



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



N° d'ordre : M2 /MT/2025

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

**Filière : Génie civil**

**Option : Matériaux**

### Thème

**L'utilisation des supports en caoutchouc dans la résorption de l'énergie des sollicitations cycliques.**

Présenté par :

MERNIZ Khadidja.

Soutenu le 23/06/2025 devant le jury composé de

Président : LAREDJ Nadia Université de Mostaganem

Examineur : MALIKI Mustapha Université de Mostaganem

Rapporteur : MISSOUM Hanifi

Université de Mostaganem

Année universitaire : 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## REMERCIEMENTS

*Toute notre parfaite gratitude et remerciements à Allah le plus puissant qui nous a donné la force, le courage, la patience et la volonté pour élaborer ce travail.*

*Nous tenons à remercier chaleureusement et exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur **Pr. MISSOUM Hanifi**, pour son soutien inestimable, ses conseils, son aide et ces orientations précieuses tout le long de la réalisation de ce projet.*

*Nous tenons également à remercier les honorables membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous ont accordés en acceptant d'évaluer notre travail.*

*Nous remercions aussi l'ensemble des enseignants du département de génie civil qui ont contribué à notre formation en génie civil.*

*Enfin, pour n'oublier personne, Nous profitons de l'occasion afin de remercier tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.*

## DEDICACE

«وما توفيقى إلا بالله عليه توكلت وإليه أنيب»

*Avec toute ma gratitude, je dédie cet humble et modeste travail avec grand amour, sincérité et fierté :*

*A mes trèschères parentes ma mère et mon père pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements.*

*A mes frères et mes sœurs.*

*A toute ma famille.*

*A tous mes amis.*

*A tous mes professeurs*

*A tous ceux que j'ai oubliés qui m'ont apporté l'aide et le soutien nécessaire durant ces années d'études. Merci à vous tous.*

***Khadija***

## RESUME

Ce projet présente une recherche sur le thème « L'utilisation des supports en caoutchouc dans la résorption de l'énergie des sollicitations cycliques » vise à améliorer la durabilité et la performance des structures et des ponts soumis à des charges répétées. Grâce à leurs propriétés élastométrique, Ces supports absorbent et dissipent une partie significative de l'énergie mécanique, réduisant ainsi les efforts des vibrations et des efforts dynamiques sur les infrastructures. Et à la fin, présentes comment calcul les appareilles d'appuis. Cette recherche regroupe à 5 chapitres :

- Généralité sur le caoutchouc.
- Le caoutchouc dans la construction.
- Le comportement de caoutchouc.
- Le caoutchouc un matériau d'amortissement.
- Calcul des appareilles d'appuis des tabliers de ponts.

Mots clés : caoutchouc, isolateur, supports en caoutchouc, sollicitations cycliques, appareilles d'appuis en élastomères fretté.

## ABSTRACT

This project presents a research on the theme « The use of rubber supports in the absorption of the energy of cyclical sollicitations » aims to improve the sustainability and performance of structures and bridges subject to repeated loads. Thanks to their elastomeric properties, these supports absorb and dissipate a significant part of mechanical energy, thus reducing the efforts of vibrations and dynamic efforts on infrastructure. And at the end, present how to calculate the sets of support. This research includes 5 chapters:

- Generality on rubber.
- Rubber in construction.
- Rubber behaviour.
- The rubber is damping material.
- Calculation of support devices for bridges.

Keywords: rubber, insulator, rubber supports, cyclical stresses, sets of support in freight elastomers.

## المخلص

يقدم هذا المشروع بحثاً عن موضوع "استخدام الدعم المطاطي في امتصاص طاقة التمييز الدوري" إلى تحسين استدامة وأداء الهياكل والجسور الخاضعة للأحمال المتكررة. بفضل خصائصها المرنة، تدعم هذه الدعم امتصاص وتبديد جزء كبير من الطاقة الميكانيكية، مما يقلل من جهود الاهتزازات والجهود الديناميكية على البنية التحتية. وفي النهاية، قدم كيفية حساب مجموعات الدعم. يتضمن هذا البحث 5 فصول:

- عموميات على المطاط.
- المطاط في البناء.
- سلوك المطاط.
- المطاط هو تخميد المواد.
- حساب أجهزة الدعم للجسور.

الكلمات المفتاحية: المطاط، عازل، دعائم المطاط، ضغوط دورية، مجموعات من الدعم في المرنة الشحن.

# TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS .....	3
DEDICACE.....	4
RESUME.....	5
ABSTRACT .....	6
الملخص .....	7
LISTE DES FIGURES.....	12
LISTE DES TABLEAUX .....	14
LISTE DES NOTATIONS .....	15
1 Introduction .....	17
1.1 Définition de caoutchouc :.....	17
1.1.1 Historique du caoutchouc :.....	17
1.1.2 Production :.....	18
1.1.3 La structure du caoutchouc : .....	18
1.1.4 Mise en œuvre et sa fabrication : .....	19
1.2 Les types de caoutchouc :.....	20
1.2.1 Caoutchouc naturel (NR) : .....	20
1.2.2 Caoutchouc synthétique : .....	20
1.2.3 Caoutchouc chloroprène (Néoprène CR) :.....	21
1.3 Classification des caoutchoucs :.....	22
1.3.1 Caoutchoucs à usage général : .....	22
1.3.2 Caoutchoucs à usages spéciaux :.....	22
1.3.3 Caoutchoucs à usages très spéciaux :.....	23
1.4 Les caractéristiques de caoutchouc : .....	23
1.4.1 Propriétés physiques :.....	23
1.4.2 Propriétés chimiques : .....	23
1.4.3 Propriétés mécaniques :.....	23
1.5 L'utilisation et l'importance du caoutchouc : .....	24
1.6 Les inconvénients du caoutchouc :.....	25
1.6.1 Caoutchouc naturel :.....	25
1.6.2 Caoutchouc synthétiques :.....	25
2 Introduction .....	28

2.1	Application du caoutchouc dans la construction : .....	28
2.1.1	Étanchéité : .....	28
2.1.2	Joints et profilés spécifiques : .....	28
2.1.3	Revêtements de sols : .....	30
2.1.4	Protection contre les chocs et les vibrations : .....	30
2.1.5	Anti-vibratoires et Amortissement : .....	31
2.2	Applications spécifiques : .....	31
2.2.1	Amélioration des caractéristiques mécaniques d'un sol contenant des déchets caoutchouteux : .....	32
2.2.2	Béton caoutchouté : .....	33
2.2.3	Les déchets des pneus : .....	33
2.3	La relation entre les propriétés de caoutchouc et son rôle : .....	34
2.3.1	Le rôle du caoutchouc dans la réduction des vibrations et des chocs : .....	34
2.3.2	Explication simple de l'énergie générée par les vibrations et les chocs : .....	34
3	Introduction .....	37
3.1	Comportement physicochimique de caoutchouc : .....	37
3.1.1	La température : .....	37
3.1.2	Renforcement des élastomères : .....	38
3.1.3	La vulcanisation : .....	39
3.1.4	Influence du nombre de ponts : .....	39
3.1.5	La cristallisation : .....	40
3.1.6	Le vieillissement : .....	41
3.2	Comportement mécanique de caoutchouc : .....	41
3.2.1	L'élasticité caoutchoutique : .....	41
3.2.2	La viscoélasticité des élastomères : .....	46
3.2.3	Hystérésis : .....	48
3.2.4	Viscosité : .....	49
3.2.5	L'effet Mullins : .....	50
3.2.6	L'effet Payne : .....	52
3.3	Le comportement des sols avec les déchets caoutchoutique : .....	53
3.3.1	L'effet de l'ajout du caoutchouc sur le comportement des sols : .....	53
3.3.2	Résistance à la compression : .....	53
3.3.3	Résistance à la traction : .....	54
4	Introduction : .....	57
4.1	Définition d'amortisseur en caoutchouc : .....	57
4.2	Le caoutchouc comme un matériau d'amortisseur : .....	57

4.2.1	Dans l'industrie mécanique :	57
4.2.2	Dans le bâtiment :	59
4.2.3	Amortissement (absorption de l'énergie sismique) sous fondation :	59
4.3	Les caractéristiques qui permettent d'être amortisseur :	61
4.3.1	Flexibilité et résilience :	61
4.3.2	Isolation des vibrations :	61
4.3.3	Résistance à la température :	61
4.3.4	Capacité de charge :	61
4.4	Avantages des amortisseurs en caoutchouc :	61
4.4.1	Réduction des vibrations et du bruit :	61
4.4.2	Amélioration de la fiabilité de l'équipement :	61
4.4.3	Amélioration de la sécurité :	62
4.4.4	Flexibilité de conception :	62
4.4.5	Propriétés élastiques :	62
4.4.6	Facilite d'entretien :	62
4.4.7	Durabilité et résistant :	62
4.5	Effet du séisme sur les ponts :	62
4.5.1	La perte d'assise :	63
4.5.2	La fragilité :	63
4.5.3	La liquéfaction et le tassement des sols :	65
4.6	Résolvez les problèmes mentionnés précédemment :	66
4.6.1	Isolation sismique à la base :	66
4.7	L'importance de son appareilles dans les ouvrage de type dalle de pont :	68
4.8	Principe de L'isolation sismique des ponts :	68
4.9	Analyse des structures isolées à la base :	69
4.10	Système par appuis en élastomère :	71
	Note importante :	72
4.11	Modification des propriétés mécaniques de caoutchouc :	72
5	Introduction :	75
5.1	Définition des appareilles d'appuis et notre rôle :	75
5.2	Les différents types des appareils d'appuis :	76
5.3	Classification des appareilles d'appuis :	77
5.3.1	Appareil d'appuis fixe : il ne permet que la rotation du tablier en ce point. ....	77
5.3.2	Appareil d'appuis mobile :	77
5.3.3	Appareils d'appuis en élastomère fretté :	77

Figure 5-4 : Appareils d'appuis en élastomère fretté. ....	78
5.4 L'importance de son appareil dans les ouvrages de type dalle de pont :.....	78
5.5 Principe de L'isolation sismique des ponts :.....	78
5.6 Les paramètres puits en compte dans le calcul des isolateurs (appareils d'appuis) :	79
5.6.1 Les paramètres mécaniques :.....	79
5.6.2 Les paramètres géométriques des isolateurs : .....	80
5.6.3 Les paramètres du site :.....	80
5.6.4 Les paramètres de sécurité : .....	80
5.7 Définition d'un silent bloc sous fondation de pont : .....	80
5.7.1 Fonctionnement :.....	82
5.7.2 Les avantages de silent bloc sous fondation de pont :.....	82
5.7.3 Applications : .....	82
5.8 Modalisation numérique par élément finit : .....	83
5.9 Exemple de calcul :.....	83
5.9.1 Les normes et réglementations applicables :.....	83
5.9.2 Dimensionnement des appareils d'appui : .....	84
5.9.3 Aire de l'appareils d'appui :.....	84
5.9.4 Détermination de la hauteur nette de l'élastomère :.....	85
5.9.5 Dimension en plan de l'appareil :.....	85
5.9.6 Répartition des efforts horizontaux sur l'infrastructure : .....	86
5.9.7 Vérification des contraintes :.....	87
5.9.8 Dimensionnement des frettes : .....	89
5.9.9 Ferrailage du dé d'appui : .....	89
CONCLUSION GENERALE .....	92
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	93

## LISTE DES FIGURES

- Figure1-1: Le liquide du latex (*Hévéa basiliensis*).
- Figure1-2 : Schéma de fabrication de caoutchouc.
- Figure2-1 :Schéma des joints du rupture et dilatation.
- Figure2-2: joints de construction.
- Figure2-3: Etanchéité pou fenêtre (joint gonflables ).
- Figure2-4: Dalle - souple.
- Figure2-5: Le caoutchouc sous fondation.
- Figure2-6: Antivibratoires du caoutchouc dans les appuis de pont.
- Figure2-7 : La poudrette de caoutchouc.
- Figure2-8: Un talus pneumatique.
- Figure3-1: Evolution du module de Young et l'angle de perte en fonction de la température.
- Figure3-2: Formation d'un réseau par les ponts sulfures.
- Figure3-3: influence du degré de réticulation sur les propriétés mécaniques d'un élastomère.
- Figure3-4: cristallisation sous contraintes.
- Figure3-5: Caractère hyperélastiqué d'un élastomère en traction uni axiale.
- Figure3-6 : La courbe contrainte-déformation du caoutchouc NR.
- Figure3-7 : La courbe contrainte-déformation du caoutchouc IR.
- Figure3-8 : La courbe contrainte-déformation du caoutchouc polybutadiène BR.
- Figure3-9 : La courbe contrainte-déformation du caoutchouc SBR.
- Figure3-10 : La courbe contrainte-déformation du caoutchouc EPDM.
- Figure3-11: Classification des élastomères (viscoélastique ou viscoplastique).
- Figure3-12: Composante de la déformation en régime sinusoïdal (Petite déformation).
- Figure 3-13 : Evolution du module élastique avec la température.
- Figure3-14: Evolution des composantes dynamique avec la température.
- Figure3-15: Variation de l'hystérésis pour un thermoplastique en fonction de la déformation et de la température.
- Figure3-16: courbe de traction cyclique.
- Figure3-17:schématization de l'effet Mullins.
- Figure3-18: analyse de l'effet payne.
- Figure3-19: Effet de la teneur fibres en caoutchouc des pneus usée et la pression de sur le potentiel de gonflement de sol.

Figure3-20: Effet des granulats caoutchouc sur la résistance en compression (a) et le module d'élasticité (b).

Figure3-21: Effet des granulats caoutchouc sur la réduction des résistances en (Flexion/traction/compression).

Figure 4-1: Le caoutchouc dans le matériels de construction.

Figure 4-2: Amortissement en caoutchouc sous fondation.

Figure4-3 : Chute du tablier lors du tremblement de terre.

Figure4-4 : Chute d'appuis de pont lors du tremblement de terre.

Figure4-5 : Rupture des piles par cisaillement lors du séisme.

Figure4-6 : tassement différentiel des piles d'un pont route.

Figure4-7 : Principe de l'isolation sismique à la base.

Figure4-8 : Types de systèmes d'isolation sismique à la base.

Figure4-8 : Effet de l'augmentation de la période et du taux d'amortissement visqueux.

Figure4-9 : Comparaison des trois méthodes de conception parasismique.

Figure4-10 : Spectre de dimensionnement modifié pour les ponts isolés à la base.

Figure4-11 : Isolateurs sismiques en élastomère typiques et leurs courbes de comportement.

Figure4-12 : Modèle d'une couche de caoutchouc confinée verticalement soumis à des efforts (a) de compression, (b) de cisaillement et (c) de flexion.

Figure 5-1: Isolateur sismique en élastomère typique.

Figure 5- 2 : Les différents types des appareils d'appuis.

Figure 5-3: Les schémas de chaque types des appareils d'appuis.

Figure 5-4 : Appareils d'appuis en élastomère fretté.

Figure 5- 4 : Fonctions d'appareils d'appuis.

Figure 5- 5 : Le silent bloc.

Figure 5- 6 : l'installation de silent bloc

Figure 5- 7 : Dimension en plan de l'appareil d'appuis.

Figure 5- 8 : vue en plan d'un dé d'appui.

Figure 5-9: Contrainte normale sur les feuilles fretté.

Figure 5- 10 : Contrainte de cisaillement sur les feuilles fretté.

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 0-1:Formule chimique de chaque type du caoutchouc.

Tableau 0-2:Les différents types de caoutchouc.

Tableau 5-Les normes et réglementations utiliser.

## LISTE DES NOTATIONS

$T_g$ : La température d'accès pour chaque type de caoutchouc.
ELU : Etat limite ultime.
$N_{max}$ : Effort normal maximal appliquée sur l'appareil d'appuis.
$N_{min}$ : Effort normal minimal appliquée sur l'appareil d'appuis.
$n$ : nombre de feuilles élémentaires d'élastomère.
$e$ : épaisseur d'une feuille élémentaire.
$t$ : épaisseur d'une frette intermédiaire.
$a$ : coté perpendiculaire à l'axe de l'ouvrage.
$b$ : coté parallèle à l'axe longitudinal de l'ouvrage.
$\overline{\sigma}_m$ : Contrainte limite de compression de l'appareil d'appui $\overline{\sigma}_m = 15 \text{MPa}$ .
$\sigma_m$ : Contrainte calculée de compression de l'appareil d'appui.
U : retrait, fluage et température.
G : Module d'élasticité transversale.
$\tau_H$ : La contrainte de tangentielle due à la déformation lente.
$\Delta m$ : Déformation lente (retrait, fluage, température).
$t_s$ : Epaisseur de frette métallique.
t : Epaisseur de frette d'élastomère.
S : désigne la surface chargée en $\text{m}^2$
G : poids propres du tablier.
$\xi_H$ : Accélération horizontale.
$\xi_v$ : Accélération horizontale.
$\xi_s$ : Poids propre du tablier.
S : La section latérale sur laquelle agit le vent
$U_1$ : Déplacement dû au déplacement (température, retrait et fluage).
T : Hauteur nette de l'élastomère.
$H_2$ : Effort de freinage.
$\alpha_0$ : Rotation supplémentaire pour tenir compte des imperfections de pose.
$\alpha_T$ : Rotation maximale de l'appareil d'appui (en service à vide).
F : Coefficient de frottement.
$\sigma_e$ : Limite d'élasticité en traction de l'acier constructif des frettes.
$A_{fs}$ : Section de ferrailage inférieur ou d'éclatement (frettes sup).
$A_p$ : Armatures de profondeur.
A : Section de ferrailage inférieur ou d'éclatement « frettes inf » .
Z : profondeur de fret .



## Introduction générale

Dans de nombreux secteurs industriels, tels que la construction, l'automobile et les dispositifs d'isolation sismique, les matériaux capables d'absorber et de dissiper efficacement l'énergie jouent un rôle essentiel pour garantir la sécurité et la durabilité des structures. Le caoutchouc, grâce à ses propriétés élastiques et amortissantes s'est imposé comme un matériau clé pour répondre à ces exigences. Les supports en caoutchouc, en particulier, offrent des solutions performantes pour la résorption de l'énergie sous sollicitations cycliques, comme celles générées par les vibrations, les impacts ou les charges dynamiques.

Les sollicitations cycliques, répétées sur une longue période, peuvent entraîner une dégradation mécanique des matériaux et compromettre leur performance. L'étude de la réponse des supports en caoutchouc face à ces contraintes est cruciale pour concevoir des systèmes plus fiables et résistants. En effet, une meilleure compréhension de leur comportement sous des cycles de charges successifs permet non seulement d'optimiser leur performance mais aussi de réduire les coûts liés à l'entretien ou au remplacement prématuré.

Cette recherche a pour objectif d'analyser le comportement mécanique des supports en caoutchouc soumis à des sollicitations cycliques, en mettant en évidence les mécanismes de dissipation d'énergie et les facteurs influençant leur efficacité, notamment la fréquence et l'amplitude des cycles. Elle vise également à développer des modèles prédictifs permettant d'anticiper les performances de ces supports dans diverses conditions d'utilisation.

Pour atteindre ces objectifs, une étude bibliographique est réalisée, montrant des échantillons de supports en caoutchouc soumis à des tests cycliques dans un laboratoire spécialisé, où la dissipation d'énergie est mesurée en fonction de divers paramètres. Parallèlement, des modèles théoriques permettront de prédire le comportement du matériau. Cette approche permettra d'obtenir une vision globale et précise du rôle des supports en caoutchouc dans la résorption de l'énergie.

Ainsi, cette étude ambitionne d'introduire ce matériau structurel afin de fournir des solutions innovantes et adaptées aux défis posés par les sollicitations cycliques, renforçant la fiabilité des structures et des dispositifs utilisant ces matériaux.

## Chapitre 01 : Généralités sur le caoutchouc

### 1 Introduction

Ce premier chapitre a pour but la présentation globale de notre ouvrage avec ses caractéristiques et ses éléments constatifs, les caractéristiques mécaniques du sol, la zone d'implantation, ainsi que laréglementation utilisée.

#### 1.1 Définition de caoutchouc :

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

Le caoutchouc est un matériau élastique et imperméable naturellement produits à partir de la sève de l'arbre a caoutchouc (Hévéa basiliens),soit de façon synthétique à partir de monomère issus d'hydrocarbures fossiles, il fait partie de la famille des élastomères, originaire d'Amérique du sud, notamment du Brésil (voir la figure1-1).



Figure1-2: Le liquide du latex (Hévéa basiliensis).

##### 1.1.1 Historique du caoutchouc :

Aux XVIIème siècles, les Européens découvrent l'usage du caoutchouc chez les indiens d'Amérique Centrale et d'Amérique du Sud. Ces derniers l'utilisent notamment pour la confection de balles à jouer. En 1735, le français Charles Marie de la Contamine rapporte des échantillons de latex français caoutchouc à partir de l'expression indienne (Cao-Tchou). Le

caoutchouc est extrait du latex, un liquide blanc laiteux présent dans les Mayas et les Aztèques, utilisaient déjà le caoutchouc avant l'arrivée des Européens.

Dans le langage courant les élastomères sont appelés les caoutchoucs, ce mot est né de deux mots indiens : 'Cao' et 'Tchou' qui signifient ensemble 'bois qui pleure'. Le caoutchouc est un produit naturel sous forme liquide appelé latex. Ce dernier est produit par une famille d'arbres équatoriaux (les Hévéas).

### 1.1.2 Production :

- Le Brésil et les indiens d'Amérique était historiquement le principal producteur de caoutchouc.
- Aujourd'hui la Thaïlande, l'Indonésie et la Malaisie sont les plus grands producteurs mondiaux.

### 1.1.3 La structure du caoutchouc :

Il s'agit d'un poly isoprène de formule chimique (C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>). Ils se caractérisent par de très bonnes propriétés mécaniques, après vulcanisation, mais de faibles tenues chimiques et une résistance médiocre à la chaleur comme (le tableau 1-1) présente.

