

République Algérienne Démocratique Et Populaire  
Ministre De L'enseignement Supérieure De La Recherche Scientifique Université Mouloud  
MAMMERI Tizi-Ouzou



Faculté De Génie De Construction  
Départements De Génie Mécanique

## **Mémoire de fin d'étude**

En vue de l'obtention du diplôme

**Master Académique En Génie Mécanique**

**Option : Construction Mécanique**

## **Thème**

**Etude Tribologique Des Elastomères Chargé : Influence De La  
Pression De Contact Et De La Vitesse Du Glissement**

*Proposé Par :*

*MR DJRIDI Rachid*

*Présenté Par :*

*MENAS Salah*

# *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<sup>ER</sup> 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.*

# *Dédicace*

*“A toute personne noble qui se sacrifie  
pour le bonheur et le bien d'être des autre*

*...”*

*Parents...*

*Amis...*

*Collègue...*

*Personne noble rencontrée ou qui  
travaille dans l'ombre...*

## Table des matières

Remerciements

Dédicace

Introduction générale..... 2

### Chapitre I Généralités sur élastomère

1. Introduction..... 5

1.2 Le caoutchouc ..... 5

1.2.1 Présentation ..... 5

1.2.2. Historique..... 5

I.2.3 : Hévéa Brasiliensis..... 7

I.3 : le caoutchouc naturel ..... 8

I.3.1 : Durée de vie du caoutchouc..... 9

I.3.2 : Propriétés physiques et chimiques..... 9

I.3.3 : caoutchouc synthétique..... 10

I.4: le élastomères ..... 10

I.4.1: Propriétés et structures des élastomères ..... 10

I.4.2 : Microstructure des matériaux élastomères ..... 13

I.4.3 : Les différentes familles d'élastomères..... 13

I.4.3.1 : Les élastomères therm durcissables..... 13

I.4.3.2 : Les élastomères thermoplastiques ..... 14

I.4.4 : Vulcanisation / Réticulation ..... 14

I.4.6 : La cristallisation ..... 16

I.4.7 : Température de transition vitreuse Tg ..... 17

I.4.8 : La viscoélasticité ..... 17

I.4.9:L'hystérésis ..... 18

I.5 : Renforcement par les charges ..... 19

I.6 : Les mécanismes d'endommagement..... 22

I.6.1 : Processus d'endommagement ..... 22

I.7 : comportements des élastomères ..... 24

I.7.1 :L'élasticité caoutchoutique..... 24

I.7.2 :L'effet Mullins ..... 24

<b>I.7.3 : Effet Payne .....</b>	<b>26</b>
<b>I.8 : utilisation des élastomères .....</b>	<b>27</b>
<b>I.9 CONCLUSION .....</b>	<b>28</b>

## Chapitre II La tribologie des élastomères

<b>1. introduction.....</b>	<b>30</b>
<b>2 .Problématique de l'étude de l'usure.....</b>	<b>30</b>
<b>3. Définition.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1) Adhésion L'adhésion .....</b>	<b>31</b>
<b>3.2) Coefficient de frottement.....</b>	<b>32</b>
<b>3.2.1) Formulation .....</b>	<b>32</b>
<b>3.2.2) Coefficients de frottement statique et dynamique .....</b>	<b>32</b>
<b>3.3) Origine des efforts résistants. Conséquences pratiques .....</b>	<b>33</b>
<b>3.5) Contraintes résiduelles .....</b>	<b>33</b>
<b>3.6) Rugosité.....</b>	<b>33</b>
<b>4) Données et paramètres tribologiques.....</b>	<b>34</b>
<b>4.1) Taux d'usure.....</b>	<b>34</b>
<b>4.2) Valeur du produit <math>P \times V</math> .....</b>	<b>36</b>
<b>4.3) Densité d'énergie de frottement.....</b>	<b>37</b>
<b>5) Surface : .....</b>	<b>38</b>
<b>II.2.1 : Outils conceptuels en tribologie des interfaces .....</b>	<b>39</b>
<b>II.2.2 : Le triplet tribologique et la notion de troisième corps .....</b>	<b>39</b>
<b>II.2.3 : Accommodation de vitesse .....</b>	<b>40</b>
<b>6.3) Circuit tribologique : .....</b>	<b>41</b>
<b>7) L'usure des élastomères : .....</b>	<b>42</b>
<b>7.1) Principaux faciès d'usure :.....</b>	<b>42</b>
<b>7.1.1) Rouleaux d'usure .....</b>	<b>43</b>
<b>7.1.2) Cratères d'usure : .....</b>	<b>43</b>
<b>7.1.3) Stries d'usure : .....</b>	<b>44</b>
<b>7.1.4) Rides d'usure:.....</b>	<b>44</b>
<b>7.2) Principaux modes d'usure : .....</b>	<b>44</b>
<b>7.2.1) Usure par érosion :.....</b>	<b>44</b>

7.2.2) Usure par cavitation :	45
7.2.3) Usure par fatigue :	45
7.2.4) Usure par adhésive –formation de rouleaux d’usure :	47
7.2.5) Usure par abrasive :	48
7.2.6) Usure par soudage :	48
7.2.7) Usure par corrosive et oxydative :	49
7.2.8) Usure par fretting :	49
8) quelques paramètres influent sur l’usure :	49
8.1) Paramètres matériaux :	49
8.1.1) Propriétés mécaniques, effet de la température :	49
8.1.2) Ajout de charges renforçant au mélange :	49
8.2) Conditions expérimentales :	50
8.2.1) Charge appliquée :	50
8.2.2) Composition de l’atmosphère :	50
8.2.3) Lubrification :	50
9. Conclusion	51

### Chapitre III Moyens et conditions d’étude

Expérimentale de l’usure abrasive	52
III.1 : Introduction	53
III.2 : Etude expérimentale de l’usure abrasive- glissement linéaire	53
III.2.1 : Procédure expérimentale	53
III.2.2 : L’étaiu-limeur	53
III.2.2.1 : Origine	53
III.2.2 .2: Utilisation	54
III.2.2.3 : Fonctionnement	54
III.2.2.4 : Cinématique d’un étaiu-limeur	56
III.2.2.5 : Usinage	56
III.2.3 : Description des mécanismes de fixation	58
III.3: Conditions d’essais	60
III.3.1: Matériaux d’étude	61
III.3.2 :Géométrie des pions	61

<b>III.4 : conclusion .....</b>	<b>63</b>
---------------------------------	-----------

### **Chapitre IV Résultats et discussion**

<b>IV.1 : Résultats et discussion :.....</b>	<b>65</b>
--	-----------

<b>IV.2: Influence de vitesse de glissement :.....</b>	<b>65</b>
--	-----------

<b>IV.3: Influence de la charge appliquée (poids kg).....</b>	<b>67</b>
---	-----------

<b>IV.4: Influence de durée d'utilisation (nombre de cycle) :.....</b>	<b>70</b>
--	-----------

<b>VI.5 : influence de pourcentage de noir de carbone :.....</b>	<b>72</b>
--	-----------

<b>IV.6 : conclusion .....</b>	<b>74</b>
--------------------------------	-----------

<b>Reference bibliographie .....</b>	<b>76</b>
--------------------------------------	-----------

## **Lises de la figure**

<b>Figure I.1 : Isoprène, C<sub>5</sub>H<sub>8</sub></b>	<b>06</b>
<b>Figure I.2 : Élaboration du caoutchouc« sec » et du latex à partir de la sève de l'hévéa 05</b>	<b>07</b>
<b>Figure I.3 : Récolte du latex</b>	<b>08</b>
<b>Figure I.4 : Évolution du module d'YOUNG et de l'angle de perte en fonction de la température</b>	<b>12</b>
<b>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</b>	<b>13</b>
<b>Figure I.6: formation d'un réseau par les ponts sulfures [Mark, Erman et al. 1994]</b>	<b>15</b>
<b>Figure I.7: schéma de la vulcanisation [IFOCA, 1984]</b>	<b>15</b>
<b>Figure I.8: Influence de la densité de réticulation sur différentes propriétés mécaniques [Bouchereau, 1997]</b>	<b>16</b>
<b>Figure I.9 : Effet de cristallisation sous contrainte</b>	<b>17</b>
<b>Figure I.10 : Phénomène de relaxation</b>	<b>18</b>
<b>Figure I.11 : Courbe d'hystérésis d'un élastomère</b>	<b>18</b>
<b>Figure I.12 : Les différentes échelles de taille des charges</b>	<b>19</b>
<b>Figure I.13 : Influence des charges renforçant</b>	<b>20</b>
<b>Figure I.14 : Influence de la taille des particules de noir de carbone sur le comportement d'un SBR</b>	<b>20</b>
<b>Figure I.15 : Échelle d'interaction entre des particules de NdC ou de silice et la matrice de polymère [leblance, 2002]</b>	<b>18</b>
<b>Figure I.16 : Observation "macro-méso-micro" pour un élastomère réticulé</b>	<b>23</b>
<b>Figure I.17 : Deux types de mécanismes d'endommagement au sein d'un VER</b>	<b>23</b>

<b>Figure I.18 : Caractère hyperélastique d'un élastomère en traction uniaxiale</b>	<b>24</b>
<b>Figure I.19 : Chargement cyclique d'un élastomère</b>	<b>25</b>
<b>Figure I.20 : Mécanismes micromoléculaires d'assouplissement</b>	<b>26</b>
<b>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</b>	<b>26</b>
<b>Figure II.1 : rapprochement des solides : effets et conséquences fonction de la température [Schallamach,1968]</b>	<b>32</b>
<b>Figure II.2 : le triplet tribologique de Godet et le concept de troisième corps</b>	<b>33</b>
<b>Figure II.3 : sites et modes d'accommodation</b>	<b>34</b>
<b>Figure II.4: Représentation schématique du circuit tribologique</b>	<b>38</b>
<b>Figure II.5 : Surface projetée d'un palier</b>	<b>39</b>
<b>Figure II.6: contacte hertzien des élastomères</b>	<b>40</b>
<b>Figure II .7 : Frottement entre deux surfaces</b>	<b>41</b>
<b>Figure II.8: Définition des coefficients de frottement</b>	<b>43</b>
<b>Figure II.9 : Le frottement sec</b>	<b>45</b>
<b>Figure II.10 : Exemple de représentation tridimensionnelle de rugosité</b>	<b>46</b>
<b>Figure II.11: L'évolution du frottement de la rugosité (ici est représenté pointillés la rugosité optimal)</b>	<b>47</b>
<b>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) c)-après le passage de l'indenteur [Petitet, 2003]</b>	<b>48</b>
<b>Figure III.1: L'étau-limeur</b>	<b>55</b>
<b>Figure III.2 : Schéma de principe de fonctionnement d'un etau limeur</b>	<b>55</b>

<b>Figure III.3 : Dispositif expérimental d'étude d'usure abrasive</b>	<b>57</b>
<b>Figure III.4 : mécanismes de fixation a)- fixation de la lame d'abrasion b)- fixation de l'échantillon</b>	<b>59</b>
<b>Figure III.5 : les éléments des mécanismes d'étude d'usure abrasive</b>	<b>60</b>
<b>Figure III.6 : Balance électronique</b>	<b>61</b>
<b>Figure III.7: photographie et dimensionnement des échantillons pour l'usure abrasive</b>	<b>62</b>
<b>Figure IV.1 : Courbe de variation de coefficient d'archard en fonction d'angle d'aspérité pour un polymère</b>	<b>65</b>
<b>Figure IV.2: évolution de la perte de masse en fonction de l'angle d'inclinaison de la lame d'abrasion</b>	<b>56</b>
	<b>66</b>
<b>Figure IV.3 : Relation entre les angles <math>\alpha</math> et <math>\theta</math></b>	<b>67</b>
<b>Figure IV.4: évolution de la perte de masse en fonction de la vitesse de glissement</b>	<b>67</b>
<b>Figure IV.5: évolution de la perte de masse en fonction de la charge appliquée</b>	<b>69</b>
<b>Figure IV.6: évolution de la perte de masse en fonction du nombre de cycles parcourus</b>	<b>73</b>

## Liste des symboles

$T_g$  : 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

$\sigma$  : contrainte

$\lambda_i$  : 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

$\mu$  : coefficient de frottement

$C$  : couple

$R$  : rayon

$H$  : distance d'application la charge

*Introduction*

*générale*

## **Introduction générale**

Le caoutchouc est une substance omniprésente dans de nombreux appareils et matériaux fabriqués par l'homme. Son rôle unique et son importance le rendent familier, étant essentiel dans diverses applications telles que les pneumatiques, les semelles de chaussures, les essuie-glaces et les joints d'étanchéité.

Les élastomères, dont le caoutchouc est un exemple, possèdent des propriétés mécaniques uniques telles que l'élasticité et l'extensibilité, les rendant indispensables dans des industries telles que l'aéronautique, l'automobile, le bâtiment et le génie civil. La capacité des élastomères à absorber les vibrations et à se déformer les rend précieux dans de nombreuses applications. Leur comportement tribologique, en particulier leur résistance à l'usure par contact, suscite un intérêt considérable.

Des études sont menées pour comprendre et améliorer les propriétés des élastomères. Les formulations spécifiques, influencées par les conditions de fabrication et les charges de renforcement telles que le noir de carbone, sont au centre de ces recherches. L'ajout de noir de carbone, par exemple, améliore la résistance à l'usure des élastomères, un enjeu économique et écologique majeur.

L'objectif de notre travail est d'analyser l'impact des paramètres tribologiques sur l'usure des pièces d'élastomère chargées. Cette étude est organisée en quatre chapitres pour examiner en détail cette question.

Le premier chapitre s'attarde sur la description des élastomères d'un point de vue physicochimique et mécanique, ainsi que sur leur processus de mise en œuvre et l'effet de l'ajout de charges sur leur comportement, tant en statique qu'en dynamique.

Le deuxième chapitre est divisé en deux parties distinctes : la première partie examine le système tribologique, tandis que la seconde partie traite de manière générale des différents modes d'usure (abrasion, érosion, fatigue, adhésion, etc.).

Dans le troisième chapitre, nous abordons expérimentalement l'influence des paramètres tribologiques sur l'usure par perte de masse d'un élastomère chargé de type SBR. L'accent est mis sur l'usure abrasive, la plus prépondérante, étudiée à l'aide d'un dispositif approprié. Le

## *Introduction générale*

---

contact est linéaire et obtenu en utilisant une lame d'abrasion. Nous mettons en évidence l'impact des paramètres tribologiques des élastomères chargés (vitesse de glissement, angle d'inclinaison de la lame, nombre de cycles ou durée d'utilisation, charge appliquée ou poids).

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

Enfin, une conclusion générale clôture ce mémoire en mettant en évidence les principaux résultats de l'étude et en soulignant leur importance.[1]

*Chapitre I*  
*Généralités sur*  
*élastomère*

## 1. Introduction

Les élastomères sont membres de la famille des polymères, un terme utilisé pour décrire de manière générale les substances macromoléculaires, naturelles ou synthétiques, dotées d'élasticité caoutchouteuse. Leurs nombreuses propriétés, telles que l'élasticité, l'étanchéité et la résistance aux vibrations, les rendent polyvalents dans divers domaines tels que la construction, l'étanchéité, les semelles de chaussures, les articles sportifs, l'industrie automobile, en particulier dans la fabrication de pneumatique.

## 1.2 Le caoutchouc

### 1.2.1 Présentation

Le caoutchouc, qu'il soit naturel ou synthétique, se distingue par son élasticité, son imperméabilité et sa résistance électrique. Le caoutchouc naturel est extrait d'un liquide blanc laiteux appelé latex, produit par diverses plantes, tandis que les caoutchoucs synthétiques sont fabriqués à partir d'hydrocarbures insaturés.

### 1.2.2. Historique

L'introduction du caoutchouc en Europe découle de la découverte du Nouveau Monde, bien qu'il fût déjà connu depuis longtemps des peuples indigènes. Le terme "caoutchouc" dérive du mot indien "caa-o-chu", signifiant "l'arbre qui pleure". Les cultures anciennes, telles que les Incas, les Mayas, les Olmèques et les Aztèques, associaient le latex coulant des arbres au sang d'un humain blessé, lui conférant ainsi une signification sacrée. En plus de ses utilisations rituelles, le caoutchouc était également utilisé à des fins thérapeutiques, comme pour la toux chronique ou les maux de dents, ainsi que pour la fabrication d'objets courants moulés en argile, tels que des bouteilles ou des bottes.

L'explorateur Charles de la Condamine a contribué à raviver l'intérêt scientifique pour le caoutchouc en envoyant en France, en 1736, des échantillons bruts accompagnés de descriptions des produits fabriqués par les peuples d'Amazonie. Cette redécouverte a conduit à un intérêt croissant pour les propriétés du caoutchouc. En 1770, le chimiste britannique Joseph Priestley a découvert la capacité du caoutchouc à effacer l'encre par frottement.

La première application commerciale du caoutchouc a été lancée en 1791 par l'industriel britannique Samuel Peal, qui a breveté une méthode d'imperméabilisation des tissus en les traitant avec une solution de caoutchouc dans la térébenthine. En 1823, Charles Macintosh a établi une usine à Glasgow pour la fabrication de tissus et de vêtements imperméables, donnant ainsi son nom à ce type de vêtements. Plus tard, Faraday a déterminé la formule brute du caoutchouc brut, confirmée ultérieurement comme  $(C_5H_8)_n$  par des analyses plus approfondies. (figure.I.1).

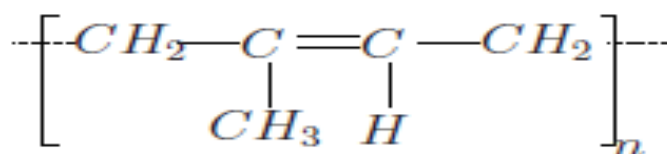


Figure I.1 : Isoprène,  $C_5H_8$  [2]

Au début du XIX siècle, la première fabrication de caoutchouc est créée à Paris. Elle produit des bandes pour jarretières et bretelles mais qui ont pour inconvénient de devenir poisseux par temps chaud et cassantes par temps froid. L'origine de la manufacture de Michelin date de 1830 avec la construction d'un atelier de confection de balles pour enfants. Neuf ans plus tard, son futur rival américain Goodyear s'aperçoit de l'action de la chaleur sur un mélange " caoutchouc/soufre ". Un Maintient à 150°C durant 45 minutes permet de Fixer l'élasticité de la gomme tout en supprimant son adhésivité. Hancock déposera un brevet nommant ce procédé vulcanisation. C'est en 1888 que voit le jour l'industrie la plus consommatrice de caoutchouc : celle du pneumatique. Les bicyclettes sont les premières à profiter des pneumatiques développés par (John Dunlop) et les frères Michelin qui équiperont très rapidement tous les types de véhicules. Les deux guerres mondiales ont eu pour conséquence d'étendre les zones de production Vers d'autres plantations que celles de l'Hévéa, afin d'éviter les manques d'approvisionnement, mais également de développer les recherches vers des caoutchoucs synthétiques. Entre 1941 et 1945, la production de **SBR** (Copolymère Styrène Butadiène) passe de 230 à 731000 tonnes. Les deux chocs pétroliers de 1973 et 1979 vinrent donner un coup d'arrêt au développement exponentiel des caoutchoucs synthétiques (une hausse de 10% du prix du baril donnant une hausse de l'ordre de 5% sur celui du SBR).

