Ces élastomères qui prennent soin de nous

Brice Gabrielle

Résumé Les matériaux élastomères ou caoutchoucs sont utilisés dans de nombreuses applications et doivent répondre à des cahiers des charges très variés, en termes de propriétés mécaniques, d'environnement et de conditions d'utilisation. Chaque élastomère a sa spécificité et il existe donc une très grande variété de structures chimiques, de formulations et de procédés pour fabriquer des pièces en caoutchouc. Cet article présente les principales structures chimiques et les formulations mises en œuvre dans l'élaboration des pièces en caoutchouc, ainsi que les méthodes physiques de caractérisation. Il montre aussi que les élastomères contribuent notablement à la diminution des émissions des gaz à effet de serre, notamment dans le secteur de l'automobile, et sont des vecteurs d'innovation reconnus.

Mots clés **Élastomères, transition vitreuse, vulcanisation, compoundage.**

Abstract **Those elastomers that take care of us**
Rubber materials are widely used in many applications and require a wide range of specifications in terms of mechanical properties, environment and working conditions. A very wide variety of chemical structures, formulations and processes are available in order to answer to these specifications. This article deals with the main chemical structures and formulations used in the development of rubber materials, as well as physical characterizations. It also highlights that elastomers contribute significantly to the reduction of greenhouse gas emissions and are vectors of innovation.

Keywords **Elastomers, glass transition, vulcanization, compounding.**

Les caoutchoucs ou élastomères nous accompagnent discrètement tout au long de la journée. Déjà présents dans les textiles, on les retrouve sous la douche assurant l'étanchéité des différents raccords, puis dans les transports : s'ils nous permettent d'avancer grâce au pneu, ils nous évitent également d'avoir mal au cœur en voiture. En effet, le caractère amortissant des caoutchoucs permet de filtrer la fréquence de vibration du moteur entrainant la résonance de la cage thoracique et donc le mal au cœur (4-8 Hz). Pour améliorer notre confort dans la voiture, des joints en caoutchouc assurent l'étanchéité autour des portières et des vitres. Si elles savent être discrètes et se rendre invisibles, les pièces en caoutchouc peuvent également être très imposantes. Ainsi le joint en caoutchouc de la porte d'écluse à Saint-Nazaire mesure 84 m et pèse plusieurs tonnes ! Les caoutchoucs sont également présents dans les produits de grande consommation comme les joints de bocaux de confiture ou les gants. On en met même dans la bouche : les chewing-gums – à noter que le caoutchouc utilisé n'est pas le même pour les adultes et les enfants, pour que ces derniers puissent faire de belles bulles…

Ces matériaux utilisés dans de nombreuses applications répondent à des cahiers des charges très variés, en termes de propriétés mécaniques, d'environnement (air, fluide), de température d'utilisation. C'est la raison pour laquelle il existe une grande variété de structures chimiques, de formulations et de procédés pour fabriquer des pièces en caoutchouc (*figure 1*).

Figure 1 - Quelques pièces en caoutchouc : joint torique, durite rondelle de conserve, pneu, joint de portière.

La formulation

Le matériau polymère

À température ambiante, il existe des polymères rigides, souvent appelés « plastiques », comme le polyamide (PA), et des polymères mous, appelés « caoutchoucs ». En fonction de la température, le caractère dur et mou des matériaux peut évoluer. Une caractéristique des polymères est la grande variation de leur module d'Young avec la température : à basse température, la mobilité des macromolécules est fortement réduite. Comme il n'existe pas d'ordre dans celles-ci, on parle d'état amorphe vitreux. Le module d'élasticité de ces matériaux est alors de l'ordre du GPa (à titre de comparaison, les métaux présentent un module compris entre 10 et 100 GPa et les ciments, un module de l'ordre de 10 GPa). Avec la température, il est possible d'activer certains mouvements d'éléments de la chaine ; ce phénomène s'accentue jusqu'à l'apparition de mouvements coopératifs sur plusieurs unités monomère qui s'accompagne d'une chute de module

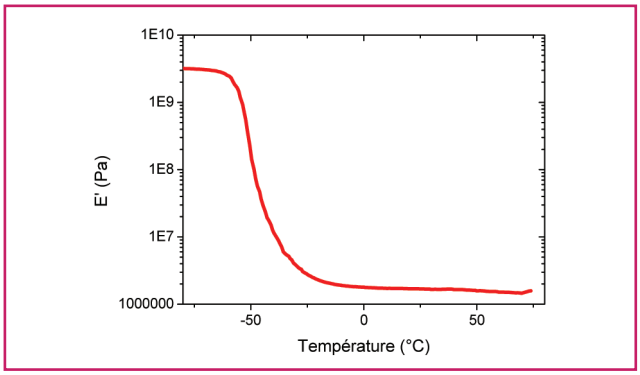


Figure 2 - Évolution du module d'un polymère en fonction de la température.

