REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTÉ DU GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

MEMOIRE

DE FIN D'ETUDES

POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER
EN GENIE MECANIQUE
OPTION SCIENCES DES MATERIAUX

THEME

IMPLEMENTATION DE LOIS DE COMPORTEMENT THERMO-HYPERELASTIQUE DANS LE LOGICIEL ABAQUS

Etudié et présenté par M. AIT KHALDOUN Djaffar

Proposé et dirigé par M. OULD OUALI Mouhand

Promotion 2011-2012

Remerciements

Je remercie, premièrement, monsieur OULD OUALI, pour son soutien et son encadrement efficace pour la réalisation de ce travail.

Je tien à remercie monsieur FARHOUM pour ses conseils et orientations.

Je remercie aussi, mes demoiselles : AIMENE kahina et BEN CHABBANE Nassima pour leurs aides et soutiens.

Je remercie toute ma famille et mes amis pour leur chaleureuse compagnie et leur affection, et le courage qu'ils m'ont inspiré durant toutes les étapes de mon cheminement.

A tous ce qui ont contribué de prés ou de loin à l'accomplissement de ce travail, un grand merci.

Dédicace

A mes chers parents

A mes frères

A ma sœur

A toute ma famille

A tous mes amis

A tous ceux qui me sont chers…

Liste des figures et tableaux

Figure (1-1) : Pièces utilisées dans l'industrie automobile……02
Figure (1-2) : Evolution du module de Young et angle de perte en fonction de la température……....03
Figure (1-3) : *Isoprène,* C5H8……...03
Figure (1-4) : Formation d'un réseau par les ponts sulfures……..07
Figure (1-5) : Influence du degré de réticulation sur les propriétés mécaniques d'un élastomère……..08
Figure (1-6) : Cristallisation sous contraintes……...09
Figure (1-7) : Caractère hyperplasique d'un élastomère en traction uni axiale……..10
Figure (1-8) : Composante de la déformation en régime sinusoïdal (petite déformation)...11
Figure (1-9) :a) Evolution du module élastique avec la température……...13
b) Evolution des composantes dynamique avec la température…….13
Figure (1-10) : Principe d'équivalence temps-température……..14
Figure (1-11) : Variation de l'hystérésis pour un thermoplastique en fonction de la déformation et de la température……..15
Figure (1-12) : Courbe de traction cyclique. (cinq cycles de chargement sont imposés entre effort nul et une déformation maximale de 300 %)……..16
Figure (1-13) : Courbe de traction cyclique.(chaque cycle de chargement est effectué à un niveau de déformation supérieur à celui du cycle précédent)……17
Figure (1-14) : schématisation de l'effet Mullins……17
Figure (1-15): Analyse de l'effet Payne , évolution propriété mécanique en fonction du niveau de déformation pour un élastomère S B R renforcé en silice……18

Figure (2-1) : Configuration de référence et déformée……20
Figure (2-2) : Déformation d'un cube élémentaire…….22
Figure (2-3) : Représentation du modèle à 3 chaines…….30
Figure (2-4) : Représentation du modèle à 4 chaines…….31
Figure (2-5) : Représentation du modèle slip-linK…….32
Figure (2-6) : Modèle jonction courante-(o) jonction courante ;(x) jonction voisines……..33
Figure (2-7) : Représentation du modèle à 8 chaines…….34
Figure (2-8): Représentation du modèle tube…….36

Figure (3-1) : Expérience de traction……...44
Figure (3-2) : Expérience de compression uniaxiale……...45
Figure (3-3) : Courbe expérimentale de traction uniaxiale d'un NBR……...46
Figure (3-4) : Courbe expérimentale de compression uniaxiale…….46
Figure (3-5) : Comparaison du modèle de Gent et les résultats expérimentaux en traction uniaxiale……47
Figure (3-6) : Comparaison du modèle de gent avec la courbe expérimentale de compression uniaxiale……48
Figure (3-7) : Comparaison du modèle d'isharia et la expérimentale de traction uniaxiale..49
Figure (3-8) : Comparaison du modèle d'isharia à la courbe de la compression uniaxiale expérimentale……49
Figure (3-9) : Comparaison du modèle d'Isharai et de Gent à la courbe expérimentale traction uniaxiale……..50
Figure (3-10) : Comparaison des modèles avec la courbe expérimentale de compression uniaxiale…….50
Figure (3-11) : Influence des paramètres dans le cas Gent……..52
Figure (3-12) : Influence des paramètres dans le cas d'Ishiara……53
Figure (3-13) : Validation du modèle de Gent avec effet de la température……54

Tableau (1-1) : Famille d'élastomères ……..05
Tableau (2-1) : Constantes C_1 et C_2 pour différents polymères……..14

Tableau (3-1) : Paramètres du modèle de Gent……..51
Tableau (3-2) : Paramètre du modèle de Gent …….51
Tableau (3-3) : Paramètres du modèle d'Ishiara……....52
Tableau (3-4) : Paramètres du modèle d'Ishiara ……..52
Tableau (3-5) : Paramètres du modèle de Gent avec effet de la température…….....54

Liste des symboles

T_g : Température de transition vitreuse

E : Module de Young

E' ou G' : module de conservation

E'' ou G'' module de perte

δ : facteur de perte

a_T : Facteur de glissement

λ_i : Extensions principales

t : Temps

Ω : Configuration déformée

Ω_0 : Configuration initiale

P: Point matériel dans la configuration courante

P_0 : Point matériel dans la configuration initiale

x: Position de point matériel dans la configuration déformée

X : Position de point matériel dans la configuration initiale

$\bar{\bar{C}}$: Tenseur de dilatation

$\bar{\bar{I}}$: Tenseur d'identité

$\bar{\bar{F}}$: Gradient de la transformation

$\bar{\bar{F}}^t$: Transposé de gradient de la transformation

$\bar{\bar{B}}$: Tenseur Cauchy-Green gauche

$\bar{\bar{E}}$: Tenseur de déformation Green-Lagrange

$\bar{\bar{A}}$: Tenseur d'Euler Almansi

I_1 : Le premier invariant de tenseur de dilatation C

I_2 : Le deuxième invariant du tenseur de dilatation C

I_3 : Le troisième invariant du tenseur de dilatation C

W : Energie de Déformation

Liste des symboles

W_D : Thème déviatorique de l'énergie de déformation

W_H : Thème hydrostatique de l'énergie de déformation

$\bar{\bar{S}}$: Tenseur de Piola-Lagrange

$\bar{\bar{\sigma}}$: Tenseur de contrainte de Cauchy

$\bar{\bar{\pi}}$: Tenseur de Boussineq

δ_{ij} : Symbole de Kronecker

P : pression

Table des matières

Introduction générale 1

Première partie : Synthèse bibliographique

Chapitre I : physicochimie et comportement mécanique des élastomères

Introduction *3*

I-1: physicochimie des élastomères *3*

I-1-1Généralités sur les élastomères *3*

I-1-2Renforcement des élastomères 6

I-1-3Vulcanisation 7

I-1-4Influence du nombre de ponts 8

I-1-5Cristallisation 8

I-1-6Vieillissement 9

I-2comportement mécanique des élastomères 10

I-2-1 L'élasticité caoutchoutique 10

I-2-2 La viscoélasticité des élastomères 11

I-2-3 Hystérésis 14

I-2-4 Viscosité des élastomères 15

I-2-5 Effet Mullins 16

I-2-6 Effet Payne 18

Conclusion 19

Chapitre II : Modèles de comportement hyperélastique des élastomères

Introduction 20

II-1Rappel sur la mécanique des milieux continus 20

II-1-1 Les tenseurs de dilatation 21

II-1-2 Tenseurs des déformations 21

II-1-3Les invariants 22

II-1-4 Notions d'incompressibilité 23

II-2 Les lois de comportement hyper élastique 23

II-3 Quelques modèles hyper élastiques 25

II-3-1 Les modèles phénoménologiques 25

a)Les modèles à base des invariant de tenseur de déformation 25

a-1) Modèle de Money- Rivelin, (1940) 25

a-2) Modèle de Rivlin , (1948)..... 25

a-3) Le modèle de BIDERMAN (1958) 26

a-4 Le modèle de yeoh (1990) 26

a-5) Le modèle de LION (1997) 26

a-6) Le modèle de haines-wilson 26

a-7) Le modèle de Rivelin et Saunders (1951) 27

a-8) Le modèle de Gent-Thomas,(1958) 27

a-9) Le modèle de Gent (1966) 27

a-10) Le modèle de Hart-Smith (1966) 28

a-11) Le modèle Lambert-DIANI et Rey 28

b) Les modèles à base des extensions principales 28

b-1) Modèle de VARGA, (1966)..... 28

b-2) Le modèle de Valanis et Landel (1967) 29

b-3)Le modèle d'Ogden (1972) 29

b-3)Le modèle d'ogden (1972) 29

II-3-2Les modèles physiques 29

a)Le modèle Neo-Hookeen (1943) 29

b) L'élasticité d'une chaine (1942) 30

c) Le modèle 3-chaines (1943) 30

d) Le modèle à 4 chaines (1944) 31

e)Le modèle d'Isharia 31

f) Le modèle Slip-Link (1981) 32

g) Le modèle de Kilian ou modèle de Van der waals (1981) 32

h) Le modèle de Flory et Erman (1982) 33

i)Le modèle d'Arrauda et Boyce 34

j) Le modèle tube (1997) 36

k)Le modèle tube étendu (1999) 37

Conclusions 38

Deuxième partie : Résultats et interprétation

Chapitre III : Résultats et simulation

Introduction 40

III-1 : Démarche suivie pour la programmation des modèles de comportement 40

III-1-1 : Le sous programme UHYPER 40

III-1-1-2 : L'interface du sous programme UHYPER 40

III-1-1-3 : Variables à définir 41

III-1-1-4 : Variables définies 42

III-2-2 : Les expressions des énergies de déformation utilisées et le calcul des dérivées correspondantes 43

a) *Le modèle de gent* 43

b) *Le modèle d'Isharia* 43

III-2Les données expérimentales 44

III-2-1Les essais classiques 44

III-2-1-1 L'extension simple 44

III-2-1-2 La compression uniaxiale 45

III-3 Simulation et interprétation des résultats 47

III-3-1 : En utilisant gent 47

III-3-2: En utilisant isharia 49

III-3-3: Interprétation 51

III-3-4 : Influence des paramètres 51

III-3-5 : Influence de la température 53

III-3-5-1 : Programmation du modèle de gent avec l'effet de la température . 53

Conclusion 55

Conclusion générale 56

Référence bibliographiques 57

Annexe 01 : Présentation du logiciel ABAQUS…… 59

Introduction générale

INTRODUCTION

Le terme élastomère désigne d'une façon générale tous les caoutchoucs (naturels ou synthétiques). Les élastomères sont des polymères constitués de longues chaines flexibles, qui ont de l'aptitude à se déformer pour des niveaux très élevés.

L'utilisation de ces matériaux a pris de l'ampleur ces dernières 50 années dans différents Domaines (aéronautique, spatial, industrie et le génie civil) et notamment l'industrie automobile ; cette dernière utilise de nombreuse pièces en élastomère (voir figure 1-1). Parmi elle on peut citer :

- les pneumatiques.
- Les cales de support de moteur.
- les suspentes d'échappements.
- attache d'amortisseur.
- billette de reprise de couple.

Ces pièces sont réalisées en caoutchouc naturel contenant du noir du carbone ; L'incorporation de ces charges confère aux élastomères des propriétés mécaniques meilleurs sur une large gamme de température : augmentation du module élastique ; une résistance significative à la rupture, a la déchirure et à l'abrasion.

Pour la caractérisation du comportement statique ou quasi-statique des ces matériaux ; nous faisons recours aux modèles ou aux lois de comportement hyperélastique répandues dans la littérature. Les uns étaient basés sur des observations expérimentales et des propriétés mathématiques d'isotropie et d'incompressibilité ; d'autres étaient issus de considérations micro-structurales et traduisaient l'origine essentiellement entropique de l'élasticité caoutchoutique [1]

Pour mettre en évidence les effets thermiques dans le comportement hyperélastiques des élastomères nous proposons de développer un modèle thermo-hyperélastique permettant de prendre en compte les effets de la température dans le comportement hyperélastiques des élastomères.

Première partie

Synthèse bibliographique

Introduction

Ce présent chapitre comporte deux partie, dont la première résume les différentes propriétés physico-chimiques des élastomères ; tandis que dans la deuxième nous abordons les mécanismes induisant les différents modes de comportement, en partant d'une brève présentation du comportement hyper élastique, en fin on met l'accent sur le comportement viscoélastique, tout en rappelant ses différentes propriétés ,en grandes et petites déformations .

I-1Physicochimie des élastomères

I-1-1 Généralités sur les élastomères

Dans le langage courant les élastomères sont appelés les caoutchoucs, ce mot est né de deux mots indiens : 'cao' et 'tchu' qui signifient ensemble 'bois qui pleure'. Le caoutchouc est un produit naturel sous forme liquide appelé latex. Ce dernier est produit par une famille d'arbres équatoriaux : *les Hévéas*. Il s'agit d'un polyisoprène de formule chimique $(C_5H_8)_n$ (Fig. 1.2). Ils se caractérisent par de très bonnes propriétés mécaniques, après vulcanisation, mais de faibles tenues chimiques et une médiocre résistance à la chaleur.

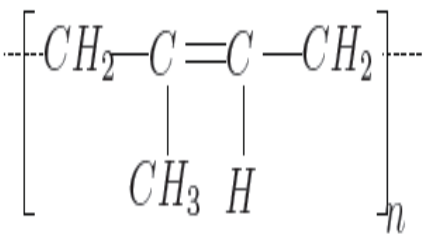

Figure (1.2) – *Isoprène*, C5H8 [1]

Figure (1-3): les hévéas [3]

Pour des températures supérieures à leur température de transition vitreuse, les élastomères se caractérisent par une grande déformabilité et une haute élasticité caoutchoutique.

En effet, l'étude des propriétés physiques des polymères, en fonction de la température, montre l'existence de plusieurs états de la matière :

– **État vitreux :** cet état caractérise généralement les verres organiques qui présentent une très faible déformabilité.

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

– **État caoutchoutique :** les élastomères sont caractéristiques de cet état. Ils possèdent une grande déformabilité et un comportement visqueux.

– **État d'écoulement :** le polymère, bien que encore solide, se comporte comme un fluide non newtonien quasi-incompressible fortement visqueux. [1]

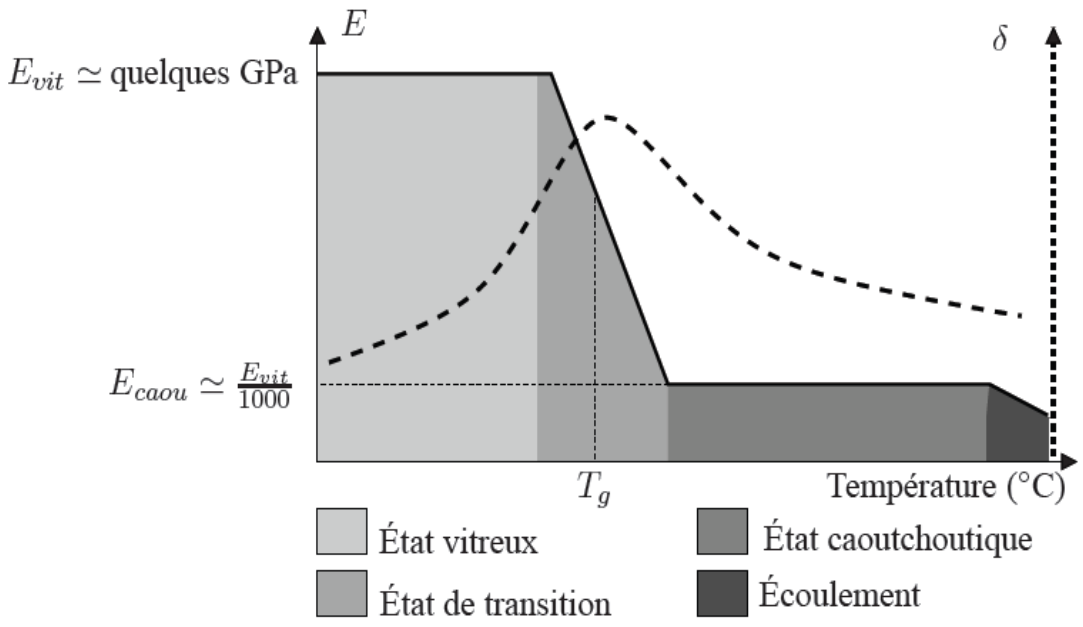

Figure (1-4) : évolution du module de Young et l'angle de perte en fonction de la température[1].

La température de transition vitreuse T_g des élastomères varie entre -10 à -120 ^{0}C selon leur composition chimique et leur micro structure.

Les propriétés mécaniques élevées, ainsi que l'imperméabilité et aussi la stabilité au changement de T^0 ont amplifié l'utilisation des matériaux élastomères dans différents domaine notamment dans l'industrie.

