

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOU MAMMERI TIZI OUZOU
FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

OPTION : CONSTRUCTION MECANIQUE

*En vue de l'obtention du diplôme de master
académique en génie mécanique*

Thème

*Usure abrasive des élastomères de pneumatiques :
influence des paramètres tribologiques*

Proposé et Dirigé par :

Mr.: DJERIDI.R

Réalisé par :

IBERSIENE Rabah

2015/2016

Remerciements

Tout d'abord, je remercie le bon Dieu qui ma donné la force et l'aide d'aller jusqu'au bout.

J'adresse mes remerciements les plus sincères à mon promoteur M^{ER} DJERIDI Rachid pour son sérieux, sa régularité, sa ponctualité et son assiduité dans toutes nos séances de travail.

Ainsi je remercie tout le personnel de la bibliothèque et les techniciens du laboratoire de génie mécanique et aussi les techniciens de hall OUED AISSI pour leur disponibilité et leur sympathie.

Je remercie également le membre de jury pour l'intérêt qu'ils portent à ce travail en ayant accepté la lourde tâche de l'examiner.

Enfin, je n'oublie pas de remercier tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce modeste travail.

** IBERSIENE **

DEDICACE

*... À la mémoire de mon chère père *arabe*,*

*À ma chère maman *houria*...*

Mes frères et sœurs.

À mes nièces melina, malake chiffa

À mes neveux mouhamed lamine, aymane ishaq et

chichnaq.

(...à ceux qui sont chers pour moi...)

....et dont je suis cher pour eux...)

RABAH IBERSIENE

Avant propos...

*Ce travail s'intègre dans le cadre de la réalisation
d'un mémoire de la fin d'étude pour l'obtention du
Diplôme du MASTER en génie mécanique*

(Option construction mécanique).

Il est intitulé :

*' 'Usure abrasive des élastomères de pneumatiques :
influence des paramètres tribologique ' '*

Sommaire

Sommaire

<i>Introduction générale</i>	01
------------------------------------	----

PARTIE THEORIQUE

Chapitre I : Généralités sur les élastomères

I.1 : Introduction	03
I.2 : Caoutchouc.....	03
I.2. 1:présentation.....	03
I.2.2 : Historique.....	03
I.2.3 : Hévéa Brasiliensis.....	05
I.3 : le caoutchouc naturel.....	06
I.3.1 : Durée de vie du caoutchouc.....	07
I.3.2 : Propriétés physiques et chimiques.....	07
I.3.3 : caoutchouc synthétique	08
I.4: les élastomères.....	08
I.4.1: Propriétés et structures des élastomères.....	08
I.4.2 : Microstructure des matériaux élastomères.....	10
I.4.3 : Les différentes familles d'élastomères.....	11
I.4.3.1 : Les élastomères thermodurcissables.....	11
I.4.3.2 : Les élastomères thermoplastiques.....	12
I.4.4 : Vulcanisation / Réticulation.....	13
I.4.5 : La cristallisation.....	14
I.4.6 : Température de transition vitreuse Tg.....	15
I.4.7 : La viscoélasticité.....	15
I.4.8:L'hystérésis.....	15

Sommaire

I.5 : Renforcement par les charges.....	14
I.5.1 : Les différentes charges.....	17
I.6: Les mécanismes d'endommagement.....	19
I.6.1 : Processus d'endommagement.....	19
I.7 : comportements des élastomères.....	20
I.7.1 :L'élasticité caoutchoutique.....	20
I.7.2 :L'effet Mullins.....	20
I.7.3 : Effet Payne.....	21
I.8 : utilisation des élastomères.....	22
I.9 : Conclusions.....	23

Chapitre II : La tribologie des élastomères

II.1 : Introduction.....	24
II.2 : Surface.....	24
II.2.1 : Outils conceptuels en tribologie des interfaces.....	25
II.2.2 : Le triplet tribologique et la notion de troisième corps.....	25
II.2.3 : Accommodation de vitesse.....	26
II.2.4 : Le circuit tribologique.....	27
II.3 : Contacts surfacique et hertzien.....	28
II.3.1 : Contact surfacique.....	28
II.3.2- Contact hertzien.....	29
II.4: Le frottement des élastomères.....	30
II.4.1 : Les différent Types de frottement	31
II.4.2 : Composante adhésive de frottement.....	31
II.4.3 : Coefficient de frottement.....	32
II.5 :L'usure des élastomères.....	32

Sommaire

II.5.1 : Introduction.....	32
II.5. 2: Usure.....	33
II.5. 2.1: Les paramètres influençant le taux d'usure	33
II.5. 2.2 : Origines de l'usure.....	33
II.6 : Données et paramètres tribologiques.....	34
II.6.1 : Evaluation de l'usure.....	34
II.6.2 : Taux d'usure.....	35
II.6.3 : Critère $p \times v$	35
II.6.4 : Densité d'énergie de frottement.....	35
II.6.5 : Rugosité.....	36
II.7 : Principaux faciès d'usure des élastomères.....	37
II.7.1 : Stries d'usure.....	38
II.7.2 : Rides d'usure.....	38
II.7.3 : Rouleaux d'usure.....	39
II.7.4: Cratères d'usure.....	39
II.8 : Phénomènes élémentaires et modes d'usure.....	40
II.9 : quelques paramètres influent sur l'usure.....	43
II.9.1 : Paramètres matériaux.....	43
II.9.1.1 : Propriétés mécaniques, effet de la température	43
II.9.1.2 : Ajout de charges renforçant au mélange.....	44
II.9.2 : Conditions expérimentales.....	44
II.9.2.1- Charge appliquée.....	44
II.9.2.2 : Composition de l'atmosphère.....	44
II.9.2.3 : Lubrification.....	45
II.10 : Conclusion.....	45

Sommaire

PARTIE PRATIQUE

Chapitre III : Moyens et conditions d'étude expérimentale de l'usure abrasive

III.1 : Introduction.....	46
III.2 : Etude expérimentale de l'usure abrasive- glissement linéaire.....	46
III.2.1 : Procédure expérimentale	46
III.2.2 : L'étau-limeur.....	46
III.2.2.1 : Origine.....	46
III.2.2.2: Utilisation.....	47
III.2.2.3 : Fonctionnement.....	47
III.2.2.4 : Cinématique d'un étau-limeur.....	48
III.2.2.5 : Usinage.....	49
III.2.3 : Description des mécanismes de fixation.....	50
III.3: Conditions d'essais.....	53
III.3.1: Matériaux d'étude.....	54
III.4 : conclusion.....	54

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1 : Résultats et discussion.....	55
IV.1.2 : Influence de l'angle de l'arrête de la lame.....	55
IV.1.3 : Influence de vitesse de glissement.....	57
IV.1.4 : Influence de la charge appliquée (poids kg).....	59
IV.1.5: Influence de durée d'utilisation (nombre de cycle).....	62
IV.6: Conclusion	65
Conclusion générale	66

Annexe

Références bibliographique

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les élastomères

Figure I.1 : Isoprène, C ₅ H ₈	04
Figure I.2 : Élaboration du caoutchouc« sec » et du latex à partir de la sève de l'hévéa.....	05
Figure I.3 : Récolte du latex.....	06
Figure I.4 : Évolution du module d'YOUNG et de l'angle de perte en fonction de la température.....	09
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.....	11
Figure I.6 : formation d'un réseau par les ponts sulfures [Mark, Erman et al. 1994].....	12
Figure I.7 : schéma de la vulcanisation [IFOCA, 1984].....	13
Figure I.8 : Influence de la densité de réticulation sur différentes propriétés mécaniques [Bouchereau, 1997].....	13
Figure I.9 : Effet de cristallisation sous contrainte.....	14
Figure I.10 : Phénomène de relaxation.....	15
Figure I.11 : Courbe d'hystérésis d'un élastomère.....	15
Figure I.12 : Les différentes échelles de taille des charges.....	16
Figure I.13 : Influence des charges renforçant.....	16
Figure I.14 : Influence de la taille des particules de noir de carbone sur le comportement d'un SBR.....	16
Figure I.15 : Échelle d'interaction entre des particules de NdC ou de silice et la matrice de polymère [leblance, 2002].....	18
Figure I.16 : Observation "macro-méso-micro" pour un élastomère réticulé.....	19
Figure I.17 : Deux types de mécanismes d'endommagement au sein d'un VER.....	20
Figure I.18 : Caractère hyperélastique d'un élastomère en traction uniaxiale.....	20
Figure I.19 : Chargement cyclique d'un élastomère	21
Figure I.20 : Mécanismes micromoléculaires d'assouplissement.....	21

Liste des figures

Figure I.21: Analyse de l'effet de Payne, évolution de propriétés mécaniques en fonction du niveau de déformation pour un élastomère **SBR** renforcé en silice..... 22

Chapitre II : La tribologie des élastomères

Figure II.1 : rapprochement des solides : effets et conséquences fonction de la température [Schallamach,1968].....25

Figure II.2 : le triplet tribologique de Godet et le concept de troisième corps.....26

Figure II.3 : sites et modes d'accommodation.....27

Figure II.4: Représentation schématique du circuit tribologique.....28

Figure II.5 : Surface projetée d'un palier.....29

Figure II.6: contacte hertzien des élastomères.....29

Figure II .7 : Frottement entre deux surfaces.....31

Figure II.8: Définition des coefficients de frottement.....31

Figure II.9 : Le frottement sec.....32

Figure II.10 : Exemple de représentation tridimensionnelle de rugosité.....36

Figure II.11: L'évolution du frottement de la rugosité.....37

(ici est représenté pointillés la rugosité optimal)

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).....37

Figure I.13 : schéma de l'endommagement d'une surface d'un élastomère par un indentateur Pointu. Les flèches indiquent la direction de glissement et les lignes pointillées la propagation des fissures ([schallamach, 1952]).....38

Figure II.14: Représentation des figures d'abrasion et de la mécanique de la rupture associée. [Schallamach, 1952; Southern et Thomas, 1979].....38

Figure II.15 : Micrographie d'un sillon formé sur un spécimen SBR.....39

Figure II.16 : Formation de rouleaux, selon [Aharoni, 1973].....39

Figure II.17 : Mécanisme de formation des cratères par déformation de la matrice et d'un agglomérant : a)-avant le passage de l'indentateur b)-sous passage de l'indentateur c)-après le passage de l'indentateur [Petitet, 2003].....40

Liste des figures

Figure II.18 : schéma de l'usure adhésive .le adhère à la surface antagoniste et lui arrache de la matière [stachowiak et coll., 2001].....	40
Figure II.19 : schéma des mécanismes d'usure abrasive : fracture et arrachage [geoges, 2000].....	41
Figure II.20 : Mécanisme d'usure érosive en présence d'un 3eme corps pour un impact unidirectionnel.....	42
Figure II. 21 : Diagramme présentant les relations entre le frottement des élastomères et leurs mécanismes d'usure.....	43
Figure II.22 : Usure et coefficient de frottement en en fonction de la température [Schallamach, 1968].....	44
Figure II.23 : lissage du substrat en présence de lubrification.....	45

Chapitre III : Moyens et conditions d'étude expérimentale de l'usure abrasive

Figure III.1 : L'étai-limeur.....	48
Figure III.2 : Schéma de principe de fonctionnement d'un etai limeur.....	48
Figure III.3 : Dispositif expérimental d'étude d'usure abrasive.....	50
Figure III.4 : mécanismes de fixation a)- fixation de la lame d'abrasion b)- fixation de l'échantillon.....	51
Figure III.5 : les éléments des mécanismes d'étude d'usure abrasive.....	52
Figure III.6 : Balance électronique.....	53
Figure III.7 : photographie et dimensionnement des échantillons pour l'usure abrasive.....	54

Chapitre IV : Résultats et discussion

Figure IV.1 : Courbe de variation de coefficient d'archard en fonction d'angle d'aspérité pour un polymère.....	56
Figure IV.2 : évolution de la perte de masse en fonction de l'angle d'inclinaison de la lame d'abrasion.....	56

Liste des figures

Figure IV.3 : Relation entre les angles α et θ	57
Figure IV.4: évolution de la perte de masse en fonction de la vitesse de glissement.....	58
Figure IV.5: évolution de la perte de masse en fonction de la charge appliquée.....	60, 61
Figure IV.6: évolution de la perte de masse en fonction du nombre de cycles parcourus...	63,64

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur les élastomères

Tableau I.2 : Familles d'élastomères.....07

Tableau I.1 : Composition du latex indépendamment du lieu de plantation.....10

Chapitre IV: Résultats et discussion

Tableau IV.1: l'intervalle de la zone linéaire pour chaque vitesse de glissement.....59

Liste des symboles

Tg : Température de transition vitreuse

V est le volume de matière enlevé

K : Le taux d'usure

L : est la distance de glissement

F_n : est la charge normale appliquée

H : la dureté du matériau

E : Module de Young

σ : contrainte

λ_i : Extensions principales

W : travail d'usure,

$\|F_n\|$: module de force normale ou course du contact,

$\|V_t\|$: module de la vitesse de glissement ou cours de contact,

t_0 : instant de début de calcul,

t_1 : instant de fin de calcul,

t : Temps

T : effort tangentiel

Q : charge appliquée

P : puissance d'usure.

S : surface

D : diamètre

L : longueur

μ : coefficient de frottement

C : couple

R : rayon

H : distance d'application la charge

Liste des symboles

f : coefficient de frottement.

K : Le taux d'usure

P : la pression.

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

v : vitesse de déplacement

E_f : La perte énergétique

V_g : vitesse de glissement

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

Introduction générale

Introduction générale

Etant une substance présente presque dans la plupart des appareils et matériaux fabriqués par l'homme, et cela vu son indispensabilité et son rôle unique que nul autre substance ne peut jouer ou remplacer; le nom (caoutchouc) nous est devenu très familier à force qu'on traite quotidiennement avec lui.

Notre expérience avec le caoutchouc et son comportement nous incite à le placer dans une catégorie bien à part parmi les matériaux polymères: cet élastomère est capable de beaucoup se déformer, absorbe très bien les vibrations... Ses spécificités le rendent quasiment indispensable pour certaines applications. Comment, en effet, imaginer, à notre époque, les pneumatiques, les semelles de chaussures, les essuie-glaces ou les joints d'étanchéité sans cette matière ?

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.

Le comportement tribologique de caoutchouc au contact glissant constitue un considérable intérêt. Les élastomères sont utilisés pour la fabrication de nombreuses pièces soumises au phénomène de dégradation par arrachement des microparticules à la surface de contact, exemple de joints d'étanchéité,

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 tel l'ajout de noir de carbone qui a constitué l'objet de nombreux travaux de recherche pour augmenter la performance des élastomères à l'usure. L'ajout de noir de carbone améliore la résistance à l'usure par contact des élastomères.

Par conséquent, La réduction de l'usure représente donc un enjeu important d'un point de vue économique et même écologique. La résistance à l'usure par abrasion adhésive ou par autre mode d'usure plus particulier dépend des conditions d'utilisation du matériau ou bien des paramètres tribologiques à la surface de contact.

L'objectif de notre travail consiste à mettre en évidence l'influence des paramètres tribologiques sur l'usure des pions d'élastomères chargés. Cette étude se résume dans quatre chapitres :

Introduction générale

Le premier chapitre est consacré à la description des élastomères d'un point de vue physicochimique et mécanique, leur mise en œuvre, ainsi que l'ajout des charges qui renforcent 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 différents modes d'usure (abrasion, érosion, fatigue, adhésion ...).

Dans le troisième chapitre on étudie expérimentalement l'influence des paramètres tribologiques sur l'usure par perte de masse d'un élastomère chargé de type SBR. On se focalise sur l'usure des élastomères la plus prépondérante, à savoir l'usure abrasive. Ce type d'usure est étudié en réalisant un mécanisme approprié. Le contact est linéaire et obtenu en utilisant une lame d'abrasion. L'influence des paramètres tribologiques des élastomères chargés (vitesse de glissement, angle de l'inclinaison de la lame, nombre de cycle ou durée d'utilisation, charge appliquée ou poids) sont mises en évidence.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons, discutons et interprétons les résultats obtenus par nos essais sur l'influence des différents paramètres tribologiques étudiés. Ces résultats sont discutés dans le but de contribuer dans l'étude expérimentale de l'usure abrasive des élastomères.

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

Les élastomères possèdent de très nombreuses propriétés. Ils sont notamment élastiques, étanches et antivibratoires. La combinaison de ces trois (3) propriétés leur assure un spectre d'utilisation extrêmement large (Colle, étanchéité, semelle de chaussures, article sportif, automobile et particulièrement celui des pneumatiques.....).

I.2 : Le Caoutchouc

I.2.1:présentation : Le Caoutchouc est un composant naturel ou synthétique, caractérisé par son élasticité, son imperméabilité et sa résistance électrique. Le caoutchouc naturel est obtenu à partir d'un liquide blanc laiteux appelé latex, fourni par de nombreuses plantes ; tandis que les caoutchoucs synthétiques sont des élastomères préparés à partir d'hydrocarbures insaturés.

I.2.2 : 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.

Lors de son exploration géographique en Amérique du Sud, Charles de la Condamine expédia en France en 1736 plusieurs rouleaux de caoutchouc brut avec une description des produits fabriqués par les peuples de la vallée amazonienne. Cela fit renaître un intérêt scientifique général pour ce produit et ses propriétés.

En 1770, le chimiste britannique Joseph Priestley découvrit que le caoutchouc peut effacer ou gommer des marques d'encre par frottement.

En 1791, la première application commerciale du caoutchouc fut lancée par un industriel britannique, Samuel Peal, qui breveta une méthode d'imperméabilisation des tissus par traitement avec une solution de caoutchouc dans la térébenthine (type de colle). En 1823, Charles Macintosh fit construire une usine à Glasgow pour la fabrication de tissus et de vêtements auxquels il a donné son nom. Faraday est le premier à déterminer le rapport carbone/hydrogène C₁₀H₁₆ du caoutchouc brut. Des analyses plus précises confirmeront cette formule : (C₅H₈)_n. (figure.I.1).

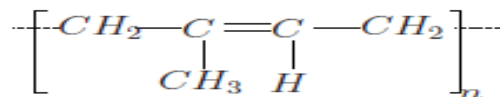


Figure I.1 : Isoprène, C₅H₈ [2]

Au début du XIX siècle, la première fabrication de caoutchouc est créée à Paris. Elle produit des bandes pour jarrettières 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, 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]

L'élaboration à partir de la sève de l'hévéa du caoutchouc« sec » et du latex (figure I.2) :

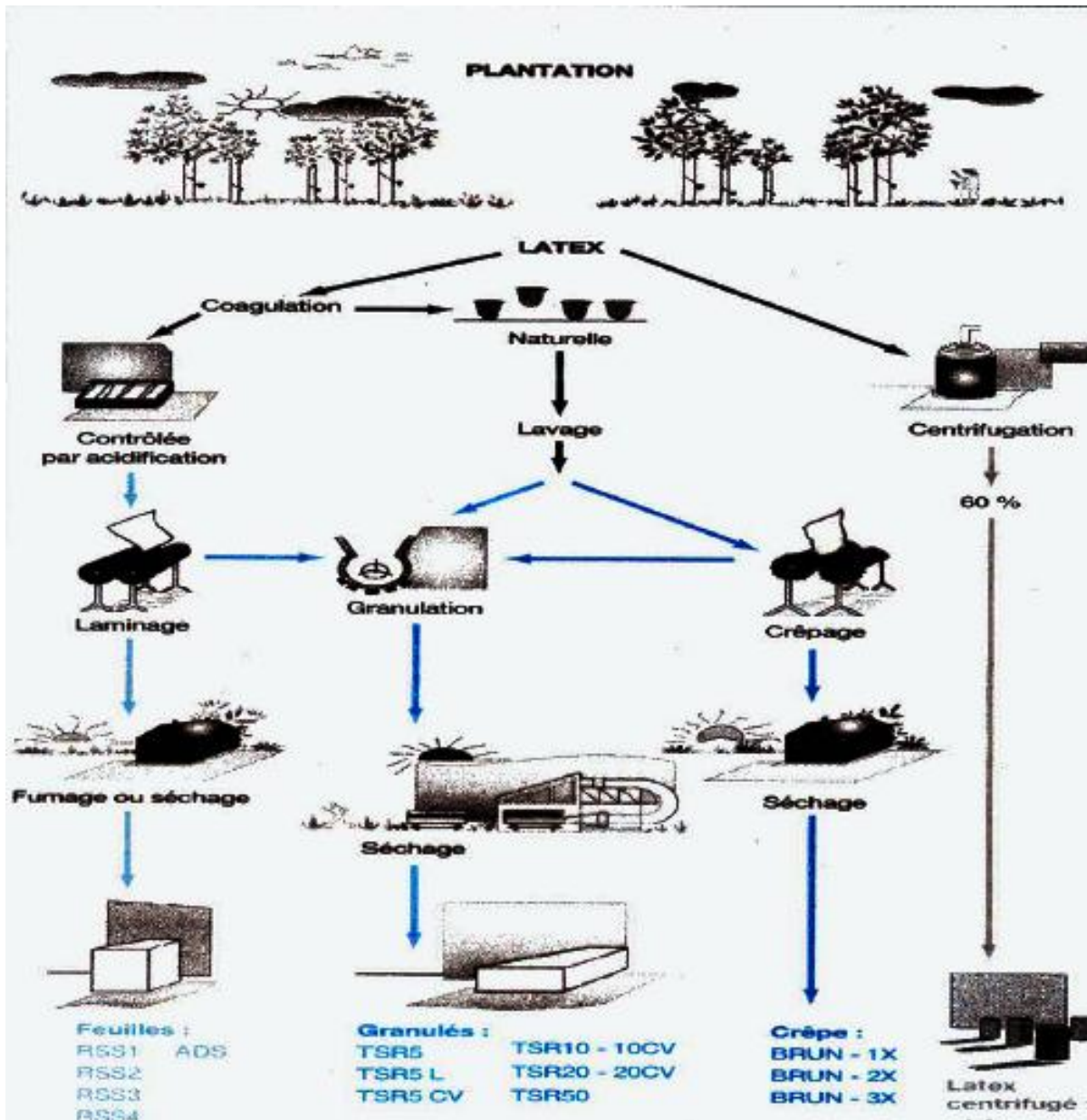


Figure I.2 : L'élaboration à partir de la sève de l'hévéa du caoutchouc« sec » et du latex

I.2.3 : Hévéa Brasiliensis

Hévéa, arbre tropical de la famille des euphorbiacées produisant du latex et appelé aussi, pour cette raison, arbre à caoutchouc. L'hévéa peut atteindre 20 à 30 m de haut. Son écorce est lisse et de couleur gris clair. Les feuilles possèdent de longs pétioles et sont composées de plusieurs folioles oblongues. Les fleurs sont minuscules, blanchâtres et parfumées et le fruit est une capsule contenant trois graines très riches en huile. L'hévéa possède des cellules spécialisées qui produisent du latex, liquide blanchâtre et laiteux à l'origine du caoutchouc

naturel. Ce dernier est récolté par légère incision du tronc de l'arbre. Originaire des régions tropicales humides situées au bord de l'Amazonie, en Amérique du Sud, l'hévéa est surtout cultivé pour le latex, utilisé dans l'industrie du caoutchouc. La majeure partie de la production provient d'Asie du Sud-est, du Sri Lanka, de Malaisie, et du Brésil (figure 1.3). [1]



Figure I.3 : Récolte du latex [1]

I.3 : le caoutchouc naturel

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.3). 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. [3]

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

*Tableau I.1 : Composition du latex indépendamment du lieu de
Plantation [3]*

I.3.1 : Durée de vie du caoutchouc

Une dizaine d'années plus tard, la technologie du caoutchouc connut une nouvelle avancée avec l'apparition des fours à vieillissement accéléré permettant d'étudier la détérioration du caoutchouc dans le temps. On put alors mesurer rapidement les pertes de propriétés dans différentes conditions, en particulier lors de l'exposition à l'oxygène atmosphérique. L'utilisation de ces fours permet de tester différents produits chimiques et d'ajouter des antioxydants qui augmentent la durée de vie des produits en caoutchouc, comme les pneus pour les véhicules et les articles souples, tels que gants, toiles et tuyaux.

D'autres progrès vinrent de l'utilisation du latex non coagulé. On introduisit des méthodes permettant d'extruder le caoutchouc en fils minces pour l'utilisation textile ; on put également déposer le caoutchouc sur des métaux et d'autres matériaux.

I.3.2 : Propriétés physiques et chimiques

Le caoutchouc brut (latex coagulé) est un polymère naturel blanc ou incolore, dont la plus petite unité est l'isoprène, de formule C_5H_8 . À la température de l'air liquide (environ - 195 °C), le caoutchouc brut est un solide dur et transparent ; de 0 °C à 10 °C, il est cassant et opaque ; au-dessus de 20 °C, il devient mou, élastique et translucide. Lorsque le caoutchouc

est malaxé mécaniquement ou chauffé au-dessus de 50 °C, il devient plastique et collant. Il se décompose au-dessus de 200 °C.

Le caoutchouc brut est insoluble dans l'eau, les bases et les acides faibles ; il est soluble dans le benzène, le pétrole, les hydrocarbures chlorés et le sulfure de carbone. Il est facilement oxydé par les oxydants chimiques et lentement par l'oxygène de l'air.

I.3.3 : caoutchouc synthétique

Tout composé produit artificiellement et semblable au caoutchouc naturel par ses propriétés chimiques et physiques essentielles peut être appelé caoutchouc synthétique. Ce sont des élastomères, c'est-à-dire des macromolécules produites par polymérisation et dont le comportement est viscoélastique (caoutchoutique) à la température d'utilisation. Après sa fabrication, le caoutchouc synthétique est également traité par vulcanisation.

I.4: les élastomères

Les élastomères appartiennent à la famille des hauts polymères. Microscopiquement, ils se présentent sous forme de macromolécules constituées de longues chaînes de polymères, linéaires ou ramifiées, enchevêtrées les unes dans les autres. Compte-tenu de leur structure amorphe et pour des températures supérieures à leur température de transition vitreuse, les élastomères se caractérisent par une grande déformabilité et une haute élasticité caoutchoutique. [4]

I.4.1: Propriétés et structures des élastomères

Un élastomère possède les propriétés suivantes : souple, il s'allonge facilement sous l'effet d'une traction, et possède donc un module d'élasticité peu élevé ; il possède une résistance à la rupture importante à son allongement maximal ; il est élastique et retrouve rapidement sa longueur initiale lorsque la sollicitation mécanique cesse ; enfin, il conserve ses propriétés dans un large domaine de température.

