



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifiques

Université A/MIRA de Béjaïa
Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique



Mémoire

Présenté par:

M_r : *OUZZANE Fahem*

M_r : *DAIDECHE Lemnouer*

Pour l'obtention du diplôme de

Master

Filière : Génie Mécanique

Option : Conception Mécanique et Productique

Thème

Conception et réalisation de moules
et mise en œuvre d'éprouvettes en
caoutchouc naturel chargé au noir
de carbone et caractérisation

Devant le jury composé de :

M_r AMZAL Ikhlef

M_r YAYA Kamal

M_r SAADEDDINE Abdelhamid

M_r BECHIR Hocine

M_r MEHANA Sai

M_r ABID Rachid

Président

Examineur

Examineur

Rapporteur

Invités- Ingénieur S.A.E.L

Invités- Ingénieur S.A.E.L





*Nous tenons, avant tout, à remercier **DIEU**, tout clément, tout puissant, de nous avoir donné la force de réaliser notre travail.*

*Nos remerciements vont exceptionnellement à Monsieur **H.BECHIR**, pour son aide, son suivi, ses conseils et directives et pour son dévouement.*

*Nous tenons à remercier Monsieur **AMZAL.I**, d'avoir accepté de présider le jury.*

*Nos remerciements vont aussi à Monsieur **YAYA.K** et Monsieur **SAADEDINE.A**, d'avoir bien voulu accepter d'examiner notre travail.*


*Nous tenons à remercier vivement l'équipe de **SAEL** particulièrement à Monsieur **MEHANA.S** et Monsieur **ABID.R** pour Leurs aide et conseils.*

Nous remercions tous les enseignants de la faculté de technologie de l'université de Béjaïa, spécialement ceux du département de génie mécanique, pour leur apport en savoir.

*Nos remerciements, vont au personnel du hall de technologie Sans oublier Monsieur **SAAL** et Monsieur **BELAMERI** pour leur immense soutien et conseil.*

Enfin, nos remerciements vont à toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à réaliser ce travail.

Merci à tous

 *Je dédie ce travail ...*

*A ceux qui n'ont jamais cessé de m'encourager et de me soutenir, à ceux qui leur amour m'a
donné la volonté d'aller toujours de l'avant,*

A ma très chère mère Safia

*Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence,
la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de
prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un
grand secours pour mener à bien mes études.*

A mon chère Père Laid

*Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement
et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis
jour et nuit pour mon éducation et mon bien être.
Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma
formation.*

A la mémoire de mes chers grands parents

A la cher Lala aldja que je considère comme ma grande mère

A mon unique frère Fayçal

A mes chères soeurs Samira et Lysa qui est une partie de mon coeur

A mon oncle Rachid et ça famille et à Yazide et ça femme Luiza

A mes cousin Ali et Saïd que je respecte

A tous les enfants de ma famille Macel, Hani, Amine, Hocine, Youcef, Lidia, Nina,

Djamila, et la petite Hana et à toutes ma famille

*A mon cher binôme **Lemnouer** et à tout sa famille*

A mes copains de classe Aziz et Mourad

A tous mes amis(es) sans cité les noms

A ma très chère Kahina et à toutes sa famille

Et à tous

Fahem.

Dédicace

Ils m'ont donné la vie, l'amour et l'espoir.

Ils m'ont offert aide, compréhension et encouragement.

Ils sont la joie de ma vie.

Ils sont là les plus chers de mon cœur.

Mes parents, avec toute ma gratitude.

Mes frères : Slimane, Nabil, Mounir, Abd el Fetah, Mahdi.

A mes sœurs : Leila, Amina.

*A la femme de mon frère Sabrina, et son fils, le petit coco de la
maison,*

Houcine, qui fait tous les joyeux.

A tous mes amis : Fahem Aziz et Mourad

Lemnauer.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I- Génialité sur les élastomères	
I-1-Qu'est ce qu'un élastomère	3
I-2-Historique	3
I-3-Production du caoutchouc naturel.....	4
I-4-Propriétés essentielles et structure moléculaires des élastomères	4
I-4-1-Aspect moléculaire	4
I-4-2-Température de transition vitreuse	5
I-5-Formation des élastomères	6
I-5-1- Formation	6
I-5-2- Notion de renforcement	7
I-5-3- La vulcanisation	7
I-6- Différentes familles d'élastomères	7
I-7- Mise en œuvre des élastomères	8
I-8-Mise en forme des mélanges	8
I-9- Comportement des élastomères	9
I-9-1- L'Elasticité caoutchoutique	9
I-9-2- Influence de la température	10
I-10- Conclusion	10
Chapitre II- Comportement hyperélastique des élastomères	
II-1-Introduction	12
II-2-Equations de base de la Mécanique des Milieux Continus	12
II-2-1-Notions fondamentales des grandes déformations (Salençon, 1988)	12
II-2- 2-Equation locale du mouvement	15
II-2-3-Notion essentielles de la Thermodynamique des milieux continus (J.Lemaitre, 1984)	15
II-2-4- Modélisation du comportement élastique non linéaire des élastomères (R.W.Ogden,1984)	16

Sommaire

II-2-5- Lois de comportement hyper - élastique (R.W. Ogden, 1984 ; holzapfel, 2000)	17
II-3- Modèle hyperélastique	18
II-3-1- Modèle de Mooney-Revlin (1948)	18
II-3-2-Modèle Néo-hookien	18
II-3-3-Modèle Mooney (1940)	18
II-3-4- Modèle de Yeoh (1990).....	19
II-3-5-Modèle de Gent (1996)	19
II-3-6-Modèle d'Ogden (1972)	19
II-4-Essais standards et Identification paramétrique	19
II-4-1-Essais standards	19
II-4-1-1-Essai de traction simple	20
II-4-1-2-Essai de cisaillement pur	21
II-4-1-3-Traction équibiaxiale	23
II-5-Identification paramétrique	24
II-6-Conclusion	28
Chapitre III- Réalisation des moules, mise en ouvre des pièces et caractérisation	
III-1-Objectif du travail	29
III-2-Dessins de définitions des moules.....	30
III-3-Conception des moules	31
III-4-Réalisation des moules	32
III-4-1-Matériels utilisés	32
III-4-2-Fabrication des moules	32
III-5-Mise en ouvre des éprouvettes et les plots	33
III-5-1-Préparation de la patte du caoutchouc	33
III-5-1-1- Les composants chimique du mélange	33
III-5-1-2Calcul de la masse du mélange	35
III-5-1-3-Préparation des mélanges	36
III-5-2-Moulage	37
III-6-Caractérisation mécanique	38
III-6-1- Essai de traction uni axiale	38
III-6-2- Le système de fixation	39
III-6-3- Principe de l'essai	39

Sommaire

III-6-4- La machine de traction	39
III-6-5- Procédure expérimentale.....	40
III-7- Modélisation du comportement hyperélastique de nos caoutchoucs	43
III-7-1- Modèle de Mooney-Rivlin	44
III-7-2- Modèle de Yeoh	47
III-8-Conclusion.....	51
Conclusion général	52

Liste des figures

Liste des figures

Figure 1-1 : Hevea brasiliensis	4
Figure 1-2 : Récolte du latex	4
Figure 1-3 : Linéaires avec réticulation très légère	5
Figure 1-4 : Caractère hyperélastique d'un élastomère en traction uniaxiale.....	9
Figure I-5 : Influence de la température [CURCHOS, J ET ALARCON-LORCA, F.]	10
Figure II-1 : Essai de traction simple	12
Figure II-2 : Essai de traction simple d'un élastomère	12
Figure II-3 : Repérage d'un point dans un solide	13
Figure-II-4 : Essai de traction simple	20
Figure II-5 : Essai de cisaillement pur (CP)	22
Figure II-6 : Essai de traction équibiaxiale	23
Figure II-7 : Dépendance de $\frac{\partial w}{\partial I_1}$ et $\frac{\partial w}{\partial I_2}$ on I_1 et I_1 (Rivlin et Saunders 1951).....	25
Figure II-8 : Relation entre I_1 et I_2 pour les différents type d'essais.....	26
Figure II-9 : Les graphes de la fonction réduite par les caoutchoucs	27
Figure III-1 : Eprouvette proposée par Y.H.Lin, (1971)	29
Figure III-2 : Eprouvette avec les dimensions modifiées	29
Figure III- 3 : Dessin du moule des éprouvettes pour la traction uniaxiale	30
Figure III- 4 : Dessin du plot1.....	30
Figure III- 5 : Dessin du plot 2	30
Figure III- 6 : Dessin du plot 3	31
Figure III- 7 : Comparaison de résistance d'un moule en acier et un autre en aluminium	32
Figure III- 8 : Moule des éprouvettes	33
Figure III- 9 : Photographie des additifs du mélange	34
Figure III- 10 : Mélangeurs	36
Figure III-11 : Machine du moulage.....	38
Figure III-12 : Différent éprouvettes injecter dans le moule	38
Figure III-13 : Système de fixation	39
Figure III-14 : Machine de traction	40

Liste des figures

Figure III-15 : L'éprouvette à l'état initial	41
Figure III-16 : L'éprouvette à l'état final.....	41
Figure III-17 : Courbes de traction des éprouvettes.....	42
Figure III-18 : Courbe des contraintes nominales et élongation.....	43
Figure III-19 : Courbe des contraintes réduites	44
Figure III-20 : Droites de Mooney-Rivlin.....	45
Figure III-21 : Comparaison entre les contraintes nominales expérimentales et calculées en utilisant le modèle de Mooney-Rivlin.....	46
Figure III-22 : Courbe de la contrainte nominale expérimentale en fonction de la contrainte calculée du modèle de Mooney-Rivlin	47
Figure III-23 : Courbes de contrainte réduite de Yeoh	48
Figure III-24 : Comparaison des contraintes nominales expérimentales à celle du modèle de Yeoh	50
Figure III-25 : Courbe de la contrainte nominale expérimentale en fonction de la contrainte calculé de du modèle de Yeoh	50
Figure III-26 : Comparaison des contraintes nominales expérimentales et contraintes des modèles de Yeoh et Mooney-Rivlin	51

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau -1 : Pourcentage de chaque composant (%)	33
Tableau -2 : Rôle de chaque composant	34
Tableau -3: Masses théoriques pour les plots et les éprouvettes et les plaques	35
Tableau -4 : Masse de chaque composant en(g)	36
Tableau -5 : Constants de Mooney-Rivlin	45
Tableau -6 : Constantes de Yeoh	49

NOMENCLATURES

(C_0) : Configuration initiale ;

(C_t) : Configuration actuelle ;

$\bar{\sigma}$: Tenseur des contraintes de Cauchy ;

\bar{E} : Tenseur des déformations Green-Lagrange ;

\bar{F} : Opérateur gradient de l'opérateur de transformation ;

\bar{F}^T : Transposé Opérateur gradient de la transformation ;

\bar{A} : Tenseur des déformations d'Euler-Almansi ;

\bar{C} : le tenseur des déformations Green-Cauchy droit ;

\bar{B} : le tenseur de déformation des Green-Cauchy gauche ;

C_{ij} : Coefficients d'élasticité ;

\bar{I} : Le tenseur identité ;

$\bar{I}_1(\bar{C})$: Premier invariant du tenseur des déformations de Green-Lagrange droite \bar{C} ;

$\bar{I}_2(\bar{C})$: Deuxième invariant du tenseur des déformations de Green-Lagrange droite \bar{C} ;

$\bar{I}_3(\bar{C})$: Troisième invariant du tenseur des déformations de Green-Lagrange droite \bar{C} ;

$\bar{\pi}$: Le tenseur de Piola-Kirchhoff (P.K.1) ;

\bar{S} : Le deuxième tenseur de Piola-Kirchhoff (P.K.2) ;

J : Jacobien de la transformation ;

λ : Elongation ;

P : Pression hydrostatique ;

ρ_0 : Masse volumique du solide dans la configuration de référence ;

Nomenclatures

W : Potentiel élastique ;

ψ : Potentiel thermodynamique ;

μ : Module du cisaillement du matériau aux petites déformations ;

η : Entropie massique.

" : Pouces 1 " = 2.54 mm

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Les élastomères sont des matériaux polymères amorphes, ils ont un comportement élastique non-linéaire. En effet, ces matériaux supportent des grandes déformations réversibles, ils sont dits hyper-élastiques, c'est-à-dire leur élasticité est d'origine entropique (Treloar L.R.G , 1975)

En première approche, ces matériaux sont supposés homogènes, isotropes et incompressibles. Dans ce contexte, un certain nombre de modèles sont proposés dans la littérature; on peut citer les modèles suivants : Néo-hookien ; Mooney-Rivlin (1940) ; Yeoh (1990,1993) et Horgan-Saccamondi (2003). Le modèle de Gent (1996,1999) est très intéressant car il tient compte de l'extension maximale des chaînes macromoléculaires. En effet, il s'apparente au modèle à « huit sous chaînes » non-gaussien d'Arruda et Boyce (Arruda-Boyce, 1993).

Théoriquement, bon nombres de modèles hyperélastiques sont proposés, cependant, l'identification paramétrique reste encore un problème ouvert car il n'existe pas encore « de protocole universel » pour pouvoir obtenir les paramètres d'élastomères. Nous précisons que dans le cadre de dimensionnement des structures mécaniques en élastomères, les valeurs numériques des paramètres de modèle sont des données d'entrées pour les codes de calcul par éléments finis industriels.

L'objectif de notre travail s'inscrit dans le cadre de la conception d'éprouvettes en élastomère pour pouvoir réaliser des essais de traction – compression uni- axial. Ainsi, on vise à mettre en évidence la compressibilité des élastomères, notamment des caoutchoucs chargés au noir de carbone.

En d'autres termes, on voudrait mesurer le coefficient de Poisson dans le domaine des petites déformations et aussi que devient ce coefficient aux grandes déformations ? Ensuite, on proposera des modèles hyperélastiques pour ces caoutchoucs chargés au noir de carbone qui sont utilisés comme des pièces de structures mécaniques (silent bloc, butée,...).

Pour pouvoir fabriquer ces éprouvettes, nous avons conçu et réalisé des moules en acier. Pendant notre stage à la SAEL (Société d'Application des Elastomères – Oued-Smar), nous avons formulé nos caoutchoucs chargés au noir de carbone et utilisé la technologie du moulage par compression pour obtenir des éprouvettes spécifiques en élastomère aux essais de traction-torsion et des plots cylindriques pour réaliser des essais de compression.

Introduction générale

Ce mémoire est constitué d'une introduction générale, de trois chapitres et d'une conclusion générale.

Dans le premier chapitre, on définit le matériau à étudier (élastomère), ainsi que ses caractéristiques principales.

Dans le deuxième chapitre, on introduit les notions essentielles des grandes déformations et de thermodynamique des milieux continus. Ensuite, nous présenterons les modèles hyperélastiques.

Au troisième chapitre, nous développons l'analyse des grandes déformations en traction uniaxiale.

Enfin nous terminons ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralité sur les

élastomères

I-1-Introduction

L'industrie automobile utilise de nombreuses pièces en caoutchoucs pour assurer des fonctions antivibratoires. Parmi elles, on peut citer les cales de support de moteur, les articulations de liaison au sol ou les suspentes d'échappement. La majorité de ces pièces est réalisée en caoutchouc naturel contenant des charges de noir de carbone. En effet, le caoutchouc naturel est un matériau peu coûteux et offrant de bonnes propriétés amortissantes.

Il est également très performant vis-à-vis de la tenue en endurance. Son principal défaut est sa mauvaise tenue à haute température, ce qui explique l'utilisation de caoutchoucs synthétiques dans les zones très chaudes comme celles qui sont proches de la ligne d'échappement.

I-2-Qu'est ce qu'un élastomère

Les élastomères sont un type particulier de matériaux polymères qui possèdent l'impressionnante faculté de pouvoir supporter de très grandes déformations. Ils se caractérisent aussi par la quasi-recouvrance de ses propriétés initiales quand la sollicitation cesse. Le plus souvent, ils n'acquièrent ses propriétés qu'après une opération dite de réticulation qui consiste à créer des liaisons chimiques fortes entre les chaînes macromoléculaires constituant le matériau. En général, l'additif permettant lors d'un traitement thermique la réticulation est le soufre mais peut être aussi le peroxyde.

I-3-Historique

Aux XVIème et XVIIème siècles, les européens découvrent l'usage du caoutchouc chez les Indiens d'Amérique Centrale et d'Amérique du Sud. Ces derniers l'utilisent notamment pour la confection de balles à jouer. En 1735, le français Charles Marie de la Condamine rapporte des échantillons de latex en France. Il crée également le mot français caoutchouc à partir de l'expression indienne « cao-tchu », qui signifie « bois qui pleure ». Cette nouvelle matière permet d'imperméabiliser des tissus, mais elle devient poisseuse au soleil et cassante à froid. En 1819, Thomas Hancock invente la mastication, qui permet de modeler des objets à partir de caoutchouc. En 1823, Charles Macintosh découvre que le caoutchouc naturel peut se dissoudre dans le benzol, et utilise ce procédé pour la fabrication de vêtements imperméables. Mais le véritable coup d'envoi de l'industrie du caoutchouc est la découverte de la vulcanisation par Charles Goodyear en 1839. Ce traitement au soufre permet d'améliorer les propriétés mécaniques et la résistance en température de ce matériau. L'essor

de la bicyclette et surtout de l'industrie automobile vont accélérer la production et l'utilisation du caoutchouc naturel.

I-4-Production du caoutchouc naturel

Aujourd'hui, sur les 21,7 millions de tonnes d'élastomères consommées dans le monde, 44% sont du caoutchouc naturel (source International Rubber Study Group, chiffres 2009). Ce produit est essentiellement utilisé dans la fabrication de pneus de poids lourds ou d'avions, de pièces support moteur, de gants, de ballons, d'adhésifs... Les principaux pays producteurs dans le monde sont la Thaïlande, l'Indonésie, la Malaisie et l'Inde.

Le caoutchouc est un produit naturel, qui s'écoule de l'écorce d'un arbre. Il se présente sous la forme d'un liquide d'apparence laiteuse, appelé latex. Il s'agit en fait d'une émulsion de particules de caoutchouc dans un sérum aqueux qui contient diverses substances minérales et organiques. Plusieurs espèces de plantes peuvent produire du latex mais la production commerciale de caoutchouc naturel est quasi-essentiellement assurée par l'hévéa (*hevea brasiliensis*). Il s'agit d'une espèce originaire de la forêt amazonienne, domestiquée à la fin du XIX^{ème} siècle et principalement cultivée en Asie du Sud-Est (Figure I-1).



Figure 1-1 : Hevea brasiliensis.

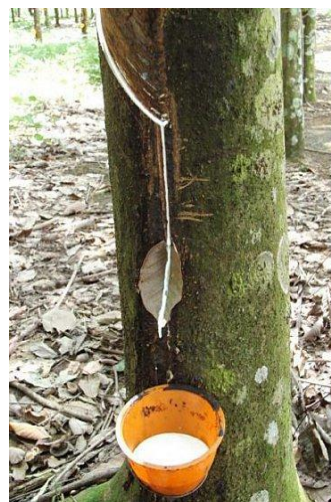


Figure 1-2 : Récolte du latex.

Le latex est récolté quotidiennement en faisant une entaille dans l'arbre et en le laissant s'écouler dans un récipient (Figure I-2). Le liquide finit par coaguler, il est donc nécessaire de raviver la blessure de l'arbre régulièrement. Le latex est filtré, centrifugé et coagulé par ajout d'acide formique ou acétique. Le caoutchouc obtenu est ensuite pressé et séché.

