

Trois questions et trois réponses sur le réfrigérateur à élastiques

T. Da Costa², M. Bacry¹, J. Flaharty¹, N. De Pinho Dias², G. Douin¹

¹LICENCE 3È ANNÉE - *Majeure Physique*

²LICENCE 3È ANNÉE - *bi-disciplinaire intensive Mécanique-Physique*

1 Introduction

À partir de notre vidéo de présentation et de notre article [1, 10], nous répondons ici à trois questions posées par notre enseignant référent, C. Antoine.

2 Peut-on évaluer grossièrement l'efficacité énergétique de notre prototype et la comparer à celle d'un réfrigérateur tel que l'on pourrait le concevoir dans des conditions idéales, ainsi qu'à un système de réfrigération utilisant la torsion de matériaux élastomères ou à mémoire de forme ?

Commençons par définir l'efficacité, ou coefficient de performance, comme l'énergie que l'on désire récupérer par rapport à celle que l'on doit fournir : dans notre cas, $COP = \frac{Q_{froid}}{\sum W}$. Idéalement, on réalise un cycle composé d'une tension et d'une détente adiabatiques réversibles d'un élastique en caoutchouc naturel dont la longueur varie de 6 à 30 cm ($Q_{1 \rightarrow 2} = Q_{3 \rightarrow 4} = 0$, $W_{1 \rightarrow 2} = \Delta U_{1 \rightarrow 2}$ et $W_{3 \rightarrow 4} = \Delta U_{3 \rightarrow 4}$), séparées par des retours à l'équilibre isochores où les élastiques sont respectivement maintenus tendus et détendus ($W_{2 \rightarrow 3} = W_{4 \rightarrow 1} = 0$, $Q_{2 \rightarrow 3} = \Delta U_{2 \rightarrow 3}$ et $Q_{4 \rightarrow 1} = \Delta U_{4 \rightarrow 1}$). Avec ces considérations, sur un seul élastiques, il vient $COP_{idéal} = \frac{Q_{3 \rightarrow 4}}{W_{1 \rightarrow 2} + W_{3 \rightarrow 4}} = \frac{\Delta U_{3 \rightarrow 4}}{\Delta U_{1 \rightarrow 2} + \Delta U_{3 \rightarrow 4}}$. En posant $\Delta U = c\Delta T$: $COP_{idéal} = \frac{c\Delta T_{3 \rightarrow 4}}{c\Delta T_{1 \rightarrow 2} + c\Delta T_{3 \rightarrow 4}} = \frac{\Delta T_{3 \rightarrow 4}}{\Delta T_{1 \rightarrow 2} + \Delta T_{3 \rightarrow 4}}$. Or il est montré, notamment dans notre étude [10], que les variations de température sont symétriques à la tension et à la détente pour de mêmes élongations, soit $\Delta T_{1 \rightarrow 2} = \Delta T_{3 \rightarrow 4}$. Alors immédiatement, $COP_{idéal} = 0,5$.

En pratique, ce cycle est erroné : les transformations ne sont pas adiabatiques, encore moins réversibles. Cela diminue donc la valeur des travaux considérés et, contre-intuitivement, augmente la valeur de l'efficacité. À la place d'une transformation adiabatique nous pourrions considérer une transformation isoforce (bien que cela ne soit pas vrai), afin de calculer le travail $W = \int f dl$ comme $W = f\Delta l$. Nous avons mesuré, pour des élastiques de 9 x 0,15 cm, une force de traction f de $(4 \pm 0,4)$ N nécessaire à fournir afin de les tendre de 10 à 26 cm, et une variation de température de (4 ± 1) K lors de cette transformation. En considérant que la force de traction est la même en valeur absolue pour tendre et détendre l'élastique, on a $COP_{réel} = \frac{c\Delta T_{3 \rightarrow 4}}{2f\Delta l}$, soit, pour $c = (0,41 \pm 0,04)$ J/K, $COP_{réel} = (1,3 \pm 0,4)$.

Cette valeur est plus plausible (car supérieure à 1, donc utile), mais il faut encore la remettre en question. Nous avons ici calculé l'efficacité d'un seul élastique, à partir de la chaleur qu'il pourrait émettre. Nous n'avons pas considéré les échanges thermiques, comme ceux décrit dans [2], afin de savoir quelle chaleur est vraiment reçue au sein de notre réfrigérateur, ni estimé les pertes de son enceinte, fendue. Nous avons considéré la force nécessaire pour tendre un élastique, mais pas celle pour mouvoir la roue, qui par son mouvement de rotation exerce une traction sur l'élastique. Enfin, nous nous appuyons sur un cycle qui est calqué sur un modèle de thermodynamique classique, employé très majoritairement pour décrire les gaz parfaits : il est très peu probable que l'on puisse le réutiliser pour expliquer correctement le comportement d'un élastomère (bien qu'un cycle similaire soit décrit dans [3]).