Les élastomères sont constitués de chaînes polymères de masse moléculaire moyenne élevée (de 100 000 à 500 000 unités monomères par chaîne), peu liées entre elles. Cependant, sous cette forme, les élastomères subiraient une déformation permanente. Pour assurer la réversibilité des déformations mécaniques, on fait subir au polymère une vulcanisation qui consiste à relier les chaînes entre elles par des ponts, qui confèrent au matériau une structure tridimensionnelle et « sert » de force de rappel. Ainsi, au repos, les chaînes sont sous forme de

pelotes. Lorsqu'une traction est exercée sur l'élastomère, ces chaînes glissent les unes par rapport aux autres et les pelotes se déplient ; dès que l'on interrompt la traction, les molécules reprennent leur position initiale. Si, au contraire, on continue d'appliquer la traction, les chaînes glissent les unes par rapport aux autres et commencent à s'écouler: le polymère se comporte comme un liquide très visqueux.

Les propriétés de l'élastomère varient en fonction du nombre de ponts établis au cours de la vulcanisation. Lorsque la densité de ces liaisons reste faible (environ un pont tous les 100 monomères), on obtient un matériau d'une très grande souplesse, comparativement à des polymères rigides tridimensionnels comme l'ébonite (un pont par monomères).

En effet, l'étude des propriétés physiques des polymères, en fonction de la température, montre l'existence de plusieurs états de la matière :

1- État vitreux : cet état caractérise généralement les verres organiques qui présentent une très faible déformabilité.

2- État de transition : à ce stade, on est en présence de polymères linéaires thermoplastiques de type cellulosiques, polyamides, polyesters, polyvinyles. . . 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.

3- État caoutchouteuse : les élastomères sont caractéristiques de cet état. Ils possèdent une grande déformabilité et un comportement visqueux.

4- État d'écoulement : le polymère, bien que encore solide, se comporte comme un fluide non newtonien quasi-incompressible fortement visqueux.

On peut ainsi réaliser une observation qualitative du module d'YOUNG et de l'angle de perte, suivant la température, ce qui permet de mettre en évidence les différents états de déformabilité que peut engendrer une variation de température sur ces matériaux

(Figure I .4). [2]

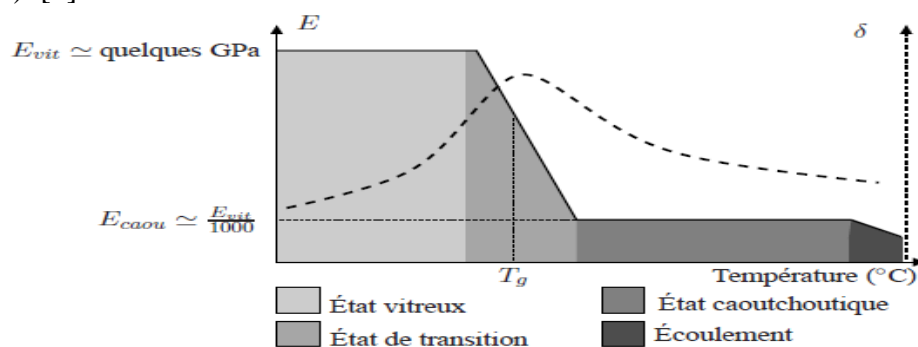


Figure I.4 : Évolution du module d'YOUNG et de l'angle de perte en fonction de la température. [2]

- 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	-72°C -72°C	Bonnes propriétés mécaniques, faible résistance à la chaleur et à l'ozone, faible tenue chimique
Caoutchoucs BUNA	Copolymère styrène-butadiène Polymère de butadiène	SBR BR	-50°C -112°C	Grande résistance à l'abrasion
Caoutchouc éthylène propylène Diène	Terpolymère éthylène-propylène-Diène	EPDM	-55°C	Excellentes propriétés élastiques, bonne tenue au vieillissement et en température, mauvaise tenue aux huiles et carburants
Caoutchouc butyle	Copolymères isobutylène-isoprène	IIR	-66°C	Très bonne résistance au vieillissement et étanchéité aux gaz.
Caoutchoucs nitriles	Copolymères butadiène-acrylonitrile (basse teneur en ACN) Copolymères butadiène-acrylonitrile (haute teneur en ACN)	NBR NBR	-45°C -20°C	Bonnes propriétés mécaniques, bonne tenue aux huiles et aux carburants, tenue en température limitée
Néoprène	Polychloroprène	CR	-45°C	Bonnes propriétés mécaniques, bonne tenue au vieillissement, tenue aux huiles modérées, tenue en température limitée
Silicones	Polydiméthylsiloxane Polydiméthylvinylméthylsiloxane Silicones fluorés	MQ VMQ FVMQ	-120°C -120°C -70°C	Haute résistance à la chaleur et au froid, faible tenue Mécanique

Tableau I.2 : Familles d'élastomères [5]

I.4.2 : 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). [3]

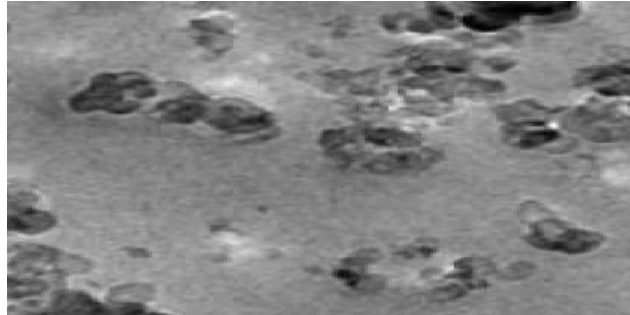


Figure I.5 : Exemple de microstructure d'un matériau élastomère observée par microscope électronique à transmission. La matrice est en gris et les charges sont en noir. [3]

I.4.3 : Les différentes familles d'élastomères

I.4.3.1 : 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 sont 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, utilisés 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 présentent d'excellentes tenues chimiques et thermiques, essentiellement utilisés en industries aéronautiques et spatiales, ainsi que dans l'industrie chimique. [3]

I.4.3.2 : 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. [3]

I.4.4 : Vulcanisation / Réticulation

Les réactions de polymérisation permettent de créer à partir de monomères de très longues chaînes moléculaires, souvent de structure filiforme. Celles-ci déterminent le comportement du polymère au dessus de Tg.

Ainsi, lors d'une sollicitation en déformation ou en contrainte pendant un temps suffisamment long, on observe après dés enchevêtrement des chaînes, leur glissement les unes par rapport aux autres. En d'autres termes, le polymère s'écoule.

La réticulation – ou vulcanisation – par ponts de soufre rend les macromolécules solidaires entre elles ; elle permet donc de transformer un amas macromoléculaire indépendant en réseau 3D continu (Figure I.6). Les mouvements des chaînes sont limités, mais la structure conserve dans son ensemble une grande élasticité. *In fine*, elle est constituée d'un très grand nombre de mailles liées entre elles par les ponts soufrés ou les enchevêtrements.

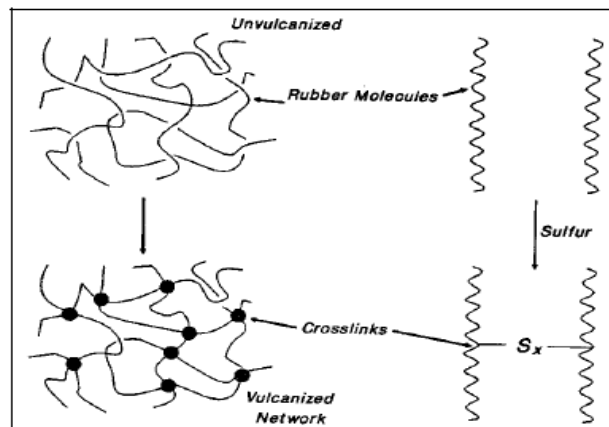


Figure I.6: formation d'un réseau par les ponts sulfures [Mark, Erman et al. 1994] [6]

En tout état de cause, la vulcanisation d'un élastomère nécessite :

- un apport d'énergie, le plus souvent d'origine thermique ;
- l'existence ou la création de sites réactifs sur les chaînes macromoléculaires ; il s'agit le plus souvent d'insaturation, de groupements polaires...
- un agent de vulcanisation qui peut ou non se fixer lui-même sur les chaînes macromoléculaires. Le soufre en présence d'activateurs et d'accélérateurs (bon équilibre entre les différentes propriétés exigées) est, de loin, le système le plus utilisé. [6]

Le schéma général de la vulcanisation est donc le suivant (Figure I.7).

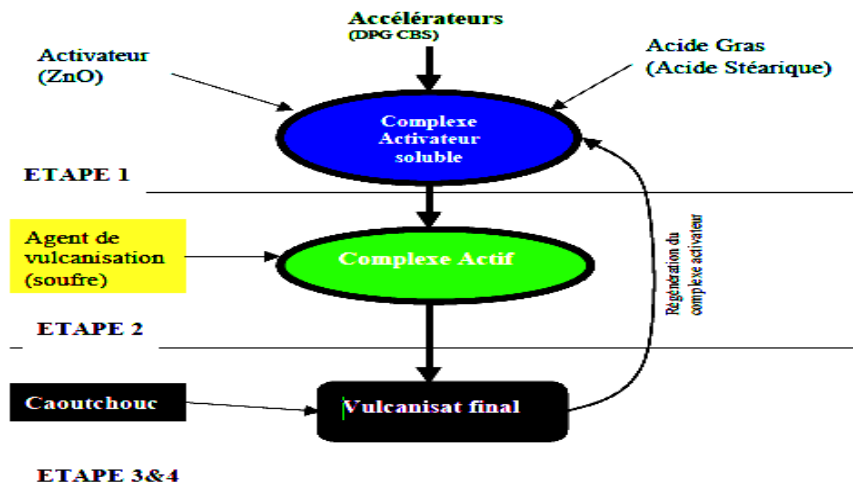


Figure I.7: schéma de la vulcanisation [IFOCA, 1984] [2]

Certaines des propriétés mécaniques que nous définirons ultérieurement, sont considérablement améliorées lorsque le degré de réticulation augmente (nombre de ponts), tandis que d'autres se dégradent, comme le montre la (Figure I.8) On peut retenir que d'une manière générale, la vulcanisation des élastomères permet d'augmenter l'élasticité, mais réduit leurs propriétés à la rupture au-delà d'un seuil. [5]

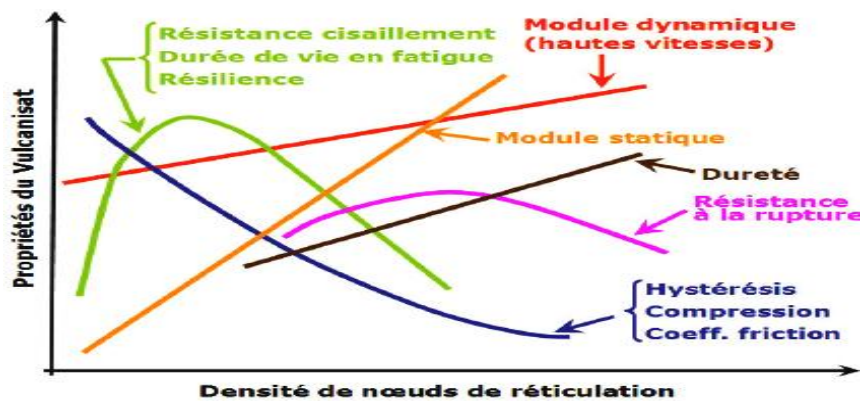


Figure I.8: Influence de la densité de réticulation sur différentes propriétés mécaniques [Bouchereau, 1997] [5]

I.4.6 : La cristallisation

Dans sa configuration non déformée, la microstructure de l'élastomère se présente sous la forme de *Pelote statistique*, où les chaînes macromoléculaires sont repliées sur elles-mêmes et s'enchevêtrent avec les chaînes voisines. Sous contraintes, ces chaînes se déploient et entraînent l'alignement progressif, dans la direction de chargement, puis l'extension des

segments situés entre deux points de réticulation, formant ainsi des zones cristallites qui agissent comme des liens supplémentaires dans le réseau macromoléculaire. Cette cristallisation induite par la déformation se traduit par une rigidité de l'élastomère à partir d'un niveau de déformation relativement important (au delà de 100% à 300% selon la nature du matériau).

Afin de vérifier si un élastomère est cristallisant ou non sous contraintes, une méthode [68] consiste à soumettre le matériau à un essai de traction cyclique à amplitude croissante. Ainsi, si les cycles réponses ne rejoignent pas la courbe non-cyclée alors l'élastomère est cristallisant. Si ces derniers rejoignent la courbe de comportement du matériau non-cyclé alors le matériau est non cristallisant (Figure I.9) [2].

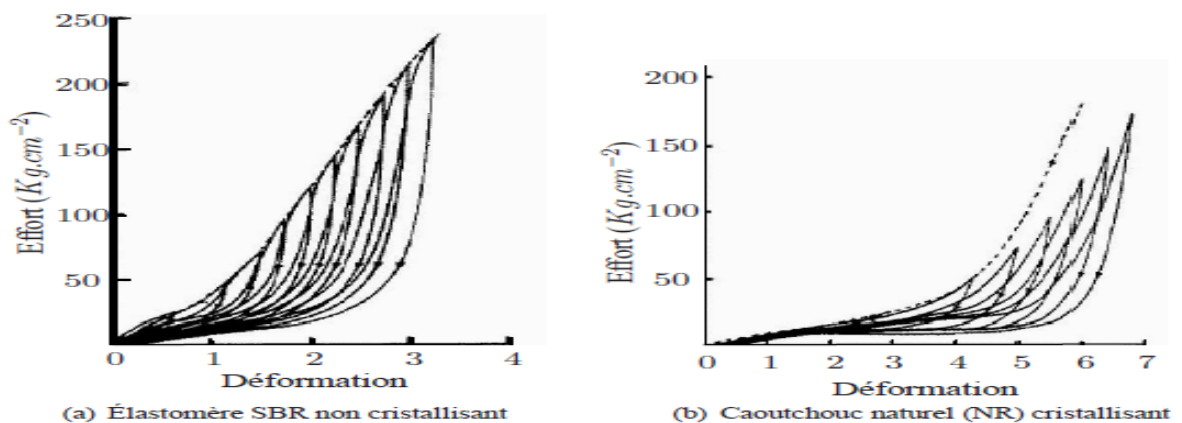


Figure I.9 : Effet de cristallisation sous contrainte [7]

I.4.7 : Température de transition vitreuse Tg

Une des propriétés les plus caractéristiques des polymères, et en particulier des élastomères, est l'existence d'une transition dite « vitreuse », au cours de laquelle les propriétés physiques du matériau sont modifiées de manière considérable. Elle traduit le passage, à température décroissante, d'un état d'équilibre métastable à un état hors équilibre.

La transition vitreuse n'est pas une transition au sens thermodynamique, mais plutôt une transition de type cinétique [Hutchinson, 1997].

En effet, lorsque la température d'un élastomère est diminuée, il existe une température de transition, dite température de transition vitreuse Tg, à partir de laquelle l'agitation thermique est trop faible pour surmonter les forces d'interaction entre les segments de chaînes. Les mouvements locaux dépendent alors du temps et de la température, et le temps caractéristique de réorganisation structurale est alors comparable au temps expérimental d'observation, au voisinage de Tg [Carrega, 1999].

Les caoutchoucs conservent leur propriété d'élasticité à très basse température. Leur transition vitreuse, c'est-à-dire la température à laquelle ils se rigidifient se situe, en règle générale, aux alentours de -50 °C [6].

I.4.8 : 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.10).
- Le second, à court terme, est un comportement hystérétique sous chargement cyclique comme le montre la (figure I.11). [7].

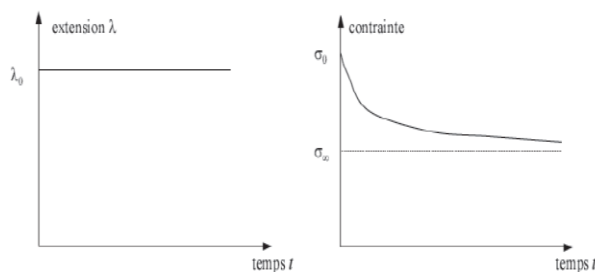


Figure I.10 : Phénomène de relaxation [7]
d'un élastomère

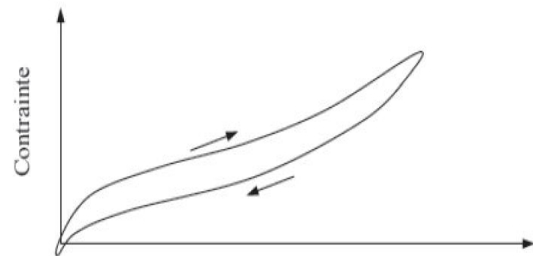


Figure I.11 : Courbe d'hystérésis [7]

I.4.9: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. [8]

I.5 : Renforcement par les charges

Le comportement d'un élastomère résulte non seulement de sa nature chimique, mais aussi des additifs que l'on y incorpore lors de son élaboration. Parmi ces additifs, les charges renforçant conditionnent fortement le comportement du matériau fini. Il s'agit alors d'un système multi phase composé :

- de la matrice qui constitue un réseau d'élastomère réticulé (**la gomme**).

- de particules fines regroupées en agrégats ou agglomérats (Figure I.12) formés lors de la phase de malaxage (*les charges de renfort*)

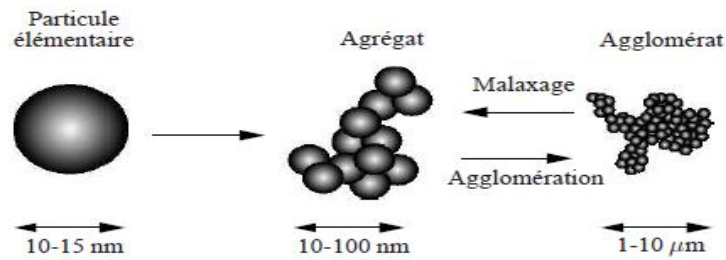
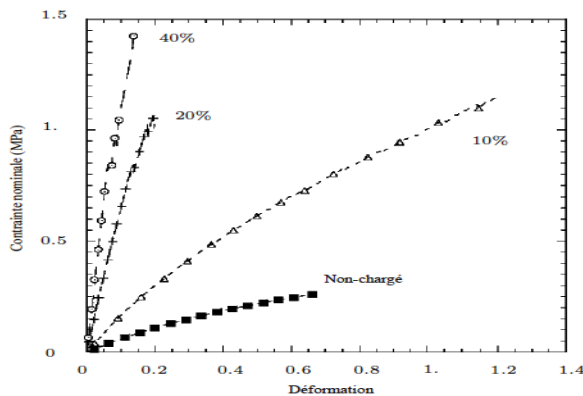
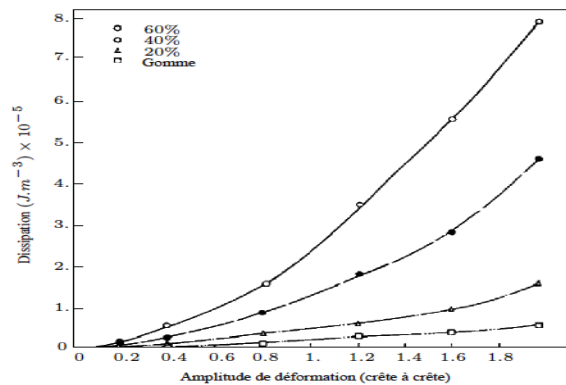


Figure I.12 : Les différentes échelles de taille des charges [2]

On entend alors par renforcement, l'amélioration des propriétés d'usage de la gomme. Il peut s'agir de l'augmentation du module tangent à l'origine, des modules sécants, de l'énergie à rupture, de la contrainte ou de l'élongation à rupture, de la résistance à la fatigue, de la résistance à l'abrasion . . . De manière générale, le caractère renforçant varie avec la nature de la charge, sa taille (Figure I.14), sa fraction volumique dans le mélange, mais aussi ses interactions avec la matrice (Figure I.13). [2]



(a) Influence du taux de charge sur le comportement instantané d'un silicone renforcé par la silice précipitée *in situ* [39]



(b) Influence du taux de charge sur l'évolution de la dissipation en fonction de l'amplitude pour un élastomère SBR chargé de noir de carbone [83].

Figure I.13 : Influence des charges renforçant [2].

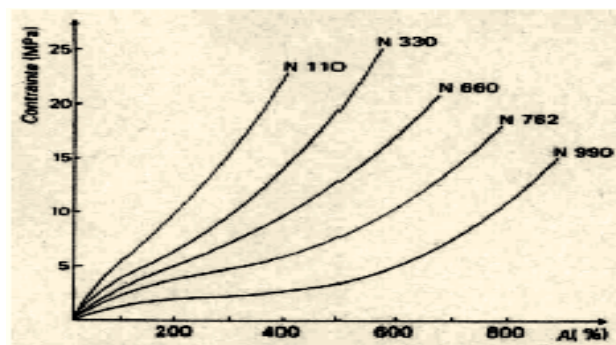


Figure I.14 : Influence de la taille des particules de noir de carbone sur le comportement d'un SBR. [2]

I.5.1 : Les différentes charges

- **les charges renforçant** : le noir de carbone et la silice (notées respectivement NdC et si par la suite).
- **les charges semi-renforçant** : 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 renforçant sont les plus utilisées.

- **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. (Figure I.15).

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.13).

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.

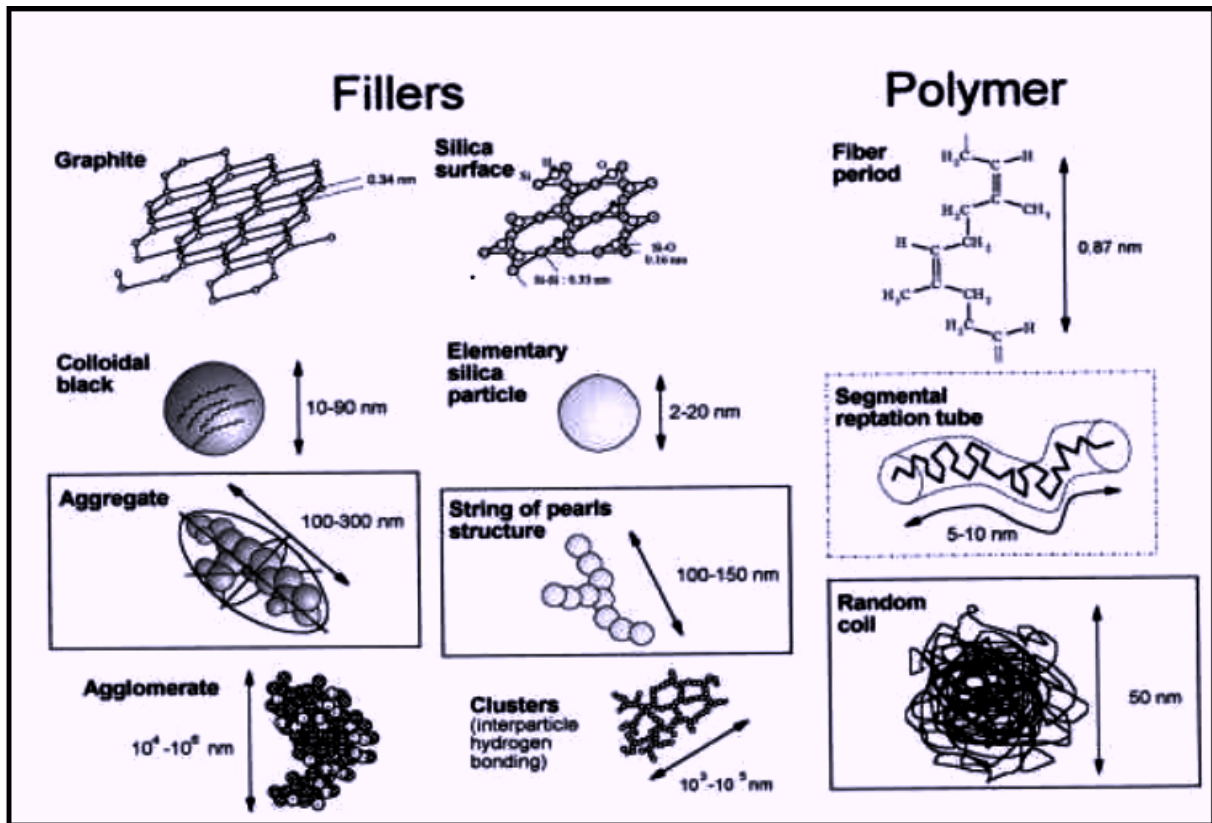


Figure I.15 : Échelle d'interaction entre des particules de Ndc ou de silice et la matrice de polymère [leblance, 2002]. [5]

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. [3]

➤ 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 élastomère sont similaires de sorte que l'incorporation de ces charges dans la matrice est aisée. [9]

I.6: Les mécanismes d'endommagement

I.6.1 : Processus d'endommagement

Il apparaît que le matériau peut être vu à trois échelles décroissantes (figure I.16).

- 1 : à l'échelle macroscopique, le matériau apparaît homogène, que l'on cherche à modéliser,
2. à l'échelle mésoscopique, la matrice et les agglomérats,
3. à l'échelle microscopique, les chaînes et les charges.

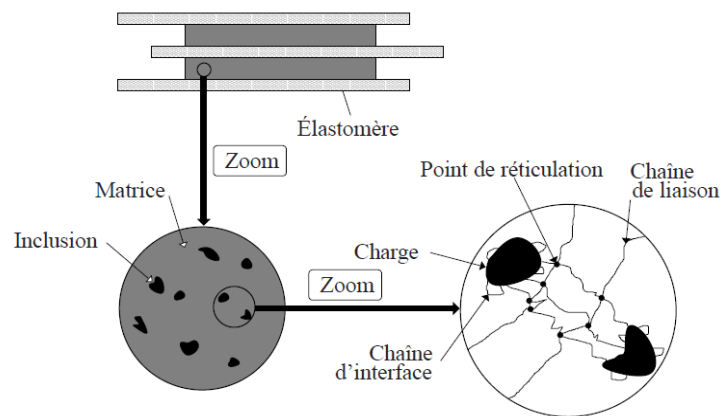


Figure I.16 : Observation "macro-méso-micro" pour un élastomère réticulé. [2]

L'endommagement des élastomères est donc lié à plusieurs phénomènes :

- la rupture des liaisons charges-chaînes, et des chaînes elles-mêmes (Figure I.17)
- la décohésion des charges, c'est-à-dire la diminution des caractéristiques mécaniques de leurs interfaces.
- la rupture des agglomérats.
- et bien sûr la propagation des fissures engendrées par ces trois phénomènes. [2]

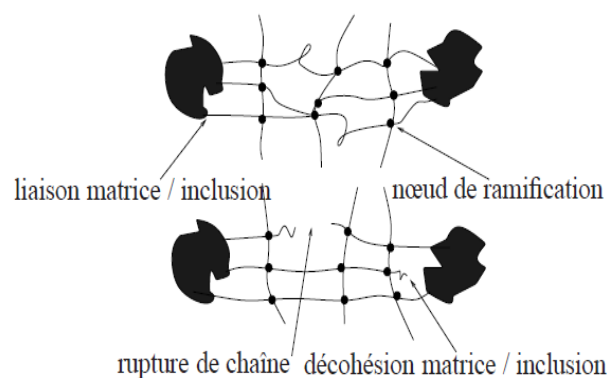


Figure I.17 : Deux types de mécanismes d'endommagement au sein d'un V.E.R. extraits de [2]

I.7 : comportements des élastomères

I.7.1 :L'élasticité caoutchoutique.