I-5-Propriétés essentielles et structure moléculaires des élastomères

I-5-1-Aspect moléculaire

Les élastomères sont des matériaux amorphes constitués d'un ensemble de chaînes macromoléculaires de différentes longueurs. A l'état cru, c'est-à-dire sans vulcanisation, les chaînes constituant l'élastomère sont indépendantes. Sous l'application d'une contrainte extérieure, elles glissent irréversiblement les unes sur les autres et se relâchent, créant ainsi du fluage et une déformation permanente. Cette plasticité exclut toute stabilité dimensionnelle ainsi que toute possibilité d'utilisation mécanique classique du matériau d'où le besoin de vulcaniser celui-ci afin de créer des liaisons de pontages chimiques entre les chaînes élastomériques et ainsi les lier les unes aux autres. L'élastomère devient alors réticulé, mais le nombre de pontage est assez limité. Cela laisse des possibilités de mouvement des chaînes beaucoup plus importantes que pour un polymère présentant un réseau thermodurcissable [Halary et al, 2008]. La structure est alors celle d'un réseau tridimensionnel unique, toujours extrêmement déformable sous une sollicitation extérieure, mais stable.

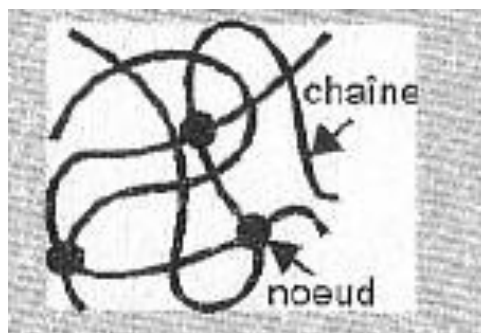


Figure 1-3 : Linéaires avec réticulation très légère

I-5-2-Température de transition vitreuse

Quand la température augmente un polymère passe à travers trois domaines :

- la température de transition vitreuse T_g caractérise le passage du matériau de l'état vitreux à l'état caoutchoutique.
- la température de fusion T_f caractérise la fusion des cristaux (pour un polymère cristallin ou semi-cristallin).
- la température de dégradation T_d où les liaisons covalentes des macromolécules commencent à se rompre sous l'action de la chaleur.

Lorsqu'un élastomère est en-dessous de la température de transition vitreuse, la mobilité des molécules est d'autant plus faible que la température baisse. Ce qui confère au matériau une forte rigidité et une faible capacité de déformation. L'élasticité est alors d'origine enthalpique avec de faibles déplacements. Par contre, au dessus de la température de transition vitreuse, le matériau est à l'état caoutchoutique où la mobilité des molécules croît avec l'augmentation de la température. Cette mobilité permet un déploiement des chaînes dans le sens de la contrainte entraînant une déformation réversible (élasticité entropique). Les élastomères ne fondent pas mais ils se décomposent à haute température.

Les élastomères sont des polymères ayant une température de transition vitreuse inférieure à la température ambiante, par celle du caoutchouc $T_g \approx -70\text{ °C}$.

I-6-Formation des élastomères

I-6-1- Formation

A l'état brut, un caoutchouc n'a pas une bonne rigidité mécanique lui permettant d'être utilisé directement dans le domaine industriel. Il doit être vulcanisé voire renforcé par des additifs qui ayant chacun un rôle bien défini, c'est ce qu'on appelle la « formulation ». Cette dernière relève beaucoup plus de savoir faire, pour maîtriser au mieux l'ajustement de certaines propriétés qu'exigent certaines applications.

Une bonne formulation doit contenir :

- Le ou les élastomères : leurs propriétés spécifiques, et en particulier leurs propriétés chimiques, devront correspondre aux nécessités de l'application. Un mélange d'élastomères pourra être utilisé si nécessaire.
- La ou les charges : utilisées surtout pour donner des propriétés aux caoutchoucs, elles peuvent aussi améliorer la mise en œuvre et diminuer le prix de revient du mélange. Les charges les plus utilisées sont les noires de carbone, les silices de précipitation, les craies et kaolins.
- Les plastifiants : ils sont utilisés pour faciliter la mise en œuvre ou abaisser la température de transitions vitreuse θ_g . Ce sont des huiles de pétrole ou des esters.
- Les agents de protection : ils sont destinés à protéger l'élastomère, dont les chaînes macromoléculaires sont plus ou moins sensibles, contre l'oxygène et l'ozone principalement. Ces produits sont généralement des dérivés aminés ou phénoliques.
- Un système de vulcanisation : il permet la formation d'un réseau tridimensionnel stable sans lequel l'utilisation d'un élastomère serait impossible.

- Les ingrédients divers : on utilise de nombreux produits au rôle très spécifique tels que des agents gonflants pour la fabrication du caoutchouc cellulaire ; des ignifugeants permettant d'obtenir les normes de tenue au feu exigées dans le bâtiment et les transports ; des colorants ; des agents de mise en œuvre, etc.

L'ensemble de tous ces composants forme un mélange.

I-6-2-Notion de renforcement

La notion de renforcement par les charges est très spécifique des élastomères. En effet, comme il a été dit précédemment, ceux-ci ont des propriétés de rupture à la température ambiante quasi nulles. L'ajout de quantités de noire de carbone augmente la résistance à la rupture, bien que la quantité d'élastomère déformable dans l'échantillon diminue.

On conçoit ainsi l'importance des charges qui permettent d'obtenir des courbes traction-allongement variables et adaptables aux propriétés requises par les spécifications.

I-6-3- La vulcanisation

C'est le procédé le plus ancien et le plus utilisé car il est souple et permet l'obtention d'une large plage de propriétés pour un mélange donné. Un système de vulcanisation par le soufre comprend un agent de réticulation (le soufre ou des produits libérant du soufre), des activateurs (oxyde de zinc et acide stéarique) et des accélérateurs (thiazoles, sulfénamides, thuirames...) permettant essentiellement de raccourcir les temps de vulcanisation pour s'adapter aux impératifs industriels.

I-7- Différentes familles d'élastomères

On compte une quinzaine de familles d'élastomères et dans certaines de ces familles dix à vingt grades différents. Les méthodes actuelles de polymérisation permettent la fabrication de produits sur mesure répondant à la fois aux problèmes de mise en œuvre et aux propriétés recherchées.

La classification courante consiste à séparer les caoutchoucs en trois catégories :

- Les caoutchoucs à usage généraux : ils sont représentés par les caoutchoucs naturels (NR) et le polyisoprène de synthèse (IR), les copolymères de butadiènes (SBR) et les polybutadiènes (BR).
- Les caoutchoucs spéciaux : ils sont les Co-ou terpolymères d'éthylène propylène et diène (EPM et EPDM), les copolymères de butadiène acrylonitrile (NBR), les polychloroprènes (CR).

- Les caoutchoucs très spéciaux : ils rassemblent les caoutchoucs de silicone (VMQ), les élastomères fluorés (FPM), les polyacrylates (ACM)...ext.

On peut ajouter à cette classification les élastomères thermoplastiques qui forment une catégorie à part, ces élastomères n'ont pas besoin d'être vulcanisés et se mettent en œuvre comme les thermoplastiques.

I-8- Mise en œuvre des élastomères

Avant d'être transformés en objets finis, les élastomères doivent être formulés. La formulation impose la fabrication d'un mélange. Le malaxage (mélange) consiste à incorporer et à disperser dans un élastomère, les différents ingrédients de la formulation préalablement établie pour une application donnée. En fin de malaxage, le mélange est mis en feuilles ou en bandes de six millimètre d'épaisseur, refroidi et stocké avant la mise en forme.

I-9-Mise en forme des mélanges

Ce procédé consiste à donner au mélange la forme de la pièce à réaliser et à vulcaniser, soit simultanément, lors d'une seconde opération. Il y a plusieurs procédés pour la mise en forme parmi les quels, on peut citer :

- Le moulage : à l'aide de presse (injection, compression ou transfert). Pour ce cas la vulcanisation se fait en même temps que la mise en forme dans le moule.
- L'extrusion : il est utilisé pour la réalisation de profilés. Dans ce procédé, la mise en forme se fait dans une extrudeuse. La vulcanisation a lieu dans un second temps et peut se faire par différentes techniques.
- Le calandrage : pour la réalisation de feuilles fines ou tissus enduits (textiles caoutchouc) largement utilisés pour les pneumatiques (carcasses, ceintures,...etc). La mise en forme s'effectue à l'aide de calandres (machine à deux, trois ou quatre cylindre). La vulcanisation des feuilles obtenues se fera en discontinue dans un autoclave ou en continue à l'aide d'une rotocure.

Les pièces obtenues par ces procédés passent par des ateliers de finition et de contrôle plus au moins rigoureux. En particulier, le contrôle à l'unité est pratiqué pour des pièces de grandes précisions (pour l'aéronautique par exemple).

I-10- Comportement des élastomères

I-10-1- L'Elasticité caoutchoutique

A titre illustratif, nous présentons sur la Fig. 1.3, la réponse à un chargement en traction uniaxiale d'un élastomère à base de silicone. Cette courbe montre d'une part, la non-linéarité de comportement et d'autre part la grande capacité à se déformer, l'élongation maximale pouvant parfois atteindre les 700%

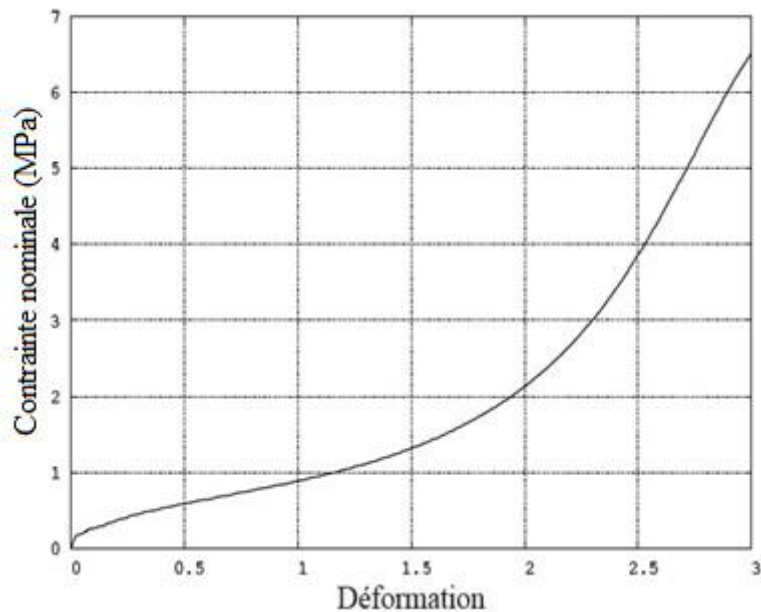


Figure 1.4 : Caractère hyperélastique d'un élastomère en traction uniaxiale

A l'échelle de la structure microscopique, un élastomère vulcanisé est constitué de longues chaînes moléculaires comportant des points de jonctions. Ces macromolécules forment ainsi un réseau tridimensionnel dont les segments de chaînes sont orientés de façon aléatoire. Outre ces points de jonctions de type liaisons covalentes, il existe des liaisons à très faible énergie appelées liaisons secondaires ou enchevêtrements. L'élasticité caoutchoutique est le résultat de cette faible interaction entre les macromolécules. Ainsi, sous l'action d'une sollicitation mécanique, ces chaînes moléculaires peuvent glisser les unes sur les autres et changer ainsi la configuration microstructurale du réseau moléculaire qui passe d'un arrangement aléatoire à un arrangement orienté suivant la direction de sollicitation. L'élasticité caoutchoutique est donc de nature entropique.

Cette élasticité caoutchoutique résulte plus des variations d'entropie configurationnelle dans le réseau macromoléculaire que des variations de son énergie interne. En l'absence de forces extérieures, le réseau de chaînes moléculaires adopte une configuration correspondant à l'entropie maximale. Sous sollicitation mécanique ces chaînes se déplient et s'arrangent suivant une direction privilégiée, la direction de chargement réduisant ainsi l'entropie du réseau et produisant un état de déformation macroscopique. En effet, en partant

d'observations expérimentales, MEYER et FERRI, (1935), puis ANTHONY et al, (1942), ont montré, dans le cas d'une traction uniaxiale, que l'effort de traction était proportionnel à la température pour une même élongation et donc que l'énergie interne changeait peu avec la déformation.

Ce résultat a été récemment discutée par CHADWICH et CREASY, (1984) montrant qu'à un état de déformation donné, la partie déviatorique du tenseur de contraintes n'est pas intégralement d'origine entropique, et découle en partie de la variation d'énergie interne

I-10-2- Influence de la température

Le comportement des élastomères dépend fortement de la température (voir figure I.4). À faible température, le comportement de ces matériaux dépend fortement de la vitesse de sollicitation (COLEMAN, B.D., NOLL, W, 1961). Pour des températures plus importantes, le module de rigidité dynamique chute, de même que la dissipation.

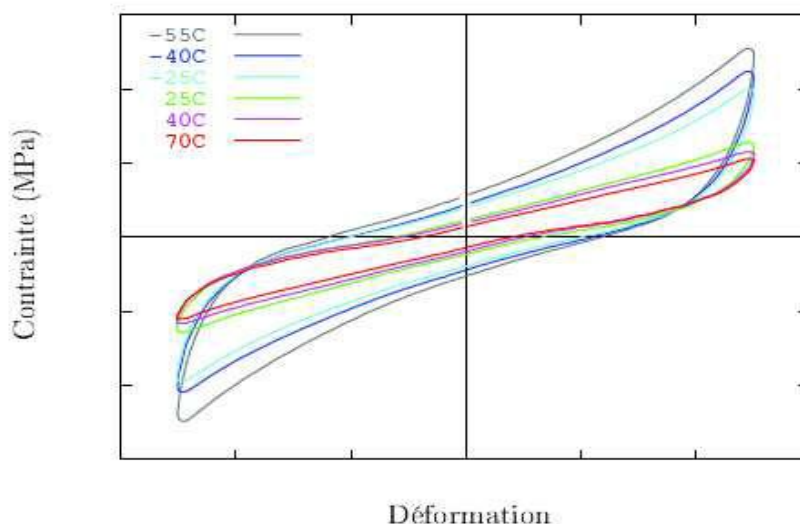


Figure I-5 : Influence de la température Curchos et al. (1990)

I-11- Conclusion

Les élastomères présentent un comportement complexe qu'il serait ambitieux de vouloir représenter dans sa totalité. Certaines caractéristiques sont d'ailleurs encore mal comprises. En particulier, les phénomènes physiques responsables de la boucle d'hystérésis en régime stabilisé ne sont pas encore tous identifiés ; il pourrait s'agir de viscosité (frottement des chaînes l'une sur l'autre), d'une réorganisation du réseau macromoléculaire (rupture et rétablissement de liaisons faibles) ou bien encore d'un phénomène de cristallisation/décristallisation.

Par ailleurs, certains phénomènes comme la viscosité ou l'existence de déformations rémanentes sont peu marqués dans le domaine d'utilisation concerné. On ne retiendra donc pour la suite que les phénomènes du premier ordre pour notre étude, c'est-à-dire l'élasticité non-linéaire du comportement et l'incompressibilité.

Chapitre II
Comportement
hyperélastique des
élastomères

II-1-Introduction

Les courbes de traction simple obtenues sur un échantillon d'un solide cristallin (acier, par exemple) et un élastomère sont complètement différentes. Elle est non-linéaire pour les élastomères. Tandis qu'elle est linéaire pour l'acier. Il en résulte que la mesure des déformations homogènes sur la surface de ces pièces est un challenge. En effet, dans la littérature, les déformations en traction simple, cisaillement pur et traction équibiaxiale sont souvent supposées homogènes pour valider les modèles de comportement hyperélastiques.

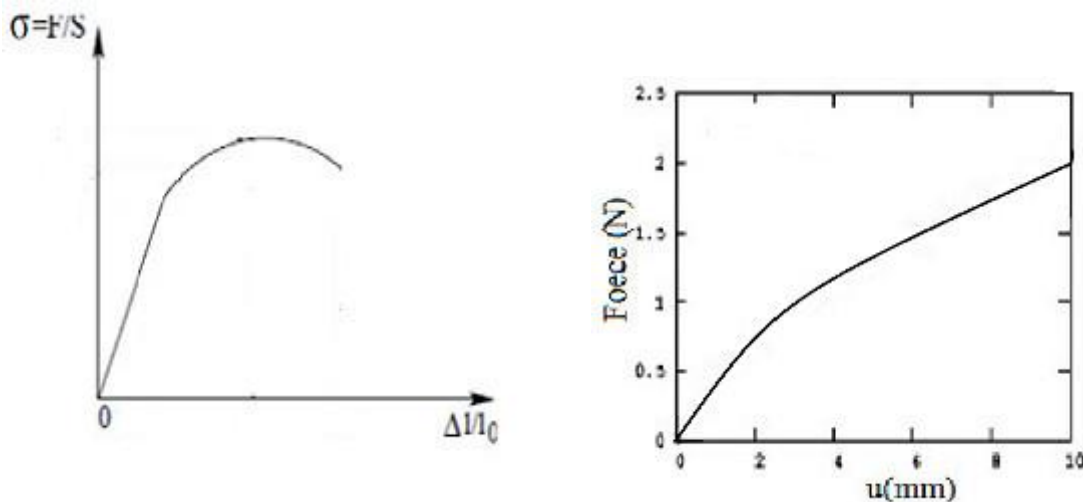


Figure II-1 Essai de traction simple d'un solide **Figure II-2** : Essai de traction simple d'un élastomère

Pour pouvoir localiser les zones utiles où les déformations sont homogènes sur des éprouvettes en élastomères, il est nécessaire de concevoir des formes spécifiques pour réaliser des essais de traction simple, cisaillement et traction équibiaxiale. Par ailleurs, les déformations mises en jeu sont grandes donc le formalisme des grandes transformations s'impose.

II-2-Équations de base de la Mécanique des Milieux Continus

II-2-1-Notions fondamentales des grandes déformations (Salençon, 1988)

On suppose qu'on a un solide (S) déformable, l'ensemble des particules composant ce solide occupent, à chaque instant, un ensemble de position dans l'espace. La configuration de référence est notée par (C_0) , où le solide occupe le volume Ω_0 . La configuration actuelle est notée par (C_t) (ou les particules du solide occupent le volume Ω_t).

Le mouvement du milieu continu est alors défini la donné de la fonction vectorielle \bar{X}

$$\text{suivante : } \mathbf{X} \left\{ \begin{array}{l} (C_0) \rightarrow (C_t) \\ \bar{X} \rightarrow \bar{x} = \bar{\phi}(\bar{X}; t) \end{array} \right. \quad (\text{II.1})$$

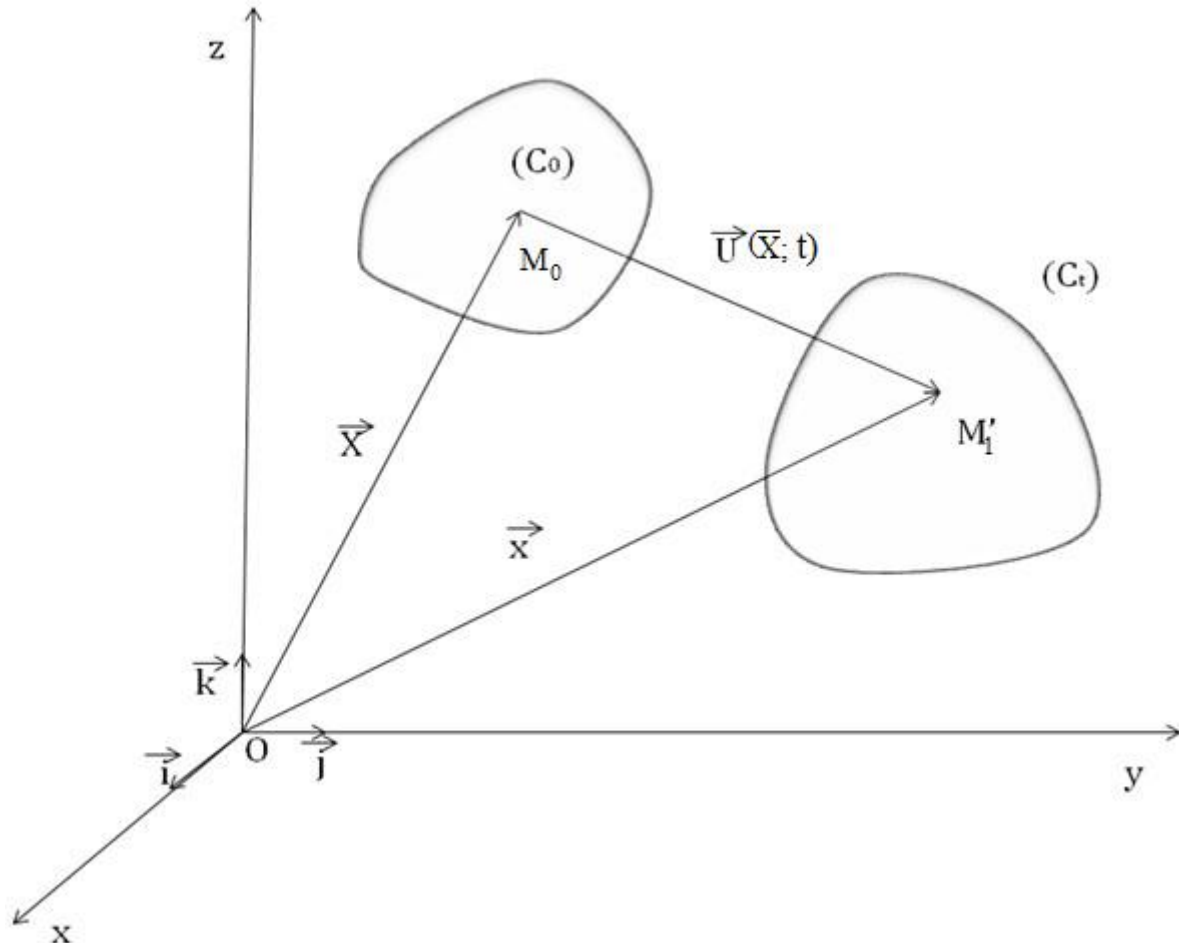


Figure II-3 : Repérage d'un point dans un solide.