Il s'ensuit un véritable regain d'intérêt pour le caoutchouc naturel et de nouvelles opportunités commerciales et technologiques. [1]

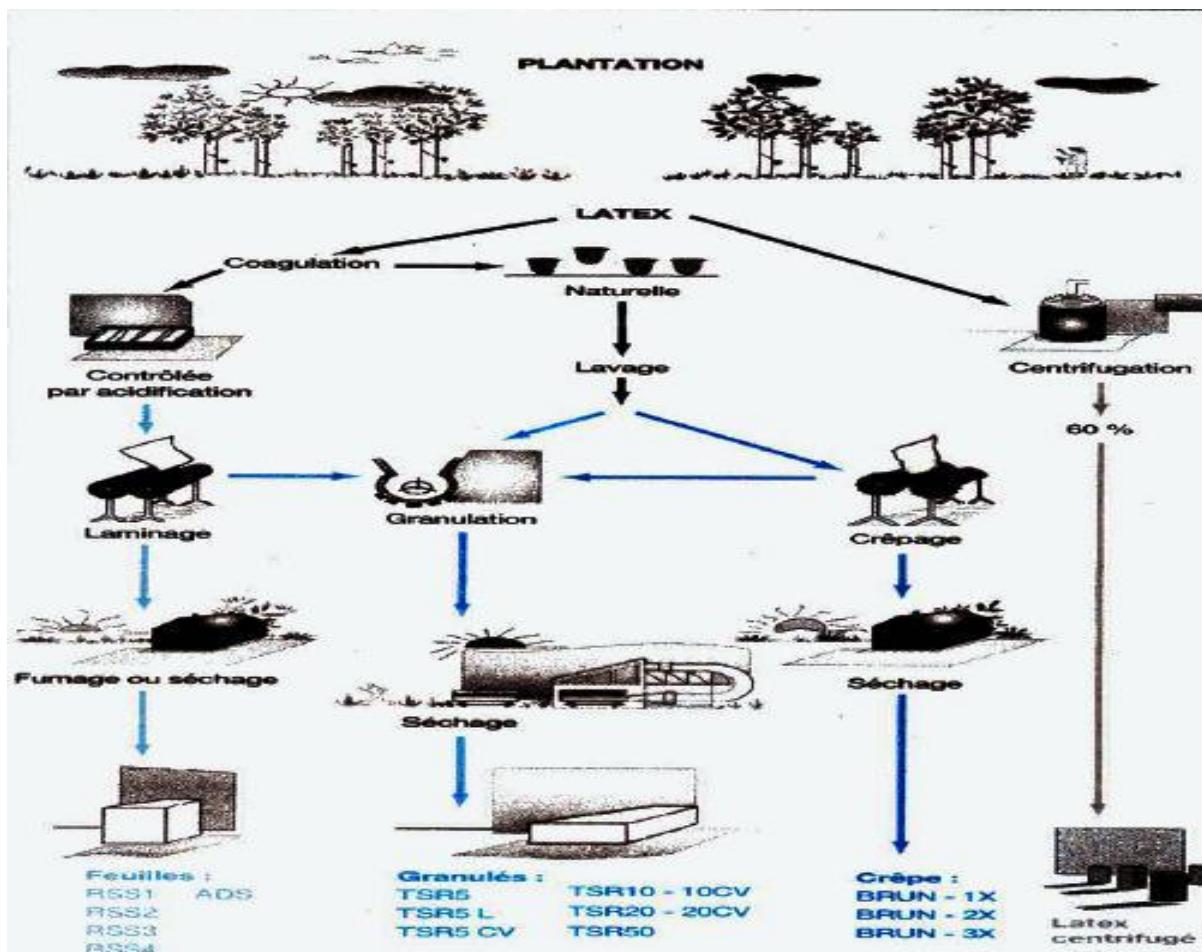


Figure I.2 : L'élaboration à partir de la sève de l'hévéa du caoutchouc« sec » et du latex

### 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'Amazone, 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: le élastomères

Les élastomères appartiennent à la famille des hauts polymères. Macroscopiquement, 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 subirait 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]

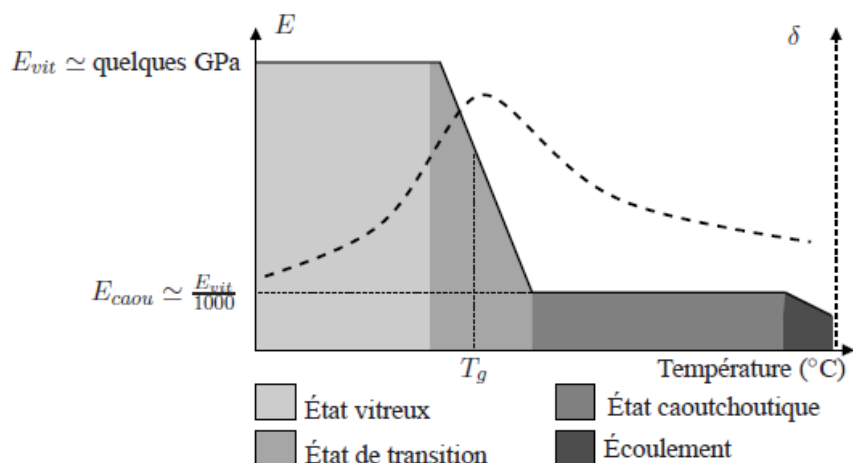


Figure I.4 : Évolution du module d'YOUNG et de l'angle de perte en fonction de la Température. [2]

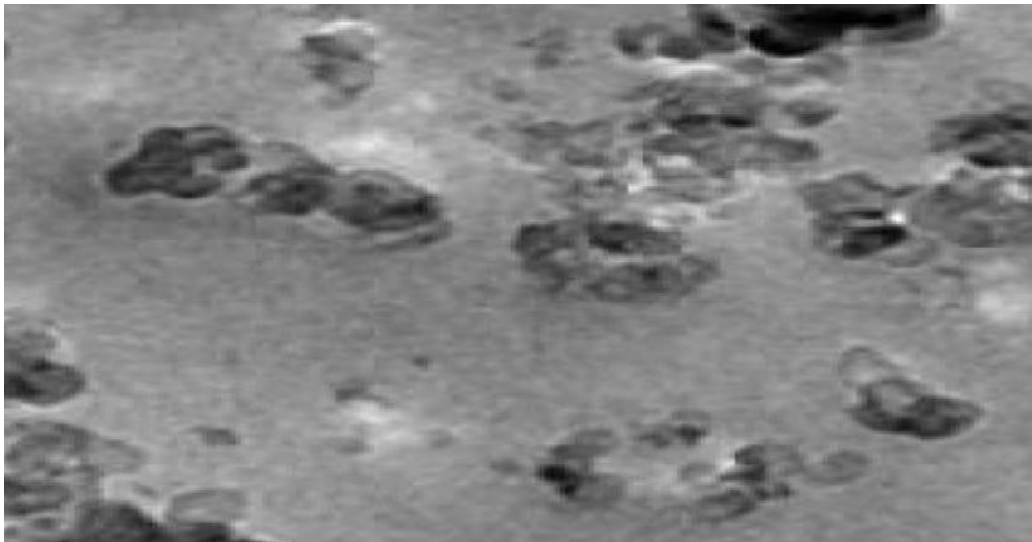
La classification et les propriétés caractéristiques des familles d'élastomères sont résumées dans le tableau I.2

Famille	Nomenclature	Symbole	Tg	Propriétés caractéristiques
Caoutchoucs naturels ou Synthétiques	Caoutchouc naturel Polyisoprène	NR IR	-72°C -72°C	Bonnes propriétés mécaniques, faibles 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 Polydiméthyl-vinylméthylsiloxane Silicones fluorés	MQ VMQ FVMQ	-120°C -120°C -70°C	Haute résistance à la chaleur et au froid, faible tenue Mécanique

Tableau I.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. *électronique à transmission. La matrice est en gris et les charges sont en noir.* (Figure I.5).



**Figure I.5 :** Exemple de microstructure d'un matériau élastomère observée par microscope

**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 oeuvre, 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.

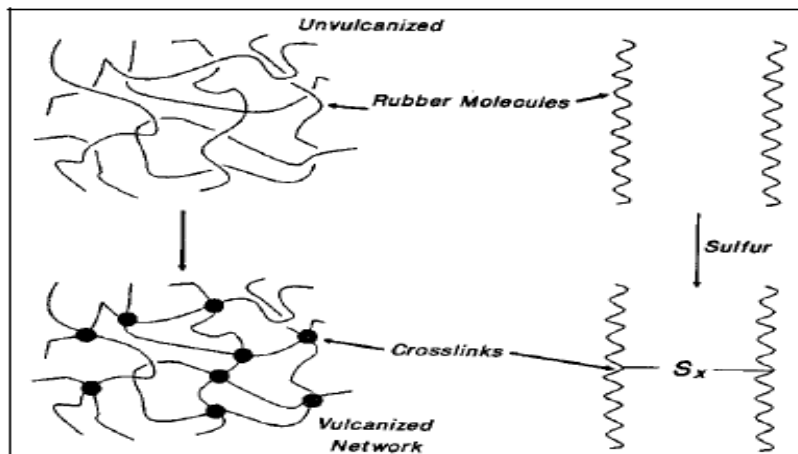


Figure I.6: formation d'un réseau par les ponts sulfures [12]

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).

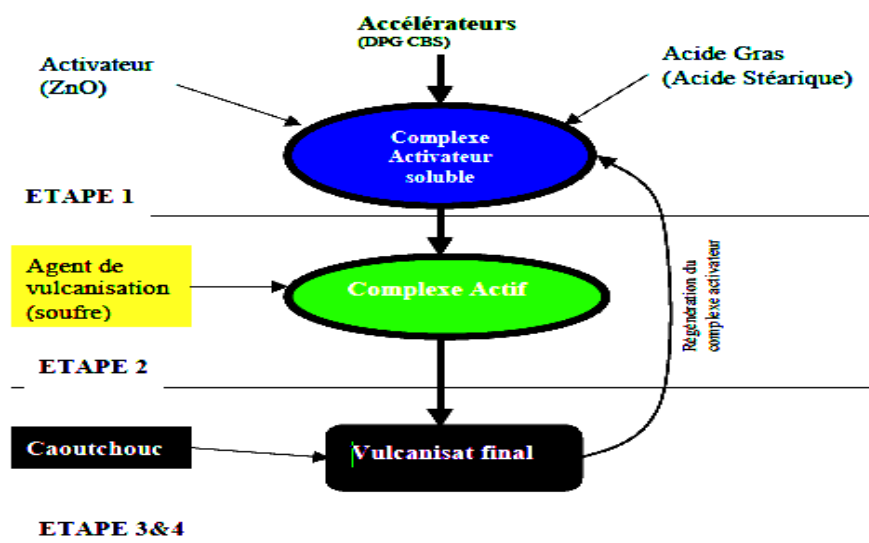


Figure I.7: schéma de la vulcanisation [2]

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]

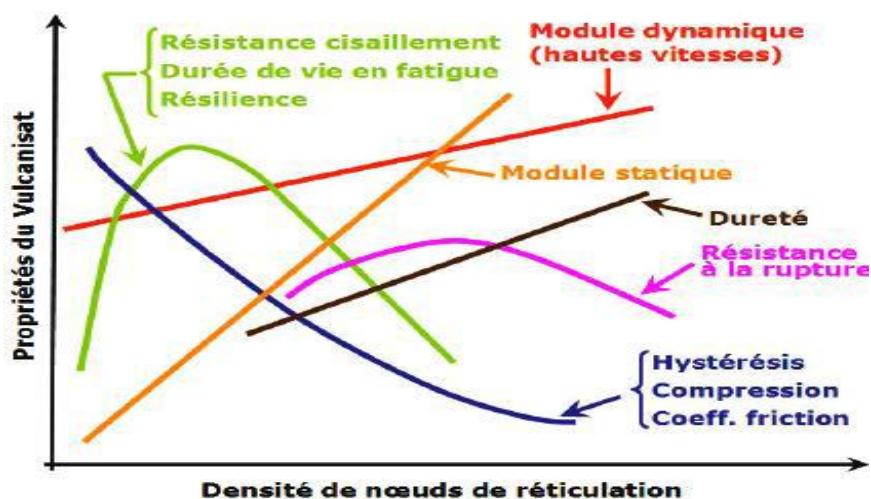


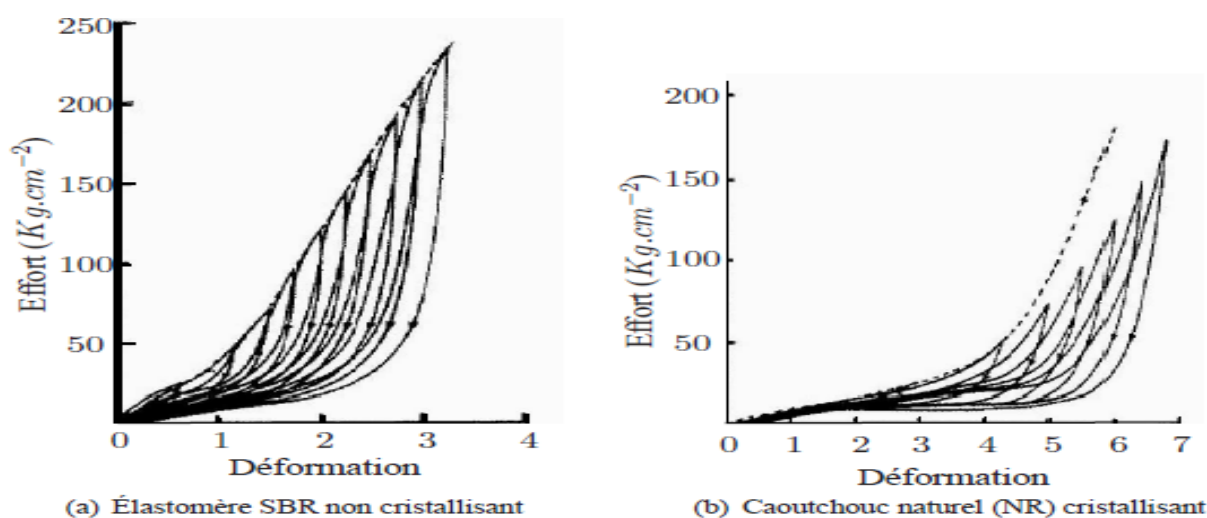
Figure I.8: Influence de la densité de réticulation sur différentes propriétés mécaniques [5]

## 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].

**I.4.7 : Température de transition vitreuse  $T_g$** 

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].



*Figure 1.9 : Effet de cristallisation sous contrainte [7]*

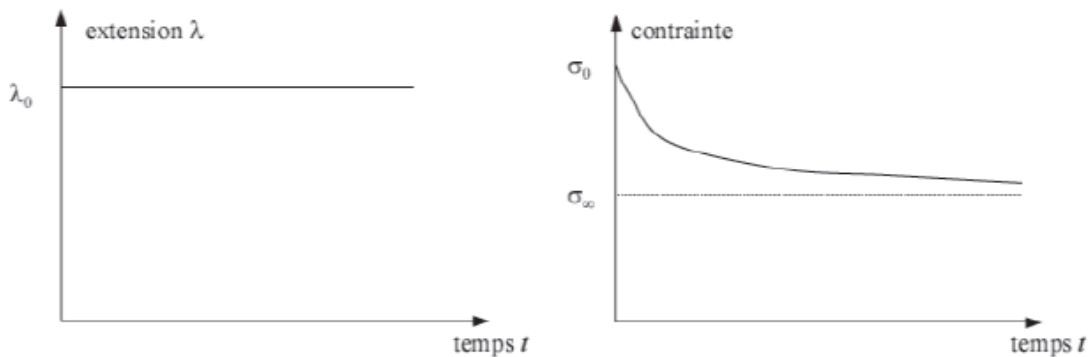
En effet, lorsque la température d'un élastomère est diminuée, il existe une température de transition, dite température de transition vitreuse  $T_g$ , à partir de laquelle l'agitation thermique est trop faible pour surmonter les forces d'interaction entre les segments de chaînes. Les mouvements locaux 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  $T_g$  [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  $-50\text{ °C}$  [6].

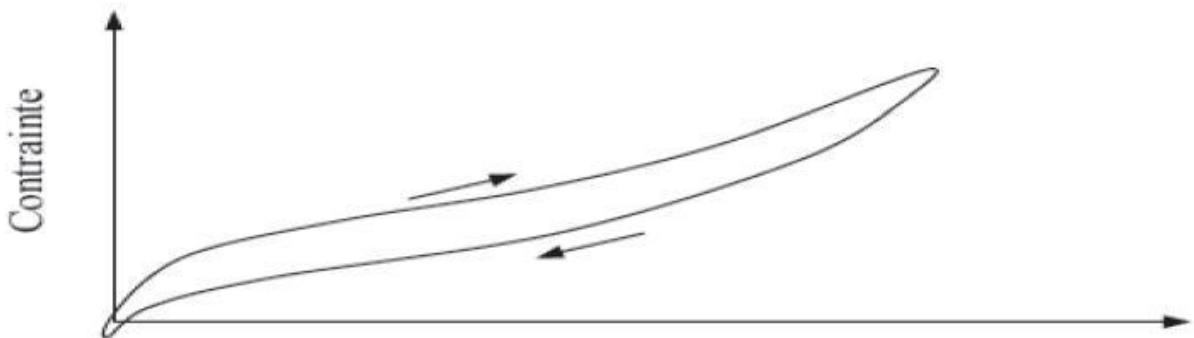
**I.4.8 : La viscoélasticité**

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 hystérique sous chargement cyclique comme le montre la (figure I.11). [7].