L'élasticité se caractérise par la capacité d'un matériau à se déformer sous contrainte et à reprendre sa dimension initiale lorsque cesse la contrainte. Les caoutchoucs ne sont pas les seuls matériaux élastiques, mais ils sont les seuls à offrir une telle capacité de déformation.

Ainsi, un ressort d'acier n'accepte guère de subir un allongement de plus de 10 %. En revanche, les caoutchoucs peuvent s'allonger couramment jusqu'à 500 % et dans certains cas, jusqu'à 1000 % ! On parle alors d'hyperélasticité.

A titre illustratif, nous présentons (Figure I.18), la réponse à un chargement en traction uni axiale d'un élastomère à base de silicone. Cette courbe montre d'une part, la non-linéarité de comportement et d'autre part la grande capacité à se déformer ; l'élongation maximale pouvant parfois atteindre les 700%. [2].

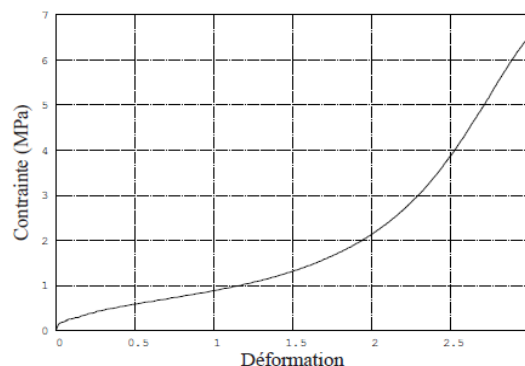


Figure I.18 : Caractère hyperélastique d'un élastomère en traction uniaxiale [2]

I.7.2 :L'effet Mullins

Lorsqu'un élastomère vierge est sollicité de façon cyclique, on observe que l'effort à appliquer initialement pour déformer l'élastomère jusqu'à un niveau donné est toujours supérieur à celui nécessaire pour atteindre le même niveau de déformation au cours des cycles suivants. Ce phénomène est connu sous le nom d'effet Mullins ou assouplissement sous contrainte des élastomères. Cet effet (Figure I.19) peut aussi être mis en évidence par un essai de traction cyclique au cours duquel on augmente progressivement l'amplitude de déformation, où l'on observe que le chemin suivi par la réponse du matériau dépend du niveau maximum de déformation subi par le matériau au cours des précédents chargements.

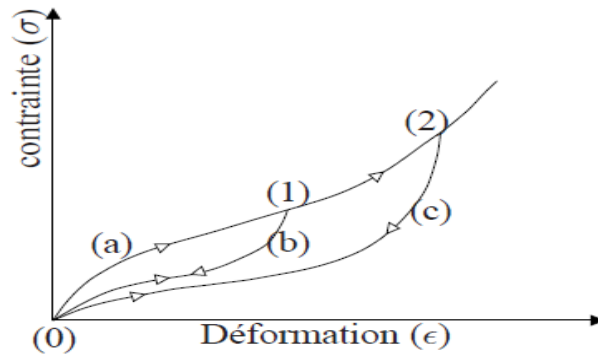


Figure I.19 : Chargement cyclique d'un élastomère. [3]

Ce phénomène a fait l'objet de plusieurs investigations et la plupart des auteurs s'accordent pour attribuer ce caractère spécifique des élastomères à un phénomène d'endommagement.

Ainsi parmi les mécanismes micromoléculaires qui ont été proposés pour expliquer ce phénomène on peut citer pour les élastomères chargés les modèles suivants (Figure I.20) :

-(a) le modèle de BUECHE qui attribue l'effet Mullins à une rupture de chaînes entre deux charges voisines.

-(b) le modèle de DANNENBERG et BOONSTRAT qui propose un mécanisme de glissement de chaînes au niveau de la surface de charge. [3]

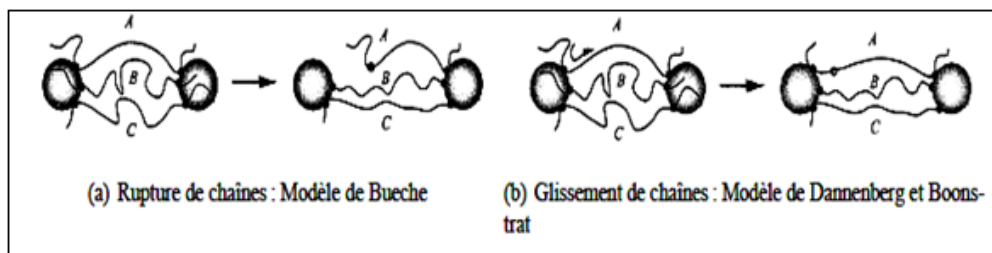


Figure I.20 : Mécanismes micromoléculaires d'assouplissement [3]

I.7.3 : 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.21), c'est l'effet de Payne. Aux faibles déformations, on observe un plateau correspondant au plateau caoutchouteux.

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. [3]

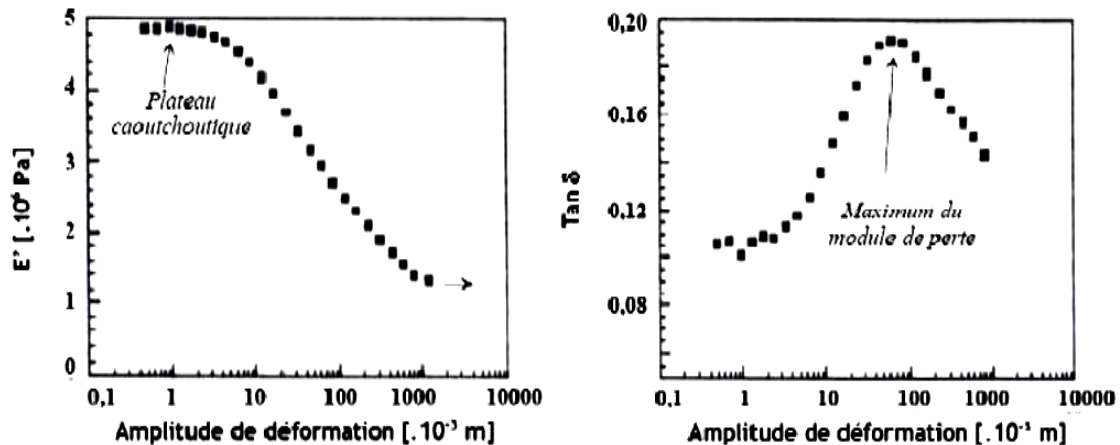


Figure I.21: Analyse de l'effet de Payne, évolution de propriétés mécaniques en fonction du niveau de déformation pour un élastomère SBR renforcé en silice [3]

I.8 : utilisation des élastomères

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 anticorrosion, tubes et tuyaux, les colles et mastics... [4]

I.9 : Conclusions

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.

Le renforcement est nécessaire dans la plupart des applications courantes des élastomères. Le noir de carbone est l'agent renforçant prédominant, mais les précipités de silice gagnent en importance avec les années, car les fabricant parviennent progressivement à contrebalancer les inconvénients majeurs de la silice que sont le coût élevé et la difficulté de mise en œuvre par des propriétés intéressantes pour de nombreux domaines.

Chapitre II

La tribologie des élastomères

II.1 : Introduction

La tribologie est la science qui étudie l'ensemble des phénomènes qui ont lieu lorsque des corps en contact sont mis en mouvement relatif. Elle présente trois aspects distincts : le frottement qui est la résistance à un déplacement imposé, l'usure suite à la dégradation des surfaces qui se traduit par une perte de matière et la lubrification qui consiste à interposer un fluide entre les deux corps en contact. C'est une science pluridisciplinaire faisant intervenir des notions de mécanique, de physicochimie et de science des matériaux en général.

Au début du vingtième siècle, la tribologie s'appuyait sur l'étude des volumes, avec une domination des concepts de la mécanique permettant d'établir des lois de comportement.

Au milieu du vingtième siècle, la tribologie s'est tournée vers l'étude des surfaces grâce aux concepts de la physique des surfaces. Depuis une vingtaine d'années, la recherche en tribologie porte sur l'étude de la dynamique des interfaces avec la prise de conscience du rôle fondamental des éléments interfaciaux dans un contact.

Les phénomènes de frottement ne sont pas décrits par des propriétés intrinsèques des matériaux, ce qui rend leur prédiction particulièrement délicate. En outre, le frottement et l'usure sont des phénomènes indépendants. Il est en effet possible de concevoir des systèmes à usure faible et frottement élevé (freins) ou à usure forte et frottement faible (usinage).

Enfin, l'introduction de la notion de contact à trois corps, qui s'articule autour des concepts de triplet tribologique, de circuit tribologique et de mécanisme d'accommodation de vitesse, a permis une meilleure compréhension des mécanismes de frottement et d'usure. [10-11]

II.2 : Surface

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

La topographie est une caractéristique géométrique de grande importance (figure II.1). 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.1 : rapprochement des solides : effets et conséquences [12]

II.2.1 : Outils conceptuels en tribologie des interfaces

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

II.2.2 : Le triplet tribologique et la notion de troisième corps

Le concept du triplet tribologique (mécanisme, premiers corps, troisième corps) introduit par Godet [13] et Berthier [14], implique la superposition de phénomènes à trois échelles différentes.

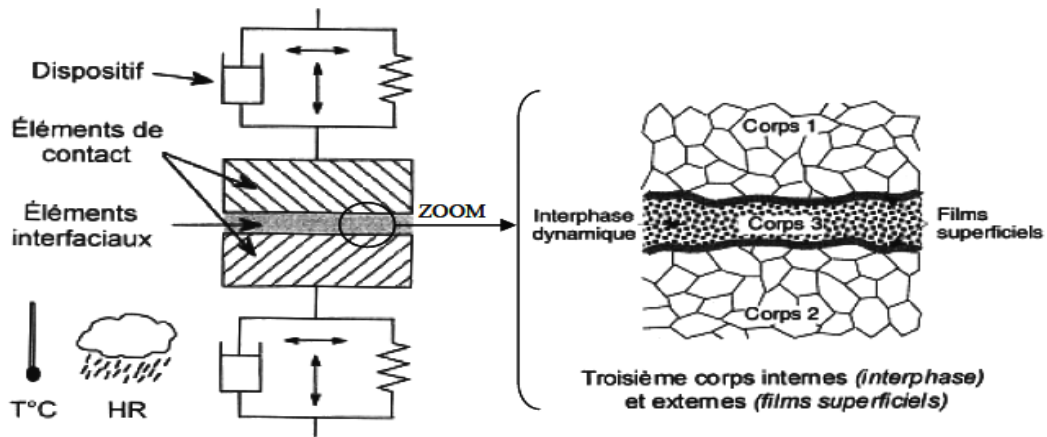


Figure II.2 : le triplet tribologique de Godet et le concept de troisième corps [13 -14]

Il se compose tout d'abord d'un mécanisme qui sollicite le contact et impose un chargement (F), une cinématique (v) et un environnement de frottement (HR , T). Viennent ensuite les deux premiers corps constitués par les matériaux en contact qui supportent les sollicitations imposées par le mécanisme. Le troisième corps est l'élément intercalaire systématiquement présent dans le contact et qui transmet la charge (portance) d'un premier corps à l'autre. Le troisième corps représente ainsi l'ensemble des éléments s'intercalant entre les deux premiers corps (figure II.2) Il est composé :

- de films superficiels (contaminants, molécules absorbées, films d'oxydes...), induits par la réactivité des surfaces,
- de particules détachées (débris) s'accumulant lors du frottement, induits par les processus de dégradation des surfaces. [12]

L'ordre de grandeur caractéristique du troisième corps est le micromètre, alors que les écrans ont une épaisseur de quelques nanomètres. Ces derniers sont composés de dépôts artificiels ou de couches naturelles physisorbées, chimisorbées, oxydées, dépendant de l'historique de préparation des surfaces des premiers corps en contact (figures II.2, II.3). [15]

II.2.3 : Accommodation de vitesse

En suivant cette logique d'un système tribologique représenté par un contact à trois corps, Berthier [16-11], considère que l'étude du frottement et de l'usure passe par l'identification des mécanismes d'accommodation de vitesse activés dans le contact ou aux interfaces.

Ces mécanismes d'accommodation notés $S_i M_j$, sont définis par des sites S_i et des modes M_j qui indiquent respectivement le lieu d'accommodation de vitesse et la manière dont celle-ci s'effectue (figure II.3).

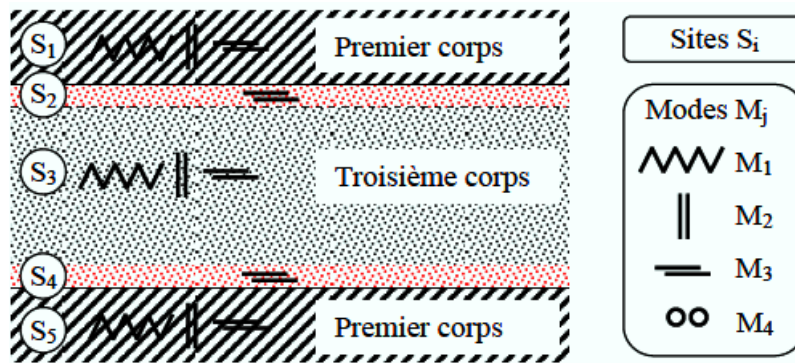


Figure II.3 : sites et modes d'accommodation [16-11]

Les premiers corps sont notés S_1 et S_5 , alors que la partie volumique du troisième corps constitue le site S_3 . Cette identification introduit également la notion d'écrans notés S_2 et S_4 qui constituent la frontière entre premiers corps et troisième corps.

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

Si nous définissons donc un mécanisme d'accommodation comme étant l'association d'un site et d'un mode d'accommodation, nous voyons qu'ils sont au nombre de vingt pouvant être activés en différents points de contact. Il faut garder à l'esprit le fait que tous ces mécanismes ne sont pas clairement identifiables (modes élastiques dans le premier corps) bien qu'activés avec certitude. Ils n'aboutissent pas à la formation de débris et ne contribuent donc pas tous à un taux d'usure correspondant à l'évacuation définitive de particules issues des débris hors du contact.

II.2.4 : 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.4).

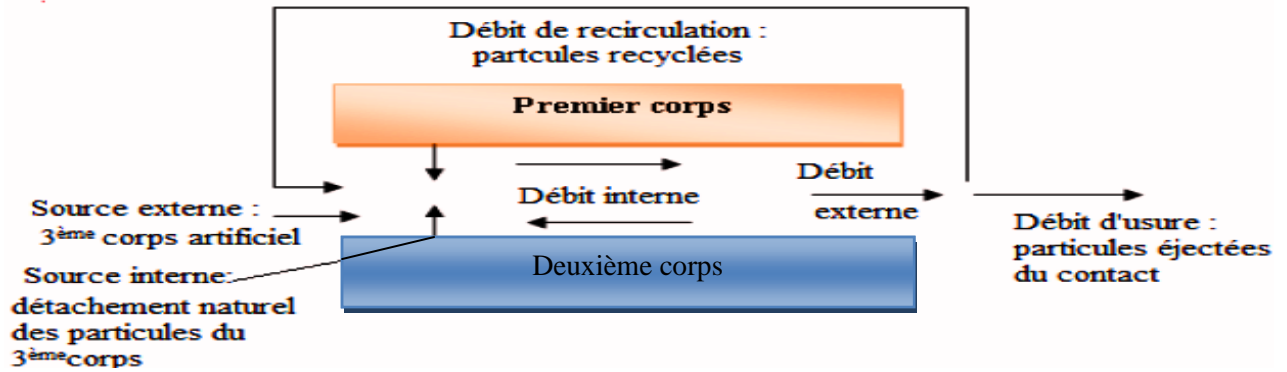


Figure II.4: Représentation schématique du circuit tribologique [3]

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). [3]

II.3 : Contacts surfacique et hertzien

II.3.1 : Contact surfacique

Le contact surfacique met en œuvre des surfaces en conformité, telles que plan sur plan, cylindre dans cylindre (Figure II.5).

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 :

$$p = \frac{Q}{S} \quad (\text{II.1})$$

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 : [3]

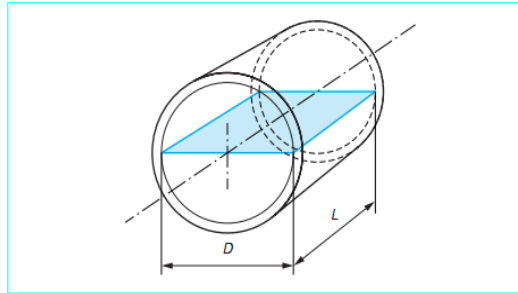


Figure II.5 : Surface projetée d'un palier [3]

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

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.3.2- Contact hertzien

Le contact d'Hertz se réfère aux contraintes localisées qui se développent lorsque deux surfaces courbes viennent en contact et se déforment légèrement sous l'action des forces appliquées. Le degré de déformation dépend de l'élasticité du matériau en contact, autrement dit, de son module élastique. (Figure II.6)

La théorie du contact d'Hertz fournit la contrainte dans la zone de contact en fonction de la force normale appliquée, des rayons de courbure des deux corps et de leur module élastique [3].

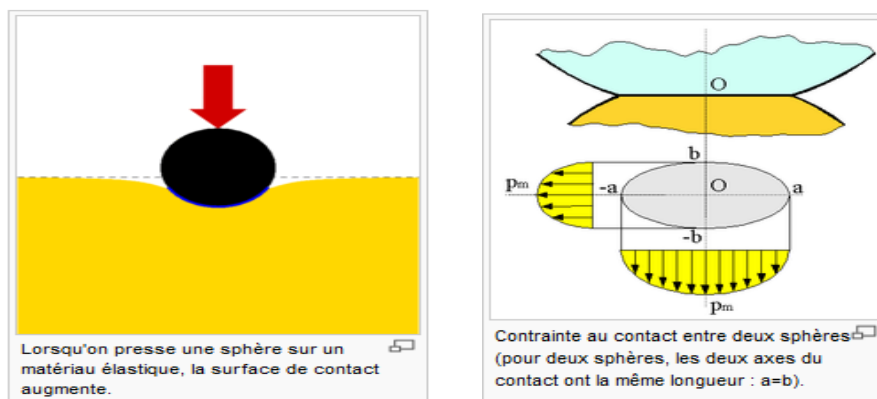


Figure II.6: contacte hertzien des élastomères

II.4: Le 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 épousée la quasitotalité 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 reliée 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. [3]

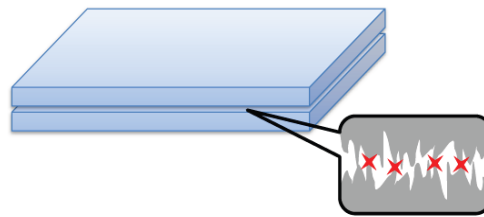


Figure II.7 : Frottement entre deux surfaces

II.4.1 : Les différents 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 8a**).
- -**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 8b**).
- -**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 8c**).

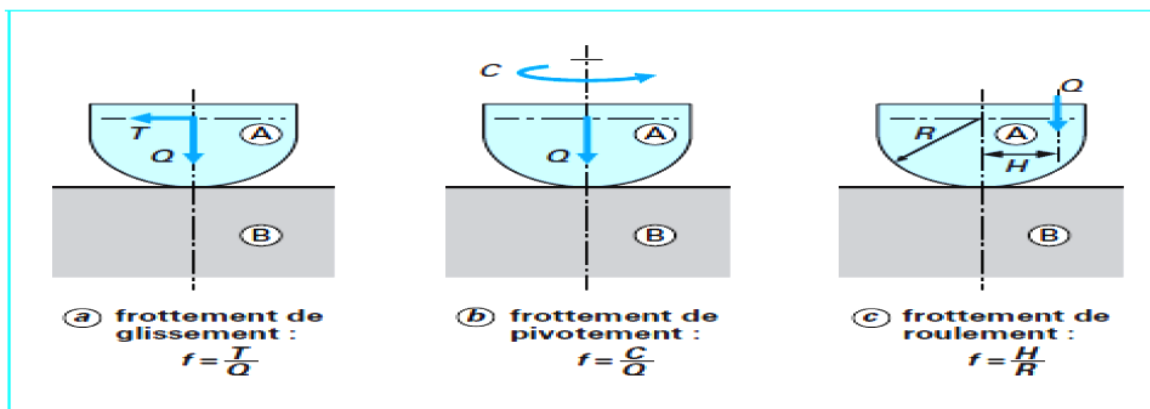


Figure II.8: Définition des coefficients de frottement [3]

II.4.2 : 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.

L'adhésion entre deux corps en contact peut avoir de multiples origines, allant des attractions purement électrostatiques (entre charges électriques opposées) jusqu'aux liaisons de nature mécanique, chimique ou métallurgique. Ces dernières incluent toutes les

interactions qui contribuent à la cohésion des solides telles que liaisons métalliques, covalentes, ioniques. L'adhésion dépend donc de la nature des matériaux antagonistes, mais aussi, pour du matériau donné, des conditions dans lesquelles s'effectue le contact : présence d'« écrans de contamination », ou de films superficiels, rapprochement plus ou moins intime des pièces... [3]

II.4.3 : Coefficient de frottement

Le coefficient de frottement est le rapport entre les forces tangentielles aux surfaces en contact (les forces de frottement) et les forces perpendiculaires à ces surfaces. Plus ce coefficient, est fort, moins le glissement des pièces l'une par rapport à l'autre est facile (figure II.9).

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

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

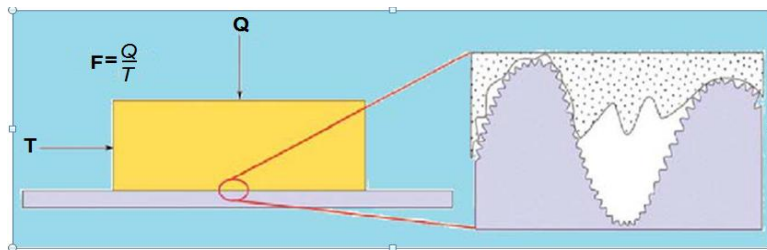


Figure II.9 : Le frottement sec

II.5 : L'usure des élastomères

II.5.1 : 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.5. 2: Usure

L'usure est une conséquence du frottement, et se produit au niveau de la zone de contact.

II.5. 2.1: Les paramètres influençant le taux d'usure

- ✓ La force de contact.
- ✓ La température.
- ✓ L'état physico- chimique des surfaces frottant (la rugosité, les couches d'oxydes).
- ✓ La structure cristallographique et les propriétés mécaniques des matériaux (la dureté).
- ✓ L'absence ou la présence d'un lubrifiant.
- ✓ La présence d'agents actifs en frottement (aditifs anti usure).

II.5. 2.2 : Origines de l'usure

- ✓ Les déformations plastiques
 - création, déplacement de dislocations
 - rayures, impacts
- ✓ Les fissurations
 - brutale, progressive
 - initiation propagation
- ✓ Les transformations physico- chimique des surfaces
 - transformations de phase : amorphisations
- ✓ Réaction chimiques
- ✓ adhésion
 - transferts à l'échelle atomique
 - évolution « boule de neige », micro grippage, grippage

De nombreux auteurs ont proposé des modèles pour décrire et évaluer l'usure.

II.6 : Données et paramètres tribologiques

II.6.1 : Evaluation de l'usure

Dans sa forme initiale, la loi d'Archard [1953] exprime, pour une configuration d'usure adhésive, en glissement, une relation entre le volume usé et des quantités caractéristiques du contact :

$$V = \frac{k \cdot \|F_n\| \cdot L}{H} \quad (\text{II.4})$$

Où V est le volume de matière enlevée, K est le coefficient d'usure, L est la distance de glissement, F_n est la charge normale appliquée et H la dureté du matériau.

Le coefficient k est différent pour chacun des corps en présence. Il dépend des conditions géométriques et thermodynamiques lors du contact. Il a été montré que la loi d'Archard peut être étendue à d'autres mécanismes, en glissement dominant. Moyennant une redéfinition de certains paramètres, l'équation précédente peut s'écrire :

$$V = K \cdot W \quad (\text{II.5})$$

Où K : est égal à $\frac{k}{H}$ W : est égal à $\|F_n\| \cdot L$

W a la dimension d'un travail. Par convention, il est appelé "**travail d'usure**".

Dans le cas où la force normale de contact varie au cours du temps (par exemple, dans une situation d'impacts-glissements, $\|F_n\|$ présente de très fortes variations de courte durée lors des chocs), la définition de W devient :

$$W = \int_{t_0}^{t_1} \|F_n\| \cdot \|V_t\| \cdot dt \quad (\text{II.6})$$

Où W : travail d'usure,
 $\|F_n\|$: module de force normale ou course du contact,
 $\|V_t\|$: module de la vitesse de glissement ou cours de contact,
 t_0 : instant de début de calcul,
 t_1 : instant de fin de calcul,

Dès lors, par analogie avec les lois usuelles de la mécanique, il est possible de définir une "puissance d'usure" en posant :

$$P = \|F_n\| \cdot \|V_t\| \quad (\text{II.7})$$

Où P : puissance d'usure.

La loi d'archard loi de type linéaire

Une autre manière d'écriture de la loi d'usure de type linéaire est :

$$V = K \cdot P \cdot t \quad (\text{II.8})$$

Où V : volume d'usure, K : coefficient d'usure, P : puissance d'usure, et t : intervalle temps

II.6.2 : Taux d'usure :

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 ».

$$K = \Delta V / F_N \cdot L \quad (\text{Ken mm}^3/\text{Nm}) \quad (\text{II.9})$$

Où ΔV : volume usé (mm³), F_N : force appliquée et L : distance de glissement (m)

II.6.3 : Critère $p \times v$

Le critère de « $p \times v$ (pressions 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.

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

$$E = Q \cdot v \cdot f \quad (\text{II.10})$$

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. [3]

II.6.4 : Densité d'énergie de frottement

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

$$\text{Tel que :} \quad E_f = \mu F_N L \quad (\text{II.11})$$

- μ : coefficient de frottement de Coulomb.