Pour caractériser la déformation au voisinage de la particule, on introduit l'opérateur gradient, de la transformation qui est une application entre le vecteur de déplacement $d\bar{X}$ à l'état initial (C_0) et son transformé $d\bar{x}$ dans l'état actuel, soit :

$$d\bar{x} = \bar{F} d\bar{X} ; \quad (\text{II.2})$$

Où \bar{F} est l'opérateur gradient, ses composantes sont données par :

$$\bar{F} = \frac{\partial \bar{x}}{\partial \bar{X}} \quad \text{ou } F_{ij} \text{ sont les composantes dans une base cartésiennes.} \quad (\text{II.3})$$

On définit le tenseur de Green-Lagrange $\bar{\bar{E}}$ et d'Euler-Almansi $\bar{\bar{A}}$ pour d'écrire respectivement les déformations dans les configurations (C_0) et (C_t) .

$$\bar{\bar{E}} = \frac{1}{2} (\bar{\bar{C}} - \bar{\bar{I}}), \quad (\text{II.4})$$

$$\bar{\bar{A}} = \frac{1}{2} (\bar{\bar{I}} - \bar{\bar{B}}^{-1}) = \bar{\bar{F}}^{-T} \bar{\bar{E}} \bar{\bar{F}}^{-1},$$

Où

$$\bar{\bar{C}} = \bar{\bar{F}}^T \bar{\bar{F}} : \text{le tenseur des déformations Green-Cauchy droit ;} \quad (\text{II.5})$$

$$\bar{\bar{B}} = \bar{\bar{F}} \bar{\bar{F}}^T : \text{le tenseur de déformation des Green-Cauchy gauche ;} \quad (\text{II.6})$$

$\bar{\bar{F}}^T$: transposé de $\bar{\bar{F}}$;

$\bar{\bar{I}}$: le tenseur identité.

Les contraintes sont caractérisées à partir des efforts intérieurs à travers un élément de surface relatif à une configuration donnée. Le théorème de Cauchy stipule que le vecteur contraint est donné par la relation suivante :

$$\vec{T}(\mathbf{M}, t) = \frac{d\vec{f}}{dS} = \bar{\bar{\sigma}}(\mathbf{M}, \vec{n}; t) \vec{n}, \quad (\text{II.7})$$

Où : dS est l'aire de l'élément de surface caractérisé par la normale extérieure \vec{n} dans la configuration actuelle (C_t) , $d\vec{f}$ est la force s'exerçant en un point de cette surface et, $\bar{\bar{\sigma}}(\mathbf{M}, \vec{n})$ est le tenseur des contraintes de Cauchy (symétrique).

On peut également introduire le 1^{er} tenseur de Piola-Kirchhoff $\bar{\bar{\pi}}$ (P.K.1), qui n'est ni Eulerien ni Lagrangien (tenseur hybride). Il sert à ramener l'effort instantané à la surface initiale, il est donné par :

$$d\vec{f} = \bar{\bar{\pi}} \vec{n}_0 \cdot d\vec{S}_0, \quad (\text{II.8})$$

Ce tenseur est important dans la formulation des modèles de comportement.

Le 2nd tenseur de Piola-Kirchhoff $\bar{\bar{S}}$ (P.K.2) est défini par :

$$d\vec{f}_0 = \bar{\bar{F}}^{-1} d\vec{f} = \bar{\bar{S}} \cdot \vec{n} \cdot d\vec{S}_0, \quad (\text{II.9})$$

est lagrangien et utile dans le cadre de la méthode des éléments finis.

Les trois tenseurs des contraintes sont reliés par la relation suivante :

$$\mathbf{J} \cdot \bar{\bar{\sigma}} = \bar{\bar{\pi}} \bar{\bar{F}}^{-1} = \bar{\bar{F}} \bar{\bar{S}} \bar{\bar{F}}^T, \quad (\text{II.10})$$

$$\text{ou } \mathbf{J} = \det(\bar{\bar{F}}). \quad (\text{II.11})$$

$\bar{\bar{\pi}}$: le tenseur de Piola-Kirchhoff (P.K.1).

$\bar{\bar{S}}$: le deuxième tenseur de Piola-Kirchhoff (P.K.2).

II-2-2-Equation locale du mouvement

Les équations d'équilibres sont obtenues à partir du bilan de quantité de mouvement. En tout point du solide, l'équation d'équilibre s'exprime par :

$$\text{div} \bar{\bar{\sigma}} + \rho(\vec{f} - \vec{\gamma}) = \vec{0}. \quad (\text{II.12})$$

En projetant dans un repère de base cartésienne, on aura :

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho(f_i - \gamma_i) = 0, \quad (\text{II.13})$$

Où sont : f_i les forces de volumes, γ_i l'accélération

et ρ la masse volumique.

II-2-3-Notion essentielles de la thermodynamique des milieux continus (J.Lemaitre, 1984)

L'inégalité de Clausius-Duhem est obtenue en utilisant le 1^{er} principe (conservation de l'énergie) puis le 2nd principe de la thermodynamique eulérienne, on obtient l'inégalité suivante:

$$\Phi = \underline{\underline{S}} : \underline{\underline{\dot{E}}} - \rho_0(\dot{\psi} - T\dot{s}) \geq 0, \quad (\text{II.14})$$

dans la configuration (C_t) , on peut déduire

$$\begin{cases} \underline{\underline{S}} = \rho_0 \frac{\partial \psi}{\partial \underline{\underline{E}}} ; \\ s = -\frac{\partial \psi}{\partial T} , \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

où s est l'entropie massique.

L'équation précédente constitue un outil incontournable pour construire des modèles de comportement via la théorie de l'état local. Il s'agit d'une approche thermodynamique phénoménologique qui consiste à écrire l'énergie libre en fonction de variables internes pour représenter les phénomènes observés.

II-2-4- Modélisation du comportement élastique non linéaire des élastomères (R.W.Ogden, 1992)

Un matériau est dit élastique, ou élastique de Green, si la loi de comportement est régie par l'existence d'un potentiel élastique W ; le tenseur des contraintes dérive de ce potentiel. Ceci implique que le travail mise en jeu pour aller d'un état à un autre ne dépend pas du chemin suivi. Pour écrire une loi de comportement hyperélastique, on postule ainsi l'existence d'une énergie libre de Helmholtz ψ définie par unité de masse dans la configuration de référence.

Pour respecter le principe d'objectivité, on montre que l'énergie peut toujours être considérée comme une fonction du tenseur des déformations de Green-Lagrange $\bar{\bar{E}}$, si de plus le matériau est isotrope, on peut écrire $\rho_0 \psi = W(I_1, I_2, I_3)$ en fonction des invariants du tenseur des déformations $\bar{\bar{C}}$ (ou $\bar{\bar{B}}$).

Où ρ_0 est la masse volumique dans la configuration de référence.

Les invariants de $\bar{\bar{C}}$ (ou $\bar{\bar{B}}$) sont définis par :

$$\begin{cases} I_1 = \text{trace}(\bar{\bar{C}}) = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 , \\ I_2 = \frac{1}{2} [I_1^2 - \text{trace}(\bar{\bar{C}}^2)] = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 , \\ I_3 = \det(\bar{\bar{C}}) = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 , \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

où : λ_1, λ_2 et λ_3 : sont les valeurs propres du tenseur de déformation $\bar{\bar{C}}$ (ou $\bar{\bar{B}}$). Pour pouvoir satisfaire l'hypothèse de quasi-incompressibilité, On considère le module de compression

hydrostatique $K_0 \approx 1000 \mu_0$ ou μ_0 est le module de cisaillement. Nous précisons que la compressibilité $D = \frac{1}{K_0}$ et aussi le coefficient de Poisson $\nu_0 \approx 0.4999$.

Mathématiquement, l'hypothèse de quasi-incompressibilité se traduit par la relation suivante :

$$J = \sqrt{I_3} = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1. \quad (\text{II.17})$$

II-2-5- Lois de comportement hyper - élastique (R.W. Ogden, 1972)

On suppose l'existence du potentiel élastique W , qui est défini comme l'énergie volumique de déformation rapportée au volume initial. Les contraintes sont reliées aux déformations par la relation suivante :

$$\bar{\bar{S}} = \frac{\partial W}{\partial \bar{\bar{E}}} = 2 \frac{\partial W}{\partial \bar{\bar{C}}}. \quad (\text{II.18})$$

Pour un matériau isotrope, l'énergie volumique de déformation W dépend que les trois invariants : $I_1(\bar{\bar{C}})$, $I_2(\bar{\bar{C}})$ et $I_3(\bar{\bar{C}})$ du tenseur de Green Cauchy droite $\bar{\bar{C}}$, soit:

$$W = W(I_1, I_2, I_3). \quad (\text{II.19})$$

Le potentiel élastique W d'un matériau incompressible ne dépend que des deux premiers invariants I_1 et I_2 . A partir de la relation (II.18) et compte tenu des relation (II.19), on peut écrire :

$$S_{ij} = 2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial C_{ij}} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial C_{ij}} + \frac{\partial W}{\partial I_3} \frac{\partial I_3}{\partial C_{ij}} \right),$$

$$\text{Et } S_{ij} = 2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \delta_{ij} + \frac{\partial W}{\partial I_2} (I_1 - C_{ji}) + \frac{\partial W}{\partial I_3} I_3 C_{ij}^{-1} \right). \quad (\text{II.20})$$

La condition d'incompressibilité permet de simplifier l'équation (II.20) :

$$S_{ij} = 2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \delta_{ij} + \frac{\partial W}{\partial I_2} (I_1 - C_{ij}) \right). \quad (\text{II.21})$$

En combinant les équation (II.21) et (II.10), on peut exprimer la loi de comportement en terme du tenseur des contraintes de Cauchy:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2 \frac{\partial W}{\partial I_1} B_{ij} - 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} B_{ij}^{-1}, \quad (\text{II.22})$$

p : représente une pression hydrostatique (ou le multiplicateur de Lagrange), qui est un paramètre qu'on élimine à l'aide des conditions aux limites.

II-3- Modèle hyperélastique

Il existe bon nombre de modèles hyperélastique dans la littérature, nous allons présenter les modèles fréquemment implémentés dans les codes de calculs par éléments finis.

II-3-1- Modèle de Moony-Rivlin (1948)

$$w = \sum_{i=0}^{L} \sum_{j=0}^{M} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (\text{II.23})$$

Les paramètres C_{ij} sont les constantes du matériau qui peuvent être obtenus à partir d'une base de données expérimentale.

A l'état naturel (libère de contraintes), le potentiel élastique est nul, par conséquent $C_{00}=0$.

II-3-2-Modèle Néo-Hookien

Le développement de la série de l'éq (II.22) à l'ordre un et en négligeant les termes d'ordre supérieurs, on obtient :

$$w = C_{10}(I_1 - 3) ;$$

$$w = \frac{\mu_0}{2} (I_1 - 3) . \quad (\text{II.24})$$

II-3-3-Modèle Mooney-Rivlin (1940)

Si on tient compte dans le développement du second invariant I_2 , on obtient:

$$w = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3). \quad (\text{II.25})_1$$

On peut transformer l'éq (II.25)₁ de la manière suivante :

$$w = \frac{\mu_0}{2} [\alpha(I_1 - 3) + (1 - \alpha)(I_2 - 3)], \quad (\text{II.25})_2$$

Où α est le nombre réel telque $0 < \alpha \leq 1$,

Si $\alpha = 1$, on retrouve le modèle Néo-Hookien.

II-3-4- Modèle de Yeoh (1990)

A partir des considérations expérimentales, Yeoh (1990) a proposé un modèle hyperélastique pour les caoutchoucs chargés au noir de carbone.

$$w = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_2 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3. \quad (\text{II.26})$$

II-3-5-Modèle de Gent (1996)

$$w = -\frac{\mu_0}{2} J_m \ln \left(1 - \frac{I_1 - 3}{J_m} \right). \quad (\text{II.27})$$

Où J_m est un paramètre du matériau et sans dimension qui est lié à l'extension maximale des chaînes macromoléculaires. Ce modèle phénoménologique s'apparente au modèle à 8-chaînes d'Arruda-Boyce (1993). En plus quand J_m est grand, c'est-à-dire,

$$\lim_{J_m \rightarrow \infty} w = \frac{\mu_0}{2} (I_1 - 3). \quad (\text{II.28})$$

On retrouve ainsi le modèle Néo-Hookien.

II-3-6-Modèle d'Ogden (1972)

Le modèle d'Ogden s'applique dans le domaine des déformations supérieures à 150%. Le potentiel élastique s'écrit sous forme d'une série :

$$w = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n}), \quad (\text{II.29})$$

Où α_n sont des nombre qui peuvent être positifs ou négatifs et μ_n sont des constantes du matériau. Si $\alpha_1 = 2$ alors on retrouve le modèle de Néo-Hookien et pour $\alpha_1 = 2$ et $\alpha_1 = -2$ on retrouve le modèle de Mooney-Rivlin.

II-4-Essais standards et Identification paramétriques**II-4-1-Essai standards**

Afin de dimensionner des pièces en élastomères de structures mécaniques, par exemple par la méthode des éléments finis, il est nécessaire d'identifier les paramètres de modèles

hyperélastique. En d'autres termes, le choix des essais mécaniques pertinent est un préalable avant d'aborder la simulation numérique par la méthode des éléments finis. Dans ce cadre, on présentera les essais classiques souvent utilisés pour pouvoir obtenir les paramètres de modèles hyperélastiques.

II-4-1-1-Essai de traction simple

On suppose qu'on peut mesurer des déformations homogènes dans la partie utile de l'éprouvette, la localisation de cette zone nécessite une étude numérique ou expérimentale. D'un point de vue expérimental, l'essai de traction simple consiste à imposer un déplacement et mesurer la force qui en résulte. On montre sur la figure (II-4) le principe de l'essai sur une éprouvette parallélépipédique ou cylindrique. On isole par la pensée un carré sur la surface de l'éprouvette dans la zone centrale. Le carré devient alors un rectangle dans la configuration déformée. La localisation de cette zone utile nécessite au préalable une étude numérique ou/et expérimentale afin de s'assurer que les déformations mesurées sont homogènes.

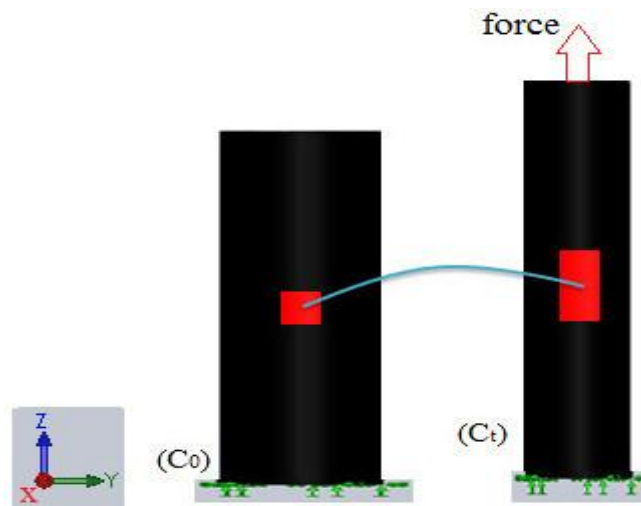


Figure-II-4 : Essai de traction simple.

Ainsi, la transformation s'écrit de la manière suivante :

$$x = \beta X, y = \beta Y \quad \text{et} \quad z = \lambda Z, \quad (\text{II.30})$$

Où β et λ sont des elongations principales. Il vient alors le gradient de la transformation,

$$(F_{ij}^{\text{TS}}) = \begin{pmatrix} \beta & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix}. \quad (\text{II.31})$$

Le milieu est supposé incompressible, par conséquent :

$$J = \det(\mathbf{F}_{ij}^{\text{TS}}) = \beta^2 \lambda = 1, \quad (\text{II.32})$$

d'où

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}. \quad (\text{II.33})$$

En portant l'équ (II.31) dans (II.29), on obtient :

$$(\mathbf{F}_{ij}^{\text{TS}}) = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{\lambda}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{\lambda}} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix}. \quad (\text{II.34})$$

La matrice associée au tenseur des dilatations de Green-Cauchy droit est :

$$(\mathbf{B}_{ij}^{\text{TS}} = \mathbf{F}_{ik} \mathbf{F}_{jk}) = \begin{pmatrix} \frac{1}{\lambda} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\lambda} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda^2 \end{pmatrix}. \quad (\text{II.35})$$

Les conditions aux limites de l'essai sont :

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = 0 \text{ et } \sigma_{33} = \sigma^{\text{TS}}. \quad (\text{II.36})$$

Introduisons l'éq (II.33) dans (II.21), on obtient :

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = 2 \frac{\partial w}{\partial I_1} \frac{1}{\lambda} - 2 \frac{\partial w}{\partial I_2} \lambda - P \quad (\text{II.37})$$

$$\sigma_{33} = \sigma^{\text{TS}} = 2 \frac{\partial w}{\partial I_1} \lambda^2 - 2 \frac{\partial w}{\partial I_2} \frac{1}{\lambda} - P = 0 \quad (\text{II.38})$$

Par élimination de la pression, P, on obtient les composantes de σ^{TS} :

$$\sigma^{\text{TS}} = 2 \frac{\partial w}{\partial I_1} \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right) + 2 \frac{\partial w}{\partial I_2} \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right)$$

$$\sigma^{\text{TS}} = \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right) \left[2 \frac{\partial w}{\partial I_1} + \frac{1}{\lambda} 2 \frac{\partial w}{\partial I_2} \right] \quad (\text{II.39})$$

II-4-1-2-Essai de cisaillement pur

Cet essai s'apparente à l'essai de traction simple. En fait, on bloque l'éprouvette dans une direction perpendiculaire, par exemple, la direction oy (figure II-5).

