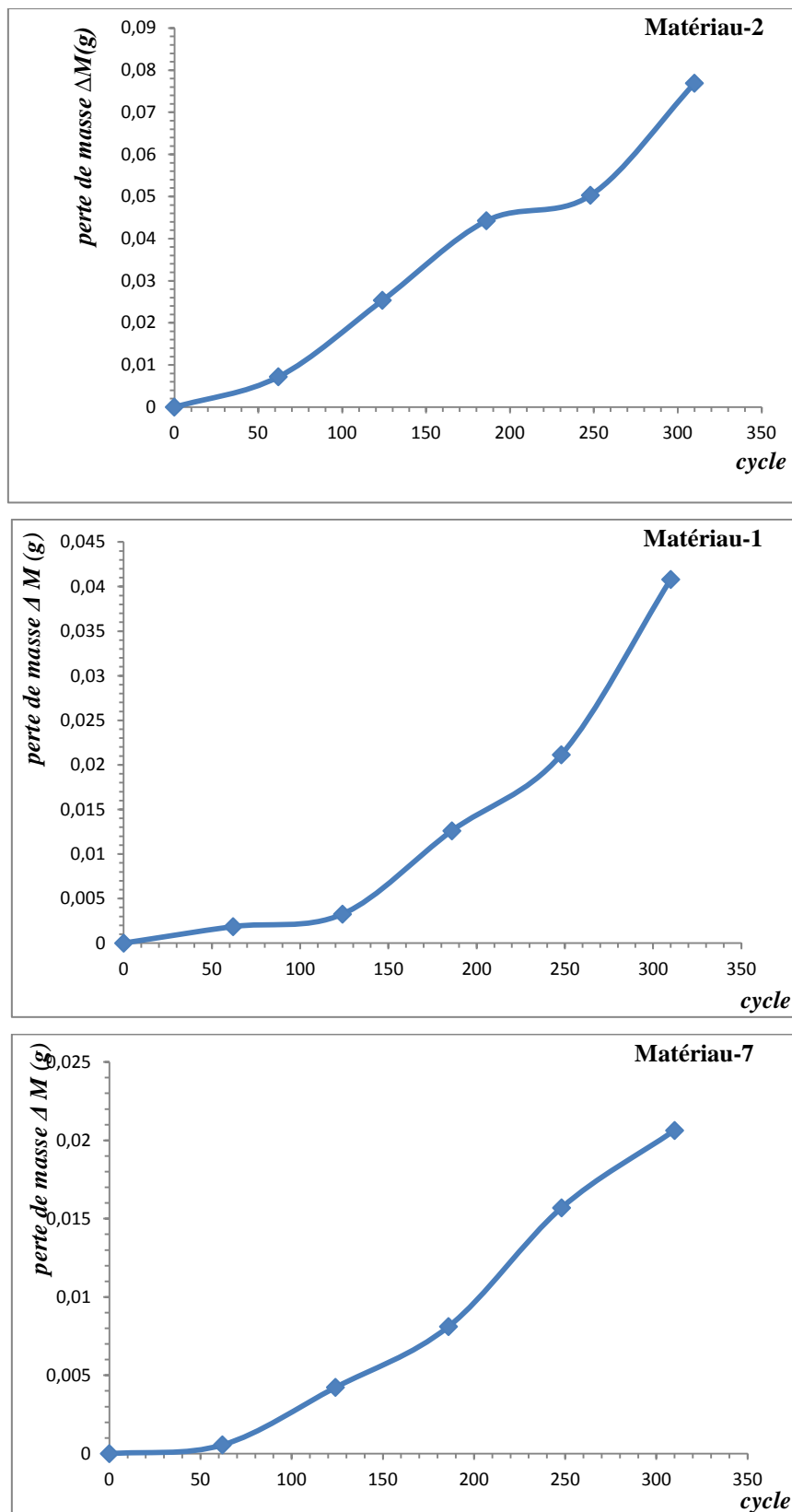


Figure III.29: évolution de la perte de masse en fonction du nombre de cycles parcouru.

L'étude de l'influence de nombre de cycle mis en jeu automatiquement le phénomène d'usure abrasive par fatigue. Nous résumons les étapes d'arrachements de la matière en trois étapes :

- En première étape il y a endommagement de la matière à la surface qui par cumule des effets mécaniques prépare la deuxième étape du mécanisme d'usure. Le nombre de cycle est N_1 ;
- Deuxième étape c'est la naissance des fissures à la surface de contact. Le nombre des fissures dépend, donc, de la nature de matériau ;
- En dernières étapes, c'est la propagation des fissures.

III.8.2.4-influence des charges de noir de carbone et de silice

Les résultats des essais sur l'influence des charges de noir de carbone et de silice sont présentés en (Figure 30). Les résultats sont obtenus pour des différentes valeurs de vitesse de glissement (15cyc/mn, 31cyc/mn et 55cyc/mn) que nous jugeons relativement faible, moyenne et élevées respectivement. Pour l'ajout de noir de carbone, l'allure des courbes obtenue est facile à reproduire et présente un minimum. Ce minimum est lié à la vitesse de glissement ; nous obtenons une usure minimale avec des taux de noir de carbone égaux à 65, 75 et 58% respectivement.

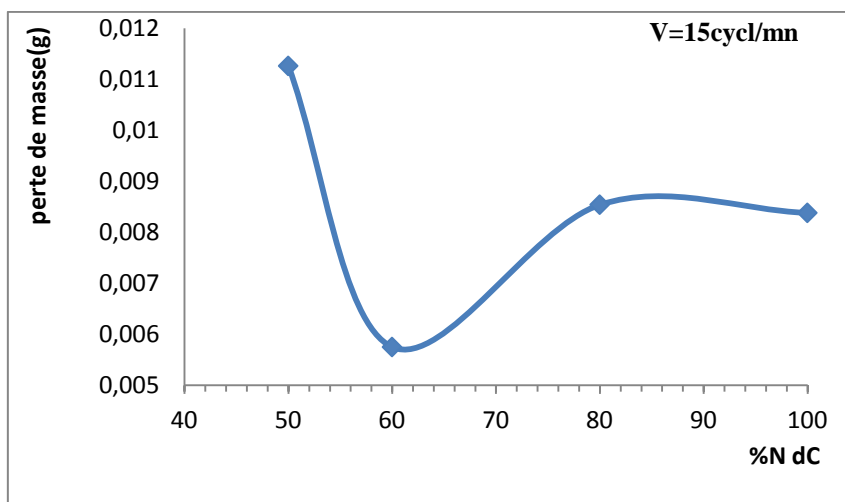
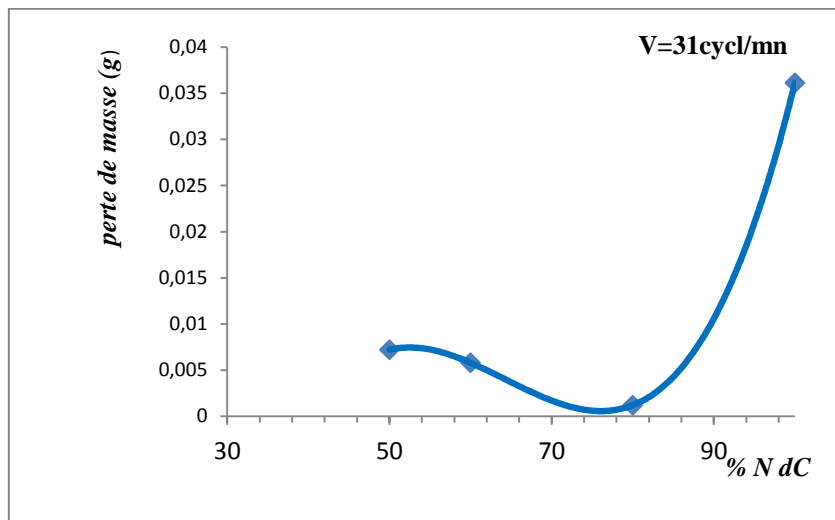
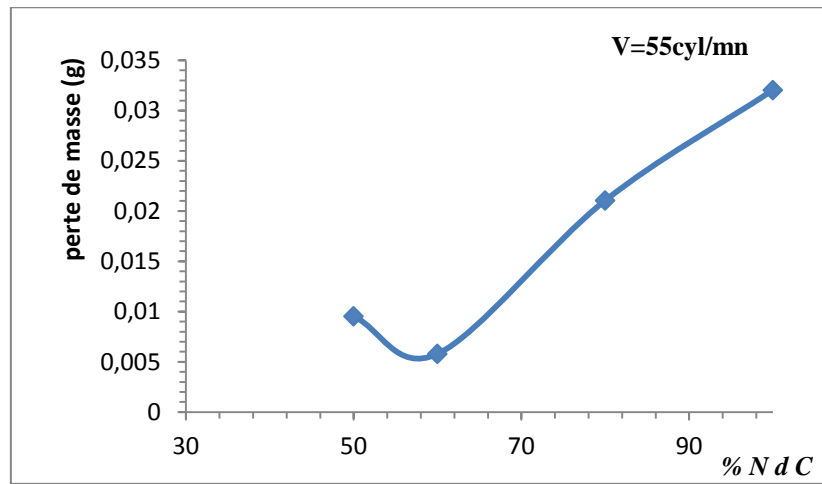