Le produit μF_N représente la force de frottement. La grande similitude entre la formule (1) (expression de l'usure) et la formule (2) (expression de l'énergie de frottement) est évidente ;

elle a conduit Fleischer à introduire le paramètre ef^* de densité d'énergie de frottement apparente et à supposer que le volume d'usure est proportionnel à l'énergie de frottement par :

$$ef^* = Ef / V = \mu/k \quad (II.12)$$

La densité d'énergie de frottement apparente ef^* correspond au potentiel d'énergie total contenu dans un tribosystème. [3]

II.6.5 : Rugosité

Les surfaces usinées ne sont jamais parfaites, elles présentent au contraire des défauts de toutes sortes dus aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière, etc. On sait depuis longtemps que ces défauts influents profondément sur la tenue en service des mécanismes et la bonne exécution de leurs fonctions tels que guidages ou l'étanchéité. (Figure. II.10)

La confusion est souvent faite entre le degré de propreté et la rugosité d'une surface. Il est importe de se rappeler que ces deux notions sont différentes et totalement indépendantes l'une de l'autre :

- la propreté est une caractéristique chimique.
- la rugosité est une caractéristique physique.

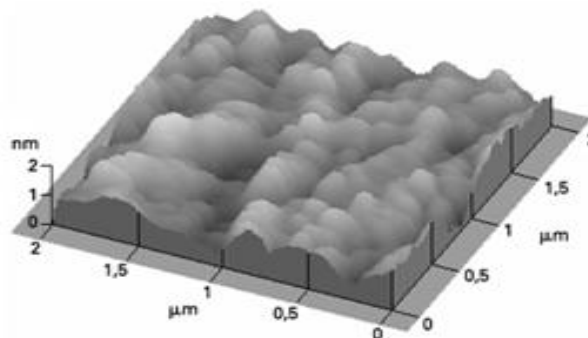


Figure II.10 : Exemple de représentation tridimensionnelle de rugosité [17]

On désigne par rugosité les **aspérités** et les **creux** d'une surface mesurés par rapport à la surface moyenne assimilée localement à un plan.

Les défauts de rugosité possèdent une grande influence sur les fonctions des surfaces.

(Figure II.11)

Des caractéristiques très diverses telles que :

- le frottement de glissement et de roulement,
- l'étanchéité,
- la résistance à l'écoulement des fluides,
- la facilité d'accrochage des revêtements, dépendent de la rugosité.

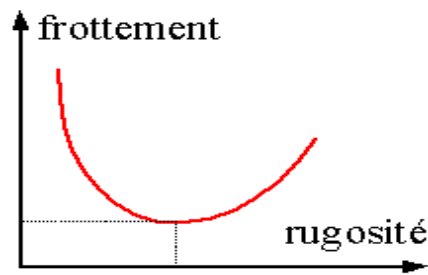


Figure II.11: L'évolution du frottement de la rugosité
(ici est représenté pointillés la rugosité optimal)

II.7 : Principaux faciès d'usure des élastomères

A l'issue d'essais de frottement et d'usure sur des élastomères, principalement quatre faciès peuvent être identifiés : les stries, les rides, les rouleaux et les cratères (Figure II.12).

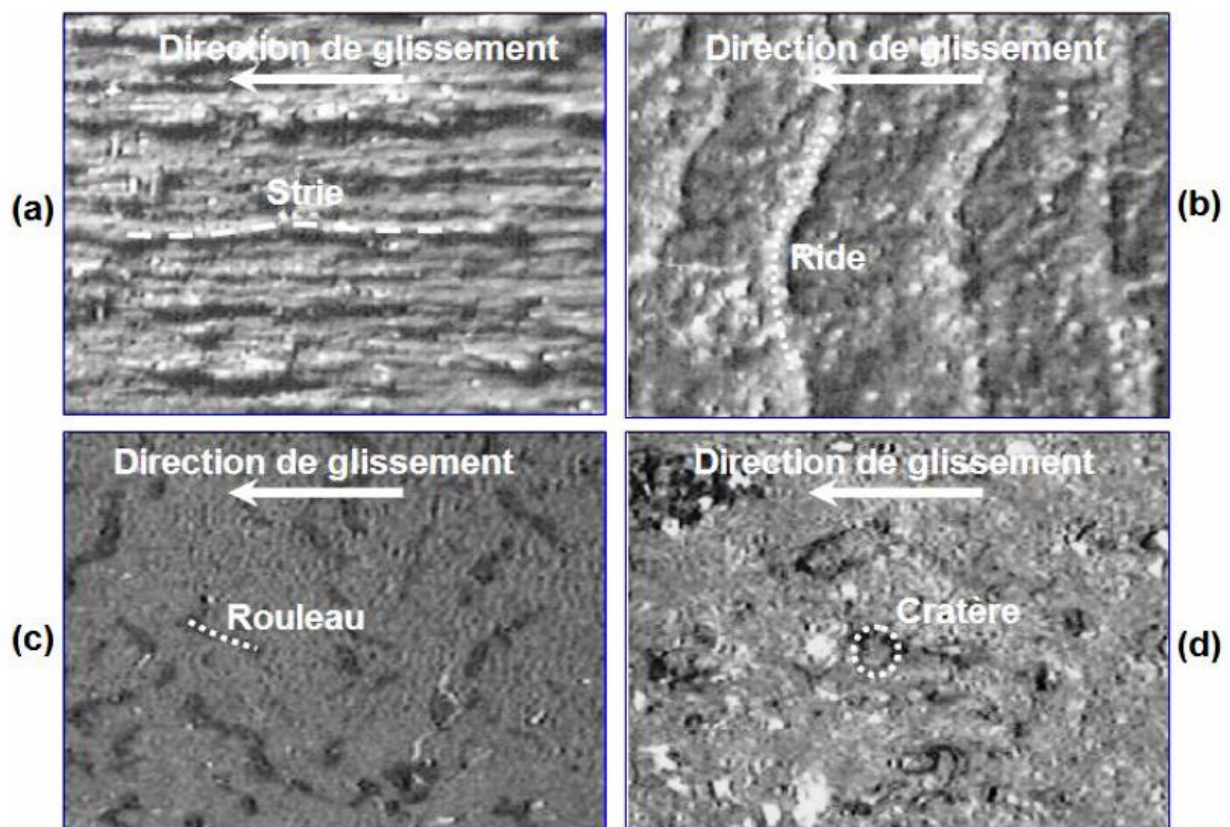


Figure II.12: principaux faciès d'usure des élastomères. Stries d'usure (a) ; rides d'usure (b) ; rouleaux d'usure(c) ; cratères d'usure(d) [18]

II.7.1 : Stries d'usure

Les stries sont des bandes parallèles à la direction de glissement. En pratique, leur largeur et leur hauteur varient du micromètre au millimètre, tandis que leur longueur s'étend de la centaine de micromètres au centimètre.

Ce faciès est associé à des conditions d'usure très sévères qui ne se rencontrent que dans des cas extrêmes.

En 1952 [Schallamach] a reproduit expérimentalement le mécanisme responsable de la création de stries d'usure, en faisant frotter une aiguille sur la surface d'un élastomère, celui-ci se déformant puis se déchirant (figure II.13) [19].

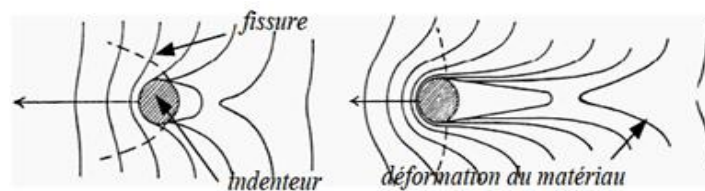


Figure I.13 : schéma de l'endommagement d'une surface d'un élastomère par un indentateur Pointu. Les flèches indiquent la direction de glissement et les lignes pointillées la propagation des fissures ([schallamach, 1952]) [19]

II.7.2 : Rides d'usure

Les rides d'usure sont des faciès orientés perpendiculairement à la direction de glissement, elles ont une forme dite en « toit d'usine » ou « dent de scie ». La partie la plus pentue s'oppose au glissement. Les rides sont espacées à intervalle régulier, elles ont des hauteurs similaires, et forment ce qui est communément appelé la « figure d'abrasion ».

Les propriétés de ces figures d'abrasion ont été étudiées par [Schallamach, 1952] avec une aiguille et par [Southern et Thomas, 1979] avec une lame tranchante. (Figure II.14). [6]

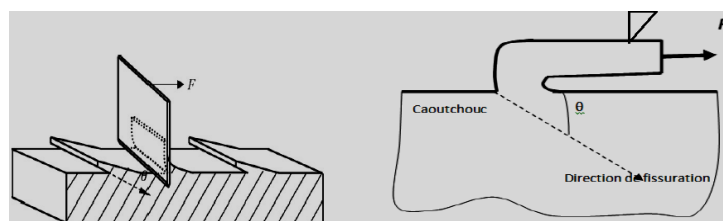


Figure II.14: Représentation des figures d'abrasion et de la mécanique de la rupture associée. [Schallamach, 1952; Southern et Thomas, 1979] [6]

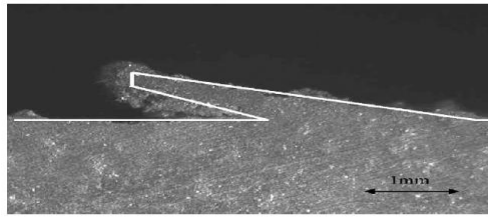


Figure II.15 : Micrographie d'un sillon formé sur un spécimen SBR [3]

II.7.3 : Rouleaux d'usure

Les rouleaux d'usure sont des débris d'usure très adhérents à la surface usée. Bien que 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 adhésive. Ils ont été étudiés notamment par [Aharoni, 1973]. (Figure II.16) [6]

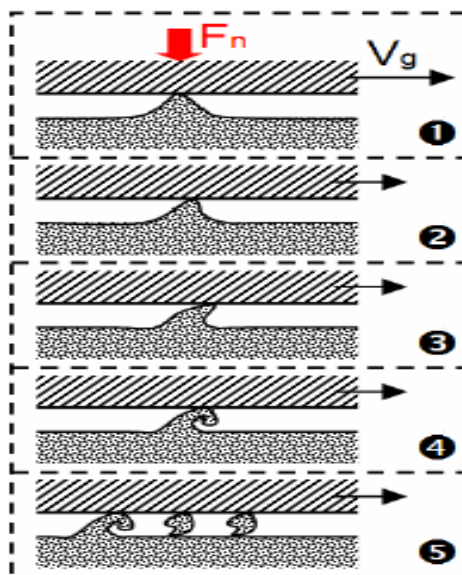


Figure II.16 : Formation de rouleaux, selon [Aharoni, 1973] [6]

II.7.4: Cratères d'usure

Les cratères d'usure sont des trous circulaires sur la surface, qui apparaît lisse à l'œil nu. Ils ont un diamètre moyen de l'ordre de la centaine de micromètres. Ces faciès sont associés à un faible taux d'usure : usure dite douce [Petitet, 2003], et peuvent être liés à la présence de charges. (Figure II.17). [18]

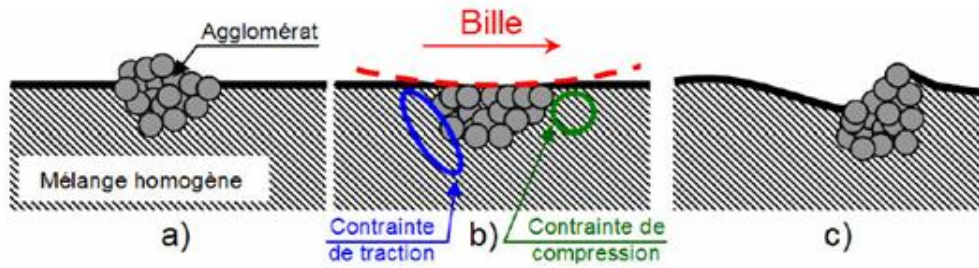


Figure II.17 : Mécanisme de formation des cratères par déformation de la matrice et d'un agglomérat : a)-avant le passage de l'indenteur b)-sous passage de l'indenteur c)-après le passage de l'indenteur [Petitet, 2003] [18]

II.8 : Phénomènes élémentaires et modes d'usure

Lorsque deux solides sont en contact, ils peuvent être soumis à 4 phénomènes élémentaires : de l'adhésion ; de la déformation plastique ; des fissures ; et des transformations physico-chimiques de surface.

➤ **Usure adhésive :**

Cette usure est due aux forces d'attraction existant entre les atomes des surfaces des solides. Lorsque les surfaces sont séparées par un effort tangentiel ou normal, si les forces d'adhérence sont supérieures à la résistance du matériau, un arrachement de matière se produit.

L'usure adhésive se caractérise par un fort taux d'usure et un coefficient de frottement instable. Les particules d'usure sont petites et souvent transférées sur l'autre solide en contact. (Figure II.18). [19]

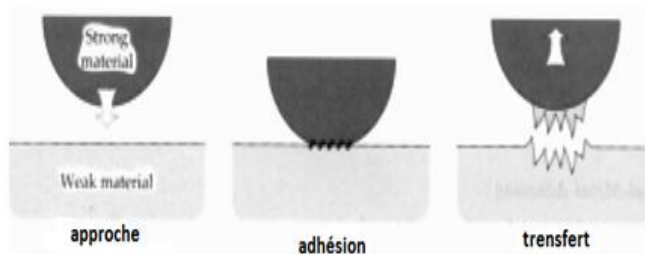


Figure II.18 : schéma de l'usure adhésive .le matériau adhère à la surface antagoniste et lui arrache de la matière [stachowiak et coll., 2001] [19]

➤ **Usure abrasive :**

Elle résulte de l'effet de coupe produit par l'action des aspérités anguleuses de l'antagoniste ou de particules d'un 3ème corps. Les fortes concentrations de contraintes initient des fissurations qui ont pour conséquence le détachement de débris (Figure II.19). [19]

L'endommagement subi par la surface se présente sous la forme de stries parallèles à la direction de glissement.

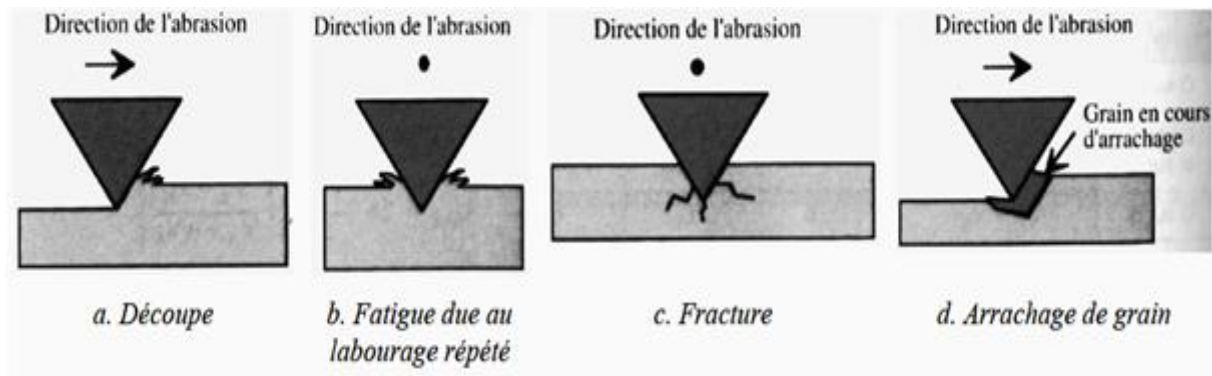


Figure II.19 : schéma des mécanismes d'usure abrasive : fracture et arrachage

[geoges,2000] [19]

➤ **Usure corrosive (tribocorrosion)**

Elle est produite par l'attaque chimique de la surface par le milieu environnant. [19]

➤ **Usure par fatigue :**

Sous l'effet de sollicitations répétées, des fissures se forment (au niveau de défauts dans le matériau), se propagent et entraînent in fine l'élimination de matière (simulation dans [Razzaghi-Kashani et Padovan, 1998]) [6].

➤ **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 (Figure II.20).

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. [6]

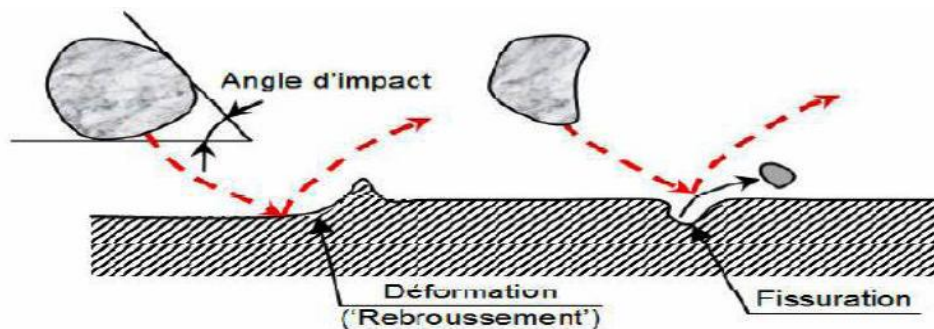


Figure II.20: Mécanisme d'usure érosive en présence d'un 3eme corps pour un impact unidirectionnel [3]

➤ **Usure par fretting**

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

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

Les cycles de sollicitation provoquent la fissuration des matériaux et la formation de débris qui peuvent accélérer l'usure lorsqu'ils restent confinés dans le contact. [6]

➤ **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.

-Dans son approche unifiée du frottement et de l'usure des élastomères, [Moore, 1980] présente un diagramme (Figure II.21) des principaux mécanismes de dégradation.

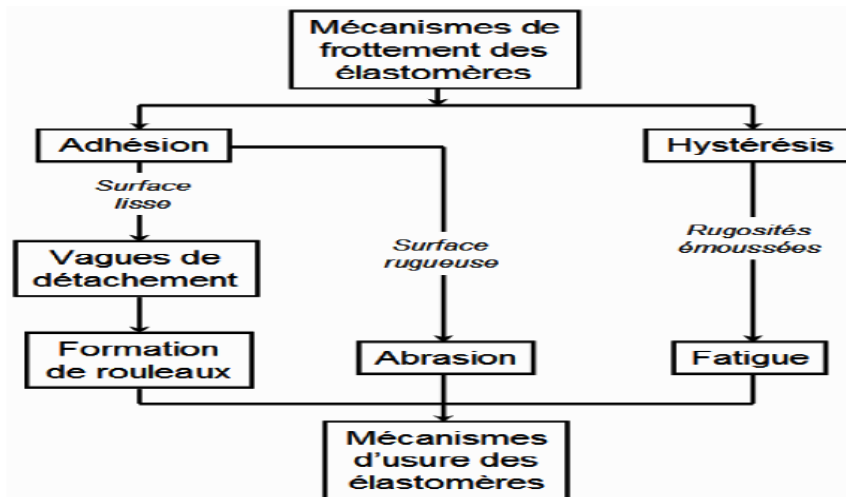


Figure II. 21 : Diagramme présentant les relations entre le frottement des élastomères et leurs mécanismes d'usure [18]

En fonction des caractéristiques de surfaces de l'antagoniste, les composantes adhésions et hystérésis du frottement donnent lieu à plusieurs mécanismes d'usure différents.

Par exemple, avec une surface parfaitement lisse, l'adhésion donne lieu à de l'usure par formation de rouleaux dans le cas où la résistance à l'étirement de l'élastomère est faible.

Des expériences plus courantes se déroulent avec des textures plus rugueuses et pointues pour lesquelles la part adhésion induit une usure par abrasion ou découpe.

Si les aspérités de la surface rugueuse sont émoussées plutôt que pointues, la composante hystérésis du frottement engendre une usure par fatigue. Moore a d'ailleurs montré que le mécanisme de fatigue est d'intensité relativement moyenne mais continue, alors que le phénomène d'abrasion est sévère et généralement assez court. [6]

II.9 : quelques paramètres influent sur l'usure

II.9.1 : Paramètres matériaux

II.9.1.1 : Propriétés mécaniques, effet de la température

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

Le facteur de frottement suit globalement les mêmes variations que la tangente de l'angle de perte et obéit donc à l'équivalence temps température. (Figure II. 22).

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 . [6]

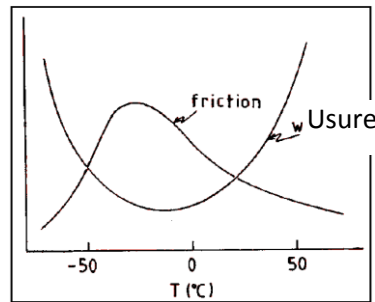


Figure II.22 : Usure et coefficient de frottement en fonction de la température [Schallamach, 1968]. [6]

II.9.1.2 : Ajout de charges renforçant au mélange

Comme nous l'avons vu précédemment, l'ajout de charges renforçantes à un élastomère a des effets non négligeables sur les propriétés mécaniques du mélange.

On comprend ainsi pourquoi la vitesse d'usure est fortement diminuée lorsque la dureté et la résistance à la rupture sont augmentées, par ajout de Noir de Carbone par exemple. [6]

II.9.2 : Conditions expérimentales

II.9.2.1- Charge appliquée

[Grosch et Schallamach, 1966] ont étudié l'influence de la charge appliquée sur l'usure de différents élastomères et ont trouvé la relation suivante :

$$V = aP^n \tag{II.13}$$

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.

Cependant, cette relation n'est valable qu'à faible charge.

II.9.2.2 : Composition de l'atmosphère

La composition de l'atmosphère influence l'usure des élastomères chargés réticulés. Par exemple, sous atmosphère azotée, le taux d'usure est moins important. [3]

II.9.2.3 : 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).

La lubrification diminue l'aire de contact réelle entre l'élastomère et la contre face rigide par conséquent 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 fluque 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 II.23).

Ce phénomène de lissage réduit la déformation viscoélastique causé par les aspérités de la surface et ceci réduit la friction de l'élastomère. [18]

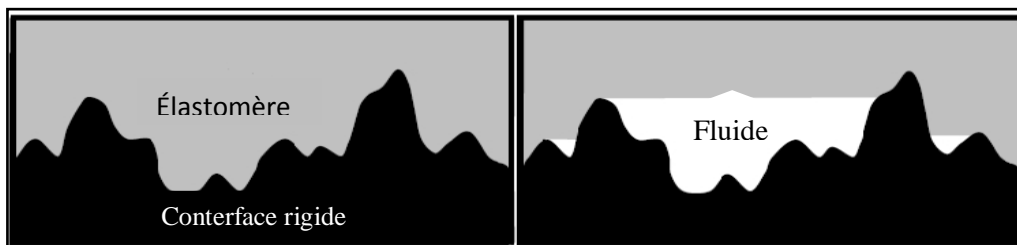


Figure II.23: lissage du substrat en présence de lubrification [18]

II.10 : Conclusion

Tout au long de cette étude bibliographique sur les élastomères chargés, nous avons pu nous rendre compte que ce matériau est assez complexe.

En ce qui concerne l'aspect tribologique de notre étude, nous devons nous attacher à prendre en compte le fait que les comportements en frottement et en usure des matériaux élastomères sont fortement dépendants des conditions de sollicitations, ce qui explique le peu de modèle global sur la tribologie des élastomères.

D'autre part 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

Moyens et conditions d'étude expérimentale de l'usure abrasive

III.1 : Introduction

Dans ce chapitre une étude du comportement à l'usure des élastomères chargés est menée. L'objectif de cette étude est de mettre en évidence l'influence de certains paramètres tribologiques tels que : nature de contact et de mouvement, sollicitations (charge ou pression de contact, vitesse de glissement, durée de fonctionnement ou nombre de cycles) et l'angle d'abrasion sur le comportement au frottement et à l'usure des pions d'élastomère de type SBR.

Ce chapitre aborde l'usure de type abrasive. Nous présentons la technique d'étude expérimentale et les conditions d'essais utilisées.

III.2 : Etude expérimentale de l'usure abrasive- glissement linéaire

III.2.1 : Procédure expérimentale

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

III.2.2 : L'étai-limeur

L'**étai limeur** ou **étai-limeur**, est une machine-outil employée pour l'usinage et la génération de surfaces planes sur des pièces métalliques. Cette machine est d'ailleurs appelée « raboteuse » à partir d'une certaine taille de pièce à usiner.

III.2.2.1 : Origine

L'idée de la raboteuse est apparue en France dans les années 1750. Les premières machines-outils à vapeur utilisant ce principe ont été conçues en Grande Bretagne dans les années 1810[1]. En 1936, James Nasmyth invente la limeuse et Pierre Decoster l'a amélioré et créé l'étai limeur en 1846.

III.2.2 .2: Utilisation

- L'étai limeur est utilisé pour de petites pièces demandant un usinage simple, surfacage et même rainurage simple ; mais pour des travaux plus complexes comme le rainurage, il se trouve remplacé avantageusement par la fraiseuse.
- Comme pour la table des raboteuses, l'étai limeur a vu évoluer le mouvement du coulisseau et de la table par des commandes hydrauliques.
- L'inconvénient majeur de l'étai limeur réside dans le fait que le coulisseau est en porte à faux pendant une partie de la phase d'usinage. Ce porte à faux provoque un échauffement, des vibrations et une déformation du coulisseau nuisibles à la qualité de la pièce.

III.2.2.3 : Fonctionnement

L'étai 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 étai limeur est constituée de :

- le bâti en fonte contenant les organes mécaniques.
- moteur électrique.
- boîte de vitesse.
- Système bielle-manivelle.
- mécanisme d'avance de la table porte-pièce.
- 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.



Figure III.1: L'étau-limeur

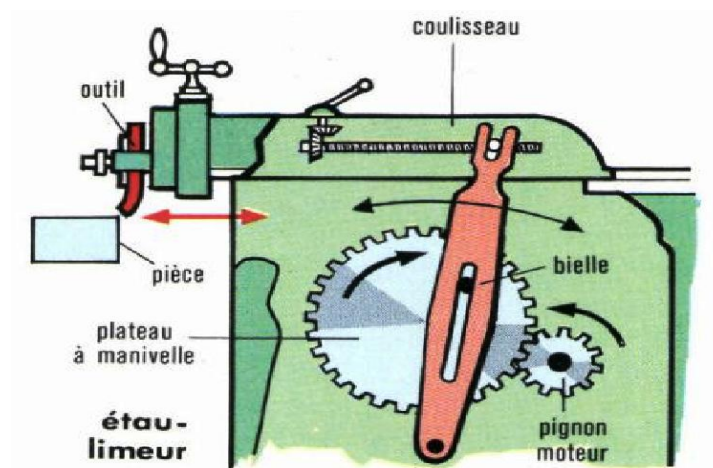


Figure III.2 : Schéma de principe de fonctionnement d'un etau limeur

III.2.2.4 : Cinématique d'un étai-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

Chapitre III: Moyens et conditions d'étude expérimentale de l'usure abrasive

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 (coupe) le cliquet patine 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.