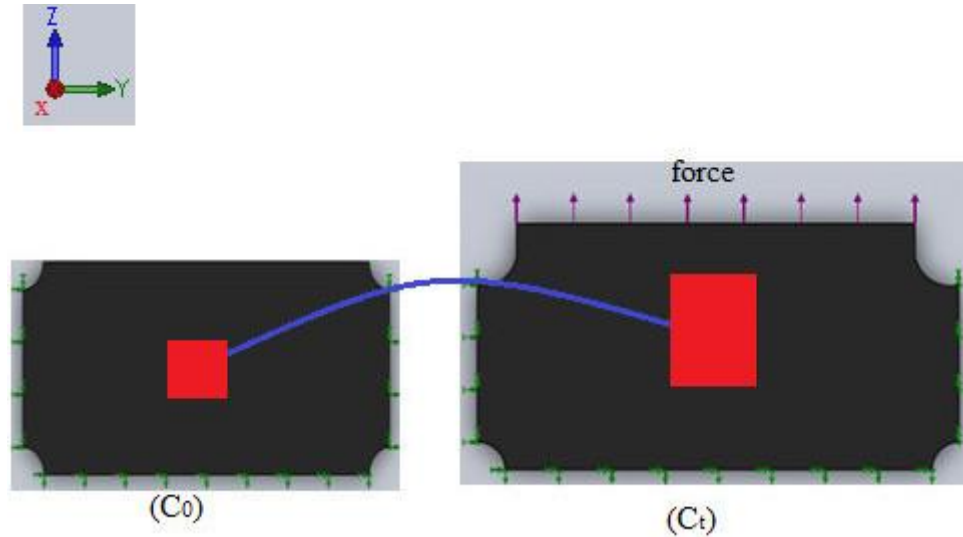


Figure II-5 : Essai de cisaillement pur (CP).

La transformation relative à l'essai est :

$$x = \alpha X, y = Y \text{ et } z = \lambda Z, \quad (\text{II.40})$$

Où α et λ sont les élongations principale dans la direction oz .

Le Gradient de la transformation est :

$$(\mathbf{F}_{ij}^{\text{CP}}) = \begin{pmatrix} \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix}. \quad (\text{II.41})$$

Le milieu étant incompressible, c'est-à-dire :

$$J = \det(\mathbf{F}_{ij}^{\text{CP}}) = \alpha \lambda = 1.$$

$$\text{d'où : } \alpha = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{II.42})$$

Reportons l'équation (II.42) dans (II.41), on obtient

$$(\mathbf{F}_{ij}^{\text{CP}}) = \begin{pmatrix} \frac{1}{\lambda} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix}. \quad (\text{II.43})$$

Les conditions aux limites de l'essai sont

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = 0 \text{ et } \sigma_{33} = \sigma^{\text{cp}} . \quad (\text{II.44})$$

La matrice associée au tenseur de Green-Cauchy droit

$$\text{est : } \left(B_{ij}^{\text{cp}} \right) = \begin{pmatrix} \frac{1}{\lambda^2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda^2 \end{pmatrix} . \quad (\text{II.45})$$

En reportant l'équation (II.45) dans (II.22), on obtient :

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = 2 \frac{\partial W}{\partial I_1} \frac{1}{\lambda^2} - 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \lambda^2 - p = 0 .$$

$$\sigma_{33} = \sigma^{\text{cp}} = 2 \frac{\partial W}{\partial I_1} \lambda^2 - 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \frac{1}{\lambda^2} - p .$$

On peut déduire :

$$\sigma^{\text{cp}} = 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^2} \right) + 2 \frac{\partial W}{\partial I_1} \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^2} \right)$$

$$\sigma^{\text{cp}} = 2 \left[\frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \right] \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^2} \right) . \quad (\text{II.46})$$

II-4-1-3-Traction équi-biaxiale

L'essai consiste à imposer deux déplacements égaux dans deux directions perpendiculaires et mesurer l'effort on monte sur la figure (II-6) le principe de l'essai, l'éprouvette de forme cruciforme permet d'obtenir des déformations homogènes dans la zone centrale.

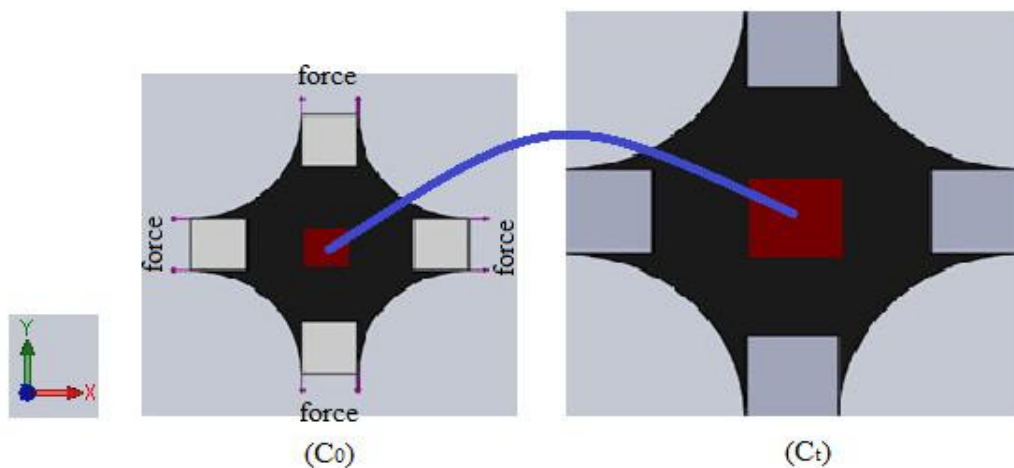


Figure II-6 : Essai de traction équi-biaxiale.

La transformation de l'essai de traction équi-biaxiale :

$$x = \lambda X , y = \lambda Y , \text{ et } z = \xi Z , \quad (\text{II.47})$$

où λ et ξ sont des élongations principales.

Le gradient de la transformation est

$$(F_{ij}^{EB}) = \begin{pmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \xi \end{pmatrix}. \quad (\text{II.48})$$

Le milieu est supposé incompressible, c'est-à-dire :

$$J = \det (F_{ij}^{EB}) = \lambda^2 \xi = 1$$

$$\text{d'où} \quad \xi = \frac{1}{\lambda^2}. \quad (\text{II.49})$$

On reporte l'équation (II.41) dans (II.40), on obtient :

$$(F_{ij}^{EB}) = \begin{pmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\lambda^2} \end{pmatrix}. \quad (\text{II.50})$$

Les conditions aux limites de l'essai sont :

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma^{EB} \quad \text{et} \quad \sigma_{33} = 0.$$

La matrice associée au tenseur des dilatations de Green -Cauchy droit est :

$$(B_{ij}^{EB}) = \begin{pmatrix} \lambda^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\lambda^4} \end{pmatrix}. \quad (\text{II.51})$$

En introduisant (II.43) dans (II.26), on obtient :

$$\begin{cases} \sigma^{EB} = \sigma_{11} = \sigma_{22} = 2 \frac{\partial W}{\partial I_1} \lambda^2 - 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \frac{1}{\lambda^2} - p \\ \sigma_{33} = 2 \frac{\partial W}{\partial I_1} \frac{1}{\lambda^4} - 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \lambda^4 - p = 0 \end{cases}$$

$$\sigma^{EB} = 2 \frac{\partial W}{\partial I_1} \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^4} \right) + 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \left(\lambda^4 - \frac{1}{\lambda^2} \right)$$

$$\sigma^{EB} = 2 \frac{\partial W}{\partial I_1} \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^4} \right) + 2 \frac{\partial W}{\partial I_1} \lambda^2 \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^4} \right)$$

$$\sigma^{EB} = \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^4} \right) \left[2 \frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda^2 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right]. \quad (\text{II.52})$$

II-5-Identification paramétriques

La base de données expérimentale s'articule autour des résultats déduits à partir de l'essai de traction simple (TS), le cisaillement pur (CP) et la traction équi-biaxiale (EB).

L'enjeu consiste alors à déterminer les dérivées partielles $\frac{\partial W}{\partial I_1}$ et $\frac{\partial W}{\partial I_2}$ du potentiel élastique en utilisant la base de données expérimentale.

Rivlin et Saunders (1951) ont montré que

$$\frac{\partial w}{\partial I_1} = \frac{\frac{\lambda_1^2 \sigma_1}{\lambda_1^2 - \frac{1}{\lambda_1^2 \lambda_2^2}} - \frac{\lambda_2^2 \sigma_2}{\lambda_2^2 - \frac{1}{\lambda_1^2 \lambda_2^2}}}{2(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)} \tag{II.53}$$

$$\frac{\partial w}{\partial I_2} = \frac{\frac{\sigma_1}{\lambda_1^2 - \frac{1}{\lambda_1^2 \lambda_2^2}} - \frac{\sigma_2}{\lambda_2^2 - \frac{1}{\lambda_1^2 \lambda_2^2}}}{2(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)} \tag{II.54}$$

On montre sur la figure (II-7) les résultats obtenus par ces auteurs :

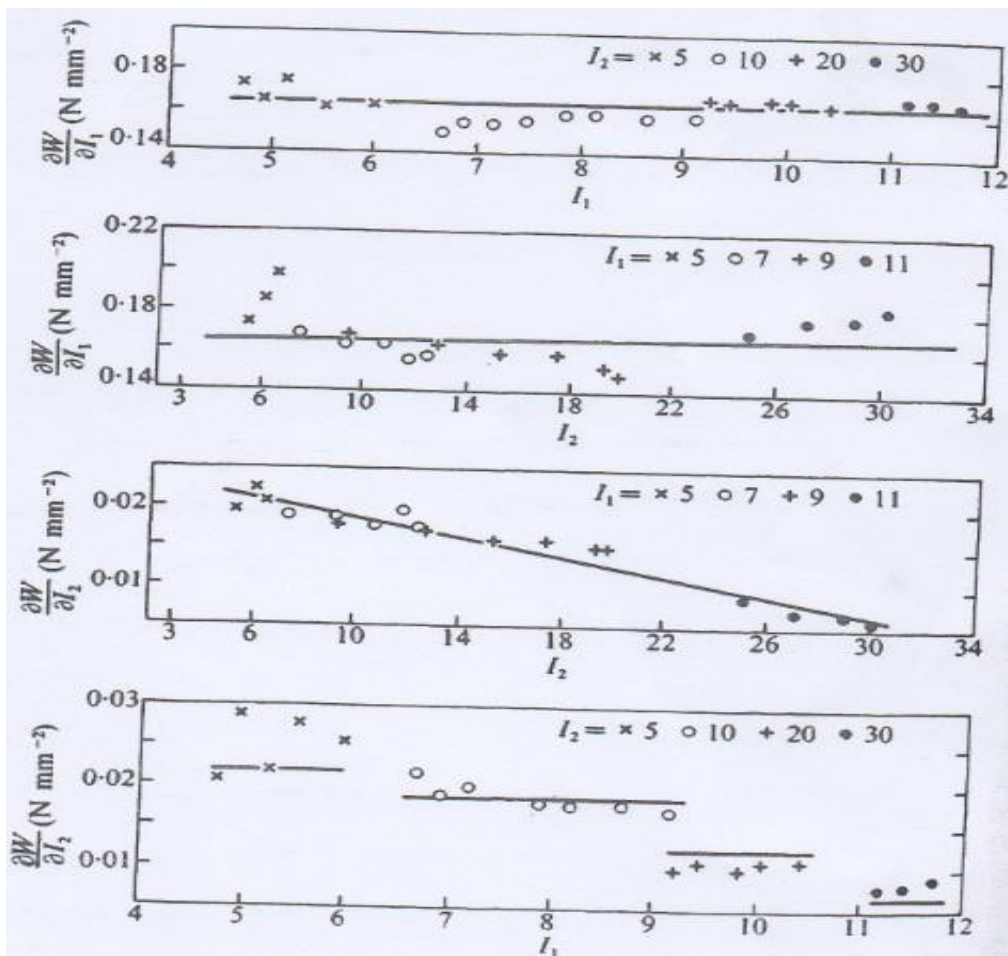


Figure II-7 : Dépendance de $\frac{\partial w}{\partial I_1}$ et $\frac{\partial w}{\partial I_2}$ on I_1 et I_1 (Rivlin et Saundes)

Dans le cadre de la base de données expérimentale précédente, on peut représenter dans le plan des invariants (I_2, I_1) l'état de déformation. figure (II-8) :

$$\begin{cases} I_1^{TS} = \lambda^2 + \frac{2}{\lambda} & , & I_2^{TS} = \frac{1}{\lambda^2} + 2\lambda, & \text{(II.55)} \\ I_1^{CP} = \lambda^2 + \frac{1}{\lambda^2} + 1 & , & I_2^{CP} = \lambda^2 + \frac{1}{\lambda^2} + 1, & \text{(II.56)} \\ I_1^{EB} = 2\lambda^2 + \frac{1}{\lambda^4} & , & I_2^{EB} = \lambda^4 + \frac{2}{\lambda^2} & , & \text{(II.57)} \end{cases}$$

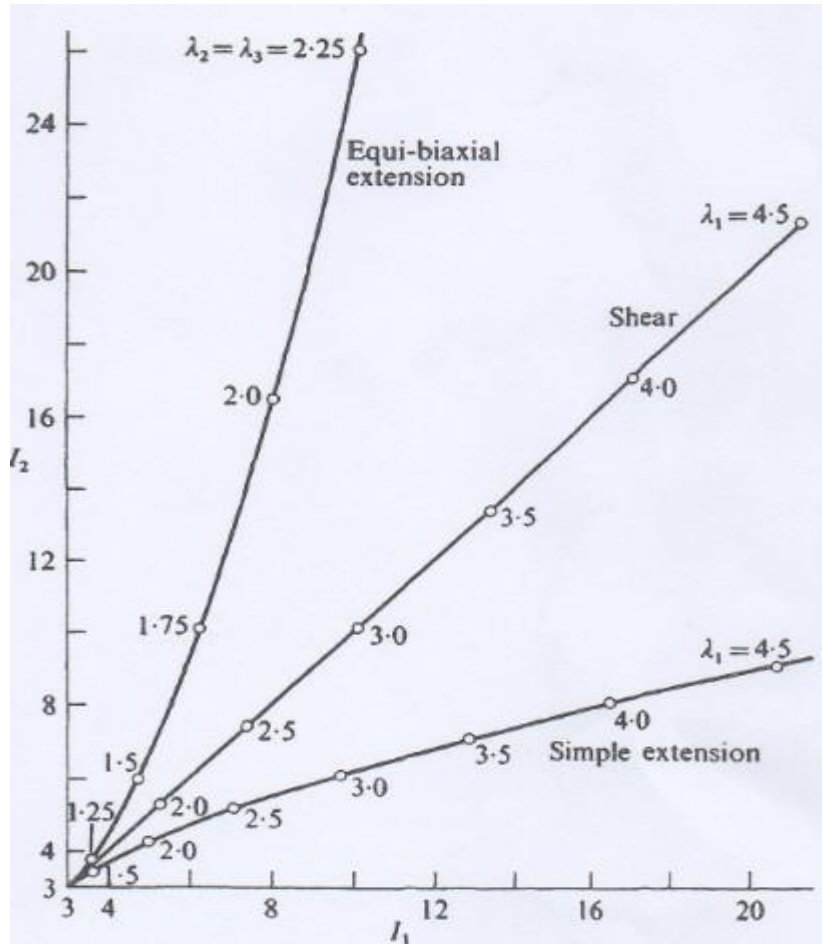


Figure II-8 : Relation entre \$I_1\$ et \$I_2\$ pour les différents types d'essai

Dans le domaine des moyennes déformations [0,150%], les dérivées partielles \$\frac{\partial W}{\partial I_1}\$ et \$\frac{\partial W}{\partial I_2}\$ sont quasi-indépendantes de l'état de déformation et sont constantes. En d'autres termes, le modèle de Mooney - Rivlin est capable de prévoir le comportement des caoutchoucs :

$$W^{MR} = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3). \tag{II.58}$$

En utilisant l'équation (II.34) on aboutit à :

$$\sigma^{TS} = \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right) \left[2C_{10} + \frac{2C_{01}}{\lambda} \right], \tag{II.59}$$

$$\Phi \left(\frac{1}{\lambda} \right) = \frac{F\lambda}{2A_0 \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right)} = C_{10} + \frac{C_{01}}{\lambda}. \tag{II.60}$$

Les graphes de la fonction réduite $\phi\left(\frac{1}{\lambda}\right)$ pour les caoutchoucs sont données sur la figure (II.9). Les constantes C_{10} et C_{01} sont déterminées par l'équation d'une droite où $\phi\left(\frac{1}{\lambda}\right)$ est linéaire.

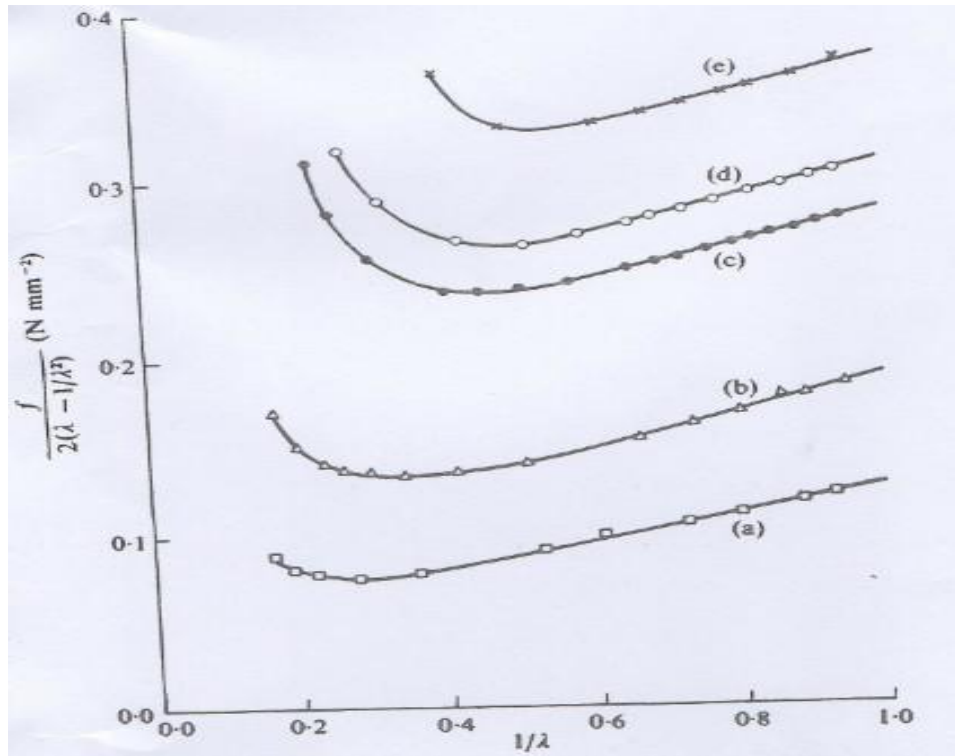


Figure II-9 : Les graphes de la fonction réduite par les caoutchoucs

Cependant, pour les grandes déformations cette approche est mise en défaut.

En grandes déformations, Diani et al.(1999) avait proposé une méthode d'identification des dérivés partielles $\frac{\partial W}{\partial I_1}$ et $\frac{\partial W}{\partial I_2}$ qui peuvent dépendre des déformations en utilisant les essais de traction simple et traction équilibiaxiale.

Ces auteurs supposent que $\frac{\partial W}{\partial I_2}$ est négligeable lors de l'essai de traction simple, en d'autres termes, sa contribution est quasi-négligeable en termes de contrainte-déformation.

de ce fait,
$$\frac{\partial W}{\partial I_1} \simeq \frac{F^{TS} \lambda}{2\left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda}\right)A_0} \quad (II.61)$$

Ensuite, ils supposent que $\frac{\partial W}{\partial I_1}$ n'est pas affecté en grandes déformations est $\frac{\partial W}{\partial I_2}$ est calculé à partir des données de l'essai de la traction équilibiaxiale.

$$\sigma^{EB} = \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^4}\right) \left[2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_1}\right)_{TS} + \lambda^2 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right] \quad (II.62)$$

$$\sigma^{\text{EB}} = \frac{F \lambda^2}{A_0} ,$$

$$\left\{ \frac{F \lambda^2}{\left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^4}\right) A_0} - 2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \right)_{\text{TS}} \right\} \frac{1}{2 \lambda^2} = \frac{\partial W}{\partial I_2} . \quad (\text{II.63})$$

Cette méthode permet de calculer les fonctions

$$\frac{\partial W}{\partial I_1} = f(I_1) \quad \text{et} \quad \frac{\partial W}{\partial I_2} = g(I_2) \quad \text{et qui sont valables pour n'importe quel état de déformation.}$$

II-6-Conclusion

La plupart des modèles de comportement hyperélastique, qu'ils soient physiques ou phénoménologiques, sont incapables de reproduire la courbure à l'origine du comportement. Certains auteurs (A. N. Gent et A. G. Thomas, 1999) ont proposé comme solution d'ajouter un terme dépendant du deuxième invariant aux lois classiques souvent exprimées uniquement en fonction du premier invariant. Cette correction n'apporte pas toujours les résultats escomptés et peut, de surcroît, donner des résultats fantaisistes pour des sollicitations différentes de celles à partir desquelles les paramètres ont été identifiés. Il semble qu'il n'existe pas à ce jour de modèle universel permettant de décrire précisément les comportements de tous les caoutchoucs. Ceci explique la multitude des modèles existants dans la littérature, chacun proposant la forme mathématique convenant au mélange de sa propre étude.

