

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira de Bejaia
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique
2^{eme} Année Master

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de master 2 En Electrotechnique

Option : Electromécanique

Thème

Etude expérimentale du comportement
d'une membrane en élastomère soumise
à une pression interne

Présenté par :

YAHIAOUI Karim

Promoteur:

M^r AMRI.A

Année Universitaire : 2013-2014

Remerciement

*Mes remerciements les plus vifs et chaleureux, vont à mon
promoteur Mr Amri.A
pour son aide, son orientation judicieuse et sa disponibilité, aussi
pour la,
patience, la compréhension et la gentillesse qu'il m'a toujours
manifestées.*

*J'adresse aussi nes chaleureux remerciements aux membres du
jury pour m'avoir fait l'honneur d'évaluer mon travail.*

*A travers ce mémoire, j'adresse ma reconnaissance à tous les
enseignants qui ont
contribué à ma formation.*

Liste des figures

Liste des figures

Figure I-1 : le ploychlorure de vinyle.....	2
Figure I-2 : le polybutadiene-styrène.....	2
Figure I-3 : macromolécule ramifiée.....	3
Figure I-4 : variation du module d'élasticité d'un élastomère en fonction de la température et représentation de la zone de transition vitreuse.....	4
Figure I-5 : structure amorphe.....	5
Figure I-6 : illustration de la réticulation.....	9
Figure I-7 : effet du soufre sur le poly-isoprène cis 1,4 (NR).....	9
Figure I-8 : variation des propriétés en fonction du taux de réticulation.....	10
Figure I-9 : les différentes échelles de tailles des charges.....	10
Figure I-10 : gomme liée et gomme occluse.....	11
Figure II-1 : formation sous contraintes d'un arrangement ordonné.....	22
Figure II-2 : courbe de fluage.....	23
Figure II-3 : courbe de relaxation.....	24
Figure II-4 : illustration du comportement hystérétique.....	24
Figure II-5 : illustration de l'effet Mullins.....	25
Figure II-6 : représentation de l'évolution de la pression interne en fonction du déplacement en traction uniaxiale pour un EPDM.....	26
Figure II-7 : représentation de l'évolution de la pression interne en fonction du déplacement en traction biaxiale pour un EPDM.....	27
Figure II-8 : représentation de l'évolution de la pression interne en fonction du déplacement en traction équi-biaxiale pour un EPDM.....	27
Figure II-9 : caractéristique de compression uniaxiale des élastomères.....	28
Figure II-10 : cisaillement d'un prisme d'élastomère.....	28

Figure II-11 : caractéristique de cisaillement.....29

Figure III-1 : illustration des paramètres géométriques de la membrane gonflée.....32

Figure IV-1 : dispositif des essais.....34

Figure IV-2 : évolution de la pression interne en fonction de la hauteur de la bulle pour membrane de 30 mm.....35

Figure IV-3 : évolution de la pression interne en fonction de la hauteur de la bulle pour une membrane de diamètre 50 mm.....36

Figure IV-5 : évolution de la pression en fonction de la hauteur de la bulle pour une membrane de diamètre 90 mm.....37

Figure IV-6 : les différentes courbes ‘pression interne en fonction de la hauteur’37

Figure IV-7 : Evolution de la pression de rupture en fonction du diamètre de la membrane.....39

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les élastomères	
Introduction.....	2
I. 1) Notions fondamentales.....	2
I.1.1) Le terme polymère.....	2
I.1.2) La macromolécule.....	2
I.1.3) La température de transition vitreuse.....	3
I.2) Définition d'un élastomère.....	4
I.3) Historique.....	5
I.3.1) La découverte et l'industrialisation.....	5
I.3.2) L'arrivée des élastomères de synthèse.....	6
I.4) La formulation.....	7
I.4.1) La réticulation.....	8
I.4.2) Le renforcement.....	10
I.5) Les principaux élastomères.....	12
I.5.1) Les élastomères d'usage courant.....	12
I.5.1.1) Le caoutchouc naturel (NR).....	12
I.5.1.1.1) Propriétés.....	12
I.5.1.1.2) Applications.....	12
I.5.1.2) Le poly (butadiène styrène) (SBR).....	12
I.5.1.2.1) Propriétés.....	13
I.5.1.2.2) Applications.....	13
I.5.1.3) Le polybutadiène (BR).....	13
I.5.1.3.1) Propriétés.....	13
I.5.1.3.2) Applications.....	14
I.5.1.4) Le poly-isoprène synthétique.....	14
I.5.1.4.1) Propriétés.....	14
I.5.1.4.2) Application.....	14
I.5.1.5) Le copolymère butadiène acrylonitrile (NBR).....	15
I.5.1.5.1) Propriétés.....	15

I.5.1.5.2) Applications.....	15
1.5.1.6) Le polychloroprène (CR).....	15
I.5.1.6.1) Propriétés.....	16
I.5.1.6.2) Applications.....	16
I.5.1.7) Le copolymère isobutylène-isoprène (IIR).....	16
I.5.1.7.1) Propriétés.....	16
I.5.1.7.2) Applications.....	17
I.5.1.8) Les caoutchoucs d'éthylène et de propylène (EPM, EPDM)	17
I.5.1.8.1) Propriétés.....	17
I.5.1.8.2) Applications.....	18
I.5.2) Les élastomères spéciaux.....	18
I.5.2.1) Les silicones.....	18
I.5.2.1.1) Propriétés.....	18
I.5.2.1.2) Applications.....	18
I.5.2.2) Les polyuréthanes.....	19
I.5.2.2.1) Propriétés.....	19
I.5.2.2.2) Applications.....	19
I.5.2.3) Le polysulfure.....	19
I.5.2.3.1) Propriétés.....	19
I.5.2.3.2) Applications.....	19
I.5.2.4) Les élastomères fluorés.....	20
I.5.2.4.1) Propriétés.....	20
I.5.2.4.2) Applications.....	20
I.5.2.5) Le polyéthylène chlorosulfone.....	20
I.5.2.5.1) Propriétés.....	20
I.5.2.5.2) Applications.....	20
Conclusion	21

Chapitre II : Caractéristiques mécaniques des élastomères

Introduction.....	22
II.1) Elasticité non linéaire	22
II.2) L'incompressibilité	23
II.3) Le fluage et la relaxation.....	23
II.3.1) Le fluage.....	23
II.6) La relaxation.....	23

II.4) Phénomènes dissipatifs.....	24
II.4.1) La viscosité.....	24
II.4.2) L'effet Mulins.....	25
II.5) Elasticité et modules.....	25
II.5.1) Comportement en traction.....	26
II.5.1.1) Traction uniaxiale	26
II.5.1.1) Traction biaxiale et équi-biaxiale.....	27
II.5.2) Comportement en compression	28
II.5.3) Comportement en cisaillement.....	28
Conclusion.....	29

Chapitre III : Etude théorique du comportement de la membrane

Introduction

III.1) Modèles phénoménologiques.....	30
III.2) Les essais de traction.....	30
III.2.1) Essai uniaxiale.....	30
III.2.2) Essai équi-biaxiale.....	31
III.3) Relations mathématiques.....	31
Conclusion.....	33

Chapitre IV : Etude expérimentale du comportement de la membrane

Introduction.....	34
IV.1) Matériel utilisé	34
IV.2) Protocole expérimentale.....	35
IV.3) Résultats des essais	35
IV.4) Equations des courbes	38
IV.5) Interprétation des résultats	38
IV.6) Courbe de la pression de rupture	38
IV.7) Identification des paramètres du modèle de Mooney-Rivlin	39
Conclusion.....	40
Conclusion générale	41

Introduction générale

Introduction générale

Les ingénieurs et les techniciens des bureaux d'études industriels sont familiarisés avec les matériaux métalliques et plastiques qu'ils savent utiliser et exploiter. Il en va généralement autrement avec les matériaux élastomériques vis-à-vis desquels apparaît un sentiment de méfiance, tout au moins un réflexe de prudence, et ce malgré que ces matériaux en raison de leur grande déformabilité réversible et leur caractère amortisseur ont envahi au cours de ces dernières décennies pratiquement tous les secteurs industriels, de l'industrie des loisirs à l'aérospatial en passant par l'automobile et l'aéronautique. A ce fait, plusieurs raisons peuvent être avancées comme par exemple :

- La faible part faite à ces matériaux dans l'enseignement des écoles de mécanique.
- Le fait qu'il existe plusieurs types d'élastomères, mais aussi le grand nombre de formules chimiques réalisables à partir d'un même élastomère, d'où une vaste gamme de mélanges possibles parmi lesquels le choix est difficile.

Il faut ajouter à cela que ces matériaux sont difficiles à étudier car leur caractéristique de déformation est essentiellement non linéaire et fortement influencée par de nombreux paramètres comme la température et la vitesse de la sollicitation, ce qui fait que les hypothèses de calcul doivent être formulées judicieusement et avec beaucoup de précautions.

L'objectif de ce modeste travail est d'étudier le comportement sous pression de membranes en élastomère extraites d'une chambre à air d'une voiture. C'est-à-dire nous allons observer la variation de la pression à l'intérieur de la bulle formée par la membrane gonflée en fonction de sa hauteur (ou volume), et ce en utilisant des membranes de diamètre différent pour voir si ce dernier influe ou pas sur le comportement. Nous allons ensuite essayer de démontrer si, notre matériau suit le modèle de Mooney-Rivlin, en exploitant les valeurs expérimentales pour trouver les paramètres du modèle afin de tracer théoriquement la courbe de la pression interne en fonction de la hauteur de la bulle et de la comparer aux courbes expérimentales pour voir si le modèle est bon. La démarche sera la suivante :

Le premier chapitre sera consacré à définir les élastomères et mentionner leur évolution à travers l'histoire, puis jeter la lumière sur leur nature microscopique et les propriétés des plus connus d'entre eux ainsi que leurs applications. Le second chapitre sera réservé à exposer leurs caractéristiques mécaniques. Le troisième chapitre consistera à étudier théoriquement le comportement de la membrane en supposant qu'elle est régie par le modèle de Mooney-Rivlin. Quant à la dernière partie (quatrième chapitre), il sera consacré aux résultats expérimentaux effectués sur les membranes, ainsi que la discussion de la validité du modèle adopté dans notre étude théorique.

Chapitre I

Généralités sur les élastomères

Introduction

Dans ce chapitre consacré à des généralités sur les élastomères, nous allons brièvement définir qu'est ce qu'un élastomère, évoqué l'origine de ces substances et l'évolution qu'elles ont connues avec le temps, puis aborder la formulation (passage d'un élastomère proprement dit à un mélange), présenter les principaux élastomères d'usage courant et spéciaux, ainsi que quelques unes de leurs propriétés, et leurs applications. Mais avant d'entamer le sujet, il convient de passé par l'explication de quelques notions de base indispensables.

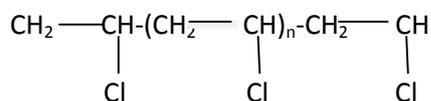
I.1) Notions fondamentales

I.1.1) Le terme polymère

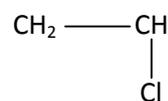
Le mot « polymère » issu du grec (*pollus* qui signifie plusieurs et *meros* qui veut dire partie), est en chimie un concept qui peut être confondu à la macromolécule. Tandis que pour un matériau donné, il sous entend qu'il est constitué (totalement ou principalement) de macromolécules [1].

I.1.2) La macromolécule

Une macromolécule est constituée d'un ensemble de plusieurs molécules (généralement organiques) liées entre elles par des liaisons covalentes. Elle est souvent assimilée à une chaîne dont les chainons représentent les motifs élémentaires (les molécules). Si, de ce fait la macromolécule est appelée « polymère », le chainon lui est dit « monomère ». Un polymère porte le nom du/des monomère le constituant précédé par le préfix « poly » comme par exemple : le poly (chlorure de vinyle) formé à base de la molécule « chlorure de vinyle » (figure I-1) et, le poly (butadiène-styrène) issu des monomères «butadiène» et « styrène » (figure I-2).

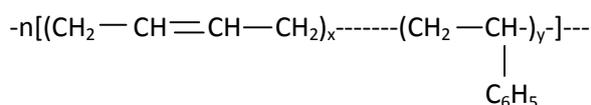


Poly (chlorure de vinyle)

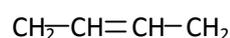


Chlorure de vinyle

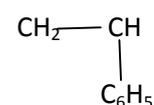
Figure I-1 : le polychlorure de vinyle.



Poly (butadiene-styrène)



butadiène



styrène

Figure I-2 : le polybutadiene-styrène

Selon la fractionnalité f du monomère, c'est-à-dire le nombre de liaisons covalentes qu'il peut lier avec ses homologues, on distingue deux types principaux de macromolécules [2] :

- Si $f = 2$ les macromolécules sont dites linéaires ou monodimensionnelles. Celles-ci ont la forme d'un collier.
- Si $f > 2$ les macromolécules sont dites tridimensionnelles. Dans ce cas, les monomères présentent des liaisons covalentes dans les trois dimensions de l'espace ce qui conduit à la formation d'un réseau dont la densité augmente avec l'augmentation de f . étant donné que tous les motifs élémentaires possèdent au moins trois points de liaison, un matériau formé de ce genre de macromolécules ne peut contenir qu'une seule.

Il existe deux types intermédiaires :

- celui de molécules ramifiées (figure I-3) qui résulte d'accidents pendant la polymérisation. Ces ramifications dont le nombre et la longueur varient avec la nature des monomères et la méthode de polymérisation ont un impacte considérable sur les propriétés mécanique du matériau.



Figure I-3 : macromolécule ramifiée

- celui des macromolécules bidimensionnelles pour lesquelles les liaisons interatomiques s'établissent dans un plan. De telles macromolécules ne sont pas réalisables (du moins pour l'heure) synthétiquement pour les composés organiques. On les trouve cependant dans des composés minéraux (graphite, talc, mica, etc.) ou organiques naturels (kératine de la laine, etc.).

I.1.3) Température de transition vitreuse T_g [3]

L'étude des variations d'une propriété physique déterminée d'un polymère quelconque en fonction de la température, à met en évidence deux zones de température particulièrement distinctives. En effet, sur un intervalle de température 'très étroit' et pour un polymère donné, des changements brutaux et importants surviens sur certaines caractéristiques telles que, le coefficient de dilatation, le volume spécifique, le module d'élasticité...etc. Cet intervalle réduit à une valeur moyenne est appelé température de transition vitreuse noté T_g ou T_v . Cette

dénomination est due au fait que sur cet intervalle de température très étroit, le polymère passe d'un état liquide très visqueux à un état vitreux (figure I-4).

La température de transition vitreuse est donc une température au-dessous de laquelle, un polymère amorphe est rigide tandis qu'au-dessus il devient mou (caoutchouteux).

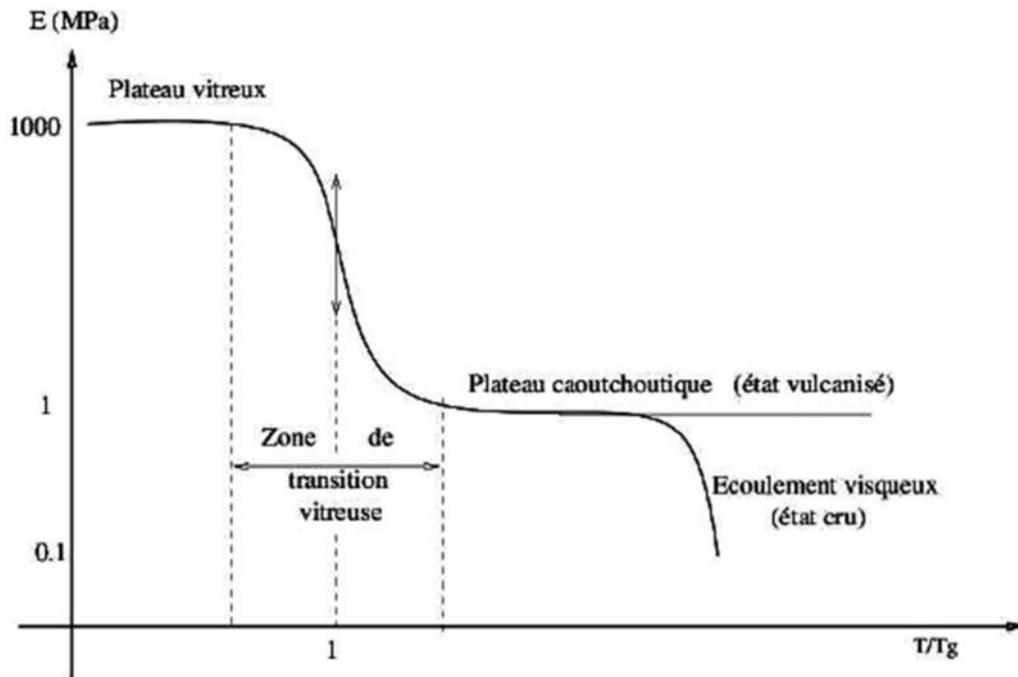


Figure I-4 : variation du module d'élasticité d'un élastomère en fonction de la température et représentation de la zone de transition vitreuse [9].

I.2) Définition d'un élastomère

Un élastomère est un polymère qui se distingue par sa caractéristique de déformations élastiques visibles à l'œil nu. Ce polymère est constitué de longues chaînes macromoléculaires linéaires ou peu ramifiées, contenant plus de 10000 monomères [5] formés essentiellement de carbone et d'hydrogène à côté desquelles d'autres atomes peuvent être figurés comme le chlore ou l'azote. Les chaînes macromoléculaires sont flexibles et peuvent avoir plusieurs conformations spatiales. De ce fait, leur arrangement est tellement désordonné que l'aspect qu'elles offrent ressemble à celui d'un plat de spaghettis : c'est la structure amorphe (figure I-5). C'est cette flexibilité des chaînes jointe à leurs faibles interactions mutuelles qui est à l'origine de l'élasticité remarquable du polymère appelé dès lors 'élastomère'. En effet, le préfixe (élasto) sous-entend l'élasticité du matériau et le suffixe (mère) rappelle sa nature polymérique. Toutefois, le terme n'est pas réservé uniquement au polymère présentant les caractéristiques

macromoléculaires décrites ci-dessus (élastomère brut), mais aussi à tout mélange à base de ce dernier (élastomère réticulé ou renforcé).

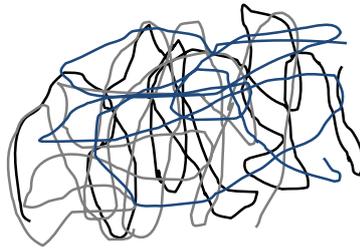


Figure I-5 : structure amorphe

I.3) Historique

I.3.1) La découverte et l'industrialisation

L'histoire commence par la découverte et l'observation du produit naturel : une matière compacte, souple et résistante, issue de la coagulation de la sève d'un arbre.

Ce produit était utilisé par les indiens d'Amérique du sud, vraisemblablement pour faire des colles ou des revêtements. Christophe Colomb et ses compagnons sont les premiers européens qui l'ont remarqué comme l'évoque le journal de la seconde expédition. Dès 1521, P. Martire de Anghiera rapporte l'utilisation de la résine souple d'un arbre par les indigènes du Mexique et, en 1615 Torquemada signale que les espagnols au Mexique imperméabilisent leurs capes avec du « lait » coulant d'un arbre. Mais ce n'est qu'en 1737 que Charles Marie de la Condamine rapportera de l'équateur une masse élastique appelée « caao-tchu » par certains indigènes et « Hève » par d'autres, et suscitera un intérêt scientifique et économique pour la matière, que l'on appellera « caoutchouc ».