Tableau 1-1:Formule chimique de chaque type du caoutchouc.

élastomères	formules
polyisoprène (IR) et caoutchouc naturel (NR)	
polybutadiène (BR)	
copolymère butadiène styrène (SBR)	
terpolymère d'éthylène propylène et diène (EPDM)	
copolymère isobutylène isoprène (IIR)	
polychloroprènes (CR)	
copolymères butadiène acrylonitrile (NBR)	

### 1.1.4 Mise en œuvre et sa fabrication :

#### 1.1.4.1 Caoutchouc naturel :

N'est pas un matériau prêt à l'emploi, il nécessite diverses opérations de préparation avant de pouvoir être industriellement utilisé. Les étapes sont les suivants :

- Formulation de la recette.
- Processus de mélange.
- La mise en forme par extrusion.
- La mise en forme par moulage.
- La mise en forme par calandrage.

#### 1.1.4.2 Caoutchouc synthétique :

La production de caoutchouc synthétique commence avec un mélange d'hydrocarbures, généralement dérivé du pétrole ou du charbon. Ce mélange raffiné donne du naphta, une huile inflammable qui, lorsqu'elle est combinée avec du gaz naturel, produit des monomères comme le butadiène, le styrène, l'isoprène, le chloroprène, l'éthylène et le propylène. La polymérisation, facilitée par un catalyseur et de la vapeur de traitement, forme des chaînes polymères pour créer du caoutchouc. Si nécessaire, les caoutchoucs synthétiques peuvent subir une vulcanisation supplémentaire à ce stade.

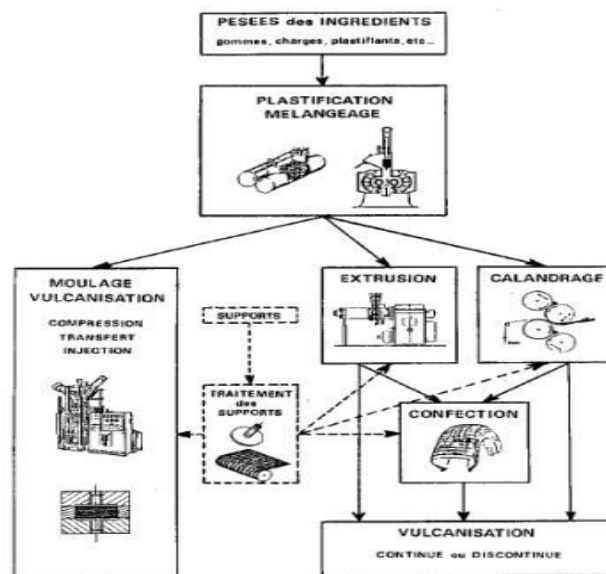


Figure1-2 : Schéma de fabrication de caoutchouc.

## 1.2 Les types de caoutchouc :

Les principaux types sont :

**1.2.1 Caoutchouc naturel (NR) :** extrait du latex, une substance produite par certain arbre, notamment l'hévéa.

- Provenant directement de l'arbre Hévéa basiliensis.
- Très élastique et résistant.
- Utiliser dans les pneumatiques de haute qualité, les gants chirurgicaux, les joints.

**1.2.2 Caoutchouc synthétique :** fabriqué à partir de polymères synthétiques issus de la pétrochimie, il se compose de cinq types :

- **Caoutchouc styrène – butadiène (SBR) :**

- Le plus courant.
- Bon marché et résistant à l'usure.
- Utilisé dans les pneus de voiture.

- **Caoutchouc nitrile (NBR) :**

- Résistant aux huiles et carburants.
- Application industrielles.
- Utilisé dans les joints, tuyaux, gants de protection.

- **Caoutchouc silicone (MQ) :**

- Résistant aux températures extrêmes.
- Très inerte et hypoallergénique.
- Utilisé en médecine, électronique.

- **Caoutchouc butyle (IIR) :**

- Très imperméable aux gaz.
- Grand résistant chimique.
- Utilisé dans les chambres à air.

- **Caoutchouc éthylène propylène diène (EPDM) :**

- Résistant aux intempéries.
- Parfait pour les joints d'étanchéité.
- Utilisé en construction, automobile.

**1.2.3 Caoutchouc chloroprène (Néoprène CR) :**

- Résistant aux intempéries.
- Isolation électrique.
- Utilisé dans les combinaisons de plongée.

Tableau 1-2:Les différents types de caoutchouc.

famille	nomenclature	symbole	Tg
Caoutchouc Naturels où Synthétiques	Caoutchouc naturel  Polisoprène	NR  IR	-72°C
Caoutchoucs BUNA	Copolymère styrène- Butadiène  Polymère de butadiène	SBR  BR	-50°C  -112°C
Caoutchouc Éthylène propylène	Terpolymère Éthylènepropylène-diène	EPDM	-55°C
Caoutchouc butyle	Copolymères isobutylèneisoprène	IIR	-66°C
Caoutchouc	Copolymères	NBR	-45°C

Nitriles	butadiéneacrylonitrile  (Basse teneur en ACN)  Copolymères butadiéneacrylonitrile  (Haute teneur en ACN)	NBR	-20°C
Néoprène	Polychloropérene	CR	45°C
Silicones	Polydiméthylsiloxane	MQ	-120°C
	Polydiméthyl- Vinylméthylsiloxane	VMQ	-120°C
	Silicones fluorés MQ	FVMQ	-70°C

### 1.3 Classification des caoutchoucs :

On compte plus d'une quinzaine de familles de caoutchoucs. La classification courante consiste à séparer les caoutchoucs en trois catégories (les sigles utilisés sont ceux qui sont recommandés par la norme ISO).

#### 1.3.1 Caoutchoucs à usage général :

Ils ne résistent pas aux huiles, mais résistent bien aux acides et aux bases. Ils font preuve d'une élasticité exceptionnelle. Applications dans l'automobile : supports moteurs, balais d'essuie-glaces. Les types les plus utilisés à cet usage est : (IR, NR, BR, SBR).

#### 1.3.2 Caoutchoucs à usages spéciaux :

Ils présentent une bonne résistance vis-à-vis des liquides agressifs (solvants, acides) ou des huiles et des carburants, et aussi un meilleur comportement à haute température. Ils vieillissent

bien. Applications dans l'automobile : amortisseurs, joints de vitrage, de pare-brise, courroies de distribution, durites. Les types les plus utilisées à cet usage est : (EPDM, IIR, CR, NBR).

### **1.3.3 Caoutchoucs à usages très spéciaux :**

Ils ont d'excellentes tenues thermiques et chimiques, et ils représentent plus de 5% de la consommation totale. Applications dans l'automobile : fils d'allumage, bagues d'étanchéité. Les types les plus utilisées à cet usage est : (VMQ, PVMQ, CM, CSM, FKM, ACM, CO, ECO, GECO, HNBR).

## **1.4 Les caractéristiques de caoutchouc :**

Le caoutchouc possède plusieurs caractéristiques importantes qui le rendent unique et utile dans de nombreuses applications.

### **1.4.1 Propriétés physiques :**

- Elasticité exceptionnelle il faut s'étirer jusqu'à plusieurs fois sa longueur initiale et reprendre sa forme originale.
- Grand flexibilité et résilience.
- Isolant électrique et thermique.
- Imperméabilité naturelle.

### **1.4.2 Propriétés chimiques :**

- Résistant à de nombreux produits chimiques.
- Bonne résistance à l'eau et à l'humidité.
- Stabilité à différentes températures.
- Possibilité de vulcanisation pour améliorer ses performances.

### **1.4.3 Propriétés mécaniques :**

- Amortissement des chocs.
- Bonne résistance à l'usure.
- Capacité d'absorption des vibrations.
- Faible coefficient de friction.

## 1.5 L'utilisation et l'importance du caoutchouc :

Le caoutchouc reste un matériau essentiel dans de nombreux domaines technologiques et industriel grâce à sa polyvalence et ses propriétés uniques, et ce sont les différents domaines dans lesquels il est utilisé :

- **Construction :**

- Étanchéité des toitures.
- Isolation des bâtiments.
- Revêtements de sol.
- Joints de dilatation.

- **Industrie électrique :**

- Câbles électriques.
- Gaines isolation.
- Protections de composants électriques.

- **Industrie automobile :**

- Fabrication de pneus.
- Joints et durites.
- Systèmes d'amortissement.
- Courroies de transmission.

- **Équipements médicaux :**

- Gants chirurgicaux.
- Tubes médicaux.
- Préservatifs.
- Sondes et cathéters.

- **Équipements sportifs :**

- Ballons.

- Chaussures.
- Protection.
- Equipements de musculation.

## **1.6 Les inconvénients du caoutchouc :**

### **1.6.1 Caoutchouc naturel :**

- Faible résistance à la lumière et aux rayons UV.
- Faible durabilité contre l'oxydation et l'ozone.
- Vulnérabilité aux températures extrême à basse température le caoutchouc peut devenir rigide et cassant. À haute température il peut se ramollir ou se dégrader, et sensibilité à certaine production chimique.
- Le recyclage du caoutchouc reste coûteux et complexe, limitant sa durabilité environnementale.
- Les coûts de production nécessitent de grandes plantation d'hévéas, ce qui peut avoir un impact environnemental, et la viabilité dépendent des conditions économiques et de la culture des plantes.

### **1.6.2 Caoutchouc synthétiques :**

- Dépendance à l'égard des produits pétroliers et des bioproduits.
- Faible résistance à la traction comparative.
- Vulnérabilité aux températures extrême à basse température le caoutchouc peut devenir rigide et cassant. À haute température il peut se ramollir ou se dégrader, et sensibilité à certaine production chimique.
- Impact environnemental, dérivé du pétrole, contribue à la pollution et au changement climatique.
- Le coût de production fluctue avec les produits pétroliers et les bi produits, et même son recyclage.

**Conclusion :**

En conclusion, le choix du caoutchouc dépend de ses propriétés spécifiques et son utilisation, tout en tenant compte de son impact environnemental et ses limitations techniques. Ses applications sont infiniment variées, allant de la protection individuelle aux systèmes techniques les plus sophistiqués, témoignant de sa polyvalence et de son importance technologique.



## Chapitre 02 : Le caoutchouc dans la construction

### 2 Introduction

Le caoutchouc est un matériaux polyvalent et indispensable dans la construction moderne, offrant des solutions techniques innovantes et performantes pour répondre aux défis architecturaux et environnementaux actuels, grâce à ses caractéristiques mécaniques et physiques.

#### 2.1 Application du caoutchouc dans la construction :

Le caoutchouc est un matériau de base pour la plupart des industries.il est couramment utilisé dans le domaine de construction.

##### 2.1.1 Étanchéité :

- **Toitures et façades :**

Le caoutchouc est largement utilisé pour les toitures en raison de sa durabilité, sa résistance aux intempéries et de sa capacité à rester flexible même à basse température.

- **Tuyaux et tubes :**

Les tubes et les tuyaux en caoutchouc sont utilisés pour le transport de fluides dans les systèmes de plomberie et de chauffage des bâtiments. Ces tubes doivent résister à la pression, aux températures extrêmes, et aux produits chimiques, ce que le caoutchouc peut assurer grâce à ses propriétés spécifiques.

##### 2.1.2 Joints et profilés spécifiques :

- **Joints dilatation :** est conçu pour absorber les vibrations des matériaux d'une structure due aux changements de température, aux tassements, aux balancements causés par le vent, et aux mouvements sismiques. il permet au béton de se contracter librement sans créer de pression sur la structure(la Figure2-9) ci-dessous présente.
- **Joints de rupture :** utilisé pour contrôler la fissuration. Lorsqu'il commence à durcir, le béton rétrécit et des petites fissures se créent. Pour contrôler ces fissures, des amorces de fissures sont faites comme (la Figure2-10) ci-dessous présente.

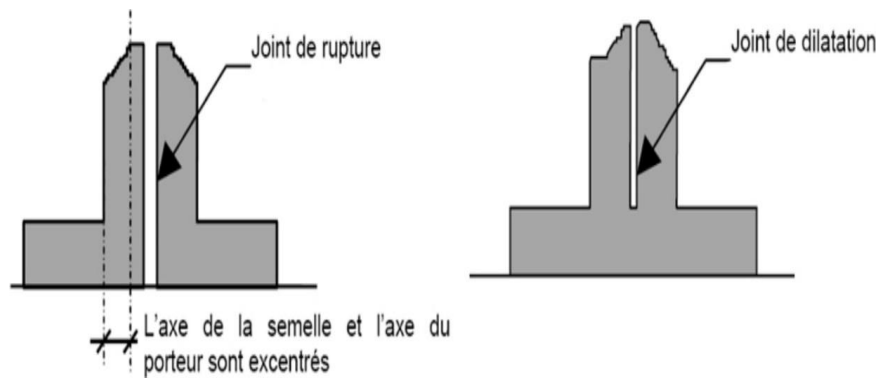


Figure2-11 :Schéma des joints du rupture et dilatation.

- **Joints de construction** : séparer deux béton d'âges différents comme (la Figure2-2) ci-dessous présente.



Figure2-12: joints de construction.

- **Joints gonflables** : permettent l'ajustement de l'étanchéité en se dilatant. Ils sont utilisés dans des applications nécessitant une adaptation dynamique, comme les portes de chambres stériles ou les environnements où la pression et la température varient comme (la Figure2-3) ci-dessous présente.



Figure2-13:Etanchéité pou fenêtre (joint gonflables ).

### 2.1.3 Revêtementsde sols :

- Les dalles ou tapis en caoutchouc sont installés dans les zones à fort trafic, les terrains de sports, ou les espaces industriels pour leur résistance et leur absorption des chocs(la Figure2-4) ci-dessous présente une dalle-souple.



Figure2-14:Dalle - souple.

### 2.1.4 Protection contre les chocs et les vibrations :

- Dans le domaine du bâtiment et des travaux publics, on notera l'utilisation des propriétés antivibratoires du caoutchouc dans les appuis de pont, les plots antisismiques. Ses propriétés d'élasticité et étanchéité sont fréquemment sollicitées pour produire des profilés pour bâtiment des structures gonflables, des réservoirs souples. (La Figure2-5) ci-dessous présente des fondation caoutchoutique placée entre les fondations et la structure comme un antivibratoire contre le séisme.



Figure2-15: Le caoutchouc sous fondation.

### 2.1.5 Anti-vibratoires et Amortissement :

Le caoutchouc est renommé pour ses propriétés anti-vibratoires, ce qui le rend idéal pour les appuis et les supports dans les constructions. Il aide à réduire les vibrations et les chocs, améliorants ainsi le confort et la sécurité des structures. Cela est particulièrement utile dans les bâtiments et les travaux publics où les vibrations peuvent être une préoccupation majeure, réduisent les vibrations et les bruits transmis dans les bâtiments ou sur les infrastructures comme les rails (La Figure2-6) ci-dessous montrent l'utilité des appareils d'appui comme antivibratoire.

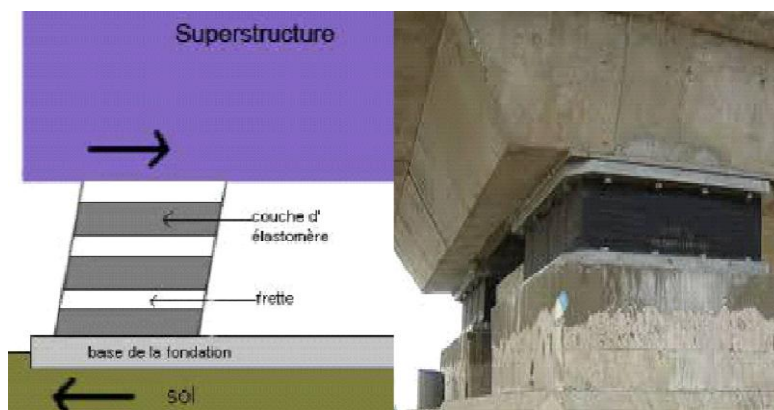


Figure2-16:Antivibratoires du caoutchouc dans les appuis de pont.

## 2.2 Applications spécifiques :

Les déchets caoutchouteux sont considérés comme encombrants et non respectueux de l'environnement. L'industrie automobile est une activité qui consomme un volume important

## Chapitre 02 :Le caoutchouc dans la construction

de caoutchouc, et par conséquent elle est la source principale des déchets de caoutchouc. Il convient donc indispensable, avec l'accroissement continu du nombre de véhicules dans le monde, de trouver des applications innovantes pour absorber une quantité de ces déchets. L'utilisation des déchets caoutchouteux dans le domaine du génie civil a connu aussi un développement rapide durant les dernières années. Dans de nombreux cas, l'utilisation d'un déchet du caoutchouc peut augmenter le facteur de sécurité.

### **2.2.1 Amélioration des caractéristiques mécaniques d'un sol contenant des déchets caoutchouteux :**

Une méthode pour le renforcement des sols pulvérulents est proposée. Cette technique consiste en l'utilisation des déchets caoutchouteux sous forme de poudrette (La Figure 2-7) dans un sable. L'utilisation des caoutchoucs comme renforts aux seins des matrices, dépend essentiellement de la compatibilité des propriétés physiques, mécaniques et chimiques, que possède caoutchouc avec les constituants de la matrice.

Le mélange les échantillons d'argile expansive avec des poudrettes de caoutchouc des pneus usés réduit la pression et l'amplitude de gonflement. Cela peut être attribué au remplacement d'argile gonflante par des poudrettes de caoutchouc des pneus usés et la résistance offerte par les poudrettes agissant par le contact argile - poudrette. Des chercheurs ont également étudié le comportement des sols sableux cimenté avec et sans poudrettes, et ont conclu que l'inclusion de poudrettes entraîne une augmentation de la résistance des échantillons. L'absorption du gonflement des argiles par superposition de couches de matériaux non gonflants tel que le sable, ou par superposition du polystyrène EPS, ou par les géo fibre ou par mélange de l'argile à des copeaux de pneus est une voie prometteuse pour la résolution des problèmes rencontrés lors de la conception sur sols gonflants. Les sols mélangés avec des fibres ont montré que la pression et le potentiel de gonflement sont nettement inférieur au potentiel et à la pression de gonflement en comparaison avec les mêmes sols argileux sans fibres. (La Figure 2-7) ci-dessous présente la poudrette de caoutchouc l'utilise dans le sol pour l'amélioration de ses caractéristiques mécaniques.



Figure2-17 : La poudrette de caoutchouc.

### **2.2.2 Béton caoutchouté :**

Une forme de béton durable dans laquelle les agrégats naturels sont remplacés par des agrégats de caoutchouc de taille similaire. Le béton durable a été accueilli favorablement par les ingénieurs et les chercheurs du monde entier pour réduire la pollution environnementale et ses avantages est :

- Anti-bruit.
- Matériaux parasismiques (anti-vibration).
- Très résistant au vieillissement.

### **Intérêt de poudrette de caoutchouc :**

- Amélioration de la cohésion.
- Diminution de la susceptibilité thermique.
- Augmentation des capacités d'allongement.
- Amélioration des caractéristiques viscoélastiques.

### **2.2.3 Les déchets des pneus :**

L'utilisation des déchets de pneus dans la construction offre des solutions innovantes et durables.

Nous notons quelques types d'utilisation :

- Pour la stabilité d'un talus.

## Chapitre 02 :Le caoutchouc dans la construction

- Stabilité au glissement de terrain.
- Pneu sol, (la figure2.8) présente un talus pneumatique déjà utilisé dernièrement à Alger par une société Italienne.
- Absorbent d'ondes sismiques.

Le but est de reconstituer un mur homogène, le plus dense possible et résistant aux poussées. Dans ce cas, la résistance interne du mur est obtenue par des nappes (soit de pneus liaisonnés entre eux, soit des géotextiles, soit des armatures treillis soudés).



Figure2-18: Un talus pneumatique.

### **2.3 La relation entre les propriétés de caoutchouc et son rôle :**

#### **2.3.1 Le rôle du caoutchouc dans la réduction des vibrations et des chocs :**

Le caoutchouc joue un rôle crucial dans la réduction des vibrations et des chocs grâce à ses propriétés viscoélastiques. Il absorbe efficacement les vibrations grâce à sa structure moléculaire, qui permet une déformation réversible et un amortissement élevé. Utilisé dans divers composants tels que silentblocs et les supports antivibratoires, il améliore le confort et la sécurité en minimisant le bruit et l'usure des machines. De plus, sa capacité à dissiper l'énergie cinétique contribue à prolonger la durée de vie des équipements.

#### **2.3.2 Explication simple de l'énergie générée par les vibrations et les chocs :**

Le caoutchouc possède des propriétés uniques qui permettent de transformer les vibrations et les chocs en énergie ou en amortissement énergétique électrique.

## Chapitre 02 :Le caoutchouc dans la construction

### **2.3.2.1 Récupération d'énergie :**

- Le caoutchouc piézoélectrique peut convertir les déformations mécaniques en électricité.
- Lors de (compression/extensions), il générer une différence de potentiel électrique.
- Idéal pour des zones à forte activité mécanique (ponts, route, zones sismique).

### **2.3.2.2 Amortissement et isolation sismique :**

- Capacité à absorber et dissiper l'énergie des chocs.
- Système antisismique pour bâtiment contre les tremblements de terre.
- Transforme l'énergie des vibrations chaleur en déformation minimales.

## Chapitre 02 :Le caoutchouc dans la construction

### **Conclusion :**

En conclusion, le caoutchouc joue un rôle crucial dans la construction grâce à sa polyvalence et à ses performances techniques. Ses applications dans l'étanchéité, l'isolation et la protection en font un matériau essentiel pour des structures durables et performantes.