Chapitre III

Réalisation des moules, mise en œuvre des pièces et caractérisation

Conclusion générale

Conclusion général

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre générale de l'étude des matériaux élastomères .Nous nous sommes intéressés en particulier aux modèles de comportement utilisés pour simuler leur comportement hyperélastique. Notre attention c'est portée particulièrement sur l'identification des paramètres de comportement de modèles simplifiés.

L'objectif de cette étude est de choisir un modèle de comportement adapté pour reproduire le comportement mécanique de nos élastomères. Pour réaliser cette étude, un travail expérimental préliminaire est effectué pour obtenir des éprouvettes pour réaliser des essais de traction uniaxiale fabriqué dans une usine spécialisé dans la fabrication des pièces en caoutchoucs.

Pour pouvoir fabriquer ces éprouvettes, nous avons conçu et réalisé des moules en acier. Pendant notre stage à la SAEL (Société d'Application des Elastomères – Oued-Smar), on a formulé nos caoutchoucs chargés au noir de carbone et utilisés la technologie du moulage par compression pour obtenir des éprouvettes spécifiques en élastomère destinées aux essais de traction et des plots cylindriques pour des essais de compression.

Des modèles sont testés pour décrire le comportement hyperélastique de nos élastomères, en l'occurrence celui de Mooney-Rivlin et de Yeoh.

Après avoir tracé les courbes de traction et les courbes de contraintes réduites, on a déterminé les paramètres du modèle de Mooney-Rivlin. Il semble que les courbes théorique et expérimentales sont différentes pour pouvoir améliorer l'identification paramétrique et les prédictions, nous avons utilisé le modèle de Yeoh.

Il se dégage qu'au travers de cette étude qu'il n'a pas été possible de déterminer les paramètres comportementaux de caoutchoucs à partir d'un seul essai.

Il s'avère que pour le caoutchouc naturel non chargé, le modèle de Mooney-Rivlin peut reproduire le comportement en traction uniaxiale dans le domaine des moyennes déformations $1 \leq \lambda \leq 1.7$. Pour les autres caoutchoucs chargés au noir de carbone les modèles de Mooney-Rivlin et de Yeoh sont mis en défaut. Par ailleurs, il semblerait que l'exploitation de l'essai de traction uniaxiale n'est pas suffisant pour identifier les paramètres matériels de nos élastomères.

Par conséquent, on recommande de construire une base de données expérimentale déduite à partir des essais de traction simple, cisaillement pur et traction équibiaxiale.

Bibliographies

Bibliographies

Bibliographies

- Arruda A.M et Boyce M.C, (1993).** Constitutive models of rubber elasticity : A Review. Rubber Chem. Technol. 69,781-785.
- Coleman, B.D., Noll, W, (1961).** Foundations of linear viscoelasticity. Rev. Mod. Phys. 33, 239–249
- Curchos, J et Alarcon-Lorca. F ,(1990).** Elastomères - Généralités. In Traité : Généralités, Techniques de l'Ingénieur
- Diani, J.L. Rey.C. (1999).** New phenomenological behavior laws for rubbers and thermoplastic elastomers Eur. J.Mech. A/solids 18,1027-1043
- Gent A.NA. (1999)a.** Elastic instabilities of inflated rubber shells. Rubber Chem. Technol. 69, 59-61.
- Gent A.NA. (1999)b.** Elastic instabilities of inflated rubber shells. Rubber Chem. Technol. 72,263-286.
- Holzapfel G.A. (2000).** Nonlinear solid mechanics. Wiley, Chichester.
- Lemaitre.J.(1984).** Mécanique des matériaux solides. Dunod,
- Mooney, M. (1940).** A theory of large elastic deformation. *Journal of Applied Physics*, 11, 582–592
- Ogden, R.W. (1972).** Large deformation of isotropic elasticity, on the correlation of theory and experiment for incompressible rubber-like solids. Proc. Roy. Soc., Lond., A326, 565–584
- Ogden. R.W. (1992).** On the thermo-elastic modelling of rubberlike solids. Journal Thermal Stress 15,533-557.
- Salençon J. (1988).** Mécanique des milieux continus Tome I. Ellipses.
- Treloar L.R.G. (1975).** The physics of Rubber Elasticity , Clarendon Press -Oxford
- Yeoh O.H. (1990).** Characterisation of elastic properties of Carbone Black Filled Rubber Vulcanisates. Rubber Chem. Technol. Vol. 64, 136-146.
- Yuan Lin.H. (1971).** Static and dynamic Experimental Investigation of Nonlinear Isothermal Viscoelasticity. Purdue University, Ph.D.
-

Annexe

SOCIETE D'APPLICATION D'ELASTOMERES**S.A.EL OUED SMAR****Presentation de l'entreprise**

Créée en 1966, la Société d'Application d'Elastomères (S.A.EL) est une entreprise privée spécialisée dans la conception ,la formulation , transformation et la fabrication de produits en caoutchouc et métal caoutchouc .

Infrastructure :

L'ensemble des moyens de production couvre une superficie de 10.000 M2 répartis dans huit (08) bâtiments.

- Administration
- Laboratoire de contrôle qualité et formulation
- Atelier central (compounding, presses 1000tonnes)
- Atelier petites presses et finition
- Atelier refendage cardage
- Atelier vernissage
- Magasins matières premières et produits finis

Compétence et capacités :

- ▶ La S.A.EL est menée par une équipe de jeunes cadres dynamiques
- ▶ 04 ingénieurs chimistes
- ▶ 01 ingénieur électromécanicien
- ▶ 03 techniciens supérieurs

avec un effectif de 200 salariés.

La capacité de production de mélanges est de 15 tonnes / jour répartis pour leurs transformations dans différents secteurs d'activités tels que :

- ▶ Bâtiment et travaux publics ;
- ▶ Hydraulique joints et profiles;
- ▶ Pièces automobiles joints, silent bloc, support;
- ▶ Pièces industrielles divers appareil d appui conforme a la norme algérienne et européenne

Politique qualité, environnement :

- La S.A.EL à mis en œuvre depuis 2003 une politique de management de qualité, elle est certifiée ISO 9001 version 2008.
- Répondre aux besoins et exigences de nos clients, par l'amélioration de nos produits.
- Evaluer et homologuer nos fournisseurs de matières premières.
- Améliorer le facteur économique en réduisant le coût d'obtention des produits.
- Mettre en place des indicateurs qualité traduisant la contribution de la qualité au respect des objectifs fixés.

EQUIPEMENTS DE LABORATOIRE

Abrasimètre



Cylindre mélangeur de



Dynamomètre zwick

1. Duromètre
2. Densimètre



Rhéomètre R100

- 4 Etuve de vieillissement
- 5 Divers petits matériel

3. Hygromètre

Outils de production



ATELIER CENTRAL

02 CHAINE DE COMPOUNDING

04 PRESSES DE 1000 tonnes



ATELIER PETITES PRESSE

33 Presses: chauffage vapeur et électrique de 250

a 400 tonnes



ATELIER DE VERNISSAGE

SECTEUR PIECES TECHNIQUE VEHICULES INDUSTRIEL



Butes, Tampons, Protecteur, Pedalier soufflet



Suports, Butee, Bavettes, Durites

Clients :

secteur privé : 60%

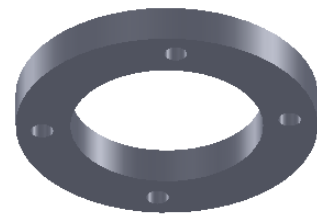
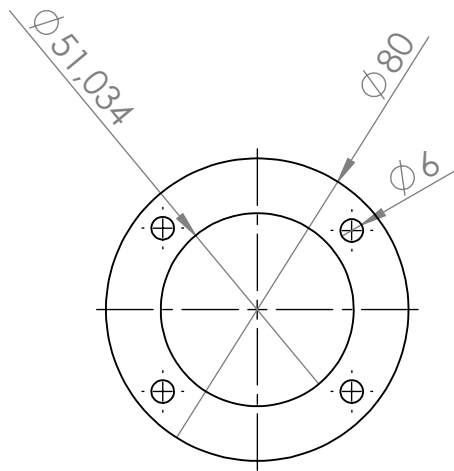
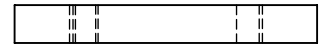
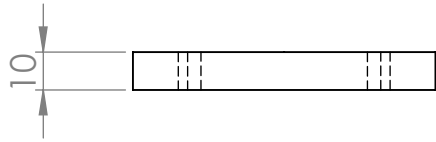
secteur public : 40%

Principaux clients

- **E.R.C.C** (joints hydraulique)
- **S.N.V.I** (pieces de rechanges, pièces techniques véhicules)
- **P.O.V.A.L** (pieces techniques et joints)
- **M.D.N-E.H.C** (chaussures)
- **S.N.T.F, INFRAFER** (semelles de rail)
- **SEROUEST**(appuis de ponts)
- **COSIDER** (appuis de ponts)
- **GENISIDER** (appuis de ponts)
- **BATIGEC**(appuis de ponts)
- **ENGOA** (appuis de ponts)
- **SNTR** (pieces de rechanges)
- **SNTV** (pieces de rechanges)
- **ETUSA** (pieces de rechanges)
- **CCEECC** (Appui de pont)
- **CEVITAL** (Neoprene)

Gamme de produits fabriqués

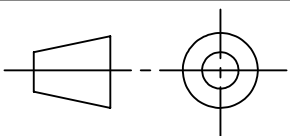
- Mélanges maitres ou crus prêts à la transformation ;
- Pièces techniques moulées en caoutchouc et caoutchouc / métal supports amortisseurs
- Pièces techniques moulées diverses pour les travaux publiques (appareil d'appuis de ponts frettés et non frettés) ;
- Pièces techniques moulées pour l'industrie automobile support, plot, protecteur, butée
- Plaques moulées compactes (néocompost, intercalaires) avec ou sans revêtement de surface ;
- Plaques moulées compactes micro cellulaires (Eva, airlit) ;
- Semelles et talons pour chaussures ;
- Divers joints torique et a lèvres de différents diamètres pour le secteur de l'hydraulique (assainissement et A.E.P).



Echelle 1/1

UNIVESITE DE BEJAIA

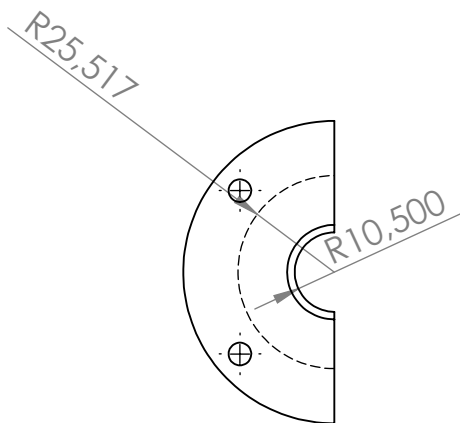
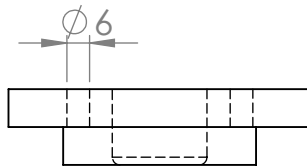
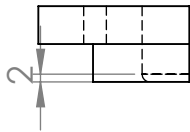
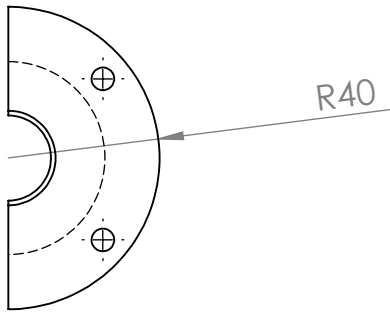
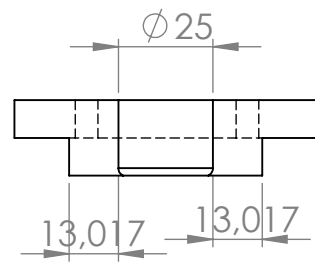
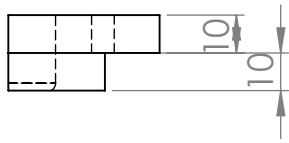
OUZZANE & DAIDECHE



partie B

2012/2013

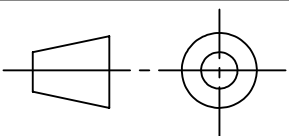
système de fixation



Echelle 1/1

UNIVESITE DE BEJAIA

OUZZANE & DAIDECHE



partie C

2012/2013

système de fixation



Systeme de fixation

III-1-Objectif du travail

Dans le cadre de ce mémoire nous allons réaliser des éprouvettes spécifiques en caoutchoucs naturel et chargés en noir de carbone. Elles sont destinées pour réaliser des essais de traction voire de traction-torsion couplés. Afin d'éviter le glissement de l'éprouvette lors de serrage des mors de la machine de traction aux grandes déformations, une forme originale a été proposée par Y.H.Lin, (1971) dans cadre de sa thèse de Doctorat .Nous allons reprendre cette éprouvette qu'on montre sur la figure (III-1) mais les dimensions sont différentes, comme on la montre sur la figure (III.2) pour pouvoir les mouler en appliquant des pressions raisonnables. La conception et la réalisation des moules sera abordée et aussi l'étude de la localisation des déformations homogènes qu'impose la forme spécifique des éprouvettes.

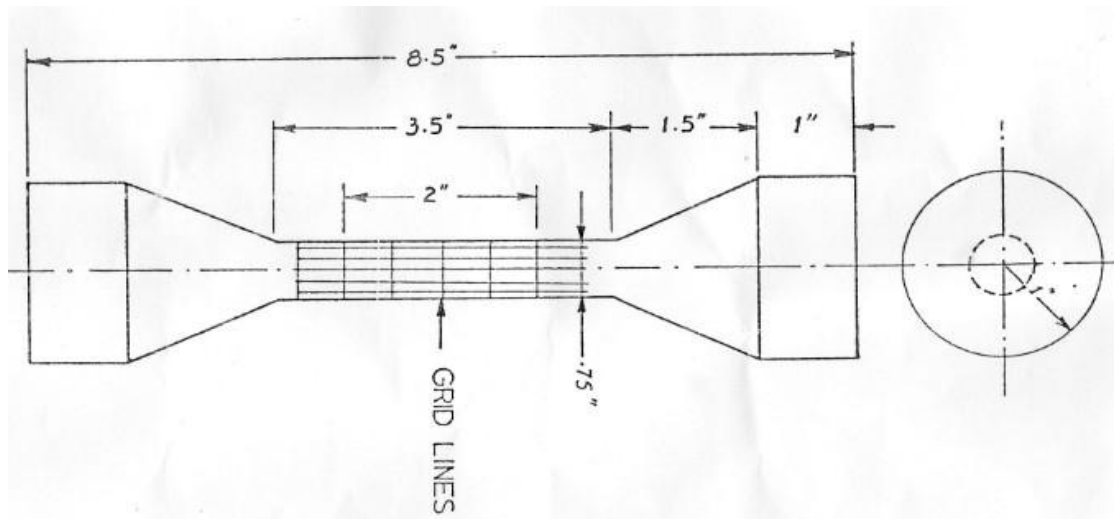


Figure III-1 : Eprouvette proposée par Y.H.Lin, (1971)

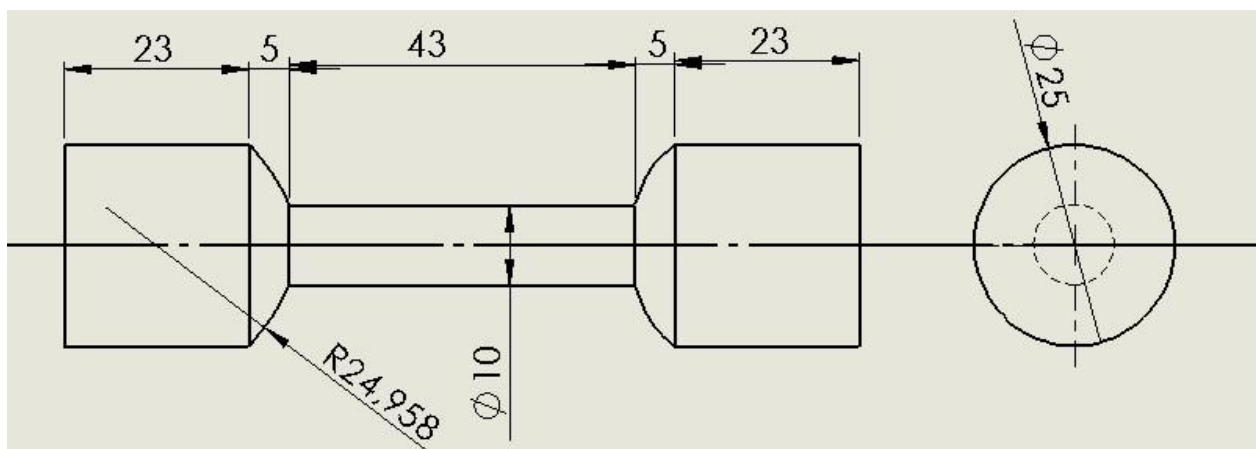


Figure III-2 : Eprouvette avec les dimensions modifiées

Par ailleurs, d'autres moules seront conçus et réalisés pour mouler des plots cylindriques en caoutchoucs destinés aux essais de compression.

III-2-Dessins de définitions des moules

Le dessin de définition représente une pièce ou une partie d'objet projetée sur un plan avec tous ses détails comme les dimensions en cotations normalisées et les usinages. On l'appelle également plan de détails par opposition au plan d'ensemble ou Dessin d'ensemble.

Avec l'utilisation du logiciel solidworks nous avons réalisé les dessins des moules qu'on montre sur les figures Figure (III- 3).