Figure III.30 : Influence de taux de noir de carbone sur l'usure abrasive des élastomères

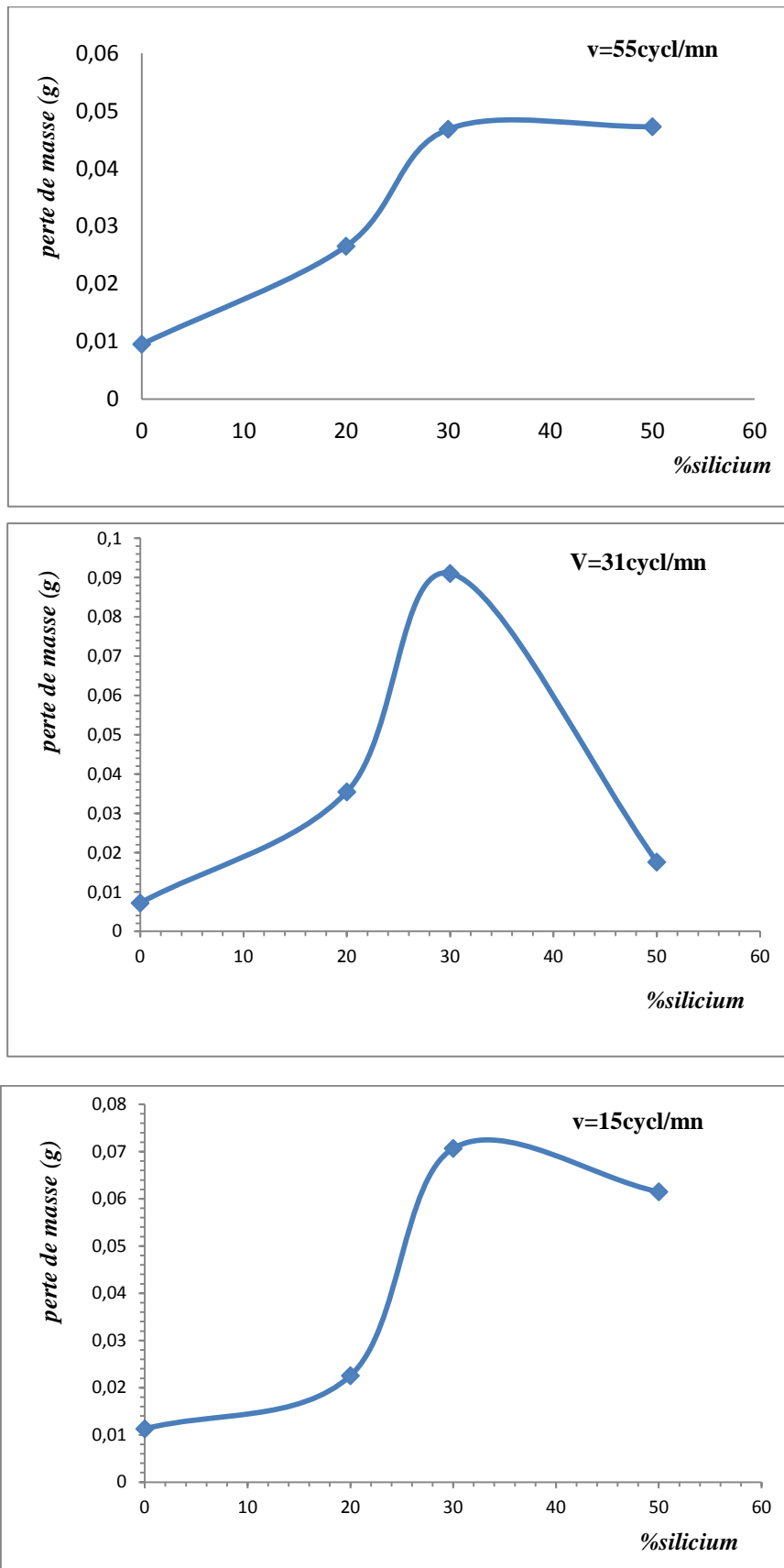


Figure III.31 : Influence de taux de silicium sur l'usure abrasive des élastomères

Pour les charges de silice, nous notons la dispersion des résultats. Nous avons donné les résultats typiques sur les courbes de la (figure 31). Ces résultats obtenus sont inverse à l'influence de noir de carbone. L'usure augmente jusqu'à une valeur maximale d'usure puis décroît en augmentant le taux de charge. Les charges renforçantes sont caractérisées par trois paramètres principaux à savoir la structure, la surface spécifique et l'activité chimiques. Contrairement aux noirs de carbones (charges traditionnelles pour le renforcement des élastomères) pour lesquels les interactions avec la matrice sont spontanées, la silice nécessite l'emploi d'un agent de couplage et de recouvrement.

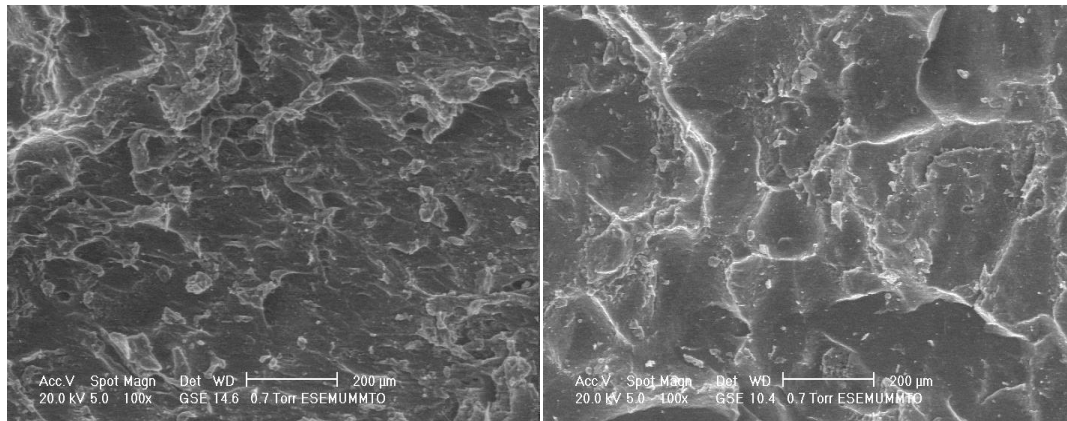
III.9-Etude micrographique de l'usure

L'étude micrographique est réalisée dans le but d'analyser l'évolution de dégradation des surfaces des élastomères abrasés en fonction des paramètres tribologiques tels la vitesse de glissement, l'angle d'inclinaison de la lame, le nombre de cycle la pression de contact et la composition chimique des matériaux d'étude. Nous observons par la mise en évidence micrographique des surfaces usées des échantillons choisis parmi d'autres les modes d'usure tels que les rides et cratères d'usure, ainsi que l'uniformité de mécanisme d'arrachement de la matière. Nous nous constatons que les paramètres tribologiques influent sur la taille et le nombre des rides et des cratères. Les clichés dans la (Figure 32) sont obtenus pour une surface usée pour un matériau de 50% de noir de carbone+30% de silice sous les mêmes conditions d'essais mais après 186 cycles et 250cycles respectivement. Nous notons que dans ce cas, les dimensions des cratères augmentent d'une manière spectaculaire et de même pour les rides.