III.2.2.5 : Usinage

➤ **La pièce**

La pièce peut être maintenue dans un étau ou bridée sur la table. Cette table, sur certaines machines, peut être inclinable selon deux axes.

➤ **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 mécanique.

Chapitre III: Moyens et conditions d'étude expérimentale de l'usure abrasive

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.

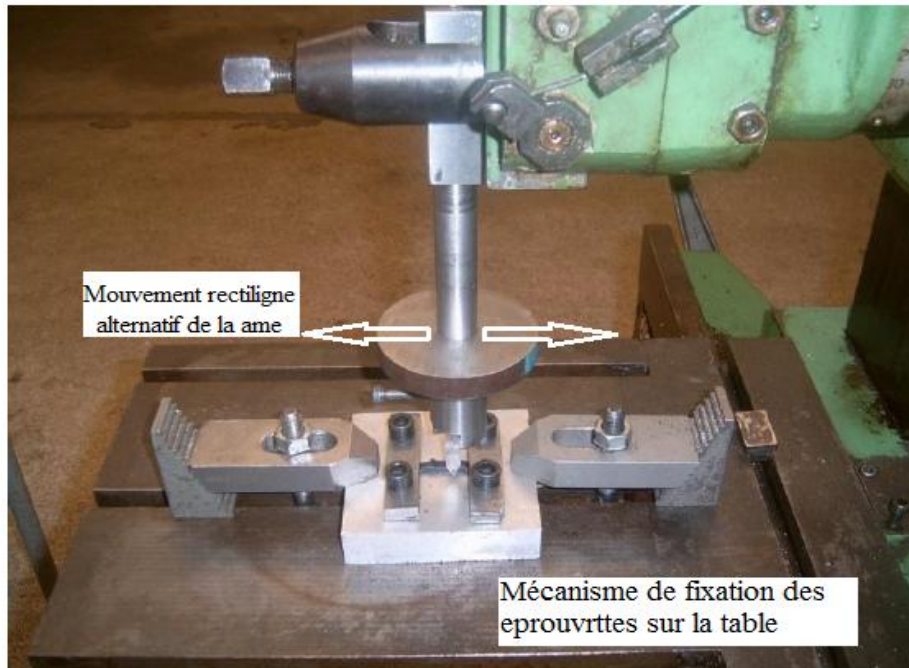


Figure III.3 : Dispositif expérimental d'étude d'usure abrasive

III.2.3 : Description des mécanismes de fixation

La conception des mécanismes de fixation (figure III.4) doit assurer un bon fonctionnement et déroulement des essais dans les conditions fixées : l'axe de l'outil étant verticale et perpendiculaire sur la surface de l'échantillon. D'autre part le déplacement de la lames doit être parallèle à la surface d'abrasion et avec des vibrations minimale. Ceci nous impose un ajustement juste glissant entre les pièces constituant le mécanisme de travail tel que masse/tige et porte lame/tige.

❖ Le dispositif expérimental se compose des pièces suivantes :

-La tige (Figure III.5): comporte une partie parallélépipède qui sert à fixer l'outil sur l'étau limeur et une partie cylindrique d'ajustement $\varnothing 20$ g6 sur laquelle glisse le poids et le porte lame. Une rainure pour annuler la rotation du porte lame par l'intermédiaire d'une vis ; *CHCM6*.

- **Le porte lame** (Figure III.5): comme son nom l'indique il sert à porter les lames, il comporte un alésage $\varnothing 20$ H7 pour glisser facilement sur la partie cylindrique de la tige, une partie cylindrique ayant un trou taraudé pour annuler sa rotation sur la tige par l'intermédiaire d'une vis *CHCM6*. Une partie méplat menée d'un trou taraudé M6 pour la fixation de la lame par une vis ; *CHCM6*.

- **La lame** (Figure III.5) : 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 (10° - 20° - 30° - 45° - 60°).

- **La charge** (Figure III.5) : C'est un disque percé à son centre d'un trou $\varnothing 20$ H7 pour glisser facilement sur la partie cylindrique de la tige. On dispose en tout de 3 disques de même diamètre 80mm et d'épaisseurs différent (11.25mm, 22.5mm, 45mm) .

- **Le support échantillons** (Figure III.5): 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.5): deux plaques qui servent pour la fixation de l'échantillon, chacune possède deux trous $\varnothing 1$ mm pour le passage de vis *CHCM10*.

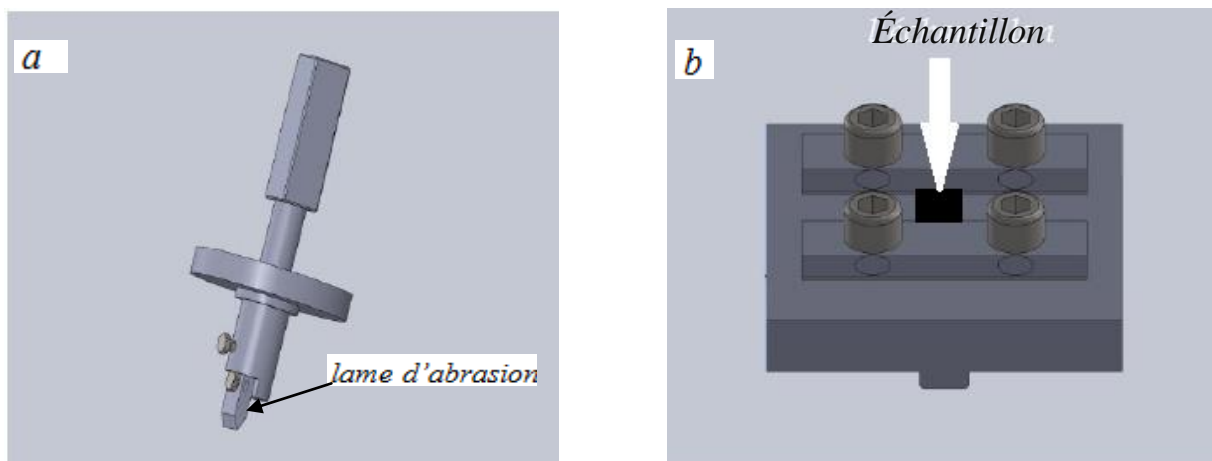
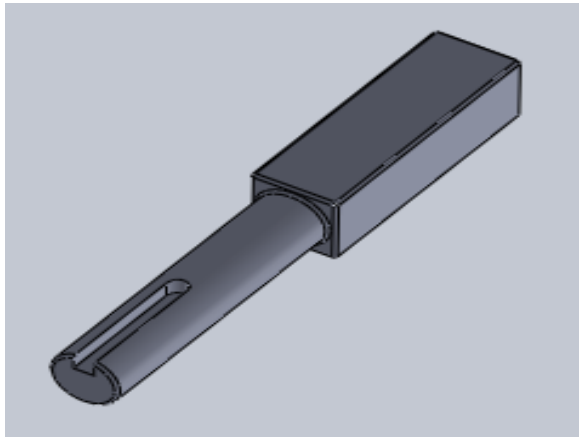
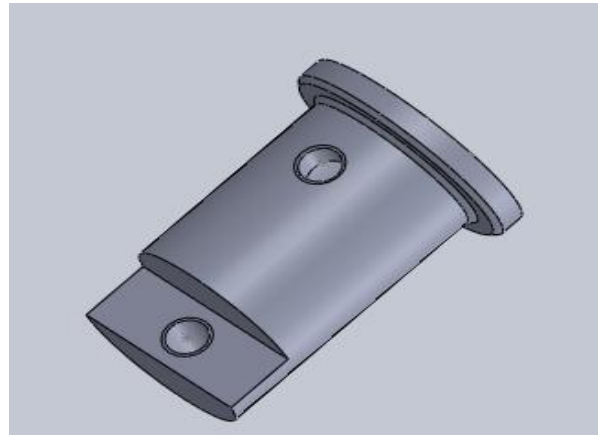


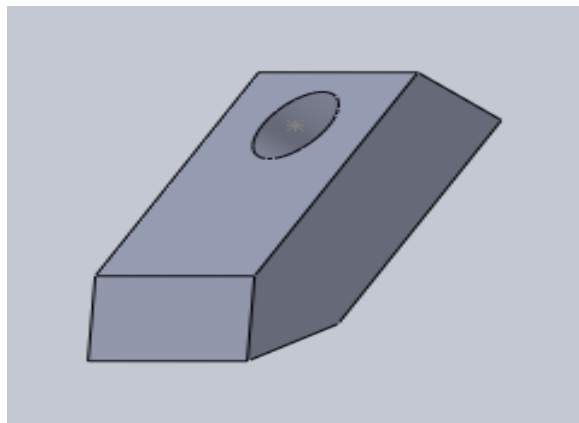
Figure III.4: mécanismes de fixation a)- fixation de la lame d'abrasion b)- fixation de l'échantillon



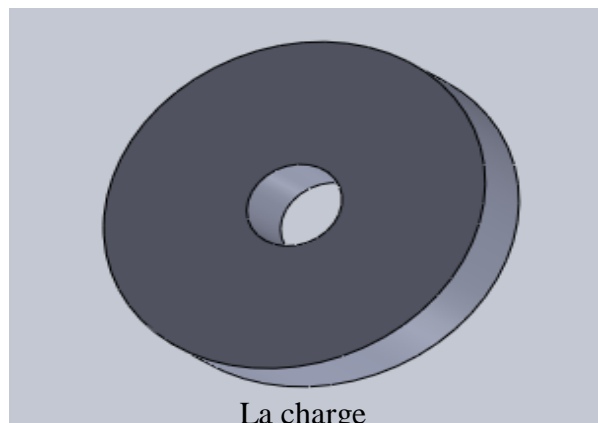
La tige



porte lame

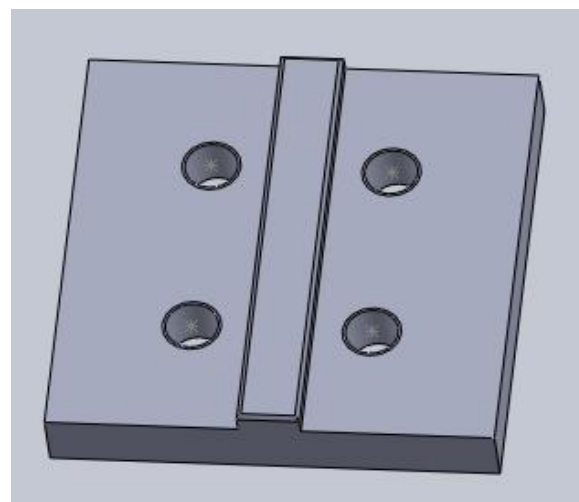


La lame

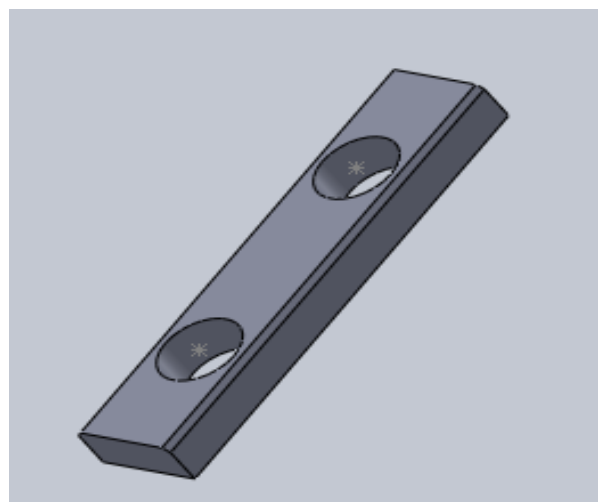


La charge

La charge



Support échantillons



la plaque

Figure III.5 : les éléments des mécanismes d'étude d'usure abrasive

III.3: Conditions d'essais

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

Dans cette partie expérimentale, nous avons met en évidence l'influence des paramètres tribologiques tels que la vitesse de glissement, la durée d'utilisation (nombre de cycle), l'angle d'inclinaison de la lame et La charge appliquée.

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, 110 et 158 cycle/minute.
La vitesse de glissement peut être calculée par la relation suivante :

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

- Les valeurs de la charge appliquée sont :(0,5 kg- 1 kg - 1,25 kg- 1,5 kg -1,75 kg).
- Les valeurs de l'angle d'inclinaison de la lame sont : (10°,20°,30°,45°,60°).
- les valeurs de nombre de cycle sont :(100, 200, 300, 500,700, 900, 1200, 1500) cycle.
- 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 dotée D'une précision de 10^{-5} g (Figure III.6).



Figure III.6 : Balance électronique

III.3.1: Matériaux d'étude

Nous avons utilisé un élastomère chargé de type SBR (styrene butadiene rubber) ce matériau est utilisé pour les pneumatiques.

L'étude de l'influence des paramètres tribologiques sur l'usure abrasive des élastomères est réalisé en se servant de 98 éprouvettes ayant le même pourcentage de noir de carbone et de silice. (La même classe).

Les échantillons sont découpés à l'aide d'une lame tranchante permettant d'éviter toute détérioration des surfaces de contact des échantillons (avoir des surfaces reproductible).

-Géométrie des pions

Les échantillons sont découpés en morceaux de section rectangulaire $10 \times 7 \text{ mm}^2$ et de longueur 50mm. (Figure III.7). La longueur utile qui représente la longueur de travail est de 15mm. L'échantillon est fixé à ses deux extrémités.

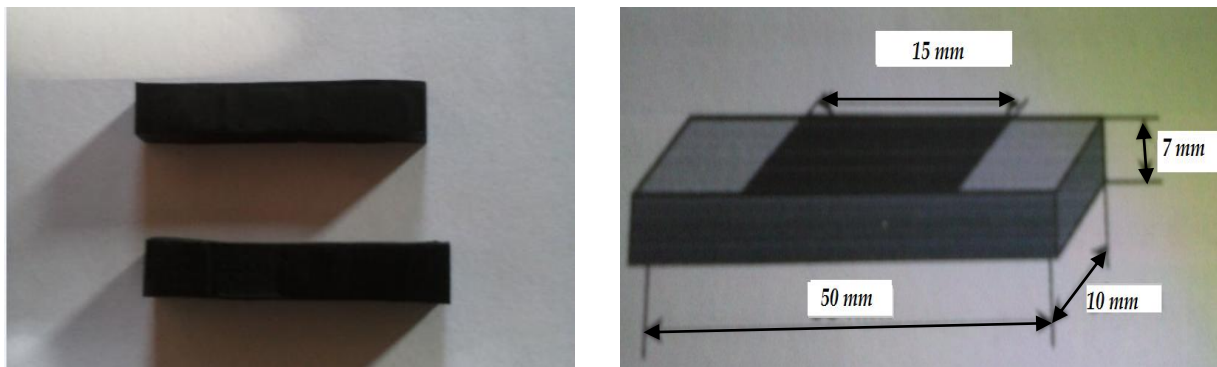


Figure III.7: photographie et dimensionnement des échantillons pour l'usure abrasive

III.4 : conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la partie expérimentale de notre travail. Nous avons conçu un mécanisme d'usure abrasif portant une lame monté sur un étau limeur. Dans cette étude nous avons met en évidence l'influence des différents paramètres tribologiques tels que: la durée de fonctionnement (nombre de cycle), la vitesse de glissement, l'angle d'abrasion et la charge appliquée.

Chapitre IV
Résultats et discussion

IV.1 : Résultats et discussion

Les paramètres considérés dans notre étude expérimentale sur l'usure abrasive de l'élastomère sont :

- ✓ La vitesse de glissement;
- ✓ Le nombre de cycle ou (la durée d'utilisation) ;
- ✓ angle d'inclinaison de la lame;
- ✓ La charge appliquée ou (le poids) ;

Nous interprétons les résultats obtenus puis nous les discutons.

IV.2: Influence de l'angle de l'arrêt de la lame

Pour étudier l'influence de l'angle d'inclinaison de l'arrêt de la lame sur le taux d'usure linéaire, nous avons réalisé sur une fraiseuse cinq lames d'angle différentes (10, 20, 30, 45, 60) °. Les résultats expérimentaux de cette étude et présentés dans la (figure IV.1). Le mécanisme d'usure est influencé par le mode de déformation élastoplastique à la surface de glissement de l'indenteur au contact de l'élastomère. L'interprétation des résultats est en accord avec la combinaison de deux approches de Thomas et de Kopalinsky-Torrance. La première approche met en évidence l'influence de l'angle de propagation des fissures sur la perte de masse. La deuxième, appliquée aux polymères, en utilisant le modèle d'Archard, permet de lier le coefficient d'abrasion d'Archard à l'angle d'aspérité rigide en contact avec la surface de notre matériau. (Approche de Thomas et de Kopalinsky-Torrance-Xie) :

$$kA = \frac{Uv}{LF} = \frac{1}{2\tau ap} * \frac{\sin^2 \alpha + 0.5 \sin 2\alpha}{1 + 2 \sin \alpha} \quad (\text{IV.1})$$

La courbe de la (figure IV.2) représente graphiquement cette relation. Nous dirons que l'angle de l'arrêt est en liaison directe avec le mode de rupture et le mécanisme de déformation dans la matrice se trouvant en zone d'arrachement.

La relation entre l'angle d'inclinaison θ , et la perte de masse peut être écrite comme suite [18] :

$$\Delta m = C_1 \frac{\cos^2(\theta) + 0.5 \sin(\theta)}{1 + \sin(\theta)} + C_2 \quad (\text{IV.2})$$

Les constantes du matériau C_1 et C_2 sont déterminées par lissage des résultats expérimentaux.

Les valeurs de ces constantes sont $C_1 = 0.606$, $C_2 = 0.032$ respectivement.

Les angles α et θ sont complémentaires (voir la figure IV.3).

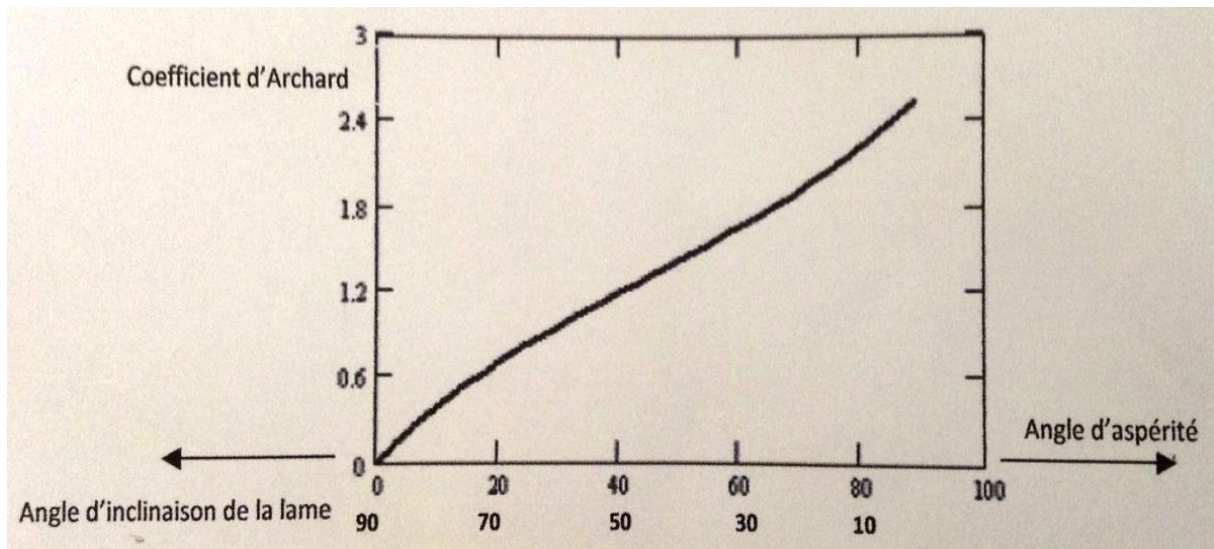


Figure IV.1 : Courbe de variation de coefficient d'archard en fonction d'angle d'aspérité pour un polymère [18]

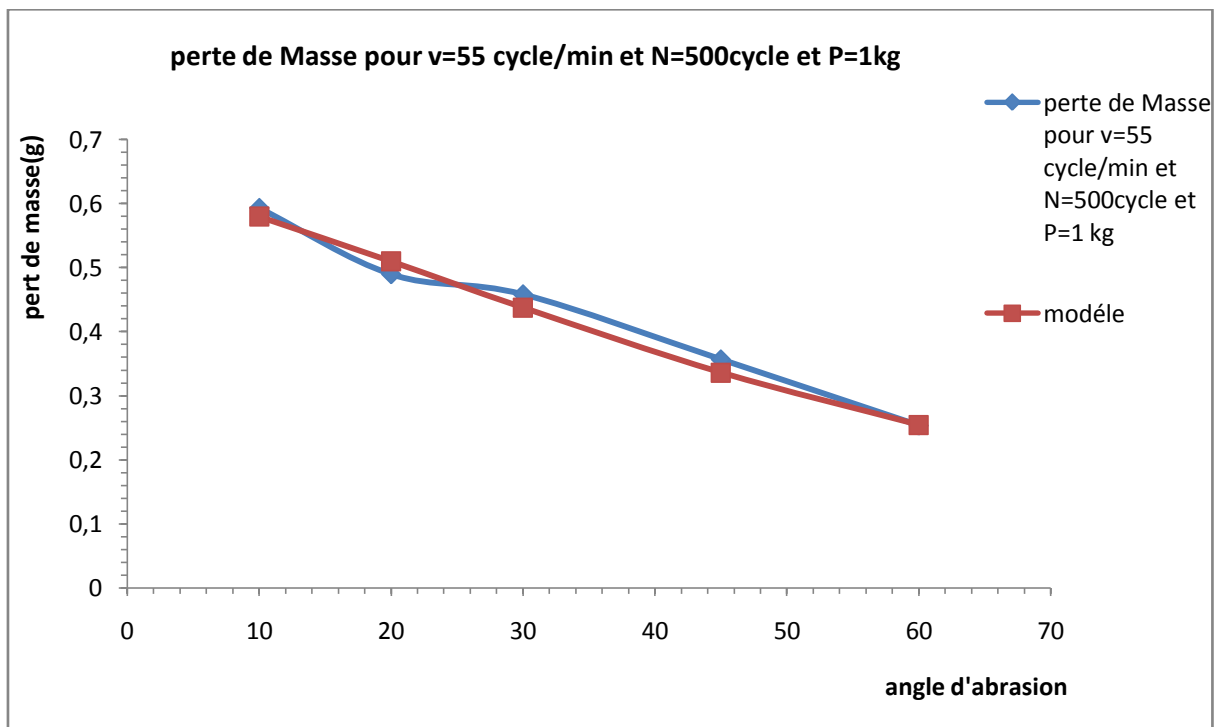


Figure IV.2: évolution de la perte de masse en fonction de l'angle d'inclinaison de la lame d'abrasion

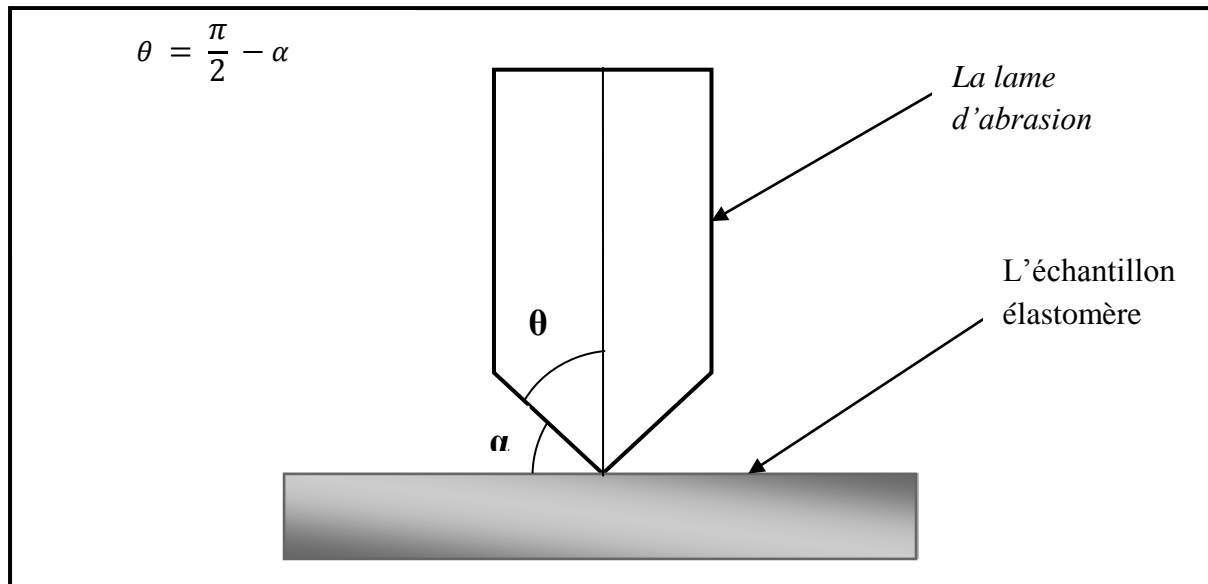


Figure IV.3 : Relation entre les angles α et θ .

IV.3: Influence de vitesse de glissement

Les résultats de l'influence des vitesses de glissement sont présentés en (Figure IV.4). Les résultats sont obtenus pour des différentes charges appliquées (0.5 kg- 1 kg- 1,5kg) et un nombre de cycle fixe égale (500cycle/minute) et $\theta=10^\circ$ 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, permet de constater l'existence d'un minimum. Nous constatons que l'usure diminue avec l'augmentation de la vitesse jusqu'à atteindre une valeur minimale puis augmente en augmentant d'avantage la vitesse de glissement jusqu'à atteindre une valeur maximale. Donc, ce minimum est lié à la vitesse de glissement. alors nous suggérons l'existence d'une vitesse critique ou bien vitesse d'usure minimale.