de près de trois ordres de grandeur (*figure 2*). Cette transition thermomécanique est appelée transition vitreuse et notée Tg (« glass transition »). Une fois l'ensemble des macromolécules mobiles, le module n'évolue plus jusqu'à écoulement ou décomposition du matériau ; on parle alors de plateau caoutchoutique.

Certains polymères opèrent ce changement de comportement à une température inférieure à la température ambiante. Ces matériaux présentent donc une certaine souplesse à température ambiante et sont appelés élastomères. Sur les 350 millions de tonnes de polymères produits en 2016, la part des élastomères n'était que de 26 millions. Les plus connus sont le caoutchouc naturel et le SBR (« styrene butadiene rubber »), largement utilisés dans la confection des pneumatiques. Cependant, il existe une grande variété d'élastomères à chaine carbonée comme le polychloroprène, le polybutadiène, le polyisoprène, le poly(éthylène glycol), les HNBR (« hydrogenated nitrile butadiene rubber »), ou d'élastomères inorganiques comme les silicones. Ces matériaux ont des températures de transition vitreuse (*tableau I*) et des élasticités différentes, mais également des polarités différentes, ce qui engendre des différences de perméabilité aux fluides et aux gaz.

Chaque élastomère a donc sa spécificité et un domaine d'application qui lui est propre. Contrairement aux plastiques, ces matériaux ne sont quasiment pas utilisés tels quels. En effet, la mobilité des chaines est telle qu'en tirant sur le matériau, il est possible de faire glisser les macromolécules les unes par rapport aux autres par désenchevêtrement de celles-ci. Les mouvements qui permettent ce phénomène ont été décrits par Pierre-Gilles de Gennes sous le nom de reptation. Le matériau a tendance à s'écouler et présente donc une très mauvaise tenue mécanique. Pour pouvoir l'utiliser, il est donc nécessaire de le formuler afin de créer des liaisons chimiques covalentes entre les différentes macromolécules.

Le système de réticulation

Pour conférer des propriétés élastiques au matériau, on doit supprimer la possibilité aux macromolécules de glisser les unes par rapport aux autres. Pour ce faire, il faut créer des ponts, *via* des liaisons chimiques, entre les macromolécules : c'est ce qu'on appelle la réticulation. La grande diversité des structures chimiques des macromolécules ainsi que les conditions de mise en œuvre et d'utilisation des matériaux ont imposé une grande variété de stratégies pour effectuer ces pontages.

Une des plus usitées et la plus ancienne est la création de ponts soufrés entre les chaines d'élastomère. Cette réaction, appelée vulcanisation, est largement mise en œuvre pour des matériaux tels que le caoutchouc naturel, le SBR et l'EPDM (« ethylene propylene diene M »). Elle met en jeu du soufre minéral S_8 qui vient réagir sur le carbone de la chaine en α de la double liaison (voir *encadré 1*). La vulcanisation a été découverte par Charles Goodyear en 1839, quand il obtint de bonnes propriétés mécaniques d'un caoutchouc en y introduisant du soufre, puis en chauffant plusieurs heures cet échantillon. Cette réaction activée thermiquement demeurait cependant lente et conduisait à un produit inhomogène. Pour pallier à ce problème, des systèmes de vulcanisation contenant un activateur et un accélérateur en plus du soufre ont été développés. Il existe différentes familles d'accélérateurs parmi lesquelles on trouve les sulfénamides, les thiazoles, les thiurames et les carbamates (*tableau II* p. 44). Ils peuvent être utilisés seul ou par couple. Combinés avec les activateurs que sont l'oxyde de zinc et l'acide stéarique, ces systèmes permettent d'abaisser de 50 % l'énergie nécessaire à la vulcanisation et de réduire le temps de vulcanisation à quelques minutes.

Une seconde voie de réticulation des chaines d'élastomères est la formation de liaisons covalentes *via* des réactions radicalaires. Pour ce faire, des peroxydes sont introduits dans la gomme caoutchouc. Le choix du peroxyde (*tableau III* p. 44) va encore dépendre de sa température d'activation et de sa compatibilité avec le polymère.