Le tableau ci – dessous regroupe les différentes classes des élastomères avec leurs températures de transition vitreuse ainsi que leurs propriétés caractéristiques.

famille	*nomenclature*	*symbole*	*T_g*	*Propriétés caractéristiques*
Caoutchouc naturels ou synthétiques	*Caoutchouc naturel*	*NR*	*-72°C*	*Bonne propriétés mécaniques, faible résistance à la chaleur et à l'ozone, faible tenue chimique.*
	polisoprène	*IR*	*-72°C*	
Caoutchoucs BUNA	*Copolymère styrène-Butadiène*	*SBR*	*-50°C*	*Grande résistance à l'abrasion*
	Polymère de butadiène	*BR*	*-112°C*	
Caoutchouc èthylène propylène diène	*Terpolymère étylène-propylène-diène*	*EPDM*	*-55°C*	*Excellentes propriétés élastiques, bonne tenue au vieillissement et en température, mauvaise tenue aux huiles et carburants.*
Caoutchouc butyle	*Copolyméres isobutylene-isopréne*	*IIR*	*-66°C*	*Très bonne résistance au vieillissement et étanchéité aux gaz .*
Caoutchouc nitriles	*Cpolyméres butadiéne-acrylonitrile (basse teneur en ACN)*	*NBR*	*-45°C*	*bonne propriétés mécaniques, bonne tenue aux huiles et aux carburants, tenue en température limitée.*
	Copolyméres butadiéne-acrylonitrile (haute teneur en ACN)	*NBR*	*-20°C*	
Néopréne	*polychloropérène*	*CR*	*-45°C*	*bonne propriété mécanique, bonne tenu au vieillissement, tenue aux huiles modérées, tenue en température limitée.*
Silicones	*Polydiméthylsiloxane*	*MQ*	*-120°C*	*Haute résistance a la chaleur et au froid, faible tenue mécanique.*
	Polydiméthyl-Vinylméthylsiloxane	*VMQ*	*-120°C*	
	Silicones fluorés	*FVMQ*	*-70°C*	

Tableau (1-1) : famille d'élastomères [1]

I-1-2-Renforcement des élastomères :

Le renforcement des élastomères à fait l'objet de nombreuses études afin de dégager les rôles joués par les charges car la majorité des caoutchoucs utilisés pour les applications mécaniques contiennent une charge.

Les élastomères sont renforcés grâce à l'incorporation de charges telles que les noirs de carbone ou encore la silice. Ce qui leur confère de meilleures propriétés (résistance à la rupture, abrasion, rigidité …). Actuellement, les charges renforçantes les plus souvent utilisées sont les noirs de carbone. La substitution de cette charge classique par la silice constitue le challenge relevé par Michelin en 1992 … [4][5].

Le noir de carbone, qui reste la principale charge renforçante du caoutchouc, se présente sous la forme de petites particules de carbones (20 nm - 50 nm) mélangées à la gomme naturelle avant vulcanisation. Pour obtenir ces matériaux chargés on effectue la polymérisation en présence des charges : Le polymère constitue alors un réseau continu et les charges forment un agglomérat à l'intérieur du réseau. Le caoutchouc est alors un matériau multiphasique composé de constituants avec des propriétés mécaniques différentes.

Les propriétés d'un élastomère chargé dépendent aussi du taux de charge .

De plus, sur le plan économique ces charges permettent la diminution du prix de revient d'une pièce à conditionner tout en conservant ou en améliorant les propriétés mécaniques du matériau… [6]

I-1-3 Vulcanisation

La vulcanisation des élastomères se fait de différentes manières selon l'élastomère, ceci est grâce à l'action d'un agent de vulcanisation qui est généralement le soufre. Ce dernier se fixe sur les chaines pour former des ponts entre elles.

Ce procédé impose la présence de double liaisons sur les chaines macromoléculaires de l'élastomère et consiste a créer une liaison pontale (poly- ou mono sulfure).[7]

Le nombre de liaisons pontales à une très grande influence sur les propriétés des élastomères.

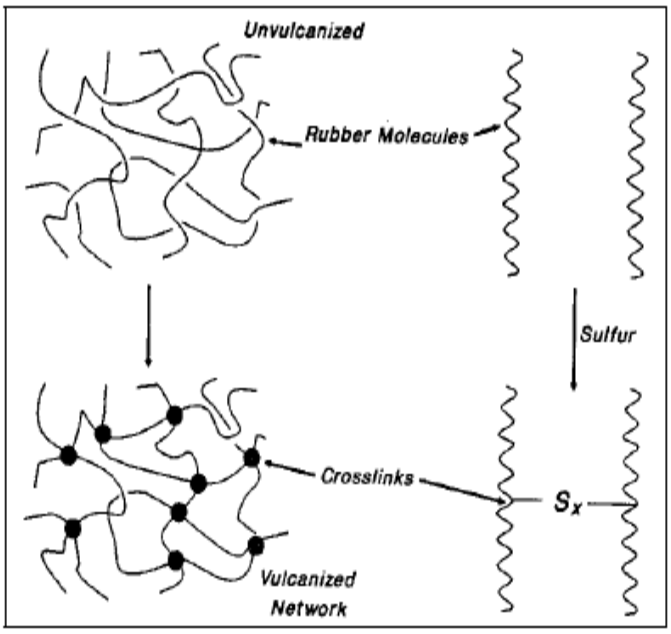

Figure (1-5) : Formation d'un réseau par les ponts sulfures [7]

I-1-4 Influence du nombre de ponts

Certaines des propriétés mécaniques tel que l'élasticité, sont considérablement améliorées lorsque le nombre de ponts (le degré de réticulation) augmente, et autres se dégradent ; comme le montre la figure ci-dessous

La vulcanisation améliore l'élasticité mais réduit les propriétés à la rupture au delà d'une limite.

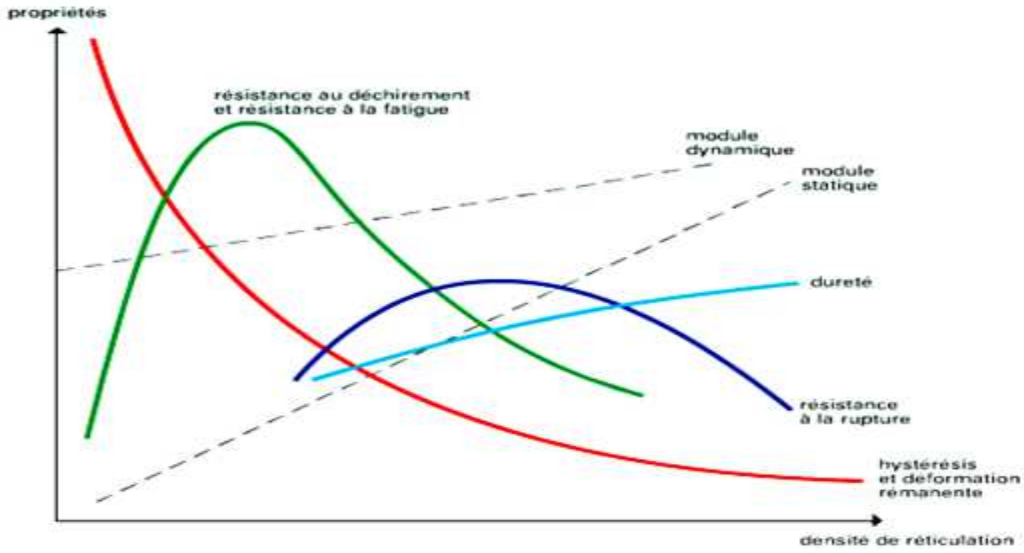

Figure (1-6) : influence du degré de réticulation sur les propriétés mécaniques d'un élastomère. [6]

La vulcanisation par le soufre présente des inconvénients du fait que les liaisons formées sont relativement sensibles à la température et conduisent à des vulcanisats aux propriétés de vieillissement parfois problématique. Toutefois par le biais de l'ajustement du taux de soufre, on arrive à optimiser la résistance thermique du réseau. Cette résistance est fondée essentiellement sur la nature des ponts formés : les liaisons polysulfures ayant des énergies de dissociation (205kj/mol) plus faible que les mono sulfures (268kj/mol). [6]

I-1-5 La cristallisation

Dans sa configuration non déformée, la microstructure de l'élastomère se présente sous la forme de pelote statique ; où les chaines macro-moléculaires sont repliés sur elle même et s'enchevêtrent avec les chaines voisines. Sous contrainte, ces chaines entrainent l'alignement progressif dans la direction de chargement, et l'extension des segments situés entre deux points de réticulation, formant ainsi des zones cristallites. (Figure 1-6) .Cette cristallisation induite par la déformation se traduit par une régidification de l'élastomère à partir d'un niveau de déformation important [8].

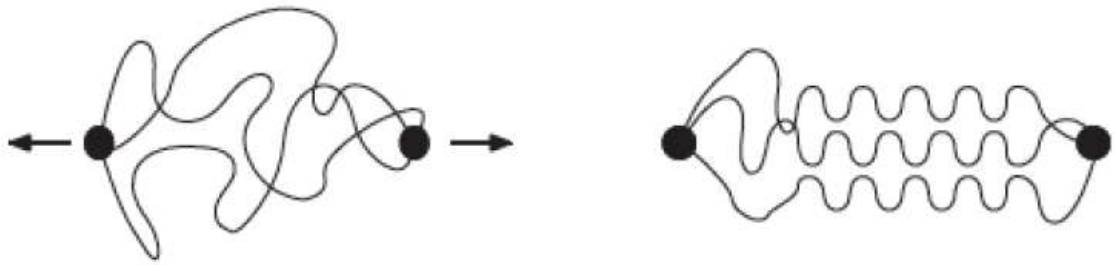

Figure (1-7) : cristallisation sous contraintes. [8]

I-1-6 Le vieillissement :

La dégradation des élastomères provient généralement de l'environnement .ceci est dû a leurs sensibilité à de nombreux facteurs de dégradation (oxygène, par exemple). celle-ci peut être d'ailleurs se manifester de façons très diverses : modification de l'aspect (en particulier changement de coloration), apparition de craquelures, poissage accompagnés presque toujours d'une variation importante des propriétés mécaniques.

L'oxygène est le facteur le plus critique, et son action est d'autant plus intense que la température.

Le vieillissement par l'oxygène ne génère pas seulement une diminution importante des propriétés mécaniques (diminution de l'allongement a la rupture), mais il s'accompagne aussi souvent d'un durcissement des vulcanisats dû à la réticulation (la plus part des élastomères de synthèse). [9]

I-2 Comportement mécanique des élastomères

I-2-1 l'élasticité caoutchoutique

il s'agit d'une élasticité a caractère essentiellement entropique, c'est-à-dire liée aux changement de conformation des chaines. ces dernières ont l'aptitude de se déformer au niveau des « points d'ancrage » . [9]

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

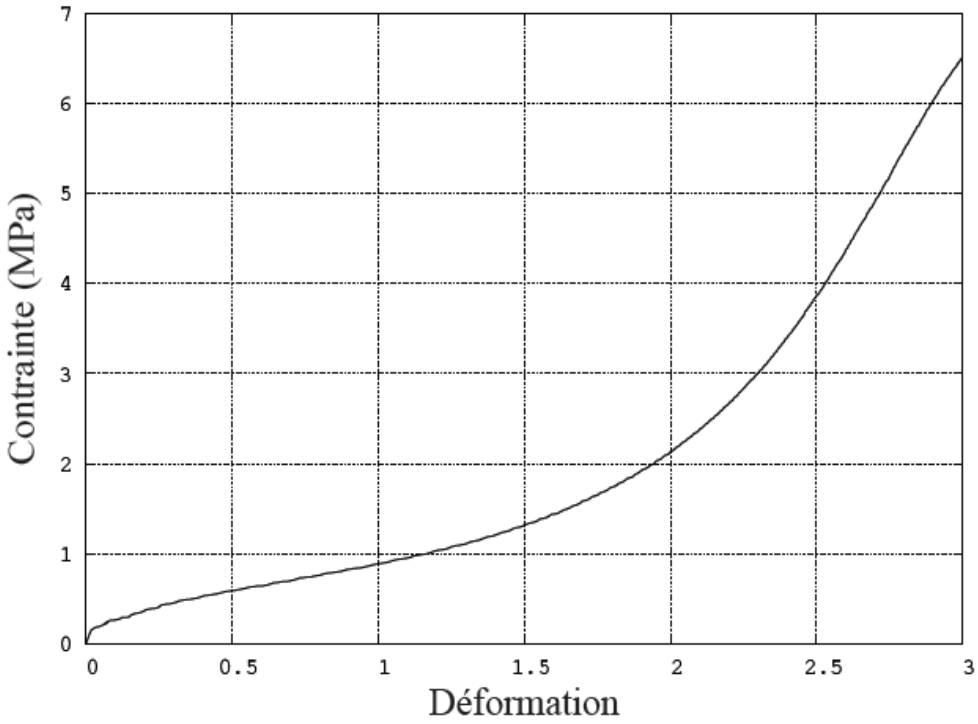

Figure (1-8) : Caractère hyperélastique d'un élastomère en traction uni axiale [1]

La courbe nous illustre la capacité de déformation de l'élastomère qui peut atteindre parfois les 700%, et d'une autre part on remarque aussi la non linéarité du comportement.

A l'échelle microscopique un élastomère vulcanisé est constitué de longue chaine moléculaire comportant des points de jonctions.ces macromolécules forment aussi un réseau tridimensionnel. Sous l'action d'une sollicitation mécanique, ces chaines moléculaires

peuvent glisser les unes sur les autres et changer aussi la configuration microstructurale du réseau moléculaire qui passe d'un arrangement aléatoire suivant la direction de sollicitation.
Par conséquent l'élasticité caoutchoutique est de nature entropique. [1][10].

I-2-3 La viscoélasticité des élastomères

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

*le comportement élastique d'origine entropique, caractérisé par un module élastique.

*le comportement visqueux se manifestant par un retard à la réponse et une perte d'énergie à chaque cycle de déformation .on parle ainsi de comportement **viscoélastique.**

On peut ainsi caractériser les propriétés viscoélastiques d'un élastomère en mesurant sa réponse à une sollicitation dynamique.

La déformation se décompose en deux composantes, l'une est en phase (déformation élastique de module $\mathbf{G}^{'}$) , l'autre est en quadrature retard(déformation visqueuse de module $\mathbf{G}^{''}$). [9]

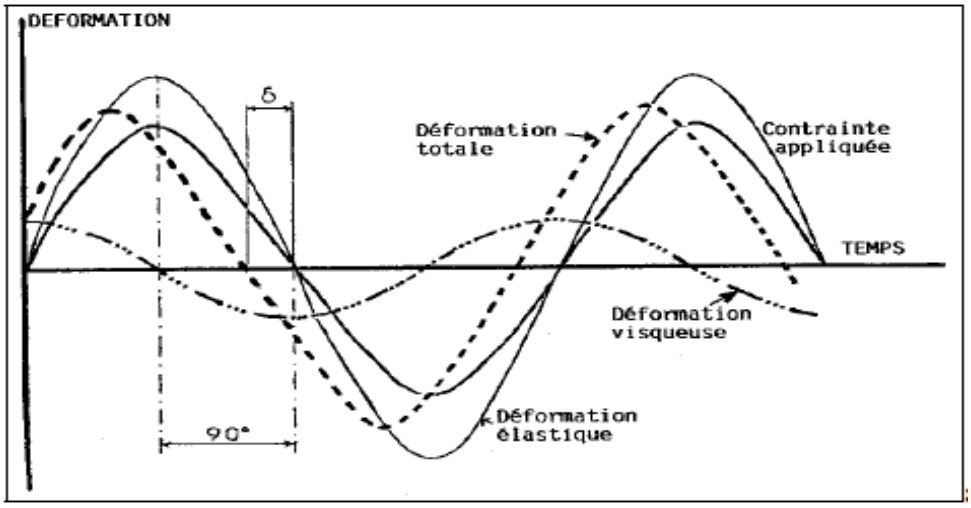

Figure (1-9) : Composante de la déformation en régime sinusoïdal (petite déformation). [9]

On a donc $\mathbf{G}^{*}=\mathbf{G}^{'}+\mathbf{i}\ \mathbf{G}^{''}$ Où $\mathbf{G}^{'}$ est le module de conservation (relié à l'énergie élastique emmagasinée) et $\mathbf{G}^{''}$ est le module de perte (relié a l'énergie visqueuse dissipée) $\delta= \mathbf{G}^{''}/\ \mathbf{G}^{'}$ apelé également « facteur de perte » qui mesure ainsi la perte d'énergie par frottement interne du matériau.

Si on suit l'évolution avec la température des propriétés d'un élastomère lors d'une sollicitation dynamique (figure 1-9) on observe 3 zones :

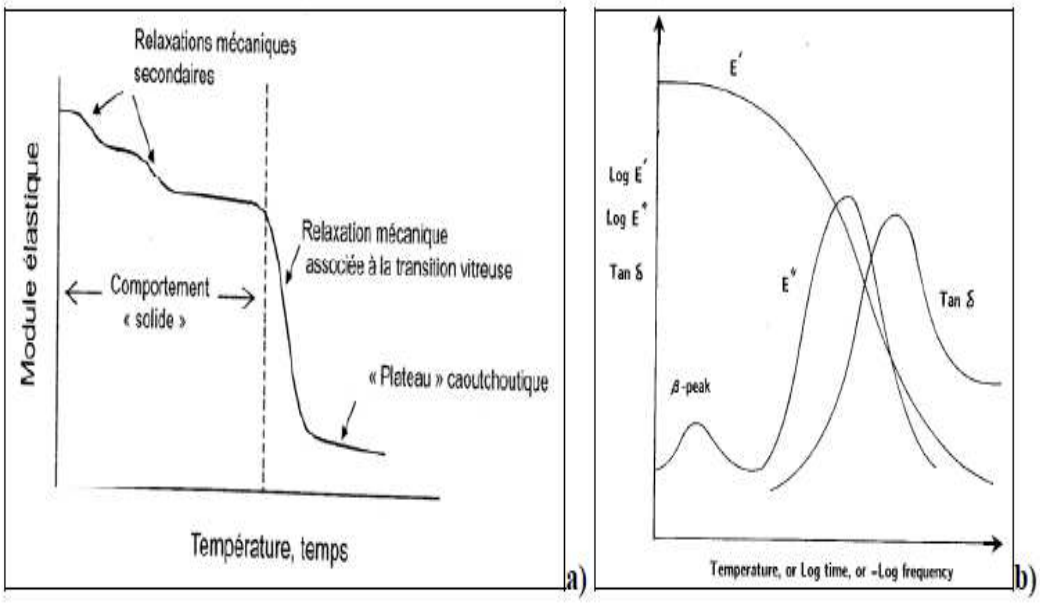

Figure (1-10) : a) évolution du module élastique avec la température [11]
b) évolution des composantes dynamique avec la température [12]

* à basse température (l'état vitreux) : le module mesuré est de l'ordre de GPa, cette rigidité est due à la quasi-immobilité des chaines macromoléculaires un réseau rigide.