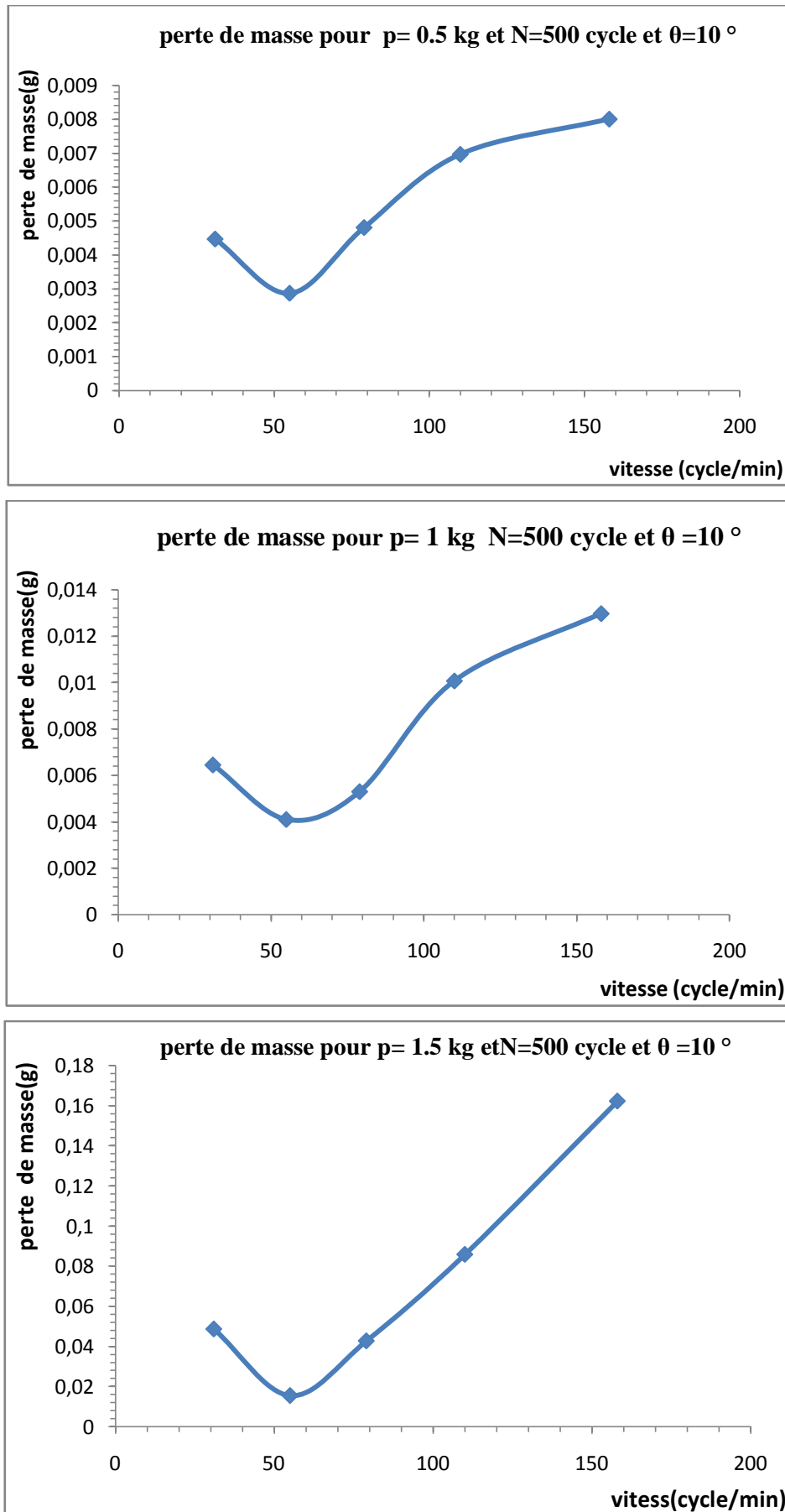


Figure IV.4: évolution de la perte de masse en fonction de la vitesse de glissement

IV.4 : Influence de la charge appliquée (poids kg)

Nous avons étudié l'influence de la charge appliquée en utilisant 5 poids différents (0.5 kg - 1 kg - 1.25 kg- 1.5 kg - 1.75 kg), et un nombre de cycle $N=500$ cycle et $\theta=10^\circ$ avec les gammes de vitesse disponible sur la machine.

Les résultats de l'influence de la charge appliquée sont présentés en (Figure IV.5). L'analyse de l'allure de ces courbes nous permet de distinguer l'existence de deux zones différentes.

Zone (1) :

- à faible charge l'usure est approximativement linéaire en fonction de la pression de contact.
- Cette zone dépend de la vitesse de glissement (voire le tableau IV.1).

Vitesse de glissement cycle /min	l'intervalle de la zone linéaire (kg)
15	[0.5, 1]
31	[0.5 ,1]
55	[0.5 ,1.25]
79	[0.5 ,1]
110	[0.5 ,1.25]
158	[0.5 ,1]

Tableau IV.1: l'intervalle de la zone linéaire pour chaque vitesse de glissement

Zone (2) :

- à partir d'une charge (considérée élevée) l'augmentation de perte de masse (usure) est très notable, l'usure augmente d'une manière exponentielle.

Ces deux constats sont en accord avec le comportement mécanique de l'élastomère. En analysant l'allure de la courbe caoutchoutique des élastomères de contrainte de déformation, le comportement est linéaire aux faibles contraintes (faible déformation) mais le comportement mécanique est de forme exponentielle aux contraintes élevées (déformations élevées). Ceci confirme la relation entre l'usure et le mécanisme de déformation résultant à la surface de contact. Ce mécanisme est généré par l'action simultanée des différents paramètres tribologiques.

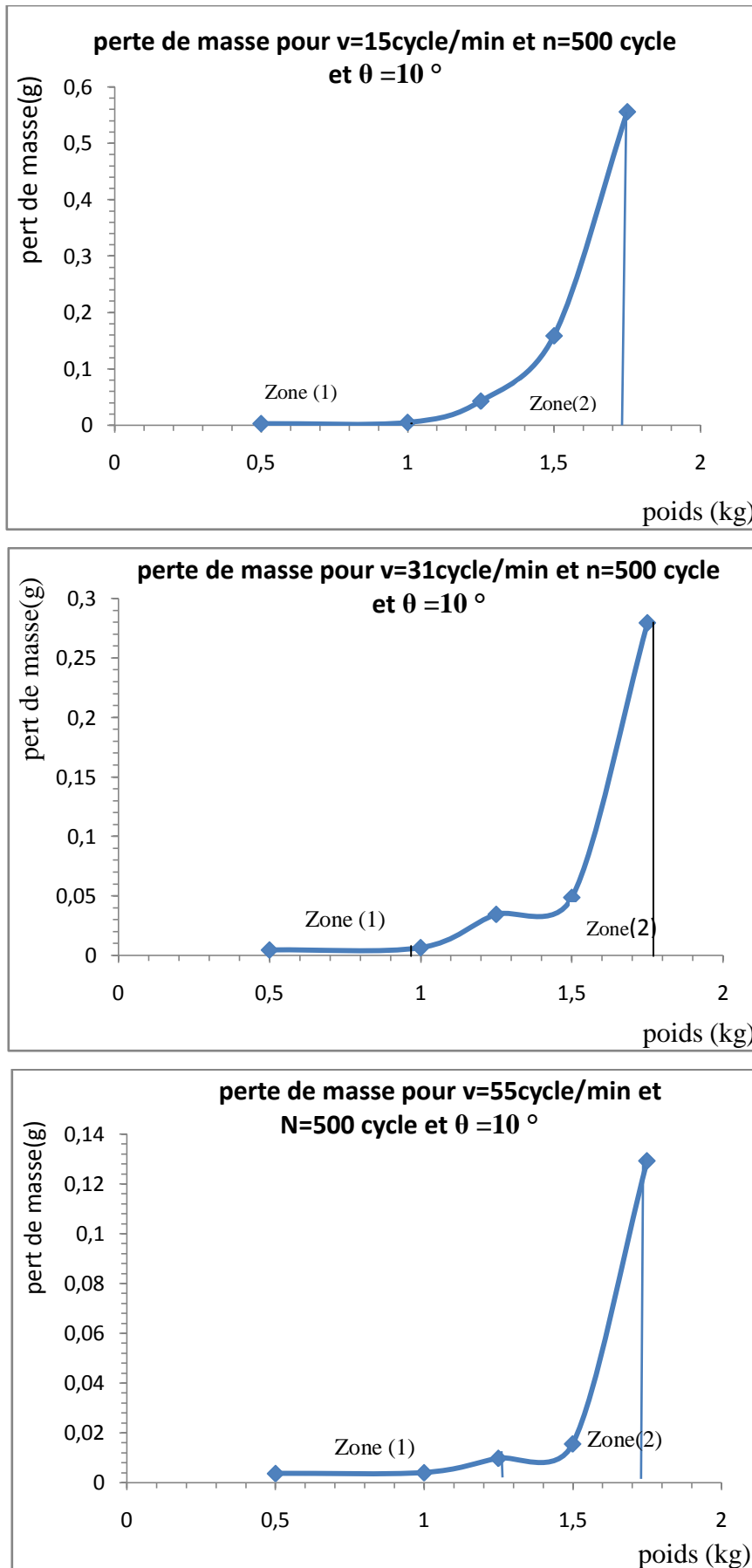


Figure IV.5: évolution de la perte de masse en fonction de la charge appliquée (poids kg)

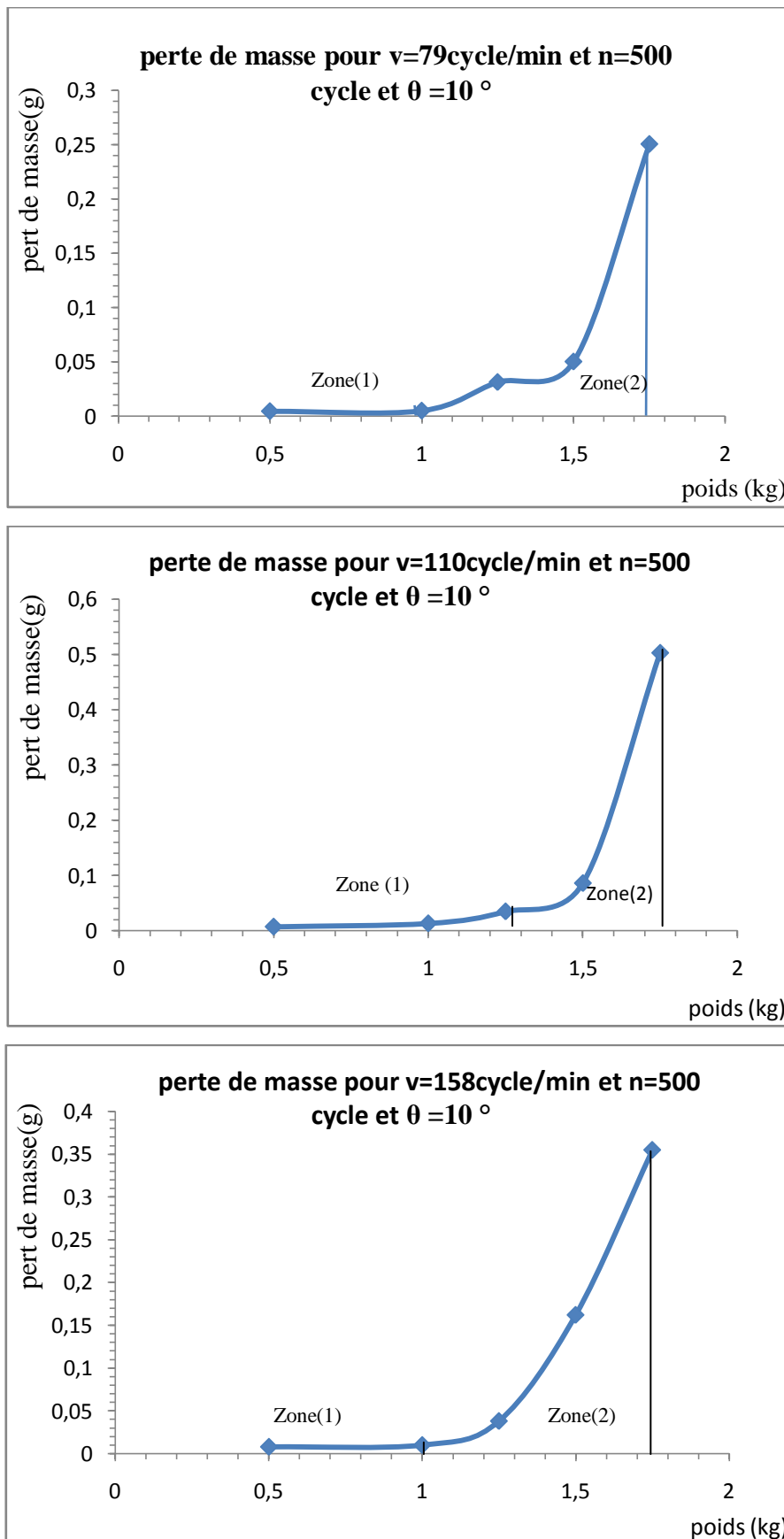


Figure IV.5: évolution de la perte de masse en fonction de la charge appliquée (poids kg)

IV.5: Influence de durée d'utilisation (nombre de cycle)

Les résultats de l'influence nombre de cycle sont présentés en (Figure IV.6).

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 :

- La première étape il y a endommagement de la matière à la surface. Le nombre de cycle est N_1 .
- La deuxième étape c'est la naissance des fissures à la surface de contact.
- En dernières étapes, c'est la propagation des fissures.

Au début de l'usure abrasive, l'arrachement de la matière est limité aux points qui présentent des défauts de structure où l'énergie de rupture est la plus faible comme les agglomérats ou bien les défauts des trous à la surface de la matière. En suit avec l'augmentation du nombre du cycle, l'endommagement augmente à la surface de contact ce qui augmente le nombre du fissures et pare conséquence la perte de masse. Le cycle d'arrachement de la matière s'accroît pare la propagation de fissures existences et la naissance d'autre fissure. Cette analyse est donc conforme avec les résultats de la perte de masse en fonction du nombre de cycles. Nous constatons que les variations suit une loi exponentielle qui est aussi la même pour les lois de rupture par fatigue (loi de paris). Cette analyse est en accord avec les résultats expérimentaux établis dans la littérature qui portent sur l'usure abrasive des élastomères NBR [18].

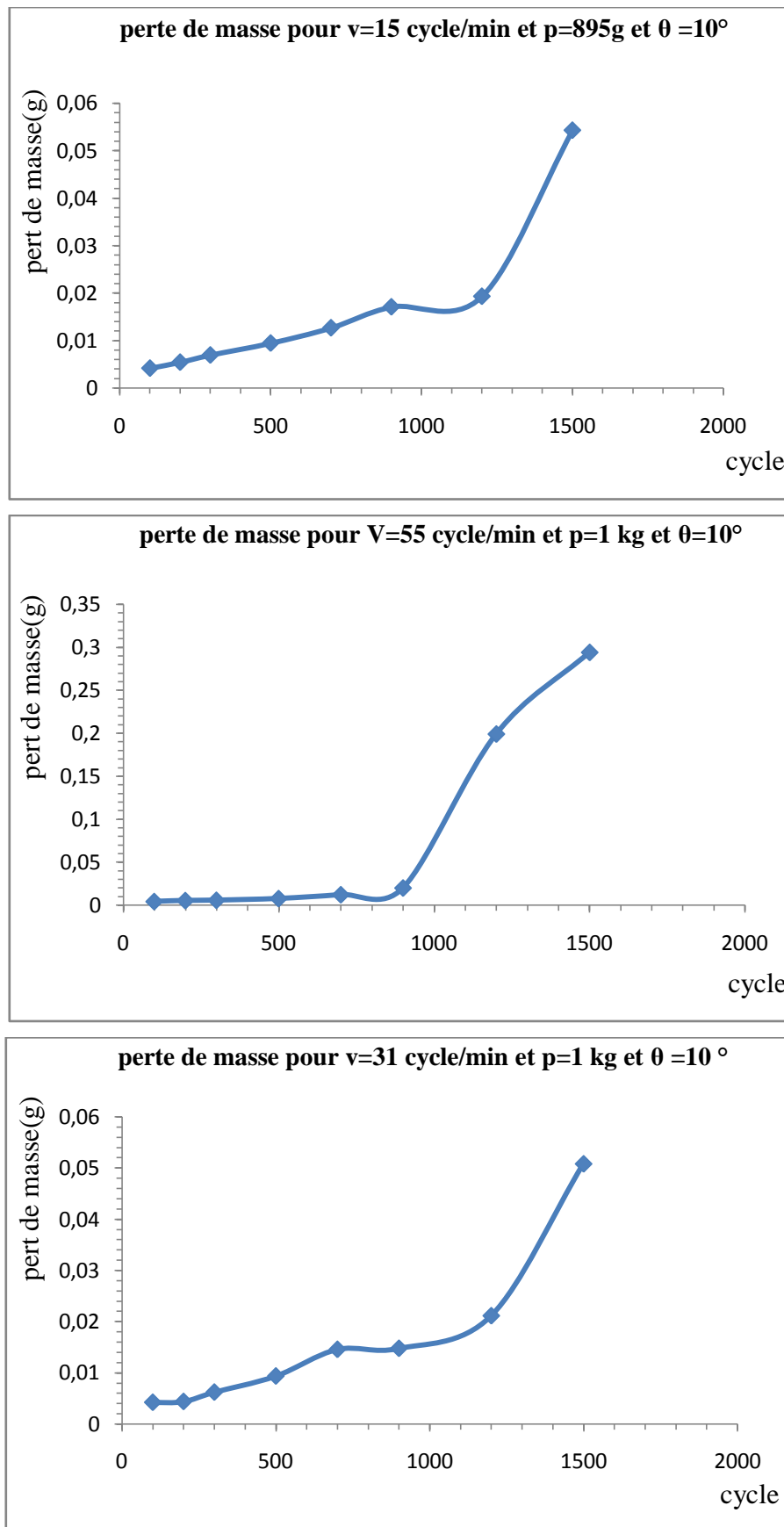


Figure IV.6: évolution de la perte de masse en fonction du nombre de cycles parcourus

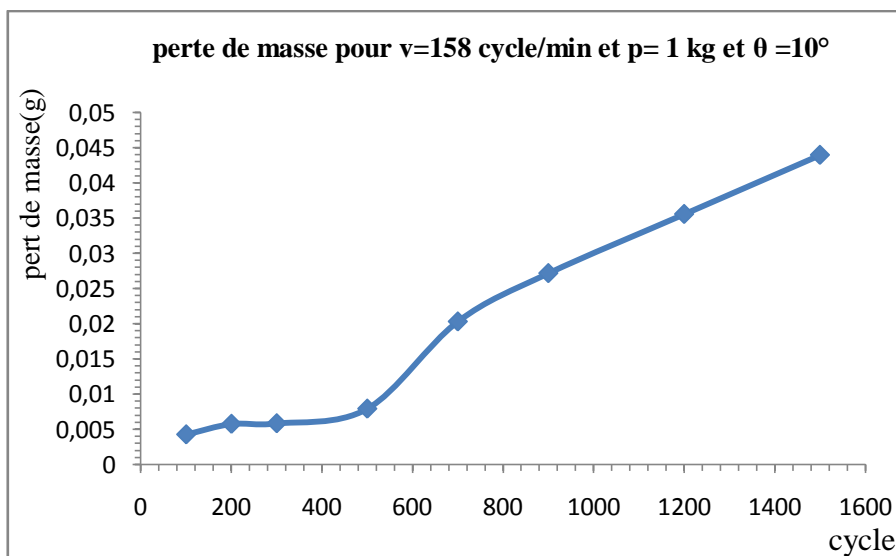
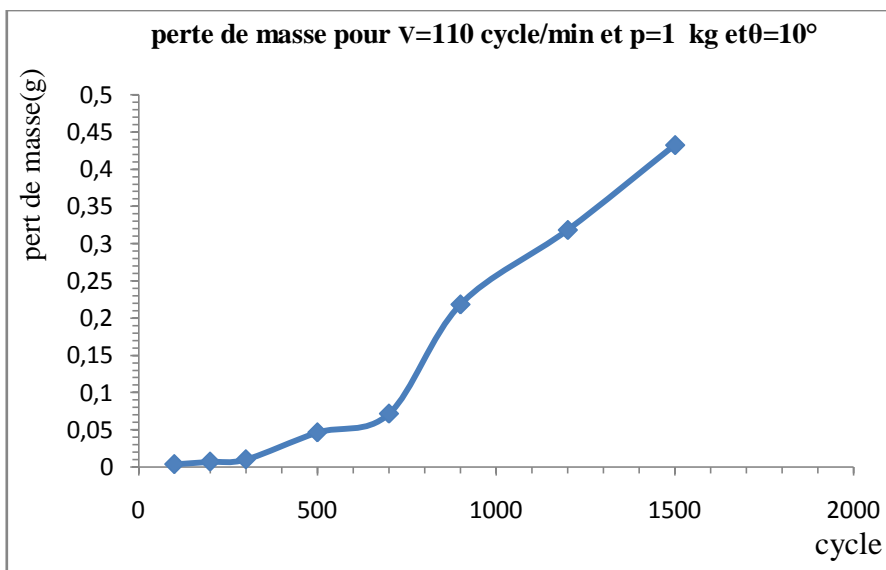
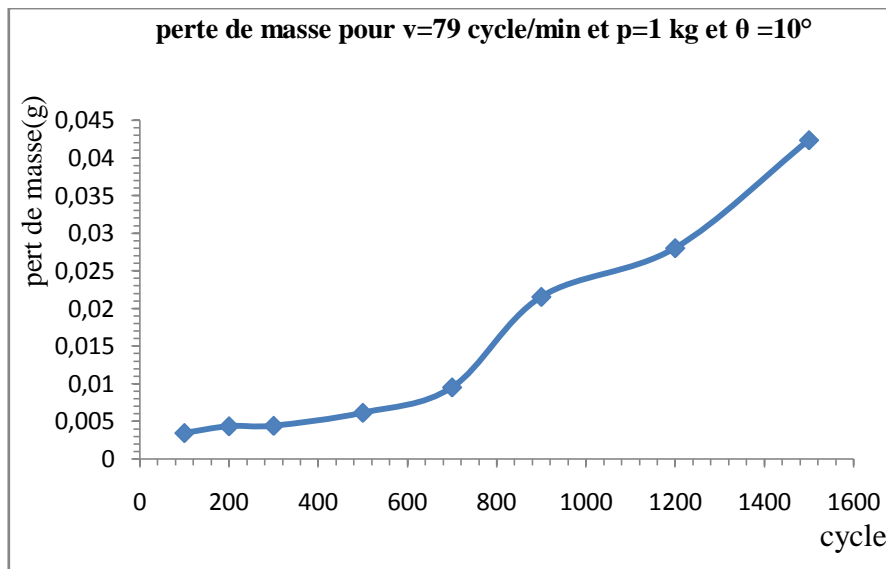
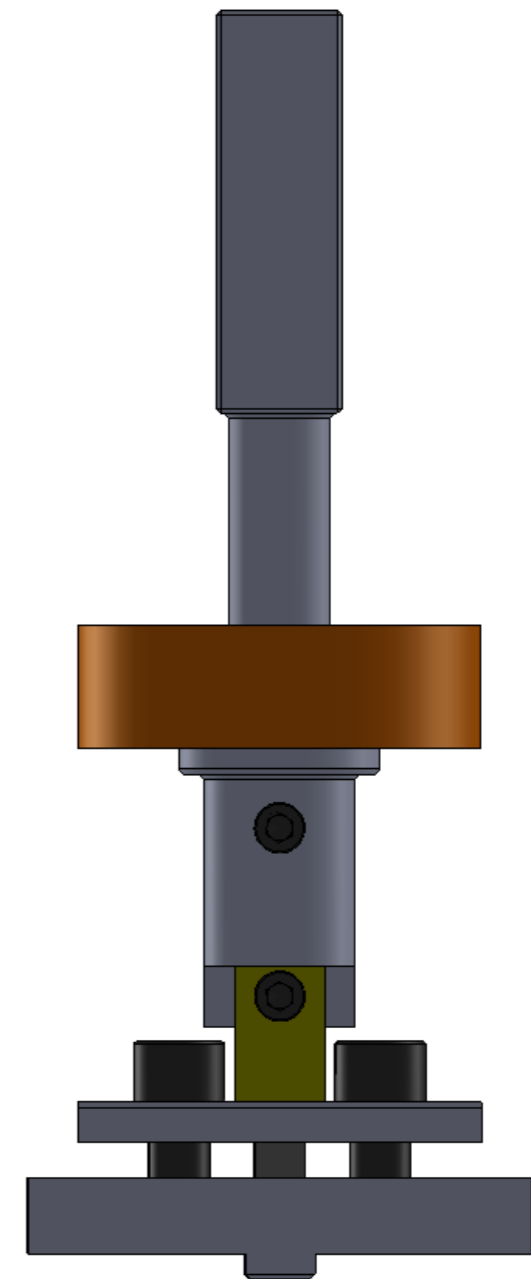
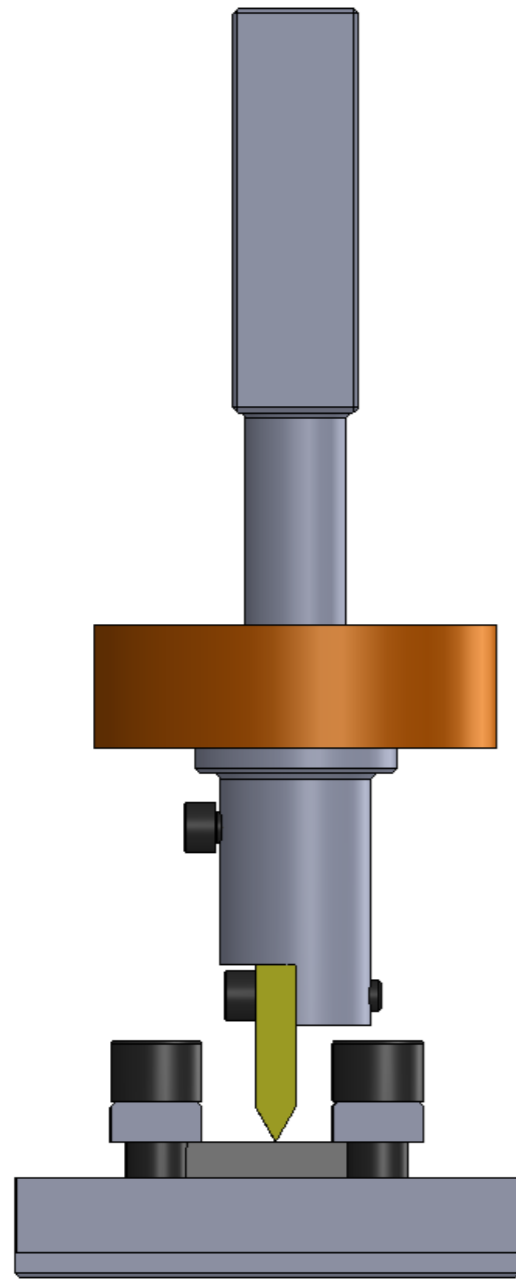


Figure IV.6: évolution de la perte de masse en fonction du nombre de cycles parcouru