Le renfort des élastomères

Pour satisfaire les contraintes liées à son utilisation, il est nécessaire d'améliorer les propriétés mécaniques des caoutchoucs en y incorporant des particules nanométriques appelées charges. Les principales charges utilisées dans l'industrie sont le noir de carbone et la silice. L'ajout de charge induit

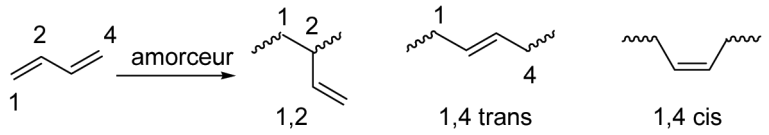
Tableau I - Températures de transition vitreuse d'élastomères.

Polymère	Tg	Propriétés principales	Applications
Silicone	- 120 à - 80 °C	Bonnes propriétés mécaniques sur une grande gamme de température (très basses et hautes températures)	Tuyau, joint
Caoutchouc naturel	- 55 °C	Bonnes propriétés mécaniques basses et hautes températures	Pneus, gants, supports moteur
Polychloroprène	- 45 à - 30 °C	Bonne résistance aux huiles, bonnes propriétés mécaniques, résistance à l'ozone	Courroies, tuyaux, câblés
HNBR	- 30 à - 10 °C	Bonne résistance aux huiles, à la chaleur et à l'ozone	Pièces pour l'automobile (joints)
SBR	- 55 à - 35 °C	Bonne résistance à la fatigue par flexion, au vieillissement (oxygène, ozone)	Bandes de roulement des pneumatiques
EPDM	- 55 à - 30 °C	Très bonne résistance au vieillissement, à l'ozone et à l'eau	Joints, profilés, pièces de freinage, câblerie…

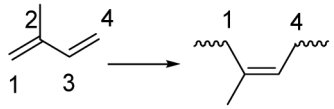
Encadré 1

La vulcanisation des élastomères

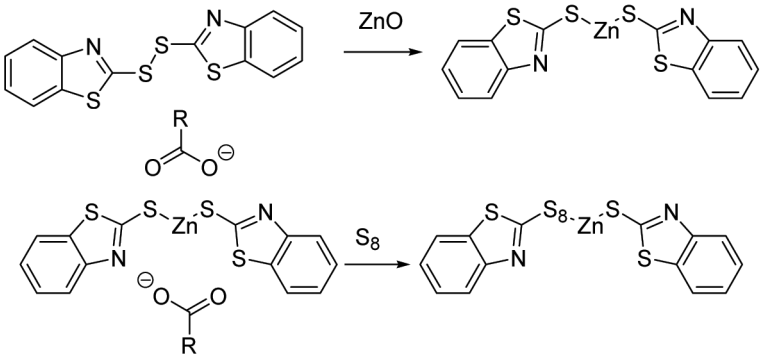
La vulcanisation est une suite de réactions chimiques conduisant à la formation de ponts soufrés entre les macromolécules. Plusieurs mécanismes réactionnels radicalaires et ioniques ont été proposés pour décrire ces réactions, mais aucun n'a pu être formellement identifié. Dans la pratique, les deux mécanismes (radicalaire et ionique) sont présents.
Avant de rentrer plus avant dans les réactions de vulcanisation, il convient de rappeler les structures de base des polydiènes (polybutadiène et polyisoprène en particulier). Le butadiène est un diène conjugué qui peut réagir en 1,2 ou en 1,4. La polymérisation en 1,2 (PBd 1,2) conduit à une structure présentant des doubles liaisons pendantes. Les macromolécules obtenues par polymérisation en 1,4 présentent une double liaison dans leur squelette. Les deux isomères possibles conduisent à des structures 1,4 cis et 1,4 trans. Le contrôle des structures est possible par le choix des amorceurs, catalyseurs, solvant et température. La diminution de mobilité des chaines occasionnée par la double liaison pendante entraine une augmentation significative de la température de transition vitreuse. On utilisera donc des polybutadiènes 1,4 :



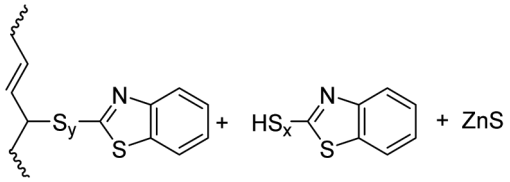
La polymérisation de l'isoprène peut conduire à des structures 1,2 ou 3,4 avec des doubles liaisons pendantes, ainsi qu'aux deux structures 1,4 cis et 1,4 trans. Le caoutchouc naturel extrait du latex de l'hévéa est composé de protéines et de polyisoprène (1,4 cis à plus de 99,9 %) :