## Chapitre 03 : Le Comportement de caoutchouc

### 3 Introduction

Le caoutchouc est un matériau polymère qui présente une propriété caractéristique le comportement de ce matériau soumis à des contraintes comme les chocs, les rayures, l'étirement, les déformations. On définit alors des propriétés comme, dureté, ductilité, élasticité, fragilité, malléabilité, résilience et rigidité. En plus de sa résistance à l'érosion et à la température, il est le meilleur matériau pour réduire les chocs et les vibrations.

#### 3.1 Comportement physicochimique de caoutchouc :

##### 3.1.1 La température :

Pour des températures supérieures, les élastomères se caractérisent par une grande déformabilité et une haute élasticité caoutchoutique. En effet, l'étude des propriétés physiques des polymères, en fonction de la température, montre l'existence de plusieurs états de la matière :

- **État vitreux :**

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

- **État de transition :**

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

- **État caoutchoutique :**

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

- **État d'écoulement :**

Le polymère, bien qu'encore solide, se comporte comme un fluide non Newtonien quasi-incompressible fortement visqueux.

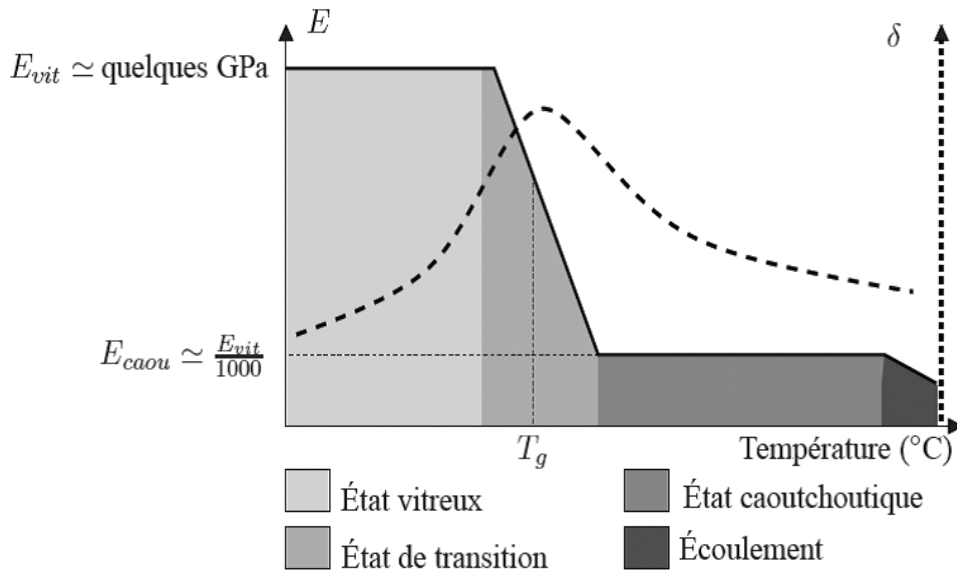


Figure3-22: Evolution du module de Young et l'angle de perte en Fonction de la température.

La température de transition vitreuse  $T_g$  des élastomères varie entre  $-10$  à  $-120$  °C selon leur composition chimique et leur micro structure comme(La Figure3-1)présenteévolution du module de Young et l'angle de perte en fonction de la température.

Les propriétés mécaniques élevées, ainsi que l'imperméabilité et aussi la stabilité au changement de  $T_0$  ont amplifié l'utilisation des matériaux élastomères dans différents domaines notamment dans l'industrie.

### 3.1.2 Renforcement des élastomères :

Le renforcement des élastomères a fait l'objet de nombreuses études afin de dégager les rôles joués par les charges car la majorité des caoutchoucs utilisés pour les applications mécaniques contiennent une charge. Les élastomères sont renforcés grâce à l'incorporation de charges telles que les noirs de carbone ou encore la silice. Ce qui leur confère de meilleures propriétés (résistance à la rupture, abrasion, rigidité etc...). Actuellement, les charges renforçâtes les plus souvent utilisées sont les noirs de carbone. La substitution de cette charge classique par la silice constitue le challenge relevé par Michelin en 1992. Le noir de carbone, qui reste la principale charge renforçant du caoutchouc, se présente sous la forme de petites particules de carbones (20 nm - 50 nm) mélangées à la gomme naturelle avant vulcanisation. Pour obtenir ces matériaux chargés, on effectue la polymérisation en présence des charges : Le polymère constitue alors un réseau continu et les charges forment un agglomérat à l'intérieur du réseau.

## Chapitre 03 : Le comportement de caoutchouc

Le caoutchouc est alors un matériau multiphasique composé de constituants avec des propriétés mécaniques différentes.

Les propriétés d'un élastomère chargé dépendent aussi du taux de charge. De plus, sur le plan économique ces charges permettent la diminution du prix de revient d'une pièce à conditionner tout en conservant ou en améliorant les propriétés mécaniques du matériau.

### 3.1.3 La vulcanisation :

La vulcanisation des élastomères se fait de différentes manières selon l'élastomère, ceci est grâce à l'action d'un agent de vulcanisation qui est généralement le soufre. Ce dernier se fixe sur les chaînes pour former des ponts entre elles. Ce procédé impose la présence de double liaisons sur les chaînes macromoléculaires de l'élastomère et consiste à créer une liaison pontale (poly- ou mono sulfure). Le nombre de liaisons pontales a une très grande influence sur les propriétés des élastomères (la Figure3-2)représente formation d'un réseau caoutchouc par les ponts sulfures.

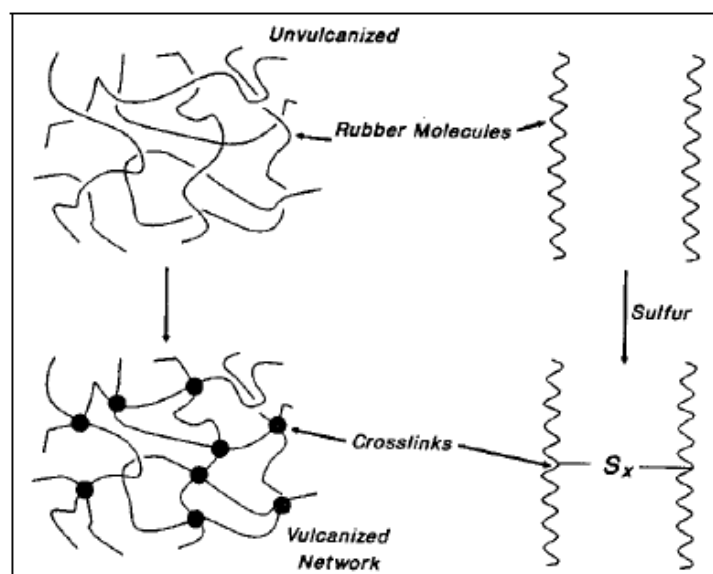


Figure3-23:Formation d'un réseau par les ponts sulfures.

### 3.1.4 Influence du nombre de ponts :

Certaines des propriétés mécaniques tel que l'élasticité, sont considérablement amélioréeslorsque le nombre de ponts (le degré de réticulation) augmente, et autres se dégradent comme le montre (la Figure3-3) ci-dessous présent l'influence du degré de réticulation sur les propriétésmécaniques d'un élastomère. La vulcanisation améliore l'élasticité mais réduit les propriétés à la rupture au-delà d'une limite.

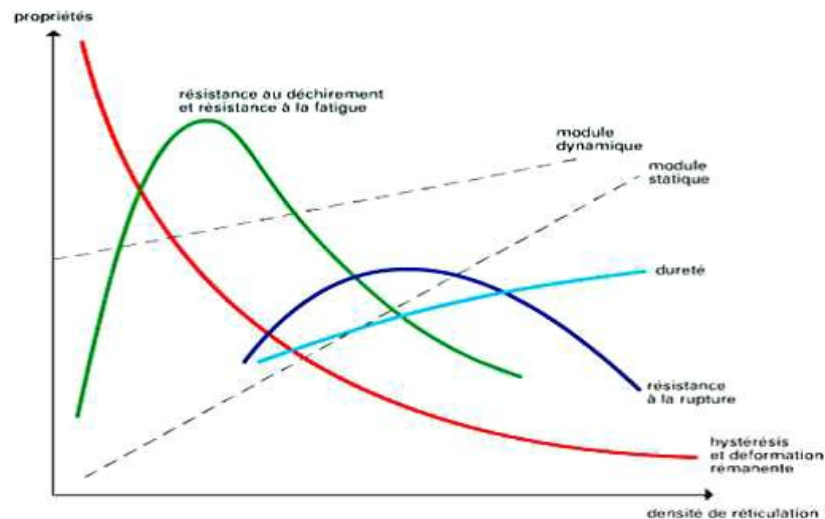


Figure3-24: influence du degré de réticulation sur les propriétés mécaniques d'un élastomère.

### 3.1.5 La cristallisation :

Dans sa configuration non déformée, la microstructure de l'élastomère se présente sous la forme de pelote statique ; où les chaînes macro-moléculaires sont repliés sur elle-même et s'enchevêtrent avec les chaînes voisines. Sous contrainte, ces chaînes entraînent l'alignement progressif dans la direction de chargement, et l'extension des segments situés entre deux points de réticulation, formant ainsi des zones cristallites. Cette cristallisation induite par la déformation se traduit par une rigidification de l'élastomère à partir d'un niveau de déformation important (voir la Figure3-4) qui présente la cristallisation de caoutchouc sous contrainte.

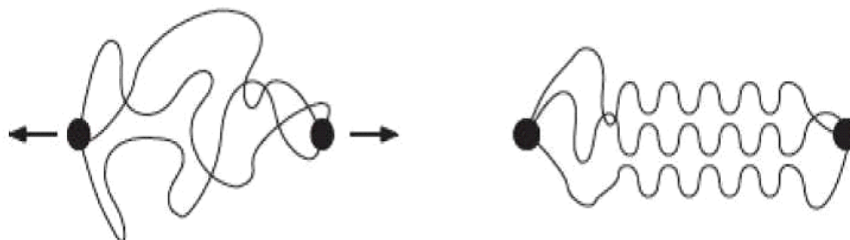


Figure3-25:cristallisation sous contraintes.

## Chapitre 03 : Le comportement de caoutchouc

### 3.1.6 Le vieillissement :

La dégradation des élastomères provient généralement de l'environnement. Ceci est dû à leurs sensibilités à de nombreux facteurs de dégradation (oxygène, par exemple). Celle-ci peut-être d'ailleurs se manifester de façons très diverses : modification de l'aspect (en particulier changement de coloration), apparition de craquelures, poissage accompagnés presque toujours d'une variation importante des propriétés mécaniques. L'oxygène est le facteur le plus critique, et son action est d'autant plus intense que la température.

Le vieillissement par l'oxygène ne génère pas seulement une diminution importante des propriétés mécaniques (diminution de l'allongement à la rupture), mais il s'accompagne aussi souvent d'un durcissement des vulcanisats dû à la réticulation (la plupart des élastomères de synthèse).

## 3.2 Comportement mécanique de caoutchouc :

### 3.2.1 L'élasticité caoutchoutique :

L'élasticité du caoutchouc est causée par le changement de sa conformation molécules de caoutchouc entrave le mouvement des chaînes moléculaire et montre la viscosité. Il s'agit d'une élasticité à caractère essentiellement entropique, c'est-à-dire liée aux changement de conformation des chaines. Ces dernières ont l'aptitude de se déformer au niveau des « points d'ancrage ».

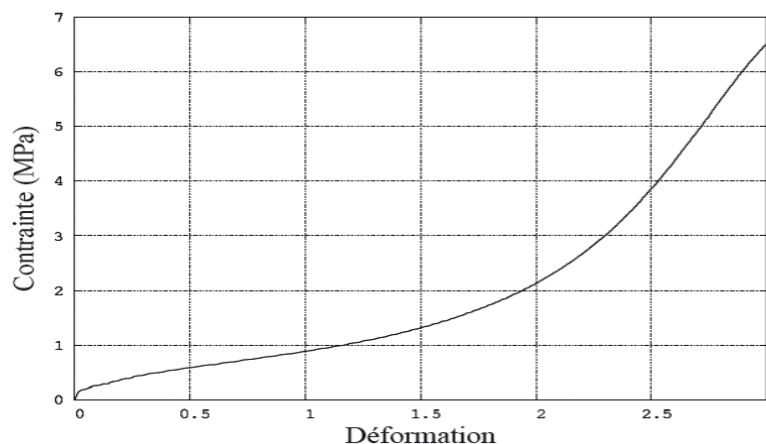


Figure3-26:Caractère hyperélastique d'un élastomère en traction uni axiale.

(La Figure3-5)ci-dessous représente la réponse d'un élastomère à base de silicone à un chargement en traction uni axiale.

## Chapitre 03 : Le comportement de caoutchouc

La courbe nous illustre la capacité de déformation de l'élastomère qui peut atteindre parfois les 700%, et d'une autre part on remarque aussi la non linéarité du comportement. A l'échelle microscopique un élastomère vulcanisé est constitué de longue chaîne moléculaire comportant des points de jonctions. Ces macromolécules forment aussi un réseau tridimensionnel. Sous l'action d'une sollicitation mécanique, ces chaînes moléculaires peuvent glisser les unes sur les autres et changer aussi la configuration microstructurale du réseau moléculaire qui passe d'un arrangement aléatoire suivant la direction de sollicitation. Par conséquent l'élasticité caoutchoutique est de nature entropique.

L'élasticité caoutchoutique varie selon les types de caoutchouc, qui sont principalement des élastomères. Voici les types les plus utilisées et leurs élastiques ;

### 3.2.1.1 Caoutchouc Naturel (NR) :

Très élastique avec une grande extensibilité (jusqu'à 750%) et une résistance à la rupture de 30 MPa. Il est utilisé entre  $-50^{\circ}\text{C}$  et  $+65^{\circ}\text{C}$ .

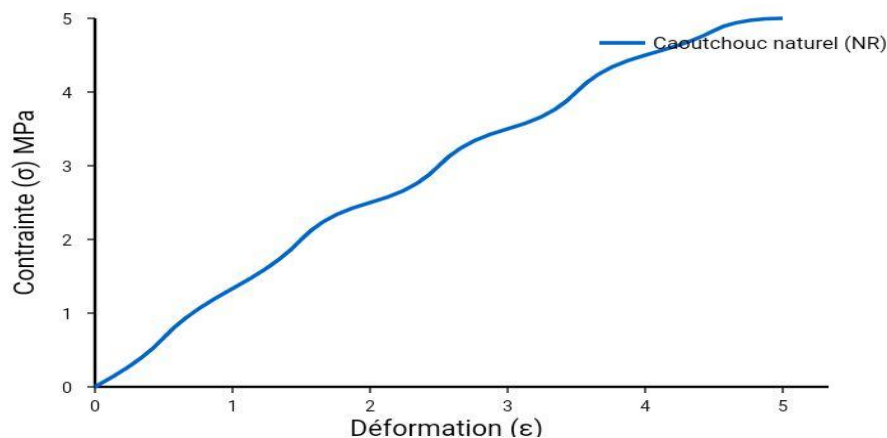


Figure3-27 :La courbe contrainte-déformation du caoutchouc NR.

(La Figure3-6)présente la courbe contrainte-déformation du caoutchouc naturel est non linéaire, avec trois phases : initialement rigide, puis plus souple lors de l'alignement des chaînes polymères, et enfin plus résistant à des déformations élevées. Cette courbe illustre le comportement viscoélastique du caoutchouc naturel, où la proportionnalité entre contrainte et déformation n'est pas constante.

### 3.2.1.2 Caoutchouc Synthétique (IR) :

Similaire au NR, avec des propriétés mécaniques excellentes mais moins résistant à la chaleur

## Chapitre 03 : Le comportement de caoutchouc

et à l'ozone.

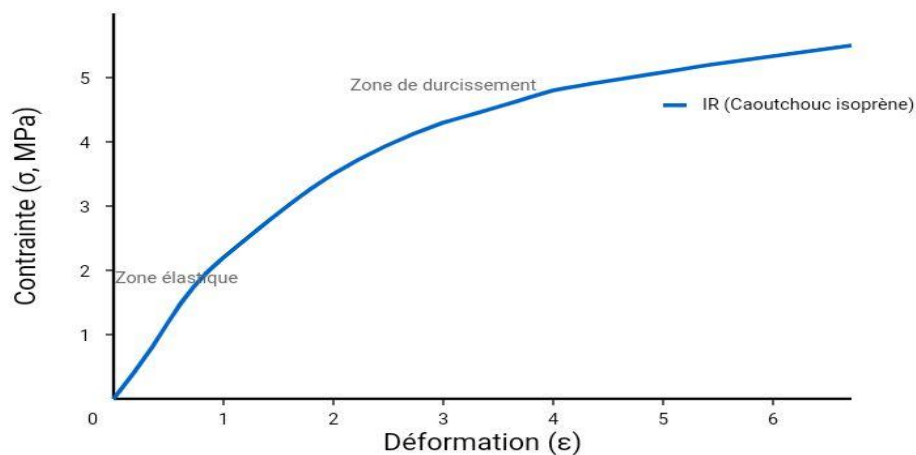


Figure3-28 :La courbe contrainte-déformation du caoutchouc IR.

(LaFigure3-7) représente la courbe contrainte-déformation du caoutchouc IR est non linéaire. Elle commence par une pente élevée (déformation difficile), suivie d'une diminution du module élastique (déformation plus facile) dans la partie médiane, puis d'une augmentation de la pente à haute déformation (déformation plus difficile jusqu'à la rupture). Ce comportement dépend de la composition et du traitement du caoutchouc

### 3.2.1.3 Caoutchouc Polybutadiène (BR) :

Utilisée pour sa grande résistance à l'abrasion, il a une température de transition vitreuse autour de  $-112^{\circ}\text{C}$ .

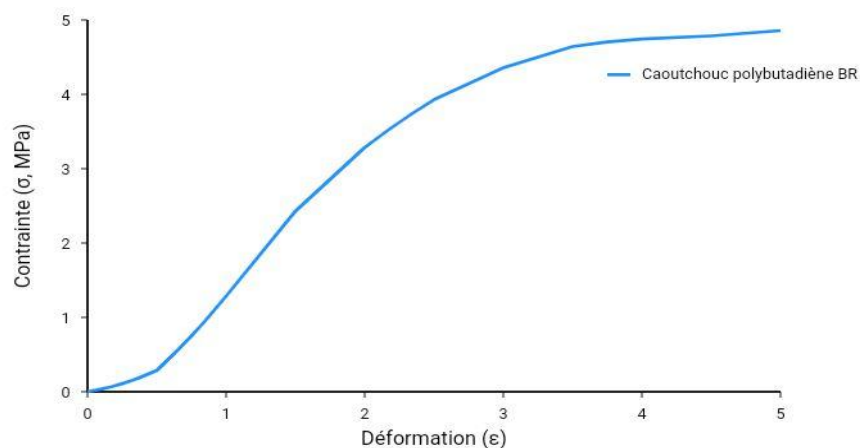


Figure3-29 :La courbe contrainte-déformation du caoutchouc polybutadiène BR.

## Chapitre 03 : Le comportement de caoutchouc

(LaFigure3-8)représente la courbe contrainte-déformation du caoutchouc polybutadiène (BR) est non linéaire. Elle commence par une pente élevée (déformation difficile), suivie d'une diminution du module (déformation plus facile) dans la zone médiane, puis d'une augmentation du module à haute déformation (déformation difficile avant rupture).

### 3.2.1.4 Caoutchouc Styrène-Butadiène (SBR) :

Mois élastique que le NR mais résistant l'abrasion, souvent utilisé dans les pneumatiques.

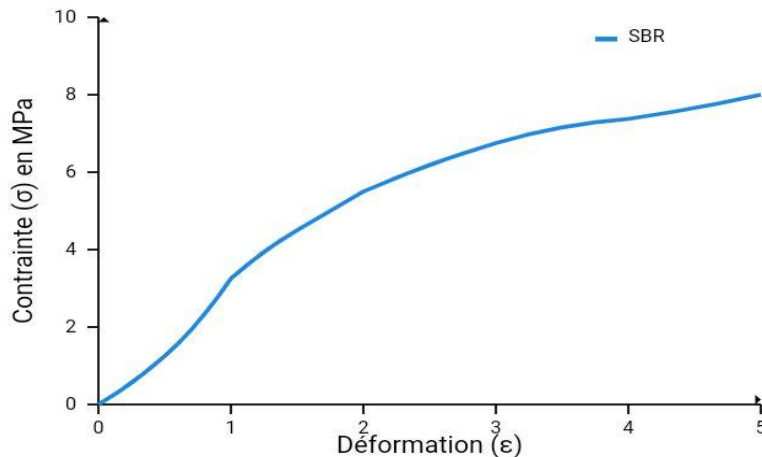


Figure3-30 :La courbe contrainte-déformation du caoutchouc SBR.

(LaFigure3-9)représente la courbe contrainte-déformation du caoutchouc SBR est non linéaire. Elle débute par un module élevé (déformation difficile), suivi d'une diminution du module (déformation plus facile) dans la phase médiane, puis d'une augmentation du module avant rupture (autour de 600%). Ce comportement dépend de la température et des conditions de chargement.

### 3.2.1.5 Caoutchouc Ethylène-Propylène-Diène (EPDM) :

Excellente résistance au vieillissement et aux températures, mais faible résistance aux huiles.