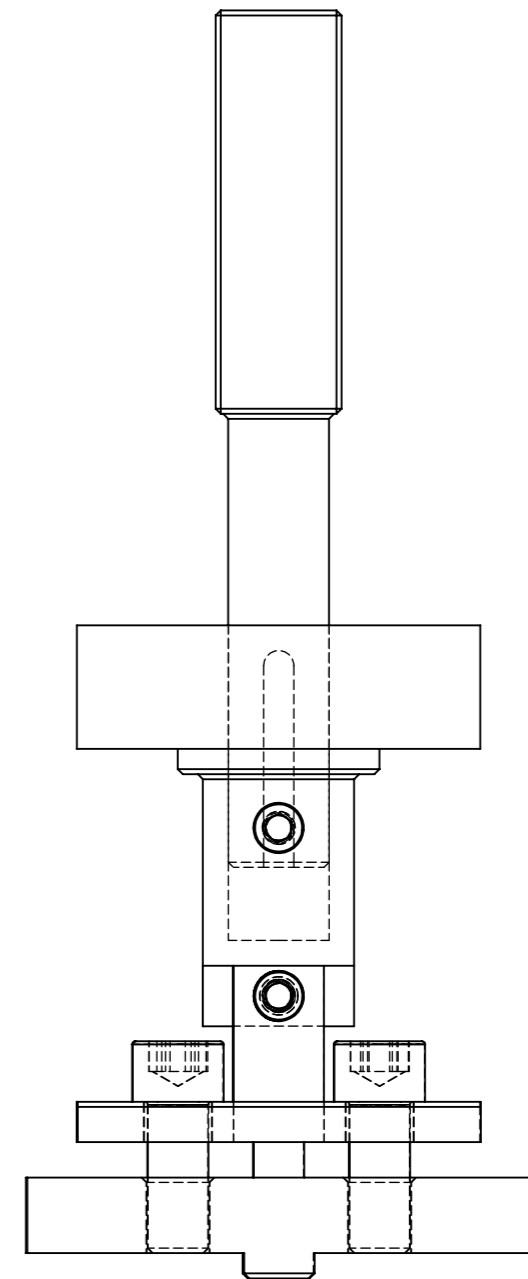
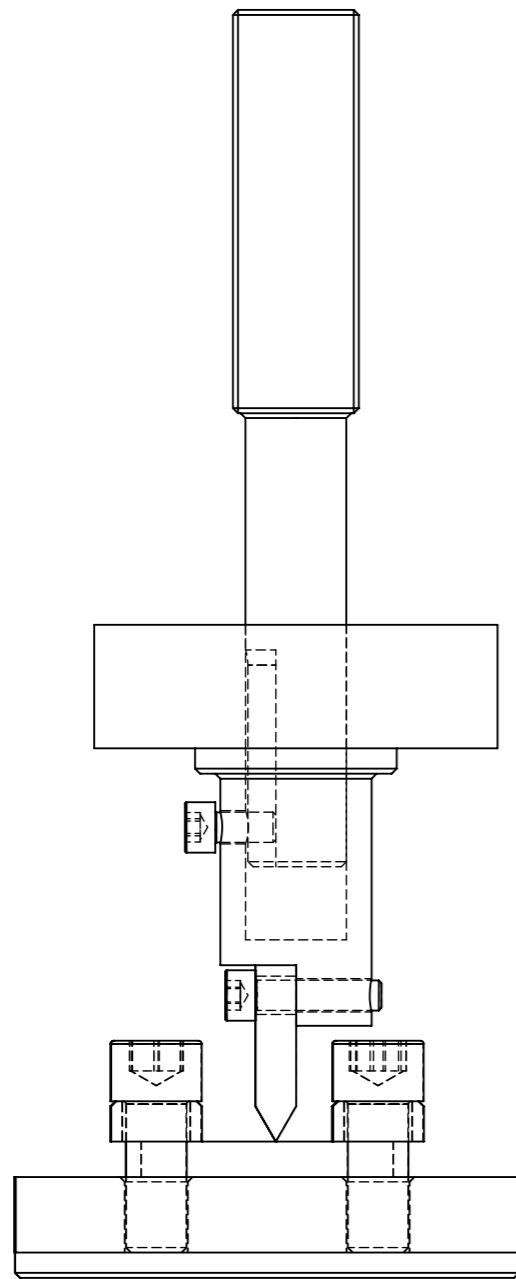
IV.6: Conclusion

L'étude de l'interaction « matériau/indenteur » implique des actions dépendante et momentanée des différents paramètres tribologiques. En conséquent, le phénomène régissant cette interaction n'est pas aisé à expliquer. Les résultats de l'influence des paramètres tribologiques permettent de confirmer l'existence de vitesses critiques. Nous avons montré que la vitesse de glissement définie donc la vitesse de déformation viscoélastique de la zone de contact. Nous attribuons l'ampleur de perte de masse par abrasion à l'apparition des ondulations de Schalamach et leurs dimensions (hauteur et largeur des rides). Aux faibles vitesses, nous suggérons que l'effet de relaxation de l'élastomère déformé dans la zone de contact agit sur l'augmentation des rides. Aux vitesses élevées, si l'effet de plastification des agglomérats dans la matrice qui emporte et l'usure abrasive de l'élastomère diminue.

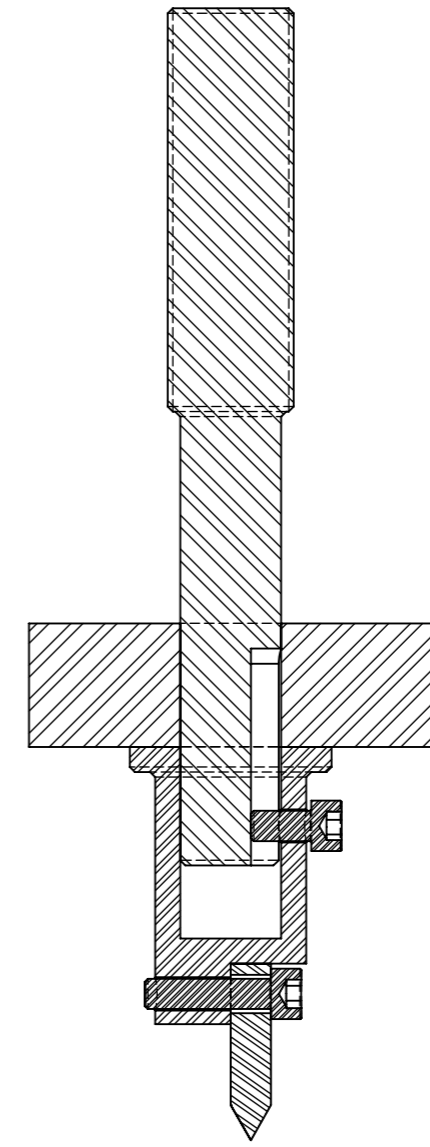
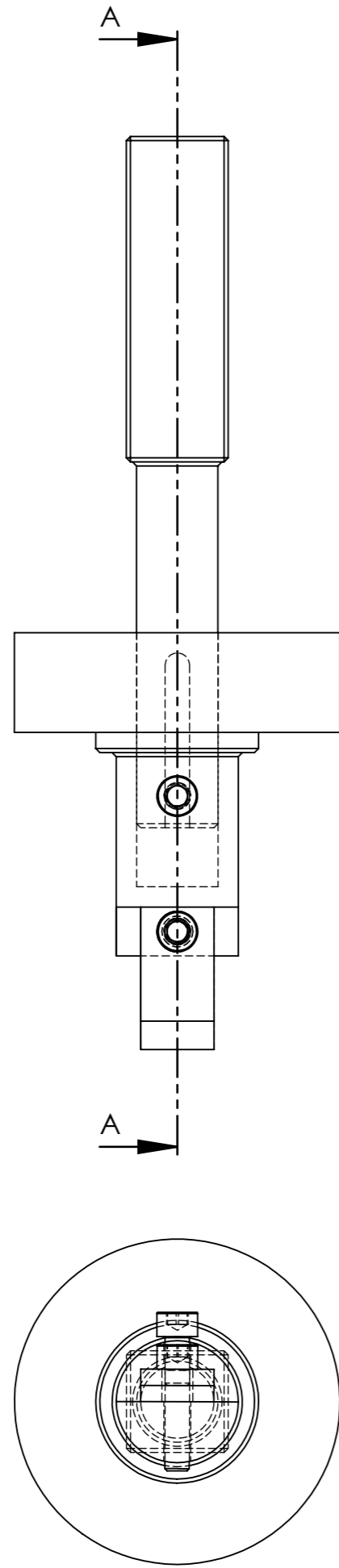
Annexes



LE DISPOSITIF EXPERIMENTALE

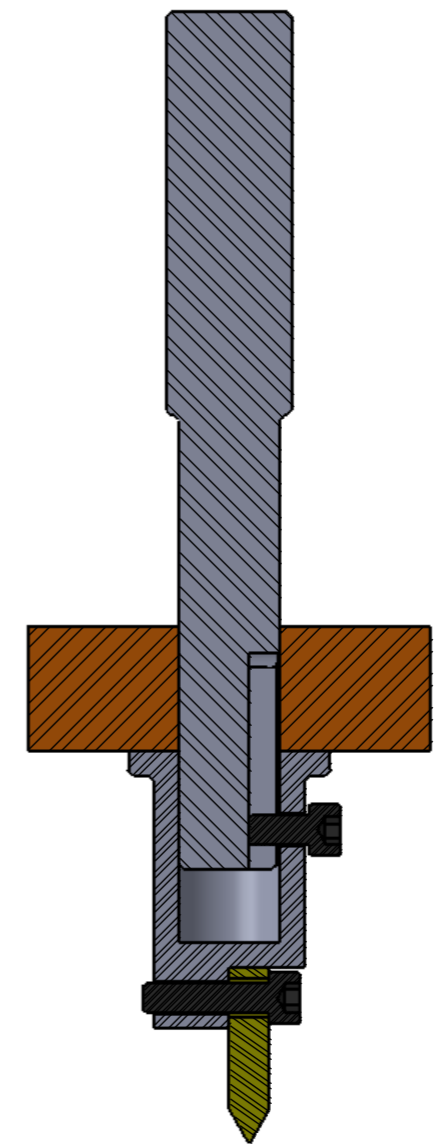
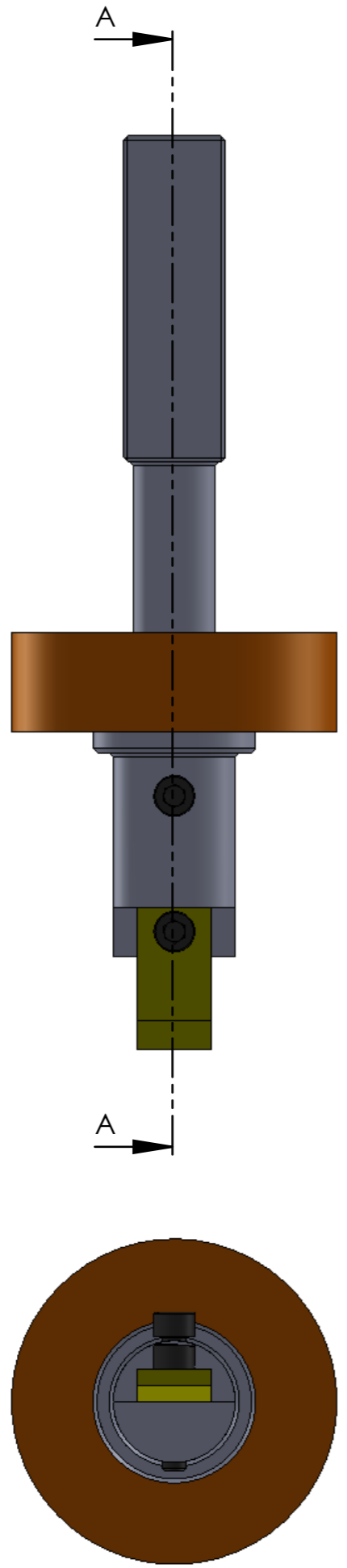


LE DISPOSITIF EXPERIMENTALE



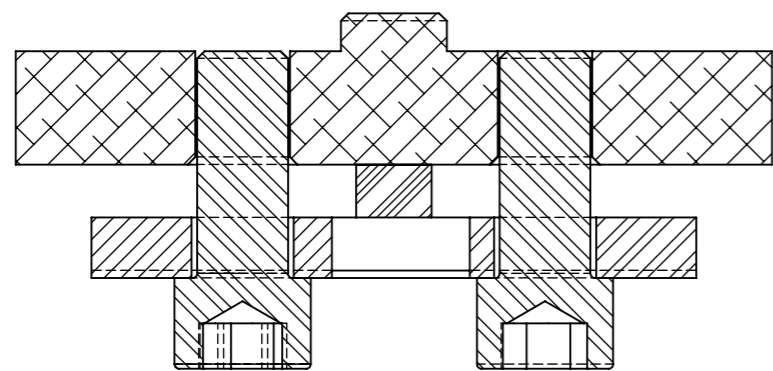
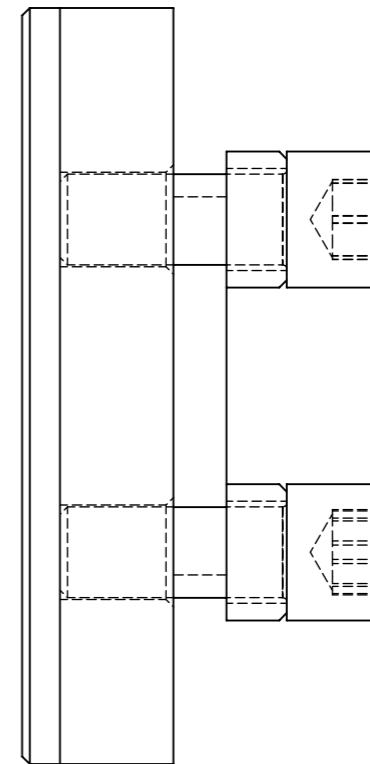
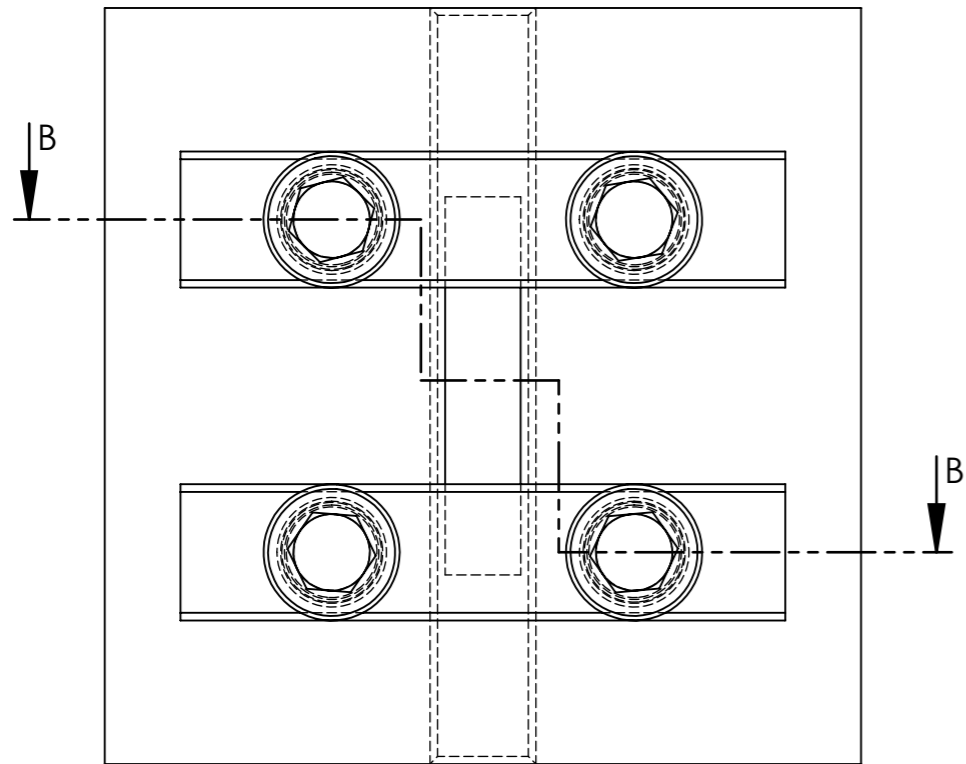
COUPE A-A

MECANISME DE FIXATION DE LA LALAMED'ABRASION



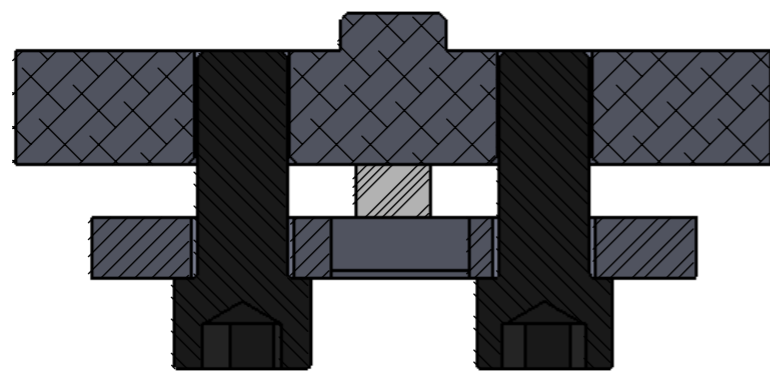
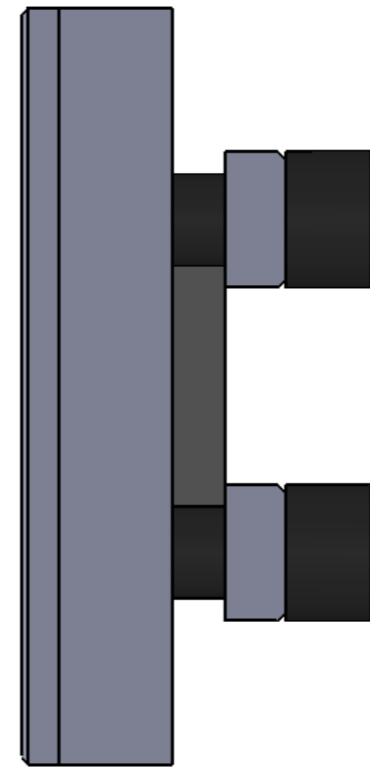
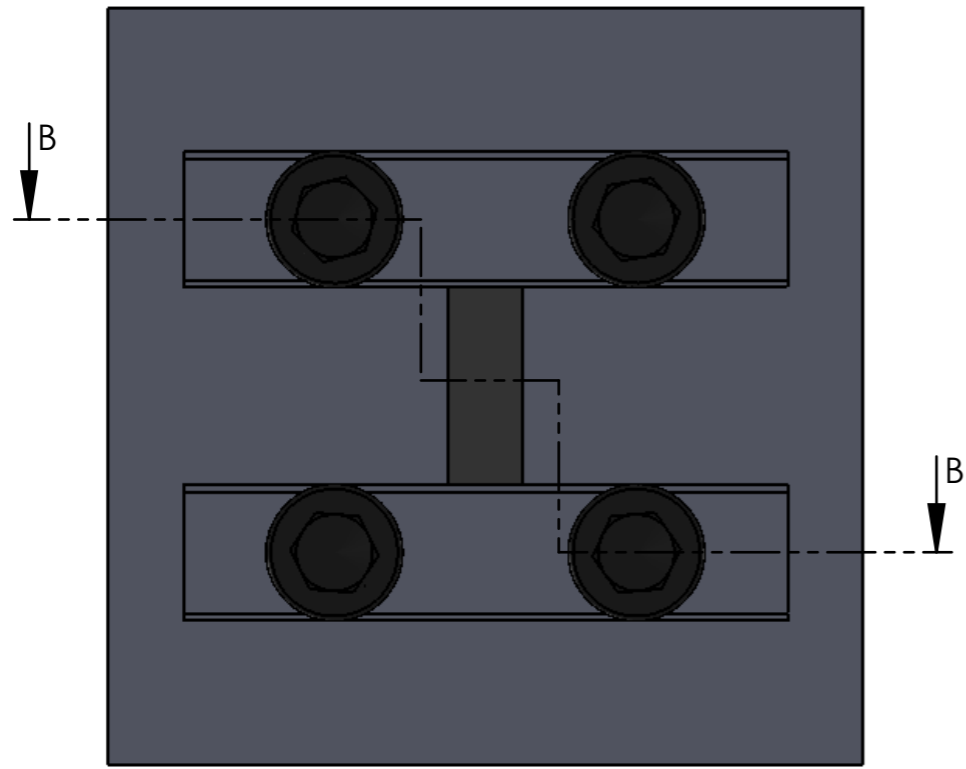
COUPE A-A

MECANISME DE FIXATION DE LA LALAMED'ABRASION



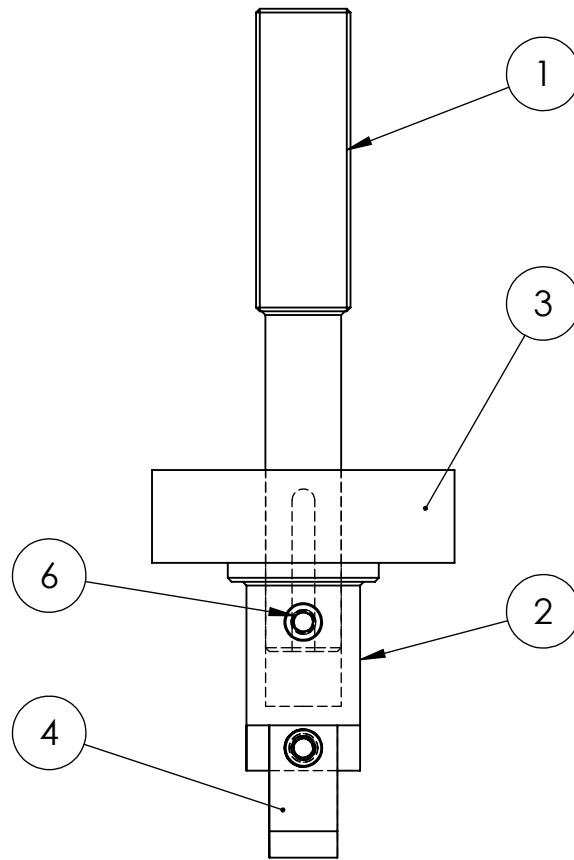
COUPE B-B

mécanisme de fixation de l'échantillon



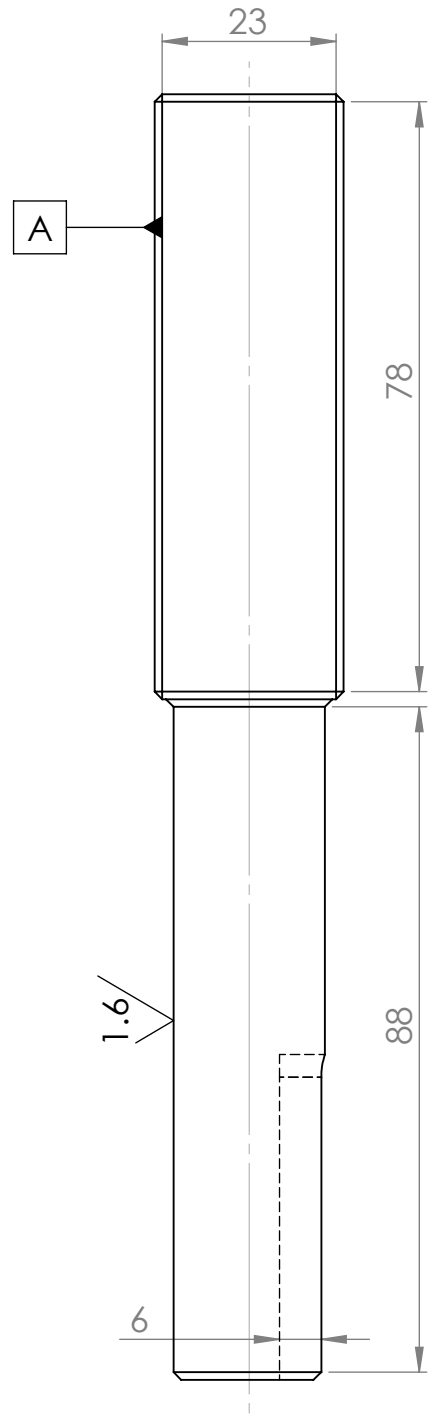
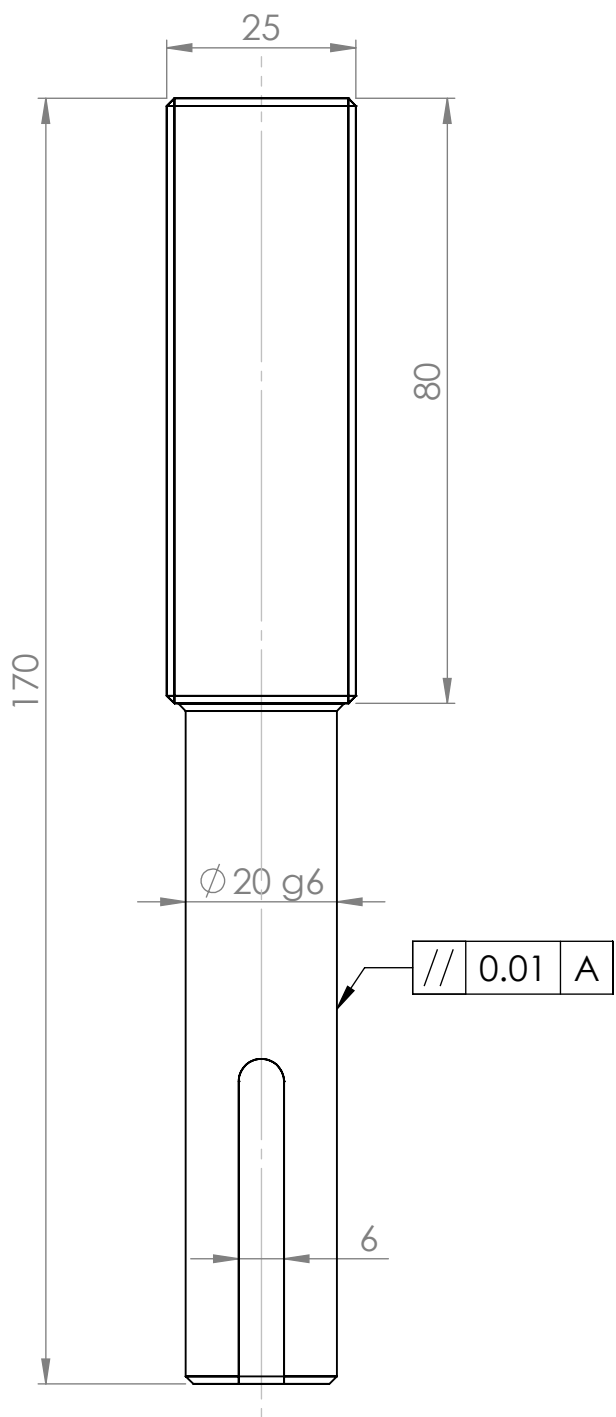
COUPE B-B

mécanisme de fixation de l'échantillon

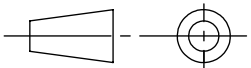


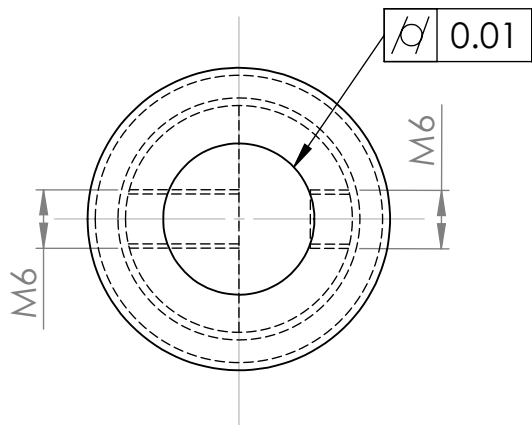
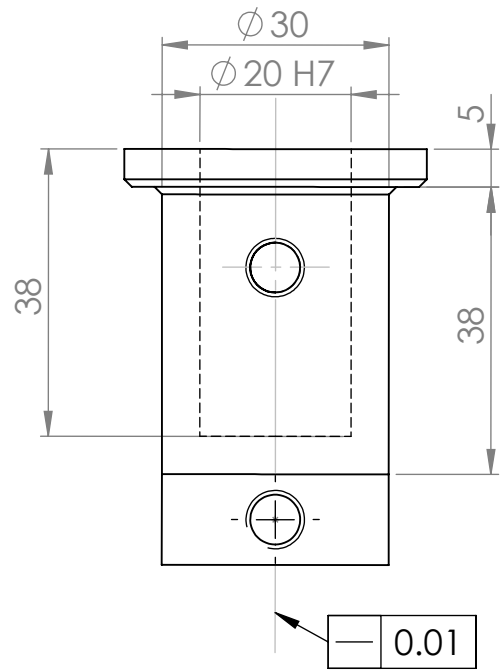
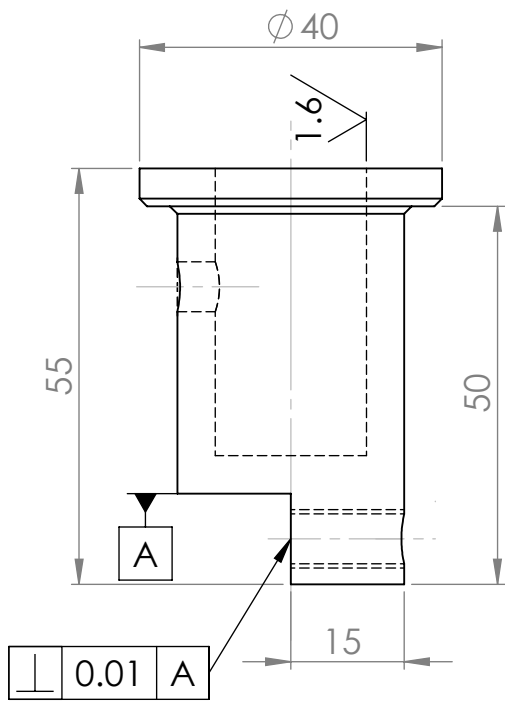
REP	NB	DESIGNATION	MATIER	OBSERVATION
1	1	LA TIGE	A40	
2	1	PORTE LAME	A40	
3	1	LE POIDS	A40	
4	1	LA LAME	XC48	
5	2	VIS CHC M6		

