

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Génie Mécanique
Parcours : Master
Spécialité : Construction Mécanique

Thème

**Analyse de la propagation des fissures dans les
appareils d'appuis en néoprène fretté sévèrement
déformé dans le cas des ponts sous chaussé**

Préparé par :

- **BENELHADJ Elmokhtar Elmansour**

- **BOUAZZA Safa**

Soutenu publiquement le : 21 / 06 / 2023, devant le jury composé de :

M^{me} SLIMANI Halima	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Présidente
M^r.ELGUERRI Mohamed	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M^r. HADJI Lazreg	Professeur (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M^{me}BENARBIA Djamila	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadrante

Année universitaire : 2022 - 2023

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce travail fut une occasion merveilleuse de rencontre et d'échange avec de nombreuses personnes. Toutes ont contribué à des degrés divers de la conception à la finalisation de ce travail de recherche.

Nos dettes de reconnaissances sont, à ce point énorme à leurs égards.

Nous tenons à exprimer particulièrement notre gratitude à Mademoiselle **BENARBIA Djamila** dont, les précieux conseils, la disponibilité, la sollicitude et les encouragements m'ont permis de mener ce travail à son terme.

Nous tenons également à remercier Monsieur **MEKROUSSI Saïd**.

Nous sommes très reconnaissants à Monsieur le Chef de bureau de l'entretien des ouvrages d'art et les cadres et les ingénieurs de la direction des travaux publics de la Wilaya de Tiaret.

Nous ne manquerons non plus de dire un grand merci aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer cette étude à sa valeur, et de me faire part de leurs remarques sûrement pertinentes qui, avec un peu de recul, sans nul doute, au perfectionnement du présent travail.

Nous espérons du fond de cœur que l'effort déployé réponde aux attentes des uns et des autres.

Merci

Dédicaces

*A mes très chers parents que je remercie pour leurs
encouragements, leurs soutiens permanents, leurs disponibilités et
leur amour.*

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	ii
DEDICACES.....	iii
Table des matières.....	vi
Liste des tableaux	xi
Liste des figures.....	xii
Liste des notations et abréviations.....	xv
INTRODUCTION GENERALE.....	1
1. Problématique.....	2
2. Objectifs de la recherche.....	3
3. Structure et contenu du document.....	3
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES APPAREILS D’APPUI	4
I.1 INTRODUCTION	5
I.2 FONCTIONS DES APPAREILS D’APPUI	5
I.2.1 Les fonctions habituelles	6
I.2.2 Les fonctions optionnelles.....	6
I.3 CLASSES ET DIFFERENTS TYPES D’APPAREILS D’APPUI.....	7
I.3.1 Classement selon le critère de déplacement	7
I.3.2 Classement sur la base du concept	8
I.4 LES APPAREILS D’APPUI EN ELASTOMERE FRETTE (AANF).....	12
I.4.1 Structure des appareils d’appui en néoprène fretté	12
I.4.2 Comportement de l’appareil d’appui en néoprène fretté	14
I.5 CONCLUSION.....	18
CHAPITRE II : DIMENSIONNEMENT DES APPAREILS D’APPUI EN NEOPRENE FRETTE.....	19
II.1 INTRODUCTION.....	20
II.2 FONCTIONNEMENT DES APPAREILS D’APPUI EN NEOPRENE FRETTE.....	20
II.2.1 Répartition de la charge.....	21
II.2.2 Distorsion.....	22
II.3 DIMENSIONNEMENT DES APPAREILS D’APPUI.....	24
II.4 PATHOLOGIE ET CAUSES POSSIBLES DE DESORDRES	28
I.4.1 Défauts en néoprène.....	28

I.4.2 Défauts de frettes en acier.....	29
I.4.3 Défauts en néoprène fretté.....	29
II.5 CONCLUSION.....	30
CHAPITRE III : APPROCHES MECANQUES APPLIQUEE.....	31
III.1 INTRODUCTION.....	32
III.2 MECANIQUE DE LA RUPTURE APPLIQUEE.....	32
III.3.1 MODES ELEMENTAIRES DE FISSURATION.....	33
III.4.1 CRITERES DE RUPTURE.....	36
III.3.2 CRITERE DU FACTEUR D'INTENSITE DE CONTRAINTES.....	36
III.4.2 CRITERE DU TAUX DE RESTITUTION D'ENERGIE G OU DE L'INTEGRALE J.....	38
III.3 CONCLUSION.....	41
CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION.....	42
IV.1 INTRODUCTION.....	43
IV.2 PRESENTATION DU MODELE NUMERIQUE.....	44
IV.3 RESULTATS ET DISCUSSION.....	48
IV.3.1 EVALUATION DES CONTRAINTES MAXIMALES	49
IV.3.2 ANALYSE DE LA PROPAGATION DES FISSURES DANS LES COUCHES DU STRATIFIE.....	49
IV.4 CONCLUSION.....	56
CONCLUSION GENERALE.....	58
1. Conclusion.....	59
2. Perspectives de la recherche.....	60
REFERENCES BIBLIGRAPHIQUES.....	61
Résumé.....	65

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II. 1 Synthèse de vérifications à effectuer.....	27
Tableau IV. 1 Caractéristiques mécaniques et géométriques.....	45

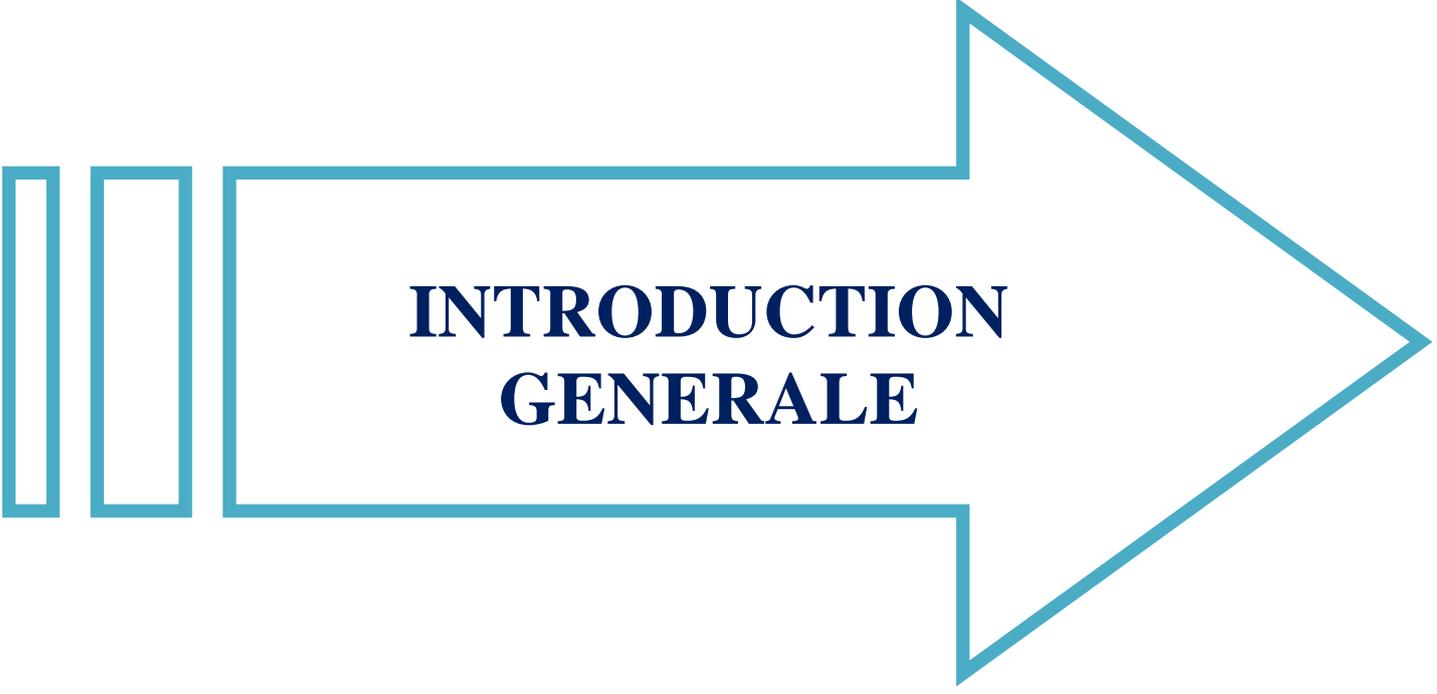
LISTE DES FIGURES

Figure I.1 Fonction d'un appareil d'appui	7
Figure I.2 appareil d'appui à plaques métalliques	8
Figure I.3 appareil d'appui à balanciers à contact linéaire	9
Figure I. 4 Appareil d'appui à balanciers à rotule axiale	9
Figure I. 5 Exemples d'un appareil d'appui à rouleau.....	9
Figure I. 6 composition schématique d'un appareil d'appui à pot.....	10
Figure I. 7 Appareil d'appui en béton armé.....	11
Figure I. 8 déplacements types des appareils d'appui en caoutchouc fretté.....	11
Figure I. 9 appareils d'appui en caoutchouc fretté.....	12
Figure I. 10 Schéma (a) et photo (b) d'un appareil d'appui en néoprène fretté.....	12
Figure I. 11 différents types d'appareils d'appui en élastomère fretté.....	13
Figure I. 12 Exemples de types d'appareils d'appui en néoprène fretté.....	14
Figure I.13 Essai de traction jusqu'à la rupture (a) et de traction d'un cycle de charge/décharge (b) d'un élastomère chargé de noir de carbone.....	15
Figure I.14 Effet de cristallisation sous contrainte.....	16
Figure I.15 Influence de la température sur le comportement de silicone chargé de silice dans l'essai de relaxation en cisaillement (a) et cisaillement cyclique (b).....	16
Figure I. 16 Réponse mécanique en compression (a) et en cisaillement (b) de l'AANF pour le premier et le troisième chargement.....	17
Figure II.1 Ecrasement d'un appareil d'appui.....	21
Figure II.2 Distorsion d'un appareil d'appui.....	22
Figure II. 3 Mesure de distorsion d'un appareil d'appui.....	23
Figure II. 4 Déformation en S d'un appareil d'appui.....	24
Figure II. 5 Appareil d'appui en néoprène fretté.....	24
Figure II. 6 Mécanisme de déplacement du tablier dû à sa rotation au niveau de l'appui.....	26
Figure II. 7 Action de la force de freinage sur le déplacement du tablier	27
Figure II. 8 Actions sismique.....	27

Figure II.9 mauvaise tenue de la formulation du caoutchouc aux effets de l'ozone.....	28
Figure II.10 Corrosion des frettes en acier.....	29
Figure II.11 rupture du plan d'adhésion.....	30
Figure III.1 Propagation d'une fissure.....	33
Figure III.2 Modes de fissuration.....	34
Figure III.3 Zone délimitant le voisinage d'une pointe de fissure.....	34
Figure III.4 Contour d'intégration.....	40
Figure IV.1 Schéma descriptif de l'échantillon.....	44
Figure IV.2 Création du modèle en Abaqus	45
Figure IV. 3 Introduction des propriétés mécaniques.....	46
Figure IV.4 Construction du stratifié.....	46
Figure IV.5 Application des conditions de Chargement.....	47
Figure IV.6 Exemple de création de fissure longitudinale.....	47
Figure IV.7 Exemple d'Application de maillage dans une plaque de néoprène ayant fissure transversale.....	48
Figure IV.8 Visualisation des résultats.....	48
Figure IV.9 Les contraintes maximales dans les différentes couches.....	49
Figure IV.10 Variation du FIC en fonction du rapport a/w en mode I et II.....	50
Figure IV.11 Variation du FIC en fonction du rapport a/w en mode I et en mode II.....	51
Figure IV.12 Variation du FIC en fonction du rapport a/w en mode I et en mode II.....	52
Figure IV.13 Variation du FIC en fonction du rapport a/w en mode I et en mode II.....	52
Figure IV.14 Variation du FIC en fonction du rapport a/w en mode I et en mode II (longitudinal).....	53
Figure IV.15 Variation du FIC en fonction du rapport a/w en mode I et en mode II (transversal).....	53
Figure IV.16 Variation du FIC en fonction du rapport a/w en Néoprène (Longitudinal).....	54
Figure IV.17 Variation du FIC en fonction du rapport a/w en Néoprène (transversal).....	55
Figure IV.18 Variation du FIC en fonction du rapport a/w (Longitudinal).....	55
Figure IV.19 Variation du FIC en fonction du rapport a/w (transversal).....	56

LISTE DES NOTATIONS & ABREVIATIONS

a	Longueur ou demi-longueur de la fissure
w	Largeur de la plaque
E	Module d'élasticité longitudinale (module de Young)
G, G_C	Taux de restitution de l'énergie, Taux de restitution de l'énergie critique.
J	Intégrale de contour.
K_I	Facteur d'intensité de contraintes en mode I
K_{II}	Facteur d'intensité de contraintes en mode II
K_{III}	Facteur d'intensité de contraintes en mode III
K_C	Facteur d'intensité de contraintes critique
U_s	Energie interne de déformation.
U_s^e	Energie interne de déformation élastique.
U_s^p	Energie interne de déformation plastique.
W_{ext}	Energie potentielle des forces extérieures
W_e	Energie de déformation élastique
r, θ	Le rayon et l'angle en coordonnées polaires.
$\alpha(a)$	coefficient de correction géométrique
γ_s	énergie superficielle caractéristique du matériau
ω_C	la séparation critique de fissure cohésive
ν	Coefficient de poisson.
μ	Module de cisaillement.
σ	composantes normale du tenseur de contraintes
τ	composantes tangentielle du tenseur de contraintes



**INTRODUCTION
GENERALE**

1. Problématique

L'amorçage de toute défaillance dans une structure mécanique soumise à des sollicitations diverses est provoqué par la naissance des fissures et donc une apparition de déformations permanentes et imposition d'une diminution de la rigidité des matériaux.

Afin de pallier à ce problème majeur auquel font face les différents mécanismes, particulièrement ceux liés aux infrastructures routières, des études qui se poursuivent par maints chercheurs virent vers la proposition d'utilisation des matériaux rigides avec de nouvelles techniques de réalisation qui assurent le retour de stabilité et de résistance.

Les appareils d'appui sont des éléments importants du système mécanique de la structure dont le rôle principal est de transmettre les actions verticales dues à la charge permanente et aux charges d'exploitation, routières ou ferroviaires, et de permettre des mouvements de rotation ou de translation.

La structure n'étant pas parfaitement rigide et étant soumise aux éléments extérieurs comme : vent, dilatation thermique, freinage, ..., les appareils d'appui doivent laisser la structure se déplacer tout en la dirigeant. La surveillance et l'entretien des appareils d'appui nécessitent donc de connaître le principe du fonctionnement de l'ouvrage. Celui-ci doit figurer dans son document signalétique et être consulté avant toute opération de surveillance des appareils d'appui. Afin de bien analyser le fonctionnement d'une structure, il est primordial de bien connaître le schéma théorique des possibilités de ses appareils d'appui et ensuite de s'assurer de la fonctionnalité des appareils.

Plusieurs facteurs nuisibles peuvent influencer le bon fonctionnement du système et provoquer des dégradations inaperçues causant au cours du temps son endommagement total. La présence d'une fissure d'origine mécanique dans les différentes couches du composites stratifié constituant l'appareil d'appuis menace directement la durabilité de la liaison et menace la stabilité de l'ouvrage. La propagation des fissures est un phénomène très dangereux qui mérite d'être mieux compris afin d'apporter les solutions adéquates et décisives qui conduit dans la plupart des cas à procéder à l'action de vérinage.

2. Objectifs de la recherche

Le but principal assigné dans cette étude est d'établir une recherche qui permet d'apporter une bonne compréhension théorique du comportement mécanique de néoprène et de frettes constituant le composite stratifié dans les appareils d'appuis des ponts sous chaussés, subissant des déformations nocives en poursuivant la propagation des fissures préexistantes dans les différentes couches.

Le travail présente une analyse du phénomène de la propagation des fissures munie d'une étude paramétrique et comparative en s'appuyant sur les critères adoptés en mécanique de la rupture basée sur la détermination du facteur d'intensité des contraintes.

3. Structure et contenu du document

Le travail entrepris se divise en quatre chapitres :

Dans les trois premiers chapitres, une synthèse bibliographique, a été faite dont le but est d'enrichir les connaissances sur la nature et le comportement des matériaux en question, développée et dirigée à la fin vers une description du cas proposé à l'étude.

Au début, et en premier chapitre, on présentera un aperçu général sur les différents types des appareils d'appuis en élastomère fretté servis dans les ponts routiers. En deuxième chapitre une synthèse sur l'ensemble des paramètres à prendre en considération pour le dimensionnement des appareils d'appuis en néoprène fretté. Ensuite, un rappel théorique, décrit les principales approches mécaniques et critères de ruptures adoptés pour le modèle étudié, est abordé dans le troisième chapitre.

Le quatrième chapitre sera axé sur l'étude du phénomène de la propagation des fissures dans les couches de la structure de la liaison d'appuis, en identifiant les paramètres mis en jeu et qui ont une influence sur le comportement mécanique du matériau, en s'appuyant sur la détermination du facteur d'intensité de contraintes, on terminera par une étude comparative entre les cas étudiés.

A la fin, une conclusion générale, a résumé l'ensemble des résultats obtenus dans ce travail, en mettant en exergue les points les plus essentiels de cette recherche afin d'aboutir à quelques perspectives d'études dans l'avenir.

CHAPITRE I



GENERALITES SUR LES APPAREILS D'APPUIS

I.1 INTRODUCTION

Les appareils d'appuis sont le plus couramment employés pour assurer la liaison entre le tablier d'un pont et ses piles. Ils peuvent être également utilisés en plusieurs domaines comme, par exemple, les stades, les pipelines ou tous types de bâtiments. Les appareils d'appui sont des éléments importants de la structure pour lesquels il existe une notion d'usure et de durabilité inférieure à celle de l'ouvrage et que l'on considère alors comme de la matière consommable. A ce titre, on se doit d'apporter tout le soin nécessaire à leur choix, leur qualité, leur conception et leur mise en œuvre. D'autant que le coût du produit lui-même est sans commune mesure avec celui des opérations d'interventions pour soulever la structure, remplacer un appareil déficient et/ou réparer des bossages. Une étude menée par le SETRA [1], il y a une dizaine d'années, sur les causes d'intervention sur les ouvrages pour la remise en état des appareils d'appui (tous types d'appareils d'appui confondus) a permis de mettre en évidence que les raisons de ces interventions étaient la conséquence des trois facteurs suivant, d'importance (en nombre) globalement équivalente :

- Des défauts consécutifs à une qualité des produits défectueuse (corrosion, désadhérisation,...) ;
- Des défauts de pose ;
- Des désordres consécutifs à un dimensionnement erroné (plaque de glissement trop courte, insuffisance de feuillets d'élastomère, dimensions en plan insuffisantes, ...).

I.2 FONCTIONS DES APPAREILS D'APPUIS

Les appareils d'appui sont des éléments utilisés pour permettre la rotation entre deux parties d'une structure et transmettre les charges définies dans les spécifications appropriées ainsi qu'afin de limiter les degrés de liberté dans le système, permettent des déplacements dans une seule direction ou dans toutes les directions d'un plan ; dont, le rôle principal est d'assurer la transmission des :

- actions verticales dues à la charge permanente et aux charges d'exploitation routière,
- mouvements de rotation (effets des charges et des déformations différées du béton),
- déplacements relatifs entre les deux parties suite aux effets de variations de longueurs de l'ouvrage (effet thermique, retrait, fluage, freinage, ...).

Il est primordial de connaître le principe du fonctionnement de l'ouvrage avant d'entamer toute éventuelle opération de surveillance ou d'entretien des appareils d'appui ce qui nécessite à consulter préalablement les documents signalétiques conjoints.

1.2.1 Les fonctions habituelles

a. Transmission des forces verticales

b. Rotation

- dans une direction avec ou sans transmission de moments,
- dans toutes les directions avec ou sans transmission de moments.

c. Déplacements

- fixes avec transmission des forces horizontales (déplacement nul),
- unidirectionnels avec transmission des efforts perpendiculaires au sens privilégié de déplacement, ainsi que des efforts dus à la distorsion ou au frottement induits par le déplacement et la variation d'excentrement sur l'appui ou/et le tablier,
- multidirectionnels avec transmission des efforts dus à la distorsion ou au frottement et des variations d'excentrement.