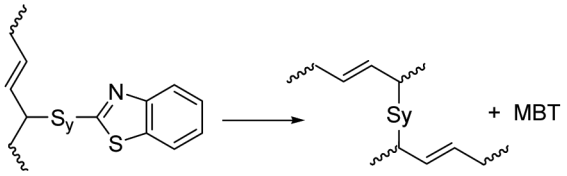
La vulcanisation moderne utilise des activateurs (ZnO, acide stéarique) et des accélérateurs. Un mécanisme communément admis est que la vulcanisation débute par l'addition d'un accélérateur de type disulfure de benzothiazole (MBTS) réagit avec l'oxyde de zinc. Le produit obtenu serait complexé par l'acide stéarique, augmentant ainsi la compatibilisation avec la matrice polymère. Dans un second temps, le soufre S_8 cyclique s'ouvrirait sous l'action de la température et viendrait s'insérer dans le complexe pour conduire à l'agent actif de sulfuration :



Cet agent de sulfuration réagit ensuite avec un atome d'hydrogène situé en α d'une double liaison (position allylique) du polybutadiène :



Il existe alors une multitude de voies pour former le pont soufré entre deux macromolécules. Par exemple, le produit de réaction peut réagir avec une autre macromolécule en libérant une molécule de MBT. Parallèlement, l'agent actif de vulcanisation peut également être régénéré, ce qui permet de poursuivre la réaction de vulcanisation :



une augmentation du module élastique et également l'apparition d'effets non linéaires comme l'effet Payne, qui est une chute du module quand le matériau est sollicité à des amplitudes croissantes, laquelle est accompagnée d'un pic de dissipation (*figure 3a*), ou l'effet Mullins qui est la diminution du module et de la valeur de contrainte maximale atteinte au cours de cyclages successifs (*figure 3b*). Ces effets ont un impact important sur les pièces antivibratoires.

Tableau II - Formules chimiques de quelques accélérateurs.

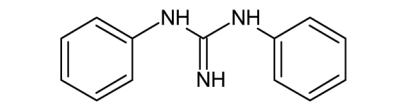
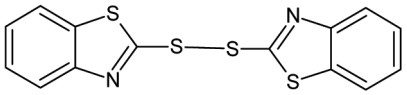
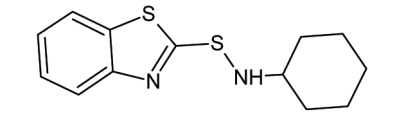
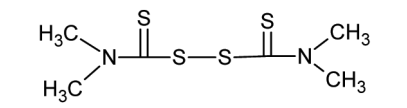
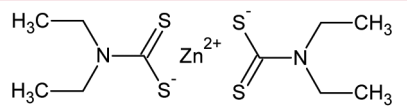
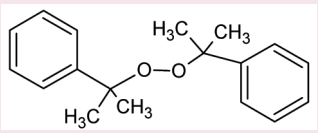
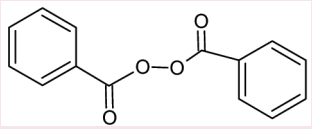
Famille	Nom	Formule chimique
Guanidines	Diphénylguanidine (DPG)	
Thiazoles	Disulfure de benzothiazole (MBTS)	
Sulfénamides	*N*-cyclohexyl-2-benzothiazyl sulfénamide (CBS)	
Thiurames	Disulfure de tétraméthylylthiurame (TMTD)	
Carbamates	Diéthylthiocarbamate de zinc (ZDEC)	

Tableau III - Les amorceurs radicalaires.

Nom	Formule
Peroxyde de dicumyle	
Peroxyde de benzoyle	

Les systèmes de protection

Afin d'améliorer la durée de vie des matériaux élastomères, une grande variété d'additifs peut être ajoutée dans la formulation. Par exemple, pour lutter contre des phénomènes d'oxydation liés à la présence d'oxygène, deux stratégies peuvent être adoptées : un système de protection chimique – des dérivés amines et phénoliques sont alors ajoutés à la formulation –, et/ou un système de protection physique – par l'introduction de cires microcristallines, le plus souvent des longues chaines de polyoléfine. Le mode d'action de celles-ci consiste à migrer à la surface au cours du temps et de former un film protecteur.