## Chapitre 03 : Le comportement de caoutchouc

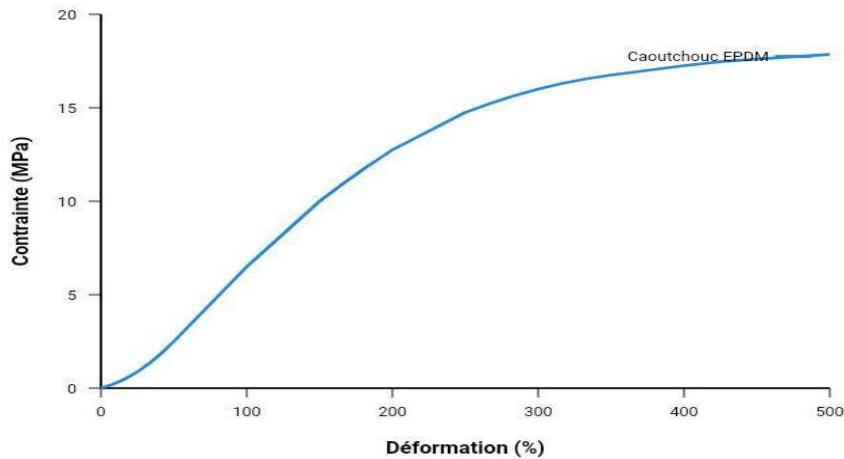


Figure3-31 :La courbe contrainte-déformation du caoutchouc EPDM.

(LaFigure3-10)représente La courbecontrainte-déformation du caoutchouc EPDM est non linéaire et comporte trois phases : initiale (module élevé nécessitant une forte force pour l'étirement), médiane (réduction du module facilitant l'étirement) et finale (augmentation du module rendant l'étirement plus difficile). Les résultats peuvent varier selon la formulation et le traitement du matériau.

Ces élastomères présentent une élasticité caoutchoutique due à l'enchevêtrement de leurs longues chaînes polymériques donc ce sans les plus flexibles.

On a quatre types de comportement mécanique, dépendant :

- De la nature chimique du polymère (rigidité intrinsèque des liaisons pivot, liaisons possibles entre chaînes).
- De la longueur des chaînes.
- De la ramification des chaînes.
- Des liaisons entre chaînes (forces de van der Waals, liaisons hydrogène, pontages).
- De la cristallinité (et donc de la vitesse de refroidissement lors de la fabrication de la pièce).
- De la température et de la vitesse de traction.

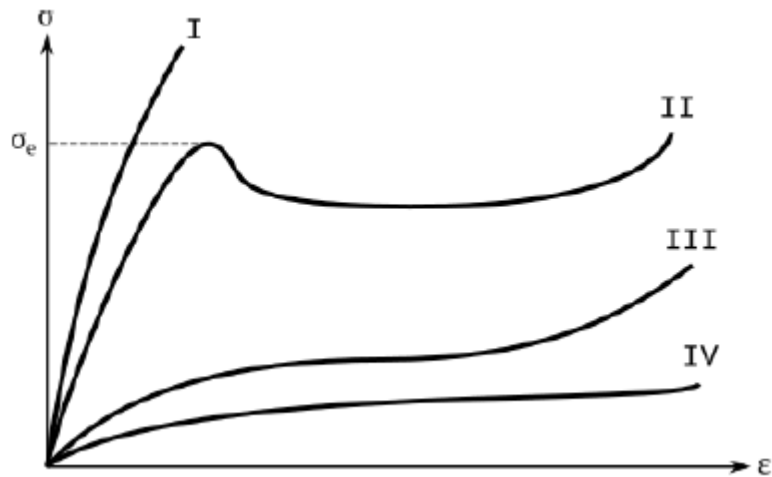


Figure3-32: Classification des élastomères (viscoélastique ou viscoplastique).

Ces types sont (voir la Figure3-11) :

I : fragile.

II : viscoélastique avec seuil d'écoulement  $\sigma_e$ .

III : viscoélastique sans seuil d'écoulement.

IV : viscoplastique.

Selon la température et la vitesse de déformation, un même polymère peut donc être fragile, Viscoélastique ou viscoplastique.

### 3.2.2 La viscoélasticité des élastomères :

Les élastomères présentent ont la particularité de présenter simultanément deux comportements :

Le comportement élastique d'origine entropique, caractérisé par un module élastique. Le comportement visqueux se manifestant par un retard à la réponse et une perte d'énergie à chaque cycle de déformation. On parle ainsi de comportement viscoélastique. On peut ainsi caractériser les propriétés viscoélastiques d'un élastomère en mesurant sa réponse à une sollicitation dynamique. La déformation se décompose en deux composantes, l'une est en phase (déformation élastique de module  $G'$ ), l'autre est en quadrature retard (déformation visqueuse de module  $G''$ ) (LaFigure3-12)représenteComposante de la déformation en régime sinusoïdal (Petite déformation de caoutchouc).

## Chapitre 03 : Le comportement de caoutchouc

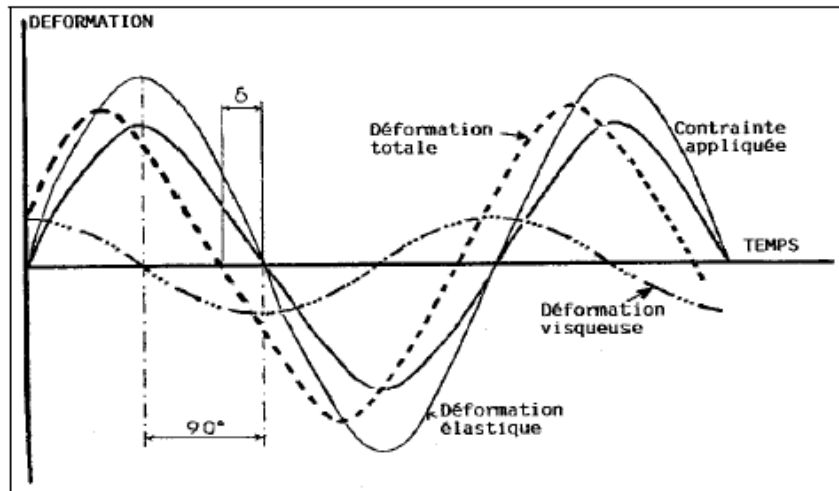


Figure3-33: Composante de la déformation en régime sinusoïdal (Petite déformation).

(LaFigure3-13) représente l'évolution avec la température des propriétés d'un élastomère lors d'une sollicitation dynamique on observe 3 zones :

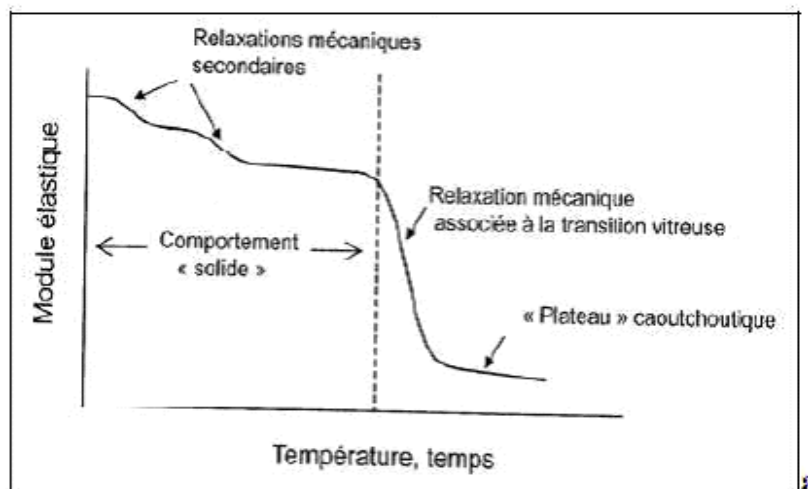


Figure3-34 : Evolution du module élastique avec la température.

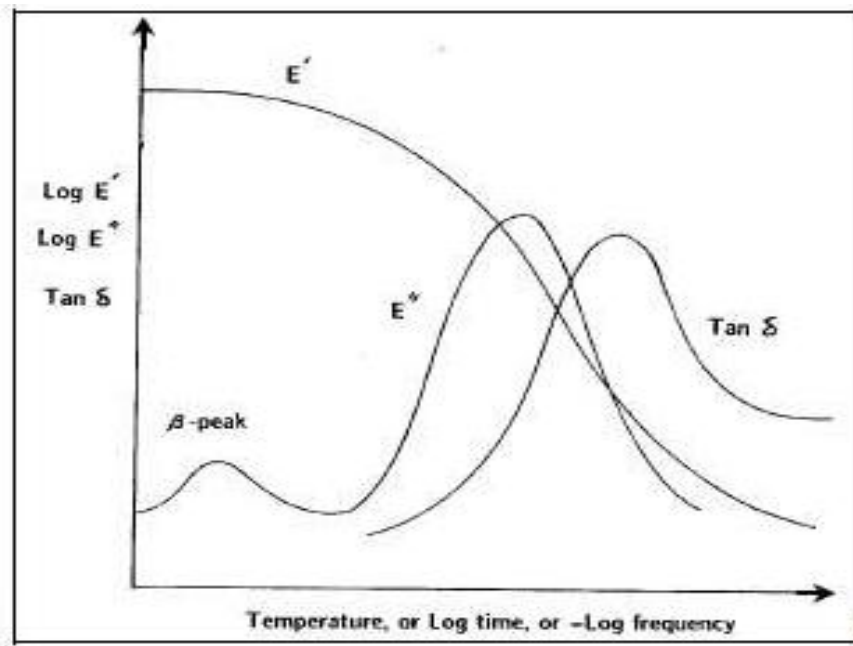


Figure3-35:Evolution des composantes dynamique avec la température.

À basse température (l'état vitreux) : le module mesuré est de l'ordre de GPa, cette rigidité est due à la quasi-immobilité des chaînes macromoléculaires un réseau rigide. (LaFigure3-14). Quand la température augmente, on observe que l'ensemble des propriétés varie brusquement au-delà d'une température appelée (température de relaxation)(associe à la température de transition vitreuse de l'élastomère).

Pour des  $T^\circ$  élevées, correspondant à l'état caoutchoutique, la valeur du module est comprise en 0.1et 1MPa. Pour l'essentiel des applications, ce sont les propriétés mécaniques de cette zone qui sont exploitées : le module élastique varie peu et le facteur de perte d'énergie est minimum.La nature viscoélastique du comportement mécanique se manifeste ainsi par une dépendance marquée de la réponse du matériau vis-à-vis de la vitesse de déformation et de la température.

### 3.2.3 Hystérésis :

La conservation de l'énergie mécanique en chaleur, ou hystérésis, est un aspect très important du comportement dynamique des matériaux viscoélastiques. L'hystérésis est la perte d'énergie mécanique par unité de volumes. Si l'on trace sur un même diagramme force/déplacement la réponse à faible vitesse d'une éprouvette en caoutchouc, la courbe de retour ne se superpose pas à la courbe aller. Il y a hystérésis, mettant en évidence l'existence de frottements internes

## Chapitre 03 : Le comportement de caoutchouc

dans le matériau. Les éléments libres des chaînes moléculaires glissent les uns sur les autres, entraînant un frottement sec interne générateur de perte d'énergie.

Une étude de l'hystérésis en fonction de la température, du taux d'élongation et de l'énergie de déformation, à vitesse de déformation constante, pour un élastomère thermoplastique. Il est montré que l'hystérésis croît lorsque la température diminue ou lorsque la déformation augmente. Ce phénomène dissipatif est donc fonction de la structure du matériau (taux de cristallisation, nombre de liaisons secondaires, ...)(laFigure3-15)présente la variation de l'hystérésis pour un thermoplastique en fonction de ladéformation et de la température.

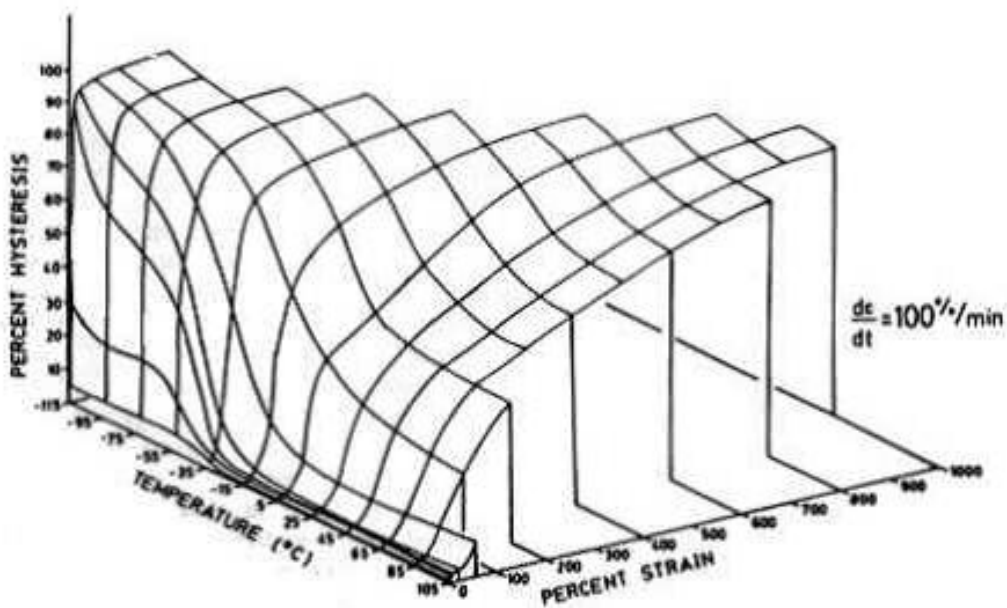


Figure3-36: Variation de l'hystérésis pour un thermoplastique en fonction de la déformation et de la température.

### 3.2.4 Viscosité :

Le comportement du caoutchouc dépend de la vitesse de sollicitation. Cette viscosité est particulièrement visible autour de la température de transition vitreuse  $T_g$ , et a une influence plus petite sur le plateau caoutchoutique. Elle est attribuée au glissement des chaînes les unes sur les autres. Des essais de relaxation (ou fluage) et des essais de viscoélasticité dynamique. Nous montrons l'attitude de dépendance de la viscosité vis-à-vis du niveau de déformation ce qui est connu sous le nom de l'effet PAYNE.

Dans cette étude, ils utilisaient des vitesses de déformation faible, inférieur à  $0.5 \text{ S}^{-1}$ .

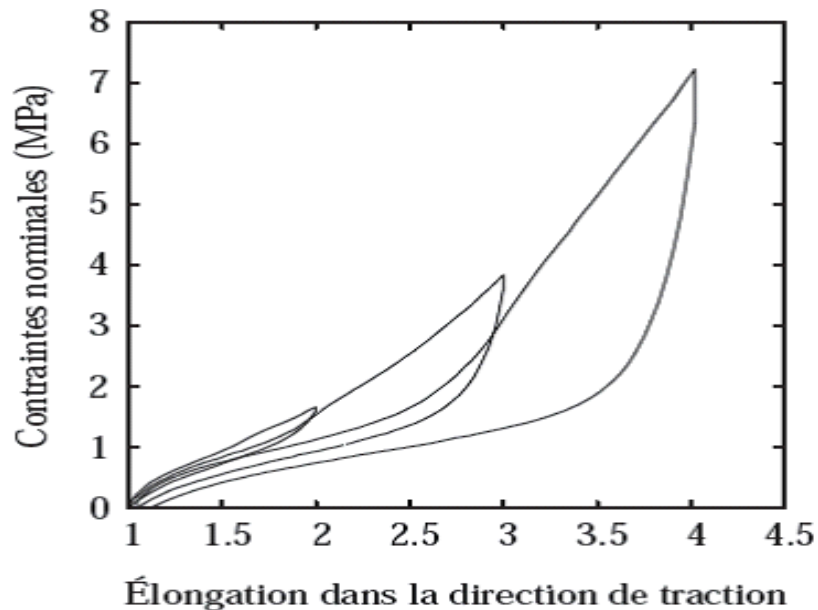


Figure3-37: courbe de traction cyclique.

(LaFigure3-16)le courbe nous illustre la traction cyclique de chargement est effectué à un niveau de déformation de supérieur à celui du cycle précédent.

La viscosité provoque aussi des effets secondaires inespérés. L'énergie produite est dégagée sous forme de chaleur, ce qui engendre l'élévation de la température ; car les élastomères ont une faible conductivité thermique. De plus pour des hautes vitesses de chargement, il se peut que le matériau soit détruit à la suite des échauffements répétés.

### 3.2.5 L'effet Mullins :

Des études ont été réalisées pour préciser le comportement des élastomères pour des essais sous chargement cyclique où un adoucissement notable est observé pour la première boucle. Ce phénomène est appelé effet Mullins.

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

## Chapitre 03 : Le comportement de caoutchouc

Ainsi, on représente, sur (LaFigure3-17), l'effet Mullins dans le cas d'un matériau idéal c'est à-dire sans phénomène viscoélastique ou de dépendance à la vitesse de déformation.

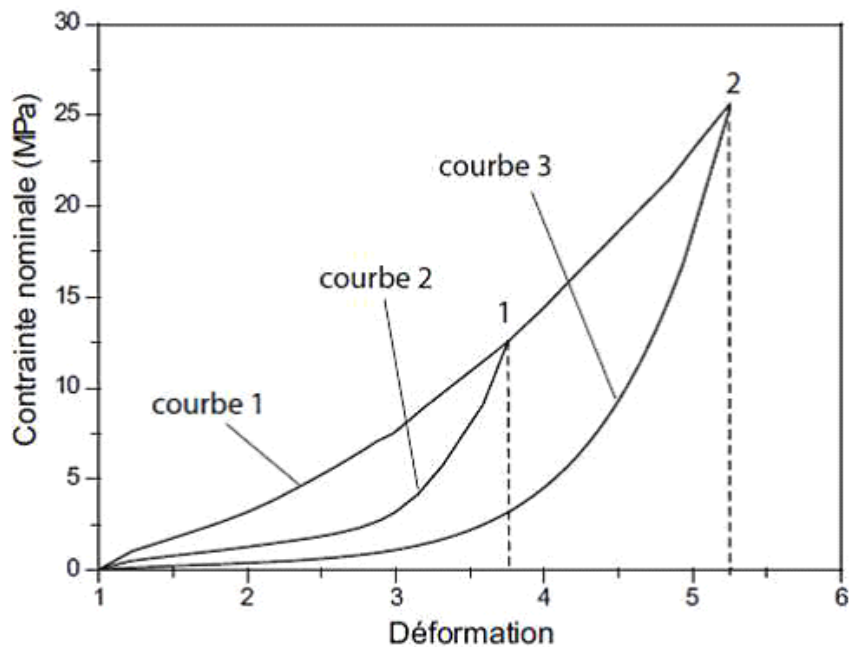


Figure3-38:schématization de l'effet Mullins.

Le matériau est chargé jusqu'à un premier niveau de déformation 1 (courbe 1) puis, il est déchargé jusqu'à déformation nulle, la réponse en décharge emprunte un autre chemin (courbe2). Si on recharge le matériau jusqu'à un niveau de déformation inférieur au niveau maximal 1 déjà atteint puis on le décharge, alors il se comporte de manière totalement élastique et emprunte toujours le même chemin (courbe 2). En revanche, s'il est chargé jusqu'à une déformation supérieure à la déformation maximale 1 déjà atteinte, la réponse du matériau suit la courbe 2 entre l'origine et cette valeur maximale 1 puis réemprunte la courbe 1 jusqu'au nouveau niveau de déformation maximale 2. Ensuite, lorsque le matériau est déchargé, sa réponse emprunte la (courbe 3).

Ce phénomène a été observé pour la première fois par Bouasse et Carrière, Mais il doit son nom à Mullins qui l'a étudié plus en détails. En fait, cet « endommagement » n'est pas complètement irréversible. Le matériau a une capacité de restauration, très lente à température ambiante, plus rapide à température élevée.

## Chapitre 03 : Le comportement de caoutchouc

Ceci permet parfois de considérer l'effet Mullins comme résultant d'une viscosité à très grande échelle de temps. Des essais de recouvrement (total ou partiel) issus de la thèse de Chagnon montrent que plusieurs mois à température ambiante sont nécessaires pour que le matériau recouvre son comportement à la première charge. Il serait dû à plusieurs phénomènes physique différents :

- La décohésion entre la gomme et les charges sous l'effet du chargement mécanique ;
- Des ruptures de chaînes ;
- Une réorganisation des chaînes provoquant une orientation préférentielle du réseau.

### 3.2.6 L'effet Payne :

Dans le domaine de petites déformations, la matrice élastométrique montre un comportement linéaire l'incorporation des charges confère aux élastomères un comportement non linéaire. Ce phénomène est connu sous le nom de l'effet Payne. Aux faibles niveaux de déformation, on observe un plateau correspondant au plateau caoutchoutique. Le module de conservation  $G'$  diminue lorsque la déformation augmente jusqu'à une valeur stable. Cette décroissance est associée à un maximum du module de perte traduisant une dissipation d'énergie d'autant plus grande que la chute de  $G'$  est élevée. (LaFigure3-18) présentel'effet 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.

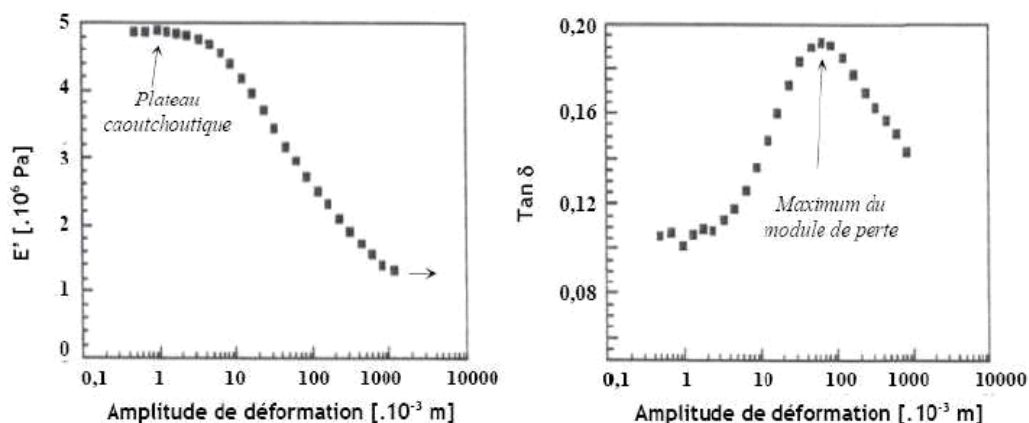


Figure3-39:analyse de l'effet payne.