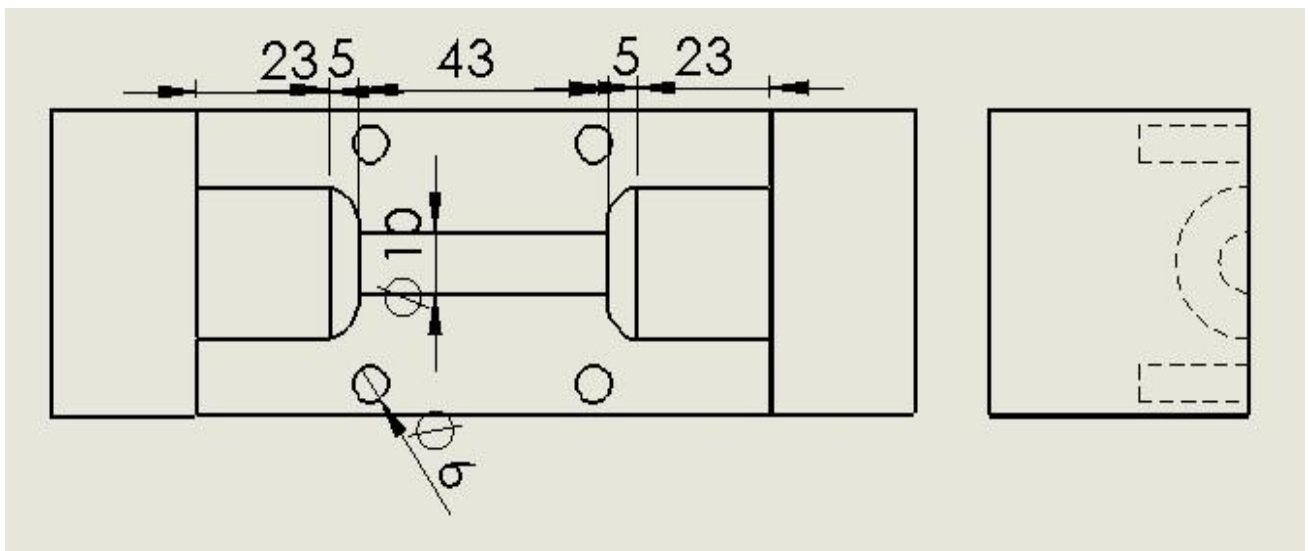


Figure III- 3: Dessin du moule des éprouvettes

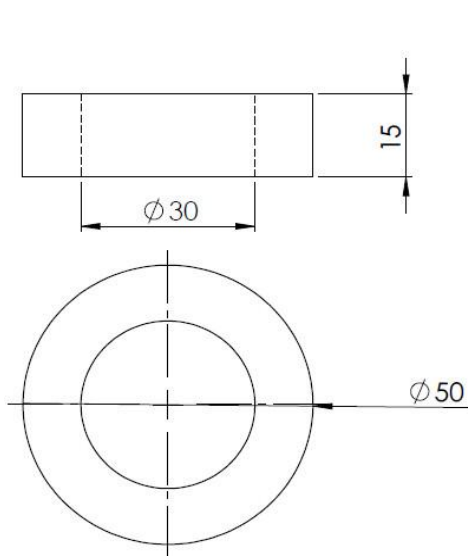


Figure III- 4: Dessin du plot1

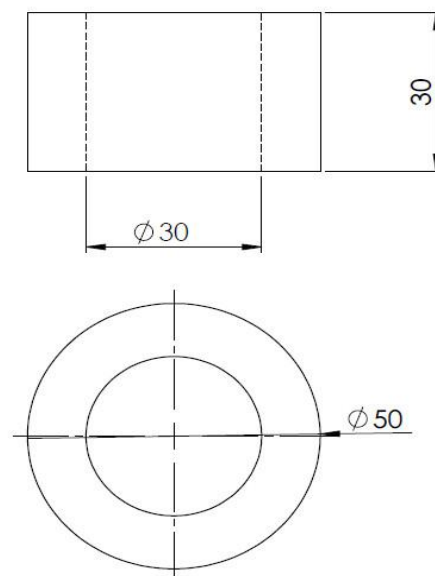


Figure III- 5: Dessin du plot 2

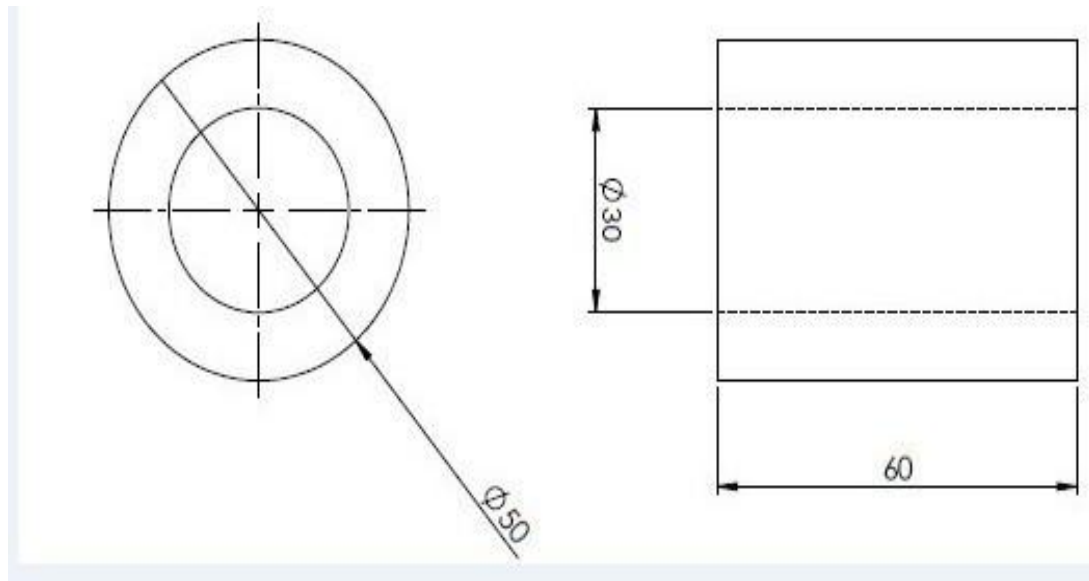


Figure III- 6: Dessin du plot 3

III-3-Conception des moules

Le moulage s'effectue dans une presse à une pression de 100 bars et une température de 180°C. En conséquence, le choix du matériau constitutif du moule est essentiel pour qu'il puisse résister aux conditions de travail.

Le moule doit supporter les conditions de mise en forme en termes de pression et température mais aussi résister aux chocs. Afin d'optimiser le choix du matériau, nous avons utilisé le logiciel SolidWorks.

Dans la première étape, on a opté pour des moules en aluminium, la simulation numérique montre que le moule ne résistera pas à une pression de 100 bars et une température de 180°C. Les résultats sont montrés sur la figure (III-7). Ensuite, notre choix est orienté vers des moules en acier qui est adéquat pour les conditions de mise en forme.

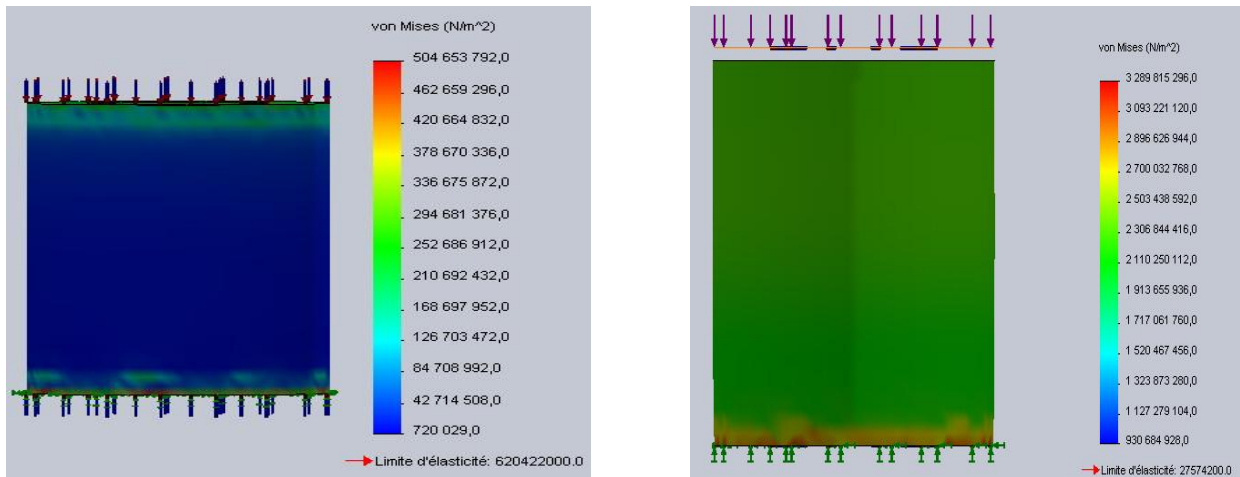


Figure III- 7: Comparaison de résistance d'un moule en acier et un autre en aluminium

III-4-Réalisation des moules

III-4-1-Matérielles utilisé

- plaque d'acier ;
- Cylindre d'acier $\varnothing 50 \text{ mm}$;
- Machine d'usinage (scie, tour, fraise, perceuse) ;
- les outils d'usinage (forés, outils de fraisage et de tournage) ;
- baguette de soudage.

III-4-2-Fabrication des moules

Le Master est la pièce maîtresse d'un moule, sa morphologie est celle de la pièce finie. Il est aussi appelé maître modèle ou mère de moule qui est réalisé en matériaux rigides, son état de surface donnera celui de l'intérieur du moule et donc celui de la pièce qui en sortira. Il est recommandé de passer beaucoup de temps sur sa finition afin d'en tirer un outillage le plus correct possible.

Une fois l'acier est coupé avec une scie, on a réalisé des trous de 30 mm sur les cylindres et sur un tour. Pour les moules des plots cylindriques et après la préparation des plaques on les assemble avec des pointes de soudures et offrir au moule la forme qui correspond à la futur pièce brute. On utilise des baguettes d'acier pour le système de guidage et des pointes de soudures afin d'assembler les parties du moule.



Figure III- 8: Moule des éprouvettes

III-5-Mise en oeuvre des éprouvettes et les plots

III-5-1-Préparation de la patte du caoutchouc

III-5-1-1- Les composants chimique du mélange

	A	B	C	D	E
Caoutchouc naturelle	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Soufre	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
CBS	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
.Acide stérique	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Oxyde de Zinc	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Huile lubrifiant	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Anti oxygéné	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Anti ozone	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70
Noir du carbone	0.00	40.00	50.00	60.00	70.00

Tableau -1 : Le pourcentage en masse de chaque composant (%)

Le rôle de chaque composant

Les aditifs	Le rôle
CBS, Soufre & Acide stérique	Les accélérateurs et les activateurs sont des ingrédients qui déterminent le succès de l'opération de vulcanisation
Huile lubrifiant	Ce produit facilite la mise en œuvre du mélange ainsi que sa tenue au froid.
Anti oxygéné	Les dérivés aminés ou phénoliques. Ont pour rôle de protéger l'élastomère contre l'oxygène.
Anti ozone	Les dérivés aminés ou phénoliques. Ont pour rôle de protéger l'élastomère contre l'ozone.
Noir du carbone	Le noir de carbone sert à renforcer le mélange et diminuer son prix de revient

Tableau -2 : Rôle des composants de mélange.



Figure III- 9: photographie des additifs du mélange

III-5-1-2-Calcul de la masse du mélange

Nous avons calculé la masse des mélanges du caoutchouc dont on a besoin théoriquement pour préparer le mélange. En utilise la relation suivante :

$$\rho = \frac{m}{v} \Rightarrow m = \rho v , \quad (\text{III.1})$$

Où

$$\rho = 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 1 \text{ g/Cm}^3 \quad ; \text{ (masse volumique) ;}$$

$$v = \frac{\pi d^2}{4} h \text{ Cm}^3 \text{ pour les plots et les éprouvettes ;}$$

$$v = h^2 e \text{ Cm}^3 \quad \text{Cm}^3 \text{ pour les plaques.}$$

	Diamètre (Cm)	La longueur (Cm)	L'épaisseur (Cm)	Le volume (Cm ³)	La masse (g)
Plot 1	3	1,5	-	10,59	10,59
Plot 2	3	3	-	21,19	21,19
Plot 3	3	6	-	42,39	42,39
L éprouvette	3	10,5	-	74,18	74,18
Les plaques	-	25	0,4	250	250

Tableau -3: Masses théoriques pour les plots, les éprouvettes et les plaques.

$$\begin{aligned} \text{La masse totale pour chaque formulation} &= (m_{pl1} + m_{pl2} + m_{pl3} + m_{ep} + m_p)5 \\ &= (10,59 + 21,19 + 42,39 + 74,18 + 250) * 5 \\ &= 1991,75\text{g} \\ &= 1,99175 \text{ Kg} \approx 2 \text{ Kg} . \end{aligned}$$

La masse totale pour le mélange = la masse pour une formulation *5

$$= 2 * 5 = 10 \text{ Kg} .$$

(III.2)

On pèse les différents ingrédients entrant dans la composition du mélange à transformer (gommes, charges, agents de mise en oeuvre, agents de vulcanisation, plastifiants, activateurs, ...), la formulation contient neuf ingrédients.

	A	B	C	D	E
Caoutchouc naturelle	1710	1710	1710	1710	1710
Soufre	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25
CBS	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
.Acide stérique	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4
Oxyde de Zinc	8.55	8.55	8.55	8.55	8.55
Huile lubrifiant	8.55	8.55	8.55	8.55	8.55
Anti oxygéné	0.255	0.255	0.255	0.255	0.255
Anti ozone	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9
Noir du carbone	0.00	68	85	102.5	115

Tableau -4 : Masse de chaque composant en (g)

III-5-1-3-Préparation des mélanges

Le malaxage est un mélangeage des ingrédients pesés dans des mélangeurs internes et externes en vue de l'obtention d'une pâte homogène à laquelle le calandrage donnera la forme et les dimensions désirées pour l'étape de l'ébauche.



Figure III- 10: Mélangeurs

III-5-2-Moulage

Dans une presse de moulage par compression, les ébauches subissent sous l'effet de la pression, la vulcanisation. qui est un processus chimique de réticulation donnant à la pièce moulée son aspect fini ou semi-fini. Le phénomène de vulcanisation est inhérent aux caoutchoucs. Le processus de polymérisation des thermoplastiques se fait à la température ambiante (pour les polyuréthanes).

Le moule est installé sur une machine spéciale (presse), constitué le de deux coquilles (partie fixe et partie mobile) qui sont fortement pressées l'une contre l'autre au moment du moulage puis écartées pour permettre l'éjection de la pièce moulée. Outre ces coquilles, le moule peut comporter un ou plusieurs noyaux destinés à former les parties creuses de la pièce et des poinçons permettant de réserver des ouvertures dans ses parois. Il arrive fréquemment que l'on place dans le moule des « inserts » qui se retrouveront par la suite inclus dans la pièce : il s'agit le plus souvent d'éléments filetés qui pallient localement la résistance insuffisante du matériau constituant le corps de la pièce.

La vulcanisation est une réaction chimique qui se produit généralement à température élevée (140 –200 °C). Elle crée un réseau tridimensionnel grâce à la formation de liaisons chimiques «ou ponts» entre les chaînes macromoléculaires, cette opération est irréversible.

Les conséquences sur le caoutchouc sont les suivantes :

- Amélioration considérable de l'élasticité et dans une moindre mesure des propriétés mécaniques,
- Amélioration de la tenue thermique, ce qui supprime sa thermoplasticité (le caoutchouc ne peut plus ainsi « s'écouler » avec la chaleur).



Figure III-11: machine du moulage.



Figure III-12: Différentes éprouvettes injectées par le moule

III-6- Caractérisation mécanique

III-6-1- Essai de traction uni axiale

Aux petites déformations l'essai de traction permet, à lui seul, de définir les caractéristiques mécaniques courantes des matériaux. Les résultats issus de cet essai, permettent de prévoir le comportement d'une pièce sollicitée en Cisaillement, Traction / Compression et Flexion. Cependant, pour les élastomères (caoutchoucs chargés au noir de carbone) la base de données expérimentale est construite en considérant des chargements multiaxiaux.

III-6-2- Le système de fixation

Les éprouvettes que nous avons moulées ne sont pas normalisées. D'ailleurs, pour les élastomères les éprouvettes normalisées exigent l'utilisation des mors pneumatique, pour éviter le glissement au niveau des têtes de ces éprouvettes. Ces mors spécifiques ne sont pas classiques et coûtent chers en termes d'argent.

Pour éviter le glissement des têtes de l'éprouvette sur les deux mors de la machine de traction, nous avons réalisé un système de fixation pour pouvoir tenir les éprouvettes qu'on montre sur la figure (III-13). (Voir annexe)



Figure III-13 : Système de fixation

III-6-3- Principe de l'essai

L'essai est réalisé sur une machine de traction de la marque (Ibertest) au laboratoire du département de génie mécanique de l'université Mouloud Maamri de Tizi oizou (Le 07-05-2013) .

Le principe de l'essai consiste à imposer un déplacement de la traverse mobile en régime quasi-statique. Nous avons choisi la vitesse de travers mobile de $10 \text{ mm}/\text{min}$. On mesure la force et le déplacement de la traverse qu'on suppose égal à celui du déplacement de l'éprouvette.

III-6-4- La machine de traction

On décrit les principales tâches pour effectuer notre essai :

- Utilisation d'une machine électromécanique à enregistrement électronique (Ibertest) :
- Le déplacement de la traverse se déroule à vitesse constante (10mm/mn dans notre cas) .
- La force appliquée est mesurée à l'aide d'un capteur piézoélectrique.
- L'allongement de l'éprouvette est supposé égal au déplacement de la traverse.

La Figure (III-14) représente le montage d'une éprouvette cylindrique montée entre deux mors d'une machine de traction.



Figure III-14 : Machine de traction

III-6-5- Procédure expérimentale

1. Mesurer au pied à coulisse la largeur et l'épaisseur de l'éprouvette et rentrer ces valeurs dans le logiciel de la machine de traction.
2. Placer l'éprouvette entre les mors de la traverse mobile (on pourra s'aider des touches de montée/descente manuelle de la traverse mobile).
3. Toujours à l'aide des touches montée/descente manuelle de la traverse mobile, positionner l'éprouvette dans le mors de la traverse fixe. L'éprouvette est verticale et parfaitement positionnée au centre des deux mors.
4. Valider.
5. Donner, la vitesse de l'essai 10 mm/min.
6. Démarrer l'essai de traction



Figure III-15 : L'éprouvette à l'état initial

7. La courbe de traction représente la force en fonction de la l'allongement. L'essai s'arrête quand l'allongement est égale à 80 mm. On montre sur la figure III-17 , les courbes forces - allongement obtenus pour différentes éprouvettes chargées au noir de carbone.



Figure III-16 : L'éprouvette à l'état final.

8-Retirer l'éprouvette et refaire l'essai de traction avec les autres éprouvettes.

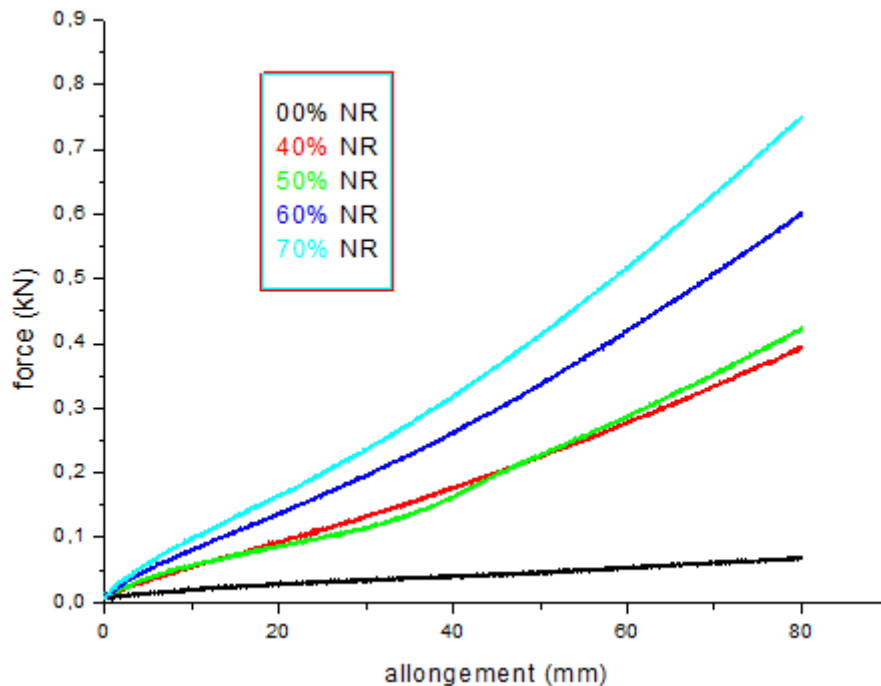


Figure III-17 : Courbes de traction des éprouvettes.

Les courbes forces - déplacement sont fortement non linéaires. Au voisinage du déplacement nul les courbes sont sensiblement linéaires et présentent des pentes différentes, qui augmentent avec le taux de charge du noir de carbone. En élevant le taux de charge, l'élastomère devient de plus en plus rigide.

Pour pouvoir interpréter les courbes, nous allons déduire les courbes contraintes nominale - élongation.

La contrainte nominale (la composante du 1^{er} tenseur de Piola -Kirechhoff) est définie par :

$$\pi_{11}^i = \pi_i = \frac{F_i}{A_0} \quad , \quad (III.3)$$

Où

$$A_0 = \frac{\pi D^2}{4} \text{ est la surface initiale de l'éprouvette avant déformation.}$$

L'élongation est définie par :

$$\lambda = \frac{L}{L_0} = 1 + \frac{\Delta L}{L_0}$$

(III.4)

ou L_0 est la longueur utile de l'éprouvette, $L_0 = 43$ mm et L la longueur instantanée de l'éprouvette dans un état déformée.