Nous sommes ainsi loin de pouvoir réellement évaluer un coefficient de performance, et nous référons donc plutôt à la récente étude de R. Wang *et al.*, dont la figure 1 est tirée. Y sont évaluées des efficacités relatives au refroidissement généré par ses transformations.

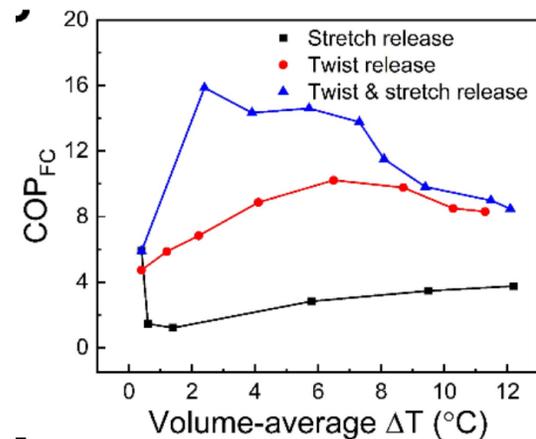


FIGURE 1 – Des valeurs de coefficients de performance pour un cycle tension/détente avec une élongation relative allant jusqu'à $7l_0$ (en noir), un cycle de torsion avec un élastique maintenu tendu à $2l_0$ (en rouge), et un cycle mixte où l'élastique est en torsion et détendu de $2l_0$ à sa longueur à vide l_0 . Notre valeur calculée de 1,3 est cohérente avec les valeurs obtenues sur la courbe noire si l'on considère le fait que nous tendons en pratique notre élastique seulement jusqu'à $3l_0$ et non jusqu'à $7l_0$. Image issue de [4].

3 L'effet Mullins est évoqué dans notre article comme un effet problématique quel que soit le nombre de "cycles" d'utilisation envisagés. N'y a-t-il pas pourtant stabilisation au bout de quelques cycles? Et qu'en est-il aussi du phénomène de fluage dont nous ne parlons pas?

L'effet Mullins se déclare dès le 2^e cycle de tension/détente : si la contrainte maximale est inférieure ou égale à celle exercée lors du premier cycle, la déformation résultante sera plus grande que la fois précédente. Vous pouvez observer l'effet sur l'image 2.

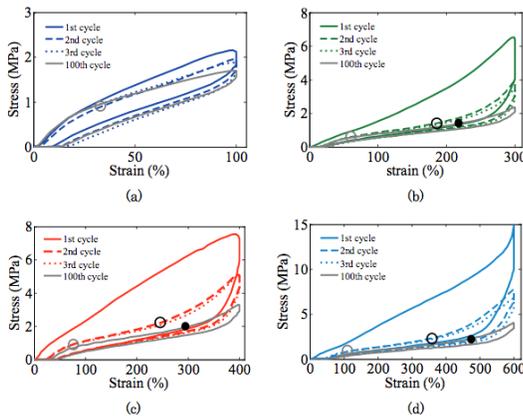


Fig 3.3 Stress-Strain curves of the first, the second, the third and the hundredth cycles in each maximum strain levels: (a) 100 %, (b) 300 %, (c) 400 % and (d) 600 %

FIGURE 2 – Illustration de l'effet Mullins pour différentes contraintes et différents nombres de cycles. Notre système se rapprocherait plutôt du graphique (c). Image issue de [2].

Cependant, à partir d'une dizaine de cycles, ce phénomène se stabilise [5]. Il devient même imperceptible à partir d'une centaine de cycles [2]. Il est vrai que nous aurions dû préciser que cet effet, plus important lors des premiers cycles, devenait négligeable par la suite. Notons que si, une fois l'effet passé, nous augmentions la contrainte, il réapparaîtrait, et il faudrait alors à nouveau plusieurs cycles pour le stabiliser. Mais ce ne sera jamais le cas sur notre roue : il n'est donc pas nécessaire de nous en préoccuper.

Quant au phénomène de fluage : tout d'abord, si l'on devait considérer un effet, cela serait la relaxation. Le fluage correspond d'avantage à la déformation d'un matériau par l'application d'une contrainte constante en continu, ce qui n'est pas le cas dans le système que l'on étudie. Lorsque la roue imposera une déformation constante à l'élastique, la réponse en contrainte diminuera un peu s'il vient d'être tendu (relaxation) et augmentera légèrement s'il vient d'être détendu (effacement) [6]. Néanmoins, au cours d'un cycle, les deux phénomènes se compensent, surtout pour des durées de tensions et détentes relativement courtes, comme celles mises en oeuvre sur notre machine. De plus, la déformation étant dans tous les cas constante, cela ne modifiera aucunement nos résultats que ce soit par rapport au travail à fournir ou à la chaleur récupérée.