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



**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**)

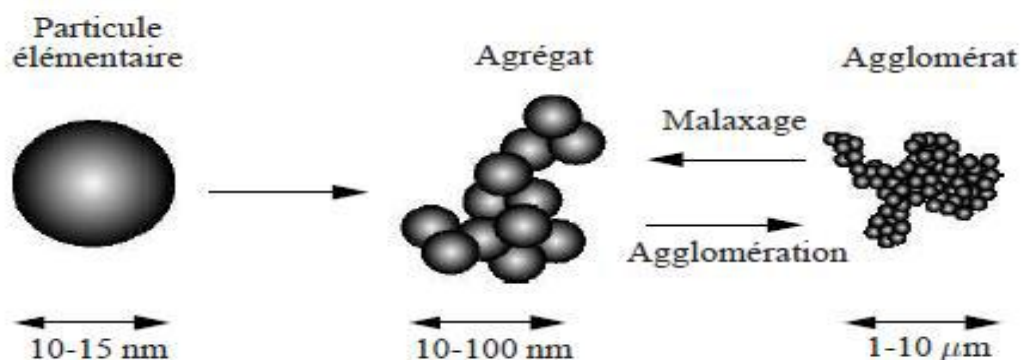
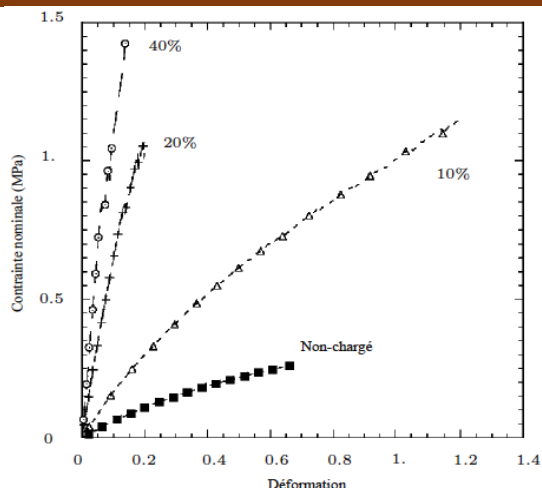
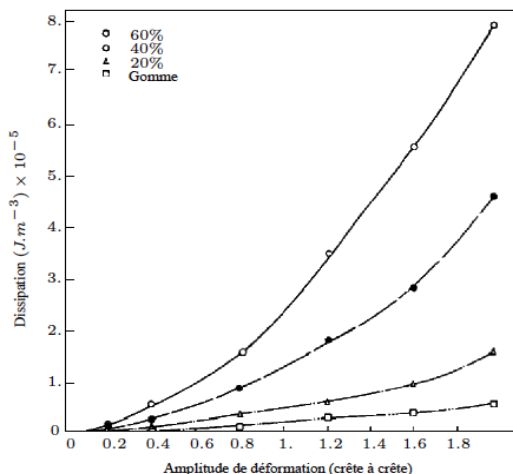


Figure I.12 : Les différentes échelles de taille des charges [2]

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]

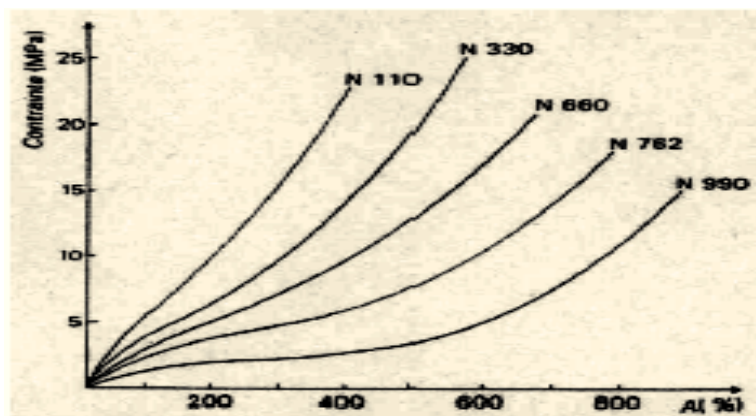


(a) Influence du taux de charge sur le comportement instantané d'un silicone renforcé par la silice précipitée *in situ* [39]



(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]

## LES DIFFÉRENTES CHARGES

Les charges utilisées dans les élastomères se répartissent en plusieurs catégories/

- **Charges renforçantes :** Le noir de carbone et la silice (NdC et Si par la suite) sont les principaux exemples. Ces charges renforcent les propriétés mécaniques de l'élastomère.
- **Charges semi-renforçantes :** Le kaolin, le noir de carbone sous forme d'agrégats de grande taille, etc., font partie de cette catégorie. Leur effet sur les propriétés de l'élastomère est moins prononcé que celui des charges renforçantes.

- **Charges de dilution (ou inertes) :** La craie, le talc, etc., sont des exemples de ce type de charge. Leur fonction principale est de réduire les coûts de production ou de modifier certaines propriétés de l'élastomère sans influencer significativement sa résistance mécanique. Parmi ces catégories, les charges renforçantes sont les plus couramment utilisées.
- **Les charges de silice :** Elles peuvent être classées en deux catégories : la silice naturelle et la silice synthétique. La silice naturelle provient de roches formées par la sédimentation d'organismes variés. En revanche, la silice synthétique est produite soit par précipitation en milieu aqueux sous l'action d'un acide, soit par réduction à haute température du tétrachlorure de silicium et oxydation du silicium

Le processus de réduction chimique à haute température permet d'obtenir différentes caractéristiques de silice en ajustant divers paramètres tels que la concentration en tétrachlorure de silicium, la température de fusion et la durée de la réaction. Selon la méthode de production, les particules de silice peuvent former différentes structures à différentes échelles, allant de particules primaires à des agrégats et des agglomérats. Le traitement de surface des particules de silice peut améliorer leur dispersion dans la matrice d'élastomère en créant des liaisons covalentes avec la matrice, influençant ainsi les interactions entre les charges et la matrice. La morphologie de la silice est similaire à celle du noir de carbone, mais leur distinction réside dans leur nature chimique.

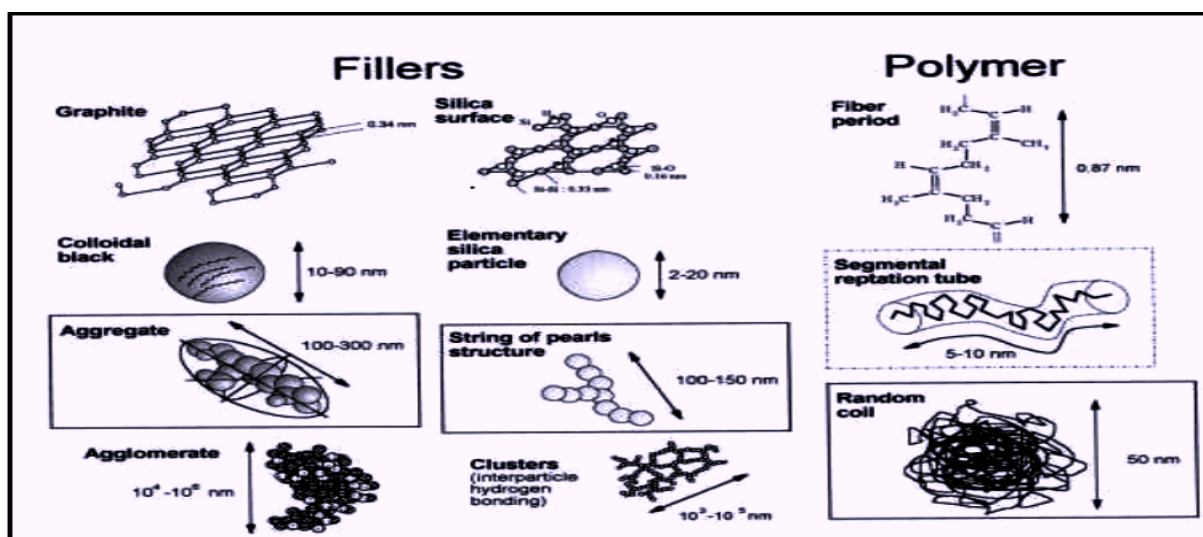


Figure I.15 : Échelle d'interaction entre des particules de NdC ou de silice et la matrice de polymère [Leblanc, 2002]. [5]

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).

- a) À l'échelle macroscopique, le matériau apparaît homogène, que l'on cherche à modéliser,
- b) À l'échelle mésoscopique, la matrice et les agglomérats,
- c) À l'échelle microscopique, les chaînes et les charges.

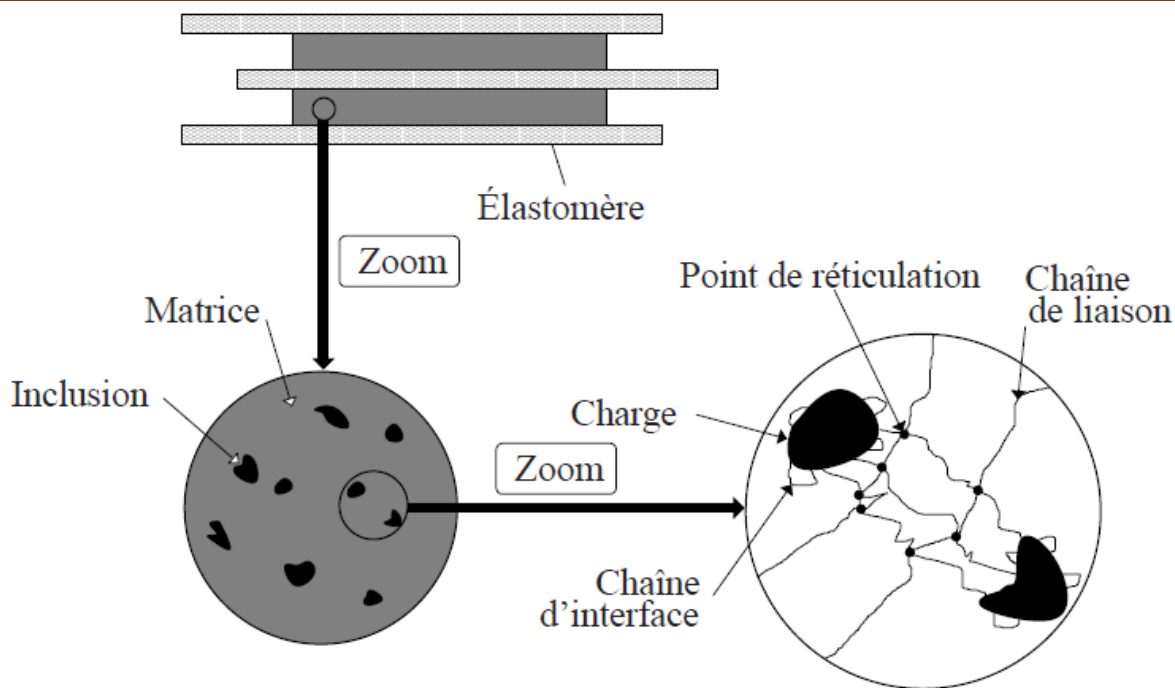


Figure I.16 : Observation "macro-méso-micro" pour un élastomère réticulé. [2]

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]

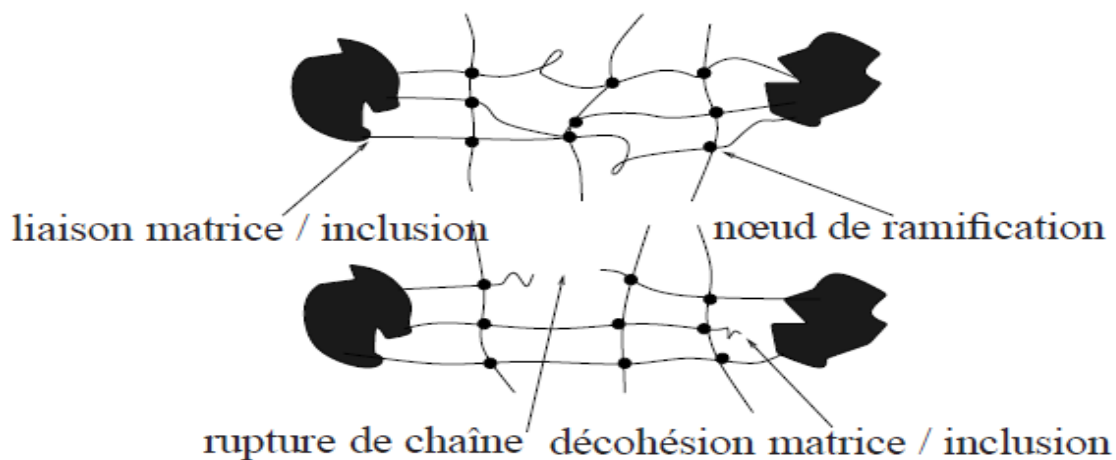
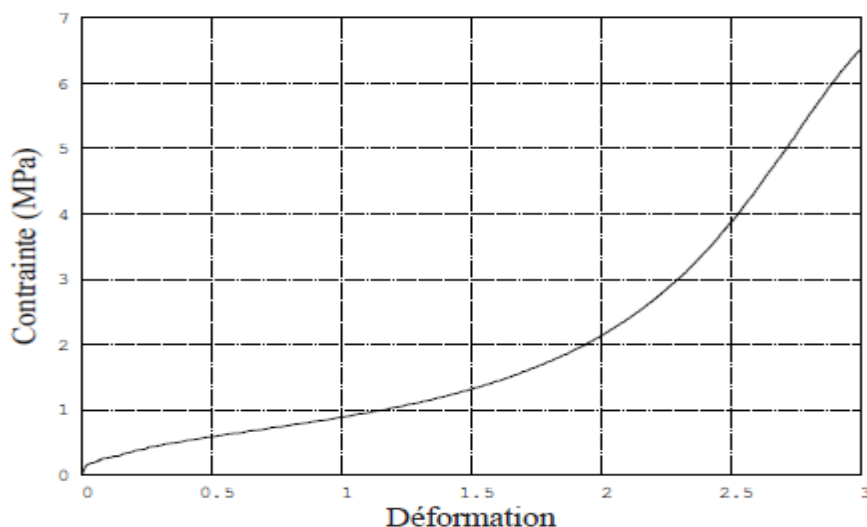


Figure I.17 : Deux types de mécanismes d'endommagement au sein d'un V.E.R. extraits de [2]

**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.

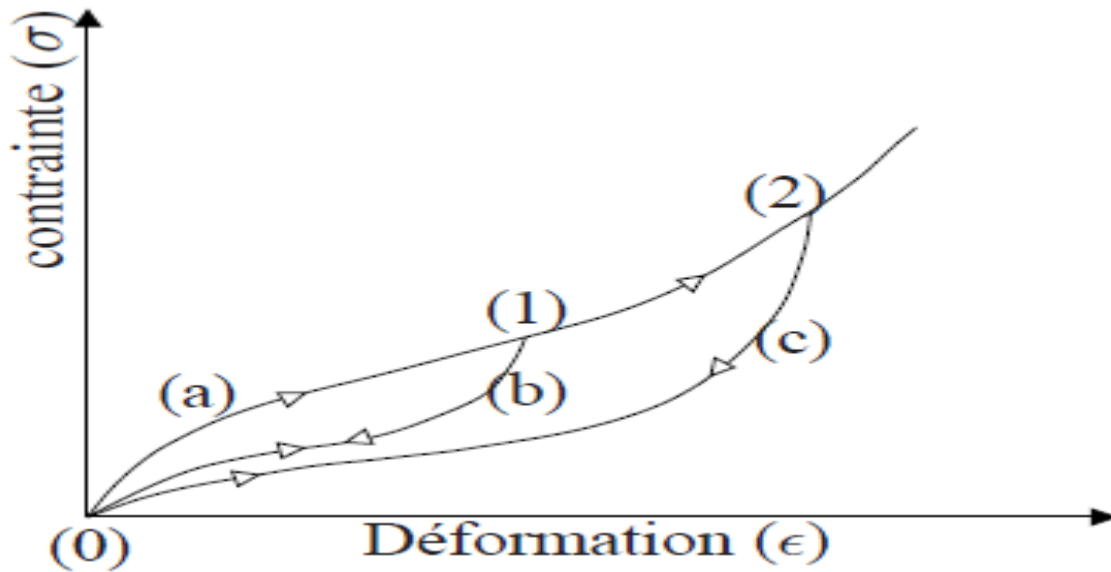


Figure I.19 : Chargement cyclique d'un élastomère. [3]

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]

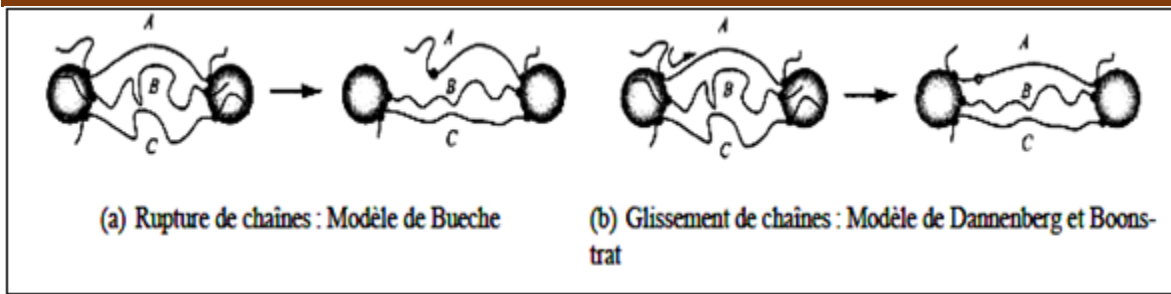


Figure I.20 : Mécanismes micromoléculaires d'assouplissement [3]

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]

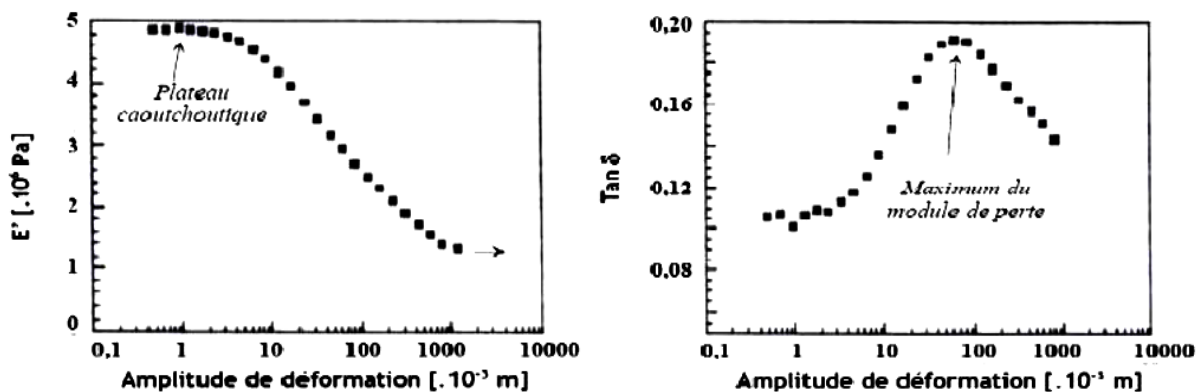


Figure I.21: Analyse de l'effet de Payne, évolution de propriétés mécaniques en fonction du niveau de déformation pour un élastomère SBR renforcé en silice [3]

## 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 CONCLUSION*

Du fait de leur composition et de leur processus de fabrication, souvent soumis au secret industriel, les élastomères présentent une microstructure complexe et offrent une gamme complète de comportements mécaniques.