***** quand la température augmente, on observe que l'ensemble des propriétés varie brusquement au-delà d'une température appelée **température de relaxation α (t_g)** (associe à la température de transition vitreuse de l'élastomère).

* pour des T° élevées, correspondant à l'état caoutchoutique, la valeur du module est comprise en 0.1et 1MPa. pour l'essentiel des applications, ce sont les propriétés mécanique de cette zone qui sont exploitées :le module élastique varie peu et le facteur de perte d'énergie(tan δ)est minimum.

La nature viscoélastique du comportement mécanique se manifeste ainsi par une dépendance marquée de la réponse du matériau vis-à-vis de la vitesse de déformation et de la température.ces deux facteurs peuvent être reliés avec une certaine approximation par l'équivalence temps-température, qui permet de construire une courbe maitresse à partir d'essais réalisés à différentes températures et fréquence, situé dans un domaine expérimental limité.

une extension du domaine est envisageable lorsque l'on connait une propriété caractéristique de la viscoélasticité du matériau appelé *facteur de glissement appelé* a_T . [7]

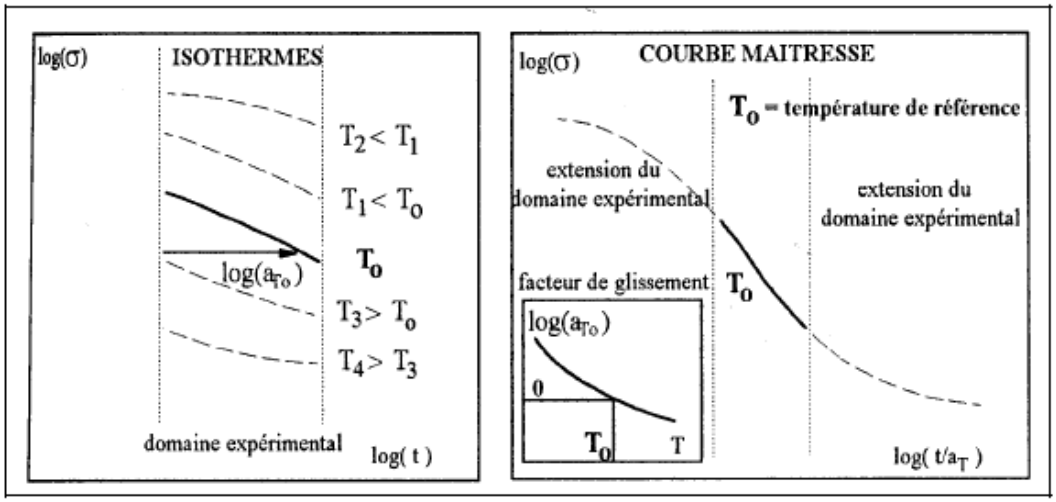

figure (1-10) : principe d'équivalence temps-température [13]

La figure (1-10) schématise le principe d'obtention d'une courbe maitresse à partir de mesure expérimentales isothermes.

L'approche phénoménologique de [13] introduisant la relation WLF, peut etre utiliser pour modéliser l'évolution du facteur de glissement au dessus de T_g :

$$\log a_T = -\frac{C_1(T-T_0)}{C_2+T-T_0}$$

Où ;

- a_T est le facteur de glissement
- C_1 et C_2 des coefficients universels dans la théorie WLF, mais en fait dépendent souvent des matériaux.
- T_0 une température de référence choisie arbitrairement, en règle générale , on prend $T_0 = T_g$ où $T_0 = T_g+50°C$, ceci conduisant à une translation de 3 à 10°C pour une décade de fréquence.

Le tableau (1-2) nous renseigne sur les valeurs de C_1 et C_2 pour quelque polymères , « constante universelles » corespondent aux valeurs de la théorie WLF .

Polymères	C_1	C_2	T_g (K)
Polysobutylène	16.6	104	202
Caoutchouc naturel	16.7	53.6	200
Elastomère poluréthane	15.6	32.6	238
« constante universelle »	17.4	15.6	

TABLEAU (2-1) : constantes C_1 et C_2 pour différents polymères [9]

I-2-4 Hystérésis :

La conservation de l'énergie mécanique en chaleur, ou hystérésis, est un aspect très important du comportement dynamique des matériaux viscoélastique.

L'hystérésis est la perte d'énergie mécanique par unité de volumes.

Si l'on trace sur un même diagramme force/déplacement la réponse à faible vitesse d'une éprouvette en caoutchouc, la courbe de retour ne se superpose pas à la courbe aller. Il y a hystérésis, mettant en évidence l'existence de frottements internes dans le matériau [7]. Les éléments libres des chaînes moléculaires glissent les uns sur les autres, entraînant un frottement sec interne générateur de perte d'énergie.

Une étude de l'hystérésis en fonction de la température, du taux d'élongation et de l'énergie de déformation, à vitesse de déformation constante, pour un élastomère thermoplastique, est présentée dans [7]. Il est montré que l'hystérésis croît lorsque la température diminue ou lorsque la déformation augmente (figure 1-12). Ce phénomène dissipatif est donc fonction de la structure du matériau (taux de cristallisation, nombre de liaisons secondaires, ...).

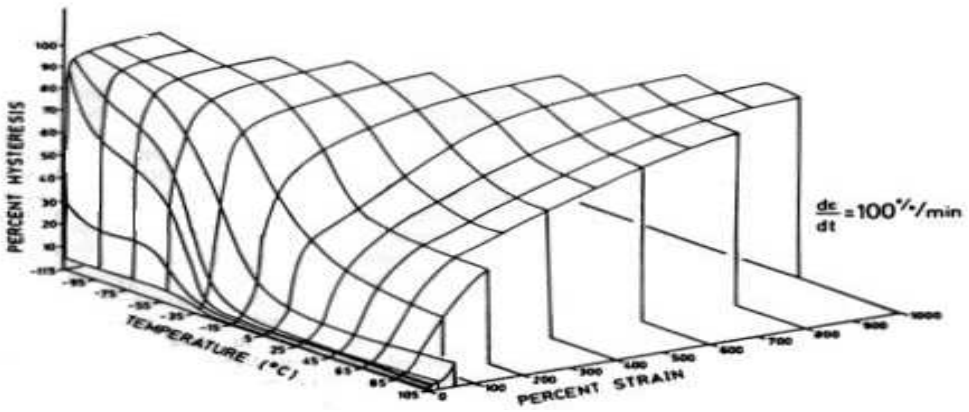

Figure (1-12) : Variation de l'hystérésis pour un thermoplastique en fonction de la déformation et de la température [7].

I-2-5 Viscosité

Le comportement du caoutchouc dépend de la vitesse de sollicitation. Cette viscosité est particulièrement visible autour de la température de transition vitreuse *Tg*, et a une influence plus petite sur le plateau caoutchoutique. Elle est attribuée au glissement des chaînes les unes sur les autres. Des essais de relaxation (ou fluage) et des essais de viscoélasticité dynamique.

nous montrent l'attitude de dépendance de la viscosité vis-à-vis du niveau de déformation ;ce qui est connu sous le nom de l'effet PAYNE

Dans cette étude ils utilisaient des vitesses de déformation faible, inférieur à

0.5 S^{-1}

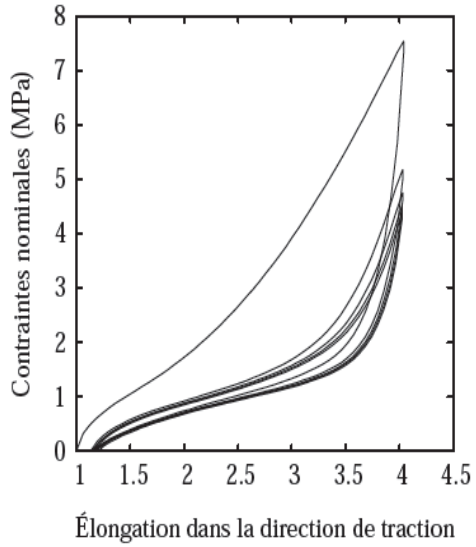

Figure (1-13) : courbe de traction cyclique. Cinq cycles de chargement sont imposés Entre effort nul et une déformation Maximale de 300% .[2]

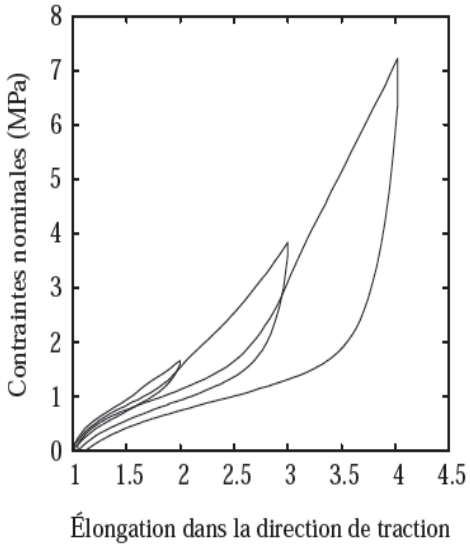

Figure (1-14) **:** courbe de traction cyclique. chaque cyclque de chargement est effectué à un niveau de déformation superieur à celui du cycle précédent.[2]

La viscosité provoque aussi des effets secondaires inespérés. L'énergie produite est dégagée sous forme de chaleur ,ce qui engendre l'élévation de la température ; car les elastomère ont une faible conductivité thermique .

De plus pour des hautes vitesses de chargement , il se peut que le matériau soit détruit à la suite des échauffements répétés.

I-2-6 L'effet Mullins

Des études ont été réalisées pour préciser le comportement des élastomères pour des essais sous chargement cyclique où un adoucissement notable est observé pour la première boucle. Ce phénomène est appelé effet Mullins [14].

Lorsqu'un élastomère est sollicité de façon cyclique, une diminution de la charge est nécessaire pour obtenir la même élongation. Ce phénomène plus ou moins réversible, connu sous le nom d'adoucissement sous contrainte ("stress-softening") ou d'effet Mullins, a été l'objet de nombreuses recherches. Après un certain nombre de cycles, ce nombre pouvant dépendre de l'amplitude de la déformation, la réponse du matériau se stabilise.[3]

Ainsi, on représente, sur la figure (1-14), l'effet Mullins dans le cas d'un matériau idéal c'est à-dire sans phénomène viscoélastique ou de dépendance à la vitesse de déformation.

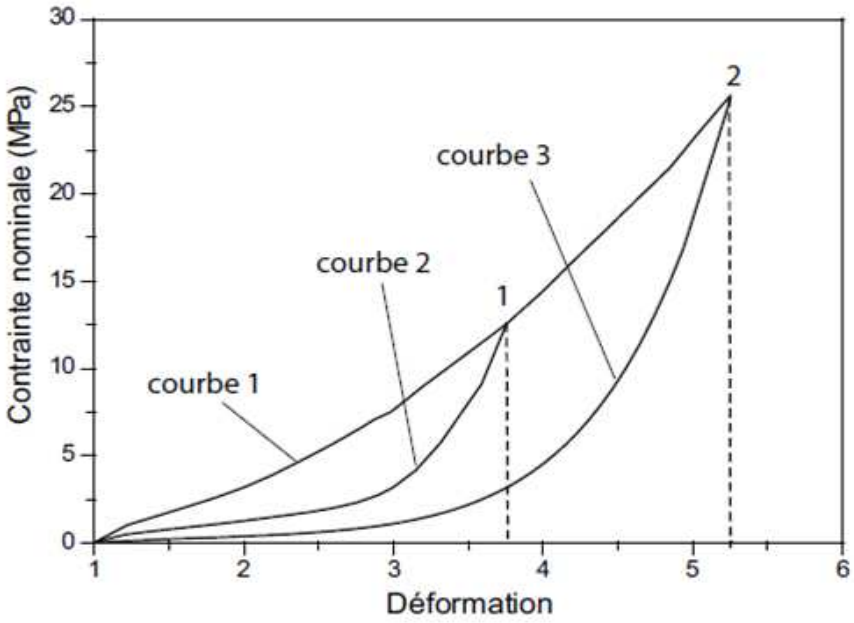

Figure (1-15) : schématisation de l'effet Mullins [6]

On peut alors décrire l'effet Mullins, pour ce matériau idéal, de la manière suivante:

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

Ce phénomène a été observé pour la première fois par Bouasse et Carrière, Mais il doit son nom à Mullins qui l'a étudié plus en détails.

L'effet Mullins est souvent assimilé à un endommagement dans la mesure où il représente une dégradation permanente du matériau accompagnée de déformations rémanentes.

En fait, cet «endommagement » n'est pas complètement irréversible. Le matériau a une capacité de restauration, très lente à température ambiante, plus rapide à température élevée. Ceci permet parfois de considérer l'effet Mullins comme résultant d'une viscosité à très grande échelle de temps. Des essais de recouvrement (total ou partiel) issus de la thèse de Chagnon montrent que plusieurs mois à température ambiante sont nécessaires pour que le matériau recouvre son comportement à la première charge. il serait dù à plusieurs phénomènes physique différents :

– la décohésion entre la gomme et les charges sous l'effet du chargement mécanique ;

– des ruptures de chaînes ;

– une réorganisation des chaînes provoquant une orientation préférentielle du réseau .

I-2-7 L'effet payne

Dans le domaine de petites déformations, la matrice élastométrique montre un comportement lineaire ; l'incorporation des charges confère aux élastomères un comportement non lineaire(voir figure ci-dessous). Ce phénomene est connu sous le nom de **l'effet payne**. Aux faibles niveaux de déformation on observe un plateau correspondant au plateau caoutchoutique.

Le module de conservation **G'** diminue lorsque la déformation augmente jusqu'à une valeure stable. Cette décroissance est associée à un maximum du module de perte traduisant une dissipation d'énergie d'autant plus grande que la chute de G' est élevée.

L'effet payne est interpreté comme le processus de désagrégation ou de rupture du réseau des charges ou par des mécanismes de frottement mis en jeu à l'interface charge/matrice [15]

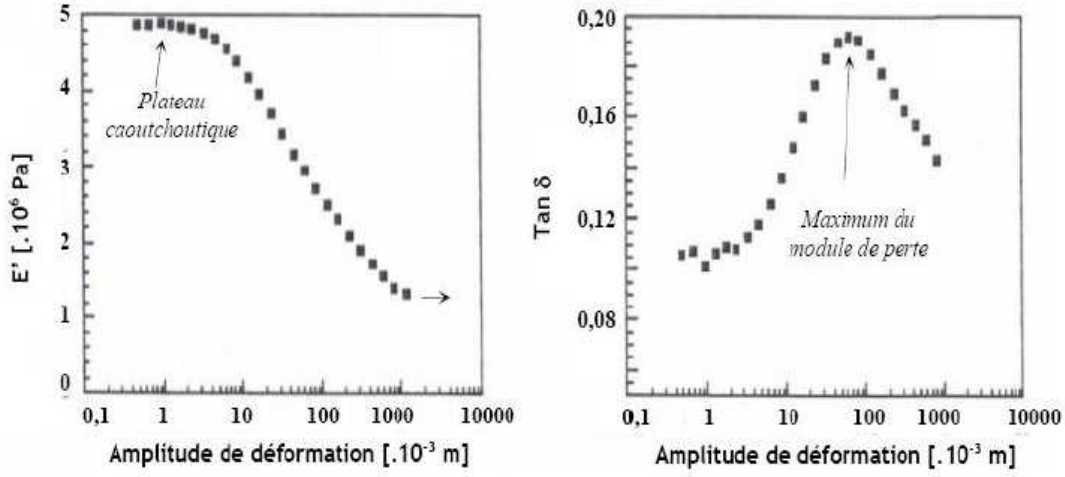

Figure (1-16):analyse de l'effet payne, évolution propriété mécanique en fonction du niveau de déformation pour un élastomère S B R renforcé en silice.[15]

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons pu voir d'une manière générale la microstructure des élastomères tout en rappelant leurs différentes classes ainsi que un bref aperçus sur les notions de renforcement et la dégradation de ces matériaux.

L'élasticité non- linéaire et les grandes déformations que les élastomères, peuvent subir, sont liées à la nature de leurs chaines macromoléculaires et à leur état de conformation.

Lorsqu'un élastomère est sollicité par des contraintes dynamiques, il répond en combinant une réponse élastique et une réponse visqueuse avec perte d'énergie à chaque cycle de déformation : il obéit à un comportement viscoélastique.

Les élastomères présentent un comportement complexe ; certaines caractéristiques sont encore mal comprises… à l'instar de l'effet Mullins et l'effet payne où beaucoup de théorie ont été proposé mais sans qu'une d'elle soit généralisée pour expliquer ces phénomènes.

Introduction

Dans ce présent chapitre nous abordons primordialement un bref aperçu sur la mécanique des milieux continus, en suite nous rappelons les différents modèles répandus dans la littérature qui décrivent le comportement hyperélastique des élastomères.

Les premiers modèles hyperélastiques ont été proposés dès les années 40. Les uns étaient basés sur des observations expérimentales et des propriétés mathématiques d'isotropie et d'incompressibilité ; d'autres étaient issus de considérations physiques.

II-1 Rappel sur la mécanique des milieux continus

Considérant une structure β qui occupe un domaine Ω_0 de R^3 à l'instant initial (sans effort),la configuration Ω_0 sera nommée configuration de référence.

Sous sollicitation mécanique, la structure β va se déformer et occuper à l'instant courant un nouveau domaine Ω de R^3 (voir figure 2-1) ce domaine est la configuration déformée.