Pour notre système, il serait plus intéressant d'évaluer la fatigue, comme fait dans les travaux de Z. J. Xie [7]. C'est un essai qui caractérise la déformation et la détérioration de la structure de l'élastique après un grand nombre de cycles, et qui apparaît déjà au bout d'une centaine de cycles : elle vient donc prendre le relais de l'effet Mullins dans l'occurrence des pertes de l'effet élastocalorique (*N. B.* : il est possible de trouver dans notre journal de bord [8] le témoignage de l'envie que nous avons eu d'évaluer la fatigue de nos élastiques. Cela reste à ce jour une expérience intéressante à réaliser).

4 Lorsque l'on gonfle un ballon de baudruche en caoutchouc, il devient plus brillant et plus clair. Peut-on expliquer pourquoi?

Tous les solides possèdent des défauts et des aspérités à leur surface. La taille de ces défauts varie d'un matériau à l'autre, ce qui a des conséquences sur la qualité de réflexion de la lumière sur ces surfaces. Plus les défauts sont petits devant les longueurs d'onde typiques du visible, plus la réflexion de la lumière sera spéculaire. Lorsqu'il n'y a aucun défaut sur la surface, pour un rayon lumineux incident, un seul sera réfléchi. Si leur taille est plus importante, la réflexion sera plus diffuse : de nombreux rayons partant dans toutes les directions seront renvoyés. C'est ce phénomène qui définit la brillance d'un matériau. Une réflexion très spéculaire est caractéristique d'une forte brillance, une réflexion très diffuse donnera une surface mate [9].

Lorsqu'on gonfle le ballon de baudruche, on étire sa membrane en caoutchouc : sa surface s'aplanit, réduisant la taille de ses défauts : d'après ce que l'on a expliqué précédemment, cela peut être une cause de l'augmentation de la brillance du matériau.

Une fois étirée, la membrane est également plus fine. Elle absorbe moins la lumière qui la traverse et devient donc plus transparente, d'où l'impression d'une plus grande clarté. En outre, le changement de la structure microscopique de la membrane (les polymères s'alignent) a certainement une incidence sur son spectre d'absorption, ce qui pourrait expliquer un éclaircissement des couleurs pour le caoutchouc d'une manière générale. Ce sont cependant des hypothèses qui demandent à être vérifiées.

Références

- [1] T. Da Costa, J. Flaharty, N. De Pinho Dias, M. Bacry, and G. Douin. Réfrigérateur à élastiques. <https://www.youtube.com/watch?v=gM43-kjDbzA>.
- [2] Yukihiro Yoshida et al. *Effet élastocalorique dans le caoutchouc naturel et le terpolymère : mécanismes responsables de la variation de température et bilan énergétique sous déformation*. PhD thesis, INSA Lyon, 2016.
- [3] DW Gerlach, JL Alvarado, EM Mina, and TA Newell. Analysis of elastomer refrigeration cycles. 2002.
- [4] Run Wang, Shaoli Fang, Yicheng Xiao, Enlai Gao, Nan Jiang, Yaowang Li, Linlin Mou, Yanan Shen, Wubin Zhao, Sitong Li, et al. Torsional refrigeration by twisted, coiled, and supercoiled fibers. *Science*, 366(6462) :216–221, 2019.
- [5] Julie Diani, Bruno Fayolle, and Pierre Gilormini. A review on the mullins effect. *European Polymer Journal*, 45(3) :601–612, 2009.
- [6] Ali Kahamel. Modélisation du phénomène de fluage et de relaxation des matériaux a mémoire. 2013.
- [7] Zhong Jian Xie. *Effet élastocalorique dans le caoutchouc naturel*. PhD thesis, 2016.
- [8] J. Flaharty, T. Da Costa, N. De Pinho Dias, M. Bacry, and G. Douin. Journal de bord. http://fablab.sorbonne-universites.fr/wiki/doku.php?id=wiki:projet:l3phys19_20:lu3py024g4:journal.
- [9] Pat Hanrahan and Wolfgang Krueger. Reflection from layered surfaces due to subsurface scattering. In *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 165–174, 1993.
- [10] J. Flaharty, T. Da Costa, N. De Pinho Dias, M. Bacry, and G. Douin. Réfrigérateur à élastiques, ou l'étude de l'effet élastocalorique appliquée aux systèmes réfrigérants. 2020.
- [11] Marc Blétry. Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux. http://mms2.ensmp.fr/mms_paris/experimental/polycop/caracterisation.pdf.