1.2.2 Les fonctions optionnelles

a. Guidage

Lorsqu'il est souhaitable que l'ouvrage se translate sur ses appuis avec un jeu transversal minime (quelques mm) on fait appel à un dispositif de guidage intégré à l'appareil ou indépendant. Les exemples les plus connus sont les dents ou les rainures de guidage des appareils d'appui métalliques, ainsi que les clavettes ou les plaques de glissement guidées des appareils d'appui à pot unidirectionnel. Les ouvrages courbes possèdent souvent des dispositifs de guidage intégrés à l'appareil ou constitués d'appareils spécifiques.

b. Anti-soulèvement

Cette fonction est recherchée dès qu'une réaction sur un appareil risque d'être négative et d'entraîner un déplacement de la structure. C'est le cas des travées de rive de faible portée d'ouvrages hyperstatiques, de nombreux ponts suspendus, etc.

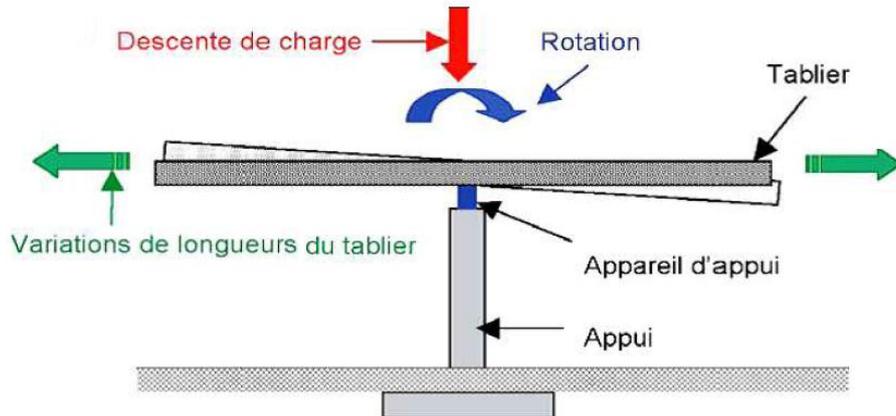


Figure I.1 Fonction d'un appareil d'appui [2]

I.3 CLASSES ET DIFFERENTS TYPES D'APPAREILS D'APPUI

Il existe essentiellement quatre types d'appareils :

- l'articulation en béton
- les appareils d'appuis en élastomère fretté
- les appareils d'appuis spéciaux
- les appareils d'appuis métalliques

Les appareils d'appuis peuvent en outre être fixes, mobiles dans un ou deux directions ou mobiles en rotation (rotule).

Selon les critères de classement des appareils d'appuis, on peut distinguer divers types de liaisons :

I.3.1 Classement selon le critère de déplacement

Si l'on considère le critère de déplacement comme fondamental, les types d'appareils d'appui peuvent être définis comme suit :

- a) Fixes :** permettent les rotations sur appui, mais ne permettent pas les déplacements.
- b) Mobiles unidirectionnels :** permettent les rotations sur appui, ainsi que les déplacements mais dans une seule direction.
- c) Mobiles multidirectionnels :** permettent les rotations sur appui, ainsi que les déplacements dans toutes les directions.

I.3.2 Classement sur la base du concept

a) Appareils d'appui métallique

a.1 À plaques métalliques

Ceux sont les plus simples. On les rencontre sur les ouvrages anciens de dimensions modestes avec des longueurs dilatables dépassant rarement 20 m et des descentes de charge réparties sur un assez grand nombre de points.

Ils sont constitués d'une plaque de plomb ou de zinc pour les plus anciens ou de deux plaques glissant les unes sur les autres. En cas de rotation de flexion, la surface de contact se réduit à une ligne.

Plus rarement, ils peuvent être constitués d'un plan et d'une surface cylindrique. Ces appareils d'appui remplissent une fonction d'appui fixe.

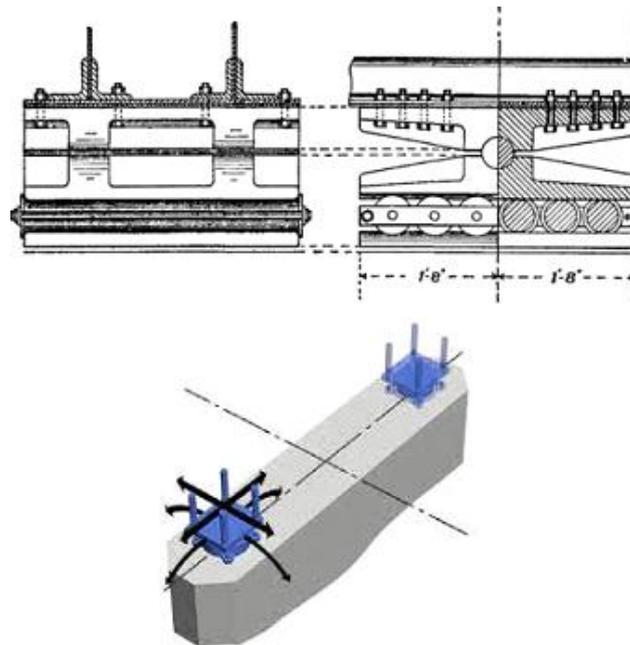


Figure I.2 Appareil d'appui à plaques métalliques

a.2 À balanciers à contact linéaire

Ils sont composés d'une surface cylindre roulant sur une surface plane. Ce types permettent la rotation dans une direction et assurent la fonction d'appui fixe. Le guidage est assuré par des goujons ou des dents

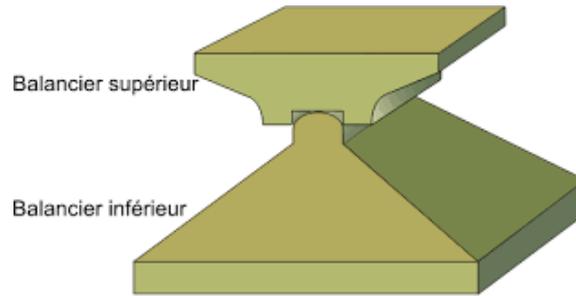


Figure I.3 Appareil d'appui à balanciers à contact linéaire.

a.3 À balanciers à rotule axiale

Ces appareils utilisés seuls, ils jouent le rôle d'appareil d'appui fixe. En général, ils comportent un guidage qui empêche un cheminement de l'axe. On les rencontre conjugués avec un plan de glissement constitué de rouleaux multiples, pour assurer en plus la fonction de déplacement longitudinal.

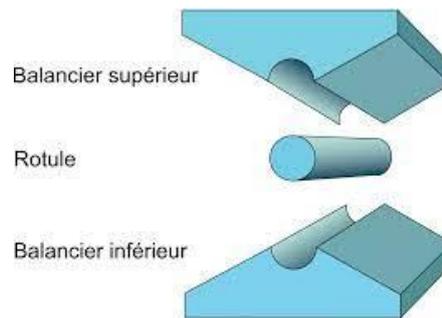


Figure I.4 Appareil d'appui à balanciers à rotule axiale.

a.4 À rouleaux

Ils existent en nombreuses versions. Ils assurent à la fois le déplacement longitudinal et la rotation d'axe transversal dû à la flexion du tablier : rouleau simple; rouleau simple tronqué ; rouleau à côtés aplatis ; et appareils d'appui à rouleaux multiples.

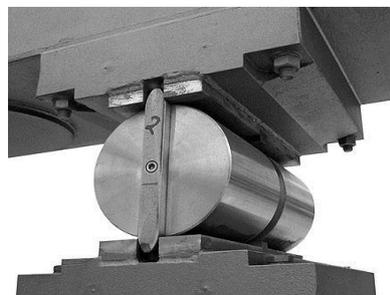


Figure I.5 Exemples d'un appareil d'appui à rouleau.

b) Appareils d'appui à pot

Les premiers appareils d'appui à pot sont apparus au début des années 60. Chaque fabricant identifie ses appareils par divers codes qui indiquent la fonction et éventuellement le type de fabrication et la charge de l'appareil.

Ce type d'appareil d'appui est constitué d'une embase métallique en forme de pot cylindrique de faible hauteur.

Dans ce cylindre est enserré un coussin en caoutchouc avec un joint périphérique pour l'étanchéité. Le piston (ou couvercle) emboîté avec un très faible jeu le coussin et va transmettre les charges avec possibilité de rotation.

Le coussin, emprisonné entre le piston et le pot, se comporte théoriquement comme un fluide. La majorité de ces coussins sont en caoutchouc naturel, certains polychloroprène. Les joints périphériques sont le plus souvent en laiton ou en acier inoxydable.

Dans cette configuration, la fonction de l'appareil se limite à un rôle d'appui fixe. Pour permettre la fonction de déplacement, on dispose de PTFE sur lequel va glisser une plaque en acier dont la surface de contact avec PTFE alvéolé ou non et graissé est en général en acier inoxydable (acier austénitique). Cette plaque d'acier est fixée sur son support par collage, vissage, soudage, etc.

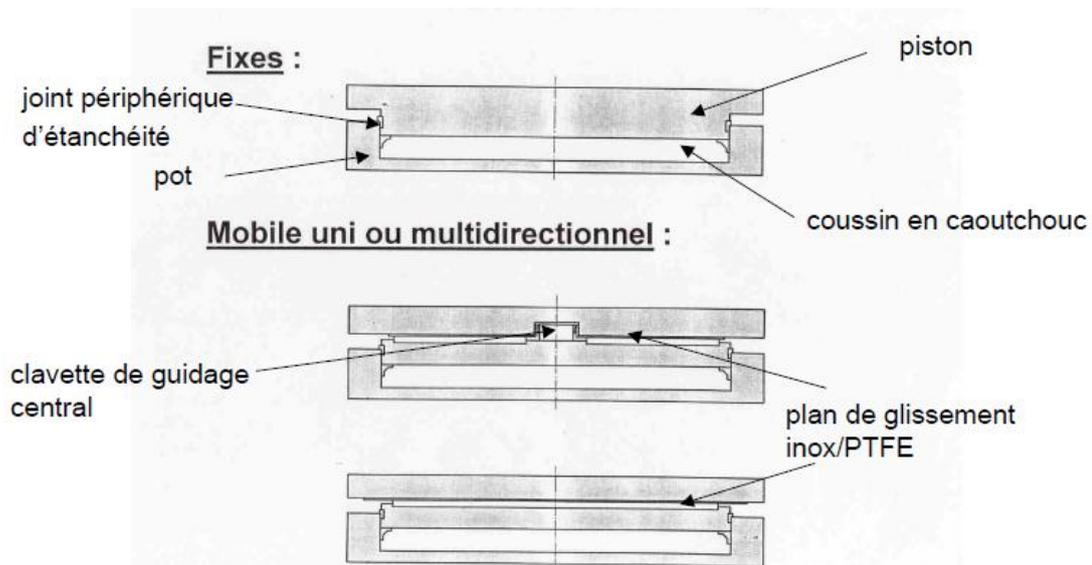


Figure I.6 Composition schématique d'un appareil d'appui à pot

c) Appareils d'appui en béton

Ce type d'appareil d'appui se trouve dans des ouvrages relativement anciens. En effet, les appareils d'appui «modernes» sont maintenant choisis du fait de leur industrialisation qui a contribué à une meilleure fiabilité de leurs caractéristiques et, aussi, de leur simplicité de mise en œuvre.



Figure I.7 Appareil d'appui en béton armé.

d) Appareils d'appui en élastomère fretté (caoutchouc fretté)

Les fonctions habituelles (descente de charge, déplacement, rotation) sont assurées par de petits déplacements élastiques.

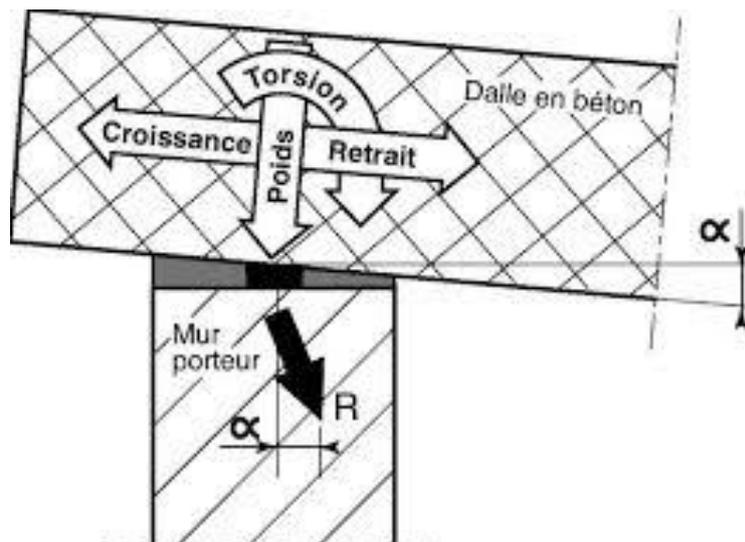


Figure I.8 Déplacements types des appareils d'appui en caoutchouc fretté.

La morphologie des systèmes d'appuis en néoprène fretté est illustrée dans la figure suivante :

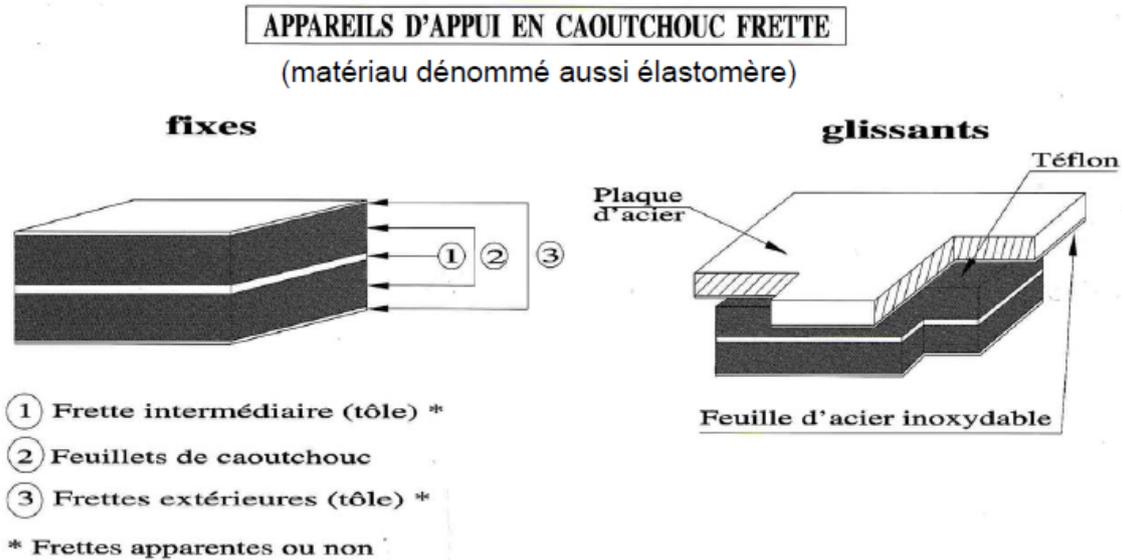


Figure I.9 Appareils d'appui en caoutchouc fretté.

I.4 LES APPAREILS D'APPUI EN ELASTOMERE FRETTE (AANF)

I.4.1 Structure des appareils d'appui en néoprène fretté

Un Appareil d'Appui en Néoprène Fretté (AANF) est un bloc d'élastomère vulcanisé renforcé intérieurement par une ou plusieurs frettes en acier d'épaisseur 2 mm, collées chimiquement (adhésion) pendant la vulcanisation [3]. Un schéma et une photo de ce type d'AANF sont donnés en figure ci-après :

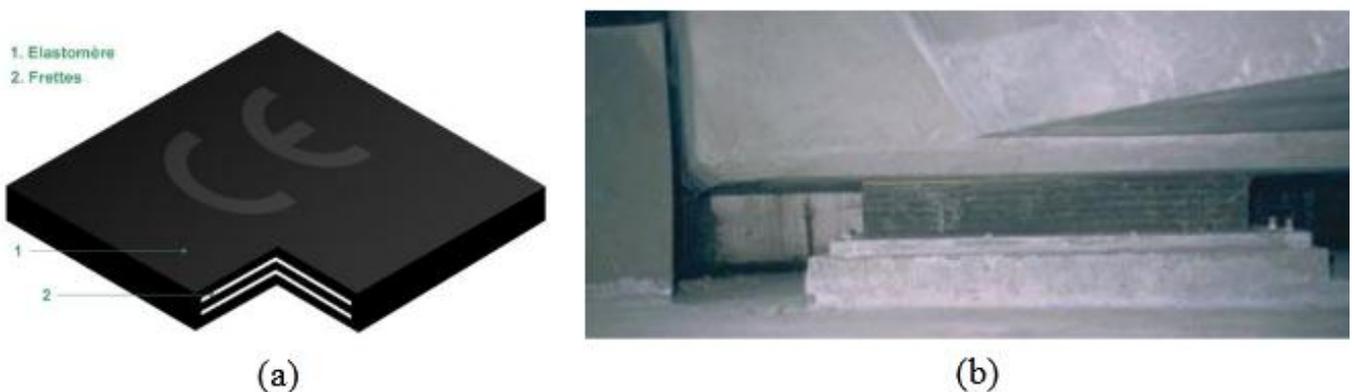


Figure I.10 Schéma (a) et photo (b) d'un appareil d'appui en néoprène fretté

Selon la norme EN 1337-3, on définit six types d'appareils d'appuis en néoprènes frettés [4]:

- Type A: appareil d'appui à une seule frette enrobée.
- Type B: appareil d'appui comportant au moins deux frettes et entièrement enrobé.
- Type C : appareil d'appui comportant des plaques métalliques extérieures.
- Type D : appareil d'appui glissant comportant en surface une feuille de PTFE (polytétrafluoroéthylène).
- Type E : appareil d'appui glissant comportant en surface une plaque métallique en contact avec la feuille de PTFE.
- Type F : Appareil d'appui non fretté et en bande.

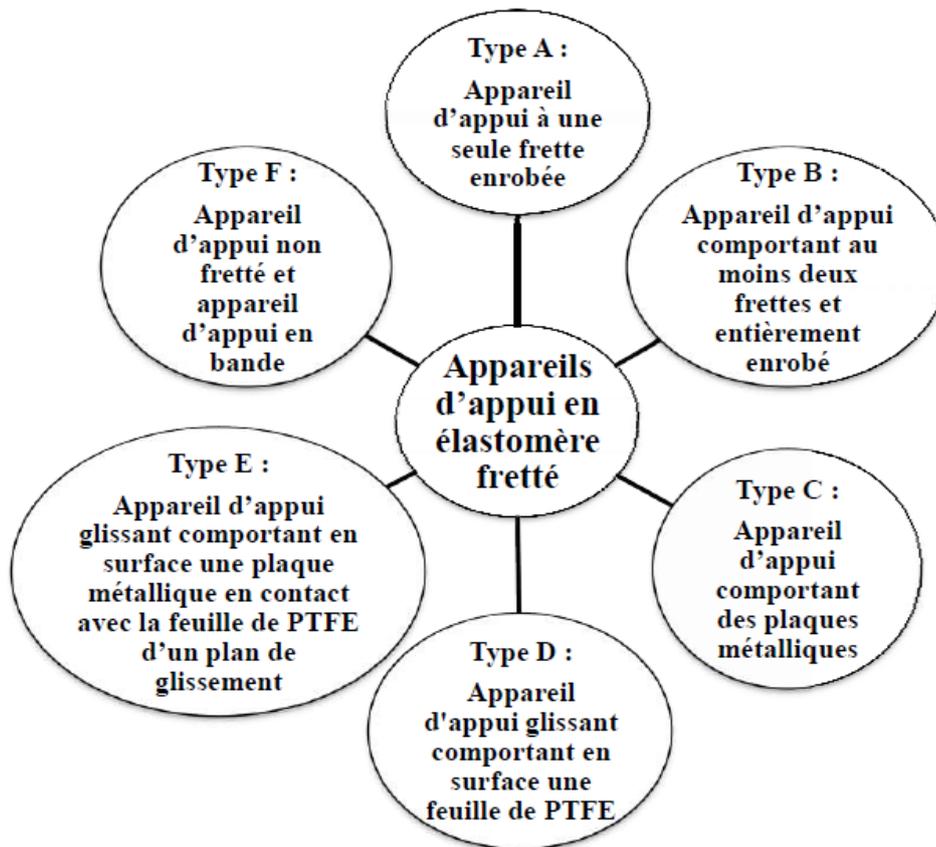


Figure I.11 Différents types d'appareils d'appui en élastomère fretté [4]

Des exemples de ces types d'appareils d'appui sont présentés dans la figure suivante :

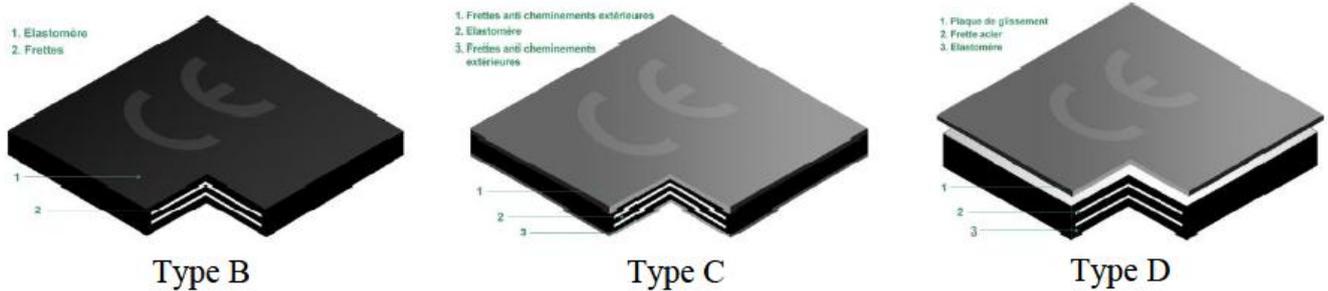


Figure I.12 Exemples de types d'appareils d'appui en néoprène fretté

Ces appareils permettent de dissiper l'énergie mécanique par leur déformation (pour tous les types d'appuis en néoprène fretté) et par le déplacement entre la plaque glissante et la structure (pour les appuis glissants) [1].