Le renforcement des élastomères est essentiel dans la plupart des applications courantes. Bien que le noir de carbone soit l'agent de renforcement dominant, les précipités de silice gagnent en importance au fil des années. Les fabricants parviennent progressivement à atténuer les principaux inconvénients de la silice, tels que son coût élevé et sa complexité de mise en œuvre, en développant des propriétés qui la rendent attrayante pour de nombreux domaines d'application

*Chapitre II*  
*La tribologie des*  
*élastomères*

**1. introduction**

La tribologie, science qui examine les phénomènes intervenant lorsque des objets en contact sont soumis à un mouvement relatif, se divise en trois domaines distincts : le frottement, qui représente la résistance au déplacement imposé, l'usure, résultant de la détérioration des surfaces et entraînant une perte de matière, et la lubrification, qui implique l'insertion d'un fluide entre les deux surfaces en contact. Cette discipline, multidisciplinaire par nature, englobe des concepts de mécanique, de physicochimie et de science des matériaux.

Au début du XXe siècle, la tribologie se concentrait sur l'étude des volumes, en mettant en avant les concepts mécaniques pour établir des lois de comportement. Au milieu du XXe siècle, elle a tourné son attention vers l'exploration des surfaces grâce aux progrès réalisés en physique des surfaces. Ces dernières décennies, la recherche en tribologie s'est particulièrement concentrée sur l'étude de la dynamique des interfaces, avec une prise de conscience croissante du rôle crucial des éléments interfaciaux dans le contact.

Les phénomènes de frottement ne sont pas simplement déterminés par les propriétés intrinsèques des matériaux, ce qui rend leur prédiction particulièrement complexe. De plus, le frottement et l'usure sont des processus indépendants. Il est donc possible de concevoir des systèmes avec une faible usure mais un frottement élevé (comme dans le cas des freins) ou inversement (comme dans l'usinage).

Enfin, l'introduction de la notion de contact à trois corps, basée sur les concepts de triplet tribologique, de circuit tribologique et de mécanisme d'accommodation de la vitesse, a permis une meilleure compréhension des mécanismes de frottement et d'usure.

**2 .Problématique de l'étude de l'usure**

Les différents types de phénomènes d'usure se regroupent en deux catégories de facteurs :

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

- Étant donné que la tribologie n'est pas une science exacte, plusieurs implications se dégagent :
- La résolution des problèmes de frottement-usure repose principalement sur des lois générales, souvent empiriques.
- L'étude de ces problèmes, même dans une approche industrielle (sélection, validation des solutions...), nécessite largement l'expérimentation.
- Les résultats expérimentaux sont difficilement extrapolables d'une situation à une autre.

Les paramètres du contact, qui font intervenir des disciplines variées telles que la mécanique, la métallurgie, la physique du solide et la chimie, sont nombreux et interconnectés par un réseau de relations complexes. Par conséquent, les propriétés tribologiques telles que les caractéristiques de frottement et la résistance à l'usure ne peuvent pas être exprimées par des critères simples ou modélisées facilement, contrairement à certains domaines comme la résistance des matériaux.

Malgré sa complexité, l'analyse du système tribologique constitue l'outil de référence pour aider à définir et étudier une configuration de frottement. Cette analyse doit permettre en particulier :

- D'exprimer rationnellement le cahier des charges du problème à résoudre, ce qui est une condition préalable à la recherche et à la sélection des solutions possibles.
- D'identifier les situations à risques et les probabilités d'incidents, afin de guider certains choix de conception
- d'appréhender les implications liées à telle ou telle option technologique (conception géométrique, cinématique...). [9]

### **3. Définition**

#### **3.1) Adhésion L'adhésion**

Entre deux corps en contact peut trouver son origine dans diverses sources, allant des simples attractions électrostatiques (entre charges électriques opposées) aux liaisons de nature mécanique, chimique ou métallurgique. Ces dernières incluent toutes les interactions qui contribuent à la cohésion des solides, telles que les liaisons métalliques, covalentes ou ioniques. L'adhésion dépend donc non seulement de la nature des matériaux en contact, mais aussi des conditions dans lesquelles se produit le contact : présence d'écrans de contamination, présence de films superficiels, degré d'intimité du contact entre les pièces, etc.

### 3.2) Coefficient de frottement

#### 3.2.1) Formulation

Soient deux corps A et B appuyant l'un sur l'autre avec une force  $Q$ , et se mouvant l'un par rapport à l'autre en restant en contact. Le cas le plus général est celui du « frottement de glissement » (figure II.1. a). [9]

Lorsqu'il s'agit de « frottement de pivotement », c'est-à-dire lorsqu'il existe un point de A qui coïncide pendant tout le mouvement avec un point de B, le mouvement s'obtient en exerçant un couple  $C$  (figure II.1. b). [9]

Lorsqu'il s'agit d'un « frottement de roulement », c'est-à-dire lorsqu'un point ou une ligne de contact de A et de B joue le rôle de centre instantané de rotation, le mouvement peut s'obtenir en déplaçant la direction de la force  $Q$  parallèlement à elle-même d'une longueur  $H$  (figure II.1.c). [9]

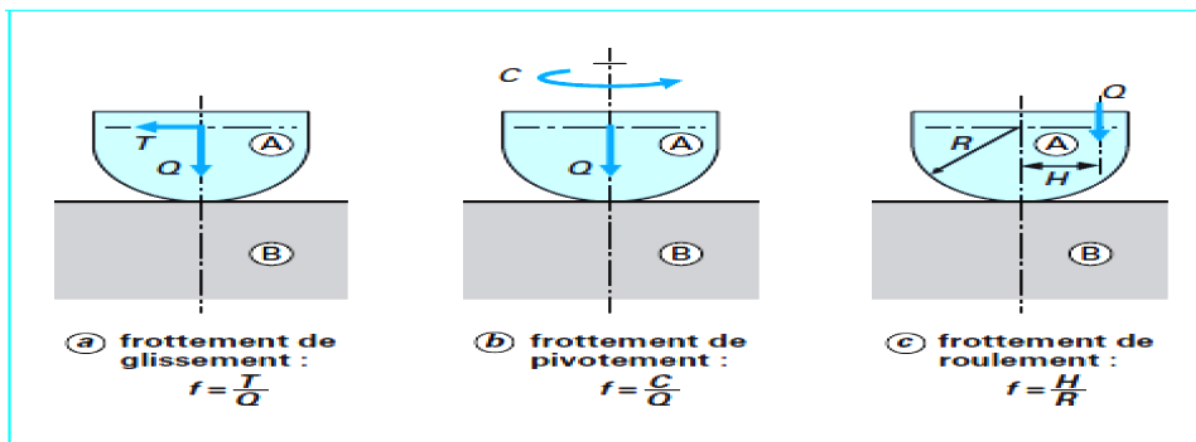


Figure II.1: Définition des coefficients de frottement [3]

#### 3.2.2) Coefficients de frottement statique et dynamique

Les forces tangentielles  $T$  (figure II.1 a) prises en compte pour calculer les coefficients de frottement statique et dynamique correspondent respectivement :

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

### 3.3) Origine des efforts résistants. Conséquences pratiques

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

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

### 3.5) Contraintes résiduelles

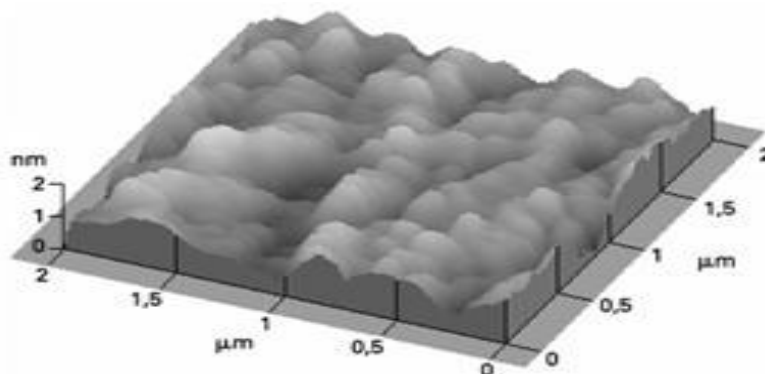
Les **contraintes résiduelles** sont les contraintes existant dans une pièce au repos en l'absence de toute force extérieure ou d'inertie.

### 3.6) Rugosité

Les 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 importé 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.



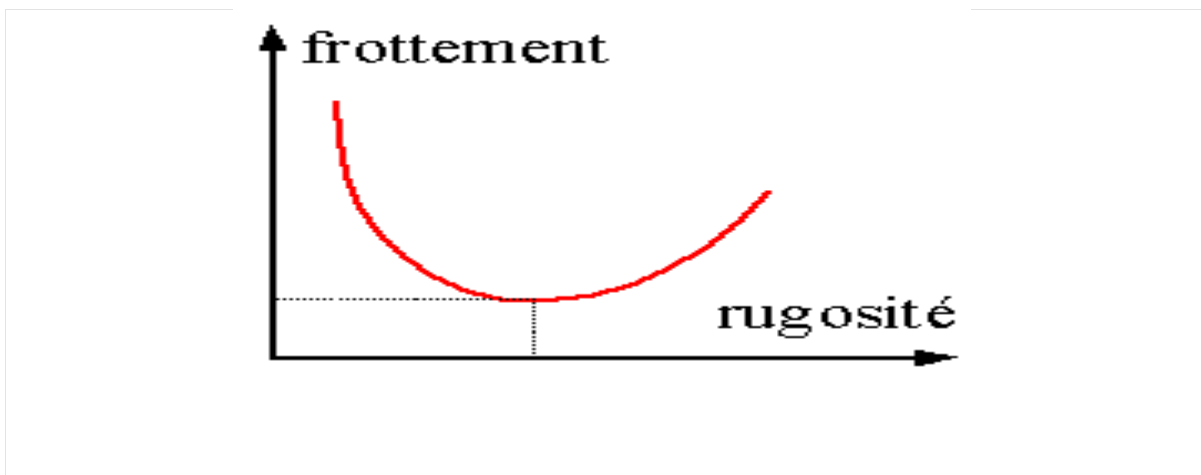
*Figure II.2 : Exemple de représentation tridimensionnelle de rugosité [17]*

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.3: L'évolution du frottement de la rugosité*

*(Ici est représenté pointillés la rugosité optimal)*

## 4) Données et paramètres tribologiques

### 4.1) Taux d'usure

Selon la norme DIN EN 50321, l'usure peut être caractérisée par n'importe quel changement de longueur, volume ou masse et être normalisée selon les conditions de sollicitation, de vie ou de débit. Dans cet esprit la norme DIN EN 50324 (ASTM G99) définit le taux d'usure comme « le volume perdu divisé par la charge normale et la distance » Le taux d'usure **k** (ou rapport de proportionnalité, voir DIN EN 50321) est dérivé de la loi d'Archard, en éliminant la dureté comme paramètre, et suppose que la perte de volume **V** est

proportionnelle à la charge normale  $FN$  et à la distance de glissement  $L$  parcourue.  $V = k V$   
 $FN$  Cette formule caractérise bien la phase stationnaire de perte de matière après le rodage initial et avant l'apparition d'un mécanisme secondaire comme par exemple la fatigue, qui dépend fortement de la topographie des pièces usinées. Les différentes écoles tribologiques soulignent toujours que la notion de taux d'usure pose divers problèmes et doit être précisée pour chaque mécanisme d'usure. Toutefois le taux d'usure est aujourd'hui utilisé couramment dans le monde entier et décrit l'évolution du niveau d'usure d'un couple de matériaux avec la sollicitation. Il faut toutefois noter que le taux d'usure ne traduit pas directement une propriété intrinsèque des matériaux en contact ou du tribosystème. En ce qui concerne la quantification de l'usure, il faut bien admettre que l'application de lois ou de modèles d'usure à l'usage général est très limité, en général par manque de connaissance des propriétés des matériaux et de leur évolution avec la température ; mais la modélisation de l'usure ou la prévision d'un taux d'usure sont des sciences qui débutent. Quoi qu'il en soit, pour une application industrielle, l'usure et, juste après, le frottement restent les deux grandeurs les plus déterminantes de par leurs implications économiques, et la connaissance de la nature exacte des différents mécanismes d'usure contribuant à un taux d'usure est un problème moins important. Demeurent deux questions :

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

Il n'y a aucun doute, que tous les tribosystèmes, que ce soit dans une application industrielle ou une machine d'essai, possèdent un taux d'usure, qui est défini par le couple de matériaux, la configuration du système et la sollicitation et qu'on peut le déterminer en fin de vie. Le taux d'usure est la « réponse » du tribosystème à une sollicitation. Le taux d'usure volumétrique  $kV$  s'exprime le plus souvent en  $mm^3/(N \cdot m)$  et se calcule à partir du volume d'usure ou de la perte de volume (ou de masse), de la charge normale et de la distance de glissement parcourue. Ces trois valeurs sont parfois difficiles à déterminer ou simplement à connaître. Notons que certains auteurs l'expriment en  $mm^2/kgf$  ou en  $mm^2/N$  D'autres utilisateurs raisonnent un peu différemment. Par exemple, dans l'industrie des systèmes de freinage, on définit le taux d'usure comme la perte de matière en masse ou en volume par mégajoule (MJ) d'énergie dissipée par le couple de matériaux, ce qui revient à supposer que le volume perdu est proportionnel à la densité d'énergie de frottement apparente  $ef^*$ , c'est-à-

dire en première approximation que le taux d'usure  $k$  est proportionnel au coefficient de frottement  $\mu$ , soit  $k = ef^*\mu$  [9]

#### 4.2) Valeur du produit $P \times V$

La pression de contact et la vitesse de glissement sont les deux paramètres clefs de la sollicitation des matériaux dans un tribosystème. Elles interviennent de diverses manières, et d'abord de manière globale.

- En effet, les valeurs du produit  $PV$  sont fréquemment utilisées dans les fiches des producteurs de matériaux pour préciser les limites d'utilisation des matériaux et couples de matériaux. La valeur  $PV$  en MPa . m/s (pour les anglo-saxons en psi.ft/min) est le produit de la pression de contact par la vitesse de glissement et caractérise la sollicitation énergétique du tribosystème/contact. Selon les configurations, la pression est la pression hertzienne de contact (contact non conforme, bille/plan par exemple) ou la pression apparente (contact conforme, plan/plan par exemple).
- La valeur  $PV$  multipliée par le coefficient de frottement :  $PV\mu$  (W/mm<sup>2</sup>), Détermine La puissance dissipée sous forme de chaleur (énergie de frottement) sur l'aire apparente de contact  $A$  (Friction Power Intensité ) ; cette énergie est évacuée principalement par conduction thermique, uniformément dans les deux corps, une faible partie étant véhiculée par le lubrifiant. Elle correspond à la puissance thermique générée par frottement et la température de volume des pièces en est une fonction croissante.

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

- La **pression de contact** détermine directement la sollicitation mécanique de la pièce (effet de plastification locale, fatigue...) et de ses couches superficielles (rupture des films superficiels...) : avec le coefficient de frottement, elle détermine les contraintes de traction arrière qui peuvent provoquer la fissuration des couches superficielles fragiles.
- La **vitesse de glissement** est le facteur le plus influent sur les températures éclair, (flash température) c'est-à-dire les températures transitoires, mais très élevées sur les

aires réelles de contact, où les deux corps ne sont séparés que par des films très minces, comme en frottement sec ou en régime mixte. L'élévation locale de la température de contact est susceptible de modifier la nature et les propriétés des surfaces (transitions de phase, ramollissement excessif, fusion... !) ainsi que la rhéologie de l'interface et surtout du lubrifiant liquide, et la réactivité chimique des pièces et du lubrifiant (oxydation...).