La mise en œuvre des élastomères

La fabrication de pièces en caoutchouc s'effectue en trois étapes :

- le mélangeage, au cours duquel tous les composants de la formulation sont introduits ;
- la mise en forme, qui permet de donner la forme finale de la pièce ;
- la vulcanisation.

Selon les procédés, plusieurs étapes peuvent être effectuées en même temps.

La phase de mélangeage fait en général appel à deux types de mélangeurs. Dans une première étape, la gomme est introduite dans un mélangeur interne (dans lequel deux rotors contre-rotatifs viennent cisailler la matière) (*figure 4*, gauche). Ce cisaillement induit une augmentation de la température, rendant la gomme plus souple ; on parle alors de plastification. Les charges et le système de protection sont ensuite introduits. La durée de mélangeage est de l'ordre de quelques minutes. Les températures atteintes en mélangeur interne sont telles que si on introduisait le système de vulcanisation, celle-ci aurait lieu de suite. C'est la raison pour laquelle une seconde étape de mélangeage à plus basse température est nécessaire. En sortie de mélangeur, le mélange est laissé quelques heures à température ambiante avant d'être introduit dans un second type de mélangeur : le mélangeur à cylindres, constitué de deux cylindres lisses, très proches, tournant en sens inverse (*figure 4*, droite). La température des cylindres est régulée, ce qui permet de maintenir la température du mélange aux alentours de 40 °C. Le système de vulcanisation est alors ajouté au mélange.

Afin de pouvoir déterminer les conditions de mise en forme et de vulcanisation, la cinétique de la réaction de vulcanisation est systématiquement étudiée par rhéologie. Une petite quantité de mélange cru est introduite dans une cavité oscillante. Celle-ci est chauffée à la température de vulcanisation. Une oscillation de 3° d'angle est alors appliquée. On mesure au cours du temps l'évolution de couple nécessaire pour maintenir cette oscillation constante. La courbe obtenue est présentée *figure 5*. Dans une première partie, on observe une diminution du couple liée à la montée en température de la gomme, puis un plateau appelé temps de sécurité,

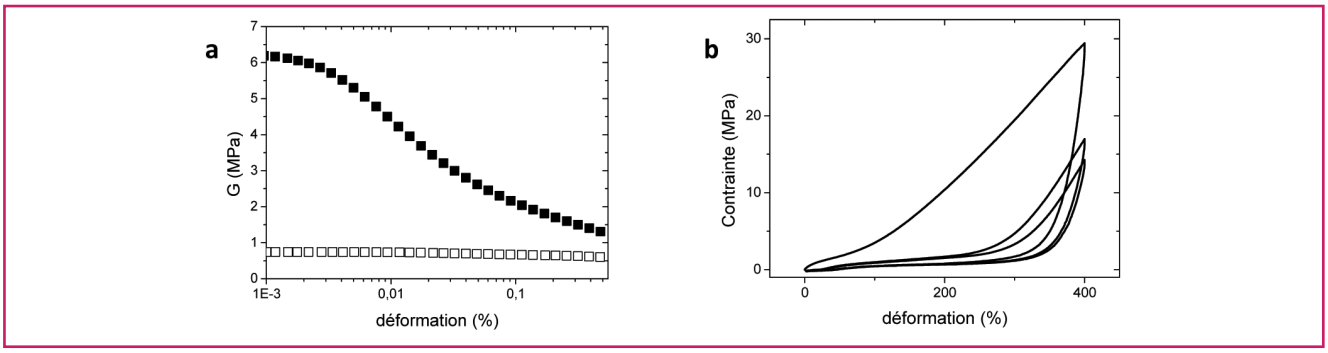


Figure 3 - a) Évolution du module en fonction de la déformation (gauche) pour un échantillon de caoutchouc naturel renforcé avec du noir de carbone (■) et pour un échantillon de caoutchouc naturel (□) ; et b) effet de cyclage successif sur la courbe contrainte-déformation d'un échantillon de caoutchouc naturel renforcé avec du noir de carbone.