Le choix du type d'appareil d'appui est très délicat. Il dépend de nombreux facteurs : descente de charge, rotation maximale, déplacements horizontaux, durabilité, coût, type d'ouvrage, environnement et dispositions constructives. Cependant, en zone sismique, il est préférable de d'utiliser des appareils d'appui en néoprène fretté. En effet, compte tenu de la souplesse qu'apportent les appareils d'appui en néoprène fretté, le comportement global de l'ouvrage sous séisme d'amplitude modérée est meilleur.

I.4.2 Comportement de l'appareil d'appui en néoprène fretté

Les applications des élastomères sont en effet multiples, tant pour leurs propriétés élastiques que pour leur capacité à amortir les vibrations. Afin de comprendre les mécanismes de l'élastomère, un grand nombre d'études ont été réalisées.

L'élastomère est obtenu après une étape de vulcanisation du latex. Cette réticulation permet de créer des réseaux tridimensionnels dans le matériau, ce qui permet d'améliorer certaines propriétés mécaniques comme l'élasticité ou la résistance à la rupture [5]. Il existe divers procédés de vulcanisation, dont le principal est la vulcanisation par le soufre. Les caractéristiques d'un mélange à base d'élastomère dépendent non seulement de la nature de l'élastomère brut, mais aussi de la formulation d'un certain nombre d'ingrédients. Ces ingrédients ont une influence directe sur les caractéristiques finales du mélange :

Les charges permettent d'améliorer un grand nombre de propriétés mécaniques telles que la viscosité, le module d'élasticité, la dureté des mélanges, la résistance à la

rupture, etc. Il existe généralement deux catégories de charge : les charges noires telles que les noirs de carbone qui sont les plus utilisées, les charges claires telles que les silices précipitées, les argiles, les kaolins, les craies, etc.

- Les plastifiants facilitent la mise en œuvre des mélanges.
- Les agents protecteurs permettent d'améliorer la tenue au vieillissement.

L'élastomère chargé peut être vu à quatre échelles décroissantes :

- Macroscopique : le matériau est homogène et isotrope.
- Mésoscopique : l'élastomère se compose d'une matrice des chaînes et de charges. A cette échelle, les comportements mécaniques de la matrice et des charges sont bien distingués.
- Microscopique : l'élastomère est constitué des agglomérats de charge et de chaînes liées par les ponts de réticulation.
- Nanoscopique : l'élastomère se compose des particules élémentaires de charges et des chaînes.

A. Caractéristiques des élastomères

➤ Elasticité non linéaire

L'élastomère présente une très grande déformation [6,7]. Il peut se déformer jusqu'à 700% à la rupture et la réponse contrainte vs déformation est fortement non linéaire [8]. De plus, cette réponse est très différente entre le chargement et le déchargement.

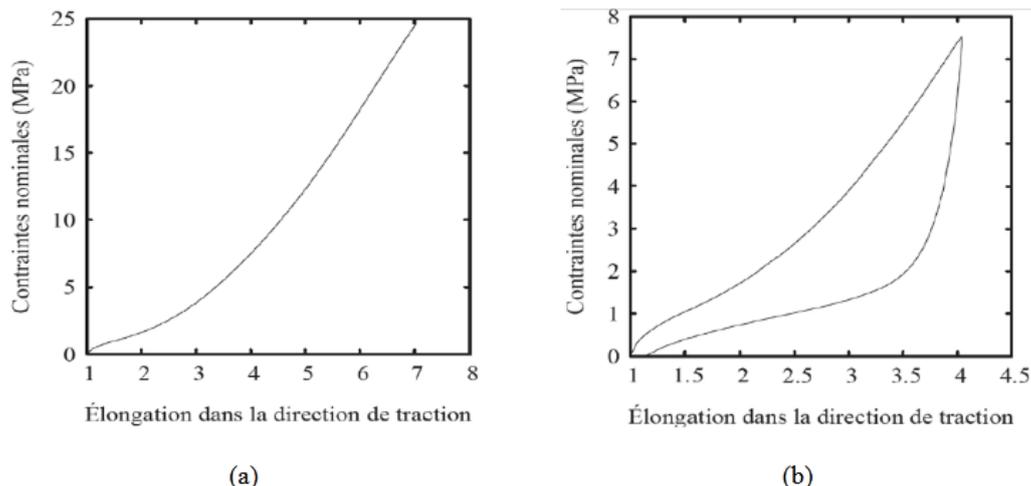


Figure I.13: Essai de traction jusqu'à la rupture (a) et de traction d'un cycle de charge/décharge (b) d'un élastomère chargé de noir de carbone [8].

➤ Cristallisation

Dans la configuration initiale des élastomères, les chaînes macromoléculaires s'enchevêtrent avec les chaînes voisines. Sous chargement, ces chaînes se réorganisent, glissent et puis entraînent l'alignement progressif dans la direction de chargement et l'extension des segments situés entre deux points de réticulation. Ces actions forment des zones cristallites qui agissent comme des liens supplémentaires dans le réseau macromoléculaire [9].

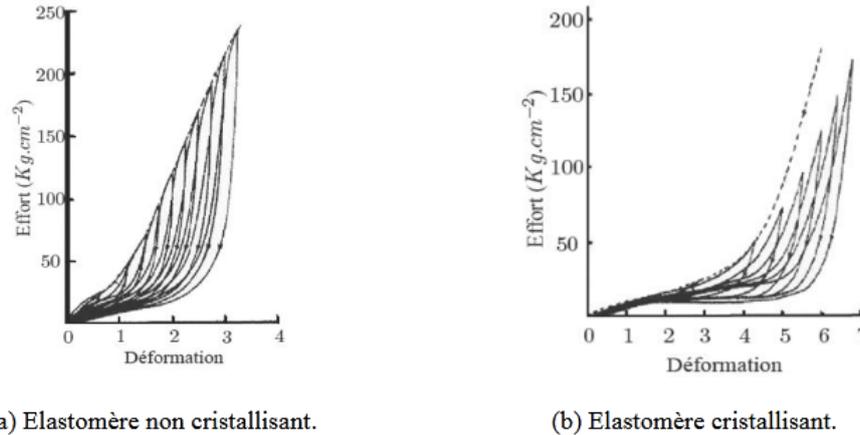


Figure I.14: Effet de cristallisation sous contrainte [10].

➤ Influence de la température

De nombreux essais expérimentaux présentent l'influence de la température sur le comportement des élastomères [11–14]. La figure 5 montre un exemple de l'influence de la température sur le comportement des élastomères à l'état caoutchoutique sous des types de chargements différents. Cette figure montre que la relaxation, la raideur et la dissipation d'énergie sont plus marquées lorsque la température diminue.

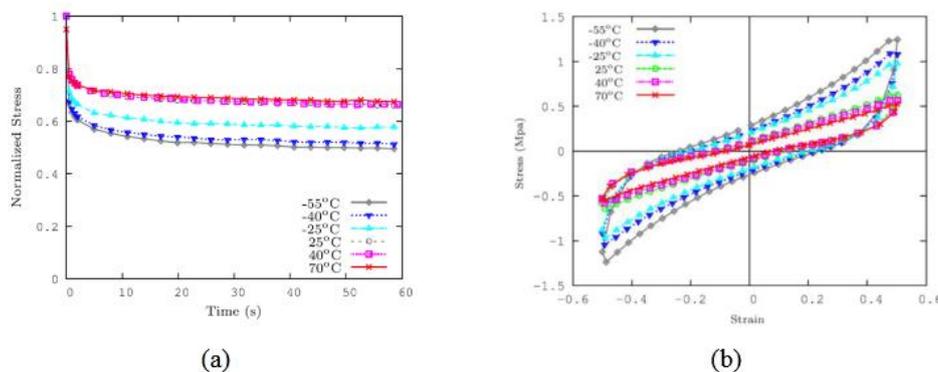


Figure I.15 Influence de la température sur le comportement de silicone chargé de silice dans l'essai de relaxation en cisaillement (a) et cisaillement cyclique (b) [11]

B. Comportement mécanique de néoprène fretté

Un AANF se compose de feuillets de néoprène et de frettes d'acier. L'acier est considéré comme élastique et rigide par rapport au néoprène. Le comportement de cet appareil est donc essentiellement lié à celui du néoprène.

Dans les conditions d'utilisation classique, l'AANF supporte un chargement de compression permanent de la structure au-dessus et une sollicitation de cisaillement dynamique en cas de séisme. C'est la raison pour laquelle la plupart des auteurs ont étudié le comportement de l'AANF sous le chargement de compression, de cisaillement et de couplage compression statique cisaillement cyclique.

De nombreux auteurs ont caractérisé expérimentalement le comportement hyper-élastique des appareils d'appui [15,16 et 17]. Un exemple est présenté sur la figure I.13. Ce comportement est aussi simulé analytiquement et numériquement par plusieurs auteurs [3,15 et 18].

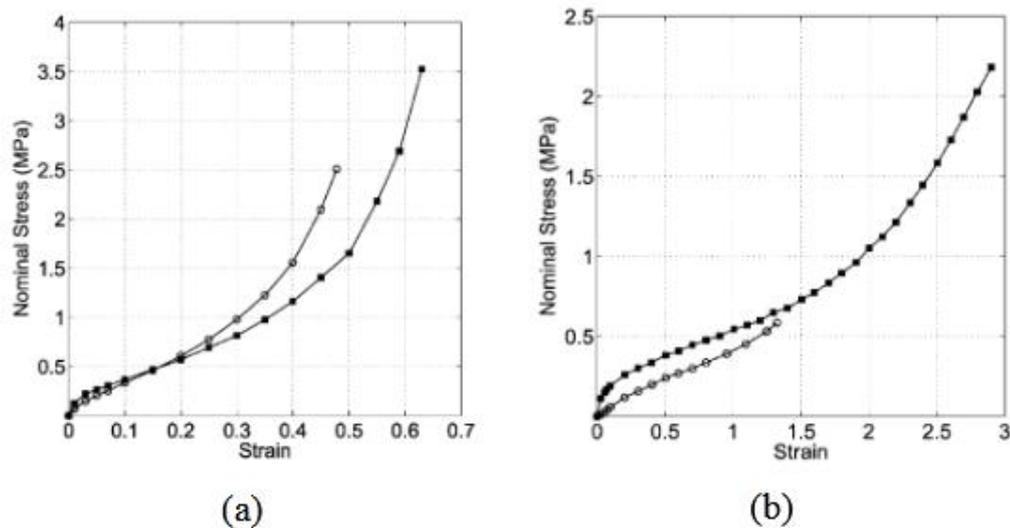


Figure I.16 Réponse mécanique en compression (a) et en cisaillement (b) de l'AANF pour le premier et le troisième chargement [16].

Dans les conditions d'utilisation classique, l'appareil d'appui en néoprène fretté est sollicité en compression statique et en cisaillement dynamique en cas de séisme. Pour mieux connaître le comportement mécanique de l'AANF sous les différents types de sollicitation, plusieurs études ont été élaborées par main chercheurs [19], permettant de tester des

éprouvettes de néoprène sous le chargement biaxial de compression quasi statique – cisaillement cyclique.

En réalité, chaque AANF peut supporter des forces de compression différentes, on a donc besoin de tester l'influence de la force de compression sur le comportement du néoprène sous le chargement de compression quasi- statique couplée à du cisaillement cyclique.

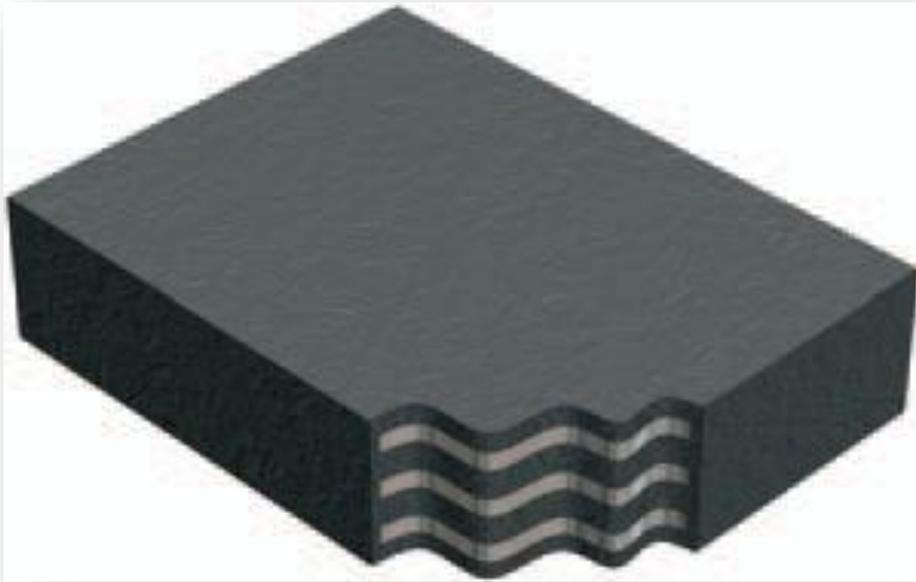
La présente recherche aborde l'analyse du comportement mécanique des appareils d'appuis présentant des désordres d'origine mécaniques notamment la propagation des fissures.

La restauration de l'appareil d'appui n'est pas actuellement étudiée dans la littérature. Il serait également intéressant de quantifier la restauration de l'appareil d'appui en configuration réelle.

I.5 CONCLUSION

En premier stade, on s'intéressait par une présentation succincte des fonctions majeurs des appareils d'appuis en étalant leurs différents types avec les divers critères de classement, dont l'objectif était de se baser surtout sur l'appareil d'appui en élastomère fretté avec des généralités sur le comportement mécanique de ce dernier ainsi que les différentes caractéristiques géométriques et mécaniques de l'ensemble d'une part et des matériaux constituant le stratifié d'autre part. Afin de bien cerner les données essentielles de cette recherche, il y a lieu de comprendre aussi le fonctionnement des appareils d'appuis en élastomère fretté en définissant les paramètres primordiaux pour leurs dimensionnements ainsi des notions générales sur les causes et la nature de désordres pourront apparaitre, ce qu'on verra en deuxième chapitre.

CHAPITRE II



DIMENSIONNEMENT DES APPAREILS D'APPUI EN NEOPRENE FRETTES

II.1 INTRODUCTION

Toute structure est flexible et son intégrité structurale doit être assurée en toutes circonstances. L'appareil d'appui est l'élément clé qui permet la liberté de mouvement entre une structure et son assise, tout en assurant la transmission des efforts verticaux et les rotations. Les appuis en élastomère sont fabriqués de caoutchouc naturel ou de néoprène, conçus et dimensionnés en fonction des besoins de la structure, où ces appuis sont à la fois assez rigides pour transmettre les charges imposées et assez flexibles pour permettre les rotations et les mouvements imposés par la structure. Ils peuvent également être utilisés dans des applications de contrôle des vibrations et des séismes. Les appareils d'appuis en élastomère frettés sont constitués par des plaques d'élastomère associées à des plaques intermédiaires (frettes) en acier inoxydable. Ce type de systèmes est déformables vis-à-vis aux efforts verticaux et horizontaux et de rotation, où l'appareil d'appui est considéré fixe tout en admettant deux mouvements translatifs et un mouvement de rotation dont les valeurs sont limitées.

Le dimensionnement des appareils d'appuis 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 et aux déformations imposées à l'appareil d'appui. L'objet principal de ce chapitre est d'analyser les paramètres à tenir en compte lors de la conception et du pré-dimensionnement des appareils d'appui en élastomère fretté en se basant sur le principe de leur fonctionnement et les méthodes de calcul et des vérifications recommandées selon la réglementation en vigueur en plus des notions générales sur les causes et la nature des désordres incitant leurs dégradation.

II.2 FONCTIONNEMENT DE L'APPAREIL D'APPUI

Ce type d'appareil d'appui est dimensionné pour assurer la descente de charge, la rotation de la structure et les mouvements liés principalement aux variations de longueur du tablier.

Dans certains cas, ces appareils comportent des dispositifs complémentaires comme des plaques de glissement inox/PTFE, (pour augmenter les possibilités des variations de

longueur de la structure) ou des dispositifs anti-cheminement (pour éviter un glissement non prévu entre l'appui et l'appareil d'appui) ou anti-soulèvement.

II.2.1 Répartition de la charge

Une répartition uniforme de la charge se voit nettement par des bourrelets parfaitement formés et semblables entre eux. L'expérience montre que tant que la flèche des bourrelets ne dépasse pas le tiers de l'épaisseur du feuillet, il n'y a pas de risque de dégradations ultérieures due à la compression.

Une mesure de l'épaisseur de l'appareil d'appui aux quatre angles doit être faite avec une précision de l'ordre du demi-millimètre.

En cas d'anomalie(s), on compare l'état des bourrelets de tous les appareils d'appui sur une même ligne.

L'absence de bourrelet, ponctuellement ou sur tout l'appareil d'appui, signifie :

- une rotation excessive (bourrelet important sur la face opposée) ;
- un défaut de planéité ou de parallélisme de bossage ;
- un déchargement (dans un angle aigu d'un pont biais, sur un pont courbe, par exemple), pouvant conduire à un cheminement ;
- un défaut de réglage des appareils d'appui à la construction ;
- une redistribution des réactions d'appui sous l'effet des déformations différées de l'ouvrage.

On peut aussi avoir l'extrusion du caoutchouc avec des écrasements ne permettant plus de voir les frettes. Il s'agit :

- d'une surface insuffisante provenant d'une erreur de calcul ;
- d'une modification de la descente de charge.



Figure II.1 Ecrasement d'un appareil d'appui.

Les défauts de contact entre l'appareil d'appui et la zone d'appui sont souvent la conséquence visible d'une insuffisance de la capacité en rotation de l'appareil d'appui. Si le défaut d'appui paraît avoir cette cause pour origine et si cela concerne moins de 10 % de la surface de l'appareil d'appui sur un ouvrage en service, il ne paraît pas utile de reprendre l'appareil d'appui, mais de suivre l'évolution de ce défaut lors des visites ultérieures (surtout aux températures extrêmes).

II.2.2 Distorsion

La distorsion d'un appareil d'appui en caoutchouc fretté est la déformation de l'ensemble de l'appareil d'appui due au cisaillement. C'est un élément primordial pour bien appréhender le fonctionnement de la structure. La distorsion d'un appareil d'appui en caoutchouc fretté est donnée par la valeur de la tangente γ telle que définie sur la figure ci-dessous.