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

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

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

### **4.3) Densité d'énergie de frottement**

Le modèle initialement développé par Fleischer utilise des formules simples. La perte énergétique **E<sub>f</sub>** due au frottement s'écrit :

$$E_f = \mu FN L$$

Avec  $\mu$  coefficient de frottement de Coulomb

Le produit  $\mu FN$  représente la force de frottement. La grande similitude entre la formule (1) (expression de l'usure) et la formule (2) (expression de l'énergie de frottement) est évidente elle a conduit Fleischer à introduire le paramètre  $ef^*$  de densité d'énergie de frottement apparente et à supposer que le volume d'usure est proportionnel à l'énergie de frottement par :

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

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

**5) Surface :**

La notion de surface est définie par l'ensemble des propriétés physico-chimiques et mécaniques des matériaux en présence mais aussi par les caractéristiques géométriques du contact. Citons par exemple l'énergie superficielle : elle influe sur les propriétés de frottement à sec des matériaux au travers des forces d'adhésion mais aussi sur le comportement du contact en régime lubrifié au travers des phénomènes de mouillage et d'étalement. La topographie est une caractéristique géométrique de grande importance (figure II.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
Inbrication			- Résistance au déplacement - Déformations, ruptures... des aspérités
Déformations élastiques, plastiques	Cas général		- Modification de la topographie : rugosité portance... - Écrouissages
	Pénétration (dureté de A > dureté de B)		- Résistance au déplacement - Labourage de B par A - Transfert de B sur A
Adhésion			- Résistance au déplacement

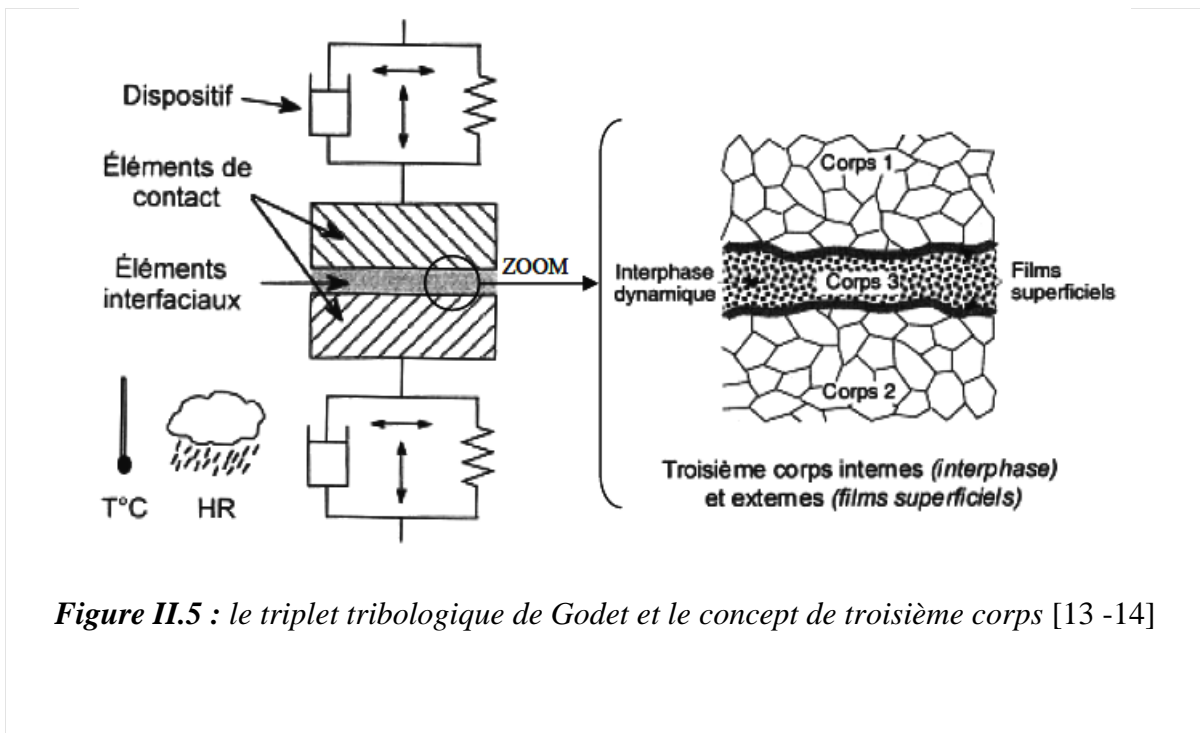
Figure II.4 : rapprochement des solides : effets et conséquences [12]

### 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.5 : 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).

### 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).

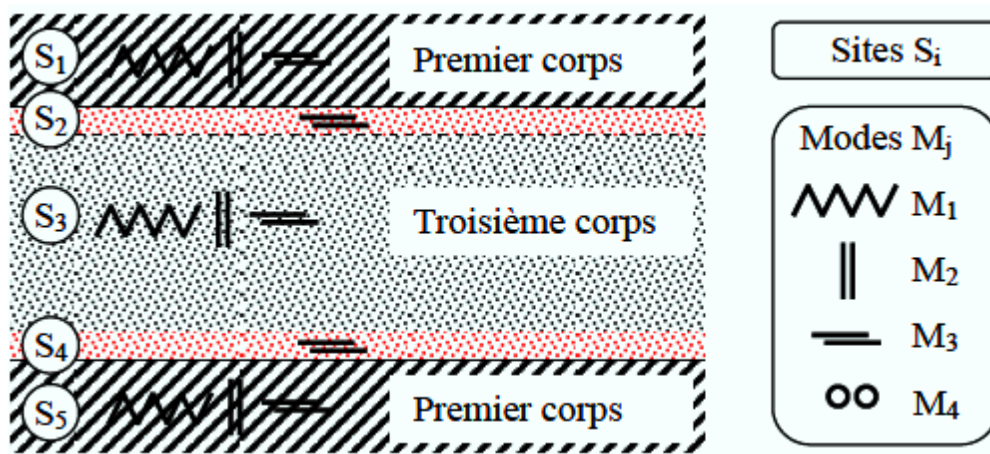


Figure II.6 : sites et modes d'accommodation [16-11]

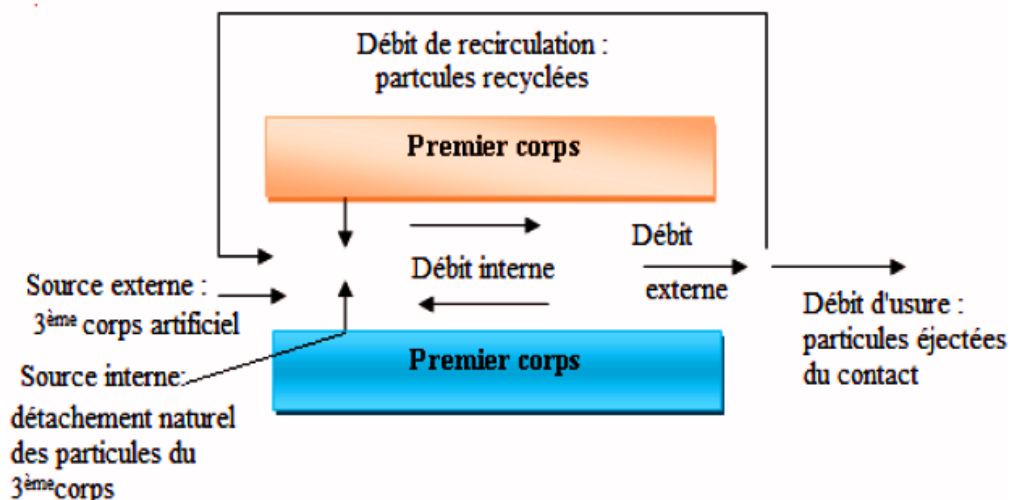
Les premiers corps sont notés  $S_1$  et  $S_5$ , alors que la partie volumique du troisième corps constitue le site  $S_3$ . Cette identification introduit également la notion d'écrans notés  $S_2$  et  $S_4$  qui constituent la frontière entre premiers corps et troisième corps.

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.

**6.3) Circuit tribologique :**

Le gradient de vitesse auquel sont soumis les débris qui constituent le troisième corps (adhérent ou non après ouverture du contact) peut se traduire en termes de débits, dont les différentes composantes participent au processus d'usure défini comme le circuit tribologique de Berthier (**figure II.8**).



**Figure II.7 :** circuit tribologique de Berthier. [10]

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

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

apparaît ainsi, qu'en aucun cas la mesure du volume de dégradation des premiers corps n'est représentative de l'usure du couple tribologique testé.

Si aucun lubrifiant n'est apporté au contact ce qui se traduit par  $Q_{se}=0$ , le terme de débit source (Q) ne représente que le débit source interne. O.Dalverny écrit ainsi les relations d'équilibre des débits pour différents types de circuits tribologiques (conservation de la quantité de matière) : [10]

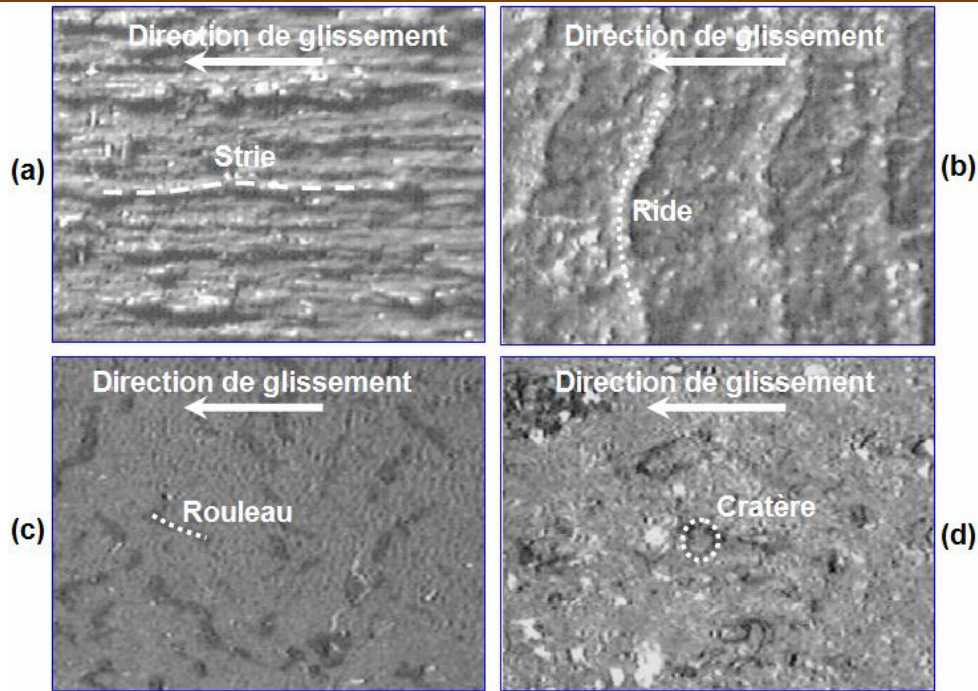
$$\begin{array}{l}
 \bullet \text{ Circuit ouvert : } \begin{cases} Q_i = Q_s - Q_e \\ Q_u = Q_e \end{cases} \quad \text{soit} \quad \begin{cases} Q_i = Q_s - Q_u \\ Q_u = Q_e \end{cases} \\
 \bullet \text{ Circuit fermé : } \begin{cases} Q_i = Q_s - Q_e + Q_r \\ Q_u = Q_e - Q_r \end{cases} \quad \text{soit}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

**7) L'usure des élastomères :**

**7.1) Principaux faciès d'usure :**

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

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



**Figure II.8** : principaux faciès d'usure des élastomères. Stries d'usure (a) ; rides d'usure (b) ; rouleaux d'usure(c) ; cratères d'usure(d).[11]

### 7.1.1) Rouleaux d'usure

Ils ont été étudiés par quelques chercheurs.

- Les rouleaux d'usure sont des débris d'usure adhérents à la surface usée.
- Les rouleaux ne constituent pas en soi un faciès d'usure, mais un troisième corps, ce sont les signes les plus évidents d'un type d'usure. [11]

### 7.1.2) Cratères d'usure :

Se sont des trous circulaires sur la surface qui apparaît lisse à l'œil nu. Quel que soit le matériau le cratère à une dimension assez homogène. Leur diamètre moyen est de l'ordre de la centaine de micromètre et sa profondeur du dixième du diamètre.

Généralement sont observés sur pneumatique, sont associés à un faible taux d'usure. Il n'existe actuellement aucun article traitant de ce faciès. [11]

**7.1.3) Stries d'usure :**

Sont des bandes parallèles à la direction de glissement. Leur largeur et hauteur variante du millimètre au micromètre, par contre leur longueur de la centaine de micromètre au centimètre, ces faciès est associé à des conditions d'usure très sévères qui ne se rencontrent que dans des cas extrêmes. Ces faciès ne font l'objet que de peu de publications.

**7.1.4) Rides d'usure:**

Se sont des faciès perpendiculairement à la direction de glissement, elles ont une forme dite « toit d'usine » ou « dent de scie ». La partie la plus pentue s'oppose au glissement. Les rides ont une longueur variant de la centaine de micromètre à plusieurs millimètres. Leur longueur de l'ordre de dix fois leur hauteur. Les rides d'usure constituent l'essentiel des publications sur l'usure des élastomères

**7.2) Principaux modes d'usure :**

Pour étudier le phénomène d'usure des élastomères il faut d'abord rappeler les principaux modes observés sur les matériaux métallique ou non métallique. En distingue plusieurs modes d'usure : Par abrasive, érosion, cavitation, fatigue et délamination, soudage, corrosive et oxydative, fretting, et par adhésive-formation de rouleaux d'usure (figure III-6 et III-7). Elle permettra d'introduire les notions de base utilisées en tribologie ainsi que les grandeurs importantes. Elle fournira également des éléments de réflexion pour la présente étude.

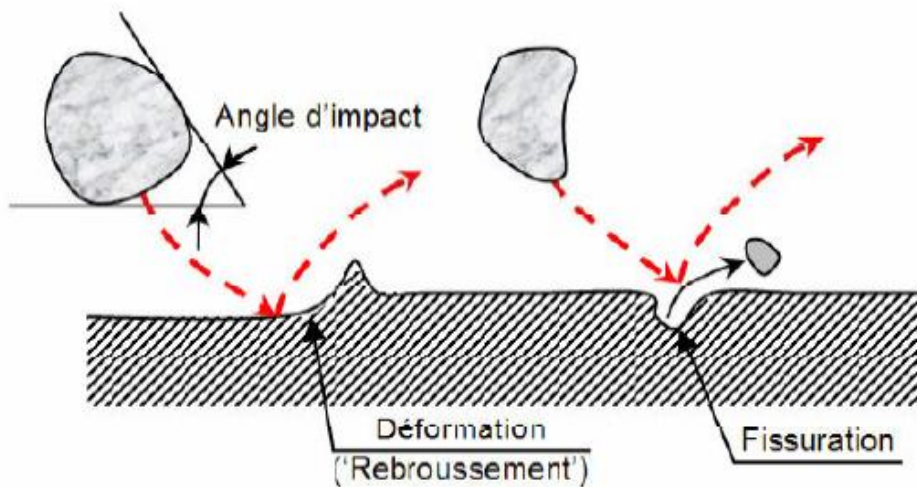
**7.2.1) Usure par érosion :**

L'usure par érosion est causée par des impacts de particules solides ou liquides contre la surface d'un solide. Ce mécanisme d'usure dépend des propriétés des matériaux présence, de l'angle d'impact, de la vitesse d'impact et de la taille de la particule.

L'érosion à faible angle d'incidence provoque un enlèvement de matière par la formation de copeaux. Lorsque l'angle augmente, à faible vitesse, des impacts répétés peuvent provoquer une propagation lente de fissures dans le matériau.

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

fonction de propriétés du matériau érodé, la fissuration peut engendrer l'enlèvement de matière. A grande vitesse et grand angle d'incidence, la particule peut fusionner avec le matériau érodé. Dans des cas extrêmes-comme la collision d'une météorite avec une planète-et pour des matériaux particuliers, la particule incidente fusionne même avec le solide érodé et provoque des projections de débris au voisinage de l'impact. 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.[11]



**Figure II.9** : mécanisme d'usure érosive en présence d'un 3ème corps pour un impact unidirectionnel. [11]

### 7.2.2) Usure par cavitation :

La cavitation apparaît lorsque le liquide atteint, au voisinage d'une surface, sa pression de vapeur saturante. Il crée alors une cavité ne pouvant rester stable dans le milieu. Elle implose donc et produit une onde de choc créant sur la surface des contraintes très élevées qui se traduisent souvent par l'apparition de faciès en forme de cratère. [11]

### 7.2.3) Usure par fatigue :

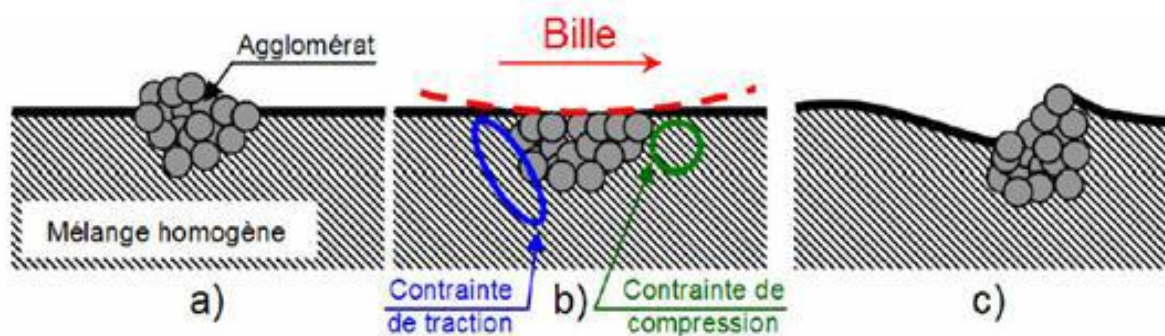
Le passage répété d'un solide sur des surfaces lisses ou rugueuses provoque la propagation de fissures par fatigue et, in fine, un arrachement de matière. Les fissures s'initient au niveau de défauts dans le matériau.

Pour les métaux [suh1973] explique que les défauts initiateurs ne se situent pas en surface ou en extrême surface du matériau, car ils sont éliminés par l'action des efforts sur la surface. Du plus, une couche d'oxyde aux propriétés mécaniques plus élevés protège la surface. Ainsi les fissures se propagent dans un premier temps en sous -couche pour remonter ultérieurement à la surface et provoques l'enlèvement d'un débris (taille des débris de 1 à 5(µm) d'usure et de l'usure par délamination.

De type d'usure varie d'un part en fonction de conditions comme la force normale appliqué. La vitesse de glissement et autres paramètres relatifs aux conditions tribologiques. Il est d'autres parts influencés par la géométrie de la surface (rugosités) et la résistance en fatigue de l'élastomère. [11]

**Remarque :**

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



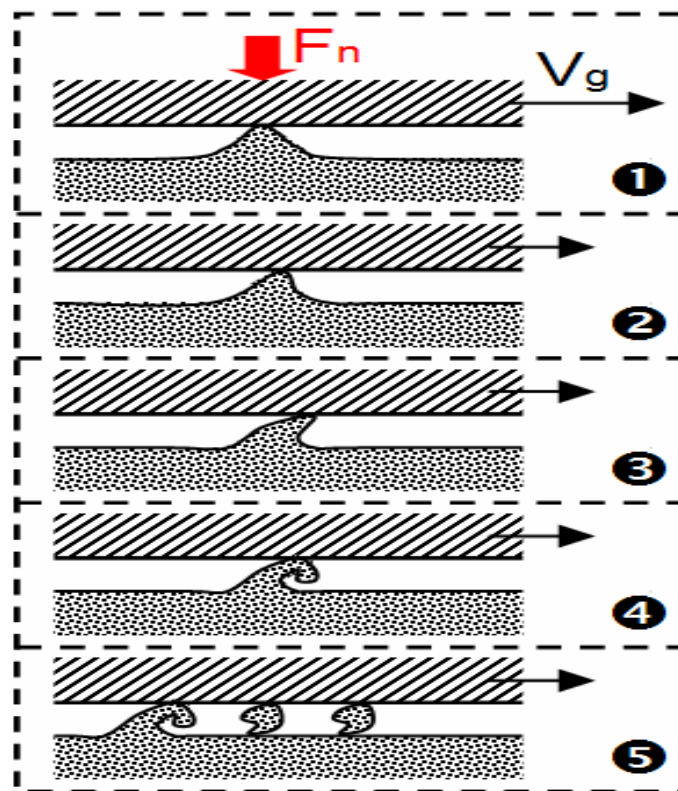
**Figure II.10** : mécanisme de création de « cratères » à partir d'agglomérats.