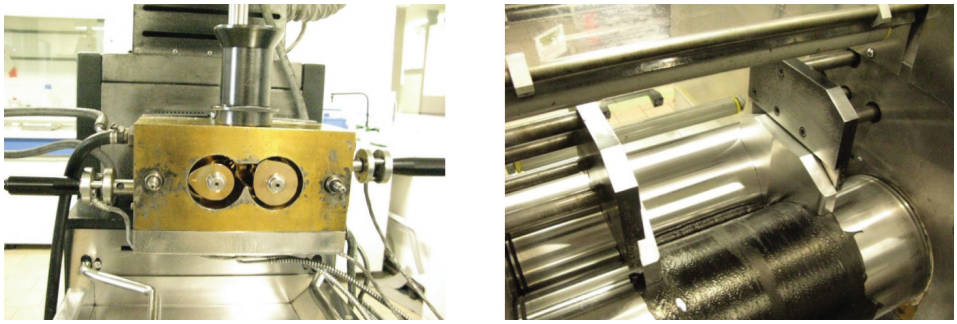


Figure 4 - Mélangeur interne (gauche) et à cylindres (droite).

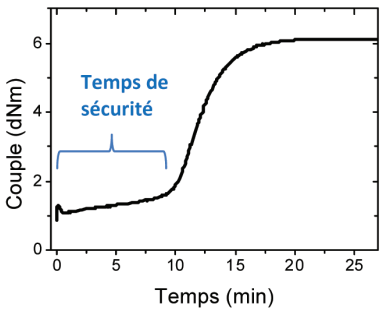


Figure 5 - Courbe rhéométrique de la cinétique de vulcanisation d'un mélange caoutchouc naturel (T = 160 °C).

qui correspond au temps qu'il faut attendre avant que le mélange ne réticule. On observe ensuite une augmentation rapide du couple qui est attribuée au commencement de la réaction de vulcanisation. Enfin, la courbe atteint un maximum, dont la position indique la durée de vulcanisation. L'allure de la courbe rhéométrique peut être modulée en modifiant le système de vulcanisation. Il est ainsi possible de diminuer le temps de sécurité si on veut augmenter les cadences de production, ou au contraire le rallonger dans le cas d'un procédé d'injection/compression.

Après avoir ainsi déterminé les conditions de vulcanisation, le mélange cru peut être mis en forme. Suivant l'application, il existe de nombreux procédés de mise en œuvre. Dans le cas de la compression, utilisée pour fabriquer des pneus de vélos, une ébauche de mélange cru est déposée dans un moule. Celui-ci est ensuite introduit dans une presse, mis sous pression et chauffé dans les conditions déterminées par la courbe rhéométrique. Il est également possible d'extruder le mélange cru afin de fabriquer des objets unidirectionnels tels que des tuyaux. Dans le cas de durites, les ébauches sont positionnées sur des tiges coudées afin qu'elles aient leurs formes finales, puis la vulcanisation a lieu en autoclave. Les produits extrudés peuvent également être vulcanisés en ligne, en positionnant des fours thermiques ou des fours à rayonnement infrarouge à la suite de l'extrudeuse. Enfin, dans le cas de pièces composites pour lesquelles le caoutchouc est fixé sur un support, le procédé d'injection est utilisé. Ce procédé nécessite d'avoir un temps de sécurité suffisamment long pour être sûr que le caoutchouc ne réticulera pas dans les canaux d'injection.

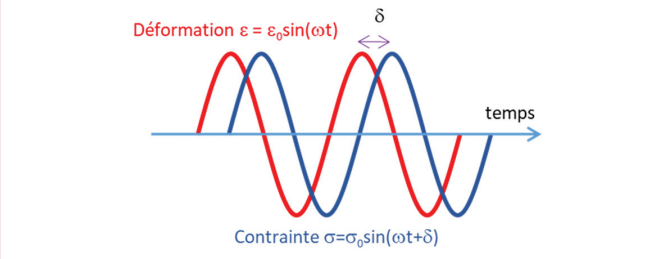
Les propriétés mécaniques

Une fois le matériau formulé et vulcanisé, celui-ci présente de bonnes propriétés mécaniques. Il est en effet possible

Encadré 2

Mesures de propriétés mécaniques en régime sinusoïdal

On applique au matériau une déformation sinusoïdale $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t)$. On mesure une contrainte résultante qui est aussi sinusoïdale et qui peut présenter un déphasage δ (angle de perte) avec la sollicitation : $\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta)$.
Dans le cas d'un déphasage nul ($\delta = 0$), le comportement est celui d'un solide élastique : $\sigma = E \cdot \varepsilon$, avec E module de Young (module élastique).
Lorsque le déphasage est égal à $\pi/2$, on observe un comportement de type visqueux : $\sigma = \eta \cdot d\varepsilon/dt$, avec η la viscosité du milieu.
Dans la plupart des cas, la réponse des polymères présente un déphasage δ compris entre 0 et $\pi/2$. Les polymères ont un comportement qualifié de viscoélastique avec les deux composantes élastique et visqueuse :