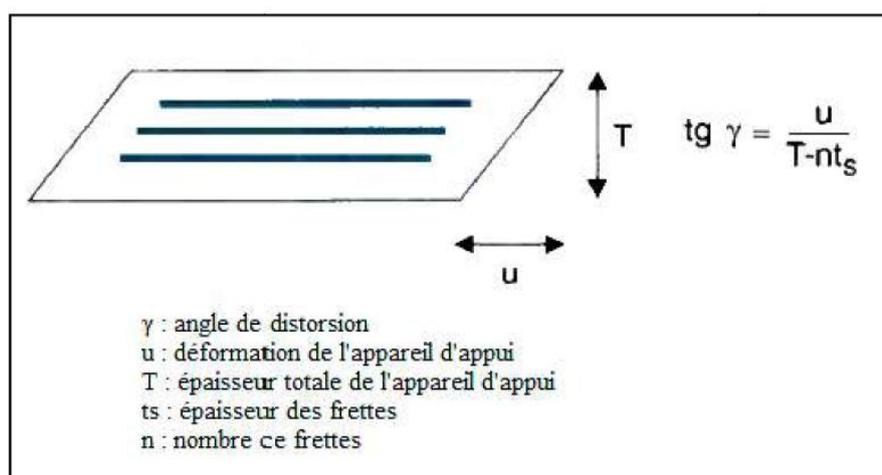


Figure II.2 Distorsion d'un appareil d'appui.

Un appareil d'appui en caoutchouc fretté est dimensionné pour une valeur maximale de $\text{tg}\gamma=0,7$ appelée « capacité de distorsion » et cette valeur maximale correspond aux déplacements relatifs extrêmes entre l'appui et la structure. Dans la plupart des cas le rapport u/T correspond à une bonne approximation.

Or, la température est le paramètre le plus important qui conditionne la longueur du tablier, c'est pourquoi, la mesure de distorsion in-situ n'a de sens que si elle est faite en fonction de la température du pont. Cette mesure est délicate et nécessite l'utilisation soit de

pâte à modeler pour réaliser un moulage de l'appareil d'appui afin d'effectuer la mesure plus facilement, soit l'utilisation d'un petit instrument similaire à celui décrit sur la figure II.3. On ne peut faire la mesure que sur l'appareil d'appui présentant la valeur la plus importante sur une ligne d'appui.

Une fois la valeur de $\text{tg } \gamma$ déterminée sur l'ouvrage au jour et à la température (ambiante) mesurée, on doit calculer la valeur correspondant à la position extrême de l'ouvrage dans le sens ou dans l'autre.

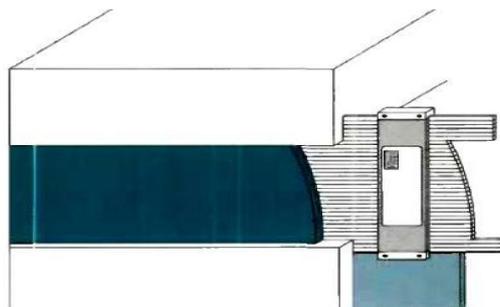


Figure II. 3 Mesure de distorsion d'un appareil d'appui.

Il est important de noter que la valeur de la distorsion à 10 ou 20 °C n'est pas une information exploitable pour comprendre le fonctionnement de la structure. À partir de la valeur de $\text{tg } \gamma$ mesurée au moment de la visite, on doit en déduire la valeur d positions extrêmes du tablier aux températures max déformations différées à venir et de l'effet du freinage, et comparer cette valeur avec celle définie dans la note de calculs.

Dans ces conditions, on doit trouver une valeur de tangente γ inférieure à 0,7.

Cette vérification n'est à faire que lors de la première inspection détaillée (en principe au bout de six ans), c'est-à-dire une fois l'essentiel des déformations différées stabilisées. Au cours visites suivantes, on se limite, sauf anomalies, à une comparaison, à température équivalente, de la valeur de la distorsion dans les conditions de la visite.

Au-delà de cette valeur de 0,7 on est dans le domaine de fonctionnement anormal de l'appareil d'appui et on s'efforce de déterminer la cause de cette distorsion anormale pour définir les mesures techniques et administratives appropriées. Cela étant, on doit considérer que ces produits peuvent admettre des distorsions allant jusqu'à 1,5 et ce n qu'on doit envisager le remplacement de l'appareil d'appui à court terme.

Il faut cependant vérifier si l'effort tangentiel engendré par cette déformation est compatible avec le fonctionnement de l'appui (cas de piles minces, par exemple).

Au-delà de 1,5, il y a le risque d'une déformation dite en S, d'un cheminement ou d'un échappement des appareils d'appui.



Figure II. 4 Déformation en S d'un appareil d'appui.

Les causes de distorsion anormale peuvent être :

- une erreur de calcul ou de positionnement d'un point fixe (la déformation de l'ensemble des appareils d'appui de l'ouvrage doit être reportée sur un plan pour analyser le comportement global de la structure et ne pas rester sur une seule ligne d'appui),
- une sous-évaluation des déformations différées ;
- un mouvement de la structure ;
- un défaut de réglage en cours de chantier ;
- un mouvement d'appui (poussée de remblai, par exemple) ;
- un grippage d'une plaque glissante.

II.3 DIMENSIONNEMENT DES APPAREILS D'APPUI

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

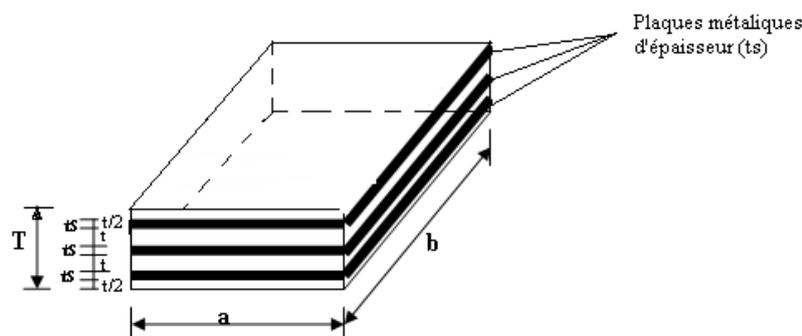


Figure II. 5 Appareil d'appui en néoprène fretté

La désignation de l'appareil d'appui est de la forme suivante : **a×b×(t+ts)**

a, b : dimensions en plan de l'appareil d'appui avec ($a \leq b$)

n : nombre de feuille d'élastomère

t : épaisseur de l'élastomère

T : épaisseur total de l'appareil d'appui « $T=n \times (t+ts)$ »

II.3.1 Dimensionnement

$$a \cdot b \geq \frac{N \max}{\bar{\sigma}_b} \quad (1)$$

Avec : a : la plus petite direction de l'appareil d'appui.

b : la plus grande dimension de l'appareil d'appui

N max : Réaction maximale sur l'appareil d'appui.

$\bar{\sigma}_b$: Contrainte de compression admissible

➤ Hauteur nette de l'élastomère

Nous cherchons à respecter la condition de non flambement de l'appareil d'appui :

$$\frac{a}{10} \leq T \leq \frac{a}{5} \quad (2)$$

➤ Dimension des frettes

L'épaisseur des frettes devra respecter les deux conditions suivantes :

$$t_s \geq \frac{a}{\beta} \cdot \frac{\sigma_m}{\sigma_e} \quad (3)$$

Avec : β : Coefficient de forme.

σ_m : Contrainte de compression moyenne.

A. Distribution des efforts

➤ Variation linéaire

a) Effet de température

$$\Delta L_{\text{temp}} = \alpha \cdot \frac{1}{2} \cdot \Delta T \cdot L \quad (4)$$

Avec : α : le coefficient de dilatation longitudinale du béton

ΔT : Variation de la température en C°

b) Effet du retrait

$$\Delta L_r = \varepsilon_r \frac{L}{2} \quad (5)$$

c) Effet de fluage

$$\Delta L_f = \varepsilon_f \frac{L}{2} \quad (6)$$

d) Effet de la rotation d'appui

$$\Delta l_\theta = \theta \cdot \frac{h_t}{2} \quad (7)$$

Avec : h_t : Hauteur totale du tablier

θ : Rotation d'appui maximale.

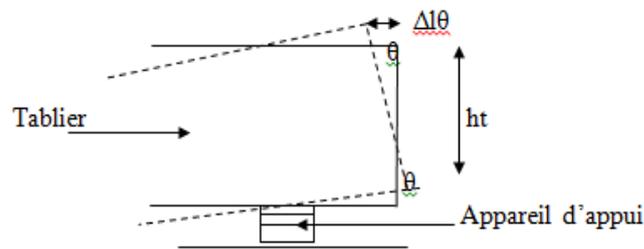


Figure II. 6 Mécanisme de déplacement du tablier dû à sa rotation au niveau de l'appui

➤ **Sous l'effet du poids propre**

$$\theta_G = \frac{g \cdot l^3}{24 \cdot EI} \quad (8)$$

Avec l : Longueur de la travée ;

g : Poids du tablier

E : Module d'élasticité

I : Inertie du tablier

B. Répartition des efforts horizontaux sur les appuis

➤ **Efforts dus aux forces dynamiques**

a) Freinage

$$\Delta l_{fr} = \frac{h \cdot F_{fr}}{2n \cdot a \cdot b \cdot G'} \quad (9)$$

h : la hauteur de l'appareil d'appui

n : nombre d'appareils d'appuis pour chaque côté

G' : le module de déformation transversale de l'appareil d'appuis

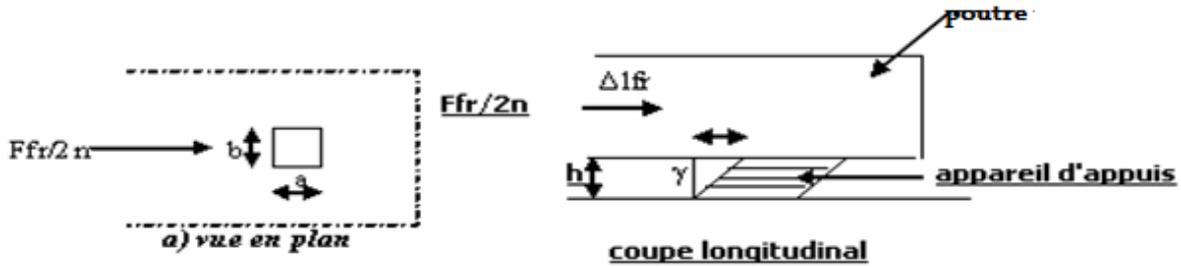


Figure II. 7 Action de la force de freinage sur le déplacement du tablier

b) Le séisme

$$\Delta l_{seis} = h * \frac{FH}{2n * a * b * G'} \quad (10)$$

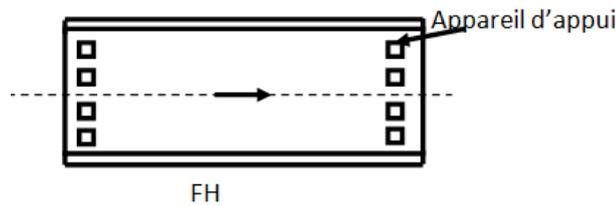


Figure II. 8 Actions sismique

II.3.2 Vérifications

L'ensemble des vérifications préconisées aux états limites selon les normes et les documents techniques sont résumées dans le tableau ci-après:

Tableau II. 1 Synthèse de vérifications à effectuer

Vérification	ELU Combinaisons fondamentales
Limitation de la distorsion ε	$\varepsilon = K_L (\varepsilon_c + \varepsilon_q + \varepsilon_\alpha) < 7$ et $\varepsilon_q < 1$
Traction dans les frettes	$t_s = \frac{2,6 F_z t_i}{A_r f_y}$
Limite en rotation	$\sum v_z \geq \frac{(a' \alpha_a + b' \alpha_b)}{K_r}$
Stabilité au flambement	$\frac{F_z}{A_r} < \frac{2 G a' S_1}{3 T_e}$
Non-glissement	$F_{xy} \leq \mu_e F_z$ et $\frac{F_{z,Gmin}}{A} \geq 3 \text{ MPa}$

II.4 PATHOLOGIE ET CAUSES POSSIBLES DE DESORDRES

I.4.1 Défauts en néoprène

Le principal désordre est l'apparition de fissures [20] ou « gerçures » des bourrelets des feuillets.

L'origine possible de ces fissures est :

- un excès de compression ;
- plus rarement, une mauvaise tenue de la formulation aux effets de l'ozone avec une fissuration caractéristique à 45°, en général, la profondeur de la fissure reste limitée à 1 à 2 cm et on peut laisser en place sous réserve d'un suivi régulier pour noter l'éventuelle évolution anormale du phénomène. Il faut signaler la présence éventuelle de lignes électriques aériennes non gainées (moyenne et haute tension) à proximité qui peuvent entraîner une présence d'ozone qui peut endommager le caoutchouc. On peut envisager de réaliser une protection de l'appareil d'appui à l'aide de mastic souple compatible avec le caoutchouc.
- si la fissure est rectiligne et parallèle au plan de frettage, elle peut provenir soit d'un éclatement de feuillets par excès de compression (rare), soit d'un problème de fabrication résultat d'une pollution (graisse, etc.) entre deux feuilles de calandres ayant servi à la confection d'un feuillet élémentaire. Comme ce désordre peut affecter toute la surface de la feuille calandree, il peut être grave en entraînant une rupture dans le plan horizontal de l'appareil d'appui. Il se détecte lors du premier chargement et aurait dû donc conduire, en bonne logique, à un rejet du produit avant la réception.



Figure II.9 Mauvaise tenue de la formulation du caoutchouc aux effets de l'Ozone

I.4.2 Défauts de frettes en acier

Ne sont concernés que les appareils d'appui découpés dans une plaque mère ou comportant une frette extérieur.

Les désordres portent sur la tenue à la corrosion soit des chants des frettes, soit des frettes extérieures. À partir d'un certain degré de corrosion, ces appareils doivent être changés. Pour protéger le chant des frettes des appareils d'appui à demi-feuillet extérieur, on peut traiter les chants avec une pâte bitumineuse de protection (un mastic copolymère acrylique en émulsion).

Pour éviter une corrosion des chants des frettes, il était mis en œuvre une peinture de protection dont la tenue sous la formation des bourrelets et la distorsion était particulièrement mauvaise. Son écaillage ou son faïençage n'est pas grave. On peut par une protection en mastic.

Ce désordre ne devrait plus se voir avec les appareils d'appui complètement enrobés. Cependant, il y a les frettes extérieures des appareils d'appui venant sur des taquets (dispositifs anti-cheminement) qui sont donc non enrobés et sujets à des désordres dus à la corrosion.



Figure II.10 Corrosion des frettes en acier

I.4.3 Défauts en néoprène fretté

On peut relever des glissements relatifs frettes/feuillet des éléments constitutifs de rupture du plan d'adhérisation.

De tels désordres nécessitent une intervention rapide pour éviter un affaissement au droit de l'appareil d'appui provoquant une dénivellation d'appui néfaste pour la structure.

Dans certains cas d'empilement, on a réalisé des collages d'appareils d'appui unitaires en caoutchouc fretté et on peut avoir des ruptures de ces plans de collages. Il faut bien les distinguer des ruptures d'adhésion. Si le désalignement provient d'un défaut de calage lors du collage et s'il est inférieur à 5 mm, il est tolérable. Ce point doit être vérifié à chaque visite et, en cas d'évolution, il faut impérativement prévoir un changement.



Figure II.11 Rupture du plan d'adhésion

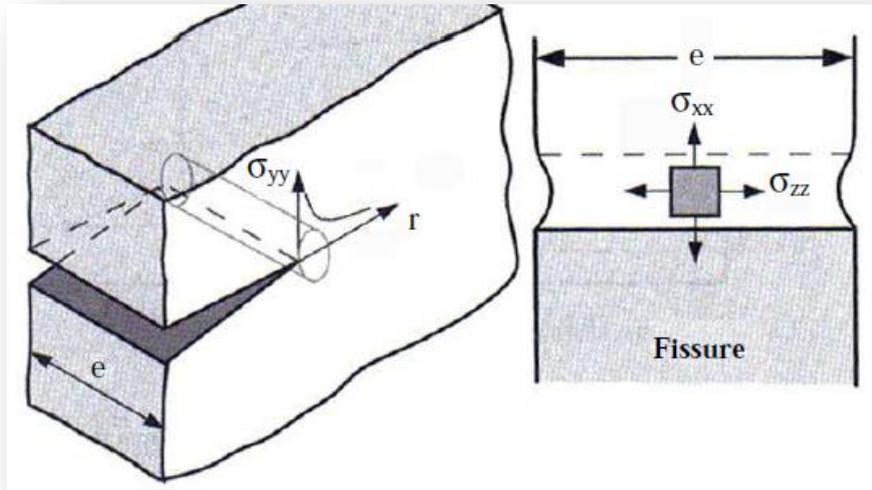
II.5 CONCLUSION

L'effet global de ces facteurs est pris en compte dans les guides de recommandation au moyen de coefficients de réduction appliqués aux propriétés mécaniques dont les valeurs peuvent varier sensiblement d'un ouvrage à l'autre. Pour le cas de notre étude, on a adopté les dimensions suivantes : **400 x 400 x 8 x (8+3)**.

Ces dimensions sont inspirées du rapport d'expertise [21] conjoint à la mission de diagnostic de l'ouvrage d'art (cas étudié : ouvrage d'art DEHMOUNI RN14PK148 Tiaret).

La compréhension du comportement mécanique des appareils d'appui en élastomère fretté et la maîtrise des méthodes de dimensionnement mène à déterminer le processus à suivre pour étudier le modèle proposé à cette recherche dont un rappel théorique menant vers l'adoption d'une approche mécanique s'avère nécessaire pour développer l'étude de cas, ce qui sera présenté dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III



APPROCHES MECANIQUES ET CRITERES DE RUPTURE

III.1 INTRODUCTION

Dans le cas particulier des élastomères chargés qui représentent la majeure partie des constituants du pneumatique, la connaissance de la résistance à la propagation de fissure en fatigue est très empirique et la dynamique de progrès sur la conception des matériaux est faible [22].

La fissuration commence à être mieux comprise dans un certain nombre de matériaux, comme des alliages de métaux, ou les polymères vitreux par exemple. Dans le cadre spécifique des élastomères, le problème de la description de la fissuration est extrêmement ardu. Les approches existantes sont soit très théoriques avec la plupart du temps peu de validation expérimentale, soit extrêmement phénoménologiques et ne permettent pas de dégager des tendances générales qui pourraient être extrapolées à d'autres familles de matériaux. La mécanique de la rupture élastique et linéaire, généralement utilisée pour prédire la distribution des champs de contrainte en tête de fissure, montre ses limites dans le cas d'élastomères chargés où de grandes déformations et un comportement fortement non-linéaire du matériau sont présents en tête de fissure.

Notre étude s'inscrit dans une démarche d'investigation du phénomène de la propagation des fissures dans les différentes couches constituant le système d'appareil d'appui en élastomère fretté en faisant appel à des critères basés sur la mécanique de la rupture appliquée, tout en identifiant les différents paramètres qui se manifestent et influencent sur le comportement mécanique du matériau vis-à-vis des risques de la rupture.

III.2 MECANIQUE DE LA RUPTURE APPLIQUEE

La mécanique de la rupture a été introduite par Griffith [23] en 1920, dont le but était de caractériser le comportement à la fissuration des structures à l'aide des paramètres quantifiables au sens de l'ingénieur, notamment le champ de contraintes, la taille de la fissure et la résistance à la fissuration du matériau.

Les premiers développements théoriques d'analyse des champs de déplacements, déformations et contraintes au voisinage d'une fissure ont été entrepris vers 1940, puis l'extension de la discipline a été amorcée par Irwin [24] en 1960. Le développement de la mécanique de la rupture s'étend aux problèmes non linéaires matériellement et géométriquement, aux problèmes de bifurcation des fissures en modes mixtes et plus

récemment aux composites, aux techniques numériques de résolution et à l'état de l'art relatif au dimensionnement de diverses structures complexes.

La rupture par fissuration est la création d'une surface de discontinuité. Il s'agit de considérer que les liaisons atomiques se comportent l'une après l'autre plutôt que toutes en même temps, en formant un trou qui s'agrandit : on dit que la fissure se propage (Figure III.1).