## Chapitre 03 : Le comportement de caoutchouc

(LaFigure3-18)évolution propriété mécanique en fonction du niveau de déformation pour un élastomère SBR renforcé en silice.

### 3.3 Le comportement des sols avec les déchets caoutchoutique :

#### 3.3.1 L'effet de l'ajout du caoutchouc sur le comportement des sols :

Effet de l'ajout de les fibres de caoutchouc sur le comportement des sols est similaire pour le sol étudié sur les paramètres du gonflement, plus le pourcentage augmente plus le gonflement libre et la pression de gonflement diminuent, à un pourcentage de 10% fibres, on constate à une diminution remarquable (laFigure3-19)l'effet de la teneur fibres en caoutchouc des pneus usés sur le potentiel et la pression de gonflement de sol.

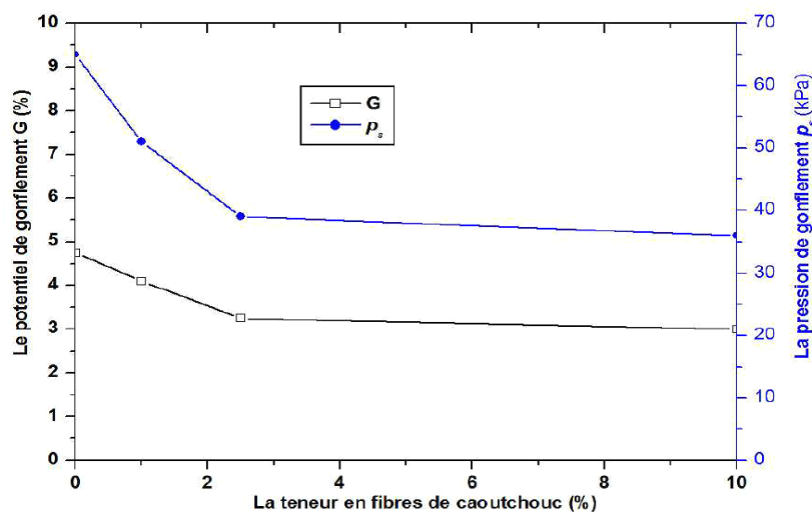


Figure3-40: Effet de la teneur fibres en caoutchouc des pneus usés sur le potentiel et la pression de gonflement de sol.

#### 3.3.2 Résistance à la compression :

Les granulats caoutchouc sont considérablement plus souples que la matrice cimentaire, et les interfaces entre ces derniers et la pâte de ciment sont encore plus larges et poreux qu'avec des granulats naturels classiques. La résistance à la compression diminue donc systématiquement quand le dosage en granulats caoutchouc augmente.

#### Module d'élasticité :

Pour les mêmes raisons qu'avec les granulats d'argile expansée, le module d'élasticité du béton diminue, comme le montre. Pour un taux de substitution de 25% des granulats naturels par des granulats caoutchouc, la résistance en compression est réduite de 86% et le module de

## Chapitre 03 : Le comportement de caoutchouc

71% (la figure3-20) présente l'effet des granulats caoutchouc sur la résistance en compression (a) et le module d'élasticité (b).

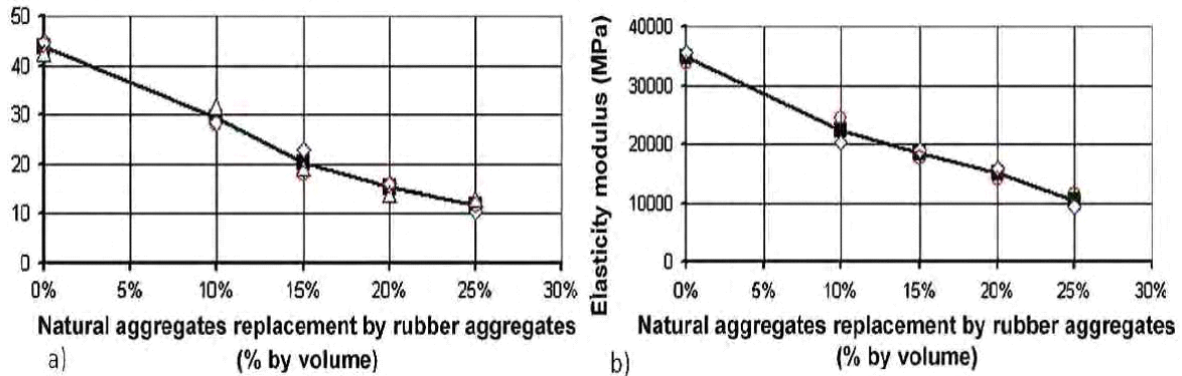


Figure3-41: Effet des granulats caoutchouc sur la résistance en compression (a) et le module d'élasticité (b).

### 3.3.3 Résistance à la traction :

Les granulats caoutchouc diminuent les résistances en traction, flexion et compression dans des proportions très similaires, comme le montre (figure) tirée de (Batayneh et al. 2008). Pour ces trois modes de sollicitation, le facteur de réduction (strength reducing factor) est quasiment le même pour l'ensemble des taux de substitution du sable par des granulats caoutchouc. Lorsque la totalité du sable est remplacée par des granulats caoutchouc, la résistance mécanique est réduite de 80% en flexion et de 90% en traction et en compression. On remarque que pour l'ensemble des formulations, le rapport résistance en traction/résistance en compression est de 9 à 12%, et le rapport résistance en flexion/résistance en compression est de 13 à 17% (voir la figure3-21) qui présente Effet des granulats caoutchouc sur la réduction des résistances en(Flexion/traction/compression).

Chapitre 03 : Le comportement de caoutchouc

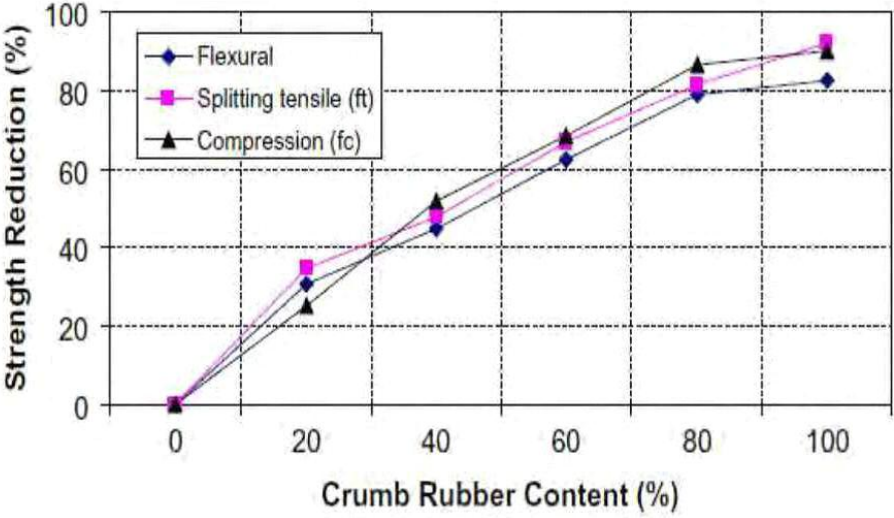


Figure3-42: Effet des granulats caoutchouc sur la réduction des résistances en (Flexion/traction/compression).

## Chapitre 03 : Le comportement de caoutchouc

### **Conclusion :**

Le caoutchouc présente des caractéristiques physicochimiques distinctives, que nous avons abordé dépendant de (la température, la vulcanisation, la cristallisation, le vieillissement). Sur le plan mécanique, le caoutchouc se distingue par son comportement hyperélastique et viscoélastique. Il peut subir de très grandes déformations réversibles. Cette élasticité exceptionnelle s'explique par la capacité des chaînes moléculaires. Le matériau présente également un effet Mullins et un effet Payne.

## **Chapitre 04 : Le caoutchouc un matériau d'amortissement**

### **4 Introduction :**

Les matériaux à partir desquels les amortisseurs en caoutchouc sont fabriqués constituent la base de leurs propriétés remarquables et de leur adaptabilité. Composé de caoutchouc, à la fois naturel et synthétique, offrir de la flexibilité, résilience, et la capacité d'amortir les chocs et les vibrations. Les composants métalliques offrent résistance et durabilité. La sélection minutieuse des matériaux garantit que l'amortisseur en caoutchouc peut exceller dans diverses applications, des suspensions automobiles aux machines industrielles et équipements de construction. Même si ces composants passent souvent inaperçus, leur contribution à l'efficacité, confort, et la sécurité d'innombrables systèmes mécaniques reste indéniable. Les matériaux utilisés dans les amortisseurs en caoutchouc témoignent de la symbiose entre la science des matériaux et l'ingénierie., créer des composants sans prétention mais indispensables qui jouent silencieusement un rôle central dans notre monde technologique.

#### **4.1 Définition d'amortisseur en caoutchouc :**

Les amortisseurs en caoutchouc sont conçus pour absorber et dissiper l'énergie, réduisant ainsi l'impact des vibrations et des chocs. Ils agissent comme un tampon, minimisant le transfert de force et protégeant les composants d'un système. Amortisseur en caoutchouc, souvent appelés supports vibrants ou isolateurs en caoutchouc, sont des composants mécaniques conçus pour absorber et amortir les chocs, vibrations, et le bruit dans les systèmes mécaniques. Ces composants sont généralement composés de caoutchouc ou de matériaux élastomères liés à du métal ou à d'autres matériaux pour améliorer leur résistance et leur fonctionnalité. La sélection des matériaux est un aspect critique de leur conception, car cela influence directement leurs performances et leur adéquation à des applications spécifiques.

#### **4.2 Le caoutchouc comme un matériau d'amortisseur :**

Le caoutchouc est un matériau idéal pour l'amortissement en raison de ses propriétés élastique et viscoélastiques, ainsi que de sa capacité à être adapté à diverses application. Voici une analyse détaillée de son utilisation comme un matériau d'amortisseur :

##### **4.2.1 Dans l'industrie mécanique :**

- **Protection des machines :**

Les amortisseurs en caoutchouc sont utilisés pour protéger les machines contre les vibrations

## Chapitre 04 : Le caoutchouc un matériau d'amortissement

et les impacts répétitifs, prolongeant ainsi leur durée de vie et réduisant les coûts de maintenance.

Avec une explication, Dans les environnements industriels, les machines fonctionnent à grande vitesse et sont souvent confrontées à des mouvements répétitifs par exemple le matériel de construction. Sans amortisseurs, les vibrations constantes peuvent entraîner l'usure des pièces, provoquant une défaillance prématurée et des temps d'arrêt coûteux.

Par exemple, dans les usines de fabrication où des équipements lourds tels que des presses et des machines à emboutir sont en fonctionnement, des amortisseurs en caoutchouc sont installés pour absorber les chocs générés à chaque cycle. Cela permet non seulement de réduire le bruit produit, mais également de prolonger considérablement la durée de vie des machines, de réduire les coûts de maintenance et d'améliorer la productivité globale. L'industrie aéronautique en est un autre exemple. Les composants des avions sont soumis à des vibrations extrêmes pendant le vol. Des amortisseurs en caoutchouc sont utilisés dans diverses parties de l'avion, notamment le train d'atterrissage et les supports moteur, pour minimiser les effets de ces vibrations. Cela contribue à améliorer la fiabilité et la sécurité de l'avion, ainsi qu'à réduire la fatigue des composants critiques.

- **Industrie automobile :**

Utilisée dans les suspensions et les sièges pour réduire les vibrations et améliorer le confort des passagers. Les amortisseurs en caoutchouc sont essentiels pour une conduite souple et confortable. Ils sont utilisés dans les systèmes de suspension pour absorber les bosses et les irrégularités de la route, empêchant ainsi que les secousses soient directement transmises aux occupants du véhicule. Les amortisseurs aident à maintenir le contact des pneus avec la route, améliorant ainsi la tenue de route et la stabilité. Un système d'amortissement qui fonctionne bien garantit au conducteur et aux passagers une conduite stable et contrôlée, même sur des terrains accidentés.

- **Machine industrielles :**

Employés pour absorber les chocs et les vibrations dans les presses, machines à emboutir, etc. réduisent ainsi le bruit et prolongeant la durée de vie des équipements. Donc les amortisseurs en caoutchouc contribuent également à la réduction du bruit. Dans de nombreuses applications, telles que les outils électriques et les appareils électroménagers, les vibrations peuvent générer des bruits indésirables. En absorbant et en amortissant ces vibrations, les amortisseurs en caoutchouc contribuent à créer un environnement de travail plus silencieux.

## Chapitre 04 : Le caoutchouc un matériau d'amortissement

Cela est particulièrement important dans les environnements où les niveaux de bruit doivent être réduits au minimum, comme dans les hôpitaux ou les bureaux. (La Figure 4-3) montre la présence de caoutchouc dans tout le matériels de construction comme antivibratoire .



Figure 4-4: Le caoutchouc dans les matériels de construction.

### 4.2.2 Dans le bâtiment :

En plus des systèmes mécaniques, les amortisseurs en caoutchouc sont utilisés dans les structures pour les protéger des effets des tremblements de terre et d'autres forces dynamiques. Dans les bâtiments et les ponts, ils peuvent être installés pour absorber l'énergie des ondes sismiques, réduisant ainsi le risque de dommages structurels et augmentant la sécurité des occupants. Prenons un exemple concret une entreprise de construction construit un gratte-ciel dans une zone sujette aux tremblements de terre. Pour garantir la stabilité et la sécurité du bâtiment, des amortisseurs en caoutchouc sont intégrés à la conception structurelle. Lors d'un tremblement de terre, les amortisseurs se déforment et absorbent l'énergie, empêchant ainsi tout balancement excessif et tout effondrement potentiel de la structure.

### 4.2.3 Amortissement (absorption de l'énergie sismique) sous fondation :

L'amortissement en caoutchouc pour l'absorption de l'énergie sismique sous fondation est une technique utilisée dans l'isolation sismique des bâtiments. Voici quelques points clés sur cette technologie :

- **Isolation en caoutchouc :**

Les isolateurs en caoutchouc, tels que les roulements en caoutchouc à amortissement élevé (HDRB), sont utilisés pour absorber et dissiper l'énergie sismique. Ils sont composés de

## Chapitre 04 : Le caoutchouc un matériau d'amortissement

couches de caoutchouc et de plaques rigides, souvent en acier, qui alternent pour améliorer les propriétés d'amortissement.

- **Matériau visco-élastique :**

Les matériaux visco-élastiques, comme ceux utilisés dans certains dispositifs antisismiques, présentent des propriétés qui permettent d'absorber l'énergie sismique efficacement

- **Absorption de l'énergie :**

Lors d'un tremblement de terre, les mouvements horizontaux sont absorbés par les isolateurs en caoutchouc, réduisant ainsi la transmission de l'énergie sismique à la structure supérieure

- **Recentrage :**

Après un événement sismique, le caoutchouc permet au bâtiment de revenir à sa position d'origine grâce à sa force de récupération élastique

- **Réduction des dommages :**

En absorbant l'énergie sismique, ces systèmes réduisent les dommages potentiels aux structures.

- **Durabilité :**

Les HDRB sont économiques et durables, offrant une solution efficace pour la protection parasismique des bâtiments. Les roulements en caoutchouc à amortissement élevé (HDRB) sont utilisés pour leur capacité à absorber jusqu'à 16% de l'énergie sismique.

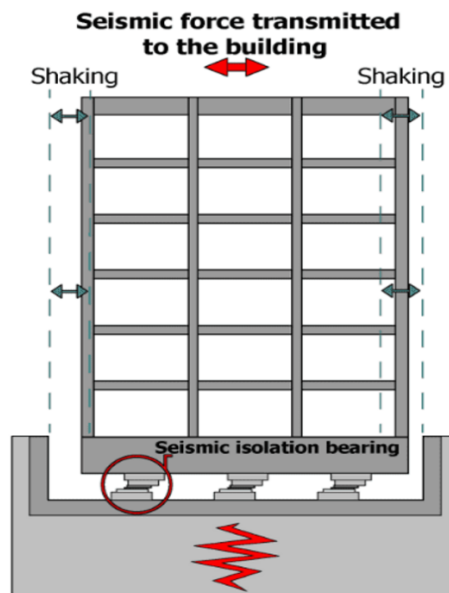


Figure 4-5: Amortissement en caoutchouc sous fondation.

### **4.3 Les caractéristiques qui permettent d'être amortisseur :**

#### **4.3.1 Flexibilité et résilience :**

Le composant en caoutchouc ou en élastomère de l'amortisseur offre la flexibilité nécessaire pour se déformer sous charge et reprendre sa forme d'origine., offrant résilience et capacité à amortir les chocs et les vibrations.

#### **4.3.2 Isolation des vibrations :**

Le choix du mélange de caoutchouc peut avoir un impact sur la capacité de l'amortisseur à isoler et amortir les chocs et les vibrations. Différents composés offrent différents degrés d'amortissement, ce qui les rend adaptés aux applications avec des exigences spécifiques en matière de contrôle des vibrations.

#### **4.3.3 Résistance à la température :**

Certains matériaux élastomères, comme du caoutchouc de silicone, sont choisis pour leur résistance aux hautes températures. Ils peuvent résister à une chaleur extrême sans perdre leurs propriétés.

#### **4.3.4 Capacité de charge :**

Matériaux élastomères sont sélectionnés pour leur capacité portante. Ils peuvent répartir les charges uniformément sur la surface et empêcher les concentrations de contraintes localisées.

### **4.4 Avantages des amortisseurs en caoutchouc :**

#### **4.4.1 Réduction des vibrations et du bruit :**

Les amortisseurs en caoutchouc sont efficaces pour réduire l'amplitude des vibrations, ce qui contribue à diminuer les niveaux de bruit dans les machines. Cela rend les environnements de travail plus confortables et plus sûrs pour les opérateurs.

#### **4.4.2 Amélioration de la fiabilité de l'équipement :**

En réduisant les vibrations, ces amortisseurs prolongent la durée de vie des machines en protégeant contre les dommages causés par les chocs et les vibrations répétées. Cela réduit les coûts de maintenance et améliore la fiabilité des équipements.

## Chapitre 04 : Le caoutchouc un matériau d'amortissement

### **4.4.3 Amélioration de la sécurité :**

Les vibrations et les chocs peuvent provoquer des accidents en déplaçant inopinément l'équipement. Les amortisseurs en caoutchouc réduisent ces risques, contribuant ainsi à améliorer la sécurité sur le lieu de travail.

### **4.4.4 Flexibilité de conception :**

Les amortisseurs en caoutchouc peuvent être conçus pour répondre à des formes et des duretés spécifiques, en ajustant la composition du caoutchouc. Cela permet de s'adapter aux besoins de rigidité et de force dans toutes les directions.

### **4.4.5 Propriétés élastiques :**

Le module d'élasticité du caoutchouc est plus petit que celui du métal, permettant une grande déformation élastique. Cela favorise l'absorption des chocs et des vibrations à haute fréquence.

### **4.4.6 Facilite d'entretien :**

Les amortisseurs en caoutchouc n'ont pas de pièces coulissantes, ce qui les rend faciles à maintenir et à installer.

### **4.4.7 Durabilité et résistant :**

Fabriqués avec des matériaux de haute qualité, ces amortisseurs sont durables et résistants, réduisant ainsi les coûts de maintenance à long terme.

## **4.5 Effet du séisme sur les ponts :**

Le séisme est l'un des phénomènes naturels des plus dévastateurs et de structures causant d'énormes dégâts humains et matériels, et qui affecte amplement les ouvrages d'art tels que les ponts dont certains sont considérés comme ouvrages stratégiques qui doivent demeurer fonctionnels pendant et après le séisme.

Les leçons tirées des séismes précédents ont aidé les concepteurs à identifier et classer les différents types de dommages subis par les ponts en trois grandes catégories suivantes :

- La perte d'assise
- La fragilité.
- La liquéfaction et le tassement des sols.

## Chapitre 04 : Le caoutchouc un matériau d'amortissement

### 4.5.1 La perte d'assise :

Sous une importante sollicitation sismique causant la rupture des appareils d'appui, les butées de sécurité et de blocage entrent en jeu afin d'éviter les déplacements entre le tablier et ses appuis. Pourtant il arrive que ces déplacements soient tellement importants qu'ils conduisent à la destruction des butées entraînant ainsi l'effondrement du tablier, comme (La figure 4-4) montre l'effet de l'efforts sismiques sur les ponts.



Figure4-3 :Chute du tablier lors du tremblement de terre.

### 4.5.2 La fragilité :

Lors des séismes, les piles sont les éléments structuraux qui ont subi le plus de dommages caractérisés par une série de défaillances dues à la combinaison des deux facteurs flexion-effort tranchant. Le ferrailage transversal insuffisant des piles fait qu'un bon confinement et une ductilité appropriée ne soient pas assurés. Ceci entraîne un éclatement du béton et un flambement des armatures longitudinales. Parmi les désordres subis par les ponts on trouve :

- **Endommagement des piles des ponts :**

Lorsqu'une pile de pont est soumise à une secousse sismique élevée, son mouvement en plan transversal provoque des fissures profondes et des allongements dans les armatures longitudinales et transversales à la partie inférieure de la pile : le flambement observé sur des aciers principaux est associé aux détails d'armatures longitudinales et transversales inappropriés sur des piles à colonne unique. Sur (La figure4-4)on remarque un exemple de fissuration par cisaillement d'une pile à colonne unique.



Figure4-4 :Chute d'appuis de pont lors du tremblement de terre.