On montre sur la figure III-18 les courbes déduites :

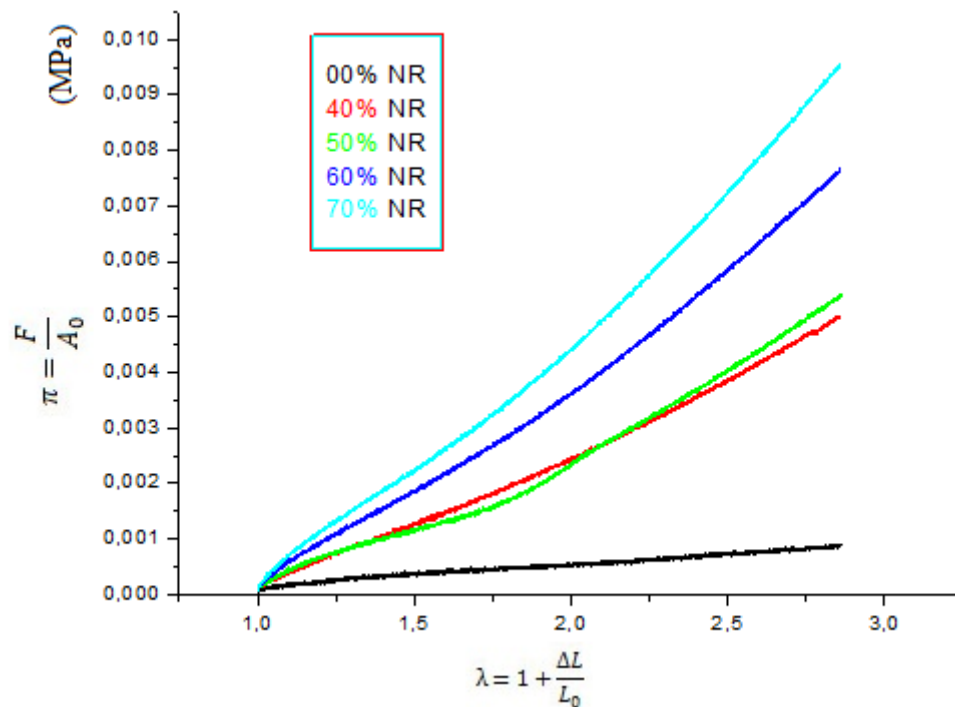


Figure III-18 : Courbe des contraintes nominales et élongation

III-7- Modélisation du comportement hyperélastique de nos caoutchoucs

Nous avons mentionné au chapitre II les modèles hyperélastiques qui peuvent reproduire le comportement des élastomères.

On se limitera volontairement aux modèles de Mooney -Rivlin (1940) et Yeoh (1993) car les paramètres matériels peuvent être obtenus en exploitant l'essai de traction uni axiale.

Afin d'obtenir la contrainte réduite, a utilisé la loi de comportement (II.21) suivante.

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2 \frac{\partial W}{\partial I_1} B_{ij} - 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} B_{ij}^{-1} . \quad (III.5)$$

En traction uni axiale,

$$\sigma^{TU} = 2 \frac{\partial w}{\partial I_1} (\lambda^2 - \frac{1}{\lambda}) + 2 \frac{\partial w}{\partial I_2} (\lambda - \frac{1}{\lambda^2}) \quad (III.6)$$

$$\sigma_{11} = \lambda \pi .$$

On déduit

$$\Phi \left(\frac{1}{\lambda} \right) = \frac{\lambda \pi}{(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda})} = 2 \frac{\partial w}{\partial I_1} + \frac{1}{\lambda} 2 \frac{\partial w}{\partial I_2} \quad (III.7)$$

La contrainte $\Phi\left(\frac{1}{\lambda}\right) = \frac{F}{A_0\left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2}\right)}$ est montrée sur la figure III-19 pour nos caoutchoucs.

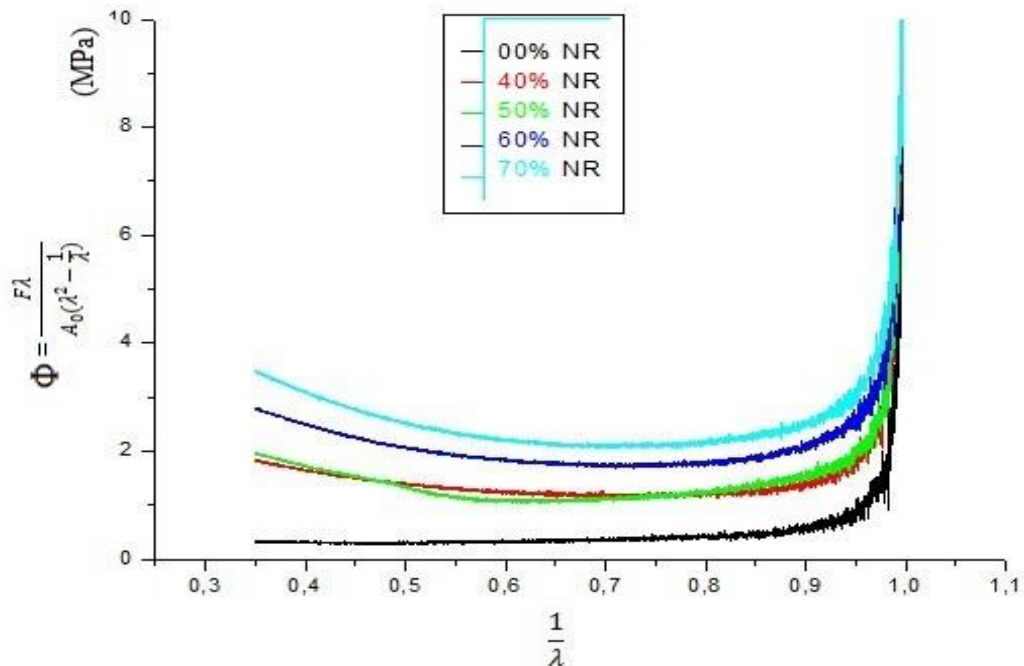


Figure III-19 : Courbe des contraintes réduites

III-7-1- Modèle de Mooney-Rivlin

Le potentiel élastique est :

$$w = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) , \tag{III.8}$$

$$\text{avec } \frac{\partial w}{\partial I_1} = C_{10} , \quad \frac{\partial w}{\partial I_2} = C_{01} . \tag{III.9}$$

La contrainte réduite de Mooney-Rivlin s'écrit :

$$\begin{aligned} \Phi^{MR}\left(\frac{1}{\lambda}\right) &= 2C_{10} + \frac{2C_{01}}{\lambda} \\ &= B + \frac{A}{\lambda} \end{aligned} \tag{III.10}$$

A partir des graphes de la contrainte réduite, les constantes c_{10} et c_{01} sont déterminées par l'équation d'une droite $\Phi^{MR} = B + \frac{A}{\lambda}$

$$A = 2C_{01} \text{ et } B = 2C_{10}$$

On trace les droites à l'aide d'un logiciel (origine) qui nous donnent la droite de Mooney-Rivlin.

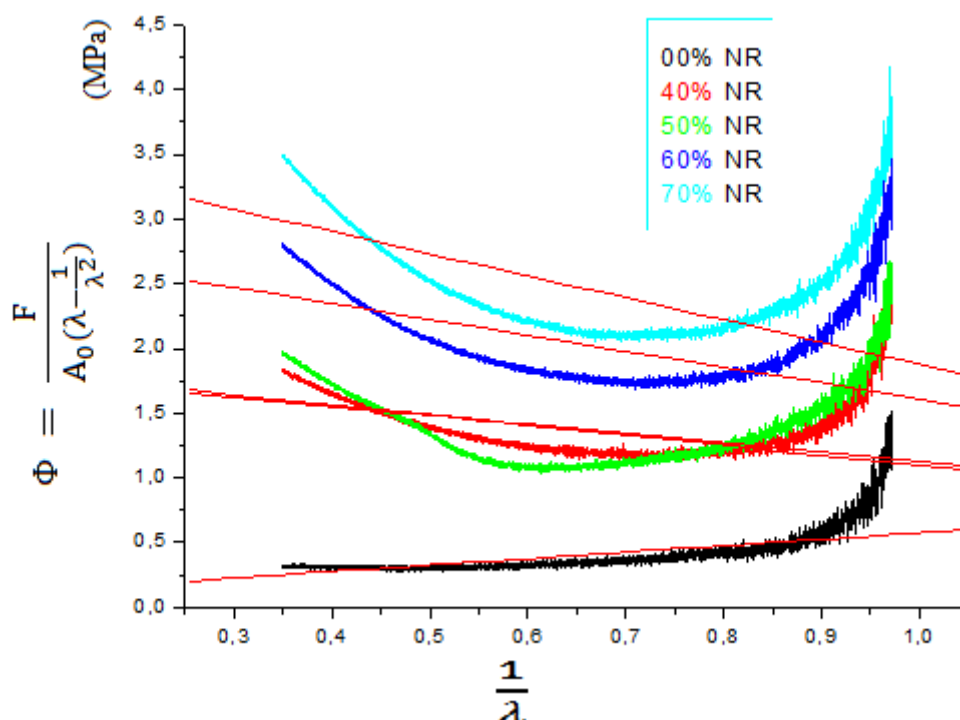


Figure III-20 : Droites de Mooney-Rivlin

Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau-5

Types du caoutchoucs	A	B	C ₀₁	C ₁₀
00 % NC	0,50047	0,07548	0.250235	0.03774
40 % NC	-0,71772	1,84126	-0.35886	0.92063
50 % NC	-0,78509	1,87865	-0.392545	0.939325
60 % NC	-1,23037	2,83965	-0.615185	1.419825
70 % NC	-1,70762	3,58498	-0.85381	1.79249

Tableau -5 : Les constantes de Mooney-Rivlin

Pour le caoutchouc non chargé, $\Phi^{MR} \left(\frac{1}{\lambda} \right)$ est une droite et les constantes C_{10} et C_{01} sont positives. Il en résulte que le comportement hyperélastique de ce matériau peut être représenté par le modèle de Mooney-Rivlin. Tandis que pour les autres ce modèle est mis en défaut car les constantes C_{10} et C_{01} sont négatives. Pour les raisons de stabilité, on doit imposer aux constantes C_{10} et C_{01} d'être positives.

Nous avons calculé la contrainte nominale en utilisant le modèle de Mooney-Rivlin

$$\pi^{MR} = \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \left(2C_{10} + \frac{2C_{01}}{\lambda} \right)$$

que nous avons comparée à la contrainte nominale expérimentale pour chaque élastomère comme le montre sur la figure (III-21)

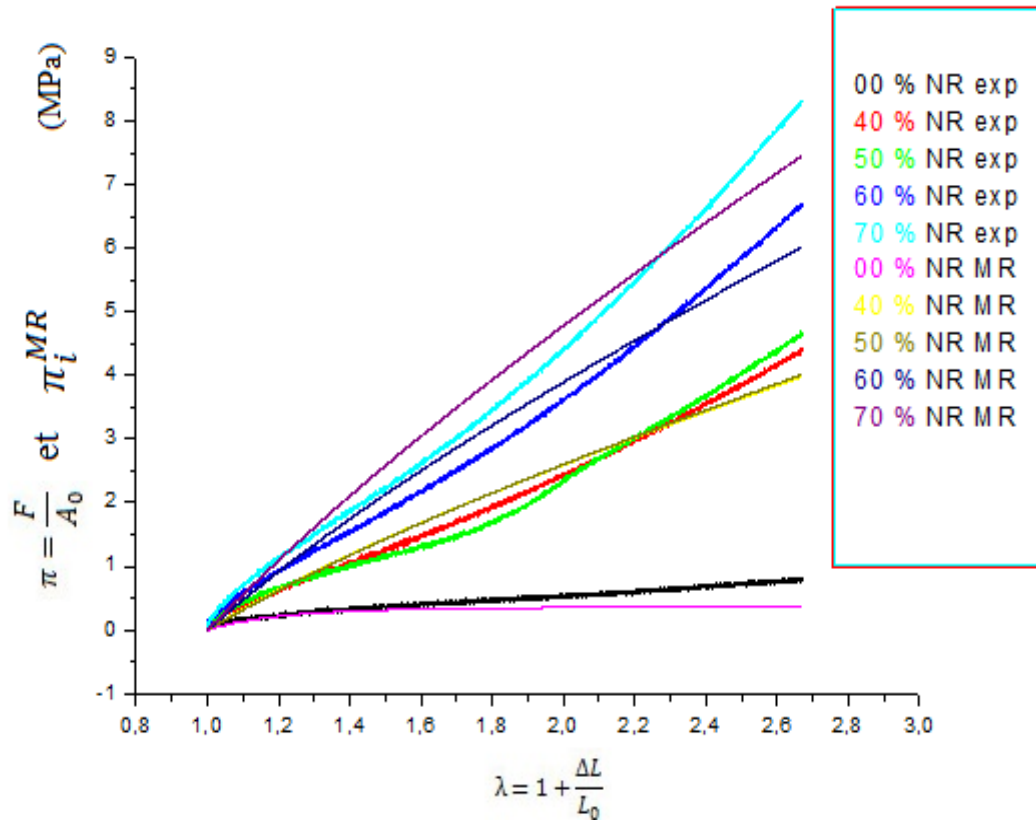


Figure III-21: Comparaison entre les contraintes nominales expérimentales et calculées en utilisant le modèle de Mooney-Rivlin.

Pour le caoutchouc non chargé, le modèle de Mooney-Rivlin. peut reproduire le comportement hyperélastique dans le domaine des moyennes déformations pour les élongations $1 \leq \lambda \leq 1.7$.

Pour des élongations supérieures à 1.7, le modèle de Mooney-Rivlin est mis en défaut.

Nous avons tracé la courbe des contraintes nominales expérimentales et calculées pour les caoutchoucs naturels non chargés. On peut constater que la courbe s'écarte de la droite pour des élongations supérieures à 1.7.

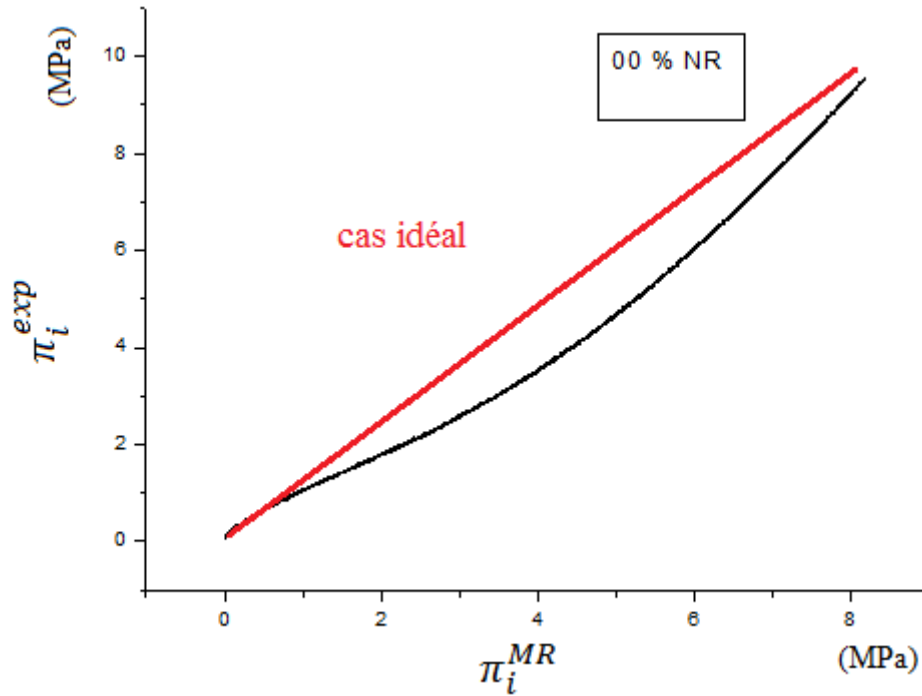


Figure III-22 : Courbe de la contrainte nominale expérimentale en fonction de la contrainte calculé de du modèle de Mooney-Rivlin

Pour pouvoir améliorer les prédictions pour les caoutchoucs chargés et le caoutchouc non chargé nous allons utilisé le modèle de Yeoh.

III-7-2- Modèle de Yeoh

Le modèle de Yeoh est défini dans le chapitre II (II.25) le potentiel élastique du modèle est :

$$w = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_2 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3. \tag{III.11}$$

On peut constater que $\frac{\partial w}{\partial I_2} = 0$ et $\frac{\partial w}{\partial I_1} = C_{10} + 2C_{20}(I_1 - 3) + 3C_{30}(I_1 - 3)^2$.

On reporte ces dérivées partielles dans l'expression de la contrainte réduite , on obtient :

$$\Psi_{(I_1-3)}^{Yeoh} = 2C_{10} + 4C_{20}(I_1 - 3) + 6C_{30}(I_1 - 3)^2 . \tag{III.12}$$

Avec : $I_1 = \text{tr}\underline{\underline{C}} = \lambda^2 + \frac{2}{\lambda}$.

La courbe expérimentale de la contrainte réduite est tracée en fonction de la variable

$$(I_1 - 3) = \lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3 \text{ pour nos élastomères.}$$

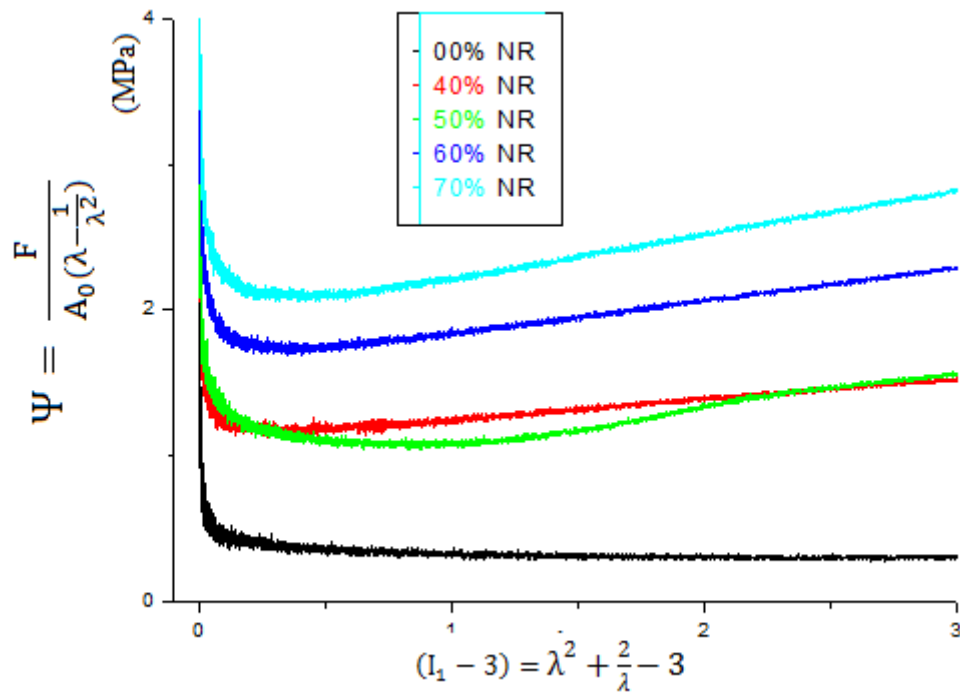


Figure III-23 : Courbes de contrainte réduite de Yeoh.

La contrainte réduite de Yeoh est une forme parabolique.

$$\Psi^Y(x) = ax^2 + bx + c \quad (\text{III.13})$$

Où

$$a = 6C_{30} \Rightarrow C_{30} = a/6$$

$$b = 4C_{20} \Rightarrow C_{20} = b/4$$

$$c = 6C_{10} \Rightarrow C_{10} = c/2$$

Nous avons cherché les constantes a , b et c en utilisant le logiciel origine, les constantes obtenues sont représentées sur le tableau-6.