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

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

Si un élastomère glisse sur une surface de très faible rugosité et possède une faible résistance au cisaillement l’usure se présentera généralement sous la forme de rouleaux d’usure. Ce mode d’usure correspond à une combinaison précise entre les propriétés de l’élastomère et les conditions tribologique et le rend très peu fréquent spécialement dans le cas de NBR chargés NDC qui possèdent une limite d’élasticité à rupture correcte. Les forces de frottement à l’interface correspondent à une forte adhésion entre les deux solides, elles donnent lieu à de fortes déformations de l’élastomère au cours cisaillement provenant de glissement relatif des deux surfaces.

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



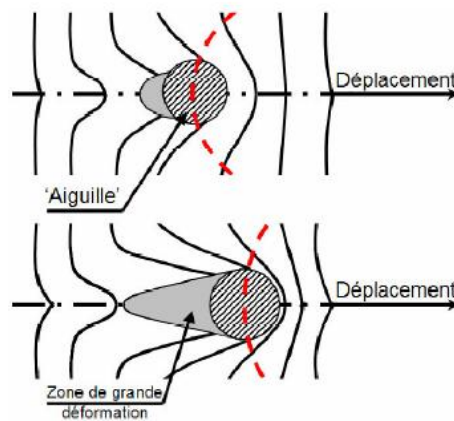
**Figure II.11** : processus physique de frottement de rouleaux d’usure. [11]

### 7.2.5) Usure par abrasive :

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

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

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



**Figure II.12** : schéma des déformations et du cisaillement de la surface de l'élastomère par une « aiguille » [à « sec » (« dry abrasion »)].[11]

### 7.2.6) Usure par soudage :

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

**7.2.7) Usure par corrosive et oxydative :**

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

**7.2.8) Usure par fretting :**

Le fretting est un mouvement oscillatoire la faible amplitude qui peut se produire entre deux surfaces en contact celui-ci engendre différentes formes de dégradation pouvant conduire à la perte de fonctionnalité. Le contact est souvent en glissement partiel, c'est-à-dire que les deux solides n'ont pas le mouvement relatif dans la partie centrale du contact, mais ils glissent sur un anneau en périphérie du contact.

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

**8) quelques paramètres influent sur l'usure :****8.1) Paramètres matériaux :****8.1.1) Propriétés mécaniques, effet de la température :**

Les propriétés viscoélastiques des élastomères dépendent fortement de la fréquence et de la température de sollicitation. Grosch et Schallamach montrent que pour obtenir un faible taux d'usure, il est nécessaire de se placer au voisinage de la température de transition vitreuse  $T_g$ .

**8.1.2) Ajout de charges renforçant au mélange :**

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

**Remarque :**

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

**8.2) Conditions expérimentales :****8.2.1) Charge appliquée :**

Grosch et Schallamach ont trouve la relation :  $V=aPn$  ou a et n sont des fonctions de formulation de l'élastomère et la nature de la surface.

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

P : la pression.

Cette relation valable qu'à faible charge.

**8.2.2) Composition de l'atmosphère :**

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

**8.2.3) Lubrification :**

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

- Il permet par ailleurs de refroidis le système en absorbant les calories.
- Il sert de protection contre l'oxydation.
- Il permet d'évacuer les particules d'usure créés. Il peut prendre les formes : liquide
- (Huile), solide (graphite).....En générale l'épaisseur du film de lubrifiant est relativement importante (supérieure aux dimensions des aspérités, pour éviter les interactions entre aspérités).

**9. Conclusion**

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*

## ***Chapitre III Moyen Et Condition D'étude Experimental 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 conçus un mécanisme d'usure abrasif portant une lame monté sur un étau 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'étau-limeur**

L'**étau limeur** ou **étau-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 Decoste l'a amélioré et créé l'étau limeur en 1846.

## ***Chapitre III Moyen Et Condition D'étude Experimental De L'usure Abrasive***

---

### **III.2.2 .2: Utilisation**

L'étou 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'étou limeur a vu évoluer le mouvement du coulisseau et de la table par des commandes hydrauliques.

L'inconvénient majeur de l'étou 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'étou 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 étou 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.

### Chapitre III Moyen Et Condition D'étude Experimental De L'usure Abrasive



Figure III.1: L'étai-limeur

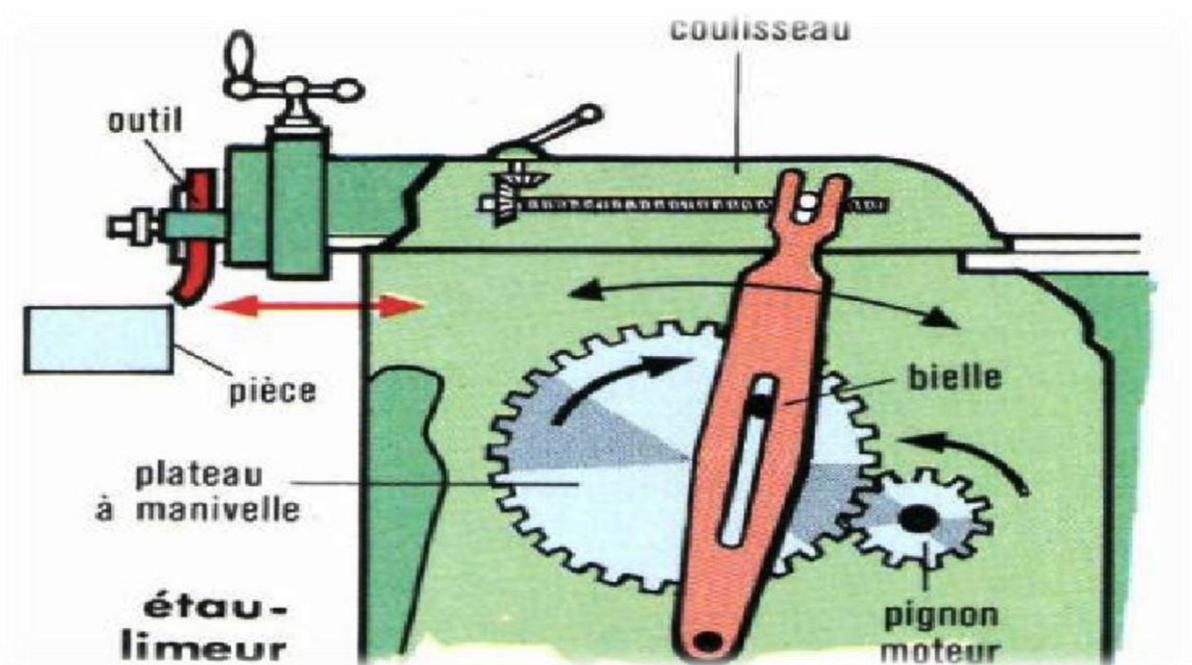


Figure III.2 : Schéma de principe de fonctionnement d'un étai limeur

## ***Chapitre III Moyen Et Condition D'étude Experimental De L'usure Abrasive***

---

### **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 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**

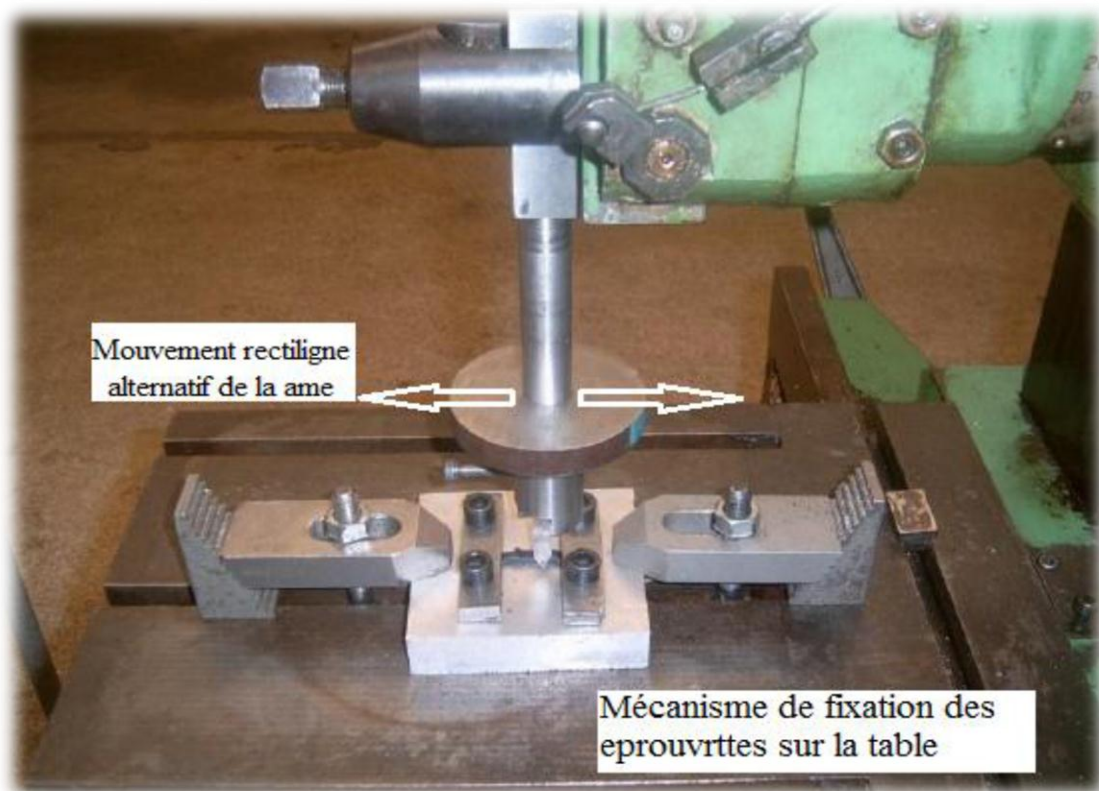
La pièce peut être maintenue dans un étai ou bridée sur la table. Cette table, sur certaines machines, peut être inclinable selon deux axes.

## ***Chapitre III Moyen Et Condition D'étude Experimental De L'usure Abrasive***

### **➤ 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.

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***

## ***Chapitre III Moyen Et Condition D'étude Experimental De L'usure Abrasive***

---

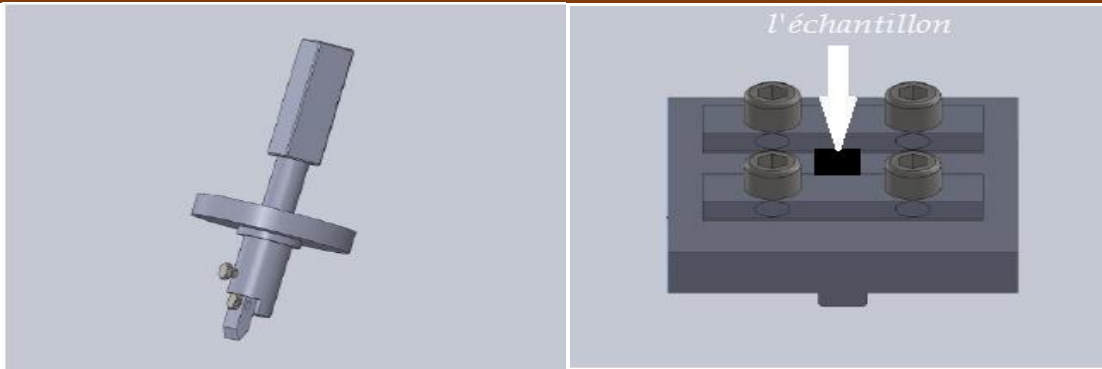
### **III.2.3 : Description des mécanismes de fixation**

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 ( $10^\circ$ - $20^\circ$ - $30^\circ$ - $45^\circ$ - $60^\circ$ ).
- **-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  $\varnothing 11$ mm pour le passage de vis *CHCM10*.

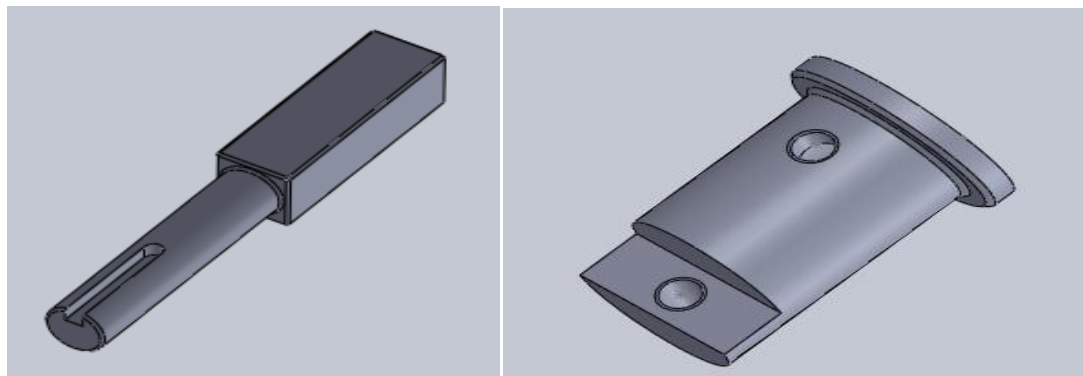
### Chapitre III Moyen Et Condition D'étude Experimental De L'usure Abrasive



a)- fixation de la lame d'abrasion

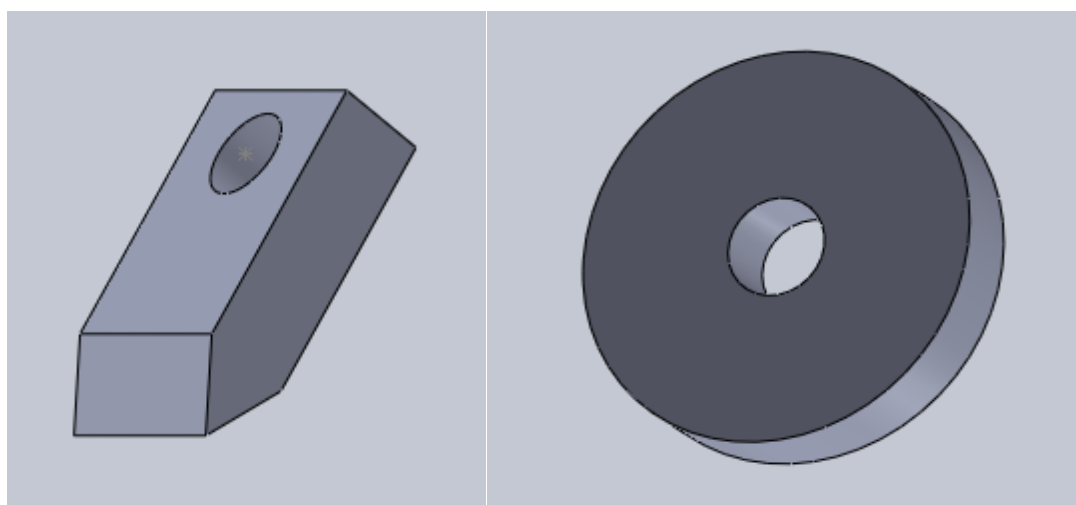
b)- fixation de L'échantillon

Figure III.4: mécanismes de fixation



La tige de fixation étai

porte lame

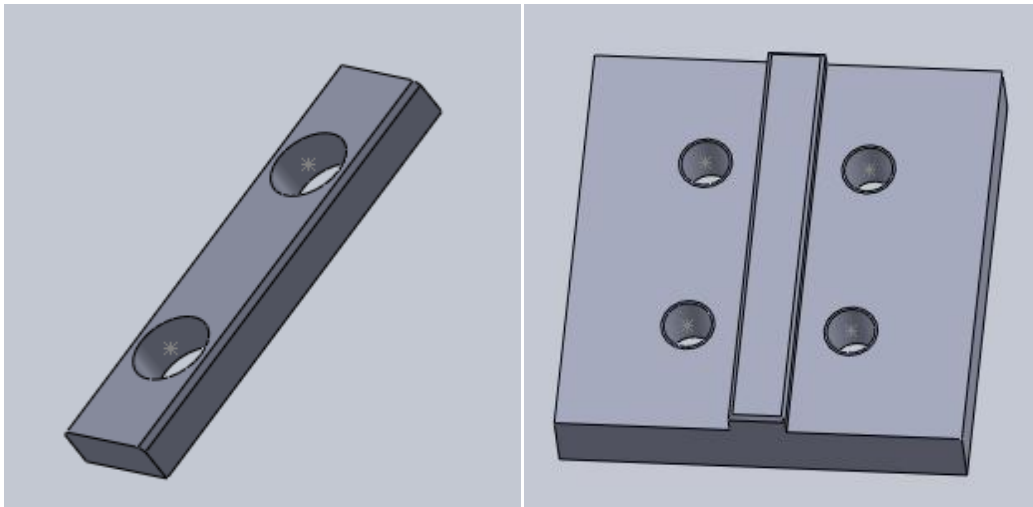


LA LAME

LA charge

## Chapitre III Moyen Et Condition D'étude Experimental De L'usure Abrasive

---



La plaque

l'élément porte échantillon

*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 duré 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<sup>-5</sup> g (Figure III.6).

## *Chapitre III Moyen Et Condition D'étude Experimental De L'usure Abrasive*

---



*Figure III.6 : Balance électronique*

### **III.3.1: Matériaux d'étude**

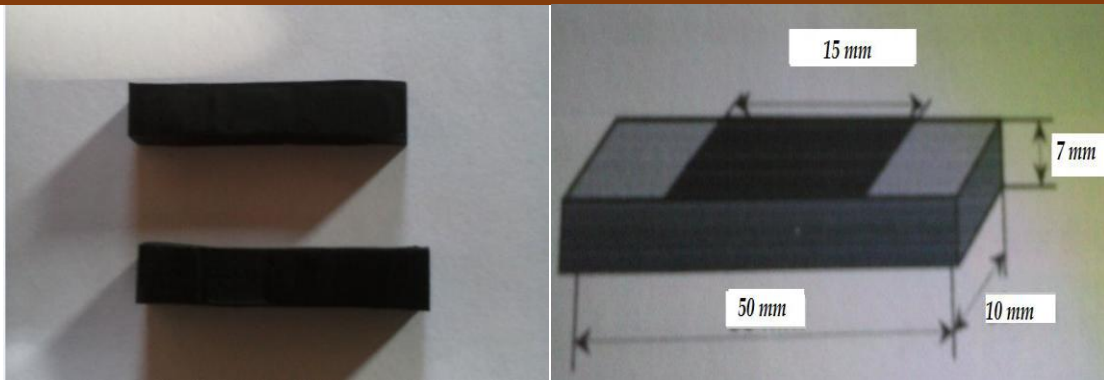
Nous avons utilisé un élastomère chargée de type SBR (styrene butadiene rubber) ce matériau est utilisé pour les pneumatiques. L'étude de l'influence des paramètres tribologiques sur l'usure abrasive des élastomères est réalisé en se servant de 98 éprouvettes ayant le même pourcentage de noir de carbone 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).