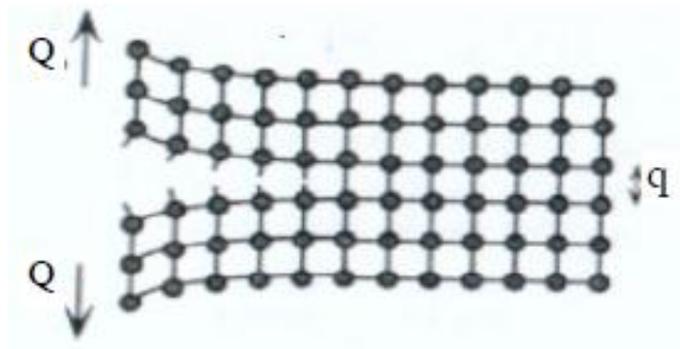


Figure III.1 Propagation d'une fissure

Le mécanisme de rupture par fissuration peut intervenir selon deux types de fissuration:

- **La fissuration brutale:** pour les solides, ou pour les matériaux à très haute résistance, les contraintes de travail sont très élevées, une énergie potentielle considérable est ainsi créée ; la présence de petites fissures peut alors conduire à une rupture brutale qui souvent ne s'accompagne pas de déformations plastiques macroscopiques par suite de la très faible ductilité.
- **La fissuration successive:** il s'agit d'une succession de mécanismes (fragile-ductile) qui, sous contraintes répétées, entraîne la fissuration successive, appelée la rupture par fatigue.

III.2.1 MODES ELEMENTAIRES DE FISSURATION

D'un point de vue macroscopique, on peut considérer deux modes principaux de rupture : la rupture plate et la rupture inclinée. La rupture plate correspond à une surface de rupture globalement perpendiculaire à la direction de la contrainte principale maximale. La rupture inclinée dans le sens transversal par rapport à la direction de propagation

s'accompagne souvent de grandes déformations. L'examen du faciès de rupture permet bien souvent de détecter, après rupture, le mécanisme de rupture et le type de fissuration produit.

On remarque généralement :

- Une zone lisse et soyeuse correspondant à la propagation en fatigue ou,
- Une zone à grains cristallins ou moins apparents, correspondant à la fissuration brutale.

On montre que toute fissuration peut être ramenée à l'un des trois modes simples ou à leur superposition. Il existe donc trois modes de fissuration élémentaires (Figure III.2).

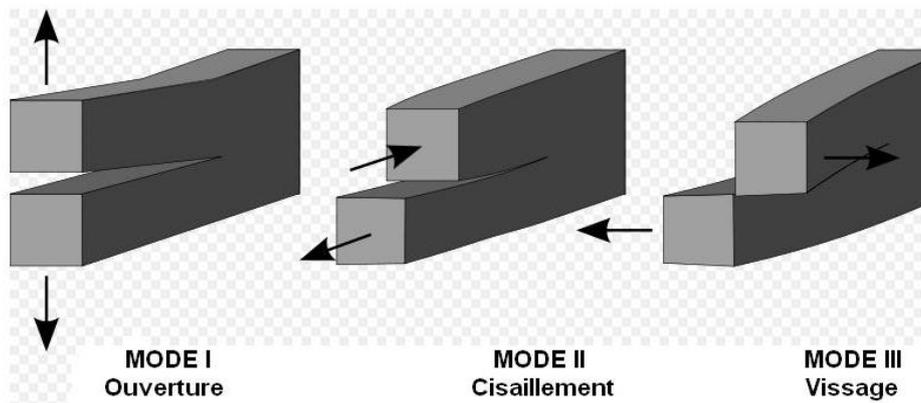


Figure III.2 Modes de fissuration

La mécanique de la rupture étudie l'interaction entre la discontinuité géométrique (fissure) et le milieu continu avoisinant, ainsi que l'évolution de cette discontinuité. D'un point de vue mécanique, on peut distinguer schématiquement, dans un milieu fissuré, trois zones successives (Figure: III.3) [25].

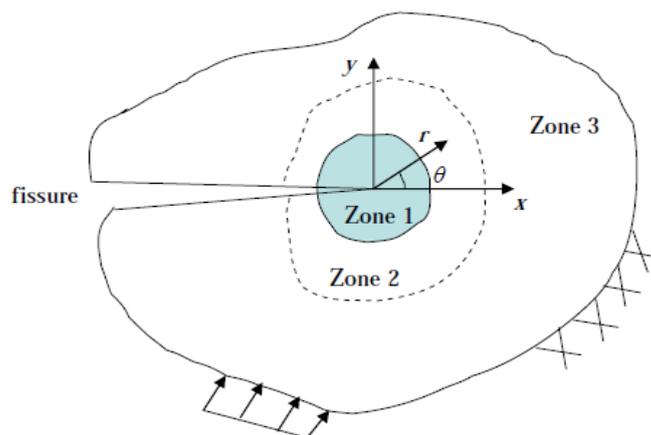


Figure III.3 Zone délimitant le voisinage d'une pointe de fissure

➤ **La zone d'élaboration 1:** elle se trouve à la pointe de fissure et dans le sillage laissé par la fissure au cours de sa propagation. L'étude de cette zone est très complexe à cause des contraintes importantes qui ont fortement endommagé le matériau. Elle est discontinue au sens de la mécanique des solides. La théorie classique de la mécanique de la rupture réduit cette zone à un point pour les problèmes plans et à une courbe pour les problèmes tridimensionnels.

➤ **La zone singulière 2:** dans laquelle les champs de déplacements, déformations et contraintes sont continus et possèdent une formulation indépendante de la géométrie lointaine de la structure. On démontre que dans cette zone, les composantes de champ de contraintes sont infinies au voisinage du front de fissure ($r \rightarrow 0$).

Plus exactement, la singularité est en $(1/r)$ en milieu élastique linéaire. Le matériau ayant une limite élastique, il existe un rayon r_p autour de la pointe de fissure qui détermine la forme de la zone plastique. En fonction de la valeur de r_p , on dira que la rupture est fragile pour r_p petit et qu'elle est ductile pour r_p grand. Cette distinction sur la base du paramètre r_p est très importante car elle conditionne la validité de la théorie utilisée:

- La Mécanique Linéaire de la Rupture pour les ruptures fragiles.
- La Mécanique Non Linéaire de la Rupture dans le cas de zone plastique non négligeable (rupture ductile).

➤ **La zone 3 extérieure** comprenant les champs lointains se raccordant d'une part, à la zone singulière, et d'autre part aux conditions aux limites en charges et en déplacements. Dans cette zone, les champs de déplacements, déformations et contraintes varient peu et peuvent être approximés par des polynômes communément utilisés dans la méthode des éléments finis.

Diverses méthodes d'analyse permettent d'étudier les champs de déplacements, déformations et contraintes au voisinage d'une fissure. On regroupe l'ensemble de ces méthodes sous deux types d'approches :

- Approches directes : qui sont fondées sur l'utilisation des fonctions d'Airy ; ces approches résolvent des problèmes plans et font appel à la recherche de fonctions analytiques.

- Approches énergétiques qui sont basées sur l'analyse énergétique du milieu continu contenant une fissure, il s'agit d'un bilan énergétique global intégrant le taux de restitution d'énergie dû à un accroissement virtuel de la fissure.

III.2.2 CRITERES DE RUPTURE

En général, trois paramètres peuvent être utilisés pour étudier les caractéristiques de la zone singulière: le facteur d'intensité de contrainte \mathbf{K} , le taux de restitution d'énergie \mathbf{G} , et l'intégrale \mathbf{J} . K est le paramètre de l'approche locale directe. G et J sont les paramètres de l'approche énergétique globale.

III.2.2.1 CRITERE DU FACTEUR D'INTENSITE DE CONTRAINTES

D'une manière générale, le facteur d'intensité de contrainte K_I en mode I est exprimé selon l'équation :

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \cdot \alpha(a) \quad (1)$$

Avec: σ est la contrainte appliquée, $\alpha(a)$ est le coefficient de correction géométrique, a est longueur de la fissure.

Dans la zone singulière, le champ de contraintes présente une singularité en $r^{-1/2}$ à la pointe de fissure. L'intensité de la singularité est caractérisée par les paramètres appelés facteurs d'intensité de contraintes, notés K_I , K_{II} et K_{III} pour chacun des modes élémentaires.

A l'aide de la théorie de l'élasticité, Irwin a montré que, en déformation ou en contrainte plane, les déplacements u_i et les contraintes σ_{ij} dans cette zone singulière peuvent être exprimés en fonction des facteurs d'intensité de contraintes :

$$u_1 = \frac{K_I}{2\mu} \left(\frac{r}{2\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \cos \frac{\theta}{2} (K - \cos \theta) + \frac{K_{II}}{2\mu} \left(\frac{r}{2\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \sin \frac{\theta}{2} (K + \cos \theta + 2) \quad (2)$$

$$u_2 = \frac{K_I}{2\mu} \left(\frac{r}{2\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \sin \frac{\theta}{2} (K - \cos \theta) - \frac{K_{II}}{2\mu} \left(\frac{r}{2\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \cos \frac{\theta}{2} (K + \cos \theta - 2) \quad (3)$$

$$\sigma_{11} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) - \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}\right) \quad (4)$$

$$\sigma_{12} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \quad (5)$$

$$\sigma_{22} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \sin \frac{\theta}{2} + \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \left(\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \quad (6)$$

Avec $K = 3-4\nu$ en déformation plane

$$K = \frac{3-\nu}{1+\nu} \text{ en contrainte plane}$$

r, θ : Le rayon et l'angle en coordonnées polaires.

μ : Module de cisaillement.

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

ν : Coefficient de poisson.

E : module de Young.

Dans le cas d'un chargement hors du plan, la seule composante du déplacement est u_3 .

Les déplacements et les contraintes ont les expressions suivantes :

$$u_3 = \frac{2K_{III}}{\mu} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (7)$$

$$\sigma_{13} = - \frac{2K_{III}}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (8)$$

$$\sigma_{23} = - \frac{2K_{III}}{(2\pi r)^{\frac{1}{2}}} \cos \frac{\theta}{2} \quad (9)$$

Les facteurs K_I , K_{II} et K_{III} sont indépendants de r et θ . Ils ne dépendent que de la répartition des efforts extérieurs d'un solide donné et de la géométrie de la fissure. Ils sont proportionnels à la discontinuité du déplacement des lèvres de la fissure. On a les expressions suivantes qui constituent leurs définitions pour les milieux fissurés :

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{E}{8C} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} [u_2] \right) \quad (10)$$

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{E}{8C} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} [u_1] \right) \quad (11)$$

$$K_{III} = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{E}{8(1+\nu)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} [u_3] \right) \quad (12)$$

avec : $C=1$ en contrainte plane

$C=1 - \nu^2$ en déformation plane

$[u_i]$ étant les déplacements des lèvres de fissure correspondant aux trois modes.

La contrainte critique est une valeur qui est donnée pour chaque matériau, elle représente la contrainte qu'un matériau peut supporter avant la formation d'une fissure ou avant la propagation d'une fissure préexistante. Le critère de contrainte critique peut s'écrire:

$$\sigma \geq \sigma_C \text{ ou } (\tau \geq \tau_C)$$

Où σ et τ sont les composantes normales et tangentielles du tenseur de contraintes qui agit sur une surface. D'où il ne faut pas choisir un matériau seulement au sens de sa résistance à la ruine classique, mais aussi au sens de son comportement vis-à-vis d'une forme d'entaille géométrique particulière ou d'une fissure.

Ceci nécessite donc la recherche de nouveaux critères de ruine pour les structures fissurées qui associent la géométrie de l'entaille à la résistance à rupture.

D'un point de vue énergétique, l'énergie nécessaire à engendrer une fissure de da , qui provoquera la rupture est appelée taux de restitution d'énergie critique. Les valeurs des facteurs d'intensité de contraintes sont calculées analytiquement ou par éléments finis pour différentes conditions aux limites, et géométries de pièces et de fissures. Le facteur critique d'intensité de contraintes K_C correspond à la force maximale d'instabilité.

Cette valeur caractéristique de la ténacité à la rupture du matériau traduit la ruine par fissuration brutale. Le critère de rupture associé correspond à une distribution critique des contraintes au voisinage de la fissure : la rupture aura lieu pour une valeur du facteur d'intensité des contraintes supérieure à la valeur critique: $K_I \geq K_{IC}$. Ce critère est essentiellement utilisé pour un état de déformations planes. Dans le cas de l'état de contraintes planes, le critère d'instabilité K_C dépend fortement de l'épaisseur.

III.2.2.2 CRITERE DU TAUX DE RESTITUTION D'ENERGIE G OU DE L'INTEGRALE J

Griffith [22] est le premier à aborder le problème des corps fissurés d'un point de vue énergétique. Par l'analyse du bilan énergétique, le taux de restitution d'énergie, noté G , a été introduit. C'est l'énergie nécessaire pour faire progresser une longueur unitaire de la fissure.

Elle correspond à la décroissance de l'énergie potentielle totale W du milieu fissuré pour passer d'une configuration initiale avec une longueur de fissure a , à une autre où la fissure se trouve augmentée d'une unité de longueur da :

$$G = -\frac{dW}{da} \quad (13)$$

Où

$$W = W_e + W_{\text{ext}} \quad (14)$$

Avec

W_{ext} énergie potentielle des forces extérieures

$W_e = \int_V W_e dV$ Energie de déformation élastique

$W_e = \int_0^\varepsilon \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$ Densité d'énergie de déformation élastique

Pour une fissure en milieu bidimensionnel, d'épaisseur b , on écrit :

$$G = \frac{1}{b} \frac{dW}{\Delta a} \quad (15)$$

Avec Δa est la variation de longueur de fissure.

En utilisant le champ des contraintes dans la zone singulière et la loi de comportement élastique linéaire, on peut relier G aux facteurs d'intensité de contraintes par :

$$G = \frac{(K_I^2 + K_{II}^2)}{E'} + \frac{K_{III}^2}{2\mu} \quad (16)$$

avec $E' = E$ en contrainte plane

$E' = E/(1 - \nu^2)$ en déformation plane

G est une valeur négative parce que l'énergie potentielle diminue lors de l'accroissement de la fissure.

Selon Griffith, "la rupture se produit lorsque l'énergie restituée par l'extension de la fissure est supérieure à l'énergie nécessaire à créer la surface relative à cette extension". Si l'on considère les conditions initiales d'une structure chargée dans le domaine élasto-plastique, et après la propagation de la fissure a d'une quantité da , la condition d'équilibre est caractérisée par la condition énergétique suivante :

$$\delta W + G_C \delta a = 0 \quad (17)$$

δW est la variation de l'énergie potentielle et G_C est l'énergie de rupture par unité de surface. La condition de la rupture devient :

$$-\frac{\partial W}{\partial a} \geq G_C \quad (18)$$

Si l'on considère $\delta a \rightarrow 0$ on obtient la forme différentielle de Griffith :

$$-\frac{\partial W}{\partial a} = G \geq G_C \quad (19)$$

Où G est le taux de restitution de l'énergie.

Une autre façon de caractériser la singularité du champ des contraintes au voisinage de la pointe des fissures est l'étude de certaines intégrales de contour que l'on peut déduire de la loi de conservation de l'énergie. Dans un milieu élastique linéaire fissuré plan, Rice, en 1968 [26], a utilisé pour la première fois dans le cadre de la mécanique de la rupture une intégrale de contour, elle est définie comme suit:

$$J = \int_{\Gamma} \left\{ W_e n_1 \sigma_{ij} n_j \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \right\} ds \quad (20)$$

Où W_e est la densité d'énergie de déformation élastique, Γ est un contour ouvert entourant la pointe de la fissure. Celle-ci est supposée rectiligne suivant l'axe de la fissure. On note par \vec{n} la normale extérieure au contour, σ_{ij} , n_j la contrainte appliquée sur le contour et u_i le déplacement correspondant (figure III.4).

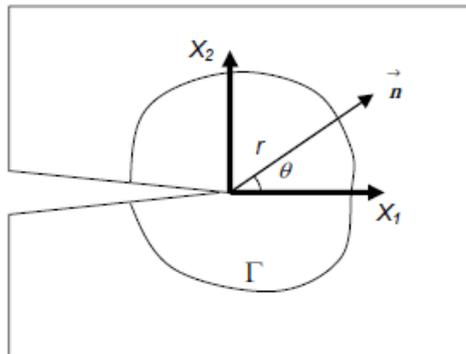


Figure III.4 Contour d'intégration

Dans le cas d'un solide élastique homogène, linéaire ou non, cette intégrale est indépendante du contour d'intégration. Rice l'a interprétée comme la différence d'énergie potentielle W de deux corps fissurés chargés de la même façon mais dont les longueurs de fissures diffèrent d'une longueur Δa , ce qui s'exprime par:

$$J = - \lim_{\Delta a \rightarrow \infty} \frac{W(a+\Delta a) - W(a)}{\Delta a} = - \frac{dW}{\Delta a} \quad (21)$$

En comparant avec la grandeur G définie précédemment, on peut dire que dans le cas d'un matériau élastique ou dans le cas d'un corps subissant une très faible déformation plastique en fond de fissure, on a :

$$J = G = - \frac{dW}{\Delta a} \quad (22)$$

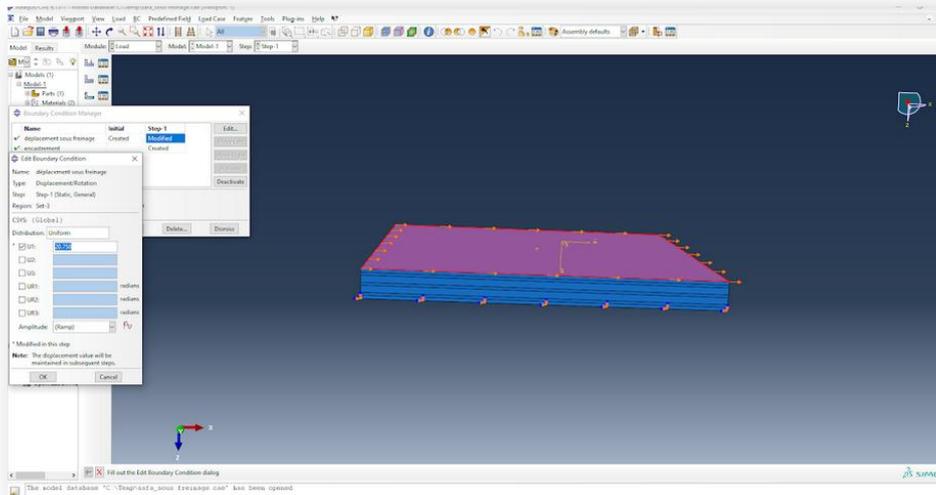
Le taux de restitution de l'énergie pouvant s'écrire sous forme d'une intégrale de contour, le critère deviendra alors :

$$- \frac{\partial W}{\partial a} = J \geq J_c \quad (23)$$

III.3 CONCLUSION

Un rappel des notions majeurs caractérisant les approches mécaniques fréquemment utilisées face aux problèmes liés à la rupture par fissuration était nécessaire afin de désigner le critère de rupture à adopter pour faire l'analyse de la propagation des fissures dans deux matériaux différents, à savoir le néoprène et l'acier de frettes où cela s'effectuera séparément.

CHAPITRE IV



RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1 INTRODUCTION

La mécanique de la rupture tend à définir une propriété du matériau qui peut se traduire par sa résistance à la rupture fragile (fracture) ou ductile. Car si les structures sont calculées pour que les contraintes nominales ne dépassent pas, en règle générale, la limite d'élasticité du matériau et soient donc par voie de conséquence à l'abri de la ruine par rupture de type ductile ; elles ne sont pas systématiquement à l'abri d'une ruine causée par la présence d'une fissure préexistante à la mise en service ou créée en service par fatigue. La rupture des composants fissurés est gouvernée par les contraintes au voisinage de la pointe de fissure.

Dans les matériaux ductiles (et même dans des matériaux qui semblent être fragiles [27]), une zone plastique se développe en front de fissure. L'augmentation de la dimension de la zone plastique est fonction de l'augmentation de la charge jusqu'à ce que la fissure se propage libérant les contraintes en arrière du fond de fissure. Le cycle de chargement/libération de chargement plastique aux abords du front de fissure conduit à la dissipation d'énergie comme le ferait un traitement thermique de relaxation de contrainte. Par conséquent, un terme dissipatif doit être ajouté à la relation de l'équilibre énergétique tel qu'élaboré par Griffith pour les matériaux cassants. En termes physiques, de l'énergie supplémentaire est nécessaire pour que la propagation des fissures se produise dans les matériaux ductiles si on les compare aux matériaux fragiles.