- **Rupture fragile des piles par cisaillement :**

Dans la plupart des ruptures en cisaillement observées (figure I.8), on a remarqué un manque de confinement du béton causé par des étriers dont l'espacement est trop grand. Ce comportement fragile résulte d'un excès de la capacité en flexion sur la résistance en cisaillement. Pendant un séisme majeur, la structure subit des mouvements cycliques très importants, diminuant ainsi la résistance du béton en compression, et entraînant la formation d'une rotule plastique de sorte que la rupture par cisaillement peut survenir. De plus, l'auscultation des ponts qui se sont effondrés à la suite d'un séisme a montré une défaillance des armatures à la base des piles. Cette zone est affectée par un chevauchement des armatures inadéquat ; cette défaillance a tendance à ne pas fournir une ductilité suffisante puisqu'elle ne permet pas la plastification des armatures. Sur (La figure4-5) on remarque un exemple de rupture des piles par cisaillement lors du séisme en l'absence des appareils d'appuis.



Figure4-5 : Rupture des piles par cisaillement lors du séisme.

### 4.5.3 La liquéfaction et le tassement des sols :

Lorsqu'un pont est construit sur un sol meuble ou liquéfiable, le risque sismique augmente. Un sol ayant une vitesse moyenne des ondes de cisaillement inférieure à celle du roc (1500 m/s) amplifie généralement la réponse vibratoire des mouvements sismiques et augmente la probabilité de déplacement de la structure; également, si un pont est construit sur un sol saturé de type sable silteux ou silt sableux ou un sol susceptible d'affaissement en raison de charges dues aux séismes, la liquéfaction du sol peut se produire, entraînant une perte d'appui et un déplacement excessif indépendamment de la réponse de vibration. Parmi les dommages remarquables constatés sur les ponts on cite :

- **Endommagement par glissement des culées :**

Les culées sont des composantes structurales qui assurent la liaison entre le tablier et les remblais. Elles sont sensibles aux mouvements latéraux extrêmes du sol. Pendant un séisme, le glissement des culées se produit généralement dans les zones où le sol est mal consolidé. Les observations effectuées sur les ponts endommagés ont montré que le glissement des culées est causé par des efforts en rotation et en translation dus aux poussées des terres.

- **Endommagement par liquéfaction et tassement du sol :**

En plus de la liquéfaction du sol, les séismes peuvent également provoquer des glissements de terrain et des éboulements. Ce sont surtout les fondations dans les zones actives de glissement qui sont mises en danger. L'étude des effets de séismes sur les sols de fondation se limite en l'occurrence aux combinaisons plus élevées des zones d'aléa sismiques et des classes de sol de fondation. Sur (La figure 4-6) on remarque un exemple de rupture des piles par cisaillement lors du séisme en l'absence des appareils d'appuis.



Figure 4-6 : tassement différentiel des piles d'un pont route.

## 4.6 Résolvez les problèmes mentionnés précédemment :

### 4.6.1 Isolation sismique à la base :

Basée sur la théorie de l'isolation des vibrations, l'isolation sismique à la base fonctionne par modification de la rigidité globale de la structure afin de découpler son mouvement de celui de la source excitatrice (le sol dans le cas d'un séisme). Le découplage se fait par introduction d'un élément flexible dans le système de rigidité latérale de la structure. Ainsi, les fréquences fondamentales de la structure sont abaissées et écartées de la plage de fréquences prédominantes du séisme. Comme les modes de vibration sont orthogonaux entre eux, une grande partie de l'énergie sismique est réfléchiée ou transmise à des modes qui ont une très faible influence sur la réponse de la structure. La présence d'un dispositif d'amortissement permet de dissiper l'énergie qui arrive à être transmise à la structure. Aussi, comme l'introduction d'un élément flexible entraîne de plus grands déplacements, l'amortissement introduit permet de garder ces déplacements dans des plages acceptables. Sur (La figure 4-7) présente l'effet des appareils d'appuis sur un pont.

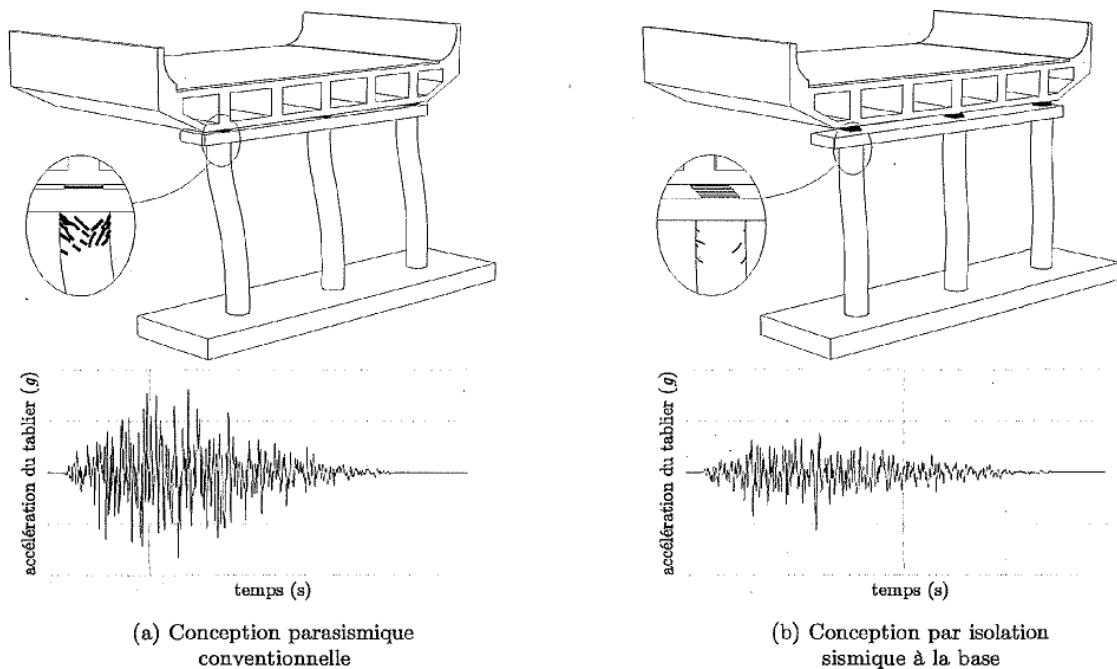


Figure 4-7 : Principe de l'isolation sismique à la base.

## Chapitre 04 : Le caoutchouc un matériau d'amortissement

Dans une structure conventionnelle, l'énergie se propage sous forme de déformation interne, entraînant souvent des dommages en raison de la faible capacité d'amortissement des matériaux. En revanche, une structure isolée à la base concentre les déplacements dans un élément flexible, limitant ainsi les déformations des autres éléments et réduisant les dommages, bien que les déplacements puissent être importants. L'isolation à la base présente l'avantage de permettre une fonction immédiate post-séisme, la structure restant élastique avec peu ou pas de dommages. De plus, cette méthode réduit la demande en matériaux de construction et les coûts peuvent être similaires ou inférieurs à ceux des conceptions parasismiques traditionnelles, sans nécessiter de réparations après un séisme majeur. Sur (La figure 4-8) on présente tous les différents cas de systèmes d'isolateur à la base.

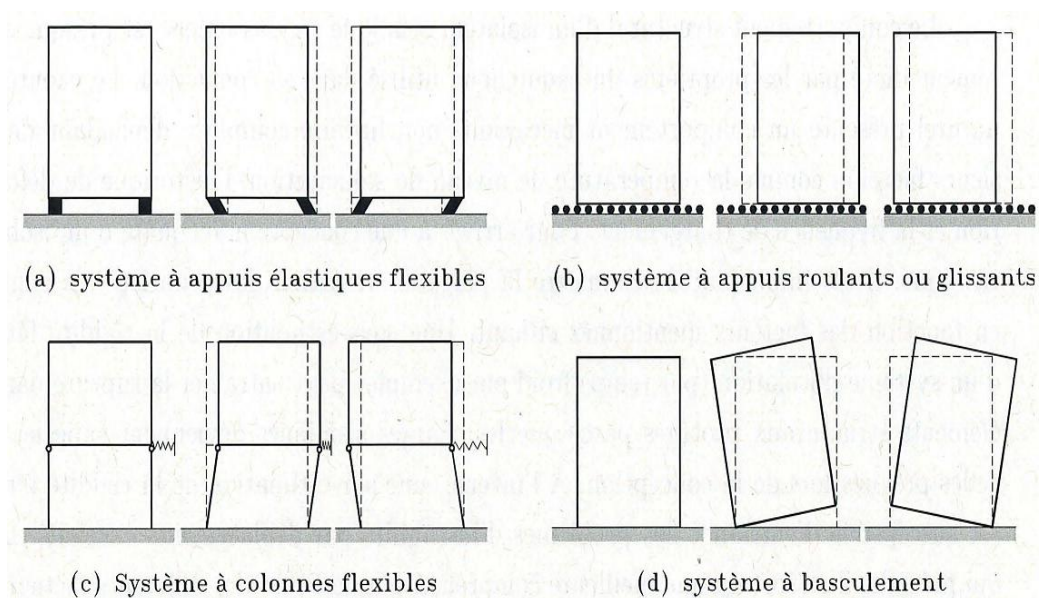


Figure 4-8 : Types de systèmes d'isolation sismique à la base.

Les systèmes par appuis élastiques flexibles sont les plus utilisés. Plusieurs types de dispositifs d'appuis flexibles existent sur le marché. Parmi les plus fréquemment rencontrés, on trouve les isolateurs sismiques en élastomère (ISE) à cause de leur faible coût de fabrication, d'installation et d'entretien. Les isolateurs sismiques en élastomère sont constitués de couches alternées de caoutchouc (naturel ou synthétique) et d'acier galvanisé comme illustré à la figure 1.4. Le caoutchouc, de par ses propriétés mécaniques, confère une grande flexibilité latérale au système tandis que la présence des feuilles d'acier permet de confiner latéralement le caoutchouc et de procurer une bonne rigidité verticale. L'isolateur peut ainsi supporter de grandes charges verticales tout en restant horizontalement très flexible. Le

## Chapitre 04 : Le caoutchouc un matériau d'amortissement

recouvrement latéral sert à protéger les plaques d'acier et le caoutchouc confiné des phénomènes de détérioration comme la corrosion et l'attaque par l'oxygène ou l'ozone.

### **4.7 L'importance de son appareilles dans les ouvrage de type dalle de pont :**

Dans les ouvrages de type dalle de pont, les appareils d'appui occupent une place essentielle dans le fonctionnement global de la structure. Contrairement aux ponts à poutres multiple ou les appuis peuvent être répartis sur plusieurs éléments porteurs, la dalle de ponts, en tant qu'élément monolithique ou faiblement divisée, transfère directement l'ensemble des charges vers les appuis situés aux extrémités ou aux points d'appuis intermédiaires.

- Ils absorbent les déplacements dus aux efforts thermiques, au fluage et au retrait du béton.
- Ils permettent la transmission efficace des charges verticales permanentes.
- Ils autorisent les rotations di tablier, nécessaires au bon comportements statique.
- Ils contribuent à la durabilité de l'ouvrage.

### **4.8 Principe de L'isolation sismique des ponts :**

L'isolation sismique repose sur le principe que si la période de vibration est augmentée suffisamment pour s'éloigner de la période d'excitation prédominante du séisme, les accélérations transmises à la structure (et par conséquent les forces d'inertie) sont considérablement réduites. Cependant, l'augmentation de la période engendre des déplacements plus importants concentrés au niveau de l'isolateur. Dès lors l'incorporation d'un dispositif de dissipation d'énergie (amortissement) à l'isolateur est requise.

(La figure 4-8)présentent, de façon idéalisée, l'effet de l'accroissement de la période et de l'amortissement respectivement sur les forces et déplacements sismiques.

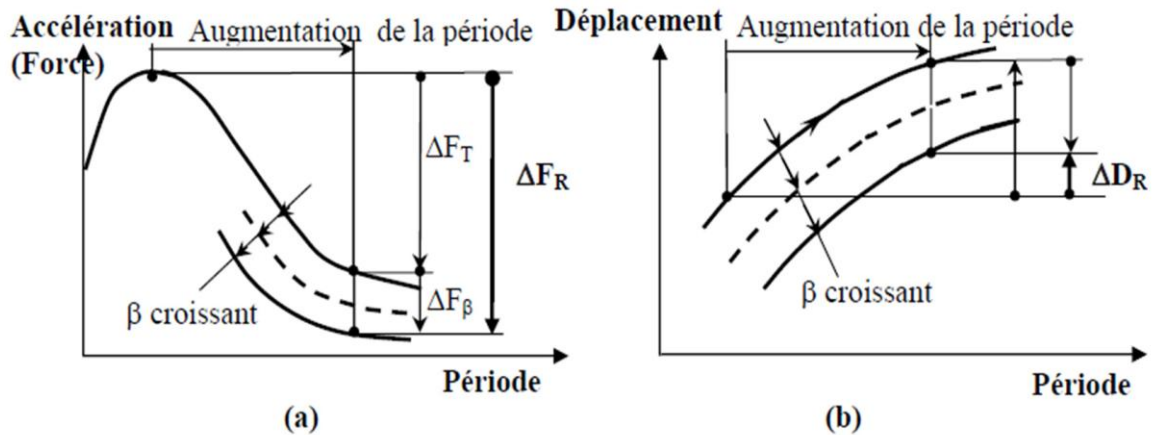


Figure4-8 :Effet de l'augmentation de la période et du taux d'amortissement visqueux.

#### 4.9 Analyse des structures isolées à la base :

L'isolation sismique, en général, consiste à modifier les propriétés dynamiques d'un ouvrage afin de réduire les efforts et les déformations dans les principaux éléments structuraux. Elle se fait en changeant une ou plusieurs des trois principales propriétés qui déterminent la réponse dynamique de l'ouvrage la rigidité, la masse et l'amortissement. Le principe de l'isolation sismique à la base consiste à concentrer les déplacements en cas de séisme dans certains éléments flexibles (isolateurs) de la structure afin de réduire ou annuler la demande de ductilité pour les principaux éléments structuraux. La flexibilité permet aussi de découpler le mouvement du sol de celui de la structure de façon à réduire la transmission de l'énergie à la structure et diminuer les efforts et les déformations internes. Pour les sollicitations dynamiques généralement dues aux séismes, au-delà d'une certaine valeur de la période, toute augmentation de celle-ci entraîne une diminution des efforts et une augmentation du déplacement. Une augmentation du niveau d'amortissement dans la structure réduit l'amplitude des déplacements et des efforts sismiques. (La figure 4-9) présente une comparaison des trois méthodes de conception parasismique et montre l'effet d'isolateur sismique sur le déplacement.

## Chapitre 04 : Le caoutchouc un matériau d'amortissement

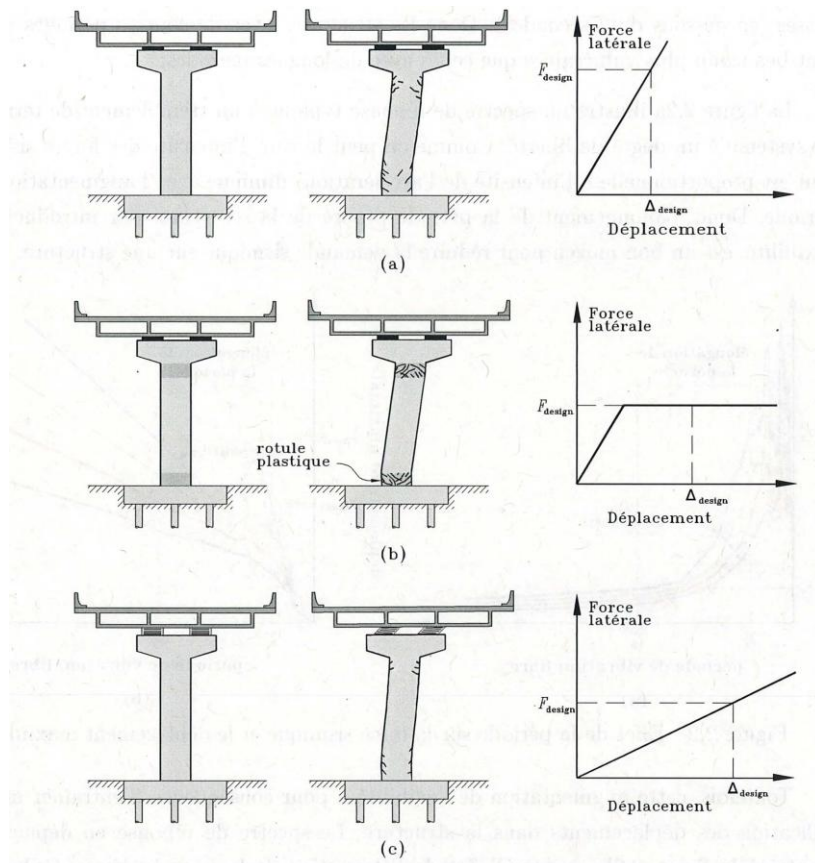


Figure4-9 : Comparaison des trois méthodes de conception parasismique.

(La Figure 4-10) c'est montre la même structure conçue par isolation sismique à la base. On peut voir que la grande partie du déplacement prend place dans le système d'isolation réduisant ainsi la demande sur la pile. Les isolateurs remplissent aussi le rôle de dissipateur d'énergie. Ainsi, les forces sismiques sont réduites et l'ouvrage demeure élastique et entièrement opérationnel après le séisme. Le principal défaut de l'isolation sismique est que de grands déplacements prennent place à cause de la flexibilité du système. Donc l'ouvrage doit être en mesure d'accommoder ces déplacements sans risque d'instabilité structurale. L'amplitude des déplacements peut être réduite par ajout d'amortissement au système d'isolation. Pour comprendre le principe de fonctionnement de l'isolation sismique à la base, il est important de comprendre l'influence des propriétés structurales (masse, rigidité, amortissement) d'un ouvrage sur sa réponse à un tremblement de terre.

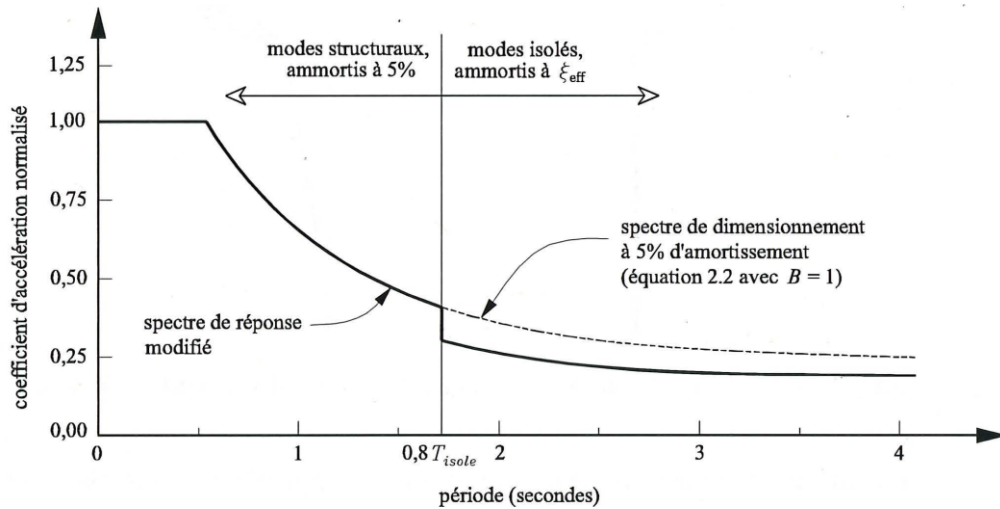


Figure4-10 : Spectre de dimensionnement modifié pour les ponts isolés à la base.

#### 4.10 Système par appuis en élastomère :

Les isolateurs sismiques en élastomère sont constitués d'alternance de couches d'élastomère et de feuilles d'acier galvanisé. Les couches d'élastomère offrent la propriété de flexibilité latérale au système tandis que les feuilles d'acier, en confinant les couches de caoutchouc, confèrent au système une grande rigidité verticale du système. L'isolateur peut ainsi supporter de grandes charges verticales tout en restant horizontalement très flexible. (La Figure 4-11) présente le comportement d'un isolateur sismique en caoutchouc (son déplacement).

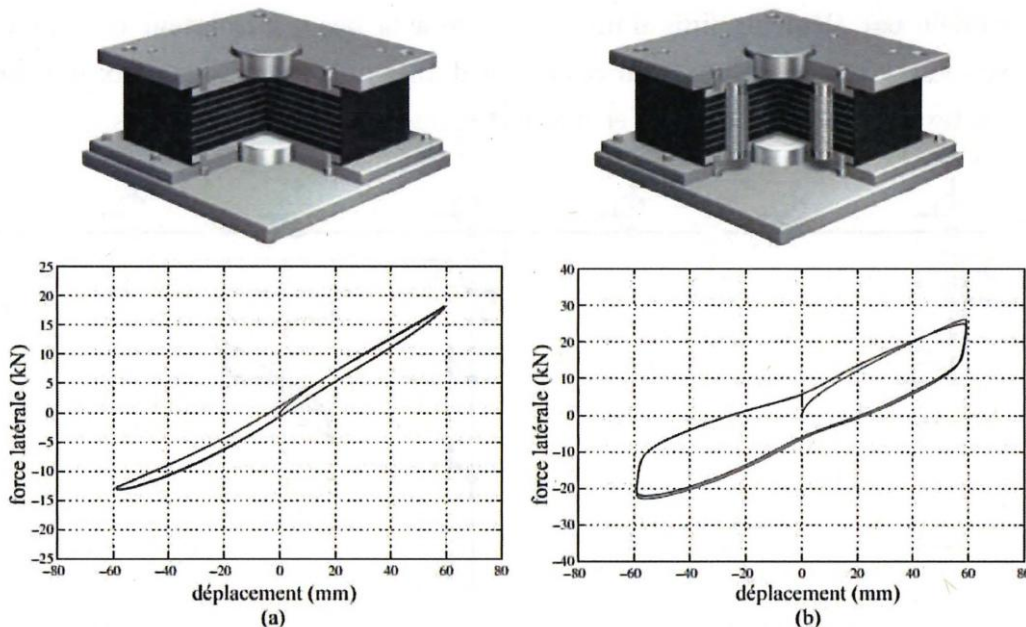


Figure4-11 : Isolateurs sismiques en élastomère typiques et leurs courbes de comportement.