Les résultats des constantes de Yeoh

Types du caoutchoucs	a	b	C	C ₃₀	C ₂₀	C ₁₀
00 % NC	0,41819	-1,93504	2,07337	0,06969833	-0,48376	1,036685
40 % NC	0,5362	-2,33733	3,35336	0,08936667	-0,5843325	1,67668
50 % NC	0,71178	-3,07994	3,90437	0,11863	-0,769985	1,952185
60 % NC	0,61264	-2,60663	4,1865	0,10210667	-0,6516575	2,09325
70 % NC	0,51031	-2,06777	4,08238	0,1275775	0,5169425	2,04119

Tableau -6 : Les constantes de Yeoh (MPa)

Ensuite, nous avons calculé les contraintes nominales de Yeoh de la manière suivante :

$$\pi_i^{Yeoh} = \left[2C_{10} + 4C_{20} \left(\lambda_i^2 + \frac{2}{\lambda_i} - 3 \right) + 6C_{30} \left(\lambda_i^2 + \frac{2}{\lambda_i} - 3 \right)^2 \right] \left(\lambda_i - \frac{1}{\lambda_i^2} \right) \quad (III.14)$$

que nous avons comparée à la contrainte nominale expérimentale. On peut conclure que ce modèle n'est pas adéquat pour représenter le comportement hyperélastique de nos élastomères, comme le montre sur la figure (III-24).

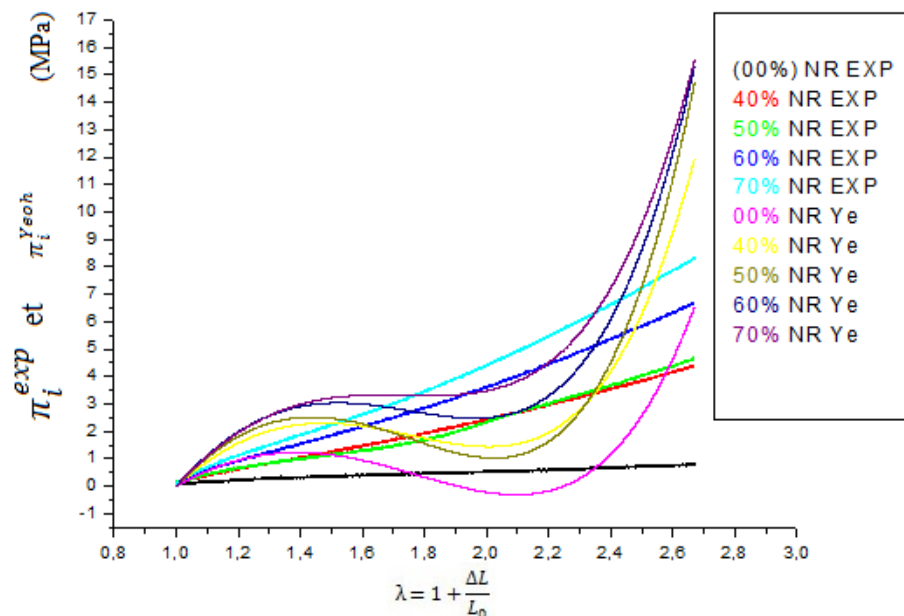


Figure III-24 : Comparaison des contraintes nominales expérimentales à celles du modèle de Yeoh

On montre sur la figure (III-25), les contraintes nominales expérimentale et calculée, pour le caoutchouc non chargé.

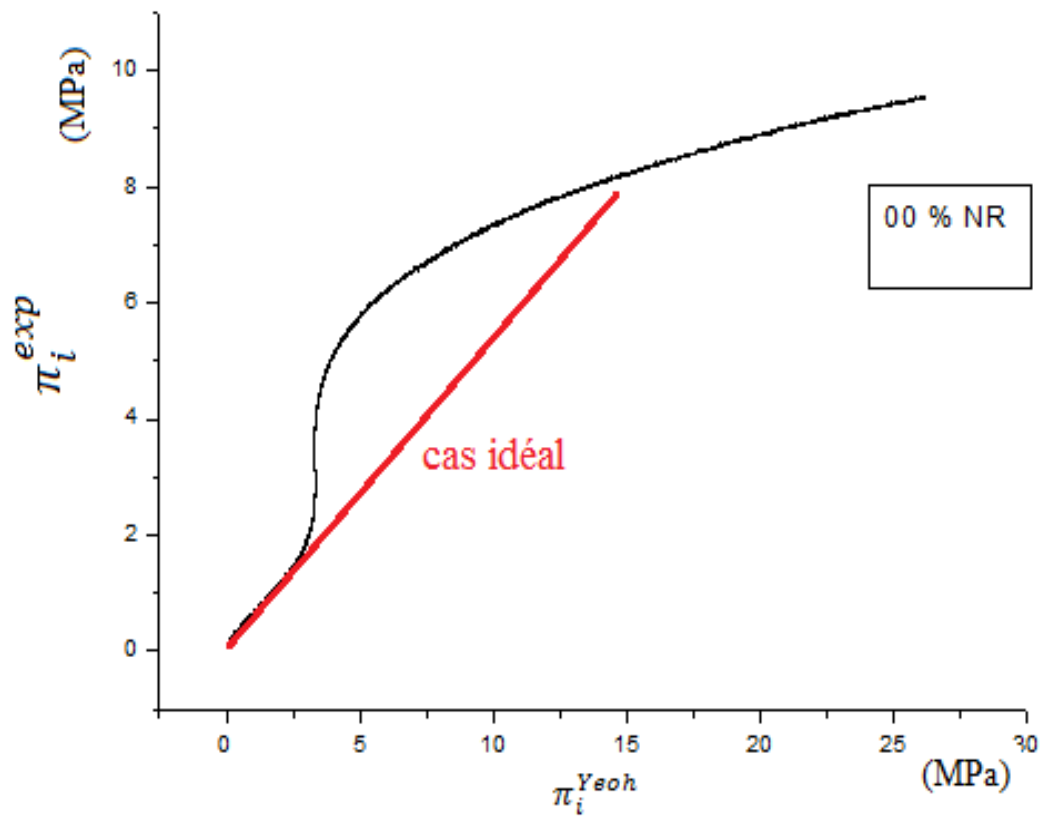


Figure III-25 : Courbe de la contrainte nominale expérimentale en fonction de la contrainte calculée du modèle de Yeoh

On peut constater que le modèle d'Yeoh est capable de reproduire les données expérimentales dans le domaine des moyennes déformations. On note que ce résultat peut être obtenu avec le modèle de Mooney-Rivlin.

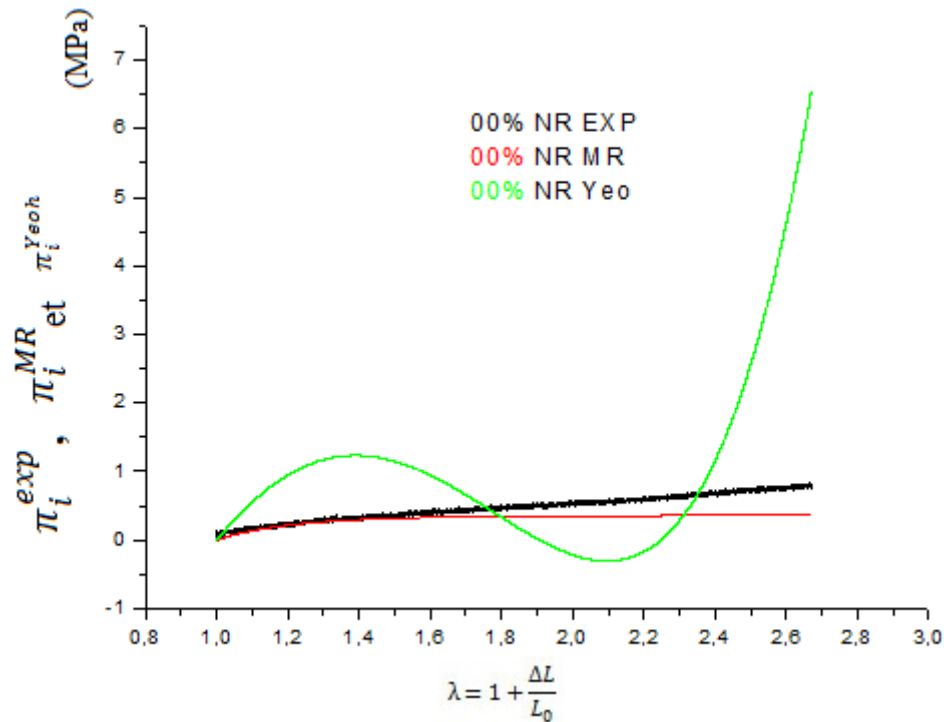


Figure III-26 : Comparaison des contraintes nominales expérimentales et contraintes des modèles de Yeoh et Mooney-Rivlin

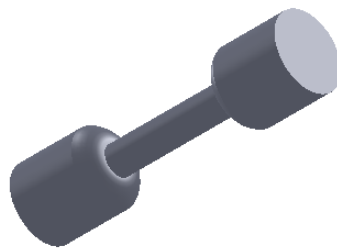
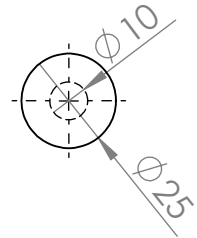
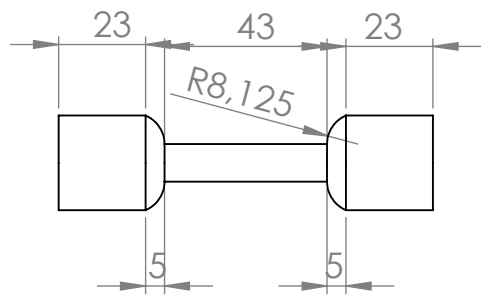
III-8-Conclusion

On a abordé dans ce chapitre plusieurs points importants. Tout d'abord, on a montré que la résistance d'un caoutchouc dépend des charges de renforcement (noir de carbone dans notre cas). Différents phénomènes ont été identifiés, on cite parmi eux :

- **Élasticité non linéaire :** Le raidissement aux grandes déformations est associé probablement à l'extension maximale du réseau macromoléculaire.
- **Incompressibilité :** On a supposé que nos élastomères sont incompressibles. Toutefois, la littérature suggère qu'elle est vérifiée en compression .

L'analyse préliminaire menée dans ce chapitre suggère qu'il n'est pas possible de déterminer les paramètres de comportement d'un caoutchouc à partir d'un seul essai.

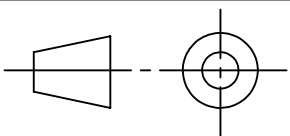
Notre analyse préliminaire suggère qu'il n'a pas été possible de déterminer les paramètres matériels de nos élastomères en exploitant seulement l'essai de traction uniaxiale.



Echelle 1/1

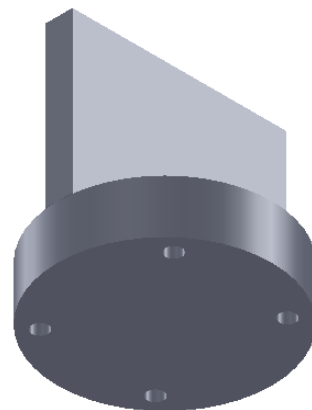
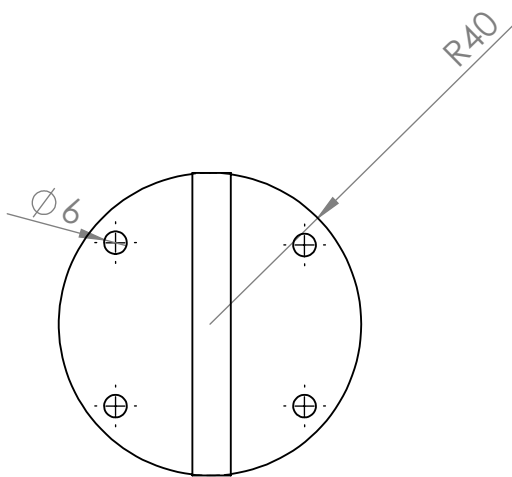
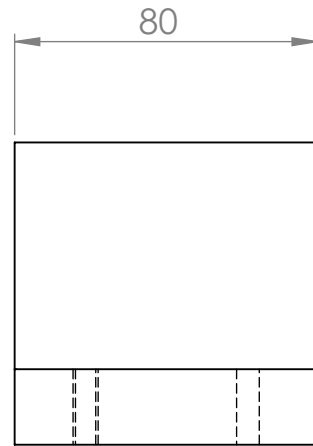
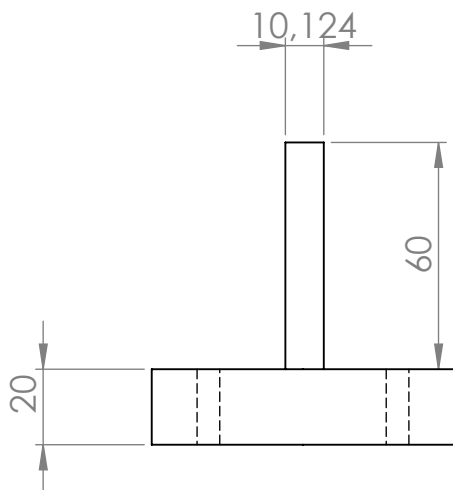
UNIVESITE DE BEJAIA

OUZZANE & DAIDECHE



Eprouvette

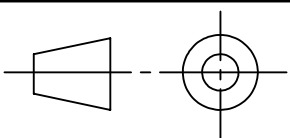
2012/2013



Echelle 1/1

UNIVESITE DE BEJAIA

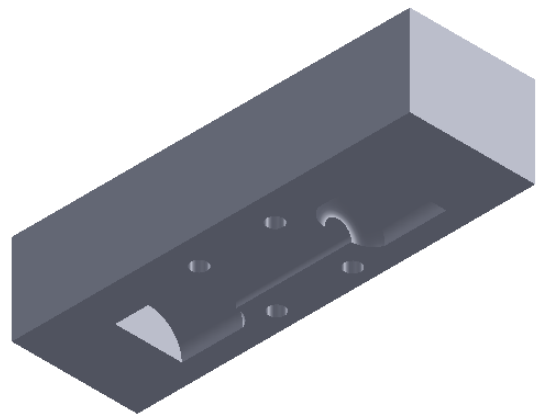
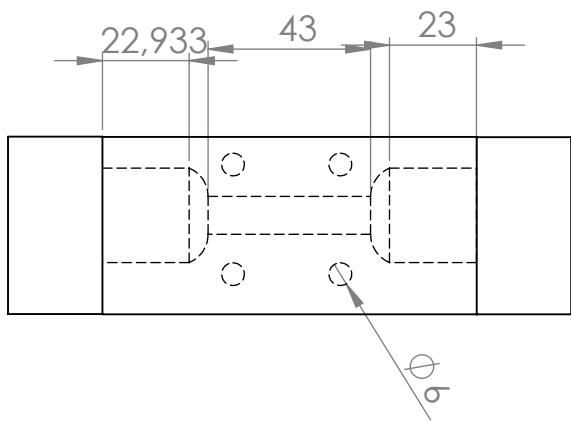
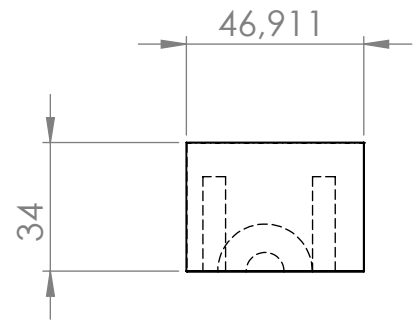
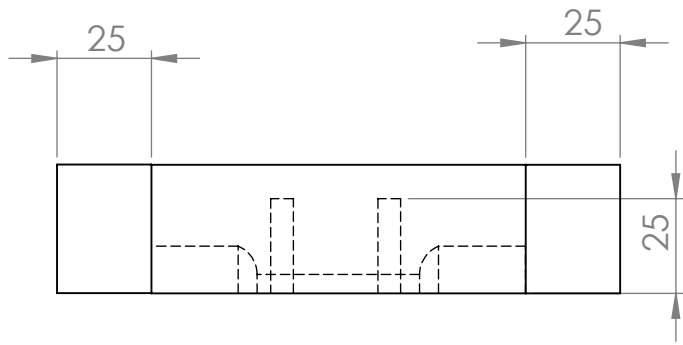
OUZZANE & DAIDECHE



partie A

2012/2013

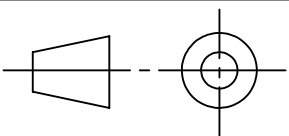
système de fixation



Echelle 1/1

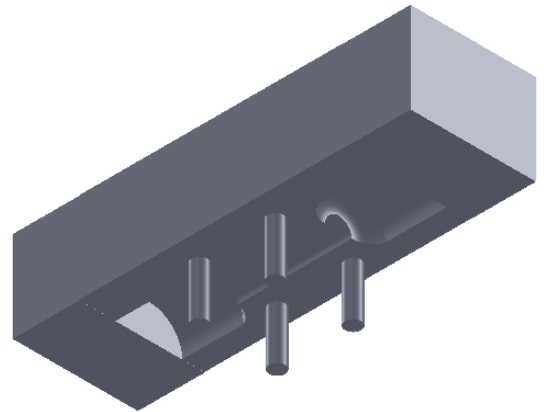
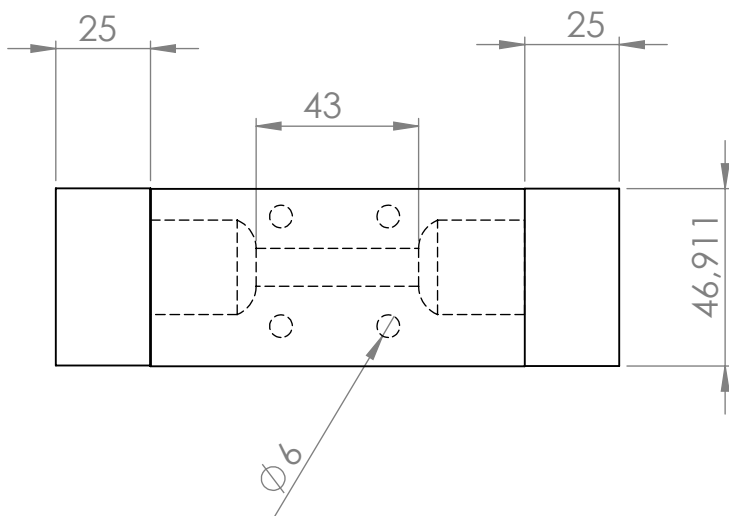
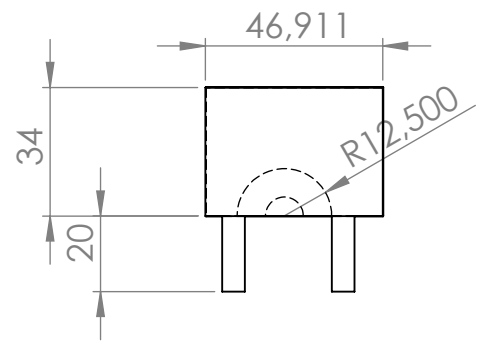
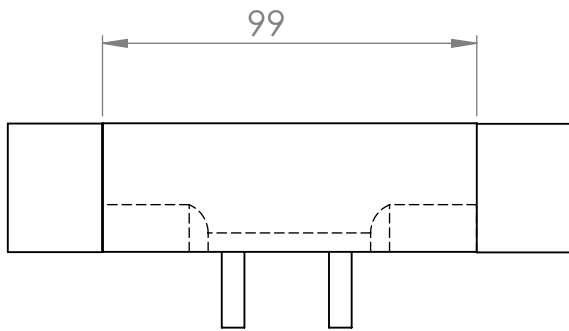
UNIVESITE DE BEJAIA

OUZZANE & DAIDECHE



partie A du moule

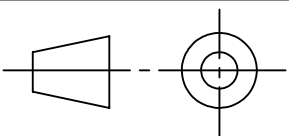
2012/2013



Echelle 1/1

UNIVESITE DE BEJAIA

OUZZANE & DAIDECHE



partie B du moule

2012/2013