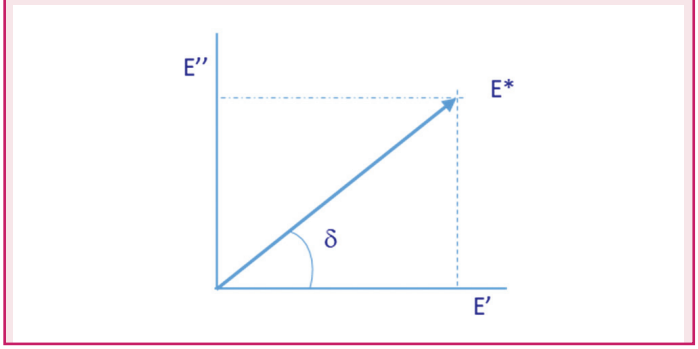


En utilisant le formalisme complexe, on applique une déformation $\varepsilon^* = \varepsilon_0 \cdot e^{j\omega t}$ et on mesure une contrainte résultante $\sigma^* = \sigma_0 \cdot e^{j(\omega t+\delta)}$. Par analogie avec la définition du module de Young, on définit un module complexe E^* tel que $\sigma^* = E^* \cdot \varepsilon^*$, soit :

$$E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} e^{j\delta} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}(\cos\delta + j \cdot \sin\delta) = E' + jE''$$

avec : $E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}\cos\delta$ module de conservation, $E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}\sin\delta$ module de perte, et $\mathrm{tg}\,\delta = \frac{E''}{E'}$ tangente de l'angle de perte.

soit encore $\frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}\cos\delta\sin\omega t + \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}\sin\delta\cos\omega t = E'\sin\omega t + E''\cos\omega t$:



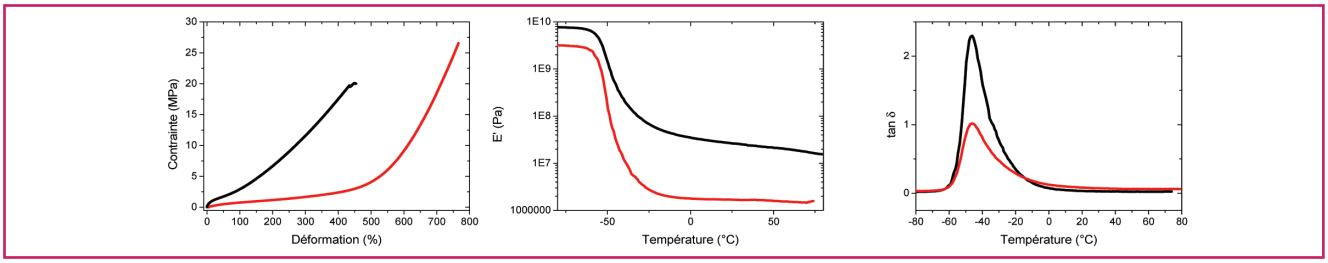


Figure 6 - Courbe contrainte-déformation (gauche), évolution du module E' (milieu) et de tan δ (droite) en fonction de la température pour un mélange caoutchouc naturel (rouge) et un mélange caoutchouc naturel renforcé avec du noir de carbone (noir).

d'obtenir de grandes déformations comme visible sur la *figure 6*. Les caoutchoucs sont souvent utilisés dans des applications dynamiques, par exemple pour fabriquer des systèmes antivibratoires comme les supports de moteur. Il est donc intéressant de caractériser les propriétés dynamiques du matériau. Pour ce faire, une petite déformation cyclique du matériau est appliquée, puis on fait varier la fréquence ou la température et on mesure l'évolution du module. Les élastomères présentent des propriétés viscoélastiques qui induisent un décalage entre la sollicitation du matériau et sa réponse. Cela se traduit par l'existence de deux composantes E' et E'' (*encadré 2* p. 45 et *figure 6*). La mesure du déphasage *via* le paramètre tan δ = E''/E' permet de caractériser l'amortissement du matériau ; ce paramètre est un critère pour modifier une formulation. Selon la gamme de fréquences à amortir ou l'importance de l'amortissement souhaité, on peut chercher à décaler la position du maximum de tan δ ou augmenter la valeur de tan δ.

Les pièces en caoutchouc, pas si simple que cela...