François Fresneau découvrira l'arbre producteur en 1747. Macquer et Herissant, deux chimistes travailleront sur la solubilité de la gomme (le caoutchouc brut). Berniard lui incorporera des matières colorantes, et Gossard le soudera à lui-même.

Les français ont ouvert la voie de la connaissance, les anglais vont permettre le démarrage économique : jusqu'en 1820 la seule application pratique restera la gomme à effacer mise en point par l'Anglais Magalhaens. M. Fraday travaillera sur la constitution chimique de la gomme. En 1826 G. Williams isolera "l'isoprène monomère". Charles Macintosh avec la découverte du benzol permettra la réalisation pratique de dissolution qui permettront d'imperméabiliser les tissus, cuirs et papiers, il sera à l'origine de la première véritable industrie. Charles Goodyear

découvrira la réticulation par le soufre en 1839. Ayant laissé par hasard un morceau de latex d'hévéa coagulé à proximité d'un poêle à charbon qui fumait (le charbon des appalaches est très soufré), il a retrouvé une masse noircie, mais aux propriétés élastiques nettement améliorées. Cependant il ne brevetera qu'en 1844 la technique appelé plus tard « la vulcanisation » : sous l'action de la chaleur le caoutchouc mêlé à une petite quantité de soufre devient parfaitement élastique, mêlé à une grande quantité il devient rigide (l'ébonite). Le britannique T.Hancock inventera le premier masticateur à caoutchouc en 1823, il s'associera à Macintosh pour mettre au point la fabrication de tissus imperméables, c'est également lui qui nommera « vulcanisation » le procédé découvert par Goodyear.

A partir de la seconde moitié du 19^{ième} siècle, il est possible de mastiquer le caoutchouc brut (la gomme) pour obtenir une pâte plastique, de lui incorporer des produits chimiques, on sait dissoudre la gomme et réaliser des enductions. Les propriétés du caoutchouc vulcanisé, notamment l'imperméabilité (à l'eau et, dans certaine proportion aux gaz), et souplesse vont engendrer l'apparition de produits divers dont le nombre ira on s'accroissant : vêtements imperméables, chaussures, joints, enveloppes de ballons, élastiques pour bretelles, tubes et tuyaux, sondes et canules chirurgicales. L'ère de l'exploitation industrielle peut commencer.

Après la réussite de la transplantation de l'hévéa dans la partie équatoriale asiatique par les Anglais en 1876, des études apportées à la sélection des plantes, à la maîtrise de la saignée, au traitement du latex permettront une augmentation du rendement de l'hectare, indispensable pour répondre à la demande croissante, surtout après l'apparition du pneumatique.

A coté du pneumatique, l'automobile doit résoudre des problèmes d'étanchéité moteur et carrosserie : ainsi naissent des tuyaux de toute sorte, des joints pour circuits, des joints pour les vitres, le pare-brise, et les portes, des courroies de transmission...etc. les premiers produits antivibratoires seront utilisés au USA avant 1939. On réalise des produits pour le grand public (vêtements, chaussures) et pour la médecine (tubes, sondes, gants, tissus imperméable). L'armée utilise masques à gaz, ballons d'observation...etc. En fin, une industrie nouvelle, le transport d'électricité utilise le caoutchouc pour ses propriétés isolantes. Parallèlement, les produits nécessaires à la formulation des mélanges à base de caoutchouc sont met au point et industrialisés. Des oxydes minéraux sont utilisés pour accélérer la réaction de vulcanisation.

I.3.2) L'arrivée des élastomères de synthèse

Au début du 20^{ième} siècle, des tentatives de synthétisation ont vues le jour, comme celle de F.Hofmann qui a réussi la synthèse du poly-isoprène à partir de crésol extrait du goudron, qui

sera améliorée et utilisée en pneumatique en 1912. Cependant, ce n'est qu'en 1929 que le premier vrai élastomère de synthèse apparut par la copolymérisation du butadiène et du styrène avec le sodium. La marque Buna (de butadiène et natrium) est déposée, et en 1930, le styrène est remplacé par l'acrylonitrile, ce sera le premier caoutchouc nitrile : Buna N, en 1932 au USA la firme « Dupont de Nemours » met au point la polymérisation d'un dérivé chloré du butadiène : le chloroprène. Le polymère du chloroprène sera nommé néoprène, la marque déposée deviendra presque un nom générique et ce sera par la suite un succès scientifique, technique et économique mondial. En 1937 la copolymérisation isobutène-isoprène est réalisée, ainsi né le premier caoutchouc Butyle.

La seconde guerre mondiale interrompt l'approvisionnement en latex, ce qui favorise la production des élastomères de synthèse : production de Buna en Allemagne et copolymérisation du butadiène styrène et butadiène acrylonitrile au USA. Au lendemain de la guerre, la production de caoutchouc naturel reprend, et la fabrication des principales familles de caoutchouc synthétique est lancée : styrène butadiène rubber (SBR), nitrile (NBR), polychloroprène, butyle, polybutadiène (BR), et peut après polyisoprène de synthèse. Seul les EPDM nés en 1951 des travaux de Ziegler et Natta, ne sont pas encore disponibles.

À côté des grandes familles d'élastomères dont la synthèse s'améliorera sans cesse, se développent de nouvelles molécules répondant à des besoins particuliers, à savoir : la résistance aux fluides agressifs, à la chaleur, au froid...etc. parmi ces élastomères, le silicone, les polysulfures, les caoutchoucs fluorés et les nombreux types issus de modifications des caoutchoucs classiques.

Les élastomères n'étant pas généralement utilisés seuls, mais formulés (environ 60% de plus en masse [5]) les adjuvants nécessaires (charges, réticulants, anti-oxygène, colorants, plastifiants...etc) ont aussi évolué. Ce sont pour la plupart des dérivés du pétrole, à l'exception de certaines charges (en général, des oxydes métalliques). Les produits finis, nés de la conjugaison des élastomères proprement dits (élastomères de bases), et des adjuvants se sont complexifiés et sont devenus souvent des matériaux composites sophistiqués : pneumatiques, supports antivibratoires à raideur multiples (voir pilotés), courroies crantées, joints tournants à plage magnétiques pour l'ABS, etc.

I.4) La formulation [5]

La formulation consiste à ajouter des adjuvants spécifiques à un élastomère brut, dans le but d'apporter des changements à ses caractéristiques comme ses propriétés physiques et chimiques, mais surtout mécaniques qui sont jusqu'ici largement insuffisantes pour répondre au besoin.

Le premier objectif majeur recherché par la formulation est l'obtention d'une élasticité satisfaisante (élastomère réticulé), le second est l'amplification et la modification de certaines caractéristiques mécaniques, tel que la dureté, la résistance à l'abrasion ou au déchirement (élastomère renforcé), le troisième est la résistance au vieillissement.

I.4.1) La réticulation

A une température supérieure à T_g de l'élastomère, et sous une contrainte, les monomères se mettent au mouvement, conduisant au changement des conformations spatiales des chaînes macromoléculaires qui se manifeste macroscopiquement par la déformation du matériau. Ce mouvement est réversible, c'est à dire que les chaînes regagnent leurs positions initiales après la disparition de la sollicitation (déformation élastique). Mais, si la contrainte est suffisante pour vaincre les faibles interactions entre les macromolécules, elle entraîne aussi un glissement des chaînes les unes par rapport aux autres : On dit que l'élastomère brut se comporte comme un fluide très visqueux [4]. L'irréversibilité du glissement qui se traduit par une déformation plastique du matériau sous la faible sollicitation est le principal point faible des élastomères bruts. En outre, leur élasticité médiocre empêche d'en tirer profit.

La réticulation est la création de connections qualifiées de ponts entre les macromolécules. Ceux-ci donnent naissance à un réseau de liaisons tridimensionnel suffisant pour empêcher le glissement éventuel des chaînes, mais suffisamment lâche pour permettre la déformation des mailles ainsi formées, et ce grâce toujours à la flexibilité des chaînes (figure I-6). Ainsi, le caractère visqueux de l'élastomère brut cède à un caractère élastique prédominant qui peut même devenir hyper-élastique, si le réseau tridimensionnel résulte de connections suffisamment éloignées les unes des autres et relativement faibles pour ne pas affecter la flexibilité des chaînes [4].

Le pontage (réticulation) est généralement réalisé par l'incorporation à l'élastomère brut d'un élément destiné à cette fin. Le plus répandu et le plus ancien est le soufre, dont l'insertion se fait par intermédiaire d'une température élevée. Son effet sur les chaînes macromoléculaires est illustré par la figure I-7. En fait le procédé rend aussi l'élastomère insoluble, au plus il

gonfle dans ses anciens solvants, il y a là un autre bénéfice, celui de la résistance à certains produits chimiques.

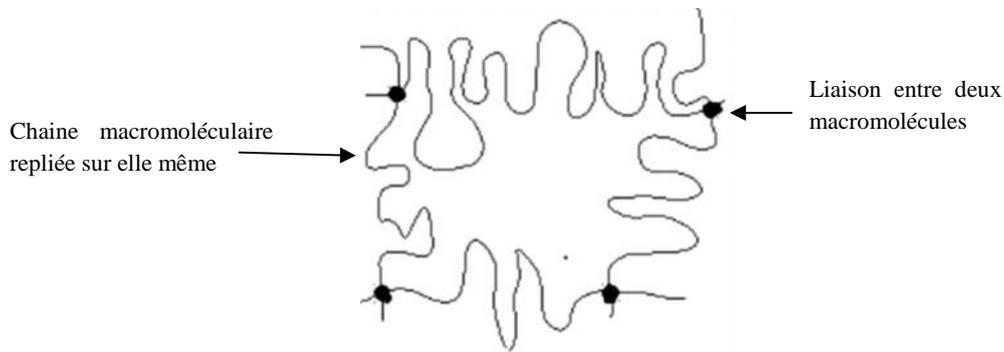


Figure I-6 : illustration de la réticulation.

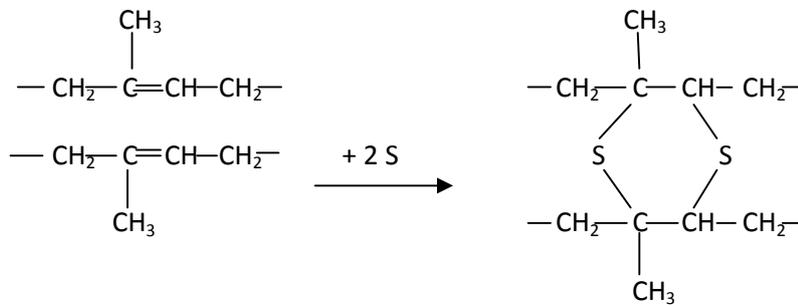


Figure I-7 : effet du soufre sur le poly-isoprène cis 1,4.

Comme il était déjà signalé, les matériaux élastomères sont dotés d'une remarquable élasticité. Ceci explique la raison pour laquelle ils sont presque tous réticulé lors de leurs élaborations. Cependant, la réticulation influence aussi d'autres propriétés mécaniques et physiques de la pièce (figure I-8), et l'action sur le taux (densité) de réticulation noté ret^1 de qui elles dépendent s'avère généralement insuffisante pour trouver un compromis entre les différentes performances recherchées. De plus, si elle confère au caoutchouc naturel des propriétés mécaniques convenables (mais peu durables), elle est généralement insuffisante pour certains élastomères synthétiques [5].

¹) : Le taux de réticulation renseigne sur le nombre de ponts existants dans un échantillon polymère.

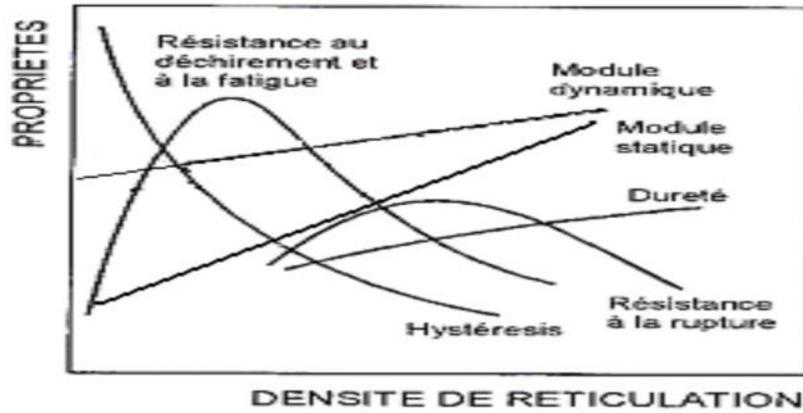


Figure I-8 : variation des propriétés en fonction du taux de réticulation [6]

I.4.2) Le renforcement [4], [8], [9]

On entend par renforcement l'amélioration de certaines propriétés mécaniques d'un élastomère par incorporation à ce dernier de fines poudres (le plus souvent les noirs de carbone ou les sillises) lors de son élaboration. L'adsorption de ces poudres par l'élastomère jointe à leurs actions fait qu'elles sont dites charges renforçantes. En effet, le matériau ainsi obtenu est multiphasé à l'échelle intermédiaire, il se compose de l'élastomère réticulé (la gomme) appelé dès lors la matrice, et de particules de charges ayant des formes complexes et des tailles disparates, éparpillés et suspendues dans la matrice.

Les particules élémentaires des charges ne sont pas isolés les unes des autres, elles se lient de façon aléatoire et irréversible et forment des grappes plus ou moins compactes appelés les agrégats (figure I-9). Ces agrégats à leur tour tendent à se rassembler pour donné naissance à des ensembles appelés les agglomérats, or les liaisons formant ces derniers sont tellement faibles qu'elles cèdent lors du malaxage des charges et l'élastomère, ce qui fait que les charges renforçantes contenus dans la matrice se présentent généralement sous forme d'agrégats.

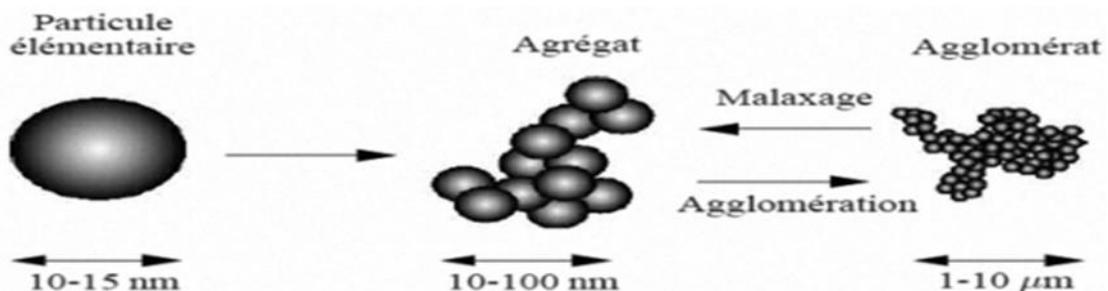


Figure I-9: Les différentes échelles de tailles des charges [8]

Les phénomènes macroscopiques observés sur un élastomère renforcé découlent des interactions chimiques et physiques entre les charges et la matrice. En effet, lors du malaxage, et vu de la structure poreuse des agrégats, une quantité d'élastomère s'intercale dans les vides interparticulaires (la partie emprisonnée par l'agrégat est dite 'gomme occluse intra' et celle se trouvant dans ses interstices est dite 'gomme occluse inter'). Ainsi, des segments de chaînes macromoléculaires voient leur degré de liberté diminué, auxquels s'ajoutent des interactions (relativement faibles) qui se développent à l'interface agrégat/élastomère. D'autre part, une couche d'élastomère de forte raideur enveloppe l'agrégat et colle parfaitement à lui, celle-ci est appelée gomme liée (figure I-10). On gros, les propriétés mécaniques et physiques d'un élastomère renforcé sont étroitement liées à la répartition des particules dans la matrice, de leurs surfaces effectives accessibles aux chaînes élastomériques, et de leurs tailles. Cette dernière caractéristique des particules ne doit pas dépassée 10 μ m pour éviter les concentrations de contraintes [4].

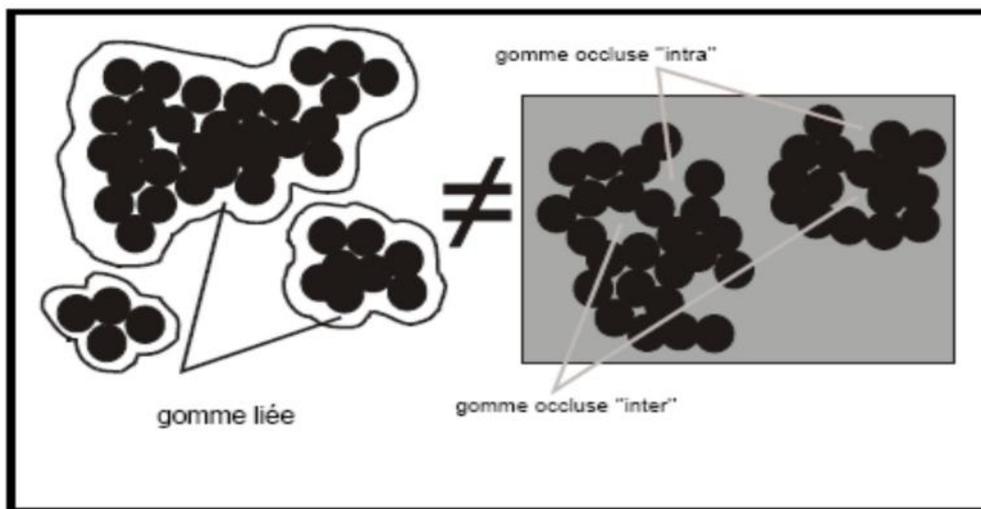


Figure I-10 : gomme liée et gomme occluse [9]

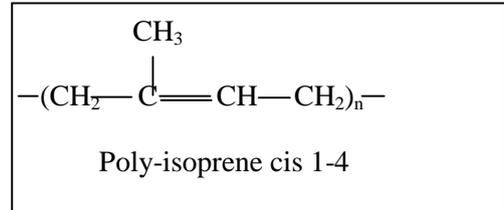
L'adjonction des charges renforçantes améliore la durée de vie de l'élastomère, et globalement l'accroissement du taux de charges, c'est-à-dire le nombre de charges renforçantes présentes dans un volume donné entraîne l'accroissement de la résistance à la rupture du matériau, de sa rigidité et de son module, ainsi que son hystérésis qui sera abordé au chapitre suivant.

I.5) Les principaux élastomères [5], [7]

I.5 .1) Les élastomères d'usage courant

I.5.1.1) Le caoutchouc naturel (NR)

Comme il a été signalé dans l'historique, cet élastomère est extrait du latex, un liquide laiteux fourni par certains arbres dont l'hévéa est le principal.



I.5.1.1.1) Propriétés

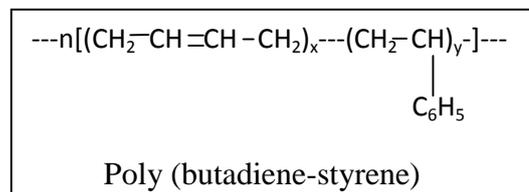
- Résilience² et élasticité exceptionnelles.
- Résistances à l'abrasion, à la déchirure, à la rupture élevées.
- Bonne flexibilité à basse température.
- Bonne adhésion aux textiles et métaux.
- Faible résistance au vieillissement.
- La température d'utilisation en continu va de -50°C à 70°C.