L'analyse des clichés dans la (Figure 33) porte sur l'influence de l'angle d'inclinaison de la lame sur l'évolution des cratères et les rides d'usure pour un matériau à 100% de noir de carbone. Nous avons choisi trois valeurs d'angle 15°, 45° et 60°, nous observons l'augmentation des dimensions des cratères en inverse de l'angle : les dimensions des cratères sont plus grands dans le cas de l'angle égale à 15° puis diminuent pour un angle égale à 45° et continuent à diminuer pour l'augmentation de l'angle à une valeur égale à 60°.

La dernière micrographie concerne l'étude de la vitesse de glissement pour un matériau de 50% de noir de carbone+20% de silice avec une durée de fonctionnement de 250 cycles et des vitesses respectivement 31, 55, 79 cycles/mn. Connaissant que l'usure des élastomères s'effectue par deux principaux mécanismes : formation des rides et des cratères, le mécanisme prépondérant sur la perte de masse est l'usure par formation des rouleaux qui

conduit aux détachements des débris. Au faible vitesse de glissement (vitesse de déformation de la matière) la valeur des rides augmente avec la valeur de la vitesse de glissement jusqu'à atteindre une vitesse critique, à partir de cette vitesse, nous suggérons une élévation de la température qui est un principal facteur qui aide à la relaxation du matériau et qui induit à la diminution des rides ainsi qu'une diminution dans la perte de masse.

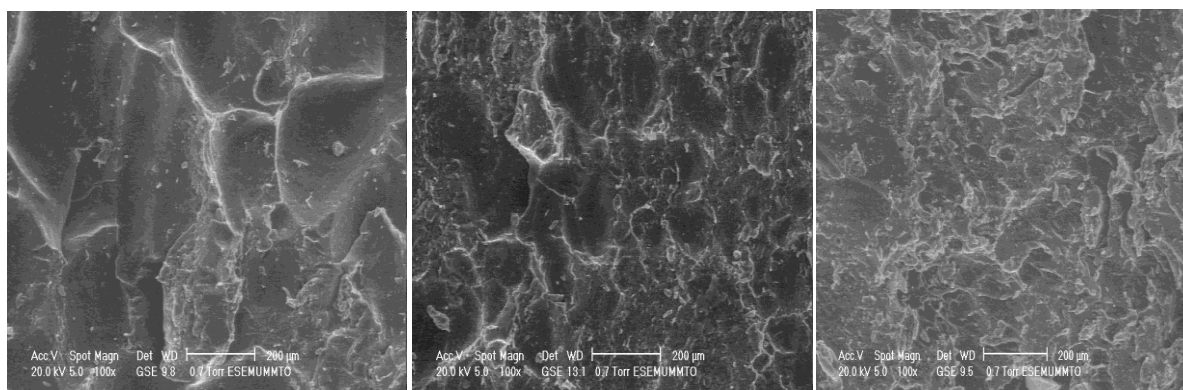


(M2, 186cycl, V=31cycl/mn)

(M2, 250cycl, V=31cycl/mn)

La charge est de 7N, l'angle d'inclinaison est de 60°

Figure III.32 : Micrographie de l'influence de nombre de cycles

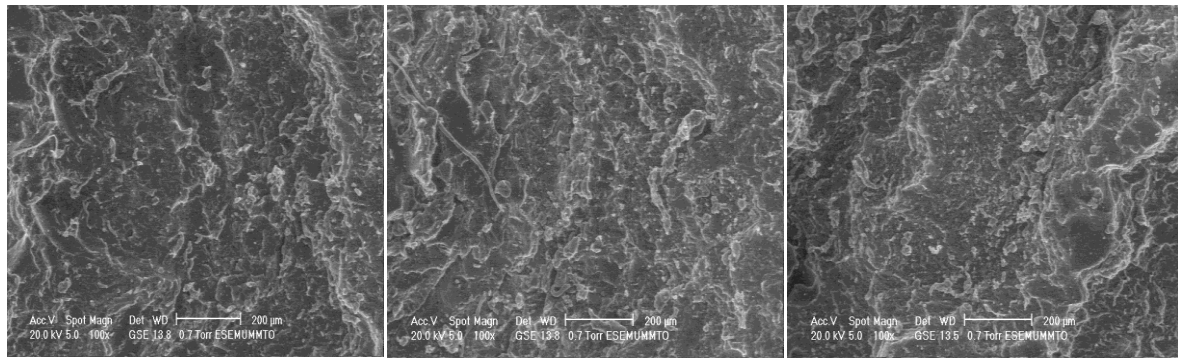


Matériau 5 : $\alpha=15^\circ$

$\alpha=45^\circ$

$\alpha=60^\circ$

Figure III.33 : Micrographie de l'influence de l'angle d'abrasion



Matériau 4 : V=31cycl/mn

V=55cycl/mn

V=79cycl/mn

Figure III.34 : Micrographie de l'influence de la vitesse de glissement

III.10-Simulation numérique par MEF

Dans le cadre de la compréhension du fonctionnement de notre système et afin d'observer l'état de contraintes et la déformation que subi l'échantillon lors de l'essai, on a réalisé une simulation par la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel ABAQUS CAE.

III.10.1-Présentation du logiciel

ABAQUS CAE permet la définition et la visualisation des différentes simulations. Initialement, les problèmes sont définis par des entités géométriques pour lesquelles seront définies les propriétés physiques et pour les différentes étapes de calcul : les contacts, les chargements, les conditions initiales et les conditions aux limites. Ensuite intervient la phase de discrétisation où les différentes entités selon leurs définitions respectives seront maillées ou non avec la définition des éléments. Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le module Job pour analyser ce modèle. ABAQUS va alors réaliser tous les calculs nécessaires pour nous permettre de visualiser le modèle et les résultats tirés de ce travail.

III.10.2-Visualisation et discussions des résultats

III.10.2.1-Contact plan-plan

L'échantillon est modélisé comme un solide déformable de dimension 5x5x5 en état de contact plan avec un maillage de type CPS4R et la technique de maillage **Hex**. Dans **Mesh-élément type**, on a choisi **Standard** pour la bibliothèque d'éléments, **Linear** comme ordre de géométrie et **Plan stress** comme famille d'élément. Pour modéliser le

comportement mécanique de notre élastomère on a utilisé un modèle physique hyperélastique isotrope d'**ARRUDA BOYCE** donné par la relation suivante :

$$U = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_m^{2i-2}} (\bar{T}_1^i - 3^i) + \frac{1}{D} \left(\frac{J_{el}^2 - 1}{2} - \ln J_{el} \right) \quad (\text{III.2})$$

Tel que :

- $C_1 = \frac{1}{2}$, $C_2 = \frac{1}{20}$, $C_3 = \frac{11}{1050}$, $C_4 = \frac{19}{7000}$ et $C_5 = \frac{519}{673750}$;
- $\mu = 200$, $\lambda_m = 5$ et $D = 0,001$.

Les résultats de la simulation numérique par la méthode des éléments fini montrent qu'à l'état statique du système, l'échantillon subi une pression de contact. L'échantillon diminue en longueur et augmente en largeur et en épaisseur alors la surface de contact initiale augmente. En appliquant un déplacement vertical de l'échantillon on distingue que la contrainte est maximale aux centre de la surface de contacte et aux extrémités encastrée de l'échantillon. La distribution des contraintes et la déformation sont données sur les figures : III.35-III.36. Les valeurs des contraintes de **Van mises** varient d'une manière linéaire de point de contact échantillon/disque : à titre indicatif la valeur de la contrainte pour un déplacement imposé de 1mm passe d'une valeur minimale égale à $6.467 \cdot 10^1$ MPa à la valeur maximale égale à $1.451 \cdot 10^2$ MPa (Figure III.36: c).