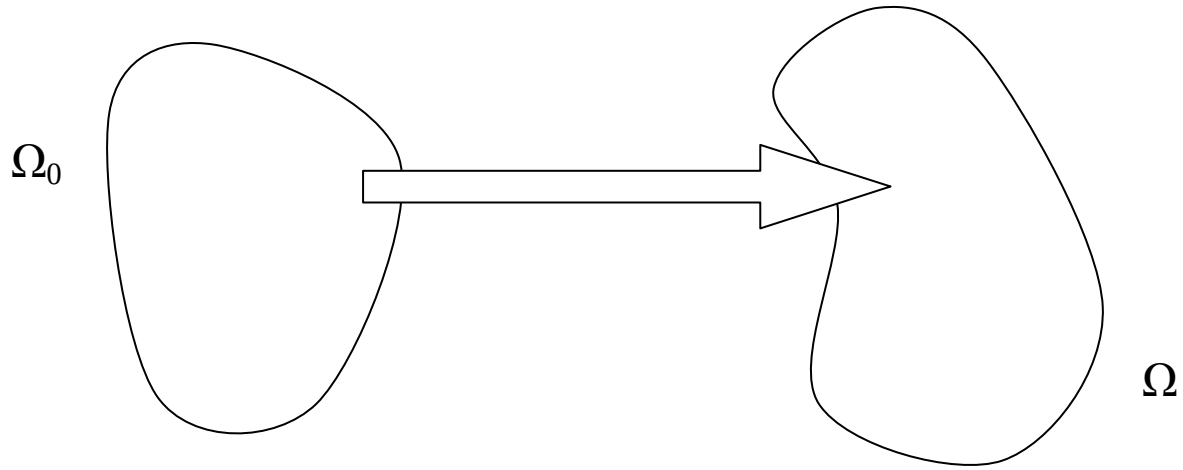

Figure (2-1) : configuration de référence et déformée.

Admettons que chaque point matériel P de Ω_0 de position $\overrightarrow{X_0}$ à t_0 occupe la position x_t au temps t.

on note F(t) le tenseur $\overline{\overline{grad}}(x)$: tenseur gradient de la transformation F(t) ; cependant on écrit

$$\overrightarrow{dx} = F(t)\overrightarrow{dX} \qquad \text{(II-1)}$$

$\overrightarrow{dx}$: la transformée d'un vecteur matériel $\overrightarrow{dX}$.

II-1-1 les tenseurs de dilatation :

On définit le tenseur lagrangien des dilatation cauchy green droit tel que :

$$\bar{\bar{C}} = \bar{\bar{F}}^t \bar{\bar{F}} \qquad \text{(II-2)}$$

Et le tenseur de cauchy green gauche , donné en description eulérien :

$$\bar{\bar{B}} = \bar{\bar{F}}\,\bar{\bar{F}}^t \qquad \text{(II-3)}$$

II-1-2 tenseurs des déformations :

a-description lagrangienne :

Le tenseur symétrique de déformation de green lagrange est définit :

$$\bar{\bar{E}} = \frac{1}{2}\left(\bar{\bar{C}} - \bar{\bar{I}}\right) \qquad \text{(II-4)}$$

b-description eulérienne :

Le tenseur d'Euler d'Almansi $\bar{\bar{A}}$ permet d'ecrire les déformation en déscription eulérienne :

$$\bar{\bar{A}} = \frac{1}{2}\left(\bar{\bar{I}} - \bar{\bar{B}}^{-1}\right) \qquad \text{(II-5)}$$

Considérons un cube unitaire se déformant en parallélépède de dimension $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$

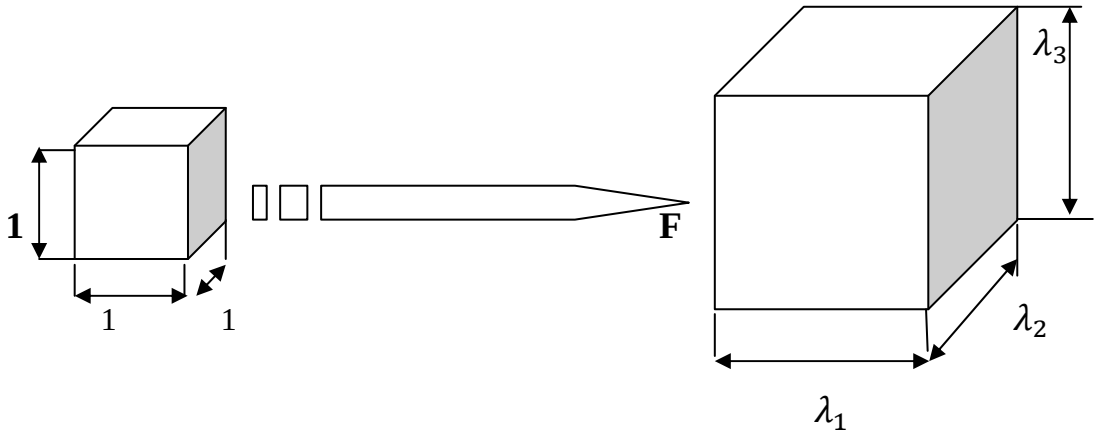

Figure (2-2) : déformation d'un cube élémentaire.

La matrice [F] du gradient de transformation s'écrit :

$$[F] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \quad \text{(II-6)}$$

où $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ sont les élengation principales.

Le tenseur $\bar{\bar{C}}$ de cauchy-green s'ecrit alors :

$$\left[\bar{\bar{C}}\right] = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda_1^2} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^2 \end{bmatrix} \quad \text{(II-7)}$$

II-1-3 : les invariants :

Les invariants de $\bar{\bar{C}}$ sont :

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 \ + \lambda_3^2 \quad \text{(II-8)}$$

$$I_2 = (\lambda_1\lambda_2)^2 + (\lambda_1\lambda_3)^2 \ + (\lambda_2\lambda_3)^2 \quad \text{(II-8)}$$

$$I_3 = det\left(\bar{\bar{C}}\right) = (\lambda_1\lambda_2\lambda_3)^2 \quad \text{(II-9)}$$

$\sqrt{I_1}$: Correspond donc à la longueur de la diagonale du parallélépipède.

$2I_2$: Correspond à la somme des Carré des aires des faces.

$\sqrt{I_3}$: Correspond au volume du parallélépipède.

II-2-4 notions d'incompressibilité :

Les élastomères sont considérée généralement comme des matériaux incompressible ; c.-à-d. : ils se déforment à volume constant.

$$j^2 = (\det F)^2 = det\bar{\bar{C}} = I_3 = 1 \qquad \text{(II-10)}$$

En termes des extensions principales :

$$\lambda_1\lambda_2\lambda_3 = 1 \qquad \text{(II-11)}$$

Dans le cas ou la compressibilité ne peut être négligée, on inclut le troisième invariant I_3 dans l'ecriture de l'énergie de déformation, cette derniere sera decomposer en deux termes :

- Un terme déviatorique
- Un terme hydrostatique

$$\omega = \omega_D(I_1; I_2) + \omega_H(I_3) \qquad \text{(II-12)}$$

II-3 les lois de comportement hyper élastique :

Les matériaux hyperélastiques sont caractérisés par l'existence d'une énergie de déformation (w) qui dépend de l'état de déformation F(t) et dont dérivent les contraintes.

En tenant compte de l'incompressibilité j=1 et I_3=1 ; on écrit :

**en ecriture lagrangienne :*

$$S = 2B\frac{\partial \omega}{\partial \bar{\bar{C}}} - PC^{-1} \quad \text{(II-14)}$$

***en ecriture eulérienne :**

$$\sigma = 2B\frac{\partial \omega}{\partial B} - PI \quad \text{(II-15)}$$

***en ecriture mixte :**

$$\Pi = \frac{\partial \omega}{\partial F} - PF^{-t} \quad \text{(II-16)}$$

W peut s'exprimer :

*En fonction des invariants du tenseur de déformation C ; I_1 et I_2 (I_3)

$$W = w(I_1, I_2) \quad \text{(II-17)}$$

*****en fonction des extensions principales λ_1 , λ_2 , λ_3

$$W = w(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad \text{(II-18)}$$

Nous obtenons aussi :

$$S = 2\left(\left[\frac{\partial \omega}{\partial I_1} + I_1\frac{\partial \omega}{\partial I_2}\right]I - \frac{\partial \omega}{\partial I_2}C\right) - PC^{-1} \quad \text{(II-19)}$$

$$\Pi = 2F\left(\left[\frac{\partial \omega}{\partial I_1} + I_1\frac{\partial \omega}{\partial I_2}\right]I\frac{\partial \omega}{\partial I_2}C\right) - PF^{-t} \quad \text{(II-20)}$$

Où également :

$$\sigma_i = 2\left[\lambda_i^2\frac{\partial \omega}{\partial I_1} + \frac{1}{\lambda_i^2}\frac{\partial \omega}{\partial I_2}\right] - P \quad \text{(II-21)}$$

Avec $i = 1, 3$

II-4 Quelques modèles hyper élastiques :

II-4-1 Les modèles phénoménologiques :

- cette démarche propose des expressions mathématiques pour décrire le phénomène sans se soucier de l'interprétation physique.ces raisonnements mathématiques sont souvent motivés par des observations expérimentales faites à l'échelle macroscopique.
- W étant le potentiel de déformation et s'exprimera en fonction:

  1-Des invariants du tenseur de déformation I_1 ,, I_2 (I_3=1 hypothèse d'incompressibilité)

  2-Des extensions principales du tenseur de déformation λ_1 , λ_2 , λ_3

a)Les modèles à base des invariant de tenseur de déformation :

a-1) Modèle de monney- rivelin, (1940) :

Dans cette approche considérée comme semi empirique, monney et rivelin ont proposé de relier la variation d'énergie libre accompagnant la déformation hyperélastique des élastomères réticulés aux premiers invariants I_1et I_2 du tenseur de déformation.

dans laquelle C_1 et C_2 sont deux constantes indépendantes de la déformation du réseau.

$$\omega(I_1, I_2) = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3) \qquad \text{(II-22)}$$

Ce modèle reste de loin le plus utilisé pour sa simplicité et sa capacité à refléter convenablement le comportement des élastomères pour des niveaux de déformation allant jusqu'à 100% [1].

a-2) Modèle de rivlin , (1948) :

$$\omega(\mathrm{I}_1, \mathrm{I}_2) = \sum_{\substack{0\le m\le\infty \\ 0\le n\le\infty}} \mathrm{C_{MN}}(\mathrm{I}_1 - 3)^{\mathrm{n}}(\mathrm{I}_2 - 3)^{\mathrm{m}} \qquad \text{(II-23)}$$

elle englobe plusieurs modèles, proposés par différents auteurs et dont les degrés d'approximation polynomiale en (I_1 , I_2) varient selon la nature de l'élastomère à modéliser et le domaine de déformation à couvrir [2].

Cette approche englobe plusieurs modèles :

a-3) le modèle de BIDERMAN (1958) :

$$\omega(\mathrm{I}_1, \mathrm{I}_2) = C10(I1 - 3) + C01(I2 - 3) + C20(I1 - 3)^2 + C30(I1 - 3)^3 \quad \text{(II-24)}$$

Ce modèle à quatre coefficients approche mieux les essais de Treloar que le modèle de monney, et améliore légèrement les résultat pour les données de Kawabata et al en traction biaxiale. [8]

a-4 le modèle de yeoh (1990) :

$$\omega(I_1, I_2) = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 \quad \text{(II-25)}$$

ce modèle à 3 constantes reste intéressant pour sa fiabilité dans la modélisation du comportement des élastomères pour des niveau de déformation inférieur a 300 % et pour sa disponibilité dans les codes de calculs. [2]

a-5 le modèle de LION (1997) :

$$\omega(I_1, I_2) = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{50}(I_1 - 3)^5 \quad \text{(II-26)}$$

ce modèle à 3 constante est en fonction des deux premiers invariants I_1 et I_2 reproduit parfaitement le comportement des élastomères en traction uniaxiale et traction biaxiale[1].

a-6) le modèle de haines-wilson :

ce modèle est une extension du modèle de monney-rivelin avec six constantes indépendantes du tenseur de déformation :

$$\omega = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{02}(I_1 - 3)^2 + C_{20}(I_1 - 3) + C_{10}(I_1 - 3)^2 \quad \text{(II-27)}$$

Ce modèle fournit une excellente approximation des courbes de traction des trois expériences classiques pour des élongations inférieures à 7.4 en traction simple et inférieures à 4 en cisaillement pur et en traction équibiaxiale [2].

a-7) le modèle de rivelin et saunders (1951) :

Les deux auteurs réalisent des essais de traction biaxial dans lequel I_1 ou I_2 est fixé.

Les résultats de ces essais donne comme conclusion que $\frac{\partial \omega}{\partial I_1}$ est indépendant de I_1 et I_2 et que $\frac{\partial \omega}{\partial I_2}$ ne dépend pas de I_1. De plus le rapport $\frac{\partial \omega}{\partial I_1}/\frac{\partial \omega}{\partial I_2}$ décroit lorsque I_2 augmente.

Alors ils proposent que w soit de la forme suivante :

$$\omega = C(I_1 - 3) + f(I_2 - 3) \qquad \text{(II-28)}$$

a-8) le modèle de Gent-thomas (1958) :

ce modèle à deux constantes découle d'une étude experimentale où le potentiel de déformation s'exprime de la forme suivante :

$$\omega(I_1, I_2) = A_1(I_1 - 3) + A_2 ln \frac{I_2}{3} \qquad \text{(II-29)}$$

IL traduit convenablement le comportement des élastomères pour des déformations inférieurs à 200 % [14].

a-9) le modèle de Gent (1966) :

Gent propose que I_1 admet une valeur maximale I_m , il propose alors un modèle empirique à deux constantes :

$$\omega = \frac{-E}{6}(I_m - 3) ln \left[1 - \frac{I_1 - 3}{I_m - 3}\right] \qquad \text{(II-30)}$$

Ce modèle à deux constantes reproduit parfaitement les essais de Treloar avec des valeurs de coefficients ayant un sens physique. Il ne décrit pas le comportement en traction biaxiale en dehors des déformations modéreés. [14]

a-10) le modèle de Hart-Smith (1966) :

Hart-Smith constate, que $\frac{\partial \omega}{\partial I_1}$ est constant pour des valeurs de I_1 inferieures a 1 mais que ce terme augmente ensuite de manière significative pour des valeurs de I_1 supérieures a 12. Alors il propose un modèle ou la fonction expenentielle modélise le raidissement du matériau :

$$\frac{\partial \omega}{\partial I_1} = G \exp k_1 (I_1 - 3)^2 \qquad \text{(II-31)}$$

et

$$\frac{\partial \omega}{\partial I_2} = G \ \frac{k_2}{I_1} \qquad \text{(II-32)}$$

Ce modèle reste bien localisé, car il ne modélise pas le comportement de tous les caoutchoucs.

a-11) le modèle de Lambert-DIANI et Rey

Ce modèle à 5 constantes, permet de bien reproduire le comportement hyperélastique caractéristique des élastomères.

$$\omega = \int_3^{I_1} exp(\alpha_0 + \alpha_1 (I_1 - 3) + \alpha_2 (I_1 - 3)^2) dI_1 + \int_3^{I_2} \beta_1 \, I_2^{\beta_2} dI_2 \qquad \text{(II-33)}$$

Les paramètres de ce modèle sont déterminés expérimentalement, généralement par identification sur des essais de traction uniaxiale, equi-biaxiale induisant des fortes variations de I_1 , permet l'identification des paramètres en I_1 et les essais de traction equi-biaxiale et de cisaillement induisant des fortes variations de I_2 permettent l'identification des paramètres en I_2. [3]

b) les modèles à base des extensions principales

b-1) Modèle de VARGA, (1966)

$$\omega = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \mu(\lambda_1 +, \lambda_2 + \lambda_3 - 3) \qquad \text{(II-34)}$$

Avec $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$

Dans la catégorie des densités d'énergie fonctions des extensions principales, ce modèle constitue une première approximation du comportement des matériaux élastomères.[1]

b-2) le modèle de Valanis et Landel (1967)

$$\omega(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{i=1}^{3} \omega(\lambda_i) \quad \text{(II-34)}$$

$$\text{Avec } \omega(\lambda_i) = \sum_{j=1}^{n} \frac{\mu_j}{\alpha_j}(\lambda_i^{\alpha j} - 1) \quad \text{(II-35)}$$

Dans ce modèle la densité d'énergie de déformation est écrite en tant que la somme de 3 fonctions découplées et qui dépendent respectivement des trois extensions principales.[1]

b-3)le modèle d'Ogden (1972)

L'énergie de déformation ω s'exprime en termes de déformation généralisées et introduit une forme mathématique en serie de puissance reelles. [15]

$$\omega = \sum_{n=1}^{N} \frac{u_n}{\alpha_n}\left(\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n}\right) - 3 \quad \text{(II-36)}$$

Ce modèle à 6 constantes reproduit les essais de Treloar avec une très bonne précision en traction uniaxiale, en cisaillement pur et en extension equibiaxiale.il est à noter que cette forme mathématique est suffisamment riche pour permettre d'approcher n'importe quelle fonction w avec peu de terme.[1]

II-4-2Les modèles physiques :

Nous présentons dans ce qui suit des modèles hyperélastique fondés sur des considérations physiques.

a) le modèle neo-hookeen (1943)

C'est le modèle hyperélastique le plus simple.il correspond au modèle de mooney-rivlin à un seul terme, mais sa justification est plus moléculaire que phénoménologique [16]. En utilisant les lois de la mécanique statique peut etre écrit sous la forme :

$$\omega = \frac{1}{2} nkT(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad \text{(II-37)}$$

Qui peut s'ecrire :

$$\omega = \frac{1}{2} nkT(I_1 - 3) \quad \text{(II-38)}$$

N est le nombre de chaînes par unité de volume, *k* est la constante de Boltzmann et T la température absolue.

b) l'élasticité d'une chaine (1942) :

Kuhn et Grun , considère qu'apartir de la limite d'extensibilité des chaine que l'accroissement de raideur final des courbes expérimentales pourra s'expliquer.[14]

N étant le nombre de segment d'une chaine donné par :

$$\lambda_{max} = \sqrt{N} \qquad \text{(II-39)}$$

$$\omega = nkT\left[\frac{\lambda}{\sqrt{N}}\beta + ln\frac{\beta}{\sin h\beta}\right] \qquad \text{(II-40)}$$

Où $\beta = l^{-1}\frac{\lambda}{\sqrt{N}}$ (II-41)

l^{-1} est l'inverse de la fonction de langevin défini par :

$$l(x) = \cos h(x) - \frac{1}{x} \qquad \text{(II-42)}$$

c) Le modèle 3-chaines (1943) :

Dans ce modèle les deux auteurs James et Guth ,supposent que la déformation du réseau de chaine orietées aléatoirement peut se ramener à un réseau de chaines réparties suivant les trois axes du repère de déformation principales.