I.5.1.1.2) Applications

L'ensemble des propriétés, notamment la haute résilience et la résistance à la déchirure et à la rupture font que cet élastomère est très utilisable dans les produits à usage dynamique, comme les pneumatiques (flancs, bandes de roulement) du poids lourd et d'aviation surtout. Il s'utilise aussi à l'état pur (sans renforcement) pour la fabrication de produits entrants en contact avec la santé, comme les gants médicaux, et les tétines de biberons.

I.5.1.2) Le poly (butadiène-styrène) (SBR)

Le nombre (x) des molécules butadiènes, et le nombre (y) des molécules styrènes sont variables, mais leur rapport le plus courant, c'est-à-dire (x/y) est de (23,5/76,5).



Cet élastomère a été développé pour servir d'alternative à l'absence du NR, et il est aujourd'hui l'élastomère synthétique le plus utilisé au monde.

²) : La résilience est le rapport de l'énergie restituée sur l'énergie fournie pour une déformation donnée, elle reflète l'élasticité du matériau et renseigne sur sa viscosité. Une haute résilience signifie une faible viscosité et donc un faible échauffement du matériau soumis à des sollicitations répétées [5].

I.5.1.2.1) Propriétés

- Renforcé, il possède des propriétés mécaniques statiques proches de celle du NR, sauf pour la résistance à la déchirure qui est plus faible.
- Excellente résistance à l'abrasion et aux flexions.
- Faible résilience par rapport au NR.
- Résistance au vieillissement relativement supérieure à celle du NR.
- Faible résistance aux liquides hydrocarbonés.
- La température d'utilisation : -50°C à 80°C.

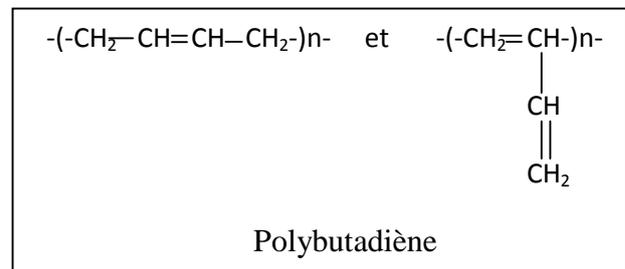
I.5.1.2.2) Applications

Les SBR sont aussi utilisés dans les pneumatiques comme le NR, mais uniquement pour les véhicules relativement légers à cause de leur faible résilience et résistance au déchirement. Ils trouvent aussi des applications dans des produits tel que, les joints, les tuyaux, les tapis et les articles de sport. Ils sont souvent utilisés en coupage avec d'autres élastomères pour optimiser les performances du produit.

I.5.1.3) Le polybutadiène (BR)

Bien qu'il fût inventé avant le SBN, il ne sera produit industriellement que plus tard, faute des faibles propriétés des produits alors obtenus.

Le BR est réticulé par le soufre.

**I.5.1.3.1) Propriétés**

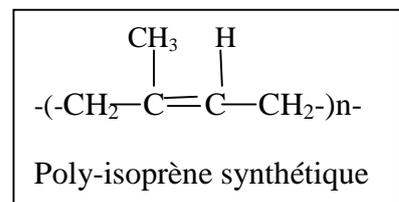
- Faible résistance au déchirement.
- Faible résistance aux hydrocarbures et aux huiles.
- Remarquable tenue à basse température.
- Très faible échauffement interne sous sollicitations dynamiques.
- Excellente résistance à l'abrasion, mais l'objet glisse sur le sol mouillé.
- Résistance au vieillissement (air chaud, ozone) identique à celle du SBR.

I.5.1.3.2) Applications

L'ensemble des propriétés révèlent que l'intérêt du BR réside dans, sa tenue à très basse température, son faible échauffement interne, et sa remarquable tenue à l'abrasion. Ceci le destine à la fabrication de bandes de roulement de pneumatiques (c'est pour cette fin qu'il a été développé) dans lesquelles il est utilisé en coupage avec le NR et le SBR, pour améliorer l'adhérence et les propriétés mécaniques. Il marque aussi sa présence dans le « polystyrène choc », un mélange de polystyrène et de polybutadiène.

I.5.1.4) Le poly-isoprène synthétique (IR)

C'est l'un des élastomères les plus produits à grande échelle, le démarrage de la production industrielle a débuté au milieu des années 70. Le IR est une tentative de créé par voie de synthèse une copie du NR, mais cette copie n'est pas encore égale à l'original. Sa réticulation se fait souvent par le soufre.



I.5.1.4.1) Propriétés

- Résistance à la rupture et au déchirement légèrement inférieures à celles du caoutchouc naturel.
- Excellente résilience à chaud.
- Très faible déformation rémanente à la compression, meilleure que celle du NR.
- Faible résistance au vieillissement (oxygène, ozone, chaleur).
- Faible résistance aux solvants hydrocarbonés et aux huiles.
- Bonne résistance aux solvants oxygénés.
- Plage d'utilisation en température : -50°C à 70°C.

I.5.1.4.2) Applications

Le domaine d'utilisation de l'IR est voisin de celui du NR. En plus, il est plus pur et moins coloré que ce dernier, ce qui permet son utilisation dans les produits de cosmétique et de santé.

I.5.1.6.1) Propriétés

- Une fois réticulé il présente des bonnes propriétés mécaniques dû à la cristallisation de la microstructure sous contraintes, et ce sur une large plage de température. De Ce fait, il peut être utilisé sans renforcement.

- Résistance aux acides et à quelques hydrocarbures.
- Résistance au vieillissement (oxygène, ozone).
- Bonne résistance à la rupture, à l'abrasion, et aux flexions répétées. Plus une bonne résilience et tenue en température, qui fait de lui l'un des meilleurs élastomères classiques.

I.5.1.6.2) Applications

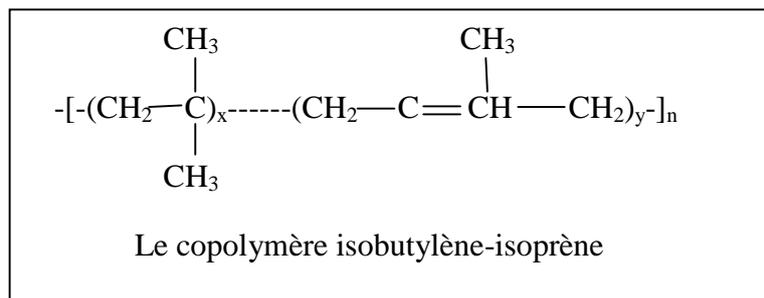
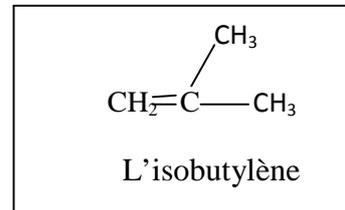
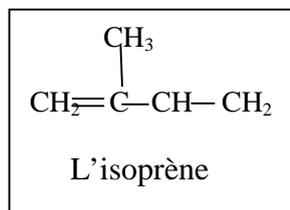
Il peut se trouvé presque dans tous les produits dits caoutchouteux comme :

- Les pièces techniques, pour les moyens de transport, pour les infrastructures (ports, aéroports, etc.) et pour l'industrie chimique.
- Courroies, joints, tuyaux, câbles, gants, articles de sport et de loisirs, et combinaisons de plongée.

I.5.1.7) Le copolymère isobutylène-isoprène (IIR)

Il a été développé au USA dans les années 40 et utilisé surtout pour son imperméabilité aux gaz.

Il est réticulé aussi par le soufre.



I.5.1.7.1) Propriétés

- Excellente résistance à la chaleur et au vieillissement (oxygène, ozone).
- Excellente imperméabilité aux gaz.
- Excellente caractéristique d'amortissement de -40 à 70°C.
- Bonne résistance à l'abrasion.

- Faible absorption d'eau et bonne résistance aux huiles végétales et animales, et certains agents chimiques comme les bases.

- La plage de température d'utilisation en continu est de -60 à 110.

I.5.1.7.2) Applications

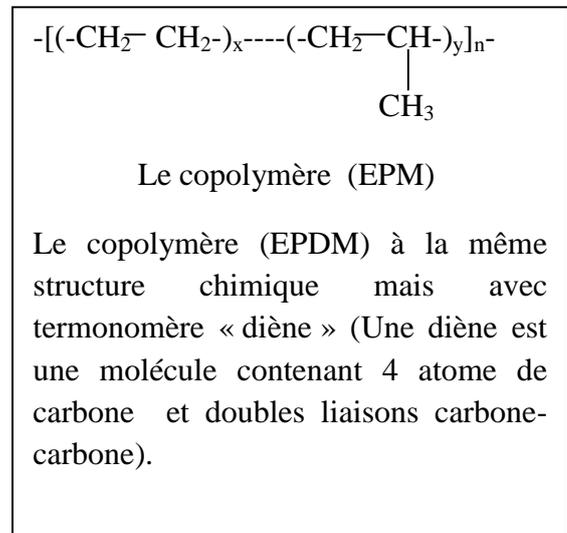
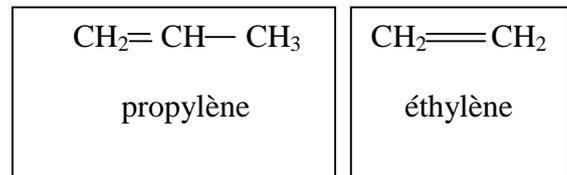
Le IIR est utilisé pour : la fabrication de chambres à air pour tous types de pneumatiques, les revêtements internes des pneumatiques sans chambre, la fabrication de vessie de vulcanisation (vessie gonflable interne à un moule), la fabrication de courroies de transport de matières chaudes, etc.

I.5.1.8) Les caoutchoucs d'éthylène et de propylène (EPM, EPDM)

EPM : éthylène propylène monomers.

EPDM : éthylène propylène diène monomers.

La réticulation se fait par des peroxydes organiques pour le EPM et pour le EPDM, mais pour ce dernier elle peut se faire aussi par le soufre.



I.5.1.8.1) Propriétés

- Excellente résistance à la chaleur, à l'abrasion, à l'ozone et à l'oxygène.
- Sensibilité vis-à-vis de la lumière et les rayons ultraviolet (UV).
- Faible résistance au déchirement.
- Bonne résistance chimique aux cétones, aux alcools, aux acides et bases dilué.
- La plage d'utilisation en température va de -60 à 150°C.

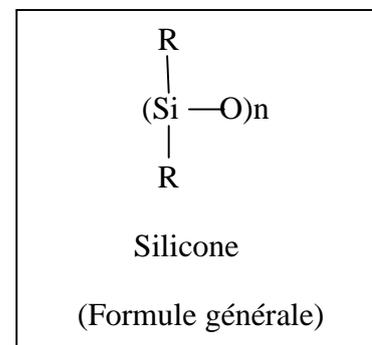
I.5.1.8.2) Applications

Leurs applications principales découlent de leur grande résistance au vieillissement et de leur capacité d'accueillir une charge renforçante pouvant atteindre 5 fois leur masse [5]. Ils sont utilisés généralement pour la fabrication de pièces élastomérique statiques, travaillant sous intempéries voire avec une connotation esthétique comme les joints de pare brise et de glace de portes des véhicules. Ils trouvent aussi des applications dans la câblerie et l'électroménager.

I.5.2) Les élastomères spéciaux

I.5.2.1) Les silicones

Ce sont Les molécules (R) dites groupes attachés aux atomes de silicium (Si) qui donnent différent types de silicones. Si par exemple R est un méthyle (CH₃), on obtient le poly (dimethyl siloxane). Ces groupes sont généralement organiques, et peuvent même contenir du fluor (F), dans ce cas le silicone est dit fluorosilicone.



La réticulation se fait par les peroxydes qui réagissent avec les groupes (R).

I.5.2.1.1) Propriétés

- Les propriétés mécaniques et électriques sont stables sur une large gamme de température (-80 à 250°C).
- Service continu 1000h à 200°C.
- Inertie chimique vis-à-vis de l'oxygène et l'ozone.
- Inertie physiologique.
- Grande perméabilité aux gaz.
- Les propriétés mécaniques sont faibles, notamment la résistance à la rupture et au déchirement.
- Tenue remarquable aux huiles et solvants pour les fluorosilicones.

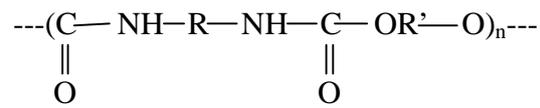
I.5.2.1.2) Applications

Les silicones sont utilisées dans divers domaines comme le bâtiment (joints d'étanchéité ou d'isolation), la médecine (prothèse très utilisées dans les implants d'organes, tuyaux utilisés par exemple pour relier les reins artificiels aux vaisseaux sanguins), l'aéronautique et l'aérospatiale.

I.5.2.2) Les polyuréthanes

AU : polyesteruréthanes.

EU : étheruréthanes.



Formule chimique générale

(R et R' sont des molécules)

I.5.2.2.1) Propriétés

- Excellente résistance à l'abrasion (humide), et au déchirement.
- Bonne imperméabilité aux gaz proche de celle du caoutchouc butyl.
- Excellente tenue au vieillissement (oxygène, ozone, radiations).
- Mauvais comportement sous sollicitations dynamiques.

I.5.2.2.2) Applications

- Bouclier pare chocs des véhicules (au USA), roues motrices de tracteur.
- Chaussure de ski, roue de planches et patins à roulettes
- Pièces diverse, courroies, crible de mines...etc.

I.5.2.3) Les polysulfures (T)

Formule générale

R : groupe généralement organique et, m : nombre supérieur ou égal à 2

I.5.2.3.1) Propriétés

- Caractéristiques mécaniques faibles.
- Excellente résistance aux esters, cétones, alcools, aux huiles et quelques acides.
- Excellente imperméabilité aux gaz.
- Remarquable résistance au vieillissement (l'ozone, la lumière et l'UV).
- La température d'utilisation va de -40 à 100°C.

I.5.2.3.2) Applications

Limité par leur mauvaise stabilité au stockage et leur odeur plus ou moins supportable, on les trouve principalement dans les revêtements des cylindres et l'isolation double vitrage.

I.5.2.4) Les élastomères fluorés

Ils ont été créés pour permettre l'utilisation de produits capables de résister à tous les fluides hydrauliques même sous des températures pouvant dépassés les 200°C. Les premiers élastomères de ce genre ont été des copolymères du difluoéthylène, et du chloro trifluoro éthylène, puis d'autres monomères fluorés ont été utilisés, comme le tétrafluoroéthylène, et l'ether perfloro méthyl vinylique.

La réticulation de ces élastomères se fait soit par les oxydes métalliques soit par les peroxydes organique, selon le polymère et les propriétés recherchées.

I.5.2.4.1) propriétés

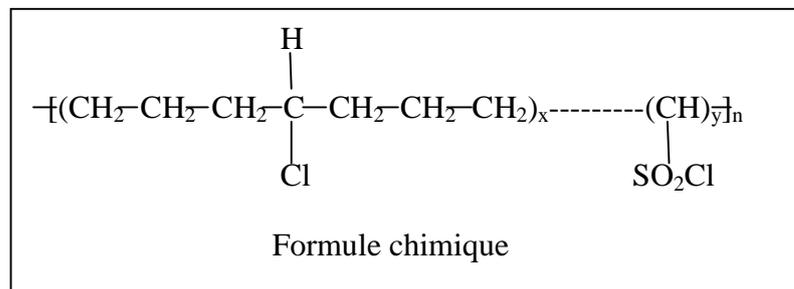
- Propriétés mécaniques moyennes.
- Très bonne résistance à la température.
- Excellente résistance à tous les fluides hydrauliques.

I.5.2.4.2) Applications

Ils sont employés surtout dans l'industrie aéronautique et spatiale, mais aussi dans l'industrie chimique et nucléaire.

I.5.2.5) Le polyéthylène chlorosulfone (CSM)

La réticulation de cet élastomère se fait par des oxydes métalliques qui entrent en réaction avec des groupes chlorosulfonés.



I.5.2.5.1) Propriétés

- L'allongement et la résistance à la rupture sont semblables à celles du NR.
- Excellente résistance au vieillissement (ozone, oxygène, UV, intempéries).
- Très bonne résistance aux acides et oxydants (concentrés et chauds).
- Déformation rémanente élevée (caractère thermoplastique).
- Résistance à la chaleur (125°C en continu), au froid (-40°C en statique).
- Faible résistance au déchirement à chaud.

I.5.2.5.2) Applications

Ils sont utilisés pour des revêtements de tissu, des plaques, des câbles, des cuves, des produits exposés aux intempéries (comme les films de toitures de grands ouvrages), etc.

Conclusion

Bien que la grande élasticité soit le dénominateur commun de tous les matériaux élastomères, leurs caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques, varient non seulement suivant l'élastomère de base (nature des macromolécules), mais aussi suivant le taux de réticulation et le taux de charges.

Chapitre II

Caractéristiques mécaniques des élastomères

Introduction

Après avoir défini les élastomères et jeté la lumière sur leur nature chimique, ce chapitre a pour objectif d'invoquer certaines caractéristiques mécaniques qui leur sont propre comme l'élasticité non linéaire, l'incompressibilité, et la viscosité, et de décrire quelques-uns de leur comportements mécaniques vis-à-vis de la sollicitation, comme la repense à la traction.

II.1) L'élasticité non-linéaire

La propriété mécanique particulièrement remarquable chez les matériaux élastomères est leur grande déformation pouvant atteindre pour certains des centaines de pour cent [10] et de retrouvé leurs géométrie initiale presque intégralement après cessation de la sollicitation. C'est pour ça que l'expression 'élasticité caoutchoutique' est souvent employée dans ce genre de matériaux, chose qui n'est pas tout à fait vrai sauf dans le cas d'un élastomère réticulé non renforcé et dans les faibles déformations [11].

En plus de ce qui vient d'être dit, contrairement aux autres matériaux notamment les matériaux métalliques, l'élasticité des élastomères est non linéaire, c'est-à-dire l'allure de la contrainte en fonction de la déformation n'est pas une droite. Cette caractéristique est influencée par les charges renforçantes ou bien encore, par la cristallisation éventuelle de certaines zones de l'élastomère sollicité.

Comme on la signalé au chapitre précédent, à l'échelle de la structure microscopique, un élastomère vulcanisé est constitué de longues chaînes macromoléculaires repliés sur elles même et comportant des points de jonctions de type liaisons covalentes. Ces macromolécules forment ainsi un réseau tridimensionnel dont les segments de chaînes sont orientés de façon aléatoire, le système est donc thermodynamiquement stable (l'entropie est maximum). Mais, sous l'action d'une sollicitation mécanique, ces segments moléculaires changent de conformations et tendent à former des arrangements de plus en plus ordonnés et orientés suivant la direction de la sollicitation (figure II-1), le système est thermodynamiquement de plus en plus instable (diminution de l'entropie). Cet arrangement peut même parfois, si les segments sont bien étirés, aboutir à la formation de motifs appelés cristallites agissant comme des charges renforçantes, c'est le cas dans le caoutchouc naturel (NR) par exemple.