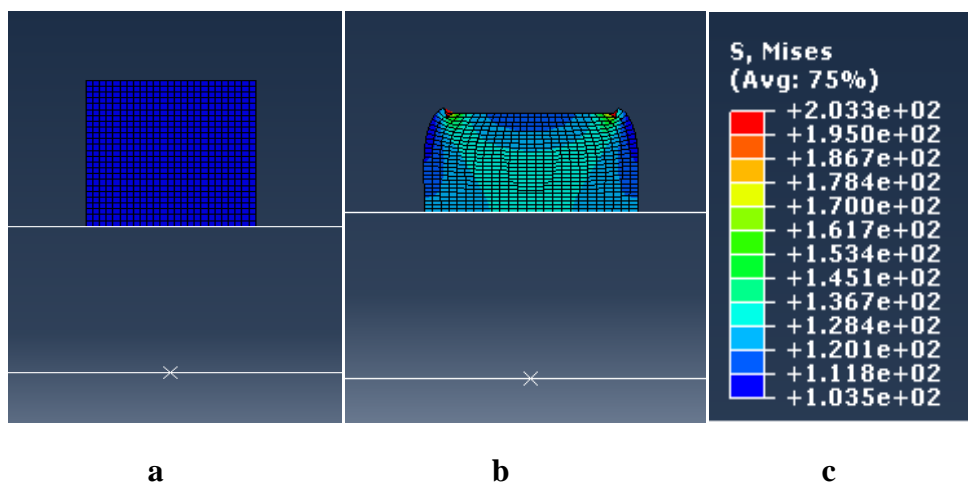


Figure III.35 : a)-modèle numérique 2D du contact plan-plan.

b)-état de contrainte de Van Mises c)-Légende des contraintes.

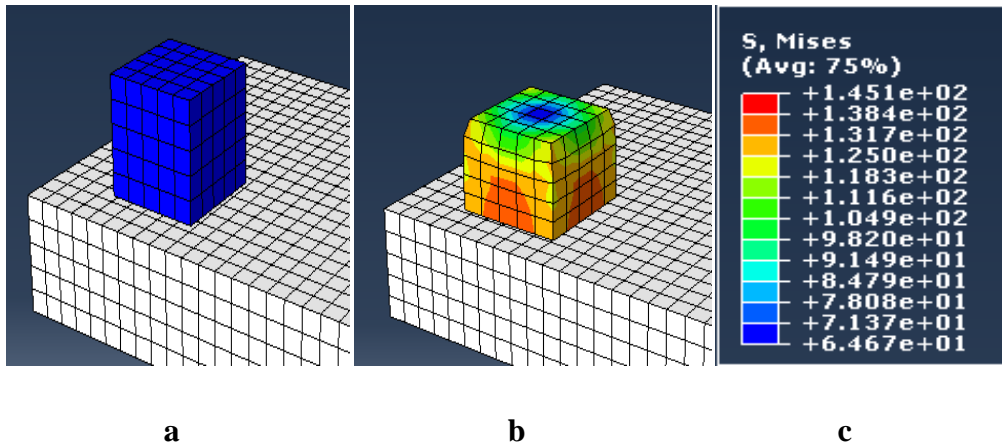


Figure III.36 : a)-Modèle numérique 3D du contact plan-plan.

b)-Etat de contrainte de Van Mises. c)-Légende des contraintes.

Les résultats de la simulation numérique de l'échantillon au cours de l'essai de l'usure sont obtenus en considérant un coefficient de frottement égale à **(1)** et que l'échantillon est encastré à la face opposée (surface de fixation de l'échantillon) à la surface de contact (Figure III.37). La distribution des contraintes dans l'échantillon sur sa face de contact est non uniforme : à l'avant de l'échantillon la valeur de la contrainte de **Van mises** est égale à $3,772 \cdot 10^2$ MPa, alors qu'à l'arrière de l'échantillon la valeur passe à $2,040 \cdot 10^1$ MPa. Ceci est en accord avec l'observation de l'état de surface de l'échantillon usé : l'usure se manifeste beaucoup plus à l'avant de l'échantillon. L'autre constat concerne la déformation de l'échantillon qui est entraînée dans le sens de la vitesse de glissement par la composante de l'effort tangentiel.

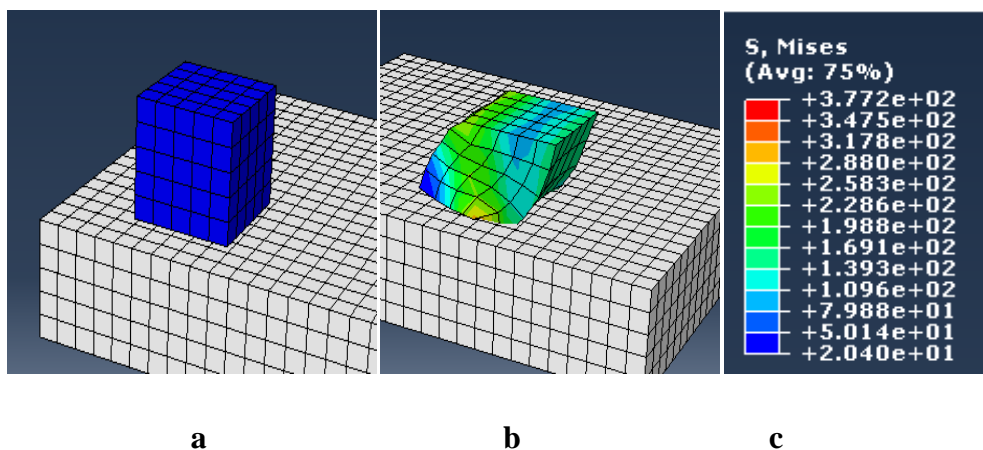


Figure III.37 : a)-Modèle numérique 3D du contact plan-plan.

b)-Etat de contrainte de Van Mises. c)-Légende des contraintes.

III.10.2.2-Usure abrasive

L'échantillon est modélisé comme un solide déformable de dimension **40x4** avec les mêmes paramètres du modèle plan-plan.

Les résultats de la simulation numérique de l'essai d'usure abrasive nous montre que la déformation est plus importante au point de contact (figure III.38), ainsi la contrainte est maximale et égale à $2,433 \cdot 10^2$ MPa pour une pénétration de la lame de 2 mm. En s'éloignant de l'arrêt de la lame la déformation diminue et la contrainte atteint une valeur minimale de $2,037 \cdot 10^1$ MPa.

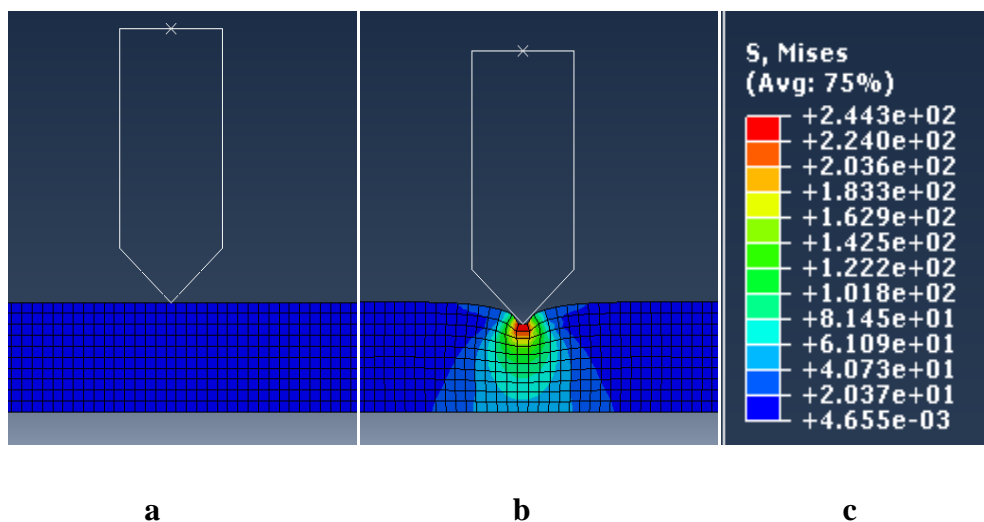


Figure III.38 : a)-modèle numérique 2D d'usure abrasive.

b)-état de contrainte de Van Mises c)-Légende des contraintes.

Au cours de l'essai d'usure les résultats obtenus en considérant un déplacement de la lame de 10 mm sont illustrés sur la figure III.39. L'échantillon se déforme suivant un angle (α) du sens du mouvement, la partie de l'échantillon du côté positif du mouvement est comprimée alors que la partie du sens négatif est étirée. La contrainte de **Van mises** atteint une valeur maximale de $1,526 \cdot 10^2$ MPa dans le point de contact lame/échantillon, et sa valeur minimale est de $1,272 \cdot 10^1$ MPa.