### **III.3.2 :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.

### *Chapitre III Moyen Et Condition D'étude Experimental De L'usure Abrasive*

---



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

## ***Chapitre III Moyen Et Condition D'étude Experimental De 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 :**

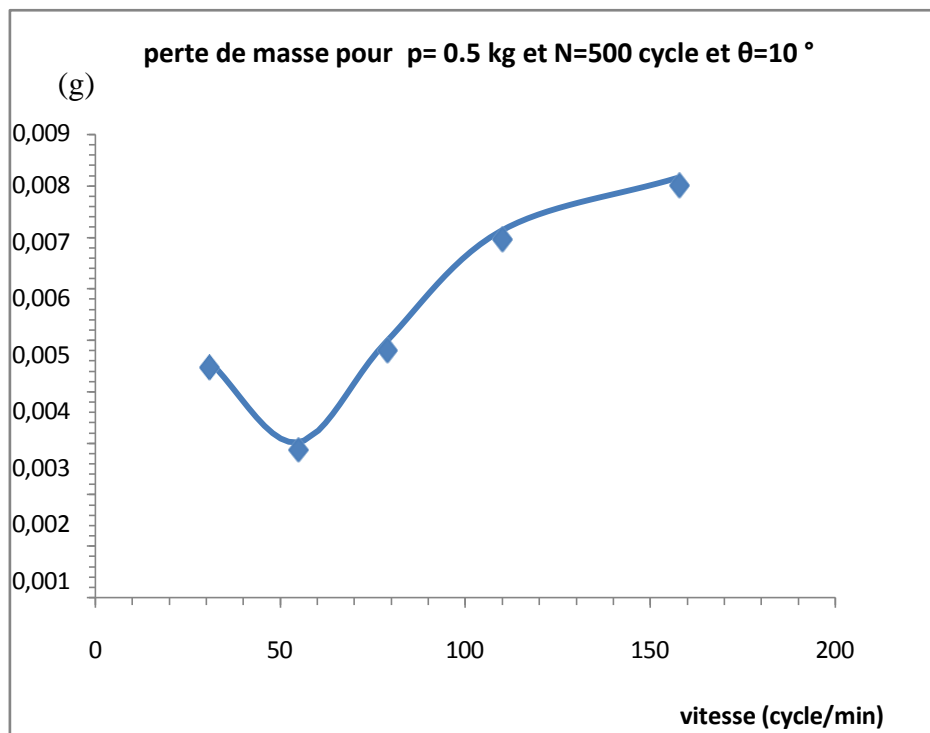
Les paramètres considérés dans notre étude expérimentale sur l'usure abrasive de L'élastomère sont :

- La vitesse de glissement;
- Le nombre de cycle ou (la durée d'utilisation) ;
- La charge appliquée ou (le poids) ;
- Le pourcentage de carbone

Nous interprétons les résultats obtenus puis nous les discutons.

**IV.2: Influence de vitesse de glissement :**

Les résultats de l'influence des vitesses de glissement sont présenté en (Figure IV.) .Les résultats sont obtenus pour des différentes charges appliquée (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.



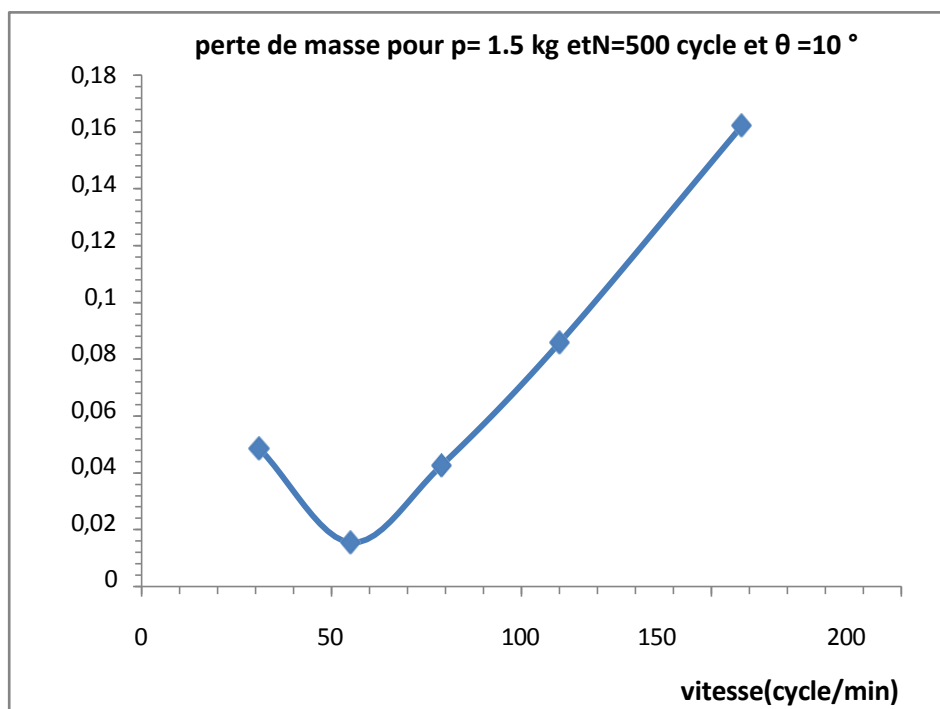
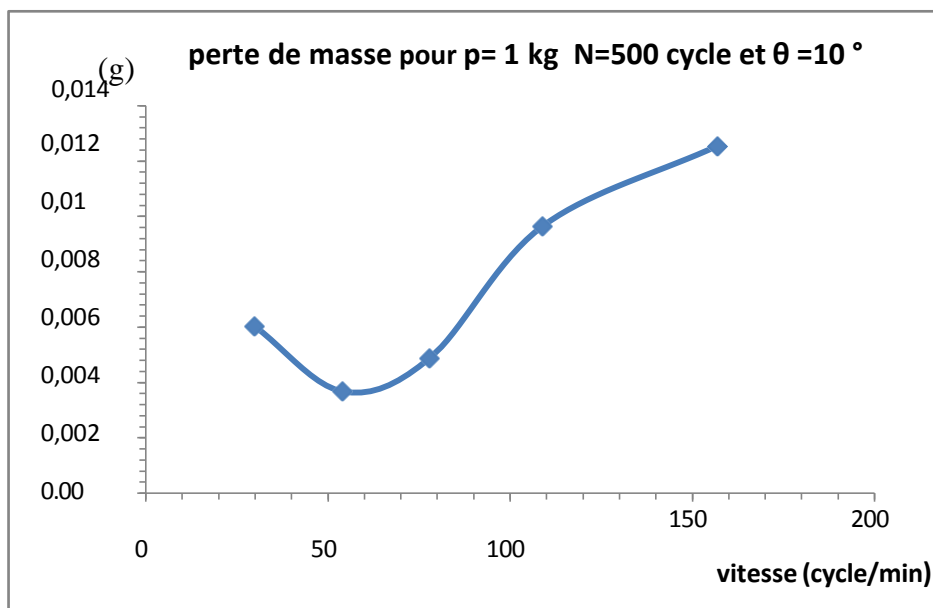


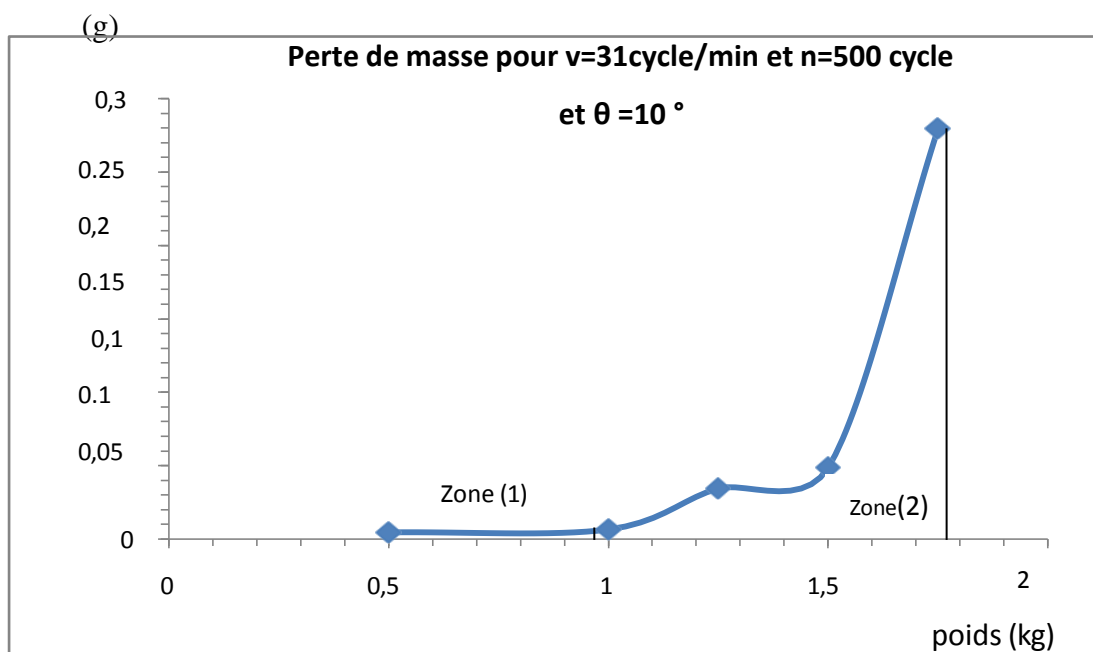
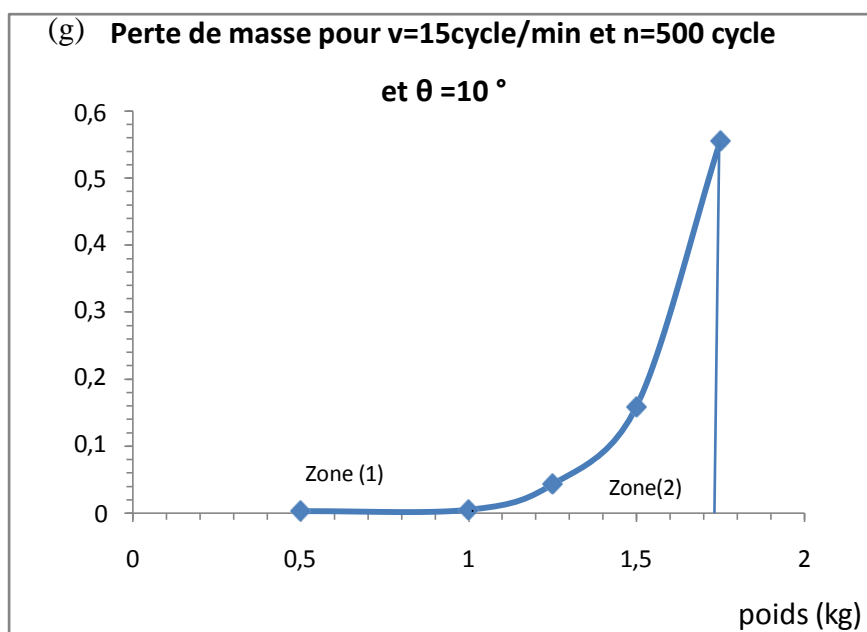
Figure IV.4: évolution de la perte de masse en fonction de la Vitesse de glissement

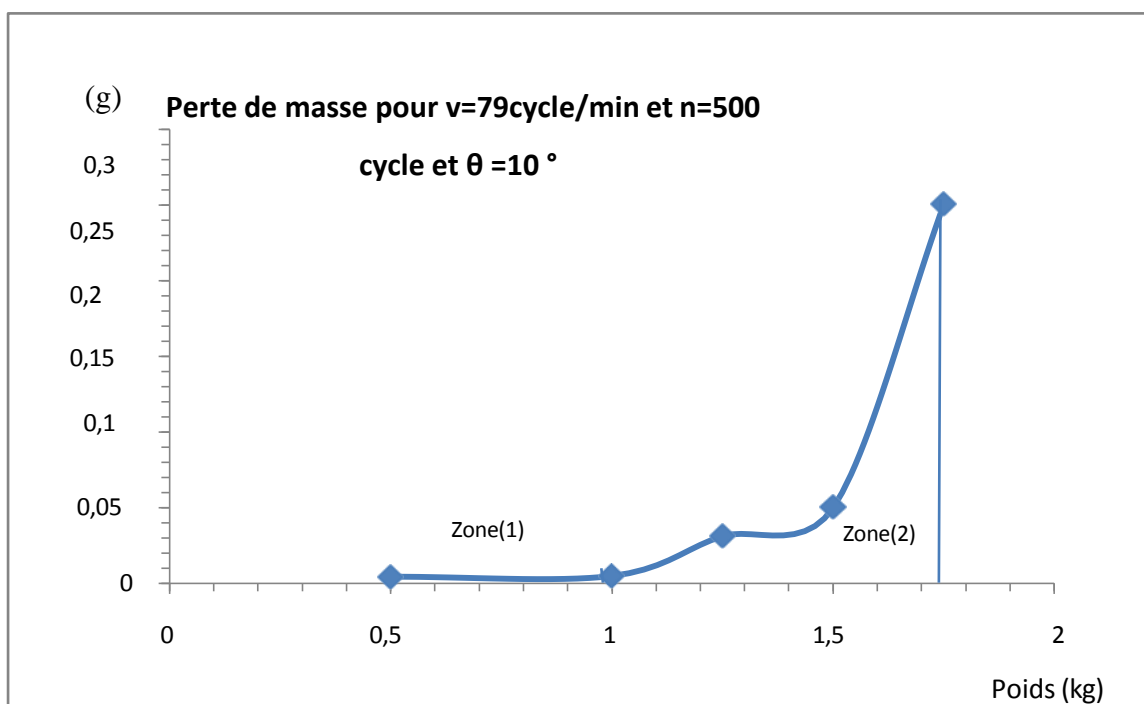
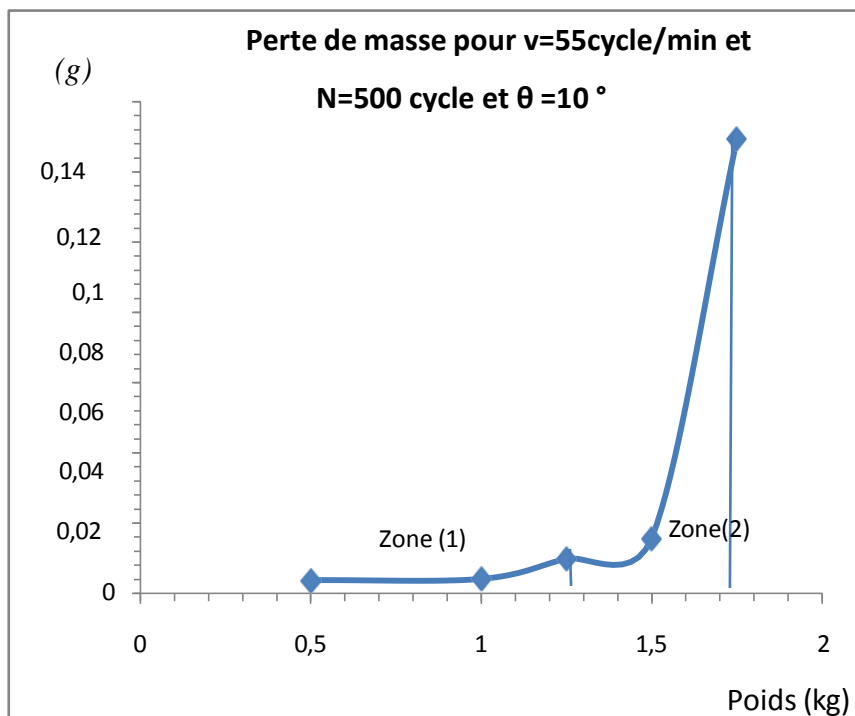
"L'analyse des courbes de variation de la perte de masse en fonction des vitesses de glissement révèle l'existence d'un minimum. Nous observons que l'usure diminue avec l'augmentation de la vitesse jusqu'à atteindre une valeur minimale, puis augmente à mesure que la vitesse continue d'augmenter, atteignant une valeur maximale. Ce minimum semble

être associé à la vitesse de glissement, ce qui suggère l'existence d'une vitesse critique ou d'une vitesse d'usure minimale."