Figure II-1: formation sous contraintes d'un arrangement ordonné

La diminution de l'entropie sous contraintes (diminution du nombre de conformations possible) induit des forces moléculaires de rappel responsables du retour du matériau à son état géométrique initial après la décharge (arrêt de la sollicitation) [9]. C'est ce qui fait que dans la littérature, l'élasticité des élastomères est dite de nature entropique.

II.2) L'incompressibilité

Une autre particularité remarquable des élastomères, est leur quasi-incompressibilité (le coefficient de poisson 0,5). Bien que des essais montrent qu'ils sont légèrement compressibles, leurs coefficients de compressibilité est de l'ordre de grandeur de celui de l'eau, ils varient entre 1000 et 2000 MPa alors que l'ordre de grandeur du module de cisaillement est d'environ 1MPa [10], cela veut dire qu'ils peuvent être considérés incompressibles quelque soit l'intensité et le type de contraintes auxquelles ils sont soumis. Il faut donc leur laisser assez d'espace dans lequel ils puissent se déformer. En effet, plus l'espace réservé aux déformations est réduit, plus la rigidité de l'élastomère augmente, chose qui est mise à profit dans certaines applications comme les butées de limitation de débattement, emboutissage sur élastomère, et supports d'ouvrages en béton. En fin, cette qualité de conservation du volume lors des déformations est une donnée intéressante pour le calcul des pièces en élastomère.

II.3) Le fluage et la relaxation [12]

II.3.1) Le fluage

Pour un échantillon en élastomère (éprouvette) soumis dès l'instant t_1 à une tension (sollicitation) constante jusqu'à l'instant t_2 ou la sollicitation se fait arrêter, la courbe déformation en fonction du temps est celle de la (figure II-2). On remarque une élongation instantanée à t_1 (segment AB), puis une élongation lente et progressive jusqu'à t_2 (arc BC) ou survient une contraction instantanée (segment CD) suivie d'une contraction progressive (arc DE) or, une élongation rémanente L_r subsiste est le matériau ne retrouve jamais son état géométrique initial : c'est le phénomène de fluage.

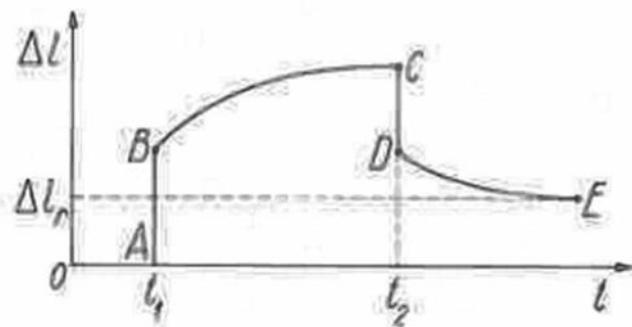


Figure II-2 : courbe de fluage [12]

II.3.2) La relaxation

Si une variation de déformation constante est imposée à un échantillon élastomérique à partir de l'instant t_1 par une force F , l'intensité de cette force varie en fonction du temps et décrit une allure représentée par la figure II-3. En effet, après l'application de la force sur l'échantillon à l'instant t_1 (segment AB), cette force décroît progressivement (arc BC) jusqu'à l'instant t_2 correspondant à la cessation de la sollicitation ($F = 0$). Pour que le matériau regagne son état primitif, il faut recourir à une force de sens inverse à celui de F (segment CD) et dont l'intensité

décroit progressivement (arc DE). Pour que cet état soit maintenu, il faut qu'une force résiduelle F_r reste exercée : c'est le phénomène de la relaxation.

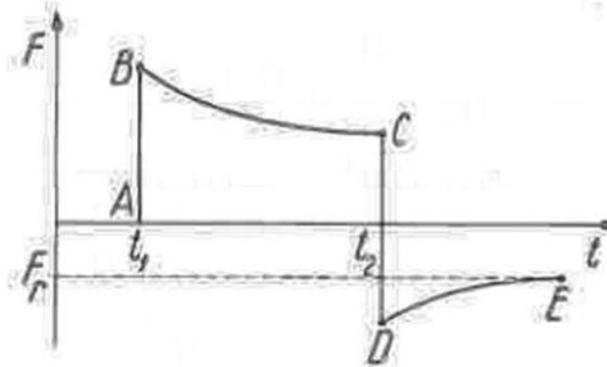


Figure II-3 : courbe de relaxation [12]

II.4) Phénomènes dissipatifs

Un matériau en élastomère soumis à un chargement cyclique présente un caractère hystérique. Autrement dit, la courbe aller diffère de celle du retour comme le montre la figure II-4.

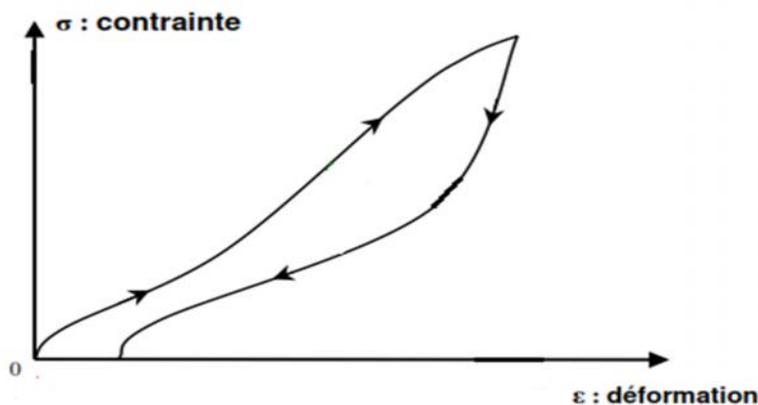


Figure II-4 : illustration du comportement hystérique.

Cela signifie que le matériau dissipe de l'énergie durant le cycle. Cette dissipation a plusieurs origines parmi lesquelles figurent la viscosité et l'effet Mullins.

II.4.1) La viscosité

Réellement, le comportement des élastomères n'est pas purement élastique, mais viscoélastique. C'est-à-dire, à côté du caractère élastique du matériau figure un caractère visqueux attribué au glissement des chaînes les une sur les autres [11]. Cette viscosité se met en évidence dans les grandes déformations par des essais de fluage (contrainte imposée), ou encore par des essais de relaxation (déformation imposée) plus facile à réaliser.

Bien que le caractère visqueux des élastomères est négligeable devant le caractère élastique en chargement quasi-statique, la viscosité qui transforme une partie de l'énergie mécanique en énergie thermique provoque une élévation de température au sein des matériaux qui sont presque

adiabatiques, ce qui conduit à une modification notable de leurs caractéristiques mécaniques [11].

II.4.2) L'effet Mullins [11]

L'effet Mullins, appelé aussi assouplissement sous contrainte, peut être défini comme une diminution de la rigidité du matériau après chaque cycle de chargement (figure II-5), avant de se stabilisé après un nombre de cycles généralement inférieur à 10. Il est dû à plusieurs phénomènes physiques comme la décohésion entre la gomme et les charges sous la sollicitation, et la rupture de quelques chaînes.

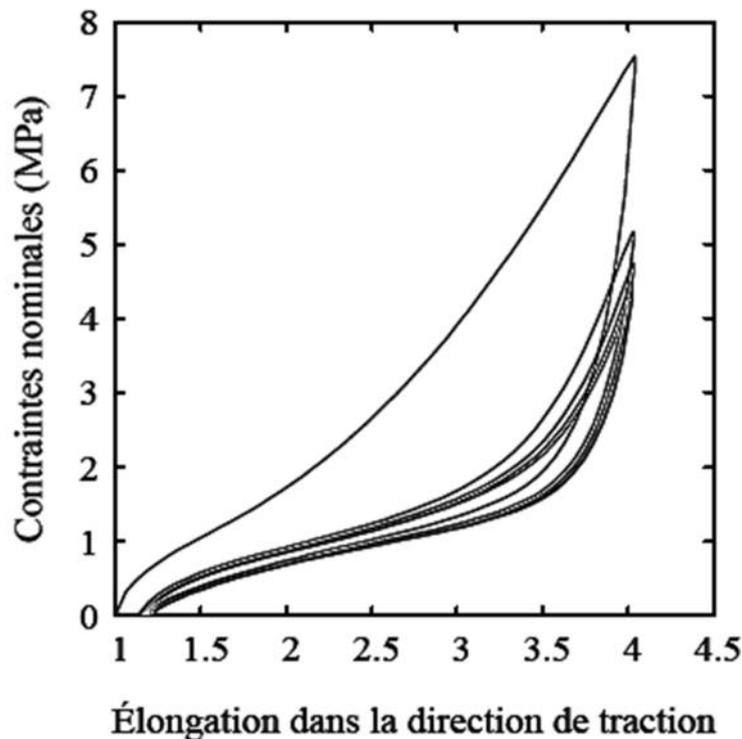


Figure II-5 : illustration de l'effet Mullins.

L'effet Mullins est un mécanisme d'endommagement dans la mesure où il représente une dégradation permanente des caractéristiques mécaniques du matériau accompagné de déformations rémanentes. Cependant, cet endommagement n'est pas tout à fait irréversible puisque le matériau se régénère avec une vitesse qui croît avec la température (à température ambiante cela se fait très lentement).

II.5) Elasticité et modules [12]

Etant donné que dans les applications pratiques des élastomères la déformation importante dans toutes les directions est leur principale propriété, certains paramètres sont utilisés pour caractériser les relations existantes entre les déformations et les contraintes statiques qui les créent. Les plus courants de ces paramètres sont :

- Le module statique d'extension-compression à l'origine dit aussi module d'Young (E_0), défini par la pente de la tangente à la courbe contrainte-déformation en traction ou compression. En fait, le module d'Young en traction et celui en compression sont presque égaux.
- Le module statique de cisaillement (G), défini comme le rapport de la contrainte à la déformation unitaire, obtenu en sollicitant tangentiellement une éprouvette élastomérique.

Les modules d'extension et de cisaillement dont l'unité est le mégapascal (MPa) sont fonction de la dureté du matériau, plus il est dure plus ils augmentent.

II.5.1) Comportement en traction

II.5.1.1) Traction uniaxiale

Toute éprouvette en élastomère soumise à la traction comme le montre la figure ci-dessous révèle une allure semblable en gros à celle illustré par la figure II-6.

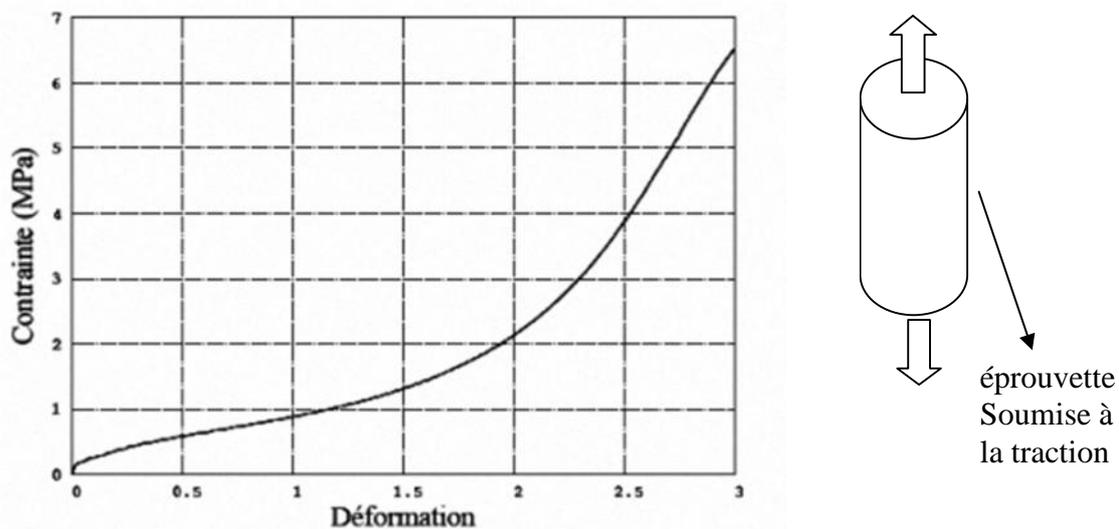


Figure II-6 : caractéristique de traction uniaxiale d'un élastomère à base de silicone [8].

Sur la courbe en remarque l'existence de trois zones. La première est celle des petites déformations là où la courbe est presque linéaire. La seconde correspond à l'inflexion, qui peut être associée au désenchevêtrement des macromolécules qui se déplacent dans leur volume de libre mouvement (volume entourant les macromolécules dans lequel leur mouvement n'est pas arrêté par les macromolécules voisines) [13]. La troisième zone est celle où l'éprouvette devient de plus en plus rigide à partir d'un certain niveau de déformation. Cette rigidité est dû aux segments de chaînes ayant atteints leur extension maximale et dont le nombre croie avec la déformation, à cela s'ajoute l'apparition éventuelle des cristallites.

II.5.1.2) Traction biaxiale et équi-biaxiale

Si un échantillon de tuyau en élastomère est soumis à une pression interne, on parle d'une traction biaxiale. La figure II-7 représente l'allure de la pression interne en fonction du déplacement pour un tuyau en éthylène propylène diène monomère (EPDM). Par contre si, la pression interne est appliquée sur une membrane circulaire au lieu un tuyau, on parle alors de la traction équi-biaxiale dont l'allure pression interne en fonction du déplacement pour une membrane du même matériau c'est-à-dire en (EPDM) est représenté sur la figure II-8.

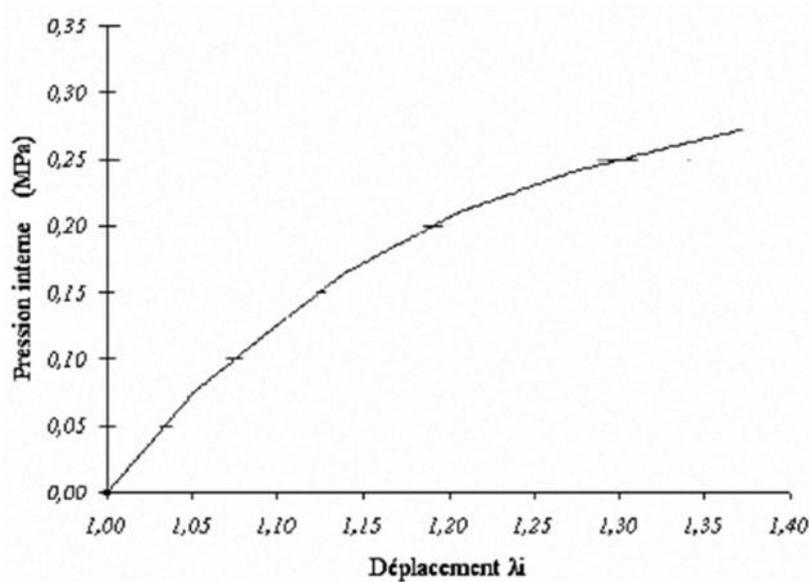


Figure II-7 : représentation de l'évolution de la pression interne en fonction du déplacement en traction biaxiale pour un EPDM.

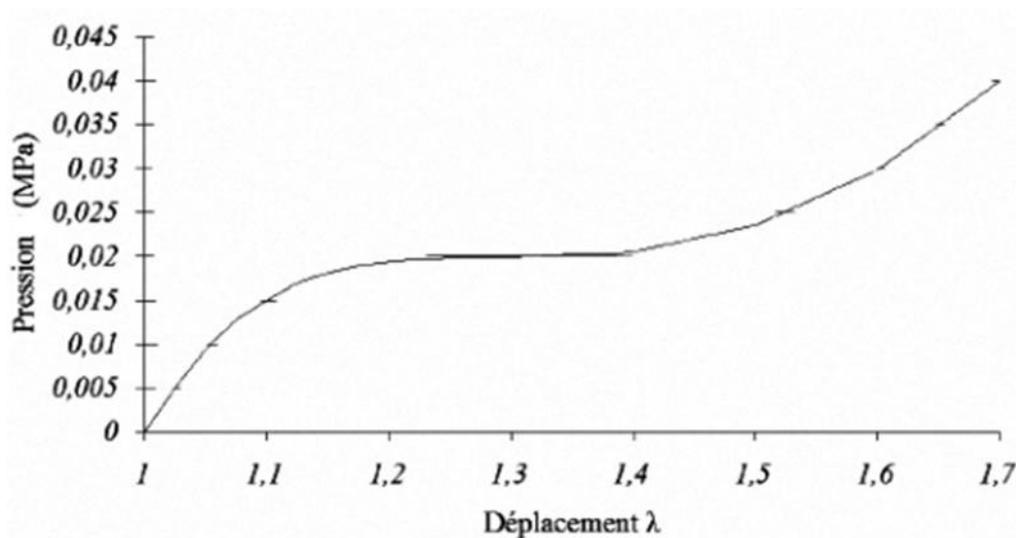


Figure II-8 : représentation de l'évolution de la pression interne en fonction du déplacement en traction équi-biaxiale pour un EPDM .

II.5.2) Comportement en compression

Si on comprime par une force F un prisme d'élastomère de hauteur h_0 , on obtient une courbe hyperbolique admettant la hauteur h_0 comme asymptote. Et si on refait la même expérience sur des prismes de mêmes dimensions mais de duretés différentes, on remarque que pour une déformation donnée la contrainte requise augmente avec la dureté, mais la hauteur h_0 sera toujours l'asymptote commune (figure II-9).

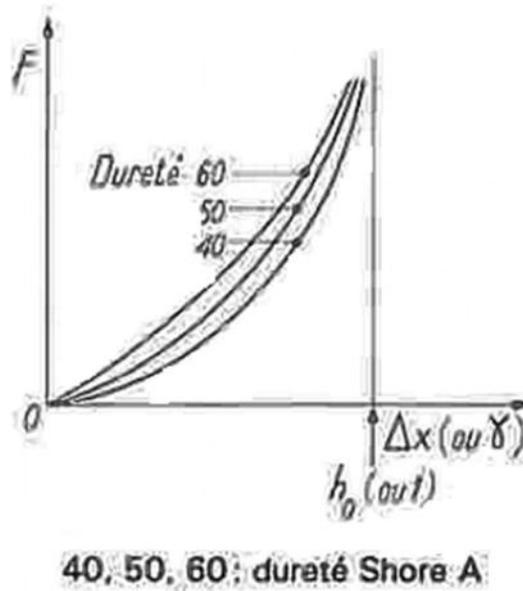


Figure II-9 : caractéristique de compression uniaxiale des élastomères [12]

II.5.3) Comportement en cisaillement

En appliquant à un prisme d'élastomère de surface (S_0) et de hauteur initiale (h_0) une force tangentielle (F), il se déforme d'une quantité x sous la contrainte $=F/S_0$ et présente un angle de glissement (γ) (figure II-10).

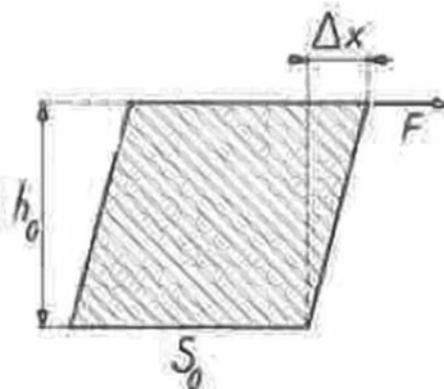


Figure II-10 : cisaillement d'un prisme d'élastomère

Comme pour les matériaux métalliques, la relation entre la contrainte de cisaillement et l'angle de glissement est la suivante : $\tau = G \gamma$ avec τ et G en (MPa) et γ la déformation unitaire qui est égale à (x/h_0) en (radian).