L'intégrale curviligne J représente un moyen de calculer le taux de restitution de l'énergie de déformation ou de travail (énergie) par unité de surface de zone rompue au sein d'un matériau [28]. Le concept théorique de l'intégrale J a été développé, de façon indépendante, en 1967 par Cherepanov [29] et en 1968 par Jim Rice [26]. Ces travaux mettent en évidence que le contour délimitant la zone plastique aux abords du front de fissure (appelé J) est indépendant du profil (contour) de la fissure.

Par la suite, des méthodes expérimentales ont été élaborées pour permettre la mesure des propriétés de rupture critiques à partir d'échantillons à l'échelle du laboratoire pour des matériaux dans lesquels la dimension des prélèvements est insuffisante pour garantir la validité des hypothèses de la mécanique linéaire élastique de la rupture, et d'en déduire une valeur critique de l'énergie de rupture.

Les facteurs d'intensité de contrainte dépendent de la géométrie du composant et des conditions de chargement (traction, flexion, contraintes thermiques,...). Une procédure pour leur détermination est la technique de la fonction de poids où les fonctions de poids ne dépendent que sur la géométrie de la fissure.

Le présent chapitre, consiste à présenter les résultats de la simulation numérique de l'étude du phénomène de la propagation des fissures dans les différentes couches de néoprène fretté constituant le stratifié d'un appareil d'appui, en tenant compte des différents paramètres géométriques et l'effet de chargement mécanique.

IV.2 PRESENTATION DU MODELE NUMERIQUE

Il s'agit de déterminer pour les deux modes de fissuration, les valeurs du facteur d'intensité de contraintes K_I et K_{II} et qui sont exprimés à partir de la relation suivante :

$$K_I = f \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \quad (1)$$

$$K_{II} = f \tau \sqrt{\pi \cdot a} \quad (2)$$

Où

a est la longueur ou bien demi-longueur de l'entaille,

σ et τ sont la contrainte normale et de cisaillement appliquées

f Coefficient géométrique

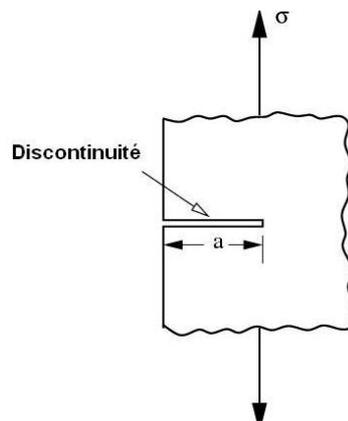


Figure IV.1 Schéma descriptif de l'échantillon

Les modèles considérés sont supposés entaillés, dont la pré-fissure prend une orientation suivant la direction transversale et orientation suivant la direction longitudinale de la couche.

Le tableau IV.1 montré ci-après résume les caractéristiques mécaniques et géométriques des couches élémentaires du stratifié composant la structure de l'appareil d'appui.

Tableau IV. 1 Caractéristiques mécaniques et géométriques du modèle

Elément	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Module d'Young (GPa)	Coefficient de Poisson
Frettes en Acier	400	400	3	210	0,28
Néoprène (couche int)	400	400	8	0,003	0,5
Néoprène (couche sup)	400	400	4	0,003	0,5

La simulation numérique du cas étudié est effectuée à l'aide du logiciel Abaqus (Version 6.14) en considérant le milieu tridimensionnel et en utilisant la méthode des éléments finis.

A partir des hypothèses de bases citées précédemment, on a suivi les étapes suivantes pour concrétiser la modélisation :

1. Création du modèle sur le module « Part »:

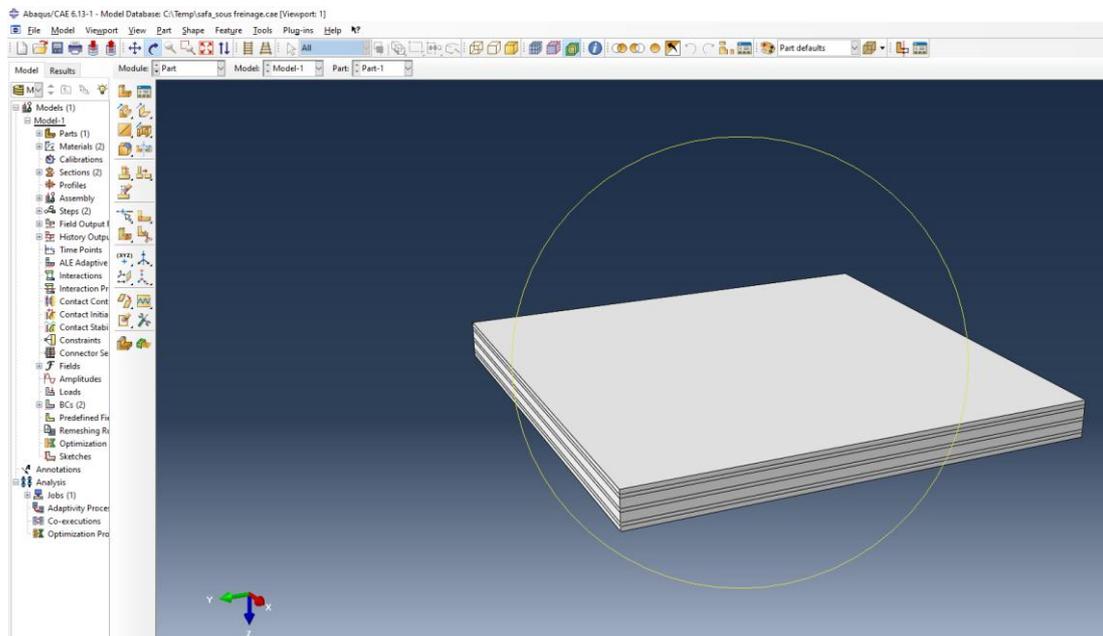


Figure IV.2 Création du modèle en Abaqus

2. Introduction des caractéristiques mécaniques du modèle sur le module « Property »:

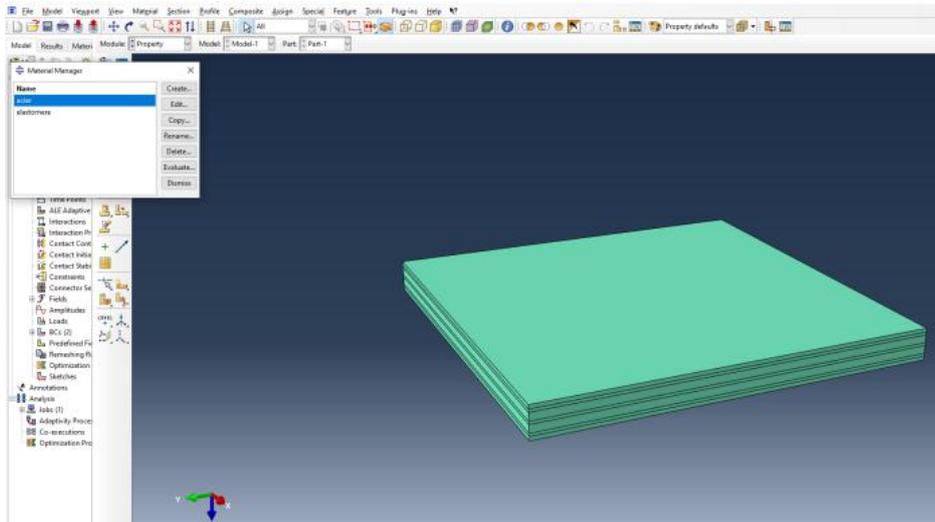


Figure IV. 3 Introduction des propriétés mécaniques

Ce module « Property » permet aussi de faire l'affectation des sections des plaques et la désignation des différentes couches du composite stratifié (ply/ply).

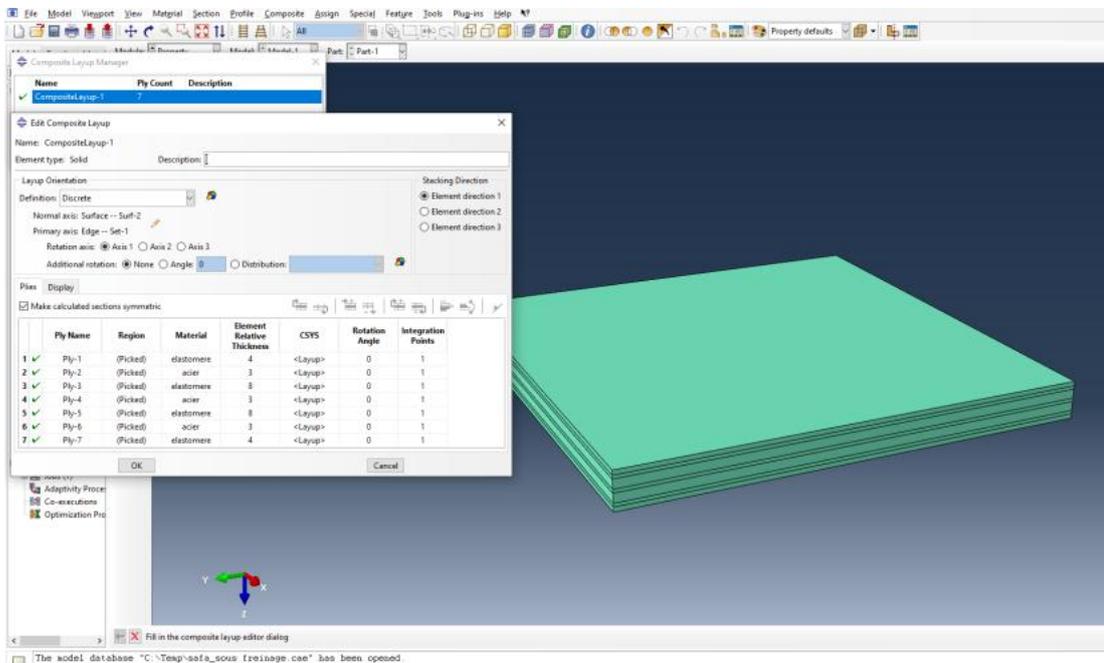


Figure IV.4 Construction du stratifié

3. Le module « **Load** » permet d'insérer les conditions aux, ainsi d'appliquer le chargement considéré en **Step1** déjà crée dans le module « **Step** »:

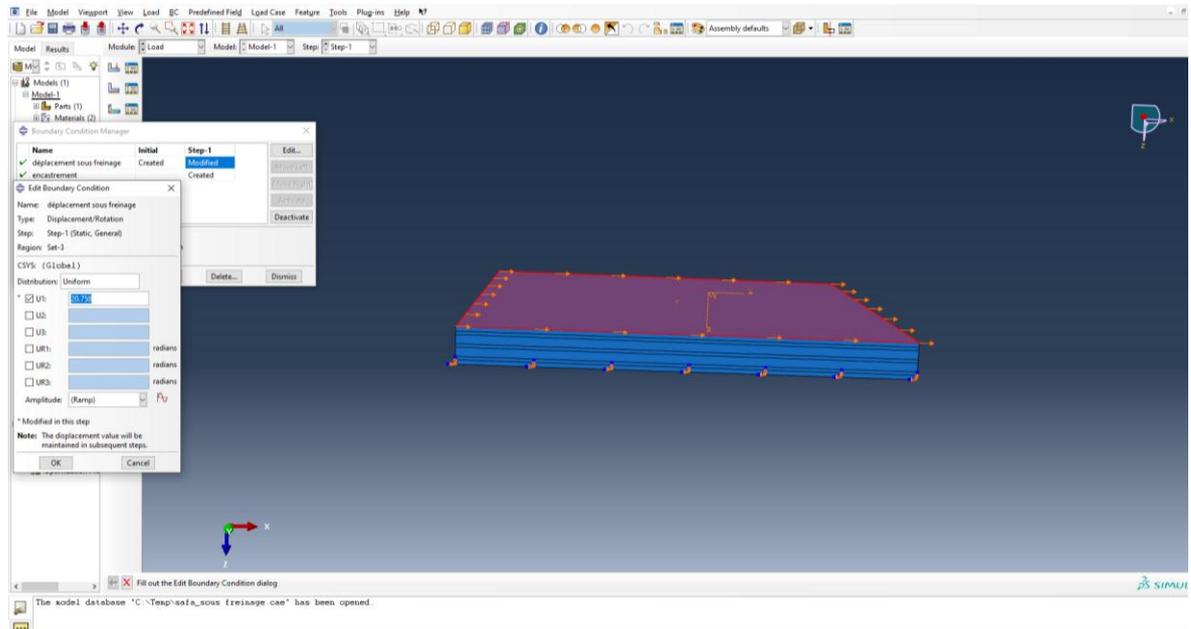


Figure IV.5 Application des conditions de Chargement

4. Création de la fissure sur le module « **Interaction** »

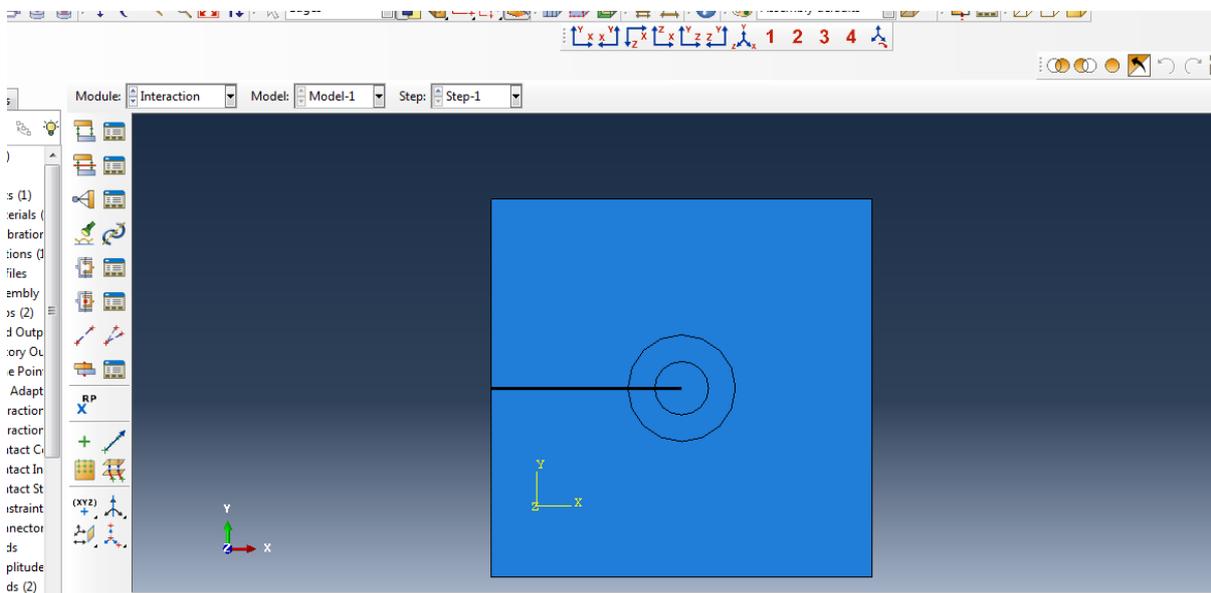


Figure IV.6 Exemple de création de fissure longitudinale

5. Maillage et discrétisation du modèle en éléments finis sur le module « Mesh »

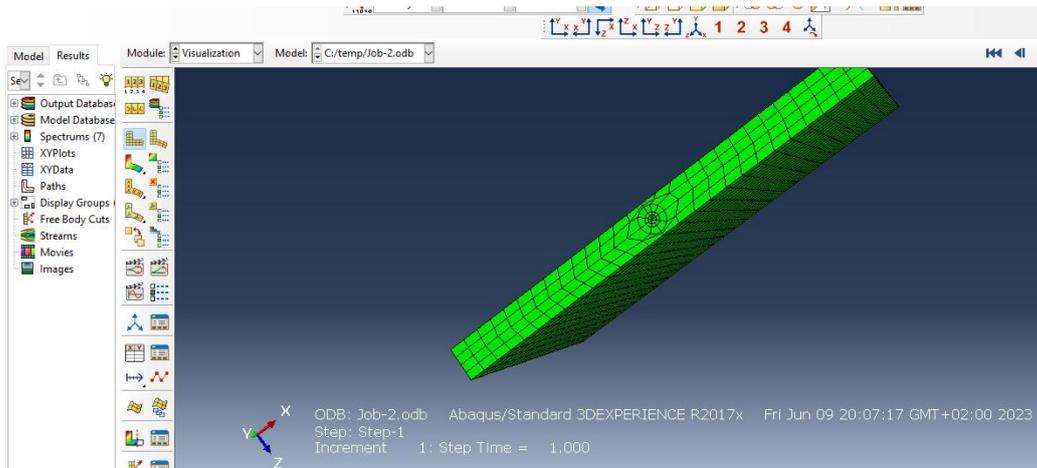


Figure IV.7 Exemple d'Application de maillage dans une plaque de néoprène ayant fissure transversale

6. Compilation et exécution de calcul sur le module « Job »

7. Analyse et observation des résultats sur le module « Results »

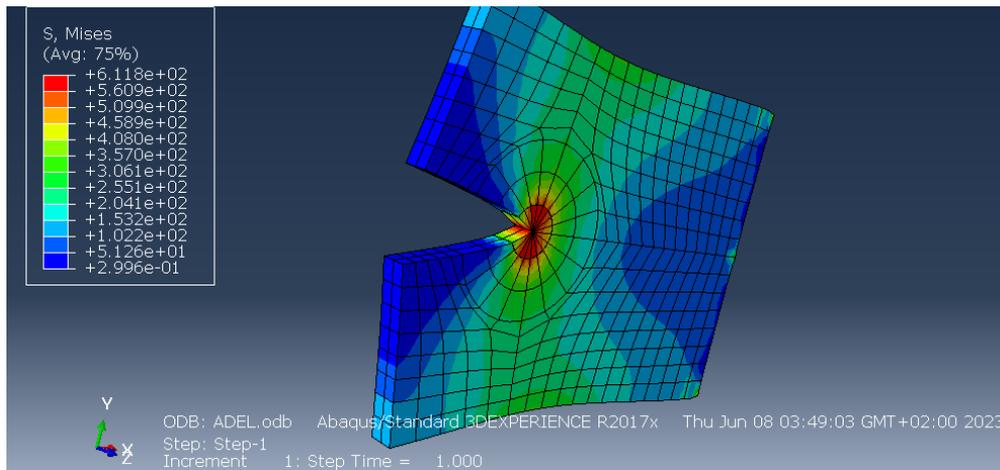


Figure IV.8 Visualisation des résultats

IV.3 RESULTATS ET DISCUSSION

Le modèle adopté pour cette application combine un critère de la mécanique de la rupture et la modélisation répartie de la fissuration, menant à tenir compte de la singularité de champ de contraintes en pointe de la fissure en accompagnant le développement de la fissuration et le comportement à la rupture en considérant l'effet des paramètres

géométriques. Cependant, l'analyse se base sur la détermination pour les deux modes de chargement I et II, les valeurs du facteur d'intensité de contraintes K_I et K_{II} .

IV.3.1 EVALUATION DES CONTRAINTES MAXIMALES

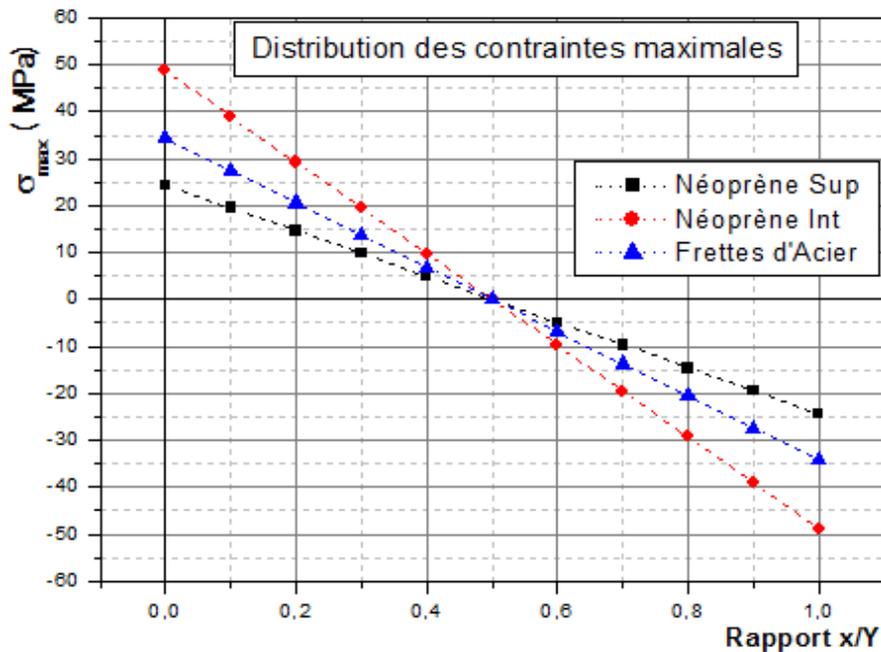


Figure IV.9 Les contraintes maximales dans les différentes couches

La figure (IV.9) représente la variation du champ des contraintes appliquées sur la plaque en traction sur les différentes couches constituant la structure de l'appareil d'appuis.