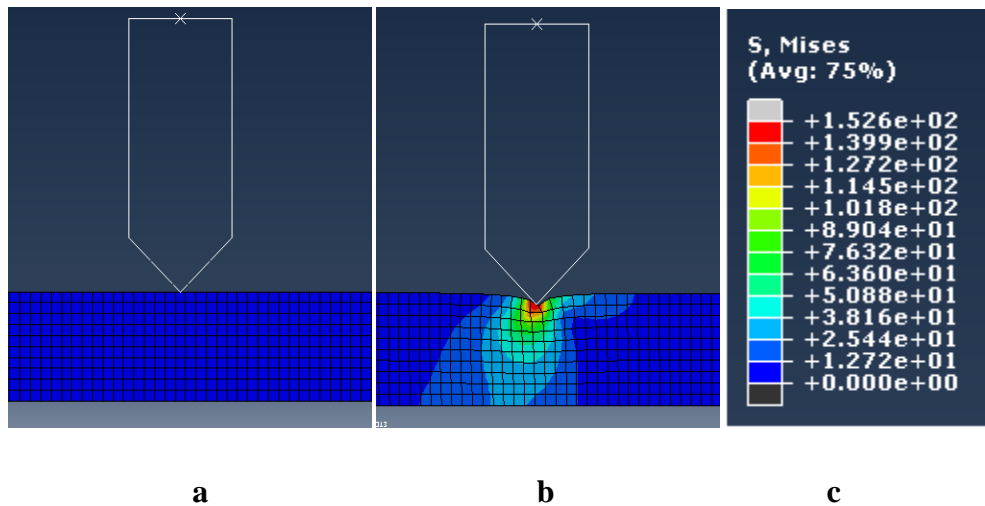


Figure III.39 : a)-modèle numérique 2D d'usure abrasive.

b)- Etat de contrainte de Van Mises c)-Légende des contraintes.

III.11- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la partie expérimentale de notre travail qui concerne l'influence des effets d'intempérie tel que : le milieu marin et les rayons solaires sur le comportement à l'usure de l'élastomère, ainsi dans une deuxième partie nous nous sommes intéressés à l'usure abrasive manifestée par des différents paramètres tribologiques citant : la durée de fonctionnement, la vitesse de glissement, l'angle d'abrasion et l'ajout des charges (noir carbone et la silice).

Une simulation par la Méthode des éléments finis a été réalisée dans le but d'étudier l'état de déformation des échantillons et la répartition des contraintes.

Les résultats obtenus par cette étude correspondent bien au phénomène d'usure des élastomères définis dans le chapitre précédent.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude nous a permis de découvrir la tribologie comme une science qui étudie le frottement, l'usure et la lubrification, mais aussi l'immensité des paramètres qui interagissent dans un contact entre deux corps en mouvement relatif.

L'objectif de notre étude est double : le premier objectif est l'étude de l'influence de l'environnement sur le comportement au frottement et à l'usure. Les essais ont été menés sur un tribomètre pion sur disque et on a abouti aux résultats suivant :

- La classe du matériau soumise à l'effet de l'eau de mer présente un même comportement que celui de la classe vierge mais avec une perte de masse moindre ceci est dû à la nature qui a acquis, le matériau est devenu ferme et il présente une faible résistance au mouvement ;
- La classe de matériau influé par les rayons solaires présente un comportement particulier car au début il suit le comportement des deux autres classes ou la perte de masse a tendance à augmenter mais, au bout d'une distance parcourue, elle diminue et tend à se stabiliser.

La deuxième partie de ce travail a été réalisée sur un étai limeur mené d'un mécanisme d'usure abrasif. Dans cette partie on a étudié l'influence de paramètres tribologiques tels que la durée de fonctionnement, la vitesse de glissement, l'angle de la lame d'abrasion et l'influence de taux de charge.

Après une présentation graphique des résultats des essais, nous confirmons avec notre interprétation, en accord avec ces résultats, les points suivants:

- La perte de masse augmente linéairement en diminuant l'angle d'inclinaison de la lame d'abrasion ;
- Dans l'analyse de l'influence de la vitesse de glissement on a constaté l'existence d'un pique signe d'une vitesse d'usure critique ou maximale ;
- L'étude de l'influence de la durée de fonctionnement nous a permis de résumer le comportement de notre élastomère qui subit en premier lieu un endommagement de la matière qui fait naître des fissures sur la surface de

Conclusion générale

contact, qui en suite se propagent et conduit à l'arrachement des débris et à la perte de masse ;

- L'ajout de certaines charges comme le noir de carbone et la silice au SBR, donne des propriétés mécaniques telles que l'augmentation de la rigidité et la résistance à l'usure.

En perspective, une étude de mécanisme in situ reste indispensable pour suivre l'effet des paramètres tribologiques comme la température et la naissance des rides aux différentes conditions d'essais. Ceci reste lié à l'utilisation d'un tribomètre spécifique pour ce but. Ces résultats par la suite peuvent contribuer à une compréhension plus approfondie de mécanisme réelle qui se produit à la surface de contact. En conséquence, cette étude contribue à la construction d'un éventuelle modèle d'usure d'un élastomère.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] A .DESSARTHE, H.GUYOT, D.YHELIC. «Plastique, composite et élastomères dans les technologies médicales» 1997.
- [2] FABRICE DELEAU «Comportement tribologique et vibro acoustique d'un contact élastomère /verre» thèse de doctorat, 2009. École Centrale De Lyon.
- [3] F.BOLLAERT, A.LEMASCOW.«Analyses de défaillances pièces plastiques élastomères ou composites » guide pratique SDM 2000.
- [4] MYRIAM PIRE«Caoutchouc naturel époxydes et réticulation par les acides di carboxyliques, chimie, cinétique et propriétés mécaniques» thèse de doctorat 11/10/2011.
- [5] INNOCENT JUDICAËL BOUDIMBO«Mécanismes élémentaires de dispersion de charges de silice dans une matrice élastomère » thèse de doctorat 23/06/2011.
- [6] C.MOREAU «Etude expérimentale et numérique de l'hyper élasticité avec prise en compte de la compressibilité-identification paramétrique inverse –applications aux élastomères compacts » thèse de doctorat, université de Bretagne sud, 24/03/2000.
- [7] GILLES MARCKMAN « Contribution a l'étude des élastomères et des membranes soufflées» thèse de doctorat à l'école centrale de Nantes, 07/06/2004.
- [8] AUDE VANDENBROUCKE «Etude du comportement mécanique pour différentes températures d'un élastomère -caractérisations expérimentale et numérique»Thèse de doctorat, Université de Bretagne Sud, 2010.
- [9] VINCENT LE SAUX «Fatigue et vieillissement des élastomères en environnement marin et thermique -de la caractérisation accélérée au calcul de structure » thèse de doctorat ,27/10 2010.
- [10] FARID KHEDIMI «modélisation micromécanique des élastomères chargé » 08/07/2011.
- [11] EMILIE PLANES «influence des charges sur l'évolution des propriétés mécaniques des EPDM chargés hors de leur vieillissement par irradiation» 12/11/2008.

Références bibliographiques

[12] GHRISTIAN NGKIO «mécanique des matériaux et des structures et modélisation numérique» mémoire master II ,2007.

[13] ADNANE BOUKAMEL «modélisations mécaniques et numériques des matériaux et structures en élastomères » thèse de doctorat, 05/10/2006.

[14] IDA RAOULT « Structure élastomère sous chargement cyclique, Comportement fatigue - durée de vie» thèse de doctorat, École Polytechnique 2005.

[15] ADAMOU ADIB SOFIANE «Comportement tribologique et réactivité de l'alliage 718 en atmosphère contrôlée et à haute température » Thèse doctorat à l'institut national polytechnique de Toulouse, 2005

[16] ELHADI ABDELMALEK«Influence des paramètres mécaniques lors de l'endommagement par les phénomènes tribologiques des couples des matériaux XC48/XC55» Mémoire magistère, Université Med Boudiaf de M'silla, 2006.