L'allure de la courbe contraintes-déformation comme le montre la figure II-11 est une droite jusqu'à une déformation maximale, là où commence la sollicitation en flexion qui se termine par une traction (0,7).

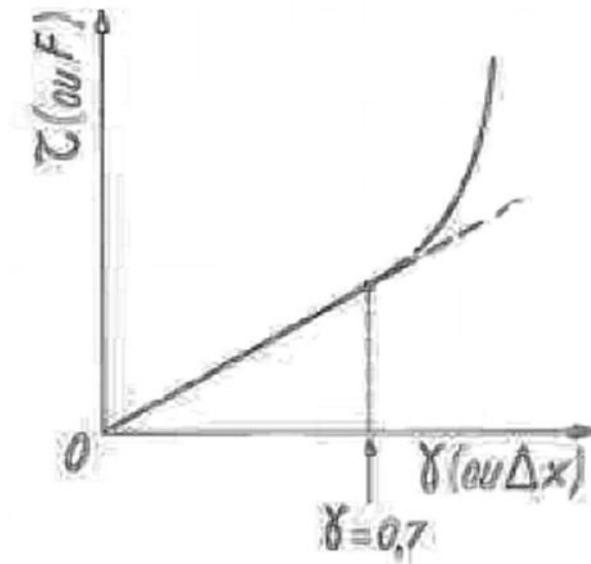


Figure II-11 : caractéristique de cisaillement [12].

Conclusion

Dans ce chapitre où on a abordé brièvement quelques caractéristiques mécaniques des élastomères et quelques unes de leur réponses vis-à-vis des sollicitations, on voit bien la complexité de l'étude de ces matériaux, et le nombre de paramètres à prendre en compte. Pour décrire le comportement des élastomères, de nombreux modèles hyper-élastiques ont été proposés, ceux-ci se scindent en deux grandes familles : Les modèles physiques qui font intervenir la structure microscopique du matériau et, les modèles phénoménologiques qui ne tiennent pas compte de la structure microscopique, ces derniers seront abordés brièvement au chapitre suivant.

Chapitre III

Etude théorique du
comportement de la membrane

Introduction

Dans ce qui suit, nous allons définir les modèles phénoménologiques utilisés pour caractériser le comportement des élastomères et citer certains d'entre eux, après quoi nous allons choisir un pour l'appliquer à notre étude.

III.1) Modèles phénoménologiques

Comme on l'a déjà dit au chapitre précédent, ces modèles ne se soucient pas des lois physiques régissant au sein du matériau sollicité, ils considèrent celui-ci comme étant une boîte noire. De manière globale, ceux sont des expressions mathématiques du potentiel de déformation W en fonctions des variables I_1, I_2, I_3 dites invariants qui sont aussi des fonctions des elongations $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, tel que :

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

$$I_2 = \lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2} + \lambda_3^{-2}$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2$$

Lorsque le milieu est isochore comme dans notre cas, puisque les élastomères sont des matériaux quasi-incompressibles, $I_3 = 1$ [11], on se retrouve alors avec un W qui ne dépend que de deux variables indépendantes I_1 et I_2

Il existe plusieurs modèles parmi lesquels on peut citer celui de : Néo-Hookéen, Mooney-Rivlin, Béderman, Tschoegl, Treloar, Ogden, Yeoh...etc. Chacun présente des avantages et des inconvénients. Par exemple, certains sont valables dans les petites déformations tandis que d'autres sont valables pour les grandes déformations. Cela n'empêche que les plus employés sont celui du Néo-Hookéen et de Mooney-Rivlin en raison de leur efficacité compte tenu de leur simplicité. Leurs expressions sont les suivantes :

- Le modèle Néo-Hookéen : $W = C_1 (I_1 - 3)$.
- Le modèle de Mooney-Rivlin : $W = C_1 (I_1 - 3) + C_2 (I_2 - 3)$, ou bien :
 $W = C_1 [(I_1 - 3) + (I_2 - 3)]$ avec : $C_2 = C_2/C_1$.

C_1 et C_2 sont des constantes du matériau.

III.2) Les essais de traction

Pour déterminer les valeurs des paramètres d'un modèle, on recourt à des essais de traction.

III.2.1) Essai uniaxiale

L'essai de traction uniaxiale ne permet pas l'identification des différentes valeurs des paramètres des modèles, en particulier celui de Mooney-Rivlin. Si, on trace les courbes contrainte (σ) en fonction de l'elongation (λ) pour plusieurs valeurs de λ on se rend compte que celles-ci sont quasiment confondues.

III.2.2) Essai équi-biaxiale

Pour l'essai équi-biaxiale, une simulation pour différentes valeurs de ν révèle une influence de celui-ci sur les courbes qui sont remarquablement distinctes. Pour réaliser cet essai, on procède à une manipulation consistant à gonfler une membrane circulaire mince. Ceci induit au niveau du pôle de la bulle un état de contrainte équi-biaxiale.

III.3) Relations mathématiques

Nous allons appliquer au matériau travaillant dans les conditions qu'on a imposés, le modèle de Mooney- Rivlin, à partir duquel on va retrouver une relation liant la contrainte (σ) à la l'élongation (λ).

On a :

$$W = C_1 [(I_1 - 3) + \nu (I_2 - 3)]$$

Avec:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \text{ et } I_2 = \lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2} + \lambda_3^{-2}$$

Le matériau utilisé est supposé incompressible, donc :

$$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1 \dots\dots\dots (1)$$

La forme de la bulle est supposée sphérique, ce qui implique :

$$\lambda_1 = \lambda_2 \dots\dots\dots (2)$$

On aura donc de (1) : $\lambda_1^2 \lambda_3 = 1$, d'où :

$$\lambda_3 = \lambda_1^{-2} \dots\dots\dots (3)$$

Les contraintes réelles de Cauchy sont données par :

$$\sigma_1 = \lambda_1 \frac{\partial W}{\partial \lambda_1} - \lambda_3^2 ; \quad \sigma_2 = \lambda_2 \frac{\partial W}{\partial \lambda_2} - \lambda_3^2 ; \quad \sigma_3 = \lambda_3 \frac{\partial W}{\partial \lambda_3} - \lambda_3^2$$

λ_3^2 : est le facteur de Lagrange, il caractérise l'incompressibilité.

La relation (2) nous permet de conclure que : $\lambda_1 = \lambda_2$

On considère $\sigma_3 = 0$, donc : $\lambda_3 = \lambda_1 \frac{\partial W}{\partial \lambda_3}$. Ce qui permet d'écrire :

$$\lambda_1 = \lambda_1 \frac{\partial W}{\partial \lambda_1} - \lambda_1 \frac{\partial W}{\partial \lambda_3}$$

Après avoir remplacé les invariants I_1 et I_2 par leurs expressions dans la formule de W , et en appliquant l'expression ci-dessus, on obtient :

$$\lambda_1 = C_1 [(2 \lambda_1 - 2 \lambda_1^{-3}) \lambda_1 - (2 \lambda_3 - 2 \lambda_3^{-3}) \lambda_3]$$

$$\lambda_1 = 2C_1 (\lambda_1^2 - \lambda_1^{-2} - \lambda_3^2 + \lambda_3^{-2})$$

On remplace σ_3 par σ_1^{-2}

$$\sigma_1 = 2C_1 (\sigma_1^2 - \sigma_1^{-2} - \sigma_1^{-4} + \sigma_1^4)$$

Finalement :

$$\sigma_1 = 2C_1 (1 + \sigma_1^2) (\sigma_1^2 - \sigma_1^{-4})$$

On s'appuyant sur cette formule, et quelques relations géométriques dans lesquelles figurent : le rayon (**R**) de la bulle, sa hauteur (**h**) et son épaisseur (**e**) dans l'état déformé ainsi que le rayon de la membrane circulaire au repos (**a**) (figure III-1), nous allons établir une relation entre les paramètres qu'on a mesurés, c'est-à-dire, la pression interne (**p**) en fonction de la hauteur (**h**).

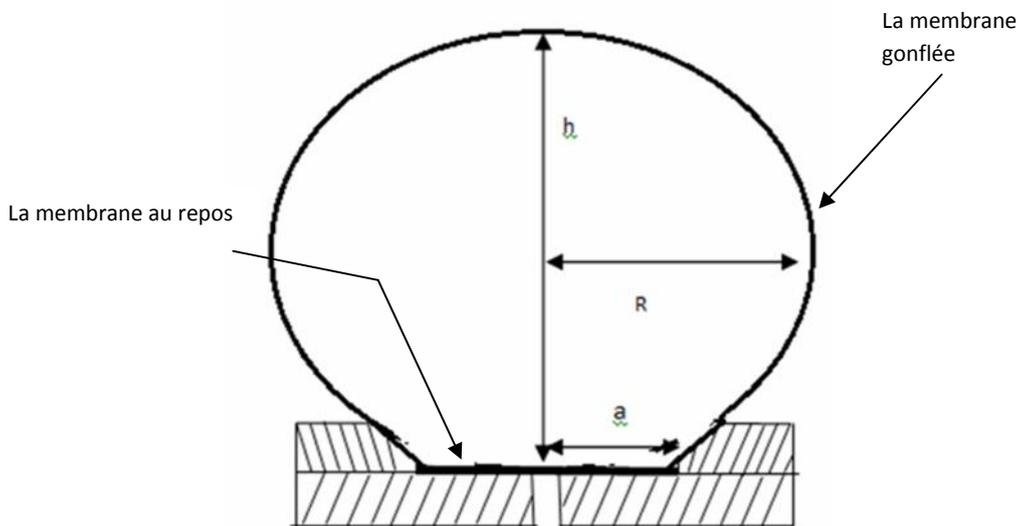


Figure III-1 : illustration des paramètres géométriques de la membrane gonflée.

On a :

$$R^2 = (h - R)^2 + a^2$$

$$= h^2 + R^2 - 2Rh + a^2$$

$$R = (h^2 + a^2)/2.h \quad \dots\dots\dots (4)$$

En faisant une coupe suivant l'équateur de la sphère, et on appliquant le principe fondamental de la statique à un instant donné à l'un des hémisphères on aura :

$$\sum F = 0, \text{ donc :} \quad \backslash$$

$$F_i = F_e + F_c \quad \dots\dots\dots (5).$$

Avec **F_c** est la résultante des forces de cohésion, **F_i** et **F_e** sont les forces dues respectivement, à la pression interne (**p_i** ou **p**) et la pression externe (**p_e**) (pression atmosphérique), tel que :

$$F_i = .R^2.p_i$$

$$F_e = \dots R^2 \cdot p_e$$

$$F_c = 2 \dots R \cdot e \dots$$

'e' est l'épaisseur de la membrane.

En remplaçant dans (5) les forces par leurs expressions on aura :

$$\dots R^2 \cdot p_i = 2 \dots R \cdot e \dots + \dots R^2 \cdot p_e$$

Donc :

$$p_i = 2e \dots / R + p_e \dots (6)$$

Or, $\lambda = e/e_0$, donc : $e = \lambda \cdot e_0 = \dots \cdot e_0$, e_0 étant l'épaisseur initiale de la membrane.

On remplace λ et e dans la formule (6) :

$$p_i = 4 \cdot e_0 \cdot C_1 \cdot R^{-1} \dots [(1 + \dots^2) (\dots^2 - \dots^4)] + p_e, \text{ donc :}$$

$$p_i = 4 \cdot e_0 \cdot C_1 \cdot R^{-1} \cdot (1 + \dots^2) (\dots^2 - \dots^6) + p_e \dots (7)$$

On cherche l'expression de \dots .

\dots est égal à la longueur finale (l), sur la longueur initiale (l_0) avec :

$$l_0 = a \quad \text{et} \quad l = [\dots/2 + \arccos(a/R)] \cdot R \quad \text{pour } h > a$$

Donc

$$\dots = R \cdot a^{-1} [\dots/2 + \arccos(a/R)] \dots (8)$$

En remplaçant R et \dots par leurs expressions respectives données par (4) et (8) on aura la formule de la pression (p_i) qui ne dépend que de la hauteur (h)

$$p_i = \frac{4 \cdot e_0 \cdot C_1 \cdot p_e}{h^2 + a^2} \left(1 + \alpha \frac{h^2 + a^2 - \dots}{(-2 \cdot h \cdot a)} \cos \left(\frac{\dots}{2} + \arccos \left(\frac{h \cdot a}{(h^2 + a^2)^{1/2}} \right) \right) \left(1 - \frac{h^2 + a^2 - \dots}{(-2 \cdot h \cdot a)} \cos \left(\frac{\dots}{2} + \arccos \left(\frac{h \cdot a}{(h^2 + a^2)^{1/2}} \right) \right) \right) + p_e$$

p_i et p_e : en Pascal (Pa).

h : en millimètre (mm).

Conclusion

On a appliqué dans notre étude le modèle de Mooney-Rivlin à partir duquel on a établi une relation qui lie la pression interne (p_i) à la hauteur (h) du pole. Au prochain chapitre nous allons mettre à profit les essais expérimentaux permettant d'avoir h et p_i pour déterminer les constantes et C_1 de l'équation ci-dessus à l'aide du logiciel GRAPH.

Chapitre IV

Etude expérimentale du
comportement de la membrane

Introduction

Cette partie consiste à gonfler des membranes en élastomère ayant différents diamètres jusqu'à les faire exploser et de voir l'évolution de la pression interne à laquelle elles sont soumises en fonction de la hauteur de la bulle formée, ainsi que l'influence du diamètre (si ça existe) sur la pression à la rupture.

IV.1) Matériel utilisé

- Membranes en élastomère extraites d'une chambre à air pour voitures.
 - Quatre joints toriques en élastomère ayant chacun 3 millimètre d'épaisseur et un diamètre intérieur de 30 mm, 50 mm, 70 mm, 90 mm.
 - Système de mise sous pression (compresseur + accessoires).
 - Papier millimétrique servant de règle pour mesurer la hauteur (h) de la bulle.
 - Quatre petits disques en téflon muni pour chacun d'un trou circulaire de diamètre () 30 mm, 50 mm, 70 mm, et en fin 90 mm. Ils sont utilisés pour imposer les diamètres cités aux membranes. Les parois des trous sont chanfreinés pour éviter le contact entre elles et les membranes gonflées.
 - Un capteur de pression transformant un signal pneumatique en un signal électrique.
-
- Deux grands disques en téflon : le premier sert à placer au dessus de lui les membranes : il est muni d'un petit trou de quelques millimètres au milieu lié directement au circuit de l'air comprimé. Quant au second, ayant un trou de 90 mm, il sert à presser contre le premier disque l'ensemble (petit disque + joint + membrane) à l'aide de six boulons répartis sur leur périphérie.
 - Un multimètre réglé sur le mode voltmètre : il permet la lecture en millivolt du signal transmis par le capteur.
 - Une caméra permettant de suivre l'évolution de la pression dans la bulle en fonction en fonction de sa hauteur.

Figure IV-1 : a) dispositif des essais

La figure ci-dessus (figure III-1-a) montre le dispositif des essais après son assemblage, dispositif qui est schématisé sur la figure III-1-b.

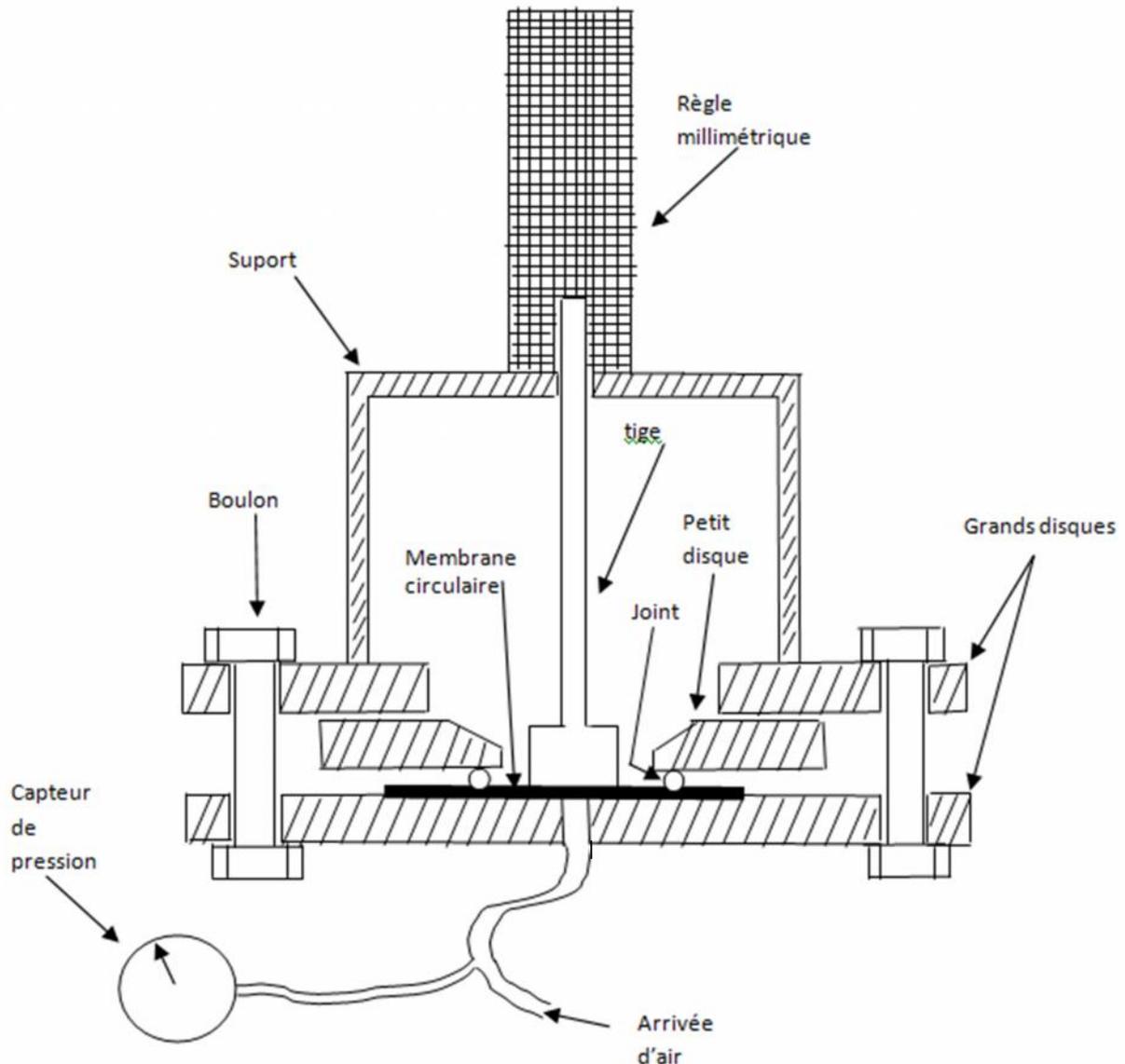


Figure III-1 : b) Schémas du montage.