Les contraintes de traction du au chargement mécanique transmis aux appareils d'appuis varient avec le rapport géométrique (X/Y) depuis la fissure localisée en milieu de la plaque en allant vers l'extrémité

IV.3.2 ANALYSE DE LA PROPAGATION DES FISSURES DANS LES COUCHES DU STRATIFIE

La relation entre le facteur d'intensité de contraintes et la taille de la fissure est conditionnée souvent par le rapport (a/w). Les modèles établis dans la simulation numérique pour l'étude paramétrique ont considéré l'étude de l'influence du rapport géométrique (a/w).

A) ETUDE PARAMETRIQUE

Concernant les cas proposés pour cette étude, trois modèles sont fournis dont les deux premiers représentent respectivement le matériau néoprène dans la couche intermédiaire puis de la couche superficielle. Le troisième modèle représente la couche de frettes en matière d'Acier S235J.

Les modèles considérés sont supposés entaillés, dont la pré-fissure prend une orientation suivant la direction transversale et orientation suivant la direction longitudinale de la plaque. A cet effet, il y aura lieu d'examiner la variation des valeurs de facteurs d'intensité de contraintes selon les deux modes I et II.

1. Etude de la propagation des fissures dans les couches intermédiaires des Néoprènes

➤ Cas de la fissure Longitudinale

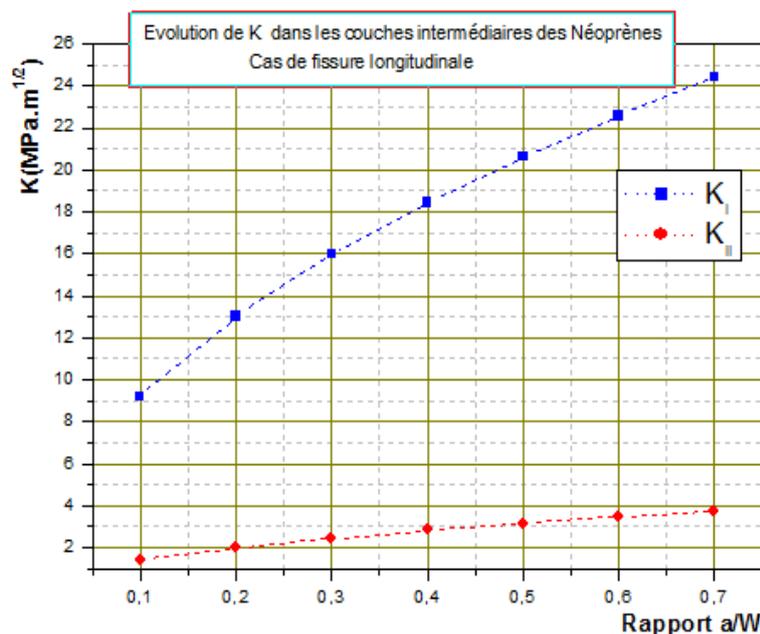


Figure IV.10 : Variation du FIC en fonction du rapport a/w en mode I et II

La figure IV.10 représente la variation des valeurs de facteur d'intensité de contraintes, en mode I et en mode II en fonction de la taille de la fissure dont le rapport géométrique (a/w) montre clairement sa proportionnalité où les valeurs de FIC augmentent considérablement avec l'accroissement de la longueur de la fissure.

On considère que la plaque, est entaillée en sa surface de largeur dont la fissure se propage longitudinalement, et sollicitée en traction pure et en cisaillement où les valeurs de facteurs d'intensité de contraintes sont observées en mode I et en mode II.

➤ **Cas de la fissure Transversale**

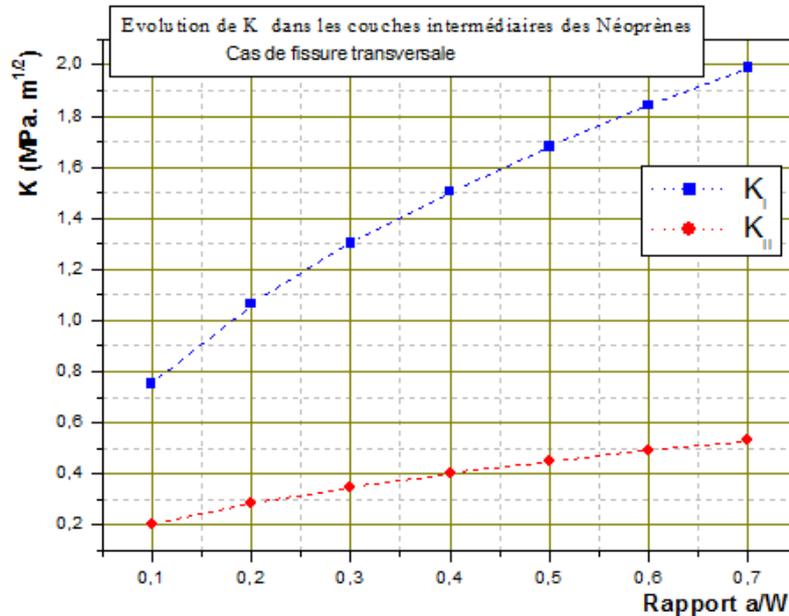


Figure IV.11 : Variation du FIC en fonction du rapport a/w en mode I et en mode II

La figure IV.11 représente la variation des valeurs de facteur d'intensité de contraintes, en fonction du rapport (a/w). La rupture considérée pour cette analyse est suivant les deux modes, comme l'entaille se trouve au niveau de l'épaisseur la plaque (en milieu) où la propagation des fissures prendra le sens transversal.

On remarque que l'évolution du facteur d'intensité de contraintes en fonction de la taille de la fissure en mode I de rupture est plus significative par rapport au mode II.

2. Etude de la propagation des fissures dans les couches superficielles des Néoprènes:

➤ **Cas de la fissure Longitudinale:**

La fissure se propage longitudinalement dans la plaque de la couche supérieure de l'appareil d'appui, sollicitée en traction pure et en cisaillement où les valeurs de facteurs d'intensité de contraintes en mode I et en mode II sont représentées sur la figure IV.12.

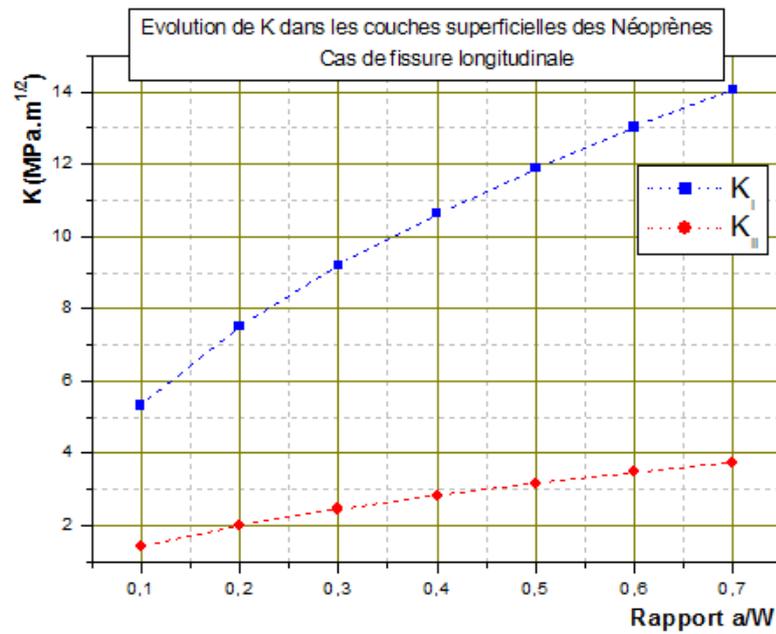


Figure IV.12 : Variation du FIC en fonction du rapport a/w en mode I et en mode II

➤ Cas de la fissure Transversale:

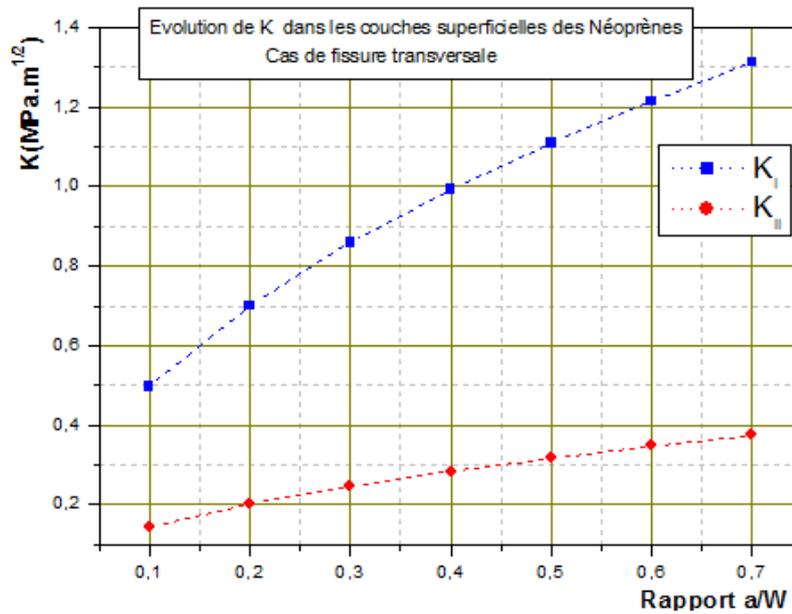


Figure IV.13: Variation du FIC en fonction du rapport a/w en mode I et en mode II

De même, la variation des valeurs de facteur d'intensité de contraintes en fonction du rapport (a/w), dont la propagation des fissures prendra le sens transversal au niveau de l'épaisseur est représentée sur la figure IV.13.

3. Etude de la couche de frette en Acier :

Le même principe de l'analyse des deux modèles précédents est maintenu pour cette étude comme l'orientation et la localisation de l'entaille ainsi les conditions de chargement.

En revanche, les propriétés mécaniques varient comme le matériau est différent dans ce cas (rigidité, limite élastique et contraintes maximales à la traction...etc).

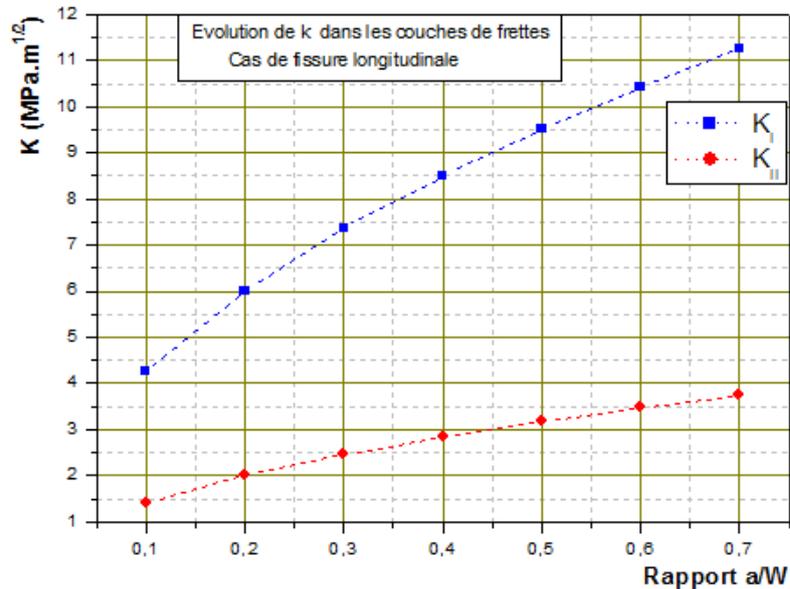


Figure IV.14 Variation du FIC en fonction du rapport a/w en mode I et en mode II (longitudinal)

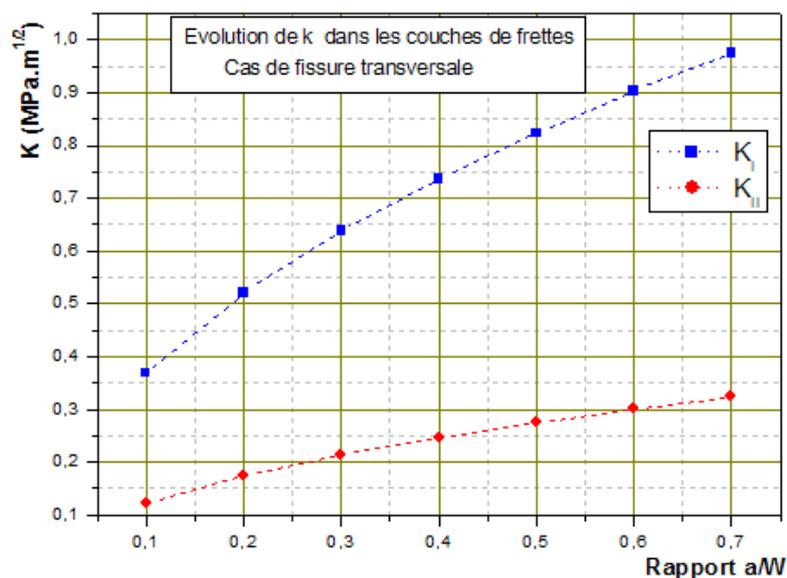


Figure IV.15 Variation du FIC en fonction du rapport a/w en mode I et en mode II (transversal)

La variation des valeurs du facteur d'intensité de contraintes en fonction de la taille de la fissure selon le mode I et II, dans le sens longitudinal et transversal de la plaque d'Acier, est représentée respectivement sur les figures IV.14 et IV.15.

L'analyse de la propagation des fissures dans les différents modèles étudiés dans cette étude paramétrique a dévoilé l'importance des paramètres géométrique, très particulièrement l'influence de la taille « a » de la fissure sur l'évolution des facteurs d'intensité de contraintes.

B) ETUDE COMPARATIVE

Les résultats de l'étude paramétrique conduit à procéder une étude comparative afin de mieux cerner les conclusions des résultats acquis.

1. Vis-à-vis de la disposition de la couche de Néoprène :

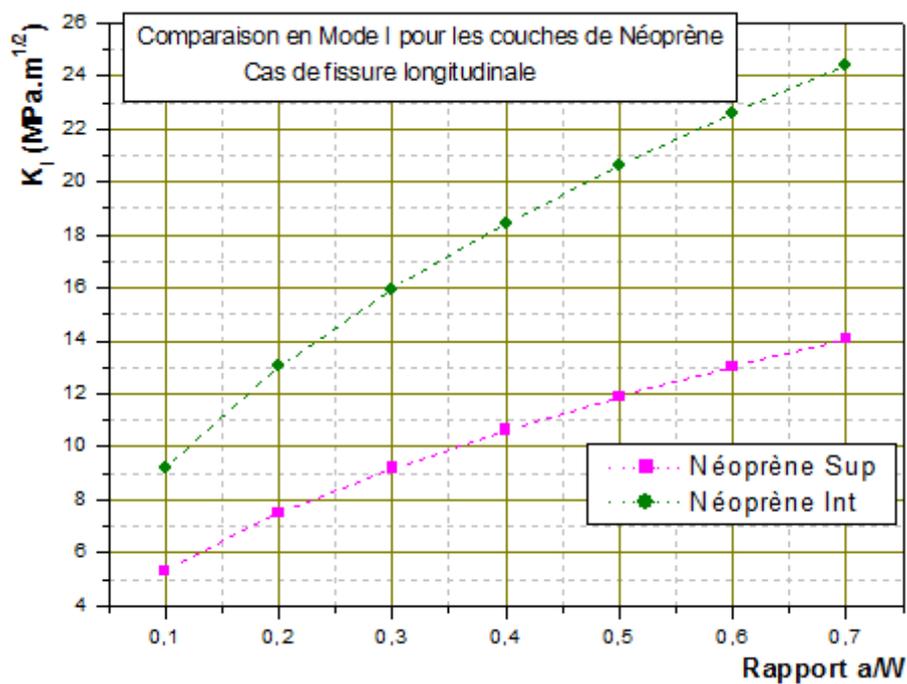


Figure IV.16 Variation du FIC en fonction du rapport a/w en Néoprène (Longitudinal)

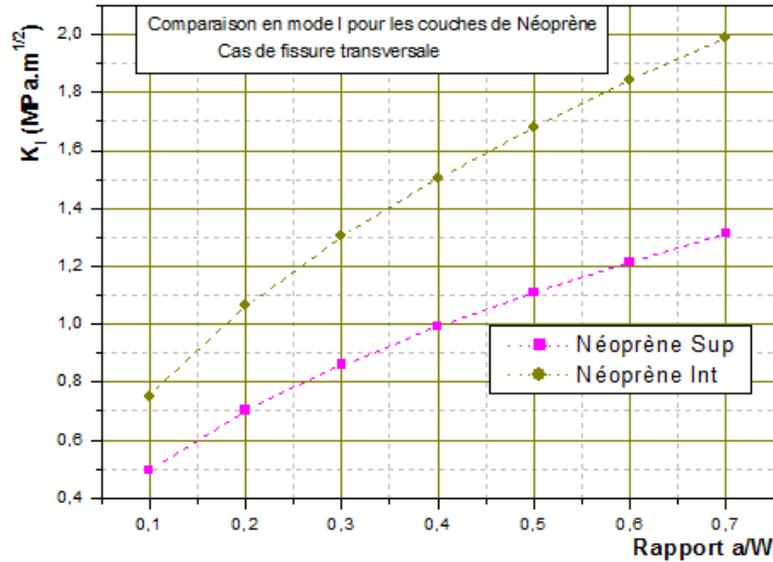


Figure IV.17 Variation du FIC en fonction du rapport a/w en Néoprène (transversal)

Longitudinalement et transversalement, comme décrit les deux figures (IV.16 et IV.17), la variation du facteur d'intensité de contraintes atteint ses valeurs maximales dans le cas où la couche de Néoprène se trouve localisée à l'intérieur du stratifié composant l'appareil d'appui.

Les valeurs critiques de K sont observées au niveau de la couche intermédiaire de néoprène.

2. Vis-à-vis de la nature du matériau :

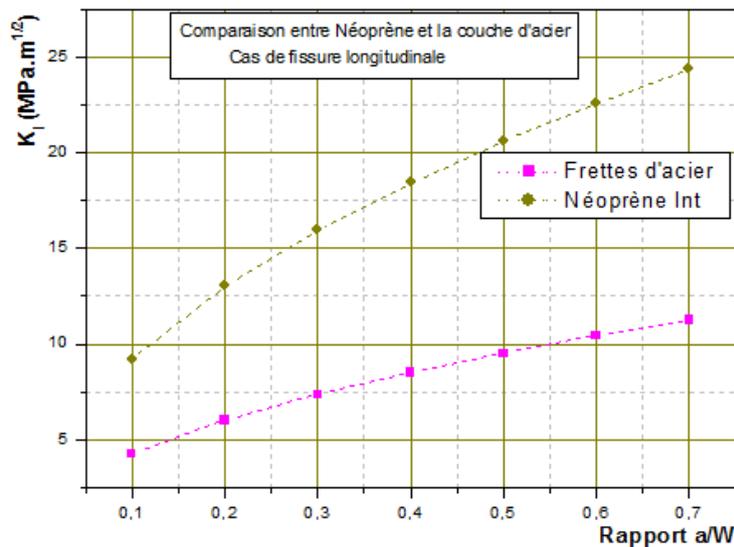


Figure IV.18 Variation du FIC en fonction du rapport a/w (Longitudinal)

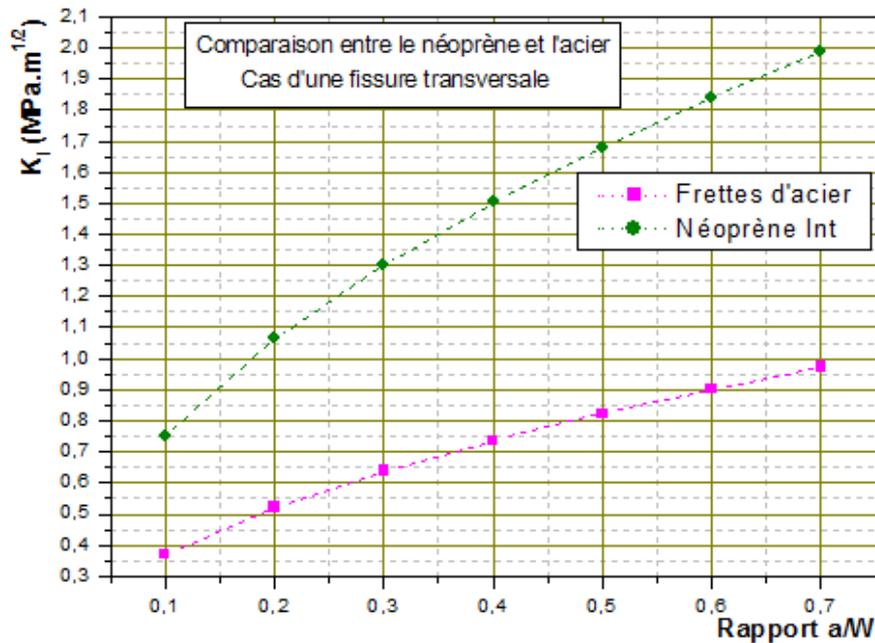


Figure IV.19 Variation du FIC en fonction du rapport a/w (transversal)

Les deux figures (IV.18 et IV.19), représentent la variation du facteur d'intensité de contraintes en fonction de la taille de la fissure dans le cas longitudinal et transversal pour une plaque de Néoprène placée à l'intermédiaire des couches et pour une plaque d'Acier.