Si n est la densité de chaine, chaque axe du repère se voit attribuer une densité n/3 de chaines.

Le modèle est illustré par la figure (2-3) :

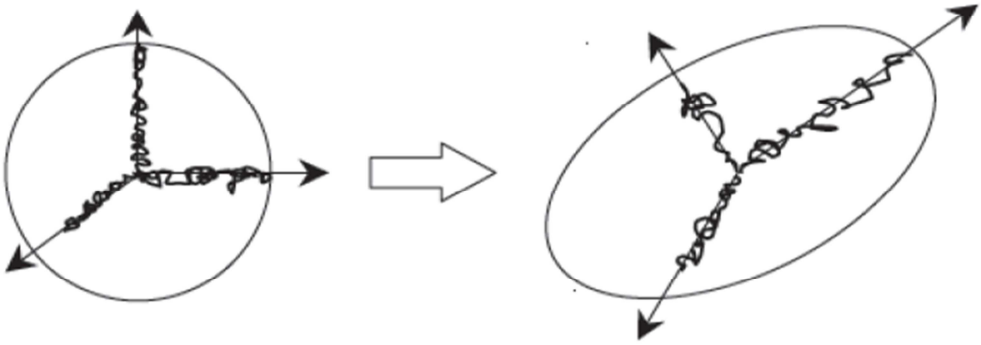

Figure (2-3) : modèle à 3 chaines[14].

Les contraintes sont alors calculées par sommation des efforts des n/3 chaines de chaque direction selon l'équation :

$$\sigma_i = \frac{nkT\lambda}{3\sqrt{N}}\lambda_i l^{-1}\left(\frac{\lambda i}{\sqrt{N}}\right) - P \qquad \text{(II-43)}$$

d) le modèle à 4 chaines (1944) :

Flory et Treaor développent un modèle purement physique représenté dans la figure (2-4). Les chaines sont orientées suivant les quartes directions du tétraèdre. Ce dernier est inclus dans une sphère unité qui se transforme en ellipsoïde contenant le tétraèdre déformé. Ce modèle ne présente pas de forme analytique ; pour cette raison que son utilisation reste toujours restreinte.

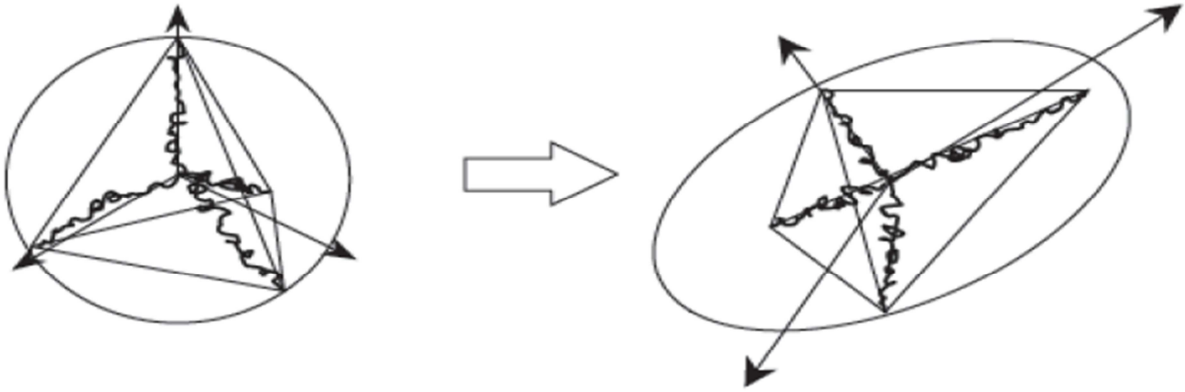

Figure (2-4) : représentation du modèle à 4 chaines[14].

e) Le modèle d'Ishiara (1951)

Ishiara construit un modèle de forme similaire à la série de rivelin ou w s'écrit :

$$\omega = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{01}(I_2 - 3) \qquad \text{(II-44)}$$

On note la présence de I_2 , qui n'était pas présent dans la théorie des modèles physiques.

Ce modèle se rapproche des modèles phénoménologiques de Biderman et de mooney-rivelin.

f) le modèle slip-link (1981)

Selon ce modèle un lien relie deux chaines suivant le schéma de la figure(2-5).L'inconvénient de ce modèle est la complexité mathématique permettant d'établir une énérgie de déformation moyenne.

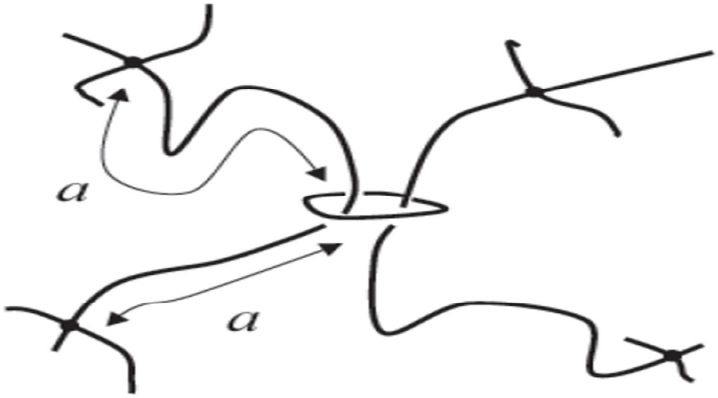

Figure (2-5) : représentation du modèle slip-linK. [8]

Ball et all dégagent expression de W qui permet d'expliquer la chute du module initiale (premiere courbure de la courbe de traction).

$$\omega = \frac{1}{2} kTN_c \sum_{i=1}^{3} \lambda_i^2 + \frac{1}{2} kTN_S \sum_{i=1}^{3} \left[\frac{(1+n)\lambda_i^2}{1+n\lambda_i^2} + ln\left(1 + n\lambda_i^2\right) \right] \qquad \text{(II-45)}$$

On netera que ce modèle est plus important en traction biaxiale à λ_2 imposé à 2 [10].

g) le modèle de Kilian ou modèle de van der waals (1981)

Kilian et al , partent de l'idée des interactions entre chaines par les forces de van der waals. Le réseau ideal est alors traité comme un gaz où les intéractions sont appliqués entre quasi-particules.

Il aboutit alors à un modèle à trois paramètre. En 1989 le modèle est proposé sous la forme d'un potentiel w par l'introduction d'un invariant généralisé $\tilde{I}$:

$$\omega = G\left\{ -(\lambda_m^2 - 3)[ln(1-\theta) + \theta] - {}^{2}/_{3}\left(\frac{\tilde{I}-3}{2}\right)^{\frac{3}{2}} \right\} \qquad \text{(II-46)}$$

Avec $\theta = \sqrt{\frac{\tilde{I}-3}{\lambda_m^2-3}}$ (II-47)

Et $\tilde{I} = \beta I_1 + (1-\beta) I_2$ (II-48)

La justification moléculaire du paramètre supplémentaire, considère comme un coefficient d'ajustement, n'est cependant pas fournie. Les transformations apportées au modèle initial de Kilian confèrent finalement a ce modèle un caractère empirique même s'il est fonde sur des considérations moléculaires.

Ce modèle reproduit très bien la traction uniaxiale et le cisaillement pur avec le meme jeu de paramètre dans le domaine des grandes déformation (600% en traction , 500% en cisaillement pur).il permet aussi de simuler le comportement en traction équibiaxiale jusqu'à 150% de déformation[14].

h) le modèle de Flory et Erman (1982)

Flory et al dévloppe un modèle où les points de jonction entre les chaines sont contraint de se déplacer dans un voisinage restreint du fait de la présence des autres chaines. (voir figure 2-6).

Figure (2-6) : modèle jonction courante-(o) jonction courante ;(x) jonction voisines. [14]

la partie fantome de ce modèle est alors est alors constitué du modèle néo-hookeen tandis que la partie contrainte réseau w_c prend la forme suivante :

sachant que $W = W_{ph} + W_c$ (II-49)

$$\omega_c = \frac{1}{2} kT\mu \sum_{i=1}^{3} [B_i + D_i - ln(B_i + 1) - ln(D_i + 1)] \quad \text{(II-50)}$$

Avec $B_i = k^2\left(\lambda_i^2 - 1\right)\left(\lambda_i^2 + k\right)^{-2}$ (II-51)

$$D_i = \lambda_i^2 k^{-1} B_i \quad \text{(II-52)}$$

Ce terme supplémentaire améliore le modèle néo-hookeen dns la déformation moyenne en ajoutant une courbure plus prononcée en début de chargement.

i) le modèle d'arrauda et boyce :

Les deux auteur se sont basés sur les travaux entrepris par james et guth ainsi que flory et tréloar sur les modèles 3 et 4 chaines et proposent un modèle à 8 chaines ,dont suppose que le réseau de chaines est distribué suivant les quatres directions privilégiées correspondant aux sommet d'un cube inclus dans une sphère unité comme le montre la figure (2-7)

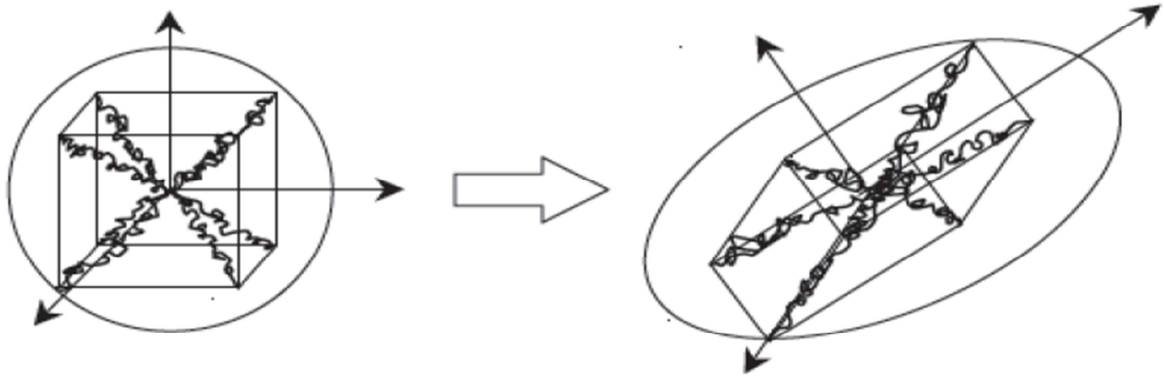

Figure (2-7) : modèle à 8 chaines. [8]

L'avantage de ce modèle est sa simplicité, on remarque que lorsque la sphère unité se déforme, toutes les chaines s'étendent de manière identique, et que la valeur de cette extension λ_{ch} est donné par la relation :

$$\lambda_{ch}^2 = \frac{\lambda_1^2+\lambda_2^2+\lambda_3^2}{3} = \frac{I_1}{3} \quad \text{(II-53)}$$

- Les contraintes sont données par :

$$\sigma_i = nkT\frac{\sqrt{N}}{3}\frac{\lambda_i^2}{\lambda_{ch}} l^{-1}\left(\frac{\lambda_{ch}}{\sqrt{N}}\right) \quad \text{(II-54)}$$

l^{-1} : Fonction inverse de la fonction Langevin

n : la densité de chaine du réseau

N : le nombre moyen de segment par chaine

C_r : nkT

L'énergie de déformation est donnée par la relation suivante :

$$\omega_{8ch} = c_r\left[\beta_{ch}\lambda_{ch} + \sqrt{N}\, ln\left(\frac{\beta_{ch}}{\sin h(\beta_{ch})}\right)\right] \quad \text{(II-55)}$$

Avec :

$$\beta_{ch} = l^{-1}\left(\frac{\lambda_{ch}}{\sqrt{N}}\right) \quad \text{(II-56)}$$

j) Le modèle tube (1997)

Heinrich et Al partent des travaux d'édwards et vilgis , pour établir un modèle de déformation où les chaines ne se déforment plus selon un modèle du réseau fantome. Les chaines sont supposées se déformer en restant confinées dans un tube fermé par le réseau avoisinant (voir figure 2-8)

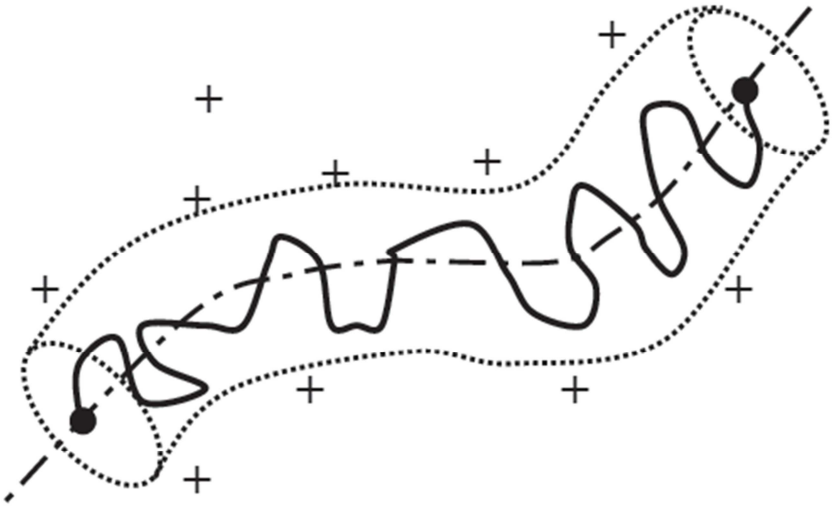

Figure (2-8) : représentation du modèle tube. [8]

Le potentiel élastique de ce modèle est donné par la relation suivante :

$$\omega = G_c I^*(2) + \frac{2G_e}{-\beta} I^*(-\beta) \qquad \text{(II-57)}$$

Où $I^*(\beta)$ est le premier invariant du tenseur de déformation généralisé $\bar{\bar{e}}(\beta)$.

G_c et G_e des paramètres qui ont une signification physique.

Ce modèle se rapproche du modèle d'Ogden à deux termes en imposant α_1,

$\alpha_2 = -\beta$, $\mu_1 = G_c$ et $\mu_2 = \frac{2G_e}{-\beta}$.

Ce modèle permet de modéliser le comportement dans les différents modes de comportement.

k) le modèle tube étendu (1999) :

Vu les insuffisances que présente le modèle tube dans la modélisation du comportement aux moyennes déformations, Kalishe et Heinrich introduisent un paramètre d'extensibilité des chaines, ils obtiennent alors une fonction d'énergie libre de la forme suivante :

$$\omega_c = \frac{G_C}{2}\left[\frac{1-\delta^2(I_1-3)}{1-\delta^2(I_1-3)} + ln\left(1-\delta^2(I_1-3)\right)\right] \quad \text{(II-58)}$$

La partie $\omega_e = \frac{2G_e}{-\beta} I^*$ (II-59)

Avec $0 \leq \beta \leq 1$ (II-60)

Conclusions :

- Les modèles cités ci-dessus décrivent relativement le comportement hyperélastique des élastomères.

- La fiabilité des modèles varie en fonction du niveau et du mode de déformation.

- Les paramètres des modèle phénoménologique restent toujours délicats à mesurer car ne sont pas relies à des valeurs parfaitement physique.

- Certains modèles sont promoteurs mais sont indisponible dans le code de calcul.

Deuxième partie

Résultats et interprétation

Introduction :

Dans ce chapitre nous retenons deux lois de comportement hyperélastique afin de les implémenter dans le logiciel ABAQUS pour la simulation du comportement hyperélastique des élastomères.

Ce présent chapitre se base premièrement sur une description de la démarche suivie pour la programmation du modèle de Gent et Isharai à partir du code de calcul fortran ; puis nous comparons les courbes numériques obtenues avec les courbes expérimentales, tout en variant les paramètres des modèles et en fin nous incluons au modèle de gent l'effet de la température pour mettre en évidence, son influence.

III-1 : démarche suivie pour la programmation des deux modèles de comportement hyperélastique :

III-1-1 : le sous programme UHYPER :

III-1-1-1 : l'utilité du sous programme UHYPER :

- le sous programme UHYPER est utilisé pour définir l'énergie de déformation pour le comportement des matériaux hyperélastiques.
- Il fait appel à tous les points matériels de calcul des éléments pour les quels la définition matérielle contient un comportement hyperélastiques.
- Il exige que les valeurs des dérivées de la fonction de l'énergie de déformation soit définie en fonction des invariants de déformation. [18]

III-1-1-2 : l'interface du sous programme UHYPER :

```
SUBROUTINE UHYPER (BI1,BI2, AJ,U, UI1, UI2,UI3, TEMP,NOEL,
1 CMNAME, INCMPFLAG, NUMSTATEV,  STATEV , NUMFIELDV, FIELDV,
2 FIELDVINC, NUMPROPS, PROPS)
C
INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
C
CHARACTER*80 CMNAME
DIMENSION U(2),UI1(3),UI2(6),UI3(6),STATEV(*),FIELDV(*),
2 FIELDVINC (*), PROPS(*)
```

Utilisation du codage en fonction U,UI1,UI2,UI3,STATEV

RETURN
END

III-1-1-3 : variables à définir :

U(1) :

U : la fonction de l'énergie de déformation. Pour un matériaux compressible J soit impliqué avec une valeur non nulle, et pour un matériau incompressible : toutes les dérivées impliquant J seront ignorées.