Les fonctions des pièces en caoutchouc sont souvent multiples, si bien qu'une gomme ne peut remplir le cahier des charges à elle seule. Il est alors possible de faire des assemblages de couches de caoutchouc de différentes natures et même d'introduire des fibres, voire tresser des fibres pour améliorer les propriétés mécaniques de la pièce, comme dans le cas des durites. Il faut alors ajuster la formulation pour ne pas avoir de décohésions aux interfaces et que chaque caoutchouc soit réticulé. De plus, il existe de nombreuses pièces fonctionnelles pour lesquelles il y a une partie métallique et une partie caoutchouc ; il faut ici aussi être capable de maintenir une bonne adhésion entre les deux matériaux.

Les élastomères sont des vecteurs d'innovation reconnus. Depuis 160 ans, les propriétés des matériaux caoutchouc ne cessent de progresser, grâce aux nouvelles voies de polymérisation et de contrôle des architectures et aux innovations apportées par les ingénieurs formulateurs.

Cependant, si on est capable d'obtenir de bonnes propriétés mécaniques, de définir certaines lois de comportement macroscopique, les mécanismes à l'échelle moléculaire demeurent mal décrits. En effet, les matériaux caoutchouc sont des produits complexes, composés de différentes molécules qui évoluent au cours de la réaction de vulcanisation mais également par la suite au cours du vieillissement, si bien qu'il existe un réel challenge analytique pour décrire précisément les mécanismes de réticulation, les interactions entre les différents additifs, ainsi que l'évolution chimique de ces matériaux. De telles informations permettraient le développement de nouvelles stratégies de formulation.

À l'heure où l'on parle de l'obsolescence programmée, c'est l'inverse qui se passe dans le domaine des élastomères où l'on demande sans cesse des durées de vie de plus en plus longues. En dix ans, les durées de tests de vieillissement sont passées de 20 h à plus de 7 000 h. Pour ce faire, de nouveaux systèmes de vulcanisation modifiant la nature des liaisons chimiques entre les ponts sont développés, ou de nouvelles stratégies de protection contre les différents types de vieillissement sont envisagées.

Les enjeux sociétaux sont également un moteur d'innovation pour les élastomères. Ainsi les caoutchoucs sont sollicités pour contribuer à la diminution des émissions des gaz à effet de serre, notamment dans le secteur de l'automobile, essentiellement *via* deux axes : la diminution de la résistance au roulement des pneumatiques et l'allègement des composants. Les pneumatiques ont permis de réduire de 2,5 % la consommation d'essence en substituant le noir de carbone par de la silice. Le second challenge visant le gain de poids se décline sur toutes les pièces en caoutchouc présentes dans une voiture : système de transfert de fluide, systèmes antivibratoires ou joints d'étanchéité. Les voies d'innovation sont l'utilisation de matériau expansé pour les joints d'étanchéité par exemple, la diminution de l'épaisseur des tuyaux, en partant sur des systèmes multicouches ou en optimisant au mieux les formulations.

Un autre axe de développement est la recyclabilité des matériaux. En effet actuellement, il est très difficile de recycler un caoutchouc réticulé. Une voie pour améliorer la recyclabilité de ces matériaux est de faire de l'éco-conception ; c'est ainsi que sont nés les matériaux thermoplastiques élastomères. Il s'agit d'alliages d'un polymère thermoplastique avec un élastomère : si l'élastomère n'est pas réticulé, on parle de TPE ; dans le cas contraire, s'il est vulcanisé, on parle de TPV. Un tel matériau combine le caractère recyclable des thermoplastiques avec les propriétés des élastomères. Au-delà du caractère recyclable de tels produits, ces matériaux ont permis d'obtenir de nouvelles performances inaccessibles aux élastomères.

Conclusion

Depuis la découverte de la réaction de vulcanisation, les élastomères sont une source d'innovation. Si l'avenir est aux matériaux connectés, les pièces élastomères peuvent y contribuer. Ainsi les ingénieurs développent des matériaux intelligents pouvant répondre à un stimulus extérieur, ou jouant le rôle de capteur pour détecter un début de défaillance, une variation de pression à l'intérieur d'un tuyau, un début d'amorce de fissure. La mécatronique s'intéresse donc également à ces merveilleux matériaux.

Brice Gabrielle
est « NMR Project Manager » chez Hutchinson*.

* Physico-Chemical Department, Hutchinson SA, Centre de Recherche, rue Gustave Nourry, BP 31, F-45120 Chalette-sur-Loing.
Courriel : brice.gabrielle@cdr.hutchinson.fr