Les valeurs de FIC les plus importantes sont marquées dans la couche de néoprène en comparaison avec la couche d'acier.

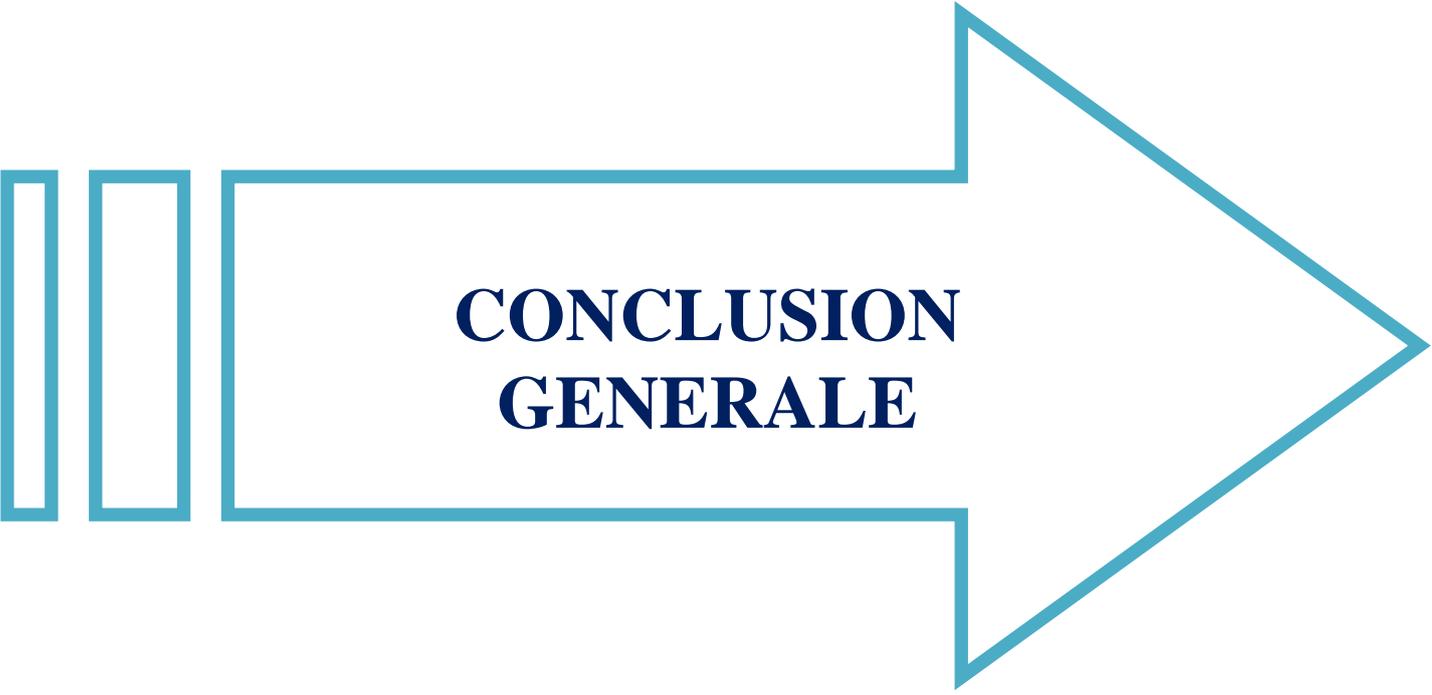
L'impact de la variation de la nature du matériau joue un rôle non négligeable quant au phénomène de la propagation des fissures ce qui déteigne sur la rigidité l'ensemble et le comportement mécanique de l'appareil d'appui.

IV.4 CONCLUSION

Le présent travail s'inscrit dans le cadre d'une étude théorique du comportement mécanique des couches constituant les appareils d'appui en Néoprène fretté vis-à-vis du phénomène de la propagation des fissures en se basant sur la détermination des facteurs d'intensité des contraintes comme critère de rupture adopté pour l'analyse.

L'analyse a dévoilé en premier stade sur l'importance des paramètres géométrique du système étudié en particulier la taille de la fissure ainsi les dimensions des plaques étudiées.

En second lieu, la prise en compte de la disposition des différentes couches, l'orientation et la localisation de la fissuration ainsi la rigidité du matériau étudié ont marqué leur importance et leur impact sur le phénomène de la propagation des fissures.



**CONCLUSION
GENERALE**

1. Conclusion

L'appareil d'appui est l'élément clé qui permet la liberté de mouvement entre une structure et son assise, tout en assurant la transmission des efforts verticaux et les rotations. Les appuis en élastomère sont à la fois assez rigides pour transmettre les charges imposées et assez flexibles pour permettre les rotations et les mouvements imposés par la structure. Ce type de systèmes est déformables vis-à-vis aux efforts verticaux et horizontaux et de rotation, où l'appareil d'appui est considéré fixe tout en admettant deux mouvements translatifs et un mouvement de rotation dont les valeurs sont limitées.

Dans l'état actuel, le phénomène de la propagation des fissures dans les structures en béton peut être décrit par le concept de la mécanique linéaire élastique de la rupture à partir du critère du facteur critique d'intensité des contraintes. Cette méthode permet de quantifier les effets de la présence d'une fissure et l'influence de celle-ci sur le comportement à la rupture.

Plusieurs facteurs nuisibles peuvent influencer le bon fonctionnement du système et provoquer des dégradations inaperçues causant au cours du temps son endommagement total. La présence d'une fissure d'origine mécanique dans les différentes couches du composites stratifié constituant l'appareil d'appuis menace directement la durabilité de la liaison et aussi la stabilité de l'ouvrage.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre d'une étude théorique du comportement mécanique des couches constituant les appareils d'appui en Néoprène fretté vis-à-vis du phénomène de la propagation des fissures en se basant sur la détermination des facteurs d'intensité des contraintes comme critère de rupture adopté pour l'analyse.

Les principales conclusions de la présente étude peuvent être résumées comme suit:

- La prise en compte des paramètres géométriques du système étudié en particulier la taille de la fissure ainsi les dimensions des plaques montrent leur influence significative sur la variation des valeurs des FIC.

- La prise en compte de la disposition des différentes couches, l'orientation et la localisation de la fissuration ainsi la rigidité du matériau s'avère nécessaire pour étudier le phénomène de la propagation des fissures...etc.

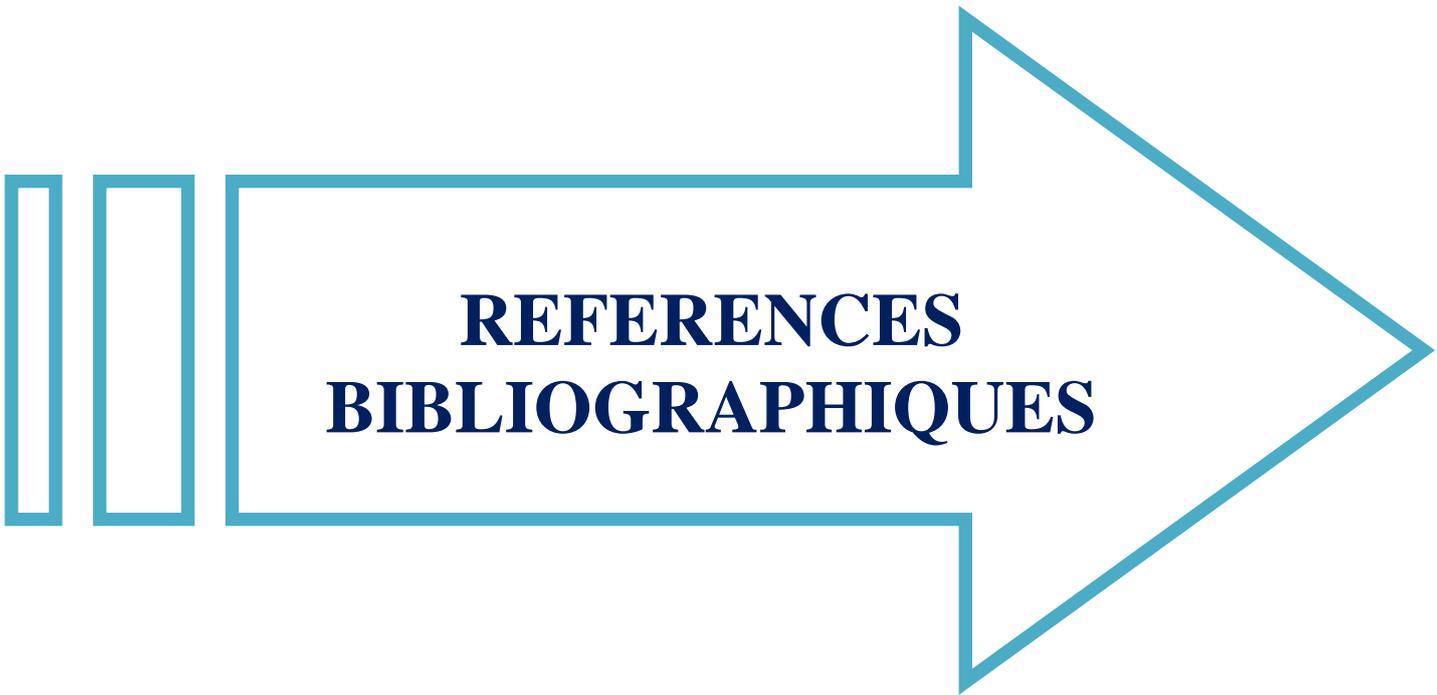
2. Perspectives à la recherche

Afin de compléter les résultats obtenus et de mieux cerner les conclusions acquises à partir de cette recherche, on peut proposer aussi d'autres travaux de recherches dans le cadre du même contexte, à titre d'exemple:

- Utilisation des modèles à deux paramètres mesurés par des essais expérimentaux afin de mieux comprendre la réponse des différents éléments constitutifs en état de fissuration.
- Aborder des travaux de recherches opérationnelles afin de minimiser l'impact de désordres à travers l'ensemble.
- Optimiser des solutions fiables pour la restauration de systèmes déformés au lieu de procéder aux opérations de vérinage.
- Etudier la faisabilité de procéder une réparation in-situ à des échelles variées...etc

En perspective, nous envisageons aussi des parties analytiques, pour faire des comparaisons en utilisant d'autres matériaux –ex : Stratifié, FGM etc.- afin de mieux valider notre fonction proposée.

Les motivations et les intérêts de ces travaux nécessitent une étude expérimentale pour que le choix des différentes approches et des paramètres soit concret donnant ainsi une illusion aux chercheurs d'entamer de nouvelles études.



**REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Sétra, Service d'Études techniques des routes et autoroutes** « Appareils d'appui en élastomère fretté. Utilisation sur les ponts, viaducs et structures similaires ». Guide technique. Août 2007.
- [2] **FAEQ 5 GUIDES STRRE.** « Appareils d'appuis » ; Entretien et réparation des équipements d'ouvrages, Une édition du syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement de structures (STRRES). Février 2010.
- [3] **BHUIYAN A. R., AHMED E.** « Analytical expression for evaluating stress-deformation response of rubber layers under combined action of compression and shear ». *Construction and Building Materials*. 2007. Vol. 21, p. 1860-1868.
- [4] **Fiche n°VIII-1.** « Appareils d'appui en élastomère fretté ». Révision : Octobre 2009.
- [5] **PETITET G., BARQUINS M.** « Matériaux caoutchouteux ». Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2008.
- [6] **MOONEY M.** « A theory of large elastic deformation ». *Journal of Applied Physics*. 1940. Vol. 11, p. 582-592.
- [7] **LION A.** « On the large deformation behaviour of reinforced rubber at different temperatures ». *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1997. Vol. 45, p. 1805-1834.
- [8] **RAOULT I.** « Structures élastomères sous chargement cyclique : comportement, fatigue, durée de vie ». Thèse, Ecole Polytechnique, 2010.
- [9] **BOUKAMEL A.** « Modélisations mécaniques et numériques des matériaux et structures en élastomères ». Habilitation à Diriger des Recherches, Université de la Méditerranée Aix-Marseille II, 2006
- [10] **HARWOOD J. A. C., MULLINS L., PAYNE A. R.** « Stress softening in rubbers : a review ». *Journal of the IRI*. 1967. p. 17-27.

- [11] **MARTINEZ J. M., BOUKAMEL A., MÉO S., LEJEUNES S.** « Statistical approach for a hyper-visco-plastic model for filled rubber: Experimental characterization and numerical modeling ». *European Journal of Mechanics a-Solids*. 2011. Vol. 30, p. 1028-1039.
- [12] **JAUNICH M., STARK W., WOLFF D.** « Comparison of low temperature properties of different elastomer materials investigated by a new method for compression set measurement ». *Polymer Testing*. 2012. Vol. 31, n°8, p. 987-992.
- [13] **RONAN S., ALSHUTH T., JERRAMS S., MURPHY N.** « Long-term stress relaxation prediction for elastomers using the time–temperature superposition method». *Materials & Design*. 2007. Vol. 28, n°5, p. 1513-1523.
- [14] **DROZDOV A. D., CHRISTIANSEN J.** « Thermo-viscoplasticity of carbon black-reinforced thermoplastic elastomers ». *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 46, n°11-12, p. 2298-2308.
- [15] **IAEA.** “Verification of analysis methods for predicting the behaviour of seismically isolated nuclear structures”. International Atomic Energy Agency, 2002.
- [16] **BURTSCHER S. L., DORFMANN A.** « Compression and shear tests of anisotropic high damping rubber bearings ». *Engineering Structures*. 2004. Vol. 26, p. 1979-1991.
- [17] **DION C.** « Etude numérique et expérimentation du comportement dynamique des ponts avec isolateurs et amortisseurs sismiques ». Canada. Ecole Polytechnique de Montréal, 2010.
- [18] **AMIN A. F. M. S., WIRAGUNA S. I., BHUIYAN A. R., OKUI Y.** « Hyperelasticity model for finite element analysis of natural and high damping rubbers in compression and shear ». *Journal of engineering mechanics*. 2006. Vol. 132, n°1, p. 54-65 .
- [19] **Quang Tam NGUYEN.** , « Etude du comportement du néoprène et d’appareils d’appuis parasismique en néoprène fretté », thèse de doctorat de l’université de Strasbourg, 2013.
- [20] **Michel FRAGNET** ;. « Les pathologies des appareils d’appuis des ponts », visite et pathologie AAP, STRRES, Juillet 2021.
- [21] **AFR CONSEIL.** ; « Expertise de l’ouvrage d’art sur RN14 PK148+000 », **RAPPORT FINAL ET SOLUTIONS DE RÉPARATION : MISSION – 3 –**. Avril 2019. DTP Tiaret.

- [22] **Samy Mzabi.** « Caractérisation et analyse des mécanismes de fracture en fatigue des élastomères chargés ». Chimie-Physique [physics.chem-ph]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2010.
- [23] **Griffith, A.** “The phenomena of rupture and low in solids”. Philosophical Transactions, 221, pp 163-198, 1920.
- [24] **IRWIN G.R.**, “Fracturing of Metals ASM Cleveland”, Fracture Dynamics, pp147-166, 1948.
- [25] **Anderson, T.L.**, Fracture mechanics : fundamentals and applications. 3rd ed. 2005, Boca Raton, FL: Taylor & Francis. 621
- [26] **RICE, J.** “A part independent and approximate analysis of strain concentration by notches and crack”. Journal of Applied Mechanics-ASME, 35, pp. 379-386, 1968.
- [27] **Van Vliet, Krystyn J.;** "Mechanical Behavior of Materials", (2006).
« <http://www.stellar.mit.edu/S/course/3/fa06/3.032/index.html> ».
- [28] **G. P. Cherepanov**, “The propagation of cracks in a continuous medium”, Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 31(3), p. 503-512, 1967.
- [29] **Meyers and Chawla.;** "Mechanical Behavior of Materials, " 445-448, 1999.

الملخص

إن ظهور الاضطرابات في الطبقات المختلفة للرقائق التي تشكل جسم المحامل أثناء التشغيل يهدد استقرار البنية التحتية ويمكن أن يتسبب في أضرار جسيمة.

يدور التحليل الذي تم تناوله في هذا البحث حول المساهمة في الدراسة النظرية للسلوك الميكانيكي للنيوبرين والحنق المكونة للمركب الرقائقي في محامل الجسور تحت الطرق ، والتي تخضع لتشوّهات ضارة من خلال استمرار انتشار الشقوق الموجودة مسبقاً في الطبقات المختلفة.

يقدم العمل تحليلاً لظاهرة انتشار الشقوق مع دراسة بارامترية ومقارنة تعتمد على المعايير المعتمدة في ميكانيكا الكسر ، باستخدام المحاكاة العددية لنموذج الحالة المدروسة ، بناءً على طريقة العناصر المحدودة باستخدام كود أباكوسAbaqus. النتائج التي تم الحصول عليها تتم مقارنتها ومناقشتها.

الكلمات المفتاح:

انتشار الشقوق ، عامل شدة الإجهاد ، المواد المركبة ، النيوبرين المغلف بالانكماش.

RESUME

L'apparition des désordres dans les différentes couches du stratifié composant le corps des appareils d'appuis lors de la mise en service menace la stabilité de l'infrastructure et peut provoquer des dégradations importantes.

L'analyse abordée dans cette recherche s'articule autour d'une contribution à l'étude théorique du comportement mécanique de néoprène et de frettes constituant le composite stratifié dans les appareils d'appuis des ponts sous chaussées, subissant des déformations nocives en poursuivant la propagation des fissures préexistantes dans les différentes couches.

Le travail présente une analyse du phénomène de la propagation des fissures munie d'une étude paramétrique et comparative en s'appuyant sur les critères adoptés en mécanique de la rupture, en utilisant la simulation numérique du modèle du cas étudié, en se basant sur la méthode des éléments finis à l'aide du code de calcul Abaqus. Les résultats obtenus sont comparés et discutés.

Mots clés:

Propagation des fissures, facteur d'intensité de contraintes, matériaux composites, Néoprène fretté.

ABSTRACT

The appearance of disorders in the different layers of the laminate making up the body of the bearings during commissioning threatens the stability of the infrastructure and can cause significant damage.

The analyses approach in this research revolves around a contribution to the theoretical study of the mechanical behavior of neoprene and frets constituting the laminated composite in the bearings of bridges under roadways, undergoing harmful deformations by continuing the propagation of pre-existing cracks in the different layers.

The work presents an analysis of the phenomenon of crack propagation provided with a parametric and comparative study based on the criteria adopted in fracture mechanics, using the numerical simulation of the model of the case studied, based on the finite element method using the Abaqus computer code. The results obtained are compared and discussed.

Keywords:

Crack propagation, stress intensity factor, composite materials, shrink-wrapped neoprene.