U(2) ; U_{dev}, la partie déviatorique de l'énergie de déformation ; cette quantité est nécessaire si les effets Mullins sont inclus.

UI1 (1) : $\partial U / \partial I_1$ (III-1)

UI1 (2) : $\partial U / \partial I_2$ (III-2)

UI1 (3) : $\partial U / \partial J$ (III-3)

UI2 (1) : $\partial^2 U / \partial I_1^2$ (III-4)

UI2 (2) : $\partial^2 U / \partial I_2^2$ (III-3)

UI2 (3) : $\partial^2 U / \partial J_2^2$ (III-4)

UI2 (4) : $\partial^2 U / \partial I_1 \partial I_2$ (III-5)

UI2 (6) : $\partial^2 U / \partial I_2 \partial I_J$ (III-6)

UI3 (1) : $\partial^3 U / \partial {I_1}^2 \partial J$ (III-7)

UI3 (2) : $\partial^3 U / \partial {I_2}^2 \partial J$ (III-8)

UI3 (3) : $\partial^3 U / \partial I_1 \partial I_2 \partial J$ (III-9)

UI3 (4) : $\partial^3 U / \partial I_1 \partial J^2$ (III-10)

UI3 (5) : $\partial^3 U / \partial I_2 \partial J^2$ (III-11)

UI3 (6) : $\partial^2 U / \partial J_2^3$ (III-12)

STATEV : tableau contenant les variables solution-dépendantes. celle ci sont fournie comme valeurs au début de l'incrément ou comme valeurs utilisées par d'autre sous programme.

III-1-1-4 : variables définies :

BI1

I_1

BI2

I_2

AJ

J

TEMP : température courante

NOEL : nombre d'élément

CMNAME : spécification du nom du matériau

INCMPFLAG : l'incompressibilité est égale à 1 si le matériau est incompressible ou 0 si le matériau est compressible.

NUMFIELDV : nombre de variable de champ

FIELDV : choix de valeurs interpolées des variables prédéfinies.

NUMPROPS : nombre de propriétés matérielles pour un matériau hyperélastiques défini

PROPS : tableau des propriétés du matériau hyperélastiques défini par l'utilisateur.

III-1-2 : les expressions des énergies de déformation utilisées et le calcul des dérivées correspondantes :

a) Le modèle de Gent :

L'expression de l'énergie de déformation est fonction du premier invariant du tenseur de déformation :

$$\omega = \frac{-E}{6}(I_m - 3) ln\left[1 - \frac{I_1 - 3}{I_m - 3}\right] \qquad \text{(III-13)}$$

les dérivées non nulle utilisée dans le sous programme UHYPER sont les suivantes :

- $$\frac{\partial \omega}{\partial I_1} = \frac{-E}{6}(I_m - 3)\left[\frac{\frac{-1}{I_m - 3}}{1 - \frac{I_1 - 3}{I_m - 3}}\right] \qquad \text{(III-14)}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial I_1} = \frac{-E}{6}(I_m - 3)\left[\frac{-1}{I_m - 1}\right] \qquad \text{(III-15)}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial I_1} = \frac{E}{6}\left(\frac{I_m - 3}{I_m - I_1}\right) \qquad \text{(III-16)}$$

- $$\frac{\partial^2 \omega}{\partial I_1^2} = \frac{E}{6}\left[\frac{(I_m - 3)}{(I_m - I_1)^2}\right] \qquad \text{(III-17)}$$

b) Le modèle d'Ishiara :

L'expression de l'energie de déformation est en fonction des deux premiers invariants du tenseur de Déformation :

$$\omega = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{01}(I_2 - 3) \qquad \text{(III-18)}$$

Les dérivées non nulles utilisées dans le sous programme UHYPER sont les suivantes :

$$\frac{\partial \omega}{\partial I_1} = C_{10} + 2C_{20}(I_1 - 3) \qquad \text{(III-19)}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial I_2} = c_{01} \qquad \text{(III-20)}$$

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial I_1^2} = 2C_{20} \qquad \text{(III-21)}$$

III-2Les données expérimentales :

III-2-1Les essais classiques :

La fiabilité d'une loi de comportement hyperélastique est sa capacité de reproduire le comportement du matériau pour les différents modes de déformation.

Dans ce qui suit nous présentons les deux différents essais classiques qu'on avait utilisé pour la simulation numérique.

III-2-1-1 l'extension simple :

Ce mode de déformation consiste à étirer un échantillon sur lequel la partie utile peut etre supposée en état de déformation uniaxiale.(voir figure 3-1).les contraintes dans la largeur et dans l'épaisseur de l'éprouvette sont alors considérées nulles.[10]

Figure (3-1) : expérience de traction

la matrice [F] du tenseur de déformation $\bar{\bar{F}}$ est alors donné sous la forme suivante :

$$[F] = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{\lambda}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \end{bmatrix} \quad \text{(III-22)}$$

Les invariants de $\bar{\bar{c}}$ sont donnés par les relations :

$$I_1 = \lambda^2 + \frac{2}{\lambda} \quad \text{(III-23)}$$

$$I_2 = \frac{1}{\lambda^2} + 2\lambda \quad \text{(III-24)}$$

$$I_3 = 1 \quad \text{(III-25)}$$

Selon l'écriture de la loi de comportement on peut encore ecrire :

$$\partial = \lambda \frac{\partial \omega}{\partial \lambda_1} - \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \frac{\partial \omega}{\partial \lambda_2} \quad \text{(III-26)}$$

Où $\frac{\partial \omega}{\partial \lambda_1}$ et $\frac{\partial \omega}{\partial \lambda_2}$ représentent les dérivées partielle de la fonction w lorsque celle-ci est ecrite sous la forme w $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$

III-2-1-2 la compression uniaxiale :

La compression uniaxiale est un cas particulier de l'extension simple, l'éprouvette est alors comprimée au lieu d'être étirée. La forme analytique est la même que l'extension simple.

Figure (3-2) : expérience de compression uniaxiale.

Nos résultats expérimentaux ont été extrais du travail mené par Mustapha et al. [19].

Les résultats expérimentaux sont représentés ci-dessous :

- ***En traction uniaxiale***

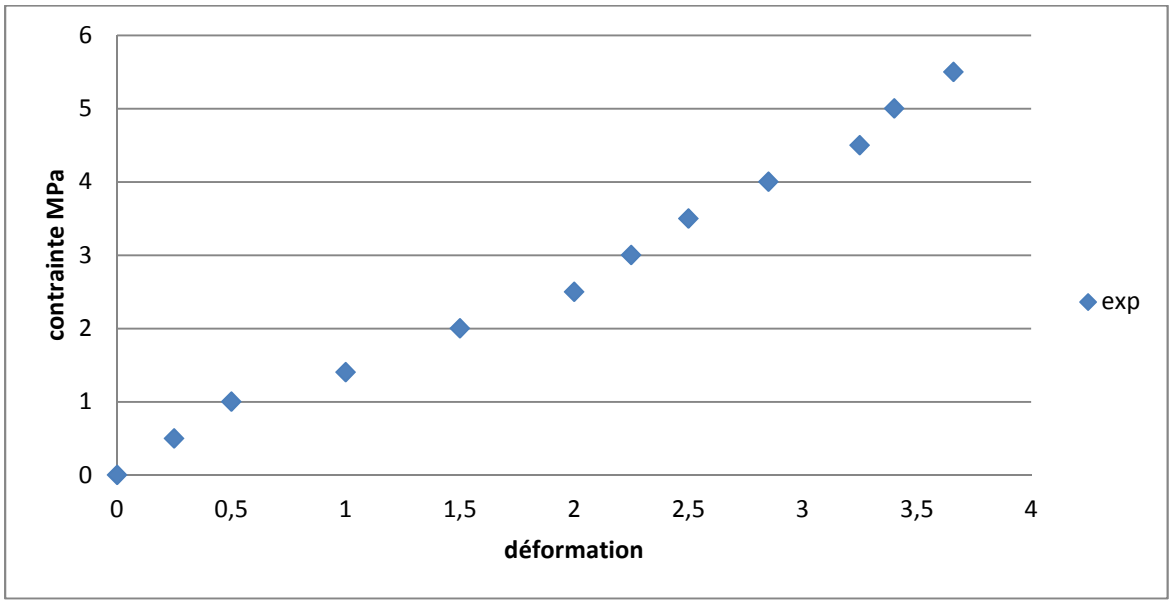

Figure (3-3) : courbe expérimentale de traction uniaxiale d'un NBR

- ***En compression uniaxiale***

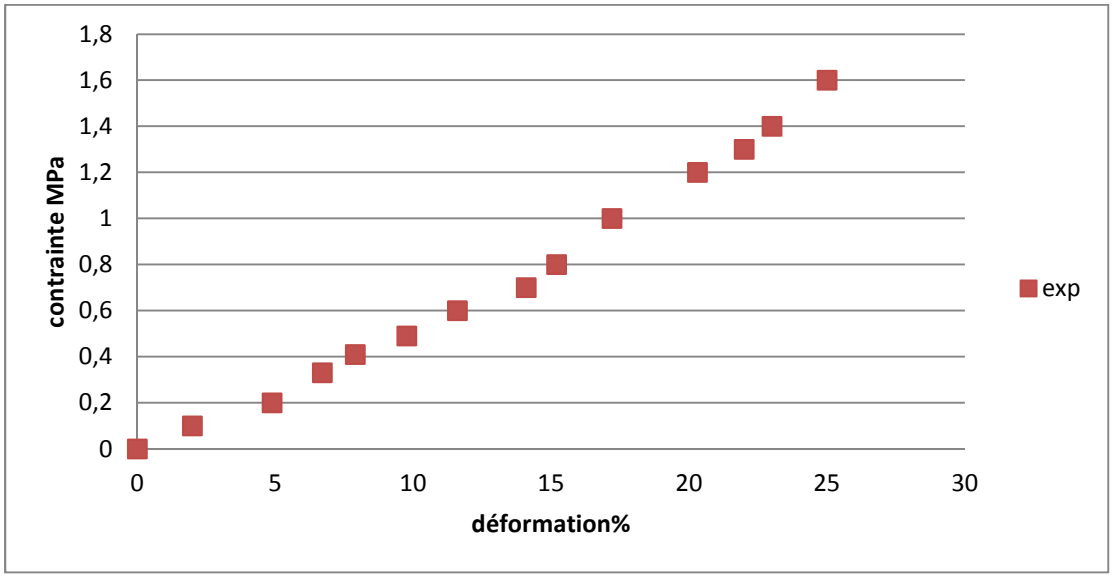

Figure (3-4) : courbe expérimentale de compression uniaxiale d'un NBR.

III-3 simulation et interprétation des résultats :

La validation des résultats numériques des deux modèles utilisés ce fera en les comparant aux résultats expérimentaux représentés ci-dessus.

III-3-1 : en utilisant Gent :

Les résultats numériques obtenus au cours d'un essai de traction sur un cube unitaire des deux modèles utilisés : Gent et Isharia sont représentés dans les figures ci-dessous avec les résultats expérimentaux :

- **En traction uniaxiale :**

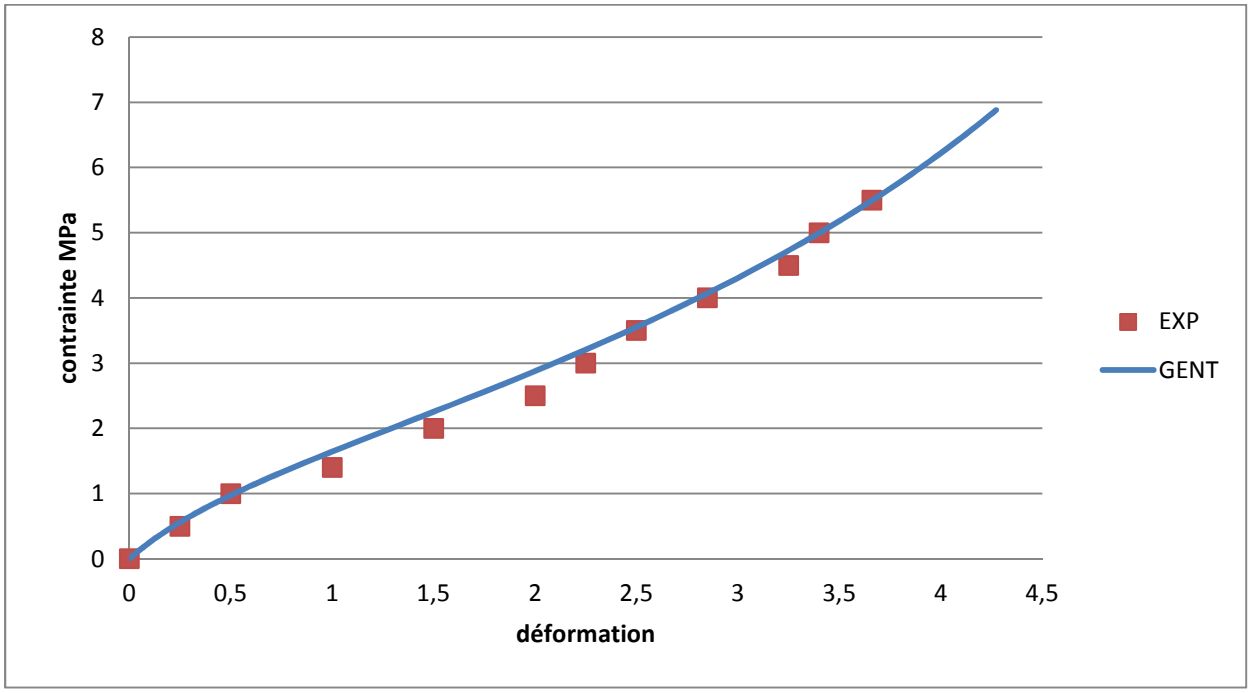

Figure (3-5) : comparaison du modèle de Gent avec la courbe expérimentale de traction

E= 0.978 , Im=92.0

- **En compression uniaxiale :**

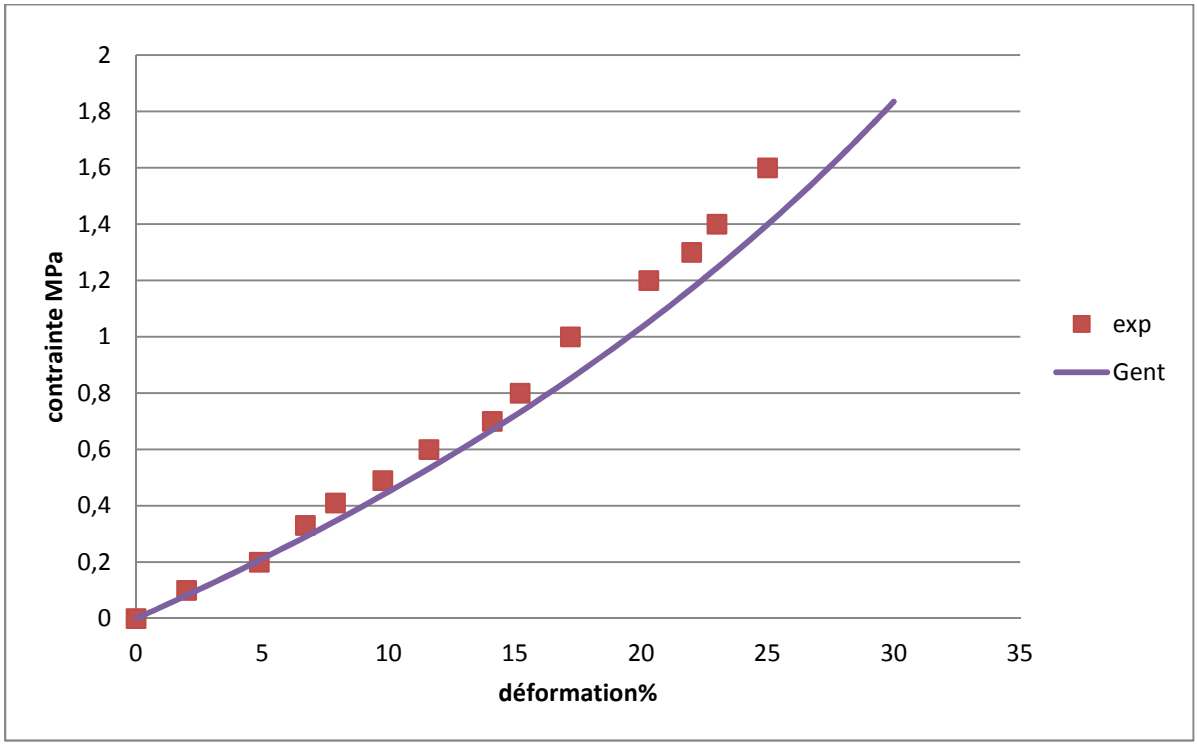

Figure (3-6) : comparaison du modèle de gent avec la courbe expérimentale de compression uniaxiale

E= 0.987 , Im= 92.0

III-3-2: En utilisant Ishiara :