[17] Vanessa BOUCHART «Eude expérimentale et modélisation micromécanique du comportement et de l'endommagement des élastomères renforcés» Thèse de doctorat, Université de LILLE 1 ,2007 .

[18] MARC THOMINE «Relations viscoélasticité tribologie des élastomères chargés. Applications aux joints d'étanchéité dans les roulements à billes» Thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquée de Lyon ,2004.

[19] MICHEL CARTIER, PHILIPPE KAPSA « Usure des contacts mécaniques» Technique de l'ingénieur, BM 5065 et BM 5066.

[20] MATHIAS WOYDT«Application des données tribologiques des matériaux» Technique de l'ingénieur, BM 7006.

[21] A. BENFOUGHAL «Analyse tribologique et thermique d'un matériau composite carbone-carbone dans un contact électrique»mémoire magister, université MENTOURI Constantine, 2010.

[22] GILLES PETITET« Contribution a la compréhension des mécanismes élémentaires d'usure douce des élastomères charges réticulés» Thèse de doctorat école centrale de Lyon, 2003.

Références bibliographiques

[23] ERIC FILDER«Usure des polymères» Technique de l'ingénieur AM 3135

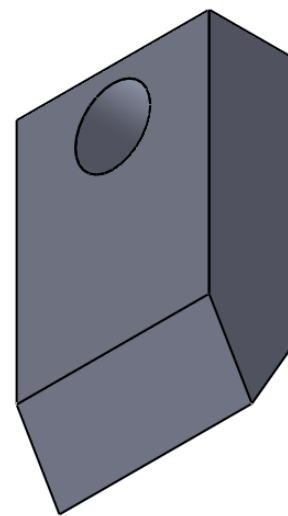
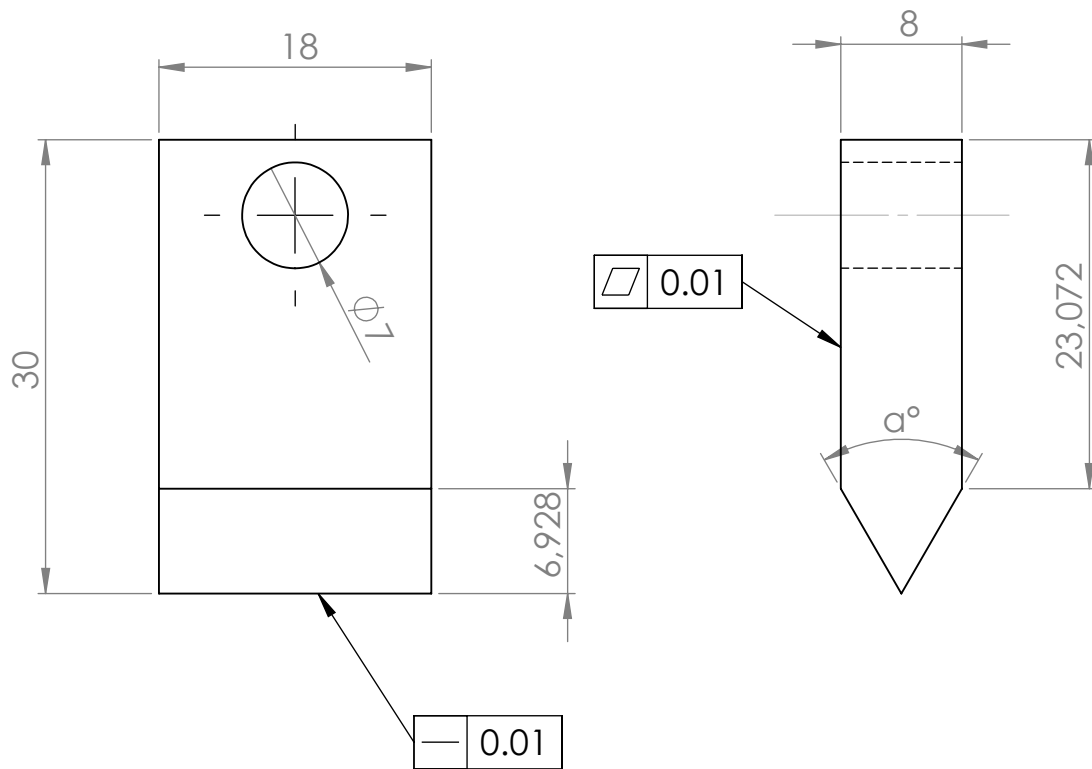
[24] G. AMONTONS « Du frottement de diverses matières les unes contre les autres» Histoire de l'Académie Royale des Sciences, Paris, pp. 432-445, 1699

[25] D. F. MOORE« Friction and wear in rubbers and tyres» Wear 61 (1980) 273-282.

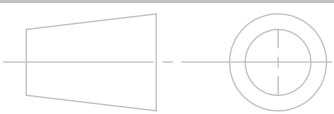
[26] Uchima Y., Ishino Y., « pattern abrasion mechanism of rubber », Wear, Vol.150, pp.141-155, 1992.

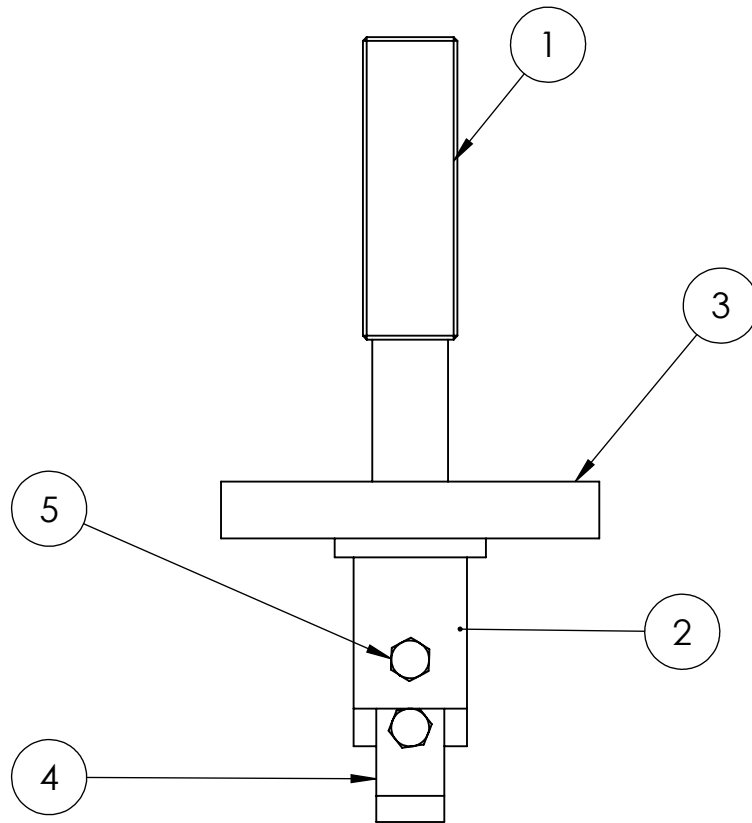
[27] Moore D.F., « The friction and lubrication of elastomers », Pergamon Press, Oxford, Materials Sc. & Tech., Vol.9, 1972