IV.2) Protocole expérimental

L'essai consiste à appliquer de l'air comprimé sous la membrane, ce qui induit en son centre un état de déformation équi-biaxiale. L'opération se déroule de la manière suivante : on place une membrane sur le grand disque lié au circuit de l'air comprimé, on pose sur elle d'abord un joint torique suivis d'un petit disque ayant un trou de diamètre similaire à celui du joint puis de l'autre grand disque. On place alors les six boulons et on les sert. Après cela, on positionne la caméra à l'endroit permettant de voir bien la feuille millimétrique et l'écran du multimètre, puis on la met en marche et on ouvre la conduite de l'air comprimé légèrement de façon que la sollicitation soit en régime quasi-statique. On attend jusqu'à ce que la bulle se déchire pour arrêter la vidéo.

Pour chaque diamètre (petit disque), on réalise l'expérience décrite ci-dessus plus d'une fois. Malheureusement, on ne peut aller au-delà de trois essais pour chaque diamètre, faute de

manque de membranes du même matériau, sans lequel on a pu aller jusqu'à cinq essais pour obtenir un résultat plus sur.

IV.3) Résultats des essais

Grace aux vidéos réalisées et par intermédiaire du logiciel MATLAB, pour chaque essai on trace le nuage de points (annexe) ayant comme coordonnées les hauteurs (h_i) espacées d'environ 4 mm et les pressions internes correspondantes (p_i), puis en utilisons l'approximation polynomiale d'ordre '4' on obtient une courbe.

Les résultats des essais obtenus avec les différents diamètres utilisés sont donnés par les figures ci-dessous.

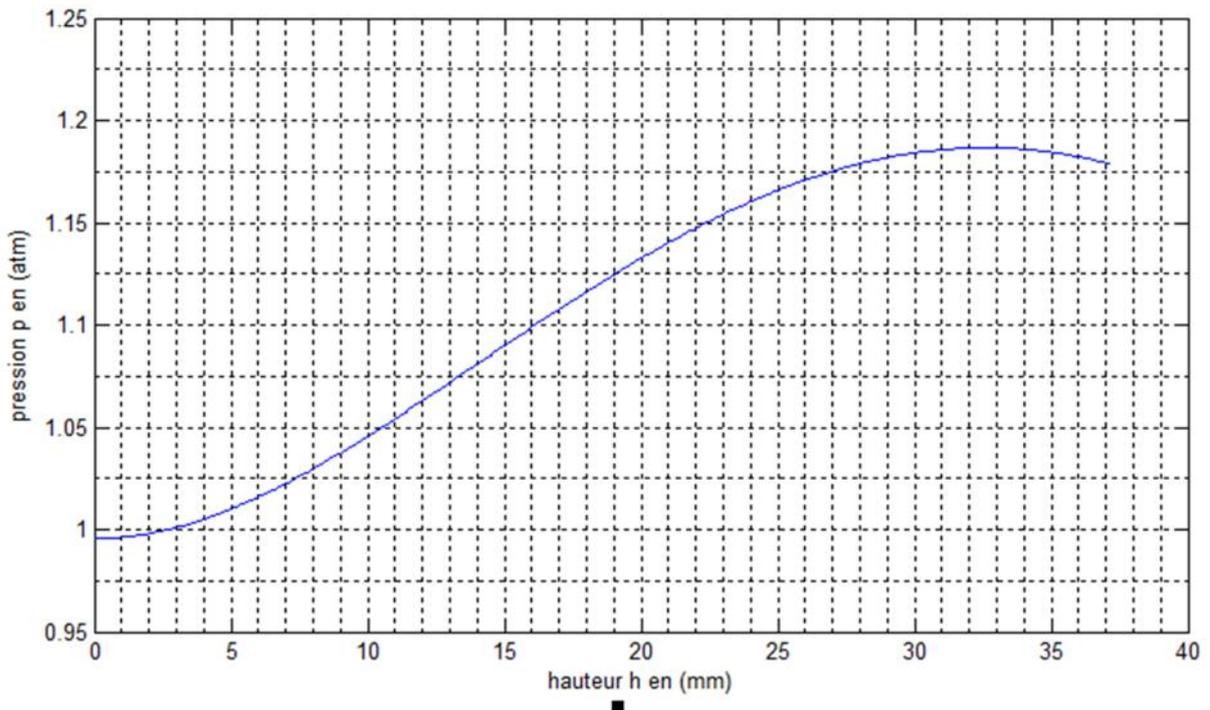


Figure IV-2 : évolution de la pression interne en fonction de la hauteur de la bulle pour une membrane de 30 mm.

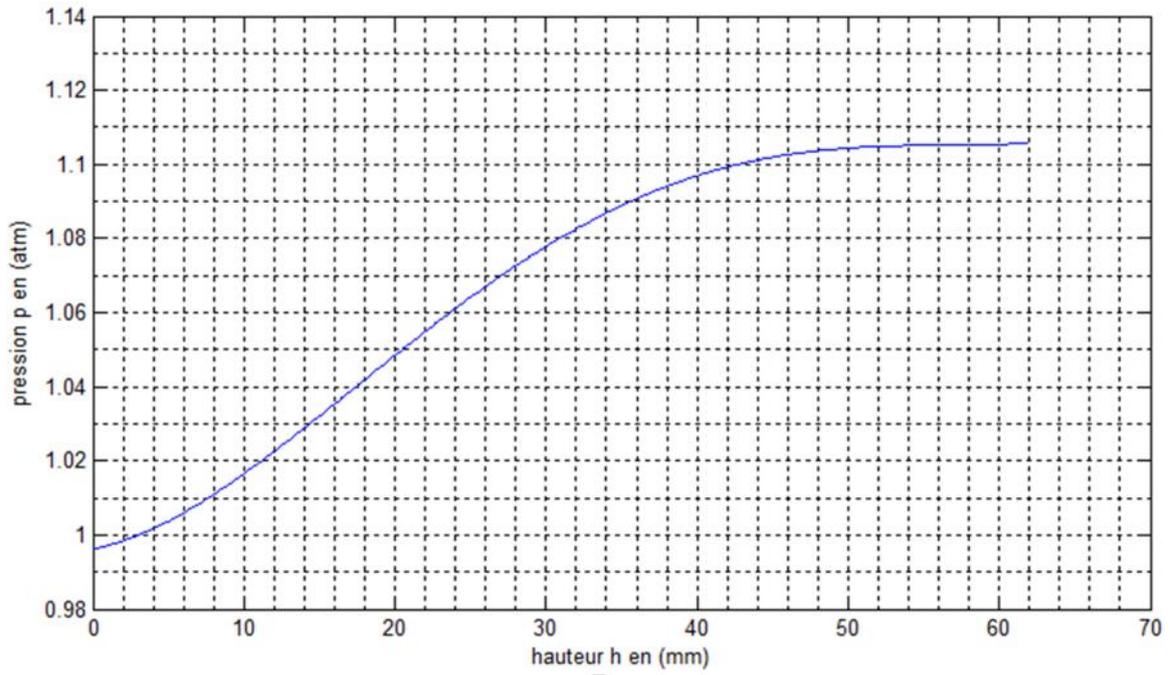


Figure IV-3 : évolution de la pression interne en fonction de la hauteur de la bulle pour une membrane de diamètre 50 mm

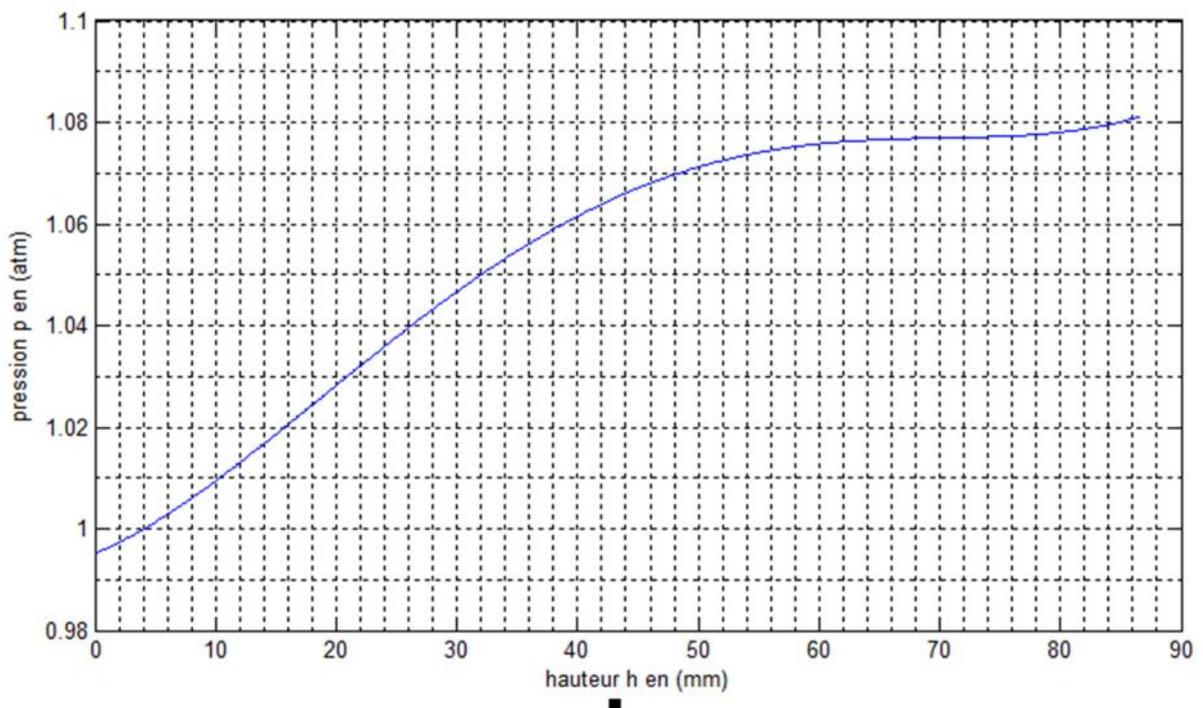


Figure IV-4 : évolution de la pression interne en fonction de la hauteur de la bulle pour une membrane de diamètre 70 mm.

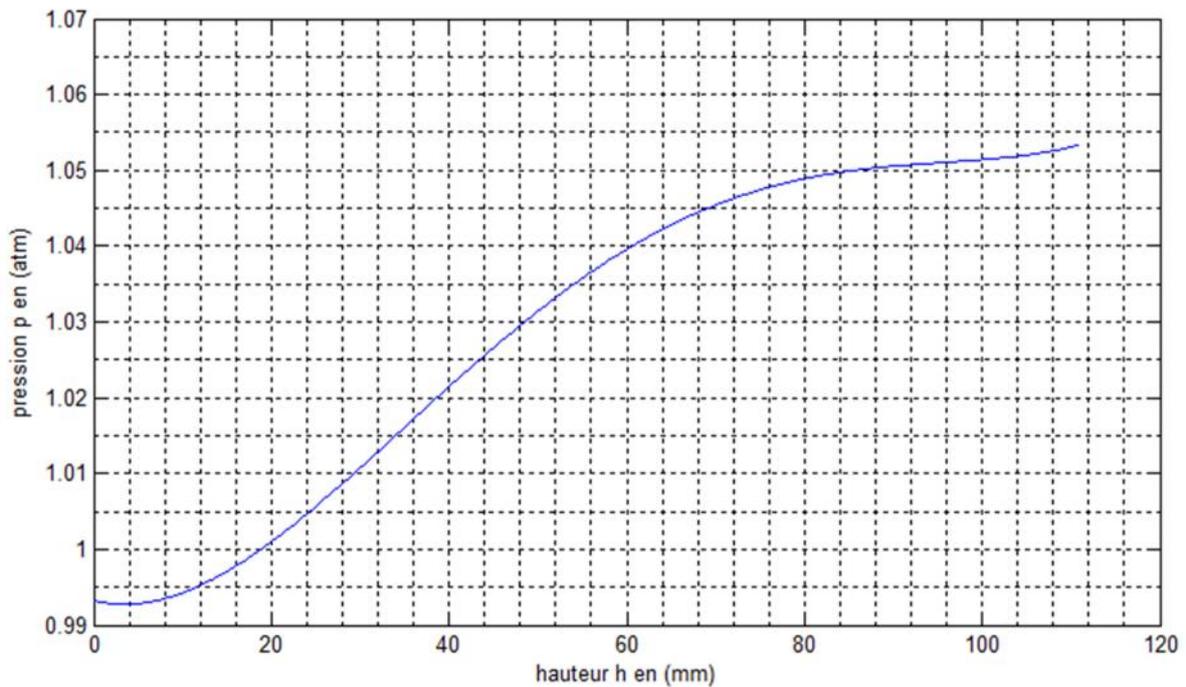


Figure IV-5 : évolution de la pression en fonction de la hauteur de la bulle pour une membrane de diamètre 90 mm.

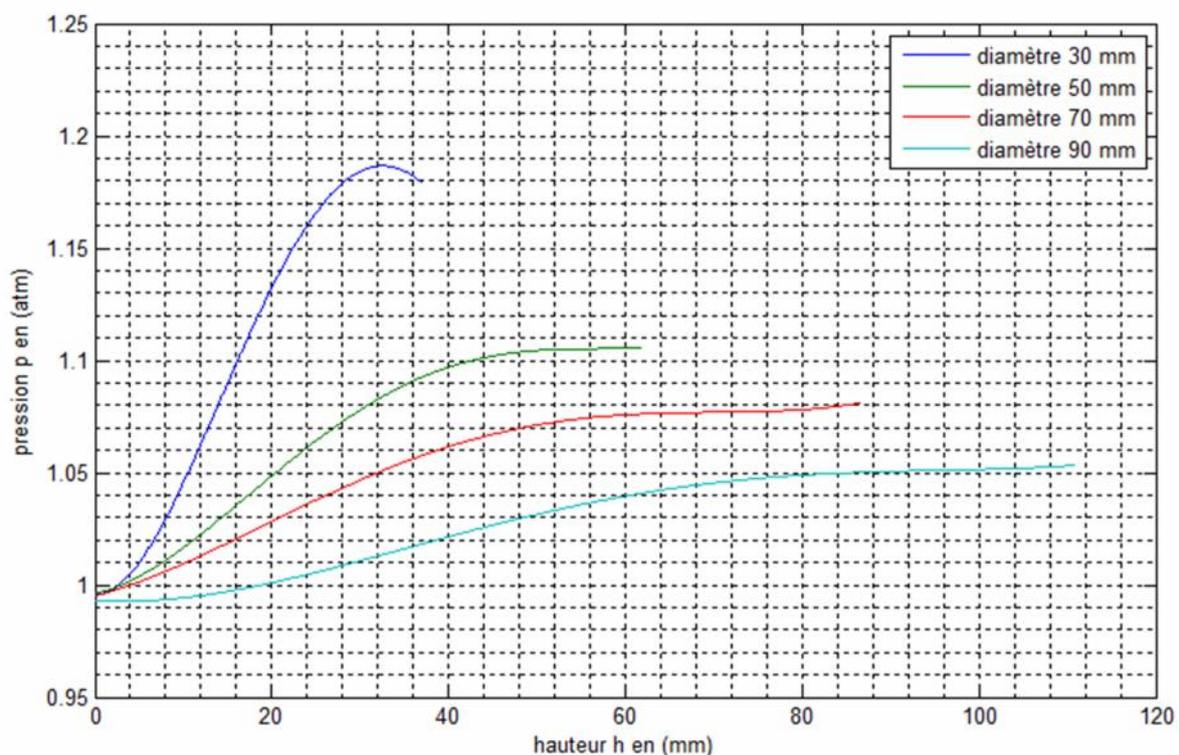


Figure IV-6 : les différentes courbes 'pression interne en fonction de la hauteur'.

Il est à noter que chaque courbe est une synthèse des courbes obtenues pour chaque diamètre. Ces dernières sont données en annexe ainsi que les programmes MATLAB

correspondants. Aussi, pour des commodités pratique, on a pris le 'bar' comme unité de pression pour tracer les courbes.

IV.4) Equations des courbes

La commande «poly2sym» de MATLAB permet l'obtention des équations des courbes ci-dessous. Elles sont comme suite :

- Diamètre 30 mm

$$p = 1,6092 \cdot 10^{-7} \cdot h^4 - 2,1011 \cdot 10^{-5} \cdot h^3 + 7,3333 \cdot 10^{-4} \cdot h^2 - 2,6412 \cdot 10^{-4} \cdot h + 1,009$$

- Diamètre 50 mm

$$p = 2,7272 \cdot 10^{-8} \cdot h^4 - 4,0358 \cdot 10^{-6} \cdot h^3 + 1,0686 \cdot 10^{-4} \cdot h^2 + 8,2558 \cdot 10^{-4} \cdot h + 1,0094$$

- Diamètre 70 mm

$$p = 6,9389 \cdot 10^{-9} \cdot h^4 - 1,2381 \cdot 10^{-6} \cdot h^3 + 5,5055 \cdot 10^{-5} \cdot h^2 + 0,001 \cdot h + 1,0083$$

- Diamètre 90 mm

$$p = 2,2485 \cdot 10^{-9} \cdot h^4 - 5,8728 \cdot 10^{-7} \cdot h^3 + 4,5074 \cdot 10^{-5} \cdot h^2 - 2,9383 \cdot 10^{-4} \cdot h + 1,0064$$

Avec : h en (mm) et p en (bar).

IV.5) Interprétation des résultats

On remarque que les courbes ont pratiquement la même allure, c'est-à-dire qu'aux faibles hauteurs (quelques millimètres), la pression interne augmente à peine, puis l'augmentation prend de l'ampleur de manière quasi-linéaire avant de se stabiliser à partir d'une certaine valeur de la hauteur (h), ceci indique qu'à partir de cette valeur (qui diffère selon le diamètre) le volume de la bulle augmente tandis que la pression interne reste approximativement constante jusqu'à la rupture. La valeur de cette hauteur est au voisinage de : 28 mm, 46 mm, 60 mm, 84 mm, pour les diamètres 30 mm, 50 mm, 70 mm, 90 mm respectivement. En fait, on conclut que le diamètre de la membrane n'a pas d'effet sur l'allure de la courbe.

De la figure IV-6 on remarque que pour une hauteur donnée, la contrainte correspondante décroît avec l'accroissement du diamètre. En déduit donc que, le module d'élasticité de la membrane augmente avec la diminution de son diamètre.

IV.6) Courbe de la pression de rupture

On a introduit sur un graphe les points ayant comme coordonnées les diamètres (D) des membranes utilisées et les pressions de ruptures (p_r) correspondantes, puis, en les approximant par un polynôme d'ordre '2' on a obtenu la courbe de la figure ci-dessous ayant sur l'intervalle [30 mm, 90 mm] l'équation suivante:

$$p_r = 2,85 \cdot 10^{-11} \cdot D^2 - 0,0054 \cdot D + 1,3284 \quad \text{en (bar).}$$

Il est clair que le diamètre de la membrane influe énormément sur la pression de rupture de ces dernières, la courbe a une allure hyperbolique.