- ***En traction uniaxiale :***

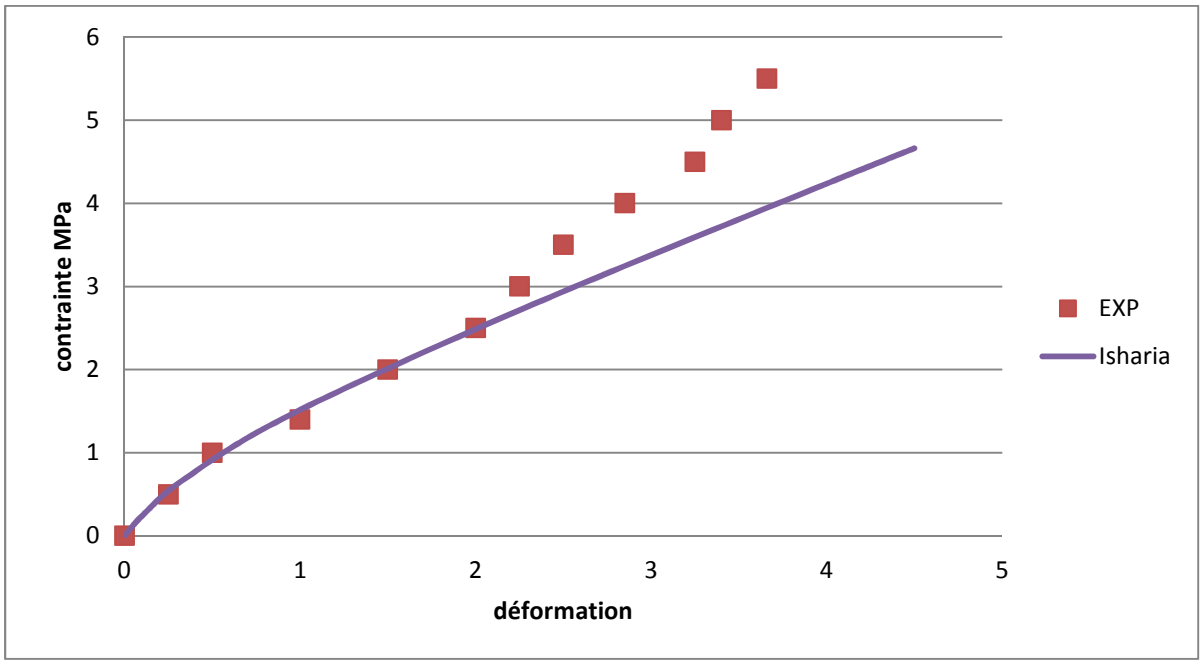

Figure (3-7) : comparaison du modèle d'isharia avec la courbe experimentale de traction

- ***en compression uniaxiale :***

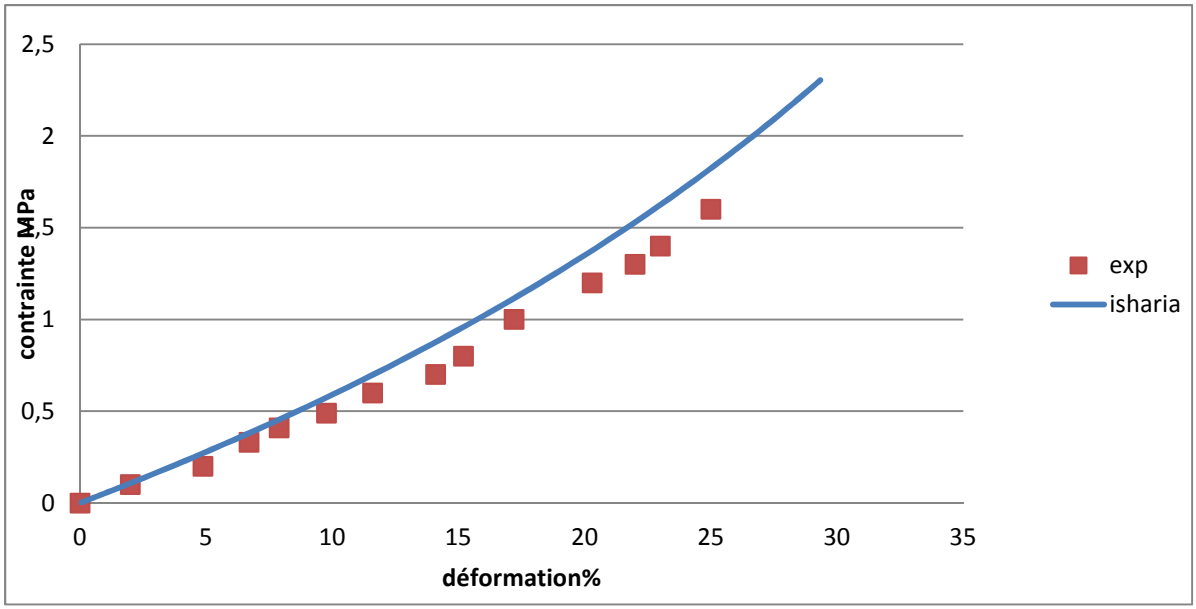

Figure (3-8) : comparaison du modèle d'isharia à la courbe de la compression uniaxiale expérimentale.

C10= 0.171, C20= -0.00024, C01= 0.489

- ***En utilisant les deux modèles :***

- ***En traction uniaxiale :***

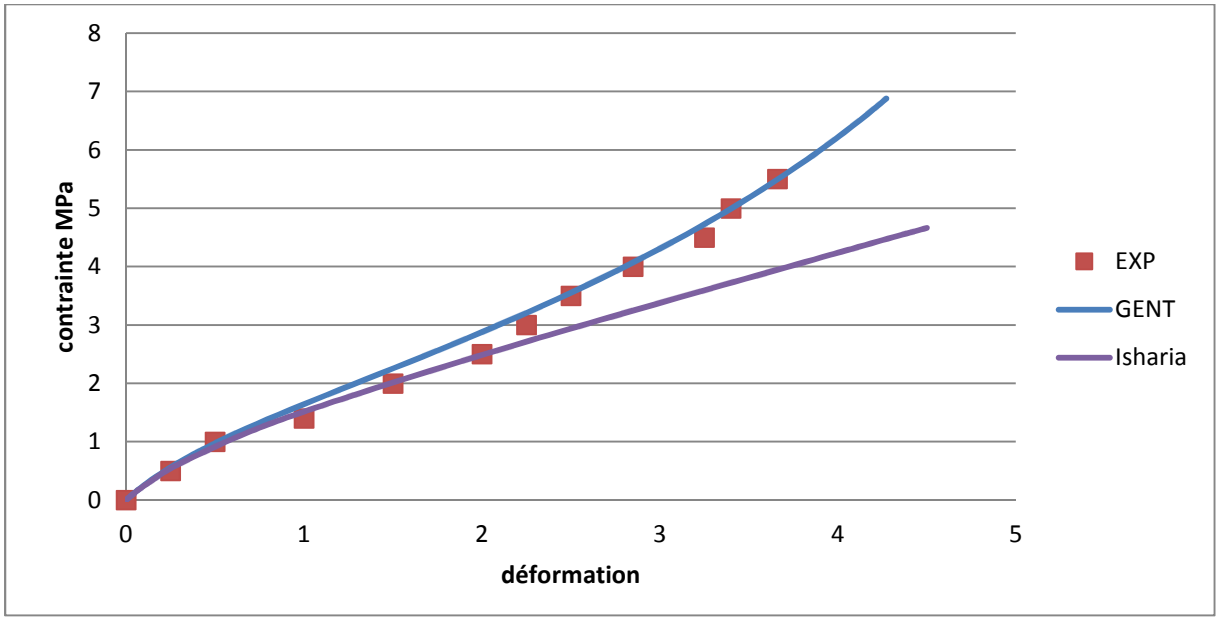

Figure (3-9) : comparaison du modèle de Gent et Isharai et la courbe expérimentale de traction.

-en compression uniaxiale :

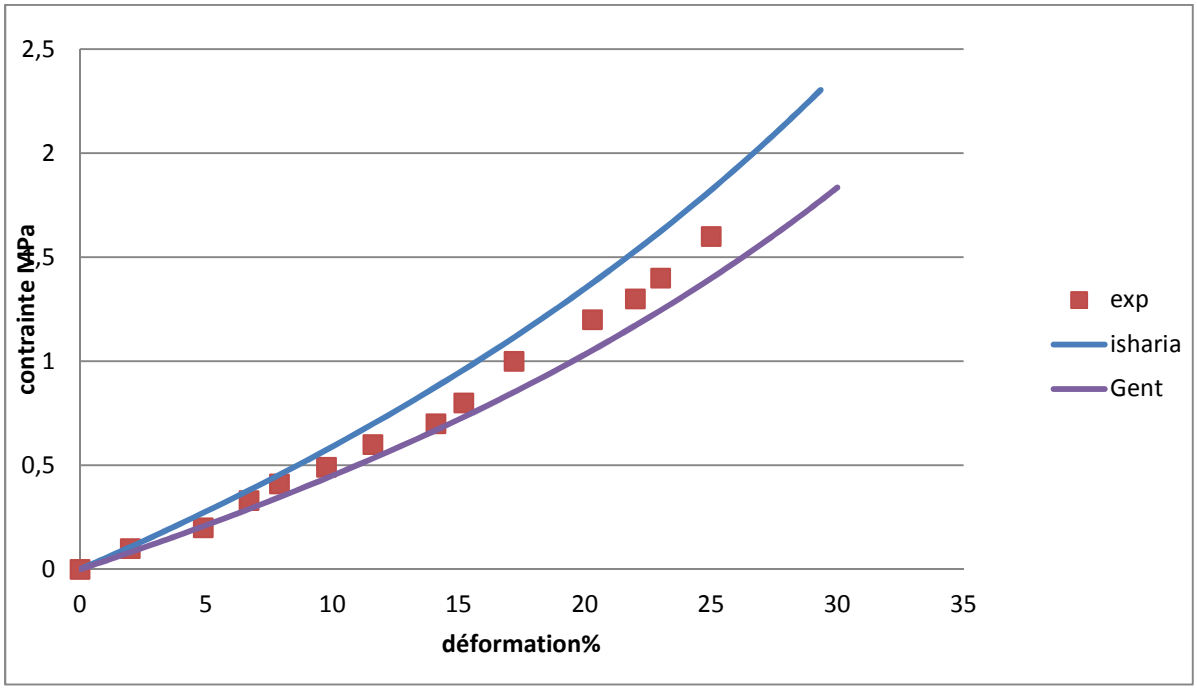

Figure (3-10) : comparaison des modèles avec la courbe expérimentale de compression uniaxiale.

III-3-3 : Interprétation :

Dans le cas du modèle de gent :

- le modèle de Gent reproduit parfaitement le comportement hyperélastique des élastomères en traction uniaxiale (petite , moyenne et grande déformation)
- il reproduit ainsi le comportement hyperélastique des élastomères dans le cas de compression uniaxiale .

Dans le cas du modèle d'ishiara :

- le modèle d'Isharia reproduit le comportement hyperélastique des élastomères dans la cas de la traction uniaxiale pour des niveaux inférieur à 200% (petite et moyenne déformation) .
- dans le cas de la compression uniaxiale le modèle s'avère acceptable pour modéliser le comportement des élastomères, du fait que la courbe numérique présent seulement un petit décalage à la courbe expérimentale.

III-3-4 : influence des paramètres :

Pour démontrer l'influence des paramètres matériaux sur le comportement mécanique des élastomères, nous faisons varier les paramètres des modèles utilisés dans le cas de la traction pour les deux modèles :

- **dans le cas de Gent**

Paramètres	I_m	E
Valeurs	92.0	0.987

les valeurs des paramètres du modèle de gent sont présentés ci-dessus :

Tableau (3-1) : paramètres du modèle de gent

Le tableau ci-dessous présente les paramètres du modèle de Gent

Paramètres	I_m	E
Valeurs	41.0	1.087

Tableau (3-2) : paramètre du modèle de Gent

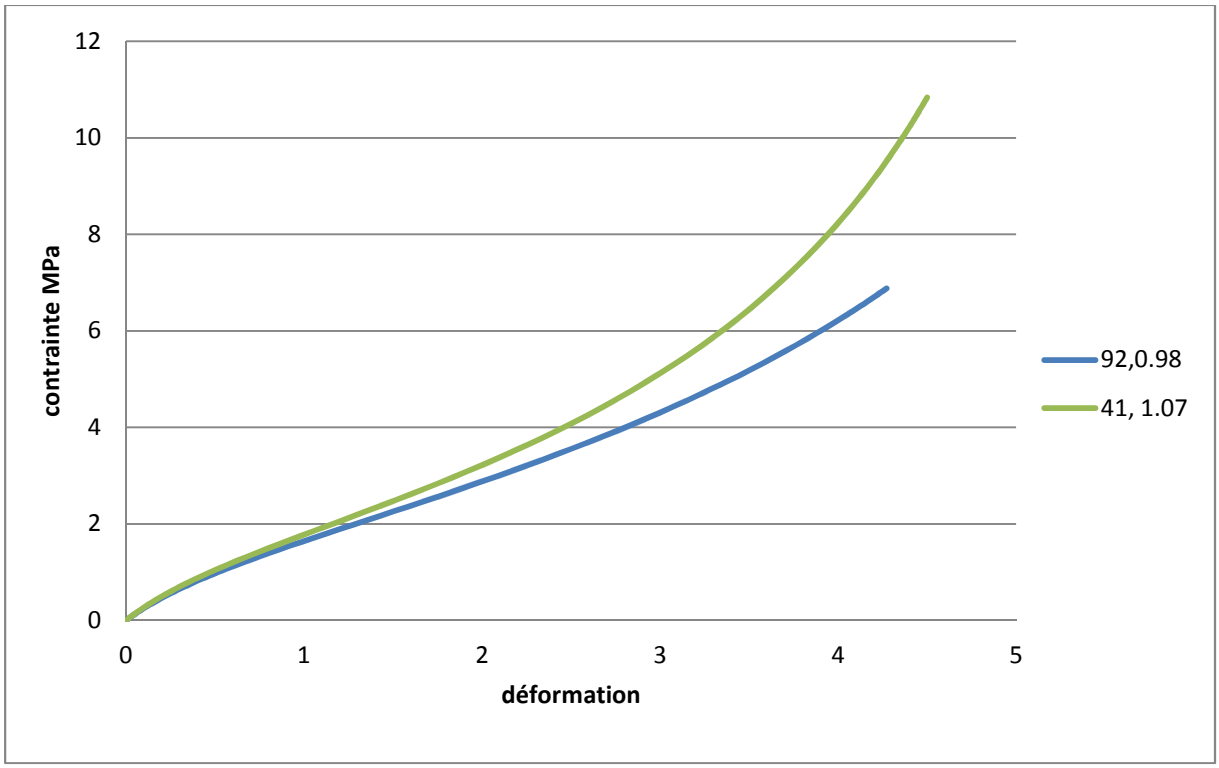

Figure (3-11) : influence des paramètres dans le cas de Gent

- **dans le cas d'Ishiara**

  Les paramètres du modèle d'isharia sont représentés ci-dessous :

paramètres	C_{10}	C_{20}	C_{01}
valeurs	0.171	-0.00024	0.489

Tableau (3-3) : paramètres du modèle d'isharia

Le tableau ci-dessous pressente les paramètres du modèle de d'Isharia

paramètres	C_{10}	C_{20}	C_{01}
valeurs	1.171	-0.024	0.489

Tableau (3-4) : paramètres du modèle d'ishiara

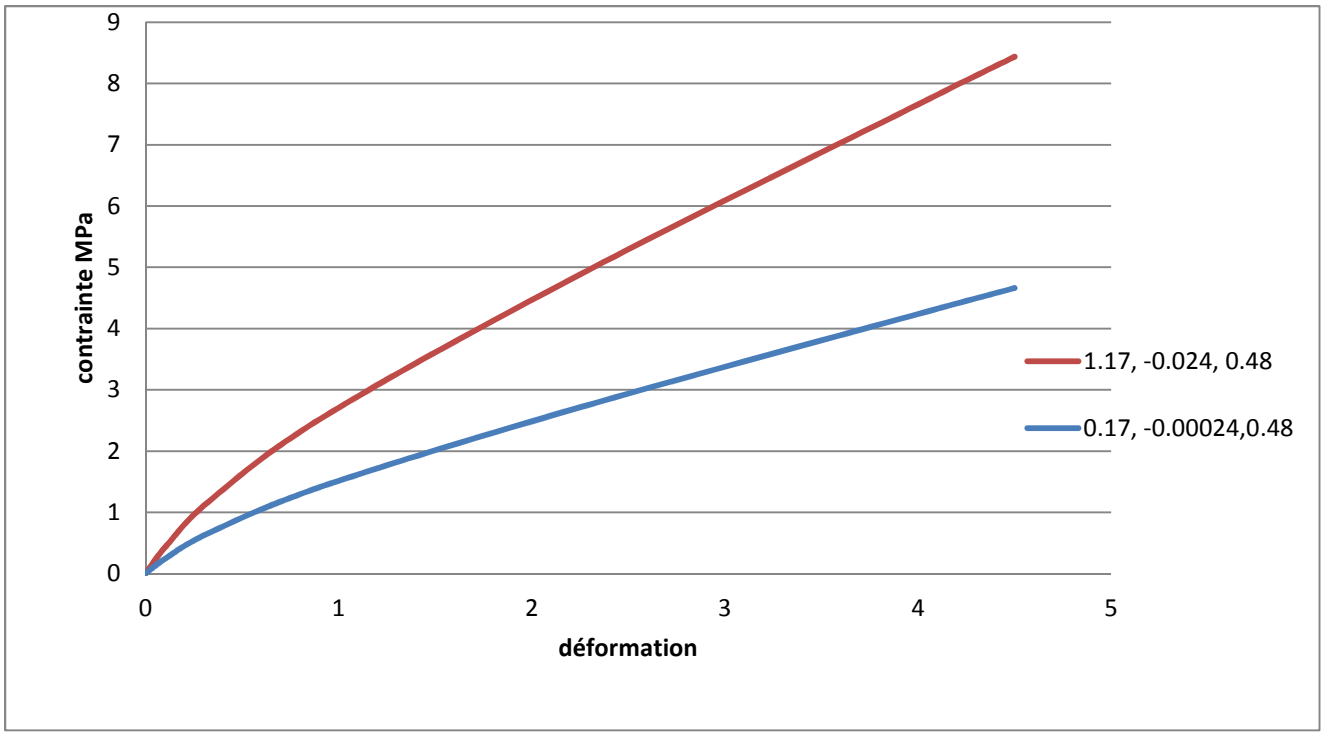

Figure (3-12) : influence des paramètres dans le cas d'Ishiara

Les courbes numériques des modèles présentent un écart considérable entre elles, en faisant varier les paramètres ; cependant les paramètres des modèles ont une grande influence dans la modélisation du comportement hyperélastique des élastomères.