MECANISME DE FIXATION DE LA LAME D'ABRASION

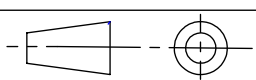


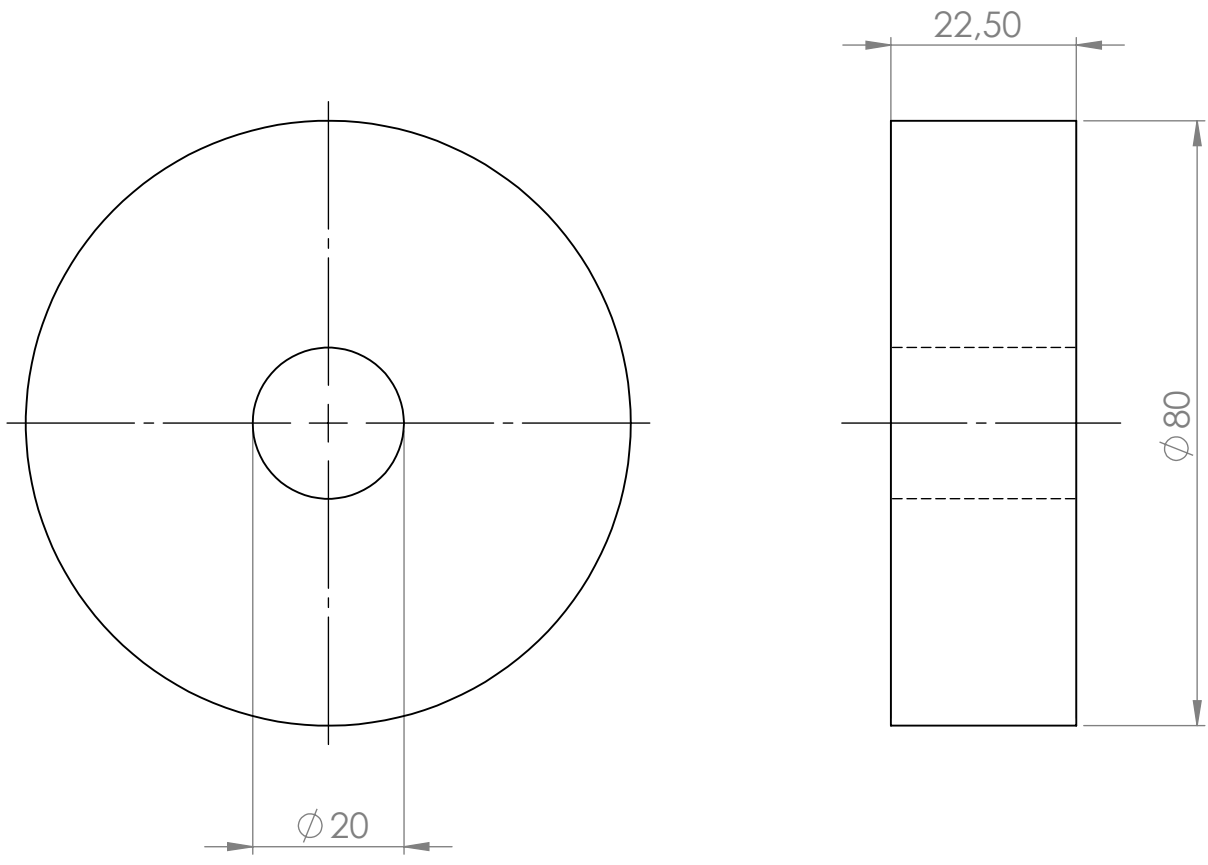
Etat de surfaces Ra=3.2 SAUF INDICATION

01	01	LA TIGE	A40	
REP	NB	DESIGNATION	MATIERE	OBSERVATION
ECHELLE 1:1		MECANISME DE FIXATION DE LA LAME D'ABRASION		
		GM-(CM)-UMMTO	2015-2016	
A4		IBERSIENE RABAH	MASTER 02 CM	



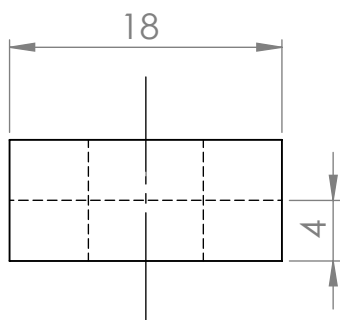
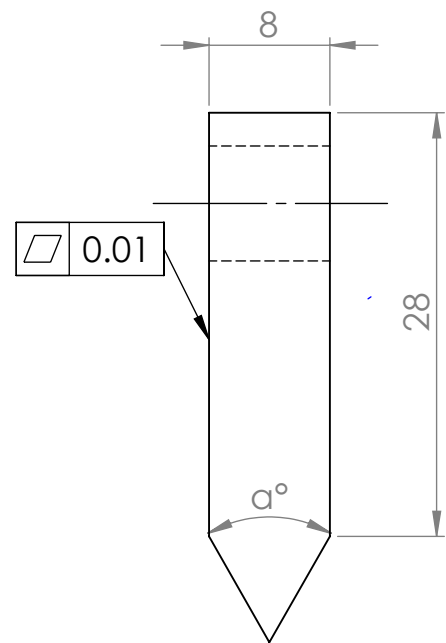
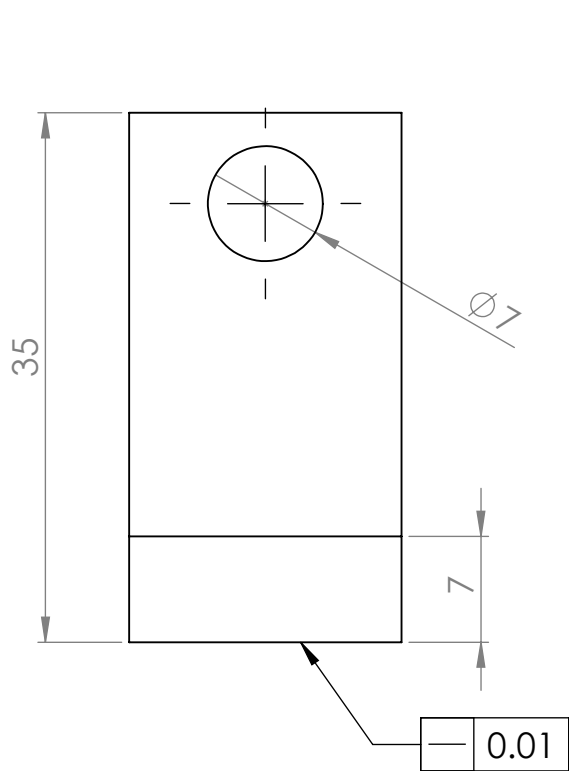
Etat de surfaces Ra=3.2 sauf indication

01	02	PORTE LAME	A40	
REP	NB	DESIGNATION	MATIER	OBSERVATION
EHELLE 1:1		MECANISME DE FIXATION DE LA LAME D'ABRASION		
		GM-(CM)-UMMTO	2015-2016	
A4		IBERSIENE RABAH	MASTER 02 CM	



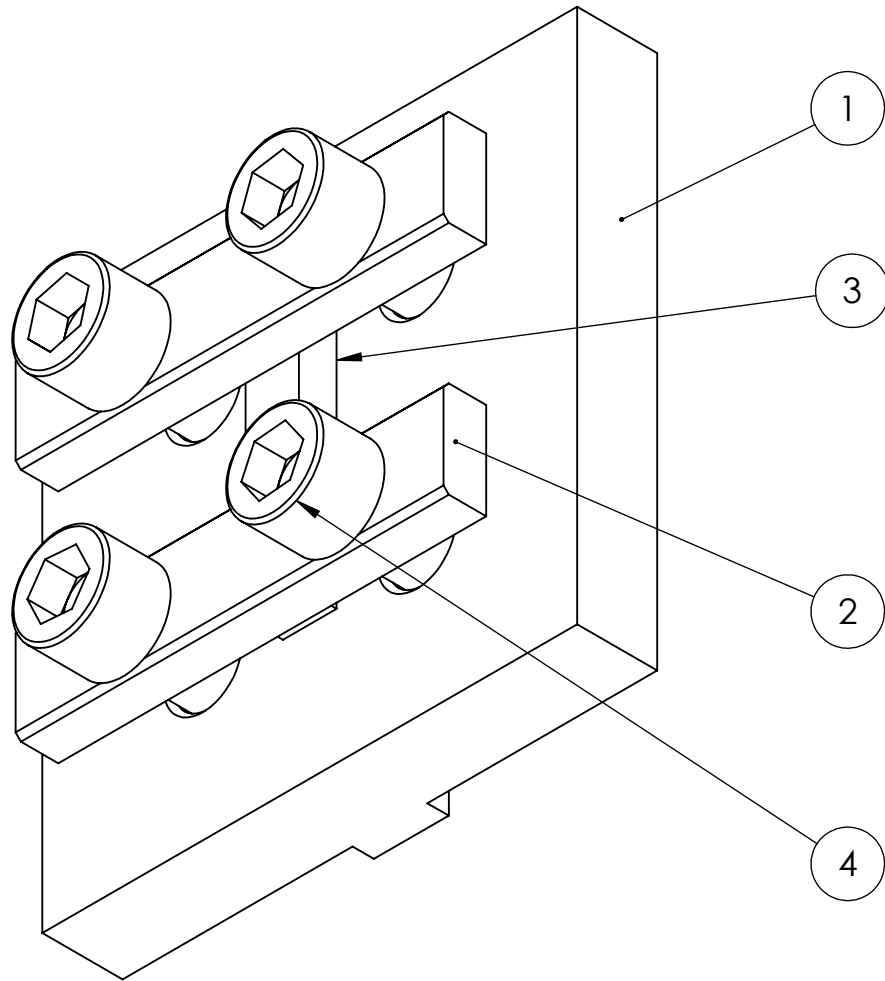
Etat de surfaces Ra=3.2

01	03	LE POIDS	A40	
REP	NB	DESIGNATION	MATIER	OBSERVATION
<p>ECHELLE 1:1</p>		<p>MECANISME DE FIXATION DE LA LAME D'ABRASION</p>		
		GM-(CM)-UMMTO	2015-2016	
A4		IBERSIENE RABAH	MASTER 02 CM	



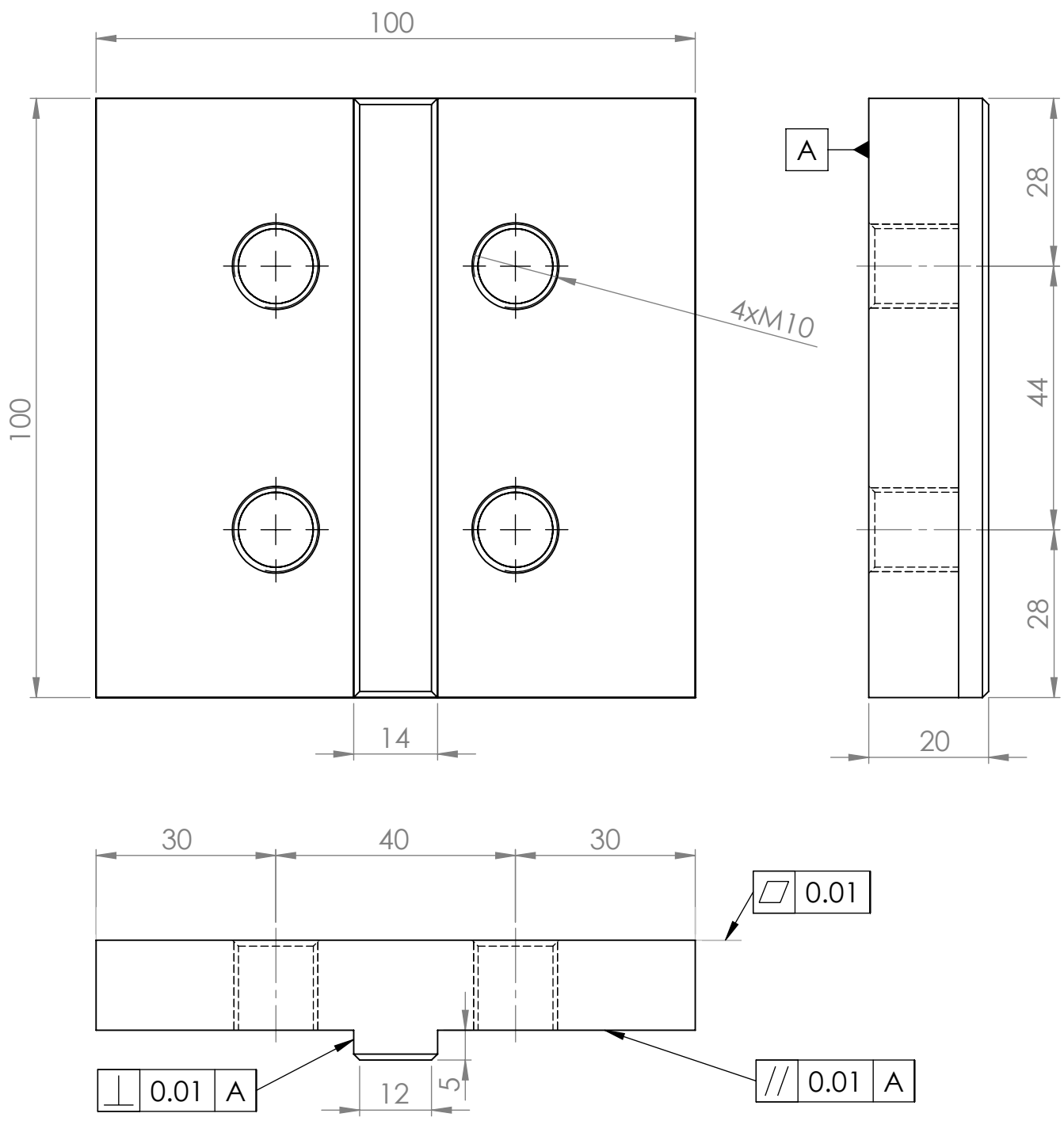
Etat de surfaces Ra=3.2

01	04	LA LAME D'ABRASION	XC48	
REP	NB	DESIGNATION	MATIER	OBSERVATION
EHELLE 1:1		MECANISME DE FIXATION DE LA LAME D'ABRASION		
		GM-(CM)-UMMTO	2015-2016	
A4		IBERSIENE RABAH	MASTER 02 CM	

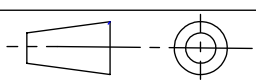


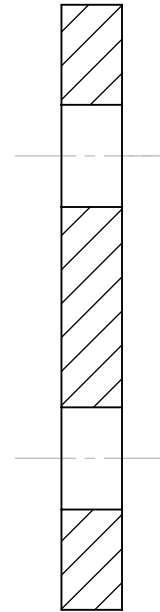
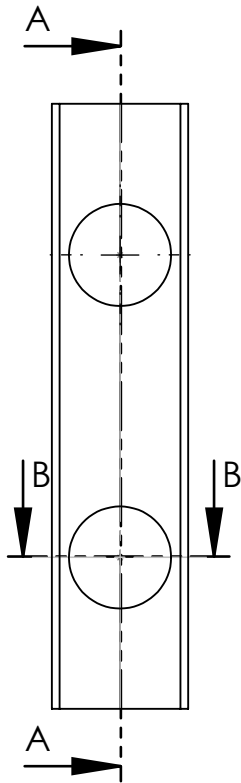
REP	NB	DESIGNATION	MATIER	OBSERVATION
1	1	SUPORTE ECHANTILLONS	ALLUMINIUM	
2	2	PLAQUE DE FIXATION	ACIER DOU	
1	3	L'ECHANTILLON	ELASTOMERE SBR	
4	4	VIS CHCM10		

MECANISME DE FIXATION DE L'ECHANTILLON

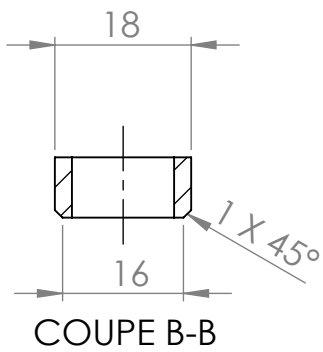


Etat de surfaces Ra=3.2

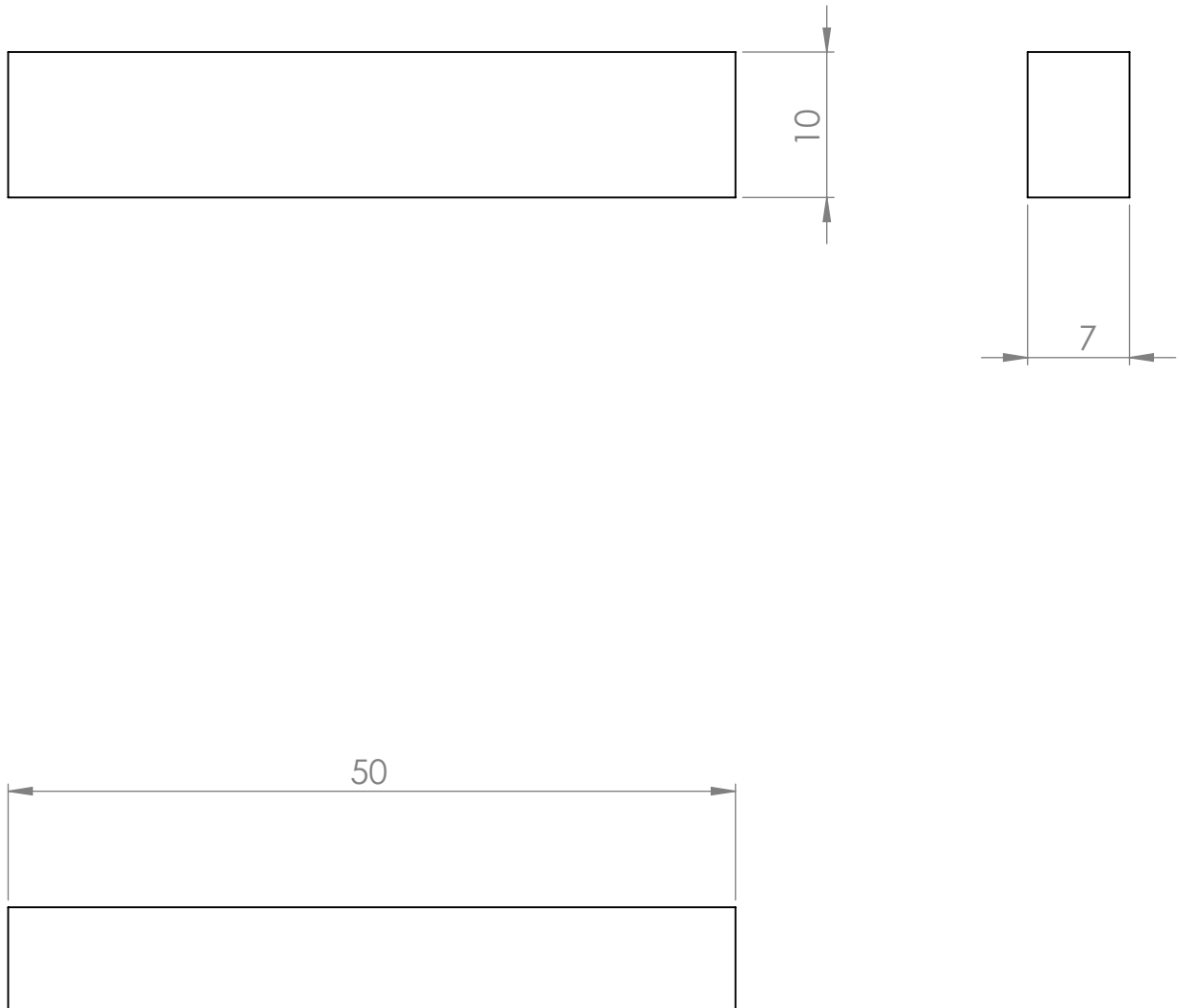
1	1	SUPPORT ECHANTILLON	ALLUMINIUM	
REP	NB	DESIGNATION	MATIER	OBSERVATION
ECHELLE 1:1		MECANISME DE FIXATION DE L'ECHANTILLON		
		GM-(CM)-UMMTO		2015-2016
A4		IBERSIENE RABAH		MASTER 02 CM

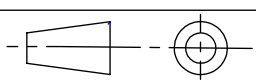


COUPE A-A



02	02	LA PLAQUE	ACIER DOU	
REP	NB	DESIGNATION	MATIER	OBSERVATION
EHELLE 1:1		MECANISME DE FIXATION DE L'ECANTILLON		
		GM-(CM)-UMMTO	2015-2016	
A4		IBERSIENE RABAH	MASTER 02 CM	



01	03	L'ECHANTILLON	ELASTOMERE SBR	
REP	NB	DESIGNATION	MATIER	OBSERVATION
ECHELLE 2:1		MECANISME DE FIXATION DE L'ECHANTILON		
		GM-(CM)-UMMTO	2015-2016	
A4		IBERSIENE RABAH	MASTER 02 CM	

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] AOUDIA KARIMA « recyclage et revalorisation des élastomères usagés » mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2013-2014.
- [2] DR ADNANE BOUKAMEL « modélisations mécaniques et numériques des matériaux et structures en élastomères » thèse de doctorat, 05/10/2006.
- [3] CHALLAL Med CHERIF, LOUNAS FAZIA « Usure abrasive et contact plan /plan avec influence des conditions de vieillissement climatique des élastomères chargés » mémoire de master Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2013
- [4] Etude d'un Projet Industriel de Fabrication d'articles en Caoutchouc pour Automobiles
- [5] DR JEAN- MARIE DEGRANGE « Influence des paramètres viscoélastiques sur le comportement viscoélastique sur le comportement tribologique d'élastomères de type NBR » thèse de doctorat, 04 octobre 2004
- [6] DR 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 appliquées de Lyon ,2004.
- [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] DR GILLES PETITET « Contribution a la compréhension des mécanismes élémentaire d'usure douce des élastomères chargés réticulée thèse de doctorat » t, 03 février 2003.
- [10] M.GODET, L.VINCENT, Propriétés tribologiques – Frottement – Usure, Pratique des Matériaux Industriels, Chapitre 2.2.4, (1990).
- [11] J.DENAPE, Y.BERTHIER, L.VINCENT, Wear particles life in a Sliding Contact under dry conditions : Third body Approach. Fundamentals of Tribology and Bridging the Gap Between Macro, Micro and Nanoscale, Nano Science Series II, volume 10, (2001), pp.393-411.
- [12] M.CARTIER, P.KAPSA, Usure des contacts mécaniques, Techniques de l'Ingénieur, BM5065 à BM5061 (2001).
- [13] M.GODET, The third body approach: a mechanical view of wear, Wear, volume 100, (1984), pp.437-452.
- [14] Y.BERTHIER, Mécanismes et tribologie, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon et de l'Université Claude Bernard de Lyon, (1988).
- [15] O.DALVERNY, Vie tribologique à chaud et température interfaciale des contacts céramiques, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I, (1998).

Références bibliographiques

[16] Y.BERTHIER, M.GODET, M.BRENDLE, Velocity accommodation in friction, Tribology Transaction, volume 32, Issue 4, (1989), pp.490-496.

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

[18] DR DJERIDI Rachid « modélisation du comportement tribologique des élastomères chargés » thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2016.

[19] EMILIE PLANES « influence des charges sur l'évolution des propriétés mécaniques des EPDM chargés hors de leur vieillissement par irradiation » 12/11/2008.