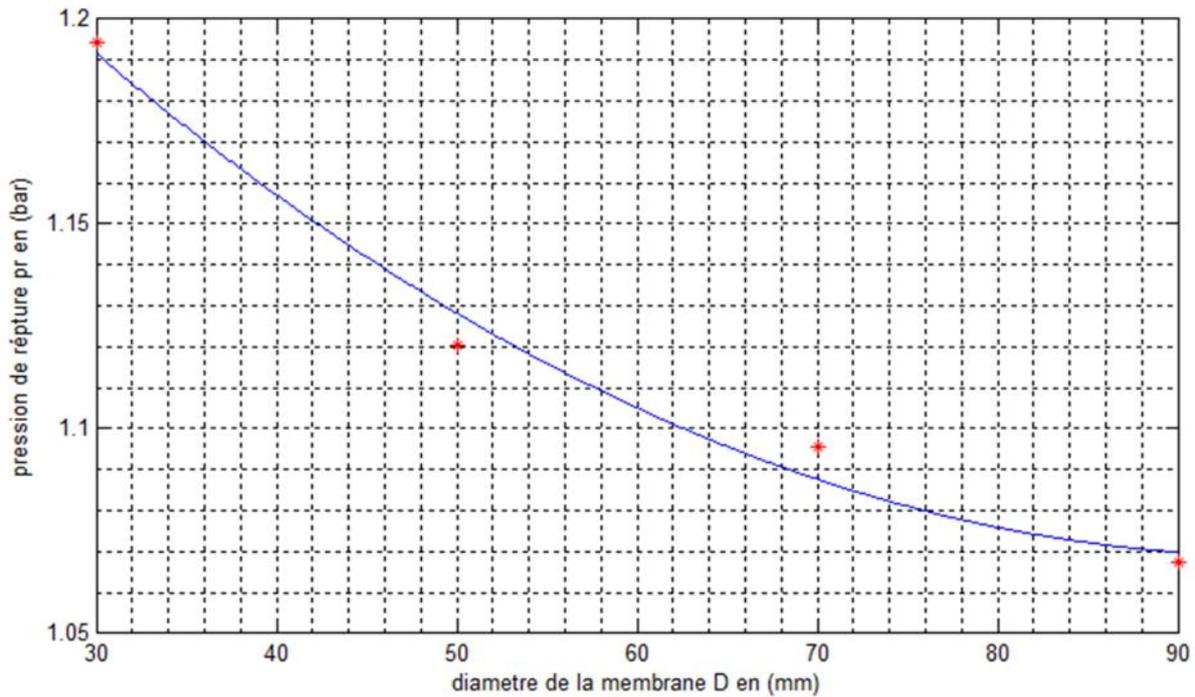


Figure IV-7 : Evolution de la pression de rupture en fonction du diamètre de la membrane.

On déduit que quand le diamètre de la membrane tend vers l’infini son influence sur la pression de rupture est négligeable, par contre quand il tend vers zéro la résistance à la rupture de la membrane tend vers celle du téflon.

IV.7) identification des paramètres du modèle de Mooney-Rivlin.

Après l’échec de la tentative de détermination des paramètres C₁ et par le logiciel GRAPH, nous avons fait recoure à une autre astuce par intermédiaire du logiciel MAPLE. La démarche est la suivante :

Nous avons :

$$p_i - p_c = \frac{8.h.C_1.e_0}{h^2+h^2} \left(1 + \alpha \left(\frac{h^2+a^2}{2.h.a} \right)^2 \left(\frac{\pi}{2} + \arccos \left(\frac{2.h.a}{h^2+a^2} \right) \right)^2 \right) \left(1 - \left(\frac{h^2+a^2}{2.h.a} \right)^{-6} \left(\frac{\pi}{2} + \arccos \left(\frac{2.h.a}{h^2+a^2} \right) \right)^{-6} \right)$$

Donc :

$$p_{eff} = \frac{8.h.C_1.e_0}{h^2+h^2} \left(1 + \alpha \left(\frac{h^2+a^2}{2.h.a} \right)^2 \left(\frac{\pi}{2} + \arccos \left(\frac{2.h.a}{h^2+a^2} \right) \right)^2 \right) \left(1 - \left(\frac{h^2+a^2}{2.h.a} \right)^{-6} \left(\frac{\pi}{2} + \arccos \left(\frac{2.h.a}{h^2+a^2} \right) \right)^{-6} \right) \dots(1)$$

Avec :

p_{eff} : pression effective. C’est la différence des pressions.

On prend deux points relativement espacés de l'une des courbes expérimentales et on remplace leurs coordonnées dans l'équation (1). On obtient alors un système d'équations ayant comme inconnus C_1 et C_2 , on résout ces équations en C_1 et on trouve deux valeurs avec C_2 , on fait l'égalité et on résout en C_2 . C_2 connu on le remplace dans une équation du système pour trouver C_1 .

Nous avons obtenu des valeurs de C_2 inférieures à zéro, ce qui veut dire que le matériau testé ne suit pas le modèle de Mooney-Rivlin.

Conclusion

Après avoir tracé les différentes courbes de la pression en fonction de la hauteur de la bulle, nous avons aboutis aux résultats donnés dans la littérature. Il s'est avéré que l'allure est indépendante du diamètre de la membrane alors que la pression de rupture évolue de manière hyperbolique avec lui.

Nous avons tenté de déterminer les paramètres du matériau utilisé en prenant un modèle de Mooney-Rivlin, mais les résultats obtenus sont très discordants entre les différents diamètres, ceci est probablement dû au manque de précision des valeurs expérimentales ainsi que le logiciel GRAPH utilisé.

Nous avons fait une autre tentative avec un autre logiciel (LE MAPLE) et nous avons obtenu un C_2 qui est négatif, ce qui est incohérent. On peut déduire que notre matériau ne suit pas un modèle de Mooney-Rivlin, mais sûrement un autre modèle.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail nous a permis de dévoiler l'allure que décrit la pression à l'intérieur de la bulle formée par la membrane gonflée en fonction de la hauteur de son pôle, allure qui est indépendante du diamètre de la membrane.

Nous avons essayé de voir si le comportement mécanique de la membrane dans notre cas peut être décrit par le modèle phénoménologique de Mooney-Rivlin. Pour cela on a supposé que c'est le cas et on a formulé une équation liant la pression effective à la hauteur de la bulle, puis nous avons fait appel aux résultats expérimentaux de ces deux variables pour trouver les paramètres du modèle adopté à l'aide du logiciel MAPLE, or les valeurs obtenues ont démontrées que le modèle de Mooney-Rivlin n'est pas celui qui régit la membrane dans notre cas.

Les essais nous ont permis aussi de synthétiser une équation permettant de prévoir pour une membrane du même matériau et de même épaisseur que celles qu'en a utilisées, la pression de rupture correspondante à n'importe quel diamètre. Ce résultat permet de dimensionner une structure alvéolaire.

Références bibliographiques

- [1] : Marc Carrega « Matériaux polymères ». Dunod (2007)
- [2] : Techniques de l'ingénieur, archive matériaux (A 3040).
- [3] : Techniques de l'ingénieur, archive matériaux (A 7700).
- [4] : Sabine Cantournet « Endommagement et fatigue des élastomères ». Thèse (2005).
Université Pierre et Marie Curie.
- [5] : André Cheymol « Mise en œuvre des élastomères 1 ». Lavoisier (2006).
- [6] : Julien Ramier « comportement mécanique d'élastomères chargés, influence de l'adhésion charge-polymère, influence de la morphologie ». Thèse (2004). Ecole doctorale matériaux de Lyon.
- [7] : Techniques de l'ingénieur, archive matériaux (A 7705).
- [8] : Adnane Boukamel « modélisations mécaniques et numériques des matériaux en élastomères ». Thèse(2006). Université de la méditerranée.
- [9] : Farid Khedimi « modélisation mécomécanique des élastomères chargés ». Thèse (2011).
Université de provence.
- [10] : Gacem Hatem « comportement viscoélastique des élastomères (viscoélasticité non linéaire- application aux multicouches). Thèse (2007). Université paris VI.
- [11] : Ida Raoult « structures élastomères sous chargement cyclique (comportement- fatigue- durée de vie). Thèse (2005). Ecole polytechnique.
- [12] : Technique de l'ingénieur, archive matériaux (A7735).
- [13] : Vincent le Saux « fatigue et vieillissement des élastomères en environnement marin et thermique : de la caractérisation accélérée au calcul de structure ». Thèse (2010). Université de bretagne occidentale.

Annexe

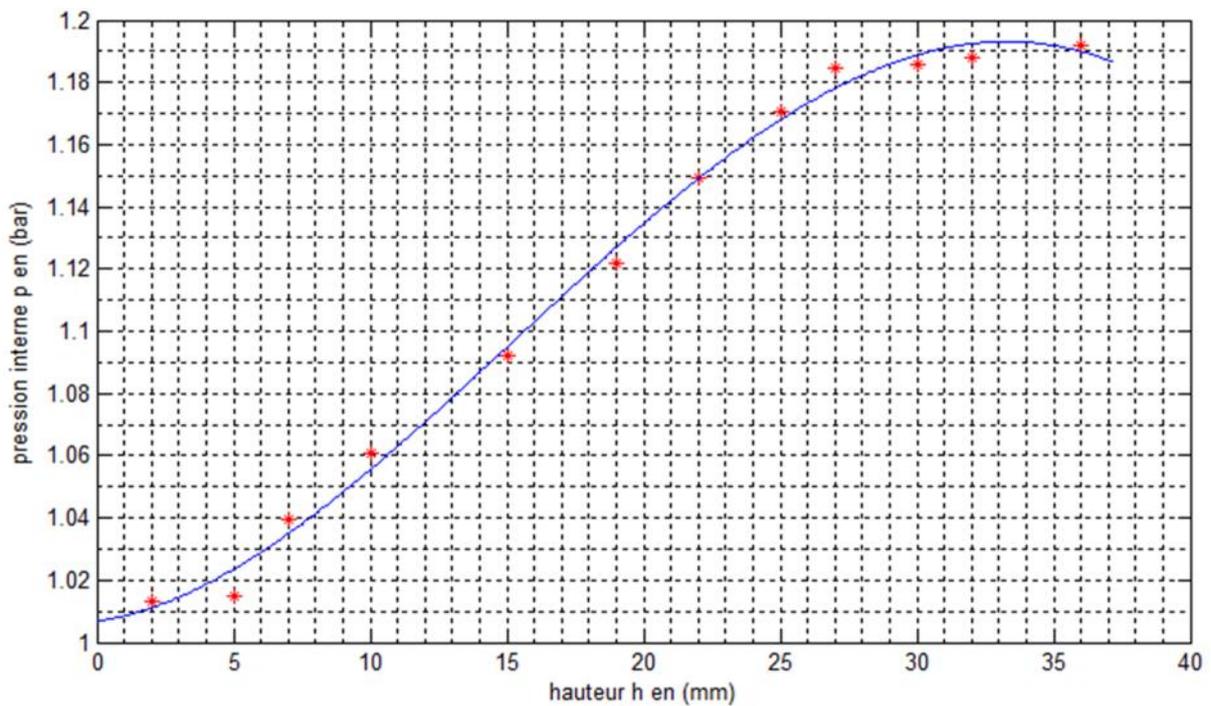
Annexe I : Résultats des essais effectués sur des membranes de 30 mm de diamètre.

Premier essai

```

h30=[0:0.1:37.2];
h31=[2 5 7 10 15 19 22 27 29 30 32 36];
v31=[173.8 174.1 178.3 182 187.3 192.4 197.1 200.8 203.2 203.4 203.8 204.4];
p31=v31/173.8;
h30=[0:0.1:37.2];
a3=polyfit(h31,p31,4);b3=polyval(a3,h30);
plot(h31,p31,'r*',h30,f3),xlabel('hauteur h en (mm)'),ylabel('pression p en (atm)'),grid minor

```

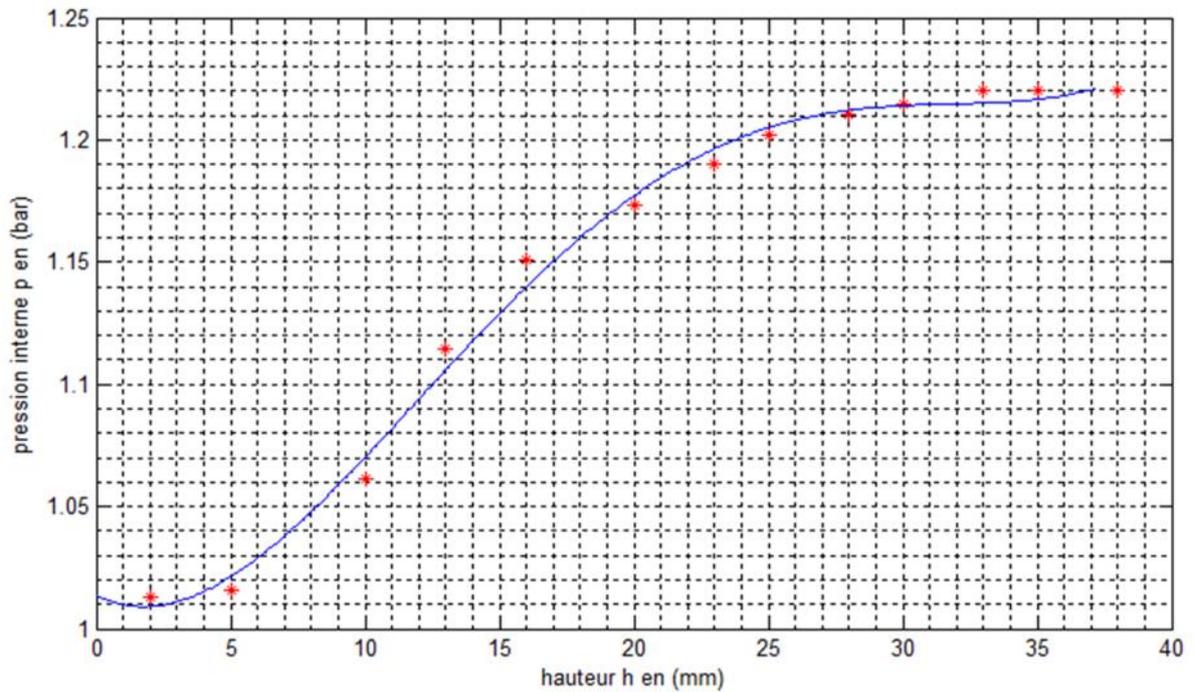


Deuxième essai

```

h30=[0:0.1:37.2];
h32=[2 5 10 13 16 20 23 25 28 30 33 35 38];
v32=[173.3 173.7 181.5 190.6 196.9 200.7 203.5 205.6 207 207.7 208.7 208.7 208.7];
p32=v32/173.3;
c3=polyfit(h32,p32,4);d3=polyval(c3,h30);
plot(h32,p32,'r*',h30,f3),xlabel('hauteur h en (mm)'),ylabel('pression p en (atm)'),grid minor

```

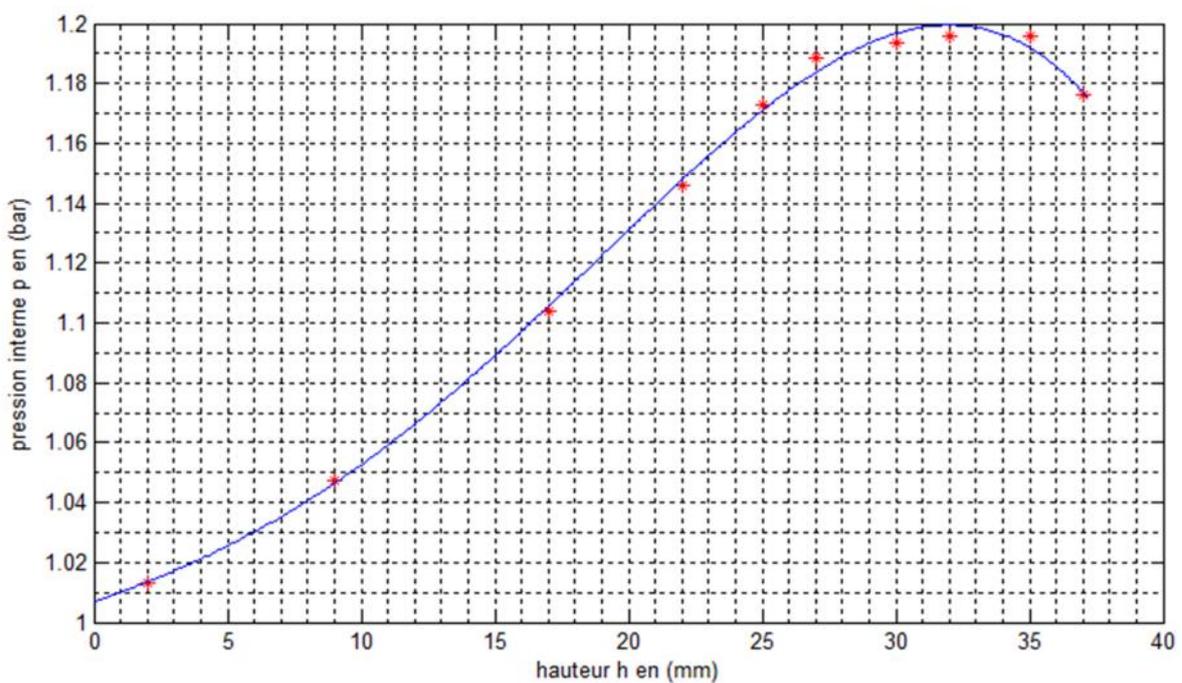


Troisième essai

```

h30=[0:0.1:37.2];
h33=[0 7 15 20 23 25 28 30 33 35]+[2 2 2 2 2 2 2 2 2 2];
v33=[175.5 181.4 191.2 198.5 203.1 205.9 206.7 207.1 207.1 203.7];
p33=v33/175.5;
e3=polyfit(h33,p33,4);f3=polyval(e3,h30);
plot(h33,p33,'r*',h30,f3),xlabel('hauteur h en (mm)'),ylabel('pression p en (atm)'),grid minor

```



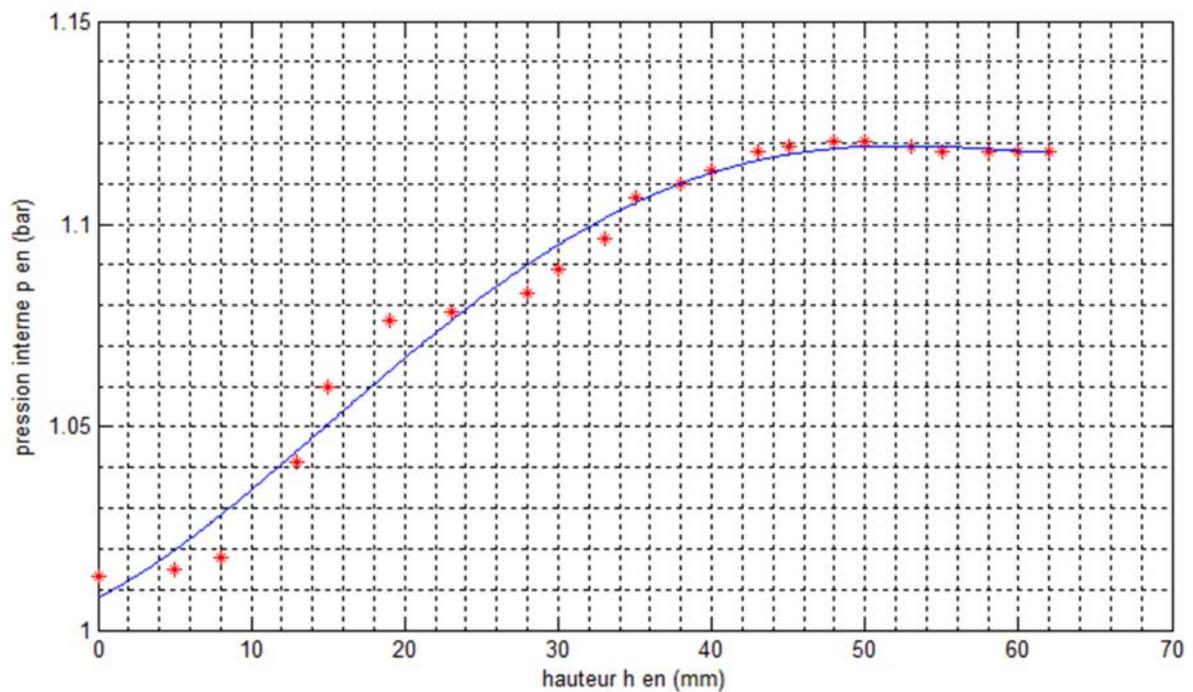
Annexe II: Résultats des essais effectués sur des membranes de 50 mm de diamètre.