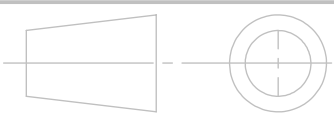
Annexes A

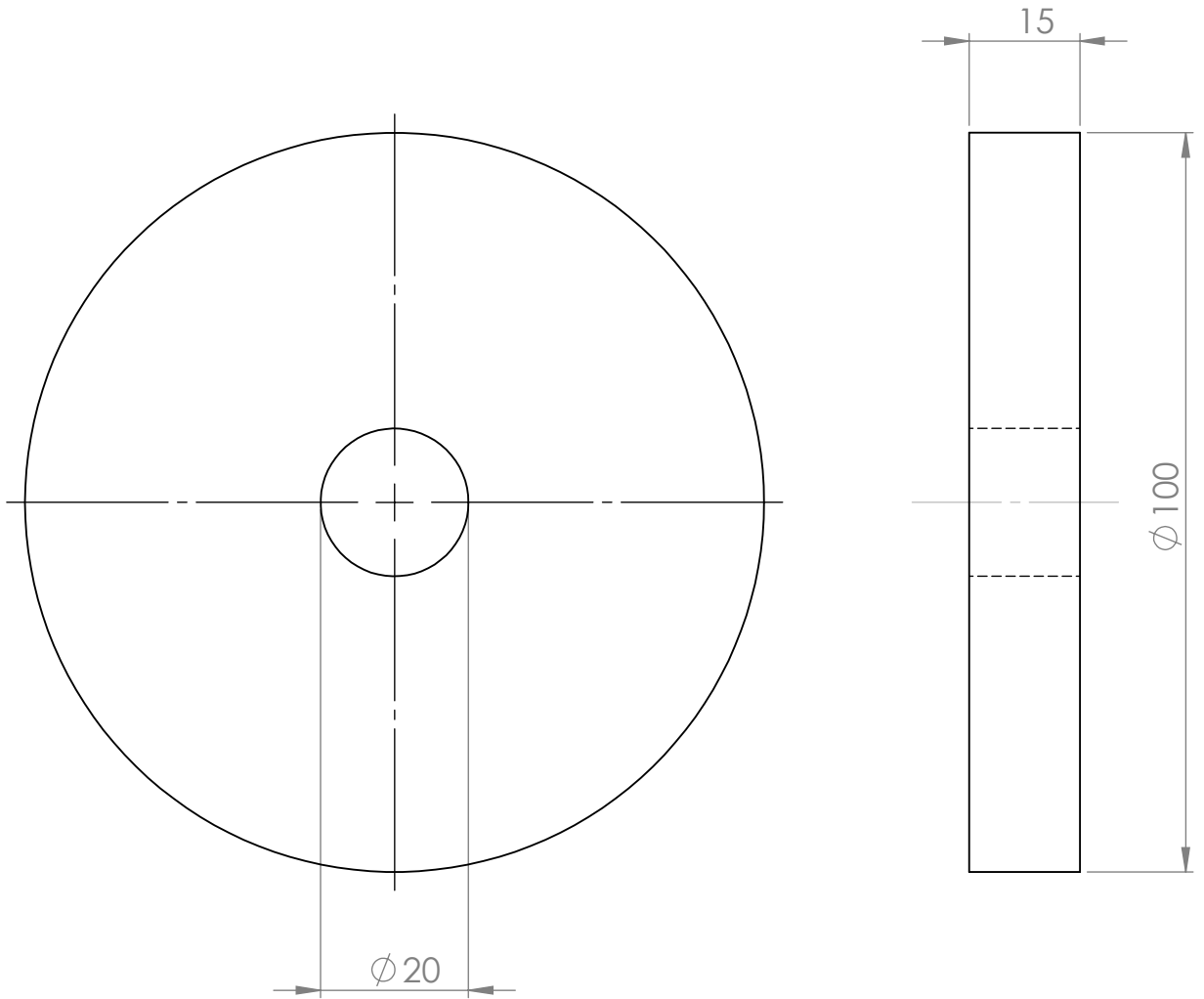


Etat de surfaces Ra = 3,2

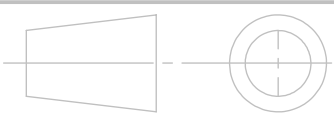
REP	NB	DESIGNATION	MATIERE	OBSERVATION
		LAME D'ABRASION	XC48	
ECHELLE 1 : 1		MECANISE D'USURE ABRASIVE		
		FM(MP)- UMMTO	2012-2013	
A4		CHALLAL Med CHERIF - LOUNAS FAZIA		

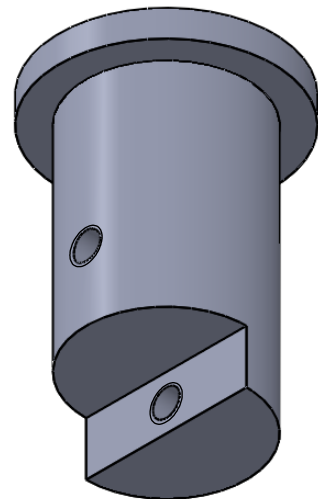
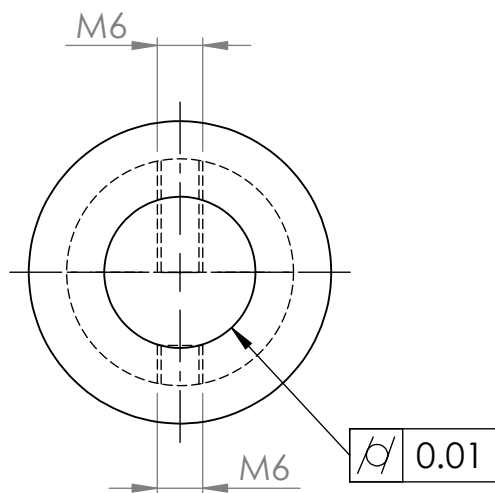
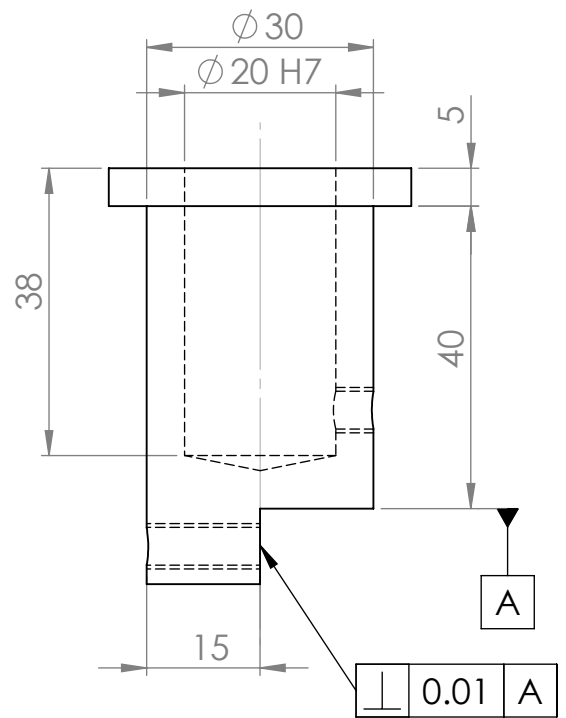
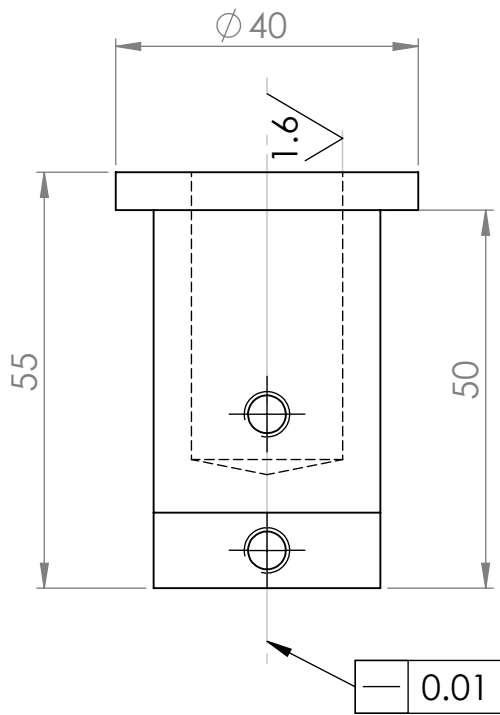


5	2	VIS CHC M6		
4	1	LA LAME	XC48	
3	1	POIDS	A40	
2	1	PORTE LAME	A40	
1	1	LA TIGE	A40	
REP	NB	DESIGNATION	MATIERE	OBSERVATION
ECHELLE 1 : 2		MECANISE D'USURE ABRASIVE		
		FM(MP)- UMMTO	2012-2013	
A4		CHALLAL Med CHERIF - LOUNAS FAZIA		