**IV.3: 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.





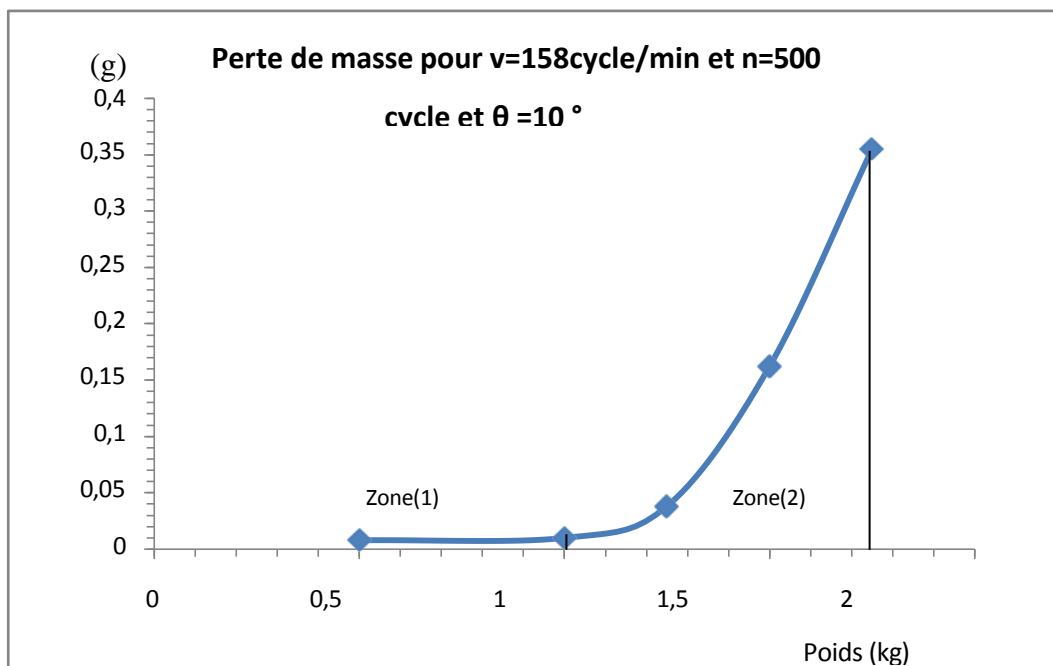
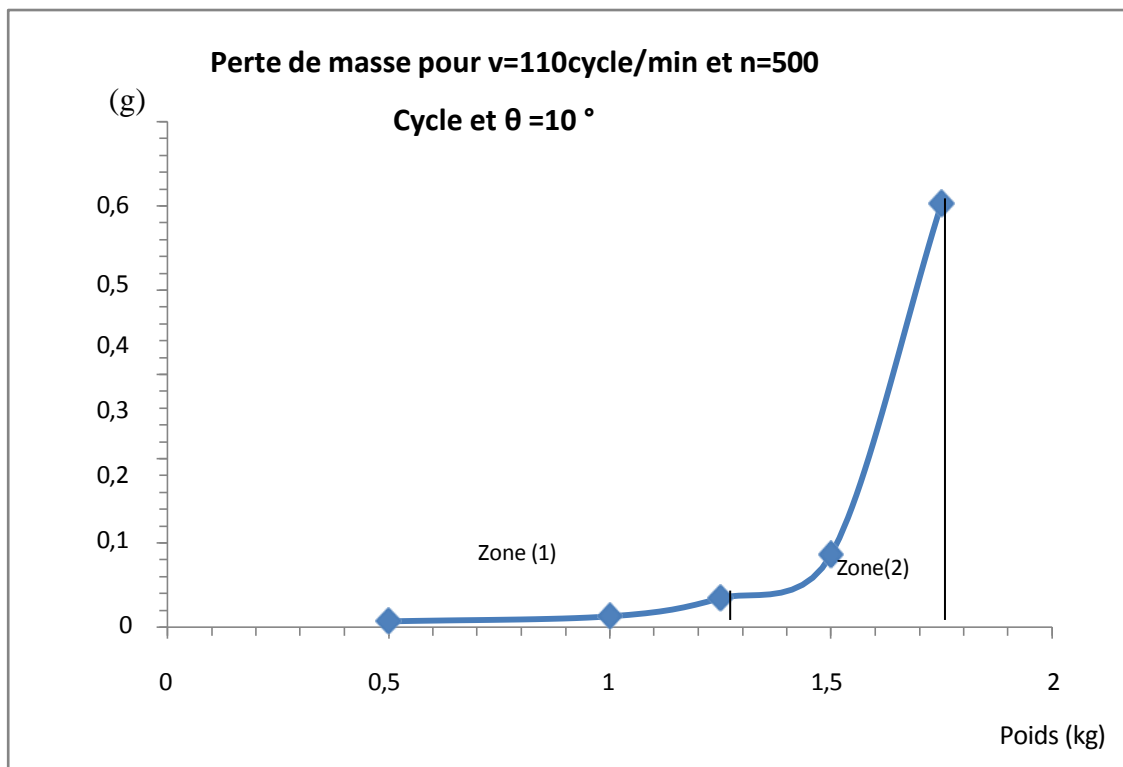


Figure VI.5 : évolution de la perte de masse en fonction de la charge appliquée

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 Et cette zone situe entre la charge 0.5 kg jusqu'à la charge 1.25kg.

**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 surfaces de contact .Ce mécanisme est générée par l'action simultanés des différents paramètres tribologiques.

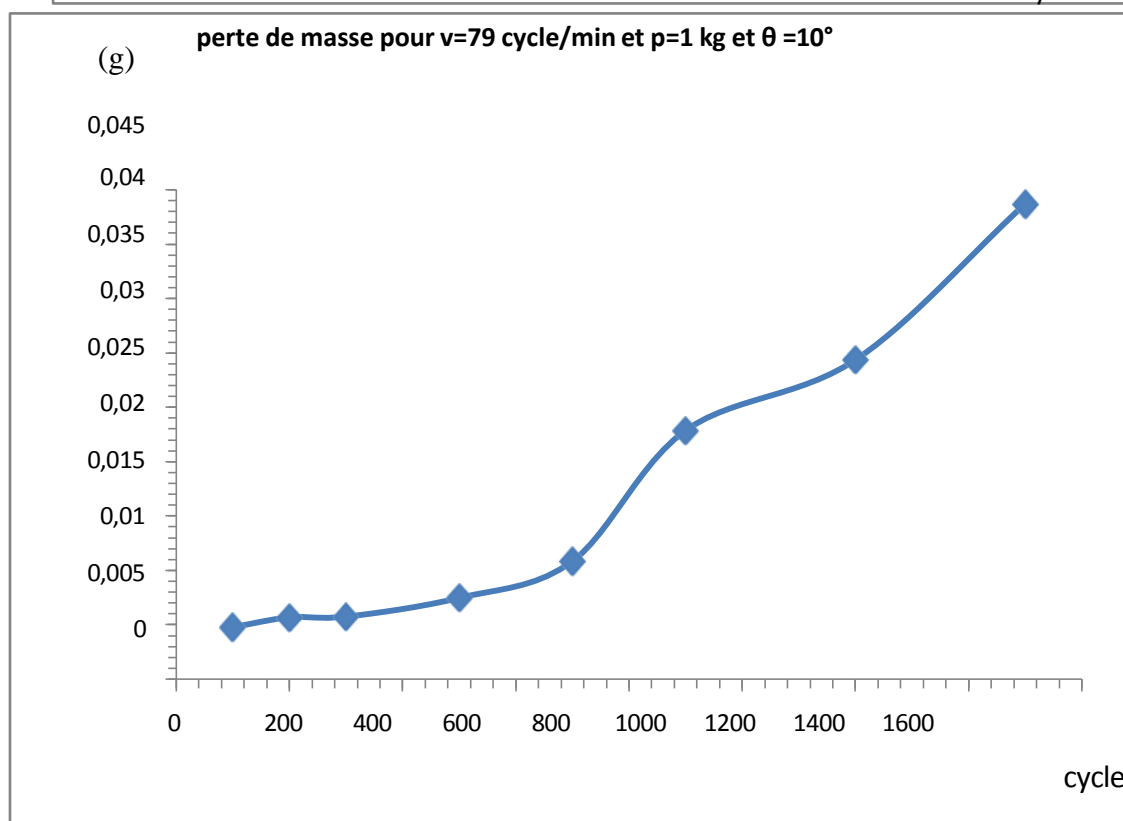
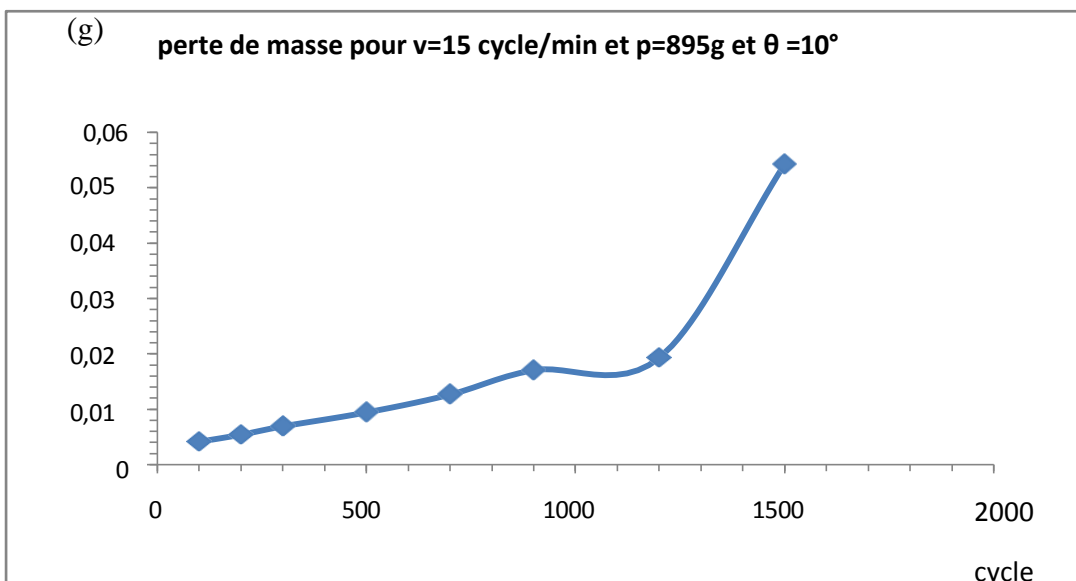
**IV.4: Influence de durée d'utilisation (nombre de cycle) :**

Les résultats concernant l'influence du nombre de cycles sont présentés dans la Figure IV.6. L'étude de cet effet met en évidence le phénomène d'usure abrasive par fatigue. Ce processus Peut-être résumé en trois étapes :

1. **Première étape** : Endommagement de la surface du matériau, lorsque le nombre de cycles est  $N_1$ .
2. **Deuxième étape** : Formation de fissures à la surface de contact.
3. **Troisième étape** : Propagation des fissures.

Au début de l'usure abrasive, l'arrachement du matériau se limite principalement aux zones présentant des défauts de structure, comme les agglomérats ou les trous, où l'énergie de rupture est la plus faible. Avec l'augmentation du nombre de cycles, l'endommagement de la

surface de contact s'accroît, ce qui entraîne une multiplication des fissures et, par conséquent, une augmentation de la perte de masse. L'intensité de l'arrachement de la matière augmente alors avec la propagation des fissures existantes et la formation de nouvelles fissures. Cette analyse est cohérente avec les résultats observés pour la perte de masse en fonction du nombre de cycles, qui suivent une loi exponentielle similaire à celle décrite par la loi de Paris pour la rupture par fatigue. Ces résultats concordent avec les observations expérimentales rapportées dans la littérature concernant l'usure abrasive des élastomères NBR [18].



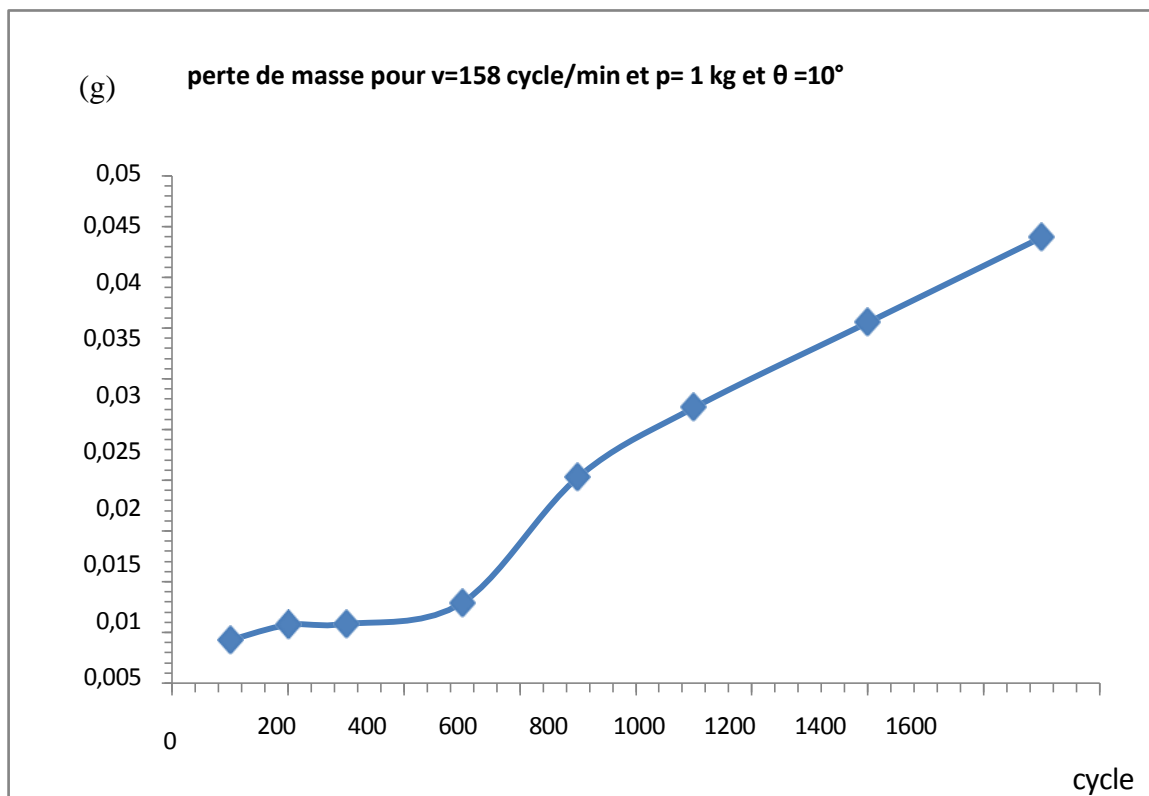


Figure IV.6: évolution de la perte de masse en fonction du nombre de cycles parcouru

**VI.4 : influence de pourcentage de noir de carbone :**

Les résultats de l'influence de pourcentage de carbone sont obtenu pour deux élastomères qui se diffèrent en pourcentage de carbone, l'un à 60 % et un l'autre à 80% de noir de carbone. Avec une charge appliquée de 1KG. Et un nombre de cycle fixe égale (500cycle/minute) et  $\theta=10^\circ$  avec les gammes de vitesses disponibles sur la machine.

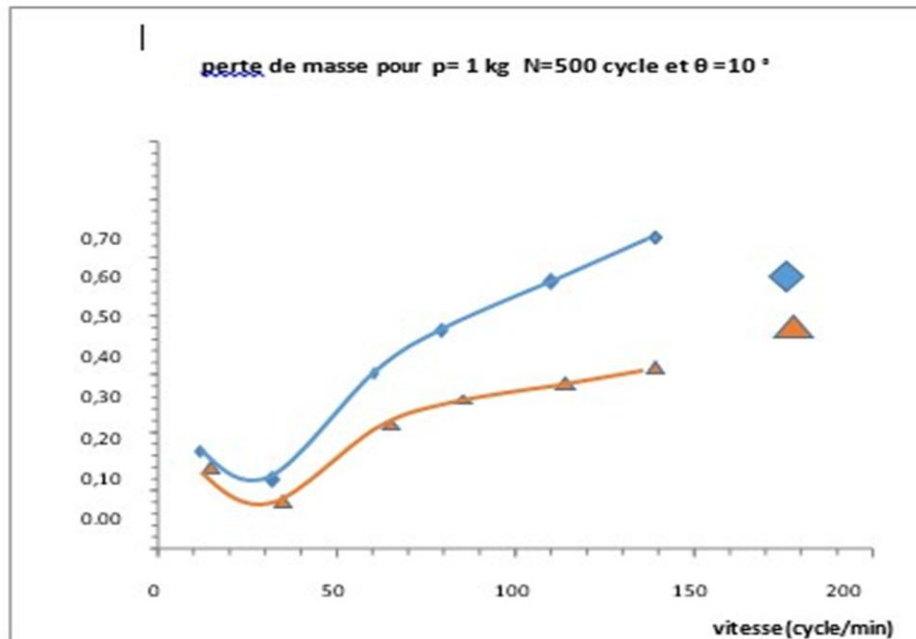


Figure IV7 : évolution de la perte de masse pour différents type d'élastomères

Figure IV7 : évolution de la perte de masse pour différents type d'élastomères

Les résultats concernant l'influence du pourcentage de carbone noir sont présentés dans la Figure IV.7. L'étude de cet effet nous aide à découvrir que L'ajout de carbone noir, agit comme un agent de renforcement. Cela améliore la résistance à l'usure, à la traction et à la déformation des élastomères, ce qui prolonge leur durée de vie.

***IV.5 : conclusion***

L'étude de l'interaction entre le matériau et l'indenteur dépend de divers paramètres tribologiques, et cette dynamique est complexe à expliquer. Les résultats concernant l'influence de ces paramètres confirment l'existence d'une vitesse critique. Nous avons démontré que la vitesse de glissement détermine la vitesse de déformation viscoélastique dans la zone de contact. Nous attribuons l'ampleur de la perte de masse par abrasion à la formation et aux dimensions (hauteur et largeur) des ondulations de Schalamach. À faibles vitesses, nous suggérons que l'effet de relaxation de l'élastomère déformé dans la zone de contact contribue à l'augmentation des rides. À des vitesses élevées, en revanche, l'effet de plastification des agglomérats dans la matrice entraîne une diminution de l'usure abrasive de l'élastomère.

# *Conclusion général*

Ce travail est consacré à l'étude expérimentale de phénomène d'usure des élastomères.

Nous avons choisis pour notre étude d'étudier l'influence du différent paramètre tribologique sur la perte de masse. Nous avons fait des variations de quelque paramètre (durée d'utilisation (nombre de cycle), la charge appliquée (poids kg), , vitesse de glissement, et le pourcentage de noir de carbone), et on a constaté que:

- Une pression accrue entraîne une déformation plus importante, ce qui peut mener à une usure par abrasion et à une réduction de la durée de vie des élastomères. La résistance à l'usure est souvent compromise à des niveaux de pression élevés.
- L'augmentation de la vitesse de frottement génère plus de chaleur, ce qui peut provoquer une dégradation thermique des élastomères. Cela peut altérer leurs propriétés mécaniques, réduisant ainsi leur résistance à l'usure.
- Plus la distance est importante, plus le risque d'usure cumulée est élevé. Cela peut conduire à des défaillances prématurées si les élastomères ne sont pas conçus pour résister à de tels cycles d'utilisation.
- La distance parcourue à des vitesses élevées augmente l'impact thermique, contribuant à la dégradation du matériau. Un frottement prolongé peut engendrer des dommages structurels au fil du temps.
- L'augmentation du pourcentage de noir de carbone améliore la résistance à l'usure et la rigidité des élastomères. Il crée une structure plus stable, ce qui réduit la déformation sous charge et l'abrasion.

En conclusion, cette étude met en évidence la nécessité d'une recherche continue pour mieux comprendre les mécanismes d'usure et améliorer les formulations d'élastomères. Les résultats obtenus ouvrent des pistes pour le développement de matériaux plus performants et durables, capables de répondre aux exigences croissantes des applications modernes.

*Reference  
bibliographie*

- [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).

[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 contactes 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