### **Note importante :**

Le caoutchouc naturel a un faible degré d'amortissement. Pour avoir plus d'amortissement dans le système, on utilise parfois du caoutchouc à haut degré d'amortissement (connu sous le nom de **HDNR** : High Damping Natural Rubber). Une autre façon d'augmenter la capacité d'amortissement est d'insérer un ou plusieurs cœurs de plomb à l'appui. On obtient alors un isolateur en élastomère à cœur de plomb. L'introduction du noyau de plomb au centre du dispositif apporte une plus grande rigidité initiale tout en procurant une bonne dose d'amortissement hystérique au système d'isolation : Comme le cœur de plomb se plastifie dès l'amorce du déplacement, la force de restitution du système est entièrement procurée par le caoutchouc. On peut voir à (La figure 4-11), l'hystérèse d'un isolateur en caoutchouc naturel standard (a) et d'un isolateur à cœur de plomb (b). On remarque la meilleure performance de l'isolateur à cœur de plomb avec une plus grande aire de courbe et une rigidité latérale initiale plus élevée.

Mais La vulcanisation consiste à créer des liaisons (pontages) entre les chaînes de polymères afin d'éliminer la thermo plasticité et d'améliorer l'élasticité du matériau. La substance de vulcanisation la plus utilisée est le soufre. Il est ajouté au caoutchouc brut et le mélange est cuit à température élevée. La réaction qui est activée par la chaleur crée des liaisons Soufre - Carbone qui rattachent les chaînes moléculaires entre elles. Plusieurs propriétés du caoutchouc sont améliorées avec la vulcanisation. La plage de température dans laquelle le matériau est élastique est élargie et le matériau devient plus résistant et moins fluant. Les modules de cisaillement et de compression augmentent. Par contre, on remarque une diminution de la capacité de dissipation d'énergie.

### **4.11 Modification des propriétés mécaniques de caoutchouc :**

Le caoutchouc est vulnérable à l'attaque de certains gaz qui 'on retrouve dans l'air ambiant comme l'oxygène et l'ozone. L'oxygène réagit avec l'élastomère en provoquant la rupture des pontages entre les macromolécules. L'ozone quant à lui provoque la scission des chaînes moléculaires du caoutchouc, ce qui se manifeste par l'apparition de fissures sur le matériau. Ces réactions engendrent les effets inverses de la vulcanisation soit une réduction de la résistance mécanique du matériau. Ils réduisent ainsi la durabilité du matériau. (La Figure 4-12) montre le comportement pour un modèle d'une couche de caoutchouc soumis à des efforts de compression, de cisaillement et de flexion. Des traitements anti-dégradant existent et consistent à incorporer au caoutchouc brut lors de la fabrication des agents antioxydants et

## Chapitre 04 : Le caoutchouc un matériau d'amortissement

anti-ozonant. Ces agents servent d'écran en réagissant avec l'oxygène et l'ozone avant que ceux-ci ne soient en contact avec la structure moléculaire du caoutchouc. Afin d'augmenter la résistance du caoutchouc à la traction, au cisaillement et à l'abrasive, on ajoute des agents de renforcement au mélange de caoutchouc pendant le processus de vulcanisation. On utilise généralement du noir de carbone, parfois de la fumée de silice. L'imbrication entre les particules de renforcement et les chaînes moléculaires de caoutchouc augmente la résistance mécanique du matériau et sa capacité de dissipation d'énergie. Le renforcement augmente aussi la résistance du matériau contre les effets du rayonnement direct du soleil. Toutefois, ce traitement diminue l'élasticité du matériau et le rend plus sujet aux déformations résiduelles après chargement.

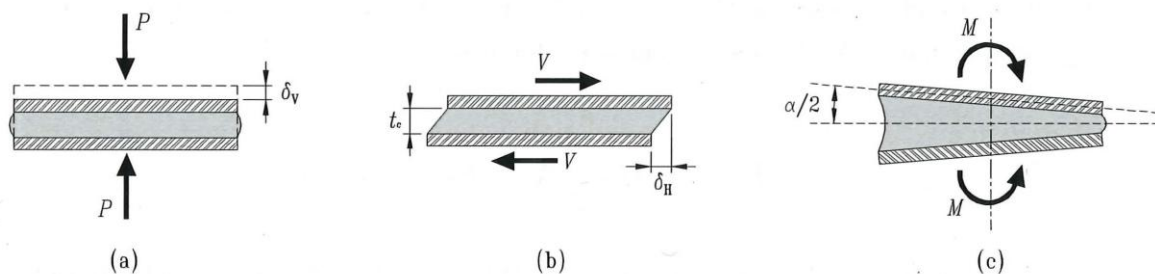


Figure4-12 : Modèle d'une couche de caoutchouc confinée verticalement soumis à des efforts (a) de compression, (b) de cisaillement et (c) de flexion.

(La Figure4-12)présente les principales hypothèses posées par les théories qui étudient le comportement en compression pure d'une couche de caoutchouc confinée entre deux plaques rigides sont (1) les sections planes restent planes après déformation, (2) les sections verticales se transforment en surfaces paraboliques de second ordre, (3) les contraintes normales sont égales dans toutes les directions (hypothèse d'un état de pression hydrostatique). En ramenant L'analyse à un problème axisymétrique avec des déformations infinitésimales, ont déduit une solution approximative la rigidité verticale d'une couche de forme circulaire.

### **Conclusion :**

Le développement et l'utilisation des amortisseurs en caoutchouc continuent d'évoluer. De nouveaux matériaux et de nouvelles conceptions sont constamment étudiés et mis en œuvre pour améliorer leurs performances et s'adapter aux exigences en constante évolution des différentes industries. Les amortisseurs en caoutchouc remplissent de nombreuses fonctions importantes, de la protection des machines et des structures à l'amélioration du confort et de la sécurité des transports et de divers appareils. Leur capacité à absorber et à dissiper l'énergie en fait un composant indispensable dans de nombreuses applications d'ingénierie, contribuant au fonctionnement efficace et fiable des systèmes dans un large éventail de domaines.

# Chapitre 05 : Calcul des supports d'appuis

## 5 Introduction :

Dans les ouvrages d'art, notamment les ponts, les appareils d'appui jouent un rôle fondamental dans la transmission des efforts entre le tablier et les appuis. Ils permettent d'absorber les déplacements relatifs dus aux charges, aux variations de température, ainsi qu'aux phénomènes différés comme le fluage et le retrait du béton. Le choix, la disposition et le dimensionnement de ces dispositifs doivent répondre à des exigences strictes en matière de sécurité, de durabilité et de performance structurelle. Dans le cas des dalles de pont, les appareils d'appui doivent être conçus de manière à supporter des charges verticales importantes tout en autorisant des déplacements horizontaux et des rotations dans certaines conditions. Leur conception repose sur une note de calcul rigoureuse, prenant en compte plusieurs paramètres mécaniques, géométriques et environnementaux.

### 5.1 Définition des appareilles d'appuis et notre rôle :

Un appareil d'appuis de pont est un élément de l'ouvrage placé entre le tablier et les appuis, dont le rôle est de transmettre les actions verticales dues à la charge permanente et aux charge d'exploitation, routière ou ferroviaires, et de permettre des mouvements de rotations ou de translation. (La figure 5-1) présente un isolateur sismique en élastomère typique et montre ses éléments constitutifs.

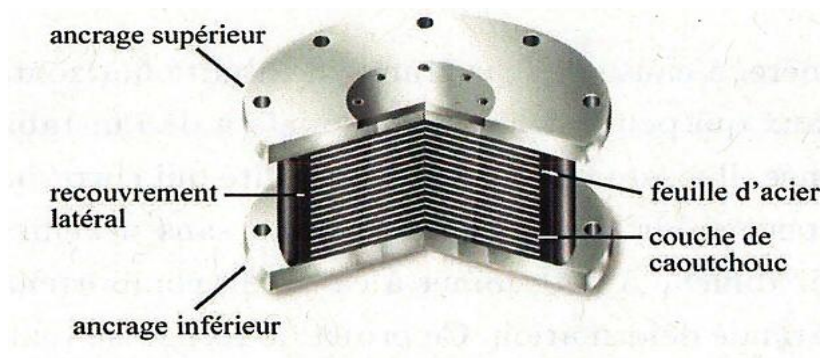


Figure 5-11: Isolateur sismique en élastomère typique.

## 5.2 Les différents types des appareils d'appuis :

(La Figure 5- 13) représente les différents types des appareils d'appuis frettés en caoutchouc et (la Figure 5-3) présente son schéma :

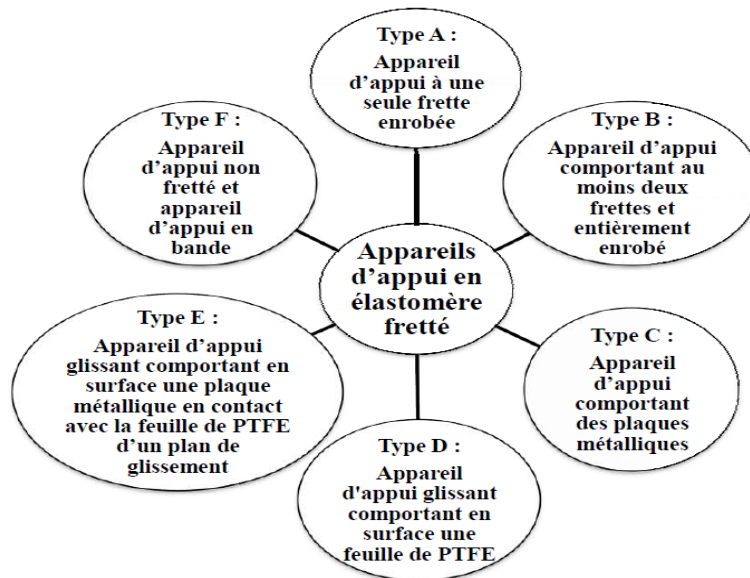


Figure 5- 12 :Les différents types des appareils d'appuis.

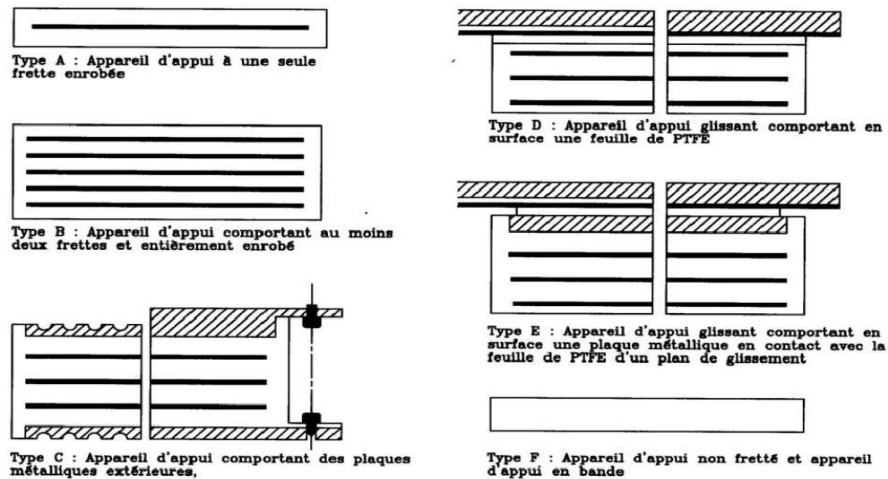


Figure 5-14:Les schémas de chaque types des appareils d'appuis.

### **5.3 Classification des appareils d'appuis :**

L'appareil d'appui est un dispositif qui permet de lier le tablier du pont à ses appuis ; piles ou culées, cette liaison doit assurer les 2 fonctions :

- Transmettre les charges verticales et horizontales vers les piles ou les culées.
- Permettre le libre mouvement du tablier dans les directions choisies que ce soient des translations ou des rotations.

On distingue deux types de mouvement des appareils d'appuis :

**5.3.1 Appareil d'appuis fixe :** il ne permet que la rotation du tablier en ce point.

**5.3.2 Appareil d'appuis mobile :** il permet la rotation et la translation en même temps.

Il existe essentiellement quatre types d'appareils d'appui qui sont :

- Les articulations en béton.
- Les appareils d'appuis spéciaux (à pot).
- Les appareils d'appuis sphériques (en acier).
- Les appareils d'appuis en élastomère fretté.

Notre choix a été porté sur les appareils d'appui les plus répandus en élastomère fretté, on vérifie que le déplacement est inférieur à 5mm.

#### **5.3.3 Appareils d'appuis en élastomère fretté :**

Ils sont constitués de feuillets d'élastomère (en général de néoprène) empilés avec interposition de tôles d'acier jouant le rôle de frettes (appui semi-fixe), ils ne sont donc ni parfaitement fixes ni parfaitement mobiles. Ce type d'appareils d'appuis est plus couramment employé pour tous les ouvrages en béton à cause des avantages qu'ils présentent :

- Facilité de mise en œuvre.
- Facilité de réglage et de contrôle.
- Ils permettent de répartir les efforts horizontaux entre plusieurs appuis.
- Ils n'exigent aucun entretien.
- Leur coût est relativement modéré.
- Ils transmettent les charges normales à leur plan, et ils permettent en même temps d'absorber par rotation et distorsion les déformations et translations de la structure.

Le principal intérêt de ces appareils d'appuis réside dans leur déformabilité vis-à-vis à des efforts qui les sollicitent, ils reprennent élastiquement les charges verticales, les charges horizontales et les rotations.

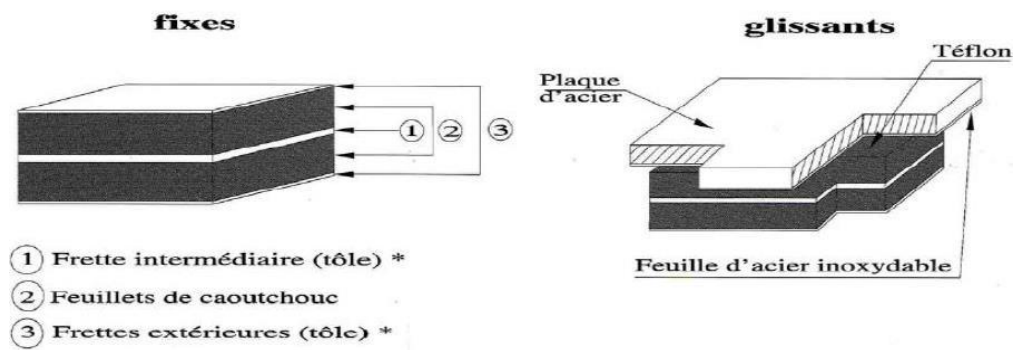


Figure 5-4 : Appareils d'appuis en élastomère fretté.

#### 5.4 L'importance de son appareil dans les ouvrages de type dalle de pont :

Dans les ouvrages de type dalle de pont, les appareils d'appui occupent une place essentielle dans le fonctionnement global de la structure. Contrairement aux ponts à poutres multiple ou les appuis peuvent être répartis sur plusieurs éléments porteurs, la dalle de ponts, en tant qu'élément monolithique ou faiblement divisée, transfère directement l'ensemble des charges vers les appuis situés aux extrémités ou aux points d'appuis intermédiaires.

- Ils absorbent les déplacements dus aux efforts thermiques, au fluage et au retrait du béton.
- Ils permettent la transmission efficace des charges verticales permanentes.
- Ils autorisent les rotations de tablier, nécessaires au bon comportement statique.
- Ils contribuent à la durabilité de l'ouvrage.

#### 5.5 Principe de L'isolation sismique des ponts :

L'isolation sismique repose sur le principe que si la période de vibration est augmentée suffisamment pour s'éloigner de la période d'excitation prédominante du séisme, les accélérations transmises à la structure (et par conséquent les forces d'inertie) sont considérablement réduites. Cependant, l'augmentation de la période engendre des déplacements plus importants concentrés au niveau de l'isolateur. Dès lors l'incorporation d'un dispositif de dissipation d'énergie (amortissement) à l'isolateur est requise. (La figure 5-5) représente tous les fonction d'un appareil d'appui.

(La figure 5-5)présentent, de façon idéalisée, l'effet de l'accroissement de la période et de l'amortissement respectivement sur les forces et déplacements sismiques.

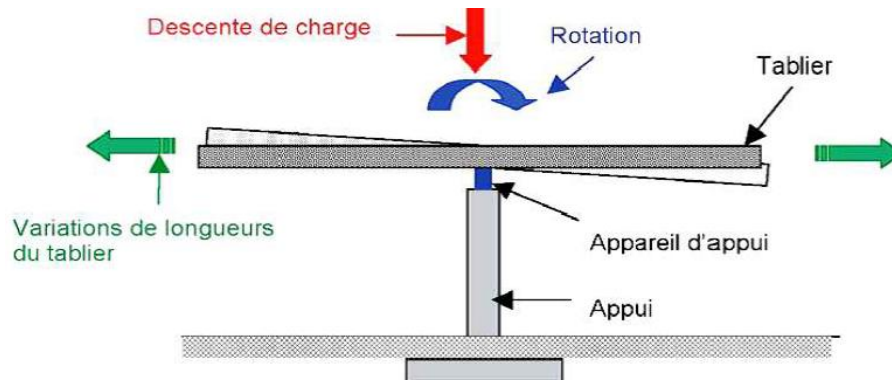


Figure 5- 15 :Fonctions d'appareils d'appuis.

## 5.6 Les paramètres puits en compte dans le calcul des isolateurs (appareils d'appuis) :

Le calcul des isolateurs sismique pour les ponts prend en compte plusieurs paramètres essentiels afin d'assurer la sécurité, la stabilité et la performance de la structure pendant un séisme. Voici les principaux paramètres à considérer :

### 5.6.1 Les paramètres mécaniques :

#### 5.6.1.1 Charge verticale permanente :

Les isolateurs doivent supporter en permanence des charges verticales importantes dues au poids du tablier et des véhicules, ce qui influence leurs propriétés mécaniques et leur dimensionnement pour éviter instabilité ou déchirure.

#### 5.6.1.2 Déplacement sismique maximaux :

Les isolateurs subissent des déplacements importants lors des séismes, et leur capacité à tolérer ces déplacements sans rupture est un paramètre clé dans le calcul.

#### 5.6.1.3 Rigidité latérale des isolateurs :

La rigidité latérale effective des isolateurs est prise en compte pour calculer la période de vibration du pont isolé et pour dimensionner la réponse sismique.

#### 5.6.1.4 Amortissement visqueux effectif :

Le coefficient d'amortissement du système d'isolation influence la dissipation d'énergie sismique.

### **5.6.2 Les paramètres géométriques des isolateurs :**

**Facteur de forme, élancement, largeur :** Ces paramètres définissent la capacité de l'isolateur à supporter les charges et les déplacements. La largeur est particulièrement importante pour la stabilité et la résistance à la rupture.

### **5.6.3 Les paramètres du site :**

La réponse des isolateurs dépend des propriétés des ondes sismiques locales, notamment le contenu fréquentiel et les caractéristiques spectrales du mouvement du sol. Ces paramètres influencent le dimensionnement optimal des isolateurs pour chaque zone sismique.

### **5.6.4 Les paramètres de sécurité :**

#### **5.6.4.1 Etats limite ultime :**

Incluent l'instabilité à l'état déplacé (perte de stabilité sous déplacement des matériaux élastomères).

#### **5.6.4.2 Etats limite service :**

Définissent des seuils avant la défaillance totale, permettant une évaluation plus fine de la performance sismique des isolateurs.

### **Remarque :**

On a choisi deux types pour l'explication :

- 1- Un silent bloc sous fondation de pont.
- 2- Un appareil d'appuis en élastomère fretté.

### **5.7 Définition d'un silent bloc sous fondation de pont :**

Bloc élastique en caoutchouc spécial, comprimé et interposé entre des pièces n'ayant entre elles qu'un mouvement de très faible amplitude, pour absorber les vibrations et les bruits, et que l'on utilise pour la fixation souple d'un moteur, d'une machine.

Un silent bloc sous fondation de pont, aussi appelé articulation élastique, est un élément qui permet d'absorber les vibrations et les chocs entre deux éléments mécaniques, ici entre la structure du pont et ses fondations. Ces supports élastiques, généralement en caoutchouc ou en élastomère, limitent la transmission des vibrations et des chocs, améliorant ainsi le confort et la durabilité de la structure.

Le silent bloc caoutchouc PAULSTRA est un organe possédant, à la fois de bonnes propriétés élastiques et des capacités d'amortissement exceptionnelles. La plupart de nos silent bloc et butée caoutchouc standards sont en caoutchouc naturel (Dureté Shore A), celui-ci étant choisi en raison de ses bonnes qualités dynamiques. Nos supports sont tenus en stock donc rapidement disponible, la livraison s'effectue en 24, 48h. Demandez et recevez l'avis de nos techniciens pour tous vos problèmes de vibrations(La figure 5-6) représente le type silent bloc.



Figure 5- 16 : Le silent bloc

En résumé, les silent blocs sous fondation de ponts sont des éléments qui :

- **Absorbent les vibrations :**

Ils réduisent la transmission des vibrations de la structure du pont vers les fondations.

- **Absorbent les chocs :**

Ils limitent l'impact des chocs sur la structure, protégeant ainsi les fondations et la structure du pont.

- **Améliorent le confort :**

En réduisant les vibrations, ils contribuent à un confort plus agréable pour les utilisateurs du pont.