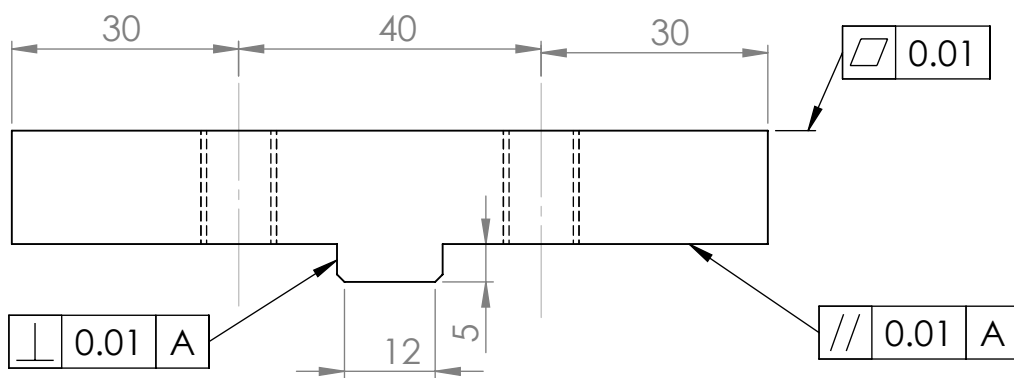
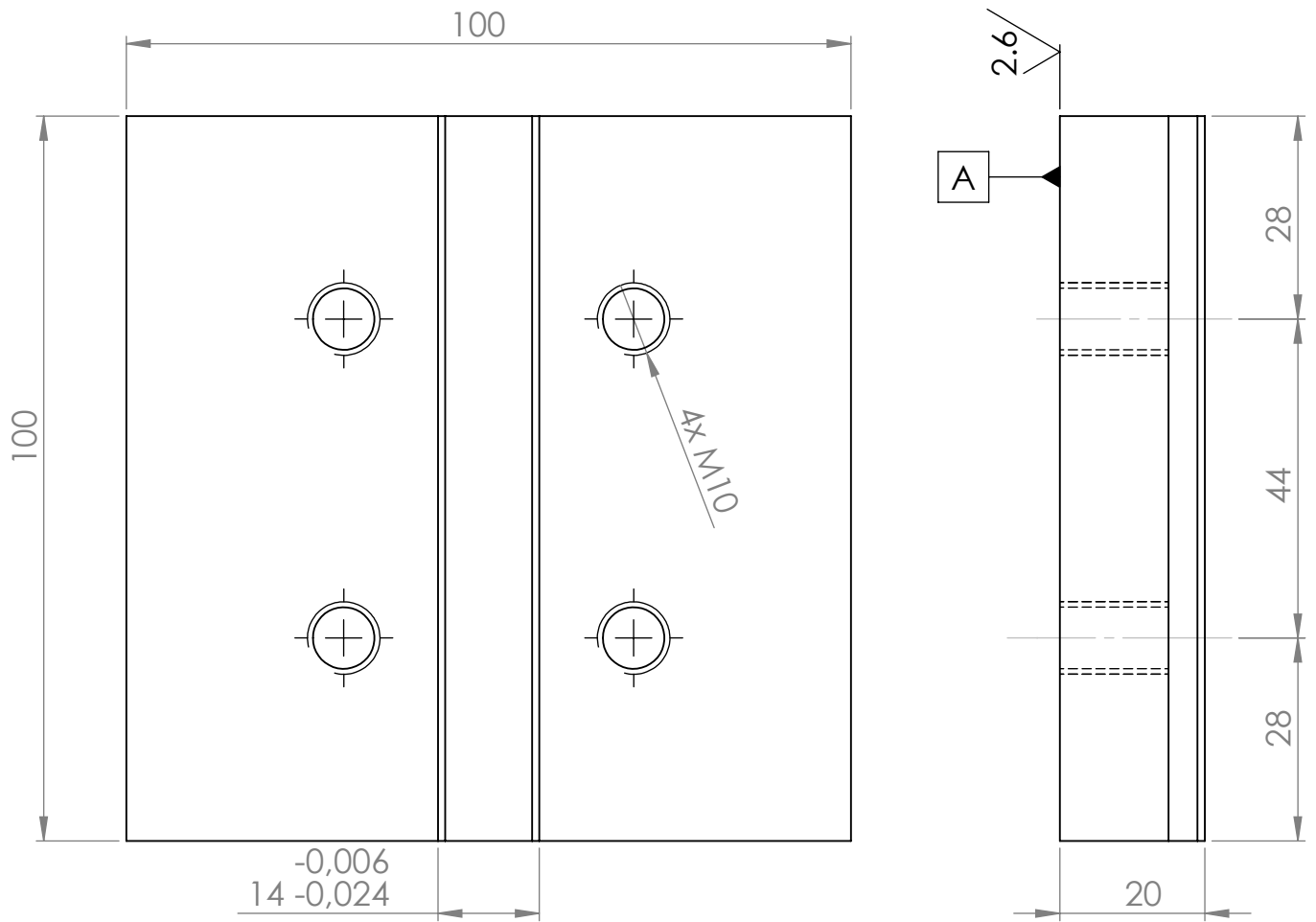
Etat de surfaces Ra = 3,2

		POIDS	A 40	
REP	NB	DESIGNATION	MATIERE	OBSERVATION
ECHELLE 1 : 1		MECANISE D'USURE ABRASIVE		
		FM(MP)- UMMTO		2012-2013
A4		CHALLAL Med CHERIF - LOUNAS FAZIA		

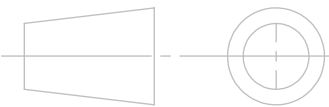


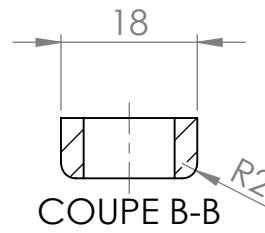
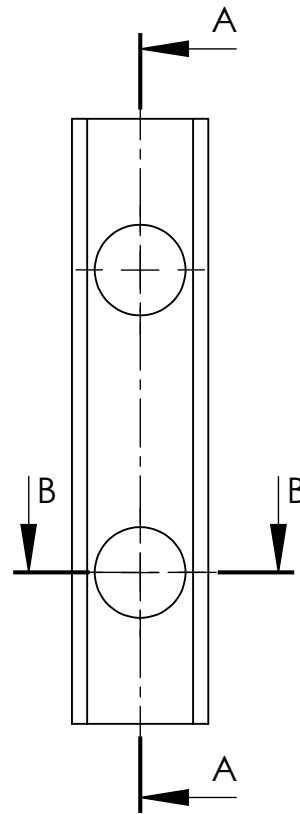
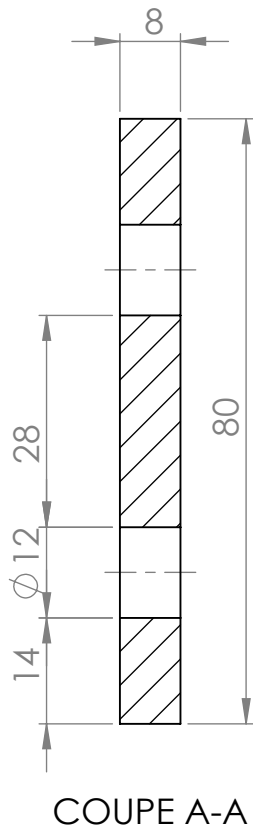
Etat de surfaces Ra = 3,2 sauf indication

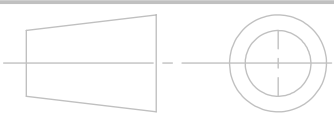
		porte lame	A 40	
REP	NB	DESIGNATION	MATIERE	OBSERVATION
ECHELLE 1 : 1		MECANISE D'USURE ABRASIVE		
		FM(MP)- UMMTO		2012-2013
A4		CHALLAL Med CHERIF - LOUNAS FAZIA		



Etat de surface Ra=10 sauf indication

		SUPPORT ECHANTILLON	ALUMINIUM	
REP	NB	DESIGNATION	MATIERE	OBSERVATION
ECHELLE 1 : 2		MECANISME D4USURE ABRASIVE		
		FM(MP)- UMMTO		2012-2013
A4		CHALLAL Med CHERIF 6 LOUNAS FAZIA		



		LA PLAQUE	ACIER DOU	
REP	NB	DESIGNATION	MATIERE	OBSERVATION
ECHELLE 1 : 1		MECANISME D'USURE ABRASIVE		
		FM(MP)- UMMTO	2012-2013	
A4		CHALLAL Med CHERIF - LOUNAS FAZIA		