Premier essai

```

h50=[0:0.1:62];
h51=[0 5 8 13 15 19 23 28 30 33 35 38 40 43 45 48 50 53 55 58 60 62];
v51=[175.3 175.6 176.1 180.2 183.4 186.2 186.6 187.4 188.4 189.7 191.4 192
192.6 193.4 193.6 193.8 193.8 193.6 193.4 193.4 193.4 193.4];
p51=v51./175.3;
a5=polyfit(h51,p51,4);b5=polyval(a5,h50);
plot(h51,p51,'r*',h50,b5),xlabel('hauteur h en (mm)'),ylabel('pression p en
(atm)'),grid minor

```

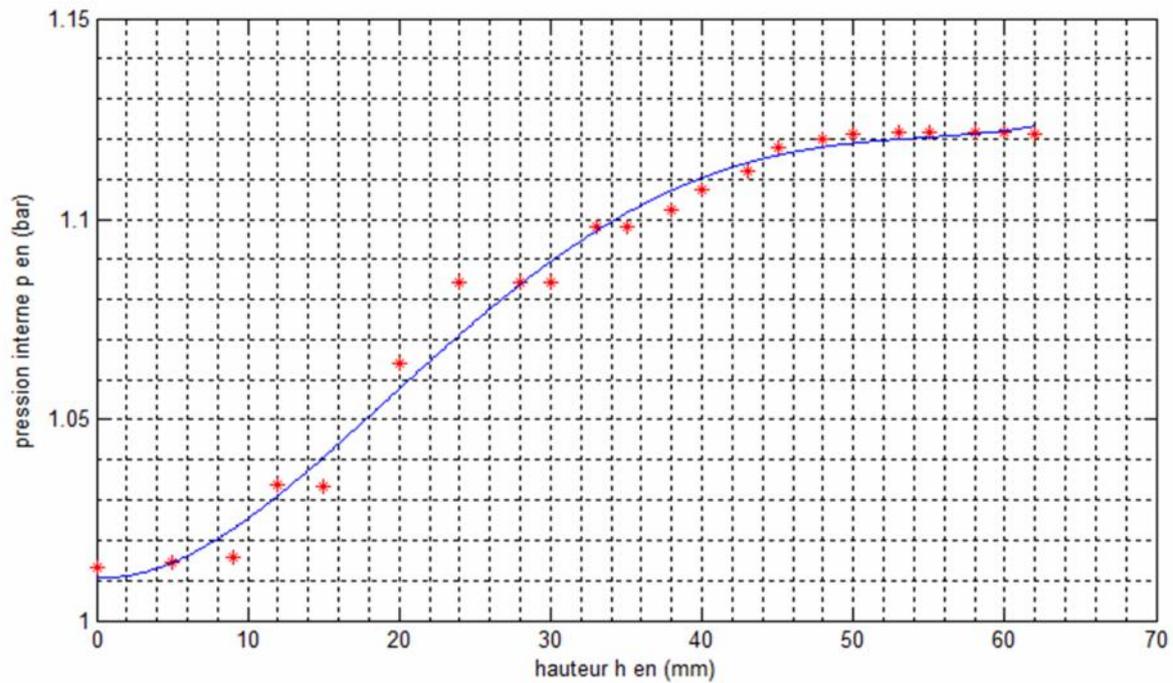


Deuxième essai

```

h50=[0:0.1:62];
h52=[0 5 9 12 15 20 24 28 30 33 35 38 40 43 45 48 50 53 55 58 60 62];
v52=[175.6 175.8 176 179.2 179.1 184.4 187.9 187.9 187.9 190.3 190.3 191
191.9 192.7 193.7 194.1 194.3 194.4 194.4 194.4 194.4 194.3];
p52=v52/175.6;
c5=polyfit(h52,p52,4);d5=polyval(c5,h50);
plot(h52,p52,'r*',h50,d5),xlabel('hauteur h en (mm)'),ylabel('pression p en
(atm)'),grid minor

```



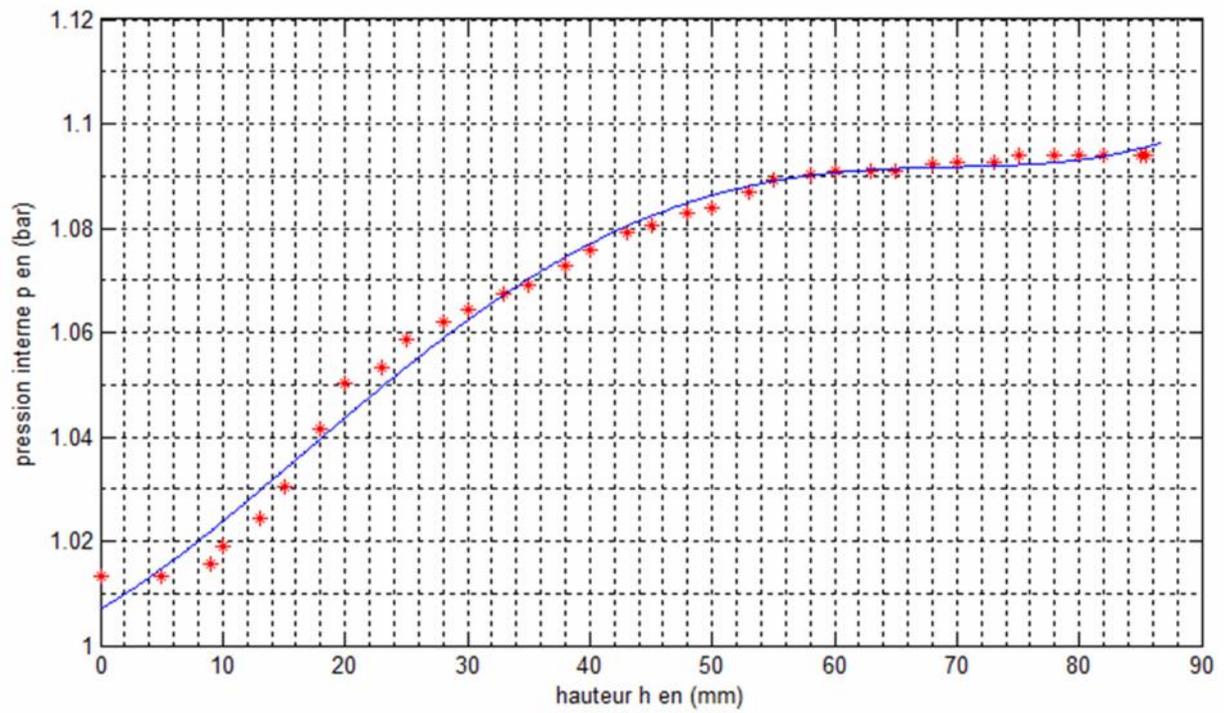
Annexe III: Résultats des essais effectués sur des membranes de 70 mm de diamètre.

Premier essai

```

h70=[0:0.1:86.7];
h71=[0 5 9 10 13 15 18 20 23 25 28 30 33 35 38 40 43 45 48 50 53 55 58 60 63
65 68 70 73 75 78 80 82 85 85.5];
v71=[172.1 172.1 172.5 173.1 174 175 176.9 178.4 178.9 179.8 180.4 180.8
181.3 181.6 182.2 182.7 183.3 183.5 183.9 184.1 184.6 185 185.2 185.3 185.3
185.3 185.5 185.6 185.6 185.8 185.8 185.8 185.8 185.8 185.8];
p71=v71/172.1;
a7=polyfit(h71,p71,4);b7=polyval(a7,h70);
plot(h71,p71,'r*',h70,b7),xlabel('hauteur h en (mm)'),ylabel('pression p en
(atm)'),grid minor

```

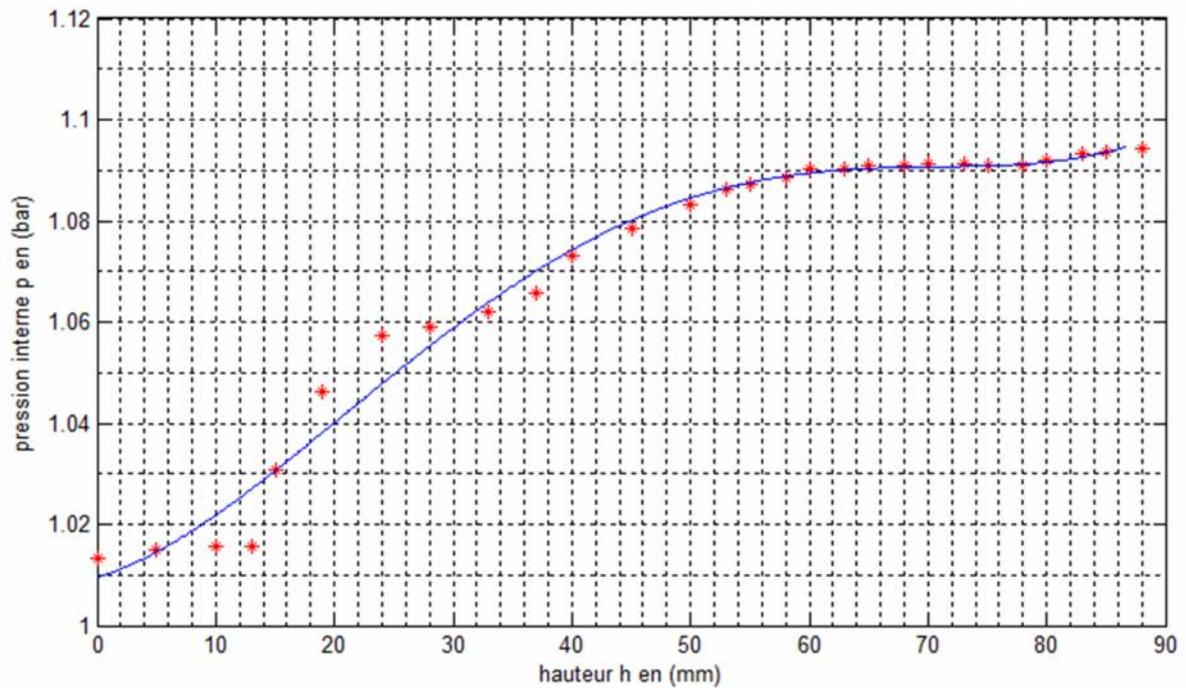


Deuxième essai

```

h70=[0:0.1:86.7];
h72=[0 5 10 13 15 19 24 28 33 37 40 45 50 53 55 58 60 63 65 68 70 73 75 78 80
83 85 88];
v72=[172.4 172.7 172.8 172.8 175.4 178 179.9 180.2 180.7 181.3 182.6 183.5
184.3 184.8 185 185.2 185.5 185.5 185.6 185.6 185.7 185.7 185.6 185.6 185.8
186 186.1 186.2];
p72=v72/172.4;
c7=polyfit(h72,p72,4);d7=polyval(c7,h70);
plot(h72,p72,'r*',h70,d7),xlabel('hauteur h en (mm)'),ylabel('pression p en
(atm)'),grid minor

```



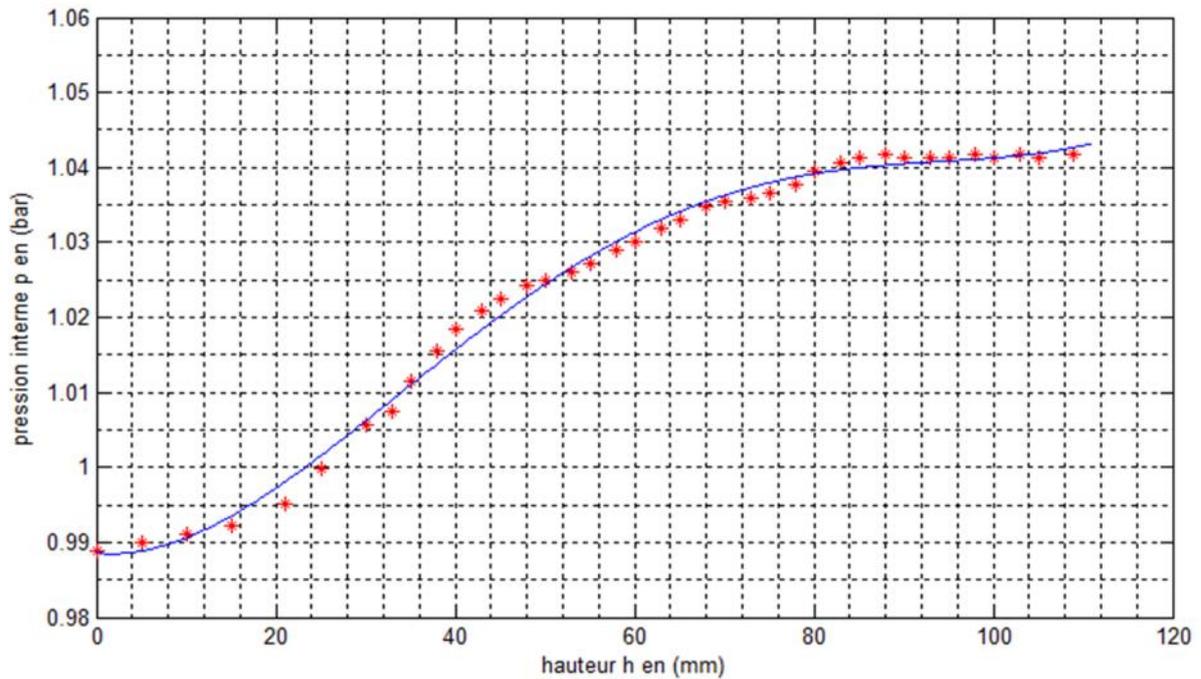
Annexe IV : Résultats des essais effectués sur des membranes de 90 mm de diamètre.

Premier essai

```

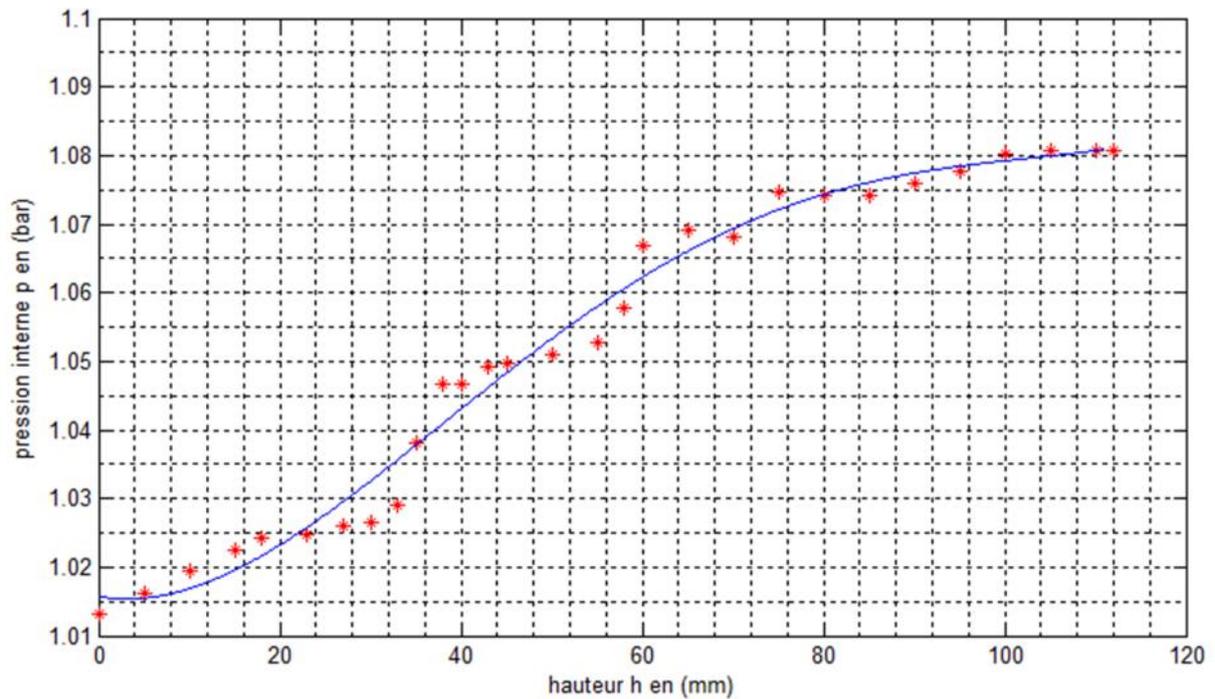
h90=[0:0.1:111];
h91=[0 5 10 15 21 25 30 33 35 38 40 43 45 48 50 53 55 58 60 63 65 68 70 73 75
78 80 83 85 88 90 93 95 98 100 103 105 109];
v91=[174.8 175 175.2 175.4 175.9 176.7 177.7 178 178.7 179.4 179.9 180.3
180.6 180.9 181 181.2 181.4 181.7 181.9 182.2 182.4 182.7 182.8 182.9 183
183.2 183.5 183.7 183.8 183.9 183.8 183.8 183.8 183.8 183.9 183.8 183.9 183.8
183.9]-[5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5
5 5 5];
p91=v91/174;
a9=polyfit(h91,p91,4);b9=polyval(a9,h90);
plot(h91,p91,'r*',h90,b9),xlabel('hauteur h en (mm)'),ylabel('pression p en
(atm)'),grid minor

```



Deuxième essai

```
h90=[0:0.1:111];  
h92=[0 5 10 15 18 23 27 30 33 35 38 40 43 45 50 55 58 60 65 70 75 80 85 90 95  
100 105 110 112];  
v92=[166.5 167 167.5 168 168.3 168.4 168.6 168.7 169.1 170.6 172 172 172.4  
172.5 172.7 173 173.8 175.3 175.7 175.5 176.6 176.5 176.5 176.8 177.1 177.5  
177.6 177.6 177.6];  
p92=v92/166.5;  
c9=polyfit(h92,p92,4);d9=polyval(c9,h90);  
plot(h92,p92,'r*',h90,d9),xlabel('hauteur h en (mm)'),ylabel('pression p en  
(atm)'),grid minor
```



Troisième essai

```

h90=[0:0.1:111];
h93=[0 4 8 12 20 25 30 35 40 43 47 50 55 59 65 70 75 80 85 90 95 100 105 110
112];
v93=[167 167.4 167.5 167.6 167.6 168.6 171.3 171.3 172 173.7 174 174.2 175.6
175.8 176.2 176.4 176.6 176.5 177.3 177.5 177.6 177.4 177.7 177.5 177.4];
p93=v93/167;
e9=polyfit(h93,p93,4);f9=polyval(e9,h90);
plot(h93,p93,'r*',h90,f9),xlabel('hauteur h en (mm)'),ylabel('pression p en
(atm)'),grid minor

```