III-3-5 influence de la température

III-3-5-1 programmation du modèle de Gent avec les effets de la température :

l'expression de l'énergie de déformation du modèle de GENT s'énonce comme suite :

$$\omega = \frac{-E}{6}(I_m - 3)ln\left[1 - \frac{I_1 - 3}{I_m - 3}\right] \qquad (3\text{-}27)$$

et pour prendre en compte l'effet de la température dans le modèle , nous avons adopté pour les deux nouveaux paramètres E et I_m qui s'écrivent comme suit :

$$E = E_0[1 - \alpha(T - T_0)]^a \qquad (3\text{-}28)$$

$$I_m = I_{m0}[1 + \alpha(T - T_0)]^b \qquad (3\text{-}29)$$

Le tableau ci-dessous représente les valeurs des paramètres du nouveau modèle :

paramètres	E0	I_{m0}	α	T_0	a	b
valeurs	0.76	102.33	0.00045	295.0	1.0	1.0

Tableau (3-5) : paramètres du modèle de Gent avec effet de la température

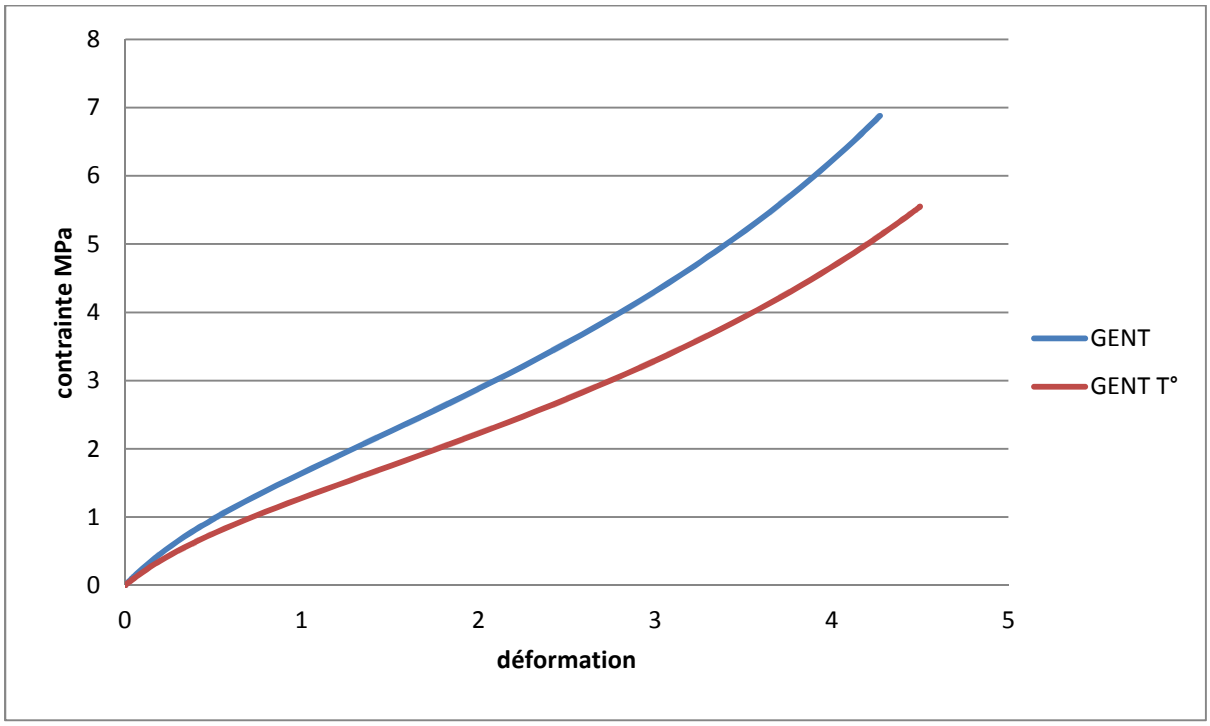

Figure (3-13) : validation du modèle de Gent avec effet de la température

Comme le montre la figure, le modèle de gent doté des effets de la température se situe sous la courbe numérique du modèle de Gent sans effet de température, cela prouve que les élastomères sous sollicitation mécanique tout en élevant la température présente des déformations importante pour de petite sollicitation mécanique

Conclusion

Les modèles utilisés décrivent le comportement hyperélastique en fonction du mode et du niveau de déformation.

- Le modèle de Gent reste très intéressant en traction uniaxiale car il modélise parfaitement le comportement de l'élastomère sur une large gamme de déformation.
- Le modèle d'Isharia est moins attractif que le modèle de Gent notamment en traction uniaxiale, Ce qui fait que son utilisation est restreinte seulement aux petites déformations.
- Le choix des paramètres des modèles jouent un rôle pesant dans la reproduction du comportement hyperélastique des élastomères.
- le modèle de Gent programmé avec effet de la température s'avère un modèle réussi, car il reproduit parfaitement le comportement hyperélastique des élastomères sous effet de la température.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail est destiné à la modélisation numérique du comportement thermo-hyperélastique des élastomères ; l'objectif tramé était d'implémenter deux lois de comportement hyperélastiques (Gent et Isharai) ,et un nouveau modèle thermo-hyperélastique indisponibles dans le code de calcul ABAQUS ,capables de reproduire le comportement mécanique des élastomères

L'étude comparative entre les résultats numériques et ceux de l'expérimentale ; en deux mode de déformation, respectivement, traction uniaxiale et compression uniaxiale, nous à illustré l'aptitude des deux modèles dans la reproduction du comportement hyperélastique des élastomères et notamment le modèle de Gent qui prend en compte le raidissement finale de la courbe de traction.

Dans l'étude de l'influence des paramètres des deux modèles nous avons pu voir l'utilité du bon choix pour une bonne attraction entre le numérique et l'expérimentale.

Sous choc thermique (élévation de la température) les élastomères présentent de grandes déformations pour de très basses contraintes ; ce que nous avons démontré a travers les résultats du modèle Gent programmé avec effet de température.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1] : ADNANE BOUKAMEL, modélisation mécanique, numérique des matériaux et structure en élastomères. Thèse de doctorat 2006, université de la méditerranée (Aix Marseille II).

[2] : IDA RAOULT, structure élastomère sous chargement cyclique. Comportement –fatigue-durée de vie .2005 ;thèse de doctorat de l'école polytechnique.

[3] : Vanessa Bouchart, étude expérimentale et modélisation micromécanique du comportement et de l'endommagement des élastomères renforcés, thèse de doctorat 2007, université de Lille 01

[4] : Amine Bennani, élaboration, comportement et durée de vie du caoutchouc naturel renforcé de silice , thèse de doctorat 2006, école des mines de paris.

[5] :T.A.Nguyen Van, S. Lejeunes, A. Boukamel, D. Eyheramenly, « linéarisation du comportement viscoélastique autour d'un état pré chargé ».

[6] : AIT CHIKH SAID, simulation du comportement hyper élastique des élastomères. Mémoire d'ingénieur ; université de Tizi Ouzou.

[7] : GACEM , relation viscoélastique/ tribologie des élastomères chargés ;université de Tunis

[8] : Aoudia karima, étude du comportement hyperélastique des élastomères, Mémoire d'ingénieur 2011, université de Tizi Ouzou

[9] : MARC THOMINE, relation viscoélasticité/tribologie des élastomères chargés. Thèse de doctorat 2004.école doctorale ; matériaux de lyon.

[10] : Cécile moreau : étude expérimentale et numérique de l'hyperélasticité avec prise en compte de la compressibilité ; thèse de doctorat 2000,université de Bretagne sud.
[11] : Etienne. S et David. L « introduction à la physique des polymères lyon, 2002,321p.

[12] : Martinon, P, « caractéristique des élastomères, technique de l'ingénieur 1998, vol traité constante phisico-chimique.

[13] : Williams. M , Landel. R " the temperature dependence of relaxation mecanisme in amorphe polymers" journal of amirican society, 1955.

[14] : Gilles Mackmann, contribution à l'étude des élastomères et de membrane soufflés, thèse de doctorat 2004,école centrale de Nantes.

[15] : Fabrice DELEAU ; comportement tribologique et vibro acoustique d'un contact élastomère / verre. Thèse de doctorat 2009, École Centrale De Lyon.

[16] :Christian Ngokio ; <fatigue dans les élastomères sous chargement triaxial. projet de fin d'étude master 2007.

[17]: Heinrich G. et Kaliske M., \Theoretical and numerical formulation of a molecular based constitutive tube-model of rubber elasticity.

[18]: ABAQUS users Manuel.

[19]: Mustapha and al ; materials and design 2009.

1 présentations du logiciel ABAQUS :

le code de calcul ABAQUS^{tm} est un code de calcul pour des éléments finis généraliste. il est connu pour ca performance dans la résolution des problèmes non linéaires.

La version 6.1.10 se compose de 3 modules différents.

1-1 : ABAQUS CAE **:**

Ce module permet la définition et la visualisation des différentes simulations. Les problèmes sont définis par des entités géométriques pour les quelles seront définies et pour les differentes étapes de calculs, les chargements, les conditions initiale , en suite le maillage des différentes entités. En fin l'étape de calcule sera réalisé par l'un des deux modules de calcul : 'standard' ou 'explicit'. [6]

1-2 : ABAQUS standard (implicite) :

Ce module est utilisé pour les calculs quasi-statiques, linéaires ou non, thermique ,acoustique. L'algorithme de calcul se base sur des calculs itératifs visant à atteindre l'équilibre global du système à chaque incrément de temps. [6]

1-3 : ABAQUS explicit :

Le module explicit est souvent utilisé pour les calculs dynamiques ; l'algorithme se base sur un très grand nombre d'incrément très courts.

Le module explicit est toute fois confronté à deux difficultés qui sont la stabilité des calcules et les modes vibratoires.

Le choix entre les schémas explicit et implicite dépend principalement du degré de non linéarité et de la vitesse du phénomène simulé.[6]

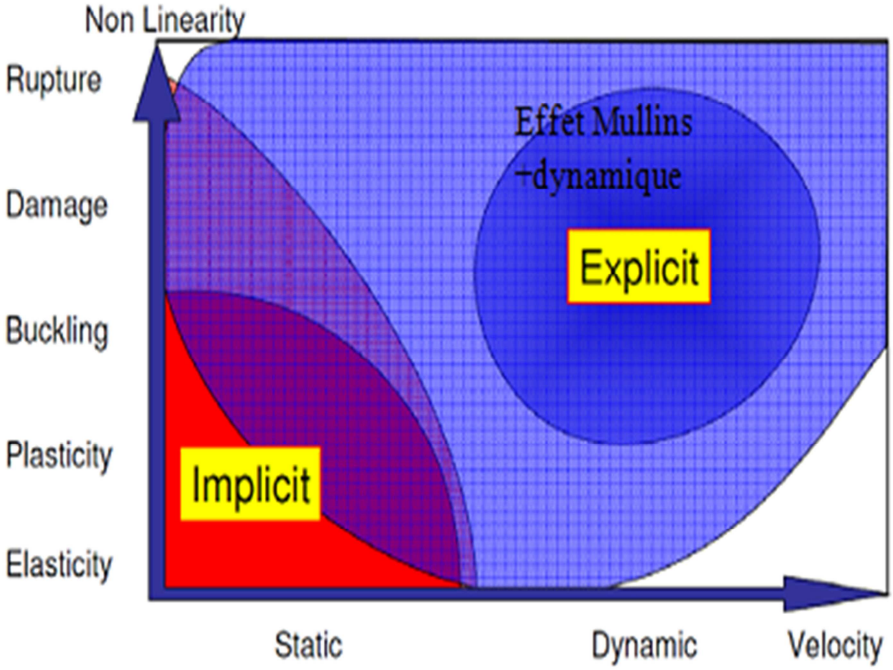

Figure (3-1) : domaines d'application des schémas implicite et explicite.[6]

1-4 : description de l'interface ABAQUS CAE :

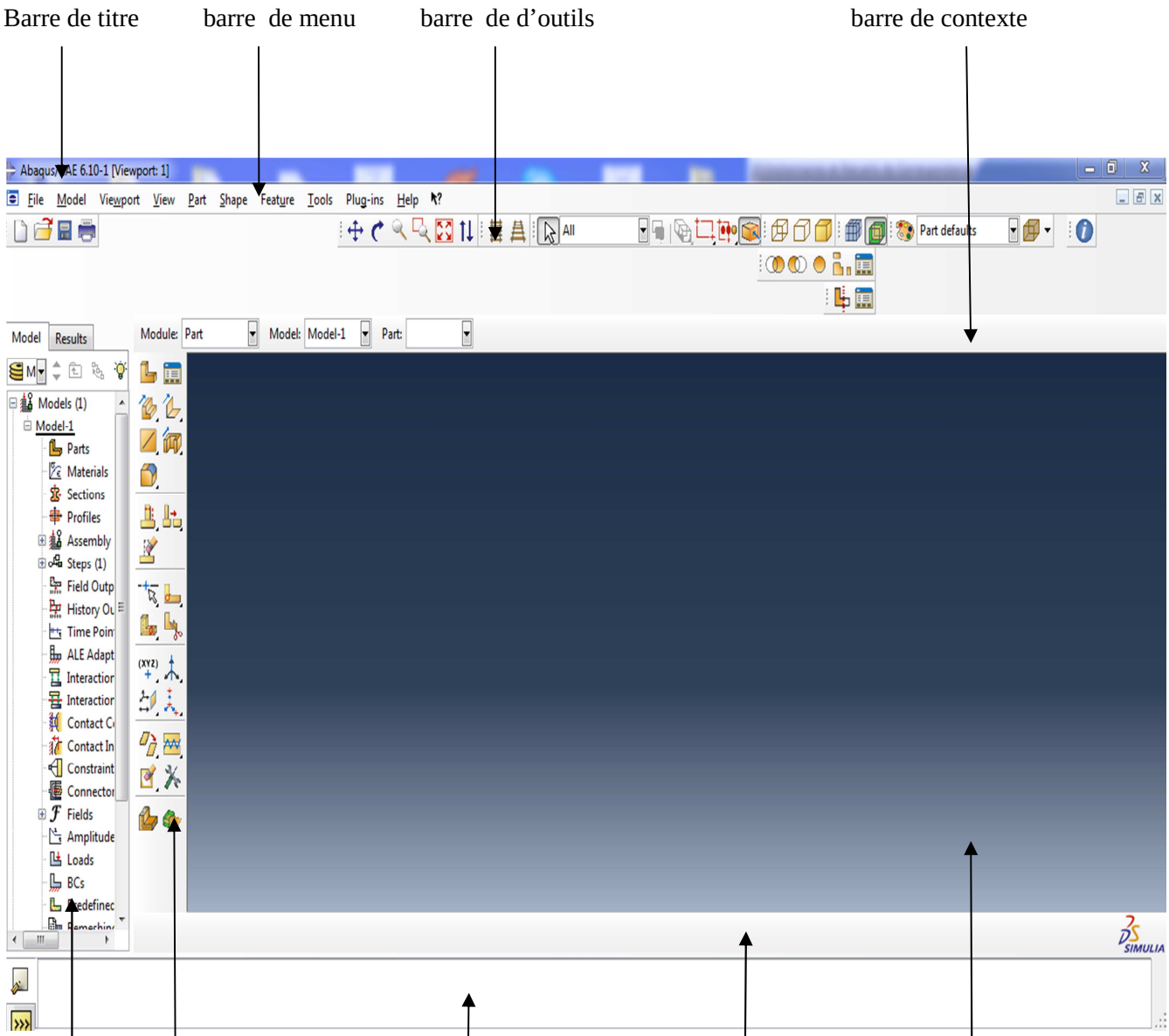

Figure (3-2) : l'interface ABAQUS CAE

On retrouve dans l'interface ABAQUS CAE (Figure 3-2) les éléments essentielle suivant:

Barre de menu

La barre de menu contient tous les menus disponibles ; les menus donnent l'accès à toutes les fonctionnalités du produit.

Barre d'outils

Y sont disposées les icônes correspondant aux commandes les plus courantes, c'est-à-dire les commandes d'ouverture et de sauvegarde de fichiers, et les commandes réglant l'affichage des vues (perspective, ombrage, zoom, rotations, etc.)

Barre de contexte

Barre de menus déroulant permettant d'accéder aux autres modules, ou de sélectionner le modèle ou la pièce sur lesquels on souhaite travailler.

Secteur de boîte à outils

On dispose d'une colonne d'icônes permettant d'accéder aux outils disponibles à l'intérieur du module dans lequel on se trouve.

Zone de message de sollicitation

L'espace juste sous la fenêtre d'affichage graphique est celui dans lequel ABAQUS vous parle : les messages affichés à cet endroit sont faits pour vous guider dans l'action que vous avez entreprise.

Arbre de construction

L'arbre donne une description visuelle de la hiérarchie des objets du modèle. Tous les objets (comme des pièces, des matériaux, des étapes, des charges) sont indiqués par de petites icônes avec en parenthèses le nombre de ces objets. L'ordre de l'arbre reflète l'ordre classique d'élaboration du modèle. A partir de cet arbre il est possible de retrouver la plupart des fonctionnalités de la barre de menu principale. Par exemple, double cliquer sur Part permet de créer une nouvelle Part comme sélectionner Part -> Create dans la barre de menu.