- **Augmentent la durabilité :**

Ils protègent les éléments de la structure du pont contre les contraintes mécaniques, prolongeant ainsi leur durée de vie.

### 5.7.1 Fonctionnement :

Le silent bloc agit comme un amortisseur en absorbant les chocs et les vibrations à travers son matériau souple. Ce matériau permet de compenser les mouvements et les déformations de la structure, tout en réduisant la transmission de ces mouvements aux fondations.

### 5.7.2 Les avantages de silent bloc sous fondation de pont :

Réduction des vibrations : Les silent blocs réduisent considérablement les vibrations transmises à la structure du pont.

Protection des fondations : Ils protègent les fondations contre les chocs et les vibrations.

Amélioration de la durabilité : Ils prolongent la durée de vie de la structure du pont.

Amélioration du confort : Ils contribuent à un confort plus agréable pour les utilisateurs du pont.

### 5.7.3 Applications :

Les silent blocs sont utilisés dans de nombreux domaines, notamment :

Ponts : Pour isoler la structure du pont des vibrations et des chocs.

Voitures : Pour amortir les vibrations du moteur et de la suspension.

Machines : Pour réduire les vibrations et les bruits.

Construction : Pour isoler les bâtiments des vibrations.

(La figure 5-7) représente comme et où installer l'appuis de silent bloc.

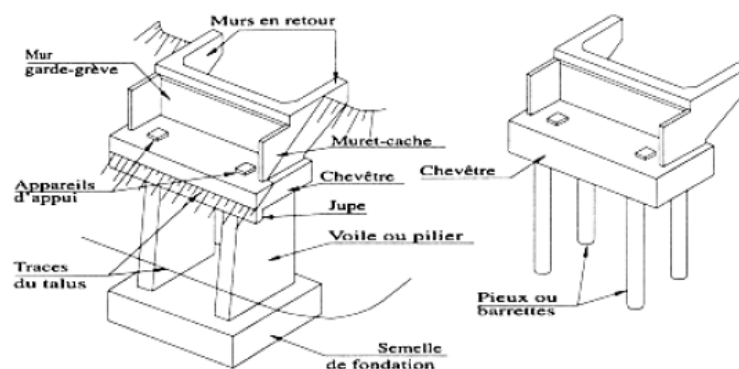


Figure 5- 17 :l'installation de silent bloc

## 5.8 Modalisation numérique par élément finit :

Un modèles numérique 3D sophistiqué utilisant le logiciel ADINA permet de simuler le comportement des isolateurs. Ce modèle intègre la formulation du caoutchouc selon le modèle d'Ogden compressible, adapté aux grandes déformations jusqu'à 700%.

## 5.9 Exemple de calcul :

On a choisi un exemple d'appareil d'appuis en élastomère fretté :

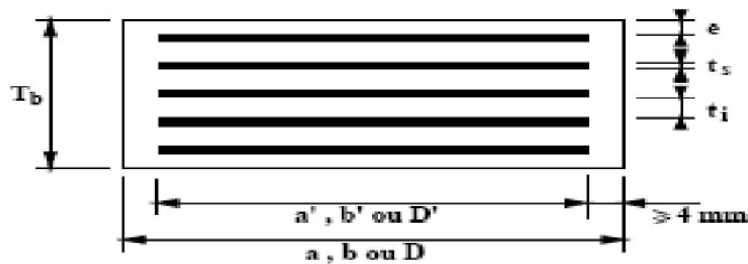


Figure 5- 18 : Dimension en plan de l'appareil d'appuis.

### 5.9.1 Les normes et réglementations applicables :

On a appliqué les normes et les règlements suivant dans les calculs :

Tableau 5-1 : Les normes et réglementations utiliser.

Norme /Règlement	Domaine d'application	Aspects clés pour isolateur sismique
<b>RPOA 2008</b>	Ouvrage d'art neufs et existants	Critère de conception, propriétés et vérifications des isolateur interaction sol-structure.
<b>RPA 2024</b>	Ouvrage béton armé, parasismique.	Sécurité, coefficients de calcul, combinaisons d'action.
<b>DTR-RCPR2008</b>	Charge et surcharge sur ponts.	Charge mobiles, poids propre, coefficients dynamiques.

### 5.9.2 Dimensionnement des appareils d'appui :

Le dimensionnement des appareils d'appui est essentiellement basé sur la limitation des contraintes de cisaillement qui se développent dans l'élastomère au niveau des plans de frettage et qui sont dues aux efforts appliqués ou aux déformations imposées à l'appui.

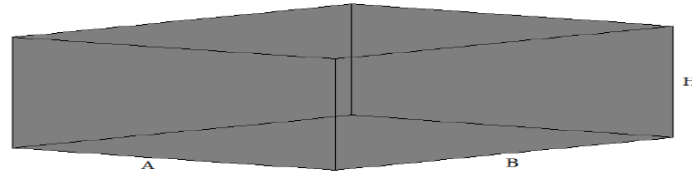


Figure 5- 19 :vue en plan d'un dé d'appui.

La désignation de l'appareil d'appuis est :

n : nombre de feuilles élémentaires d'élastomère.

e : épaisseur d'une feuille élémentaire.

t : épaisseur d'une frette intermédiaire.

a : coté perpendiculaire à l'axe de l'ouvrage.

b : coté parallèle à l'axe longitudinal de l'ouvrage.

Selon SETRA la condition de non écrasement :

Réactions max dues aux combinaisons :

1,35(G+D240) à L'ELU.

$N_{\max} = 0,9531 \text{ MN}$ .

### 5.9.3 Aire de l'appareils d'appui :

$$\sigma_m \geq \frac{N_{\max}}{a \times b} \leq \overline{\sigma}_m.$$

Avec :

On désigne par  $a \times b$  ; l'aire de l'appareil d'appui où :

a : Côte parallèle à l'axe horizontale de l'ouvrage.

b : Côte perpendiculaire à l'axe horizontal de l'ouvrage.

$\overline{\sigma}_m$ : Contrainte limite de compression de l'appareil d'appui  $\overline{\sigma}_m = 15 \text{ MPA}$ .

$N_{\max}$ : Effort normal sur l'appareil d'appuis, (effort tranchant dans la poutre).

On trouve :

$$a \times b \geq 635,4 \text{ cm}^2$$

#### 5.9.4 Détermination de la hauteur nette de l'élastomère :

D'après le document SETRA BT N04/1974 :

$$\tau_H \leq 0,5G.$$

$$\Delta h_{\max} = 13,35 \times 10^{-3} \text{m}.$$

$$G \times \left( \frac{\Delta h_{\max}}{T} \right) \leq 0,5G$$

D'où :  $T \geq 26,7 \text{ mm}$ .

On prend : **T = 50 mm**.

Avec :

U: retrait, fluage et température.

G: Module d'élasticité transversale.

$\tau_H$ : La contrainte de tangentielle due à la déformation lente.

$U_1 = \Delta h_m$  : Déformation lente (retrait, fluage, température)

#### 5.9.5 Dimension en plan de l'appareil :

Il faut respecter les conditions suivantes :

- La condition de non flambement.
- L'épaisseur minimale.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{a}{10} \leq T \leq \frac{a}{5} \rightarrow 5T \leq a \leq 10T \\ a \geq b \end{array} \right.$$

Sachant que :  $a \times b \geq 635,4 \text{ cm}^2$ .

On prend :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{a = 300mm} \\ \mathbf{b = 400mm} \end{array} \right.$$

En conclusion on va prendre un appareil d'appuis type : **CIPEC 300x400x5(12+3)**.

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{ts = 3 \text{ mm Frette métallique.}} \\ \mathbf{t = 12 \text{ mm Frette d'élastomère.}} \end{array} \right.$$

### 5.9.6 Répartition des efforts horizontaux sur l'infrastructure :

Les charges de chaussées, des systèmes A(l) et Bc sont susceptibles de développer les réactions de freinage, effort s'exerçant sur la surface de la chaussée dans l'un ou l'autre sens de circulation.

#### 5.9.6.1 Force de freinage développée par Système A(L) :

L'effort de freinage correspondant à la charge.

$$H = A(L) \times F$$

$$F = \frac{1}{(20 + 0,35\% \times S)}$$

Avec :

S : désigne la surface chargée en m<sup>2</sup>

$$A=221,65t.$$

$$S=224,8m^2.$$

$$H_{A(l)} = 10.66 t \rightarrow H_{A(l)} = 0.76t \text{ (Par chaque appareil d'appui).}$$

#### 5.9.6.2 Force de freinage développé par système B<sub>c</sub> :

Un camion peut développer un effort de freinage égal à son poids. Un seul camion est supposé freiner donc : F= 30t.

Donc la force qui revient pour chaque appareil d'appui :

$$H_{BC} = \frac{30}{2 \times 7}$$

$$H_{BC} = 2.14 t.$$

#### 5.9.6.3 Effort dû au séisme :

L'intensité du séisme est :

G : poids propres du tablier G = 635,81 tonnes.

- Effort horizontal dû au séisme est égale à :

$$\xi_H = \xi_S \times G$$

Avec :

$$\xi_H = 0.1 : \text{Accélération horizontale.}$$

$$\xi_S = 672 t : \text{Poids propre du tablier.}$$

$$G = 63,58 t.$$

- Effort vertical dû au séisme est égale à :

$$\xi_V = \xi_S \times G$$

Avec :

$\xi_V = 0.0$  : Accélération verticales.

$\xi_S = 635,81t$  : Poids propre du tablier.

$G = 44.5 t$ .

#### 5.9.6.4 Surcharge du vent :

L'action du vent est perpendiculaire à l'axe horizontal de l'ouvrage, on considère une Pression de  $250 \text{ kN/cm}^2$

La section latérale sur laquelle agit le vent est :

$$S = 28,1 (1,45 + 0,2 + 0,09) = 48,89 \text{ m}^2.$$

$$H_V = 48,89 \times 0,25 = 12,22t.$$

#### 5.9.7 Vérification des contraintes :

##### 5.9.7.1 Contrainte de compression :

$$N_{\max} = 0,9531 \text{ MN}.$$

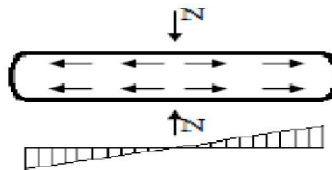


Figure 5-20: Contrainte normale sur les feuilles fretté.

$$\sigma_m = \frac{N_{\max}}{a \times b} = \frac{0,9531}{0,3 \times 0,4} = 0,94 \text{ MPA}.$$

$$\sigma_m = 0,94 \text{ MPA} \leq \bar{\sigma}_m = 15 \text{ MPA} \Rightarrow \text{Vérifiée},$$

##### 5.9.7.2 Contrainte de cisaillement :

On vérifie que :

$$\tau_N + \tau_\alpha + \tau_H \leq 5G.$$

- Effort de cisaillement dû à l'effort normal :

$$\tau_N = (1,5 \times \sigma_m) / \beta \leq 3G$$

Où :

$$\beta = \frac{a \times b}{2t(a + b)}$$

$$\beta = \frac{30 \times 40}{2 \times 1 \times (30 + 40)} = 8,57.$$

Alors :

$$\tau_N = (1.5 \times 7.94)/8.57 = 13.89 \text{ Kg/cm}^2 \leq 3G = 24 \text{ Kg/cm}^2$$

Avec :

$$G = 8 \text{ Kg/cm}^2$$

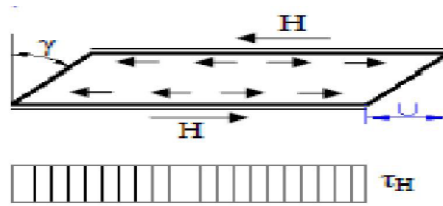


Figure 5- 21 : Contrainte de cisaillement sur les feuilles fretté.

- **Effort de cisaillement dû à l'effort horizontal :**

- **Sous un déplacement lent :**

$$\tau_{H1} = (G \times U_1)/T \leq 0.5G$$

$U_1$ : Déplacement dû au déplacement (température, retrait et fluage).

$T$ : Hauteur nette de l'élastomère.

$$\tau_{H1} = (8 \times 1.335)/5 = 2.136 \text{ Kg/cm}^2 \leq 0.5G = 4 \text{ Kg/cm}^2 \rightarrow \text{Vérifiée.}$$

- **Sous effet dynamique :**

$$\tau_{H2} = H_2/a \times b \leq 0.5G$$

$$\tau_{H2} = 2140/30 \times 40 = 1.78 \text{ Kg/cm}^2 \leq 0.5G = 4 \text{ Kg/cm}^2 \rightarrow \text{Vérifiée.}$$

Avec :

$H_2$ : Effort de freinage = 2.14t développer par la charge  $B_c$ .

- **Sous effort de déformation cumulée :**

$$\tau_H = \frac{\tau_{H1} + \tau_{H2}}{2} \leq 0.7G$$

$$\tau_H = \frac{2.136 + 1.78}{2} = 3.02 \text{ Kg/cm}^2 \leq 0.7G = 5.6 \text{ Kg/cm}^2$$

- **Sollicitation due à une rotation :**

$$\tau_a = \frac{G}{2} \times \left(\frac{a}{t}\right)^2 \times a_t < 1.5G$$

$$\tau_a = \frac{8}{2} \times \left(\frac{30}{1}\right)^2 \times 0.794 \times 10^{-3} = 2.85 \text{ Kg/cm}^2 < 1.5G = 12 \text{ Kg/cm}^2 \rightarrow \text{Vérifiée.}$$

Les contraintes de cisaillement sont limitées à :

$$\tau_\alpha + \tau_H + \tau_N \leq 5G$$

$$2.85 + 3.02 + 13.89 = 19.76 \text{ Kg/cm}^2 < 40 \text{ Kg/cm}^2 \rightarrow \text{Vérifiée.}$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_0 = 10 \times 10^{-3} \text{rad} \\ \alpha_t = a_t/n \\ \alpha_T = \alpha + \alpha_0 \\ \alpha_T = (10 \times 10^{-3}) - (6.03 \times 10^{-3}) \times = 3.97 \times 10^{-3} \text{rad} \\ n = 5 \\ \alpha_t = 0.794 \times 10^{-3} \text{rad} \end{array} \right.$$

$\alpha_0$ : Rotation supplémentaire pour tenir compte des imperfections de pose.

$\alpha_T$ : Rotation maximale de l'appareil d'appui (en service à vide).

$n$  : nombre de feuillet de l'élastomère.

### 5.9.7.3 Condition de non cheminement et non glissement :

$$\sigma_m = \frac{N_{\max}}{a \times b} \times n = \frac{23560}{0.3 \times 0.4} \times 5 = 23.26 \text{ Kg/cm}^2 > 20 \text{ Kg/cm}^2 \rightarrow \text{Vérifiée.}$$

Avec :

$$N_{\max} = 23.56 \text{ t.}$$

$$H < f \times N_{\min}$$

$$F = 0.1 + \frac{6}{\sigma_{\min}} = 0.35.$$

$$H = G \times a \times b \times \frac{U_1}{T} = 8 \times 10^{-3} \times 30 \times 40 \times \frac{1.385}{5} = 2.65 \text{ t} > 8.24 \text{ t} \rightarrow \text{Vérifiée.}$$

F : Coefficient de frottement.

### 5.9.8 Dimensionnement des frettes :

On doit vérifier les conditions suivantes :

$$t_s \geq \frac{a \times \sigma_m}{\beta \times \sigma_e}$$

$$t_s \geq \frac{30 \times 23.26}{8.57 \times 2200} = 0.03 \text{mm.}$$

On prendra :  $t_s = 3 \text{mm}$ .

Avec :

$\sigma_e$ : Limite d'élasticité en traction de l'acier constructif des frettes.

$\sigma_e = 2200$  (Acier E24-1 :  $e < 3 \text{mm}$  {SETRA Bulletin technique})

### 5.9.9 Ferrailage du dé d'appui :

Le dé d'appui permet de diffuser les charges localisées provenant directement du tablier qui peut provoquer des fissures, pour cela on disposera des armatures de chaînage et d'éclatement.

### 5.9.9.1 Armatures de chaînage :

La section calculée doit reprendre un effort de :  $R = 0,25R_{\max} = 23,82 \text{ t}$ .

$$A_c = \frac{0,25R_{\max}}{\bar{\sigma}_s}$$

$$A_c = \frac{0,2382}{333,33} = 7,14 \text{ cm}^2$$

Avec :  $\bar{\sigma}_s = 333,33 \text{ MPa}$ . pour  $f_e = 500 \text{ MPa}$ .

On prend : **6HA12**.

### 5.9.9.2 Armatures de profondeur :

Pour limiter la propagation d'éventuelles fissures ; on dispose des armatures.

$$R = 0,125R_{\max} = 11,91 \text{ t}$$

$$A_p = \frac{0,125R_{\max}}{\bar{\sigma}_s}$$

Avec :  $\bar{\sigma}_s = 333,33 \text{ MPa}$ . pour  $f_e = 500 \text{ MPa}$ .

$$A_p = \frac{0,1191}{333,33} = 3,57 \text{ cm}^2$$

On prend : **4HA12**.

### 5.9.9.3 Armatures de diffusion :

- **Ferrailage de surface (frettes sup) :**

Ce sont des armatures capables de reprendre :  $4\% R_{\max}$ .

$$A_{fs} = \frac{0,04R_{\max}}{\bar{\sigma}_s} = 1,14 \text{ cm}^2$$

On prend : **3HA8** pour  $A_{fs} = 1,51 \text{ cm}^2$ .

- **Ferrailage inférieur ou d'éclatement « frettes inf » :**

Les frettes sont disposées sur une profondeur Z tel que :

$$\frac{h}{3} < Z < h$$

$$A = \frac{0,1R_{\max}}{\bar{\sigma}_{fs}} = 2,85 \text{ cm}^2$$

On prend : **6HA8** pour  $A = 2,51 \text{ cm}^2$ .

## **Conclusion :**

En conclusion, le calcul des appareils d'appuis constitués une étape essentielle dans la conception des tabliers de ponts. Ces dispositifs assurent la transmission des efforts entre la superstructure et les appuis tout en permettant les déplacements et rotations nécessaires dus aux sollicitations externes. Une bonne compréhension des types d'appuis, de leur comportement et des efforts qu'ils subissent garantit la sécurité, la durabilité et la performance de l'ouvrage.

## CONCLUSION GENERALE

Au terme de ce travail, nous avons mis en lumière l'importance croissante du caoutchouc comme matériau d'ingénierie, en particulier dans la maîtrise des sollicitations cycliques auxquelles sont exposées les structures modernes. L'étude menée, structurée autour de cinq chapitres complémentaires, nous a permis de cerner les multiples facettes de ce matériau aux propriétés remarquables.

Dans un premier temps, les généralités sur le caoutchouc nous ont permis de mieux comprendre sa nature, son origine, ainsi que ses caractéristiques physico-chimiques fondamentales. Cette base de connaissances a constitué le socle pour aborder, dans un second chapitre, les différentes applications du caoutchouc dans le domaine de la construction, où sa flexibilité, sa résilience et sa capacité à s'adapter aux contraintes mécaniques en font un matériau de choix.

L'analyse du comportement mécanique du caoutchouc, présentée dans le troisième chapitre, a mis en évidence ses propriétés viscoélastiques, particulièrement pertinentes face aux sollicitations cycliques. Cette aptitude à restituer et dissiper l'énergie nous a conduit à le considérer, dans le quatrième chapitre, comme un matériau d'amortissement à part entière, capable de contribuer significativement à la longévité et à la sécurité des ouvrages.

Enfin, le dernier chapitre a été consacré à l'étude du dimensionnement des appareils d'appui en caoutchouc utilisés dans les tabliers de ponts. Ce volet technique a permis de concrétiser l'apport du caoutchouc dans l'ingénierie des infrastructures, en soulignant les critères de calcul, les normes en vigueur et les exigences de performance attendues de ces dispositifs.

Ainsi, à travers une approche à la fois théorique et technique, ce mémoire a démontré que le caoutchouc, souvent perçu comme un matériau secondaire, occupe en réalité une place stratégique dans la conception de structures capables de résister aux sollicitations dynamiques. Sa capacité à absorber l'énergie, à limiter les déformations et à préserver l'intégrité des ouvrages en fait un allié incontournable de l'ingénieur moderne.

Ce travail ouvre des perspectives intéressantes quant à l'optimisation des systèmes d'amortissement et au développement de solutions innovantes intégrant le caoutchouc dans les projets d'infrastructure, notamment en contexte sismique ou soumis à des charges répétées. Il appelle également à poursuivre la recherche sur les performances à long terme de ces matériaux, en lien avec les défis contemporains de durabilité, de sécurité et d'adaptabilité des structures.

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## Règlements

- RPOA 2008: Règlement Ouvrage d'art neufs et existants.
- RPA : Règles d'Ouvrage béton armé, parasismique.
- DTR-RCPR2008 :Charge et surcharge sur ponts.

## Mémoires

- Etude sur les appareils d'appui en élastomère fretté Proposé et dirigé par : Mr. S. LAKEHAL ARROUDJ Nour El Houda (2014/2015).
- Elaboration comportement et durée de vie en fatigue du caoutchouc naturel renforcé de siliceAMINE BENNANI.
- Structure élastomère sous chargement cyclique :comportement,fatigue,durée de la vie IDA RAOULT (HAL open science) (2004/2005).
- Comportement sous bases température des composés en élastomère utilisés dans les isolateurs sismiques des ponts DJAMEL ANKIK (2018/2019).

## Les livres Et Les Thèse

- Fatigue multiaxiale des élastomères ADIL ZINE 2014.
- Endommagement en fatigue des élastomères JEAN-BENOIT Le Cam (Thèse.2005).
- Fatigue thermomécanique des élastomères : Critère de durée de vie basé sur l'endommagement avec prise en compte du vieillissement physico-chimique ANDREAS HOTTIN (Thèse 2023).