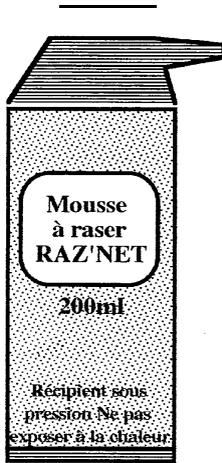


Détente adiabatique d'une mousse sous pression

par Charles de IZARRA et Olivier VALLÉE
Centre universitaire de Bourges - UFR Faculté des Sciences
G.R.E.M.I. Université d'Orléans - rue Gaston Berger
B.P. 4043 - 18028 Bourges cedex



RÉSUMÉ

En utilisant un récipient sous pression contenant une mousse (bombe de mousse à raser par exemple), on illustre à moindre frais la notion de transformation thermodynamique : transformation adiabatique et transformation isobare.

1. INTRODUCTION

L'enseignement de la physique sous forme de cours magistral peut être facilement valorisé auprès des étudiants en faisant appel à des expériences de cours. Cependant, certaines disciplines de la physique ne se prêtent pas facilement à la mise au point de ce type d'expériences, qui par définition doivent être accessibles à un large auditoire tout en étant fiables, sans toutefois nécessiter d'appareillage trop lourd ou trop volumineux. Il est souvent possible d'illustrer un cours de physique en

exploitant des phénomènes de la vie quotidienne [1], ce qui a l'énorme avantage de relier des notions quelquefois abstraites à des choses connues de tous.

Dans l'enseignement de la thermodynamique élémentaire, il est toujours délicat d'expliquer la notion de transformation thermodynamique, et des étudiants confrontés à une expérience réelle comme celle de CLÉMENT et DESORMES [2] «conçoivent» difficilement le cycle thermodynamique qu'ils doivent étudier¹. Dans cet article, on présente une étude thermodynamique d'une mousse sous pression qui se détend, ce qui permet d'illustrer à la fois la notion de transformation adiabatique et la notion de transformation isobare.

2. THERMODYNAMIQUE ÉLÉMENTAIRE DE LA BOMBE DE MOUSSE

L'effet qui est étudié ici a été observé par tout un chacun au moins une fois en utilisant un récipient contenant une mousse sous pression (il peut s'agir d'une bombe de mousse pour nettoyer les moquettes ou les fours, ou encore une bombe de mousse à raser). L'observation est la suivante : **dans un premier temps**, la mousse sort du récipient sous pression et se détend pour atteindre la pression atmosphérique ; **dans un second temps** qui dure une fraction de seconde mais qui est parfaitement observable à l'œil nu, on voit la mousse gonfler quelquefois de manière spectaculaire.

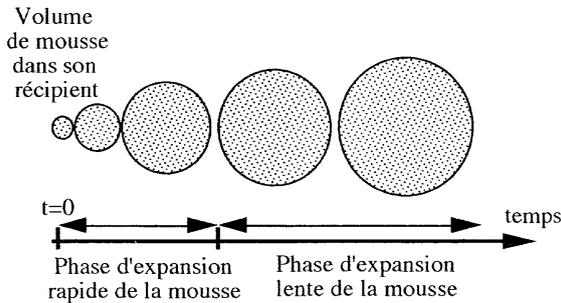


Figure 1 : Représentation schématique des deux phases d'expansion d'une mousse initialement sous pression.

1. A ce propos, on trouvera dans la référence [3] une superbe expérience destinée à mesurer le rapport des chaleurs spécifiques γ de l'air à partir du cycle thermodynamique de Otto.

Une mousse est un milieu liquide à faible tension superficielle au sein duquel sont réparties des bulles de gaz ; la surpression qui règne à l'intérieur d'une bulle de gaz (voir le modèle des bulles de savon [4]) est assez faible, et de l'ordre de quelques Pascals. Nous supposons que la mousse existe à l'intérieur du récipient sous pression, ce qui est favorisé par une agitation préalable.

Dans tout ce qui suit, nous considérerons que la mousse est propulsée par un gaz parfait diatomique (azote par exemple), de rapport de chaleur spécifique $\gamma = 1,4$. La pression du gaz dans le récipient est P_i (pression absolue), et la pression atmosphérique sera notée P_a . Le récipient est initialement à la température ambiante T_a , et nous supposons que le milieu ambiant constitue un thermostat, c'est-à-dire un réservoir d'énergie de taille très largement supérieure à la taille du récipient, et de température constante.

L'étude thermodynamique du réservoir de gaz sous pression est traitée totalement dans la référence [5], en considérant divers systèmes thermodynamiques : le réservoir seul avec le gaz à l'intérieur ou le réservoir avec le gaz à l'intérieur plus le gaz éjecté. Dans cette étude, nous nous attacherons à un volume V_i de gaz piégé dans les bulles de la mousse, et nous suivrons son évolution. Le volume V_i sera supposé assez petit devant la taille du réservoir, afin de pouvoir considérer la température de ce dernier comme constante [5]. Dans un premier temps, le gaz et la mousse sortent du récipient. La rapidité de ce processus et la faible conductivité thermique des gaz permettent de considérer qu'il a lieu sans échange de chaleur ni avec le thermostat, ni avec le liquide constitutif de la mousse : c'est une transformation adiabatique ($A \rightarrow B$), que l'on peut écrire en diagramme (P,T) sous la forme :

$$P^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} T = C^{te} \quad (1)$$

Il convient de remarquer que le liquide qui forme la mousse est très peu compressible et garde donc une température constante égale à T_a lors de la détente ($A \rightarrow B$). A la fin de la détente adiabatique, la température du gaz est T_f , et son volume est V_f (point B de la figure 2). Lorsque le gaz et la mousse sont à la pression atmosphérique P_a , l'équilibre thermodynamique s'établit par l'intermédiaire d'une transformation isobare ($B \rightarrow C$) où la mousse passe d'un volume V_f à un volume V_a . Il est raisonnable de penser que le transfert d'énergie qui permet au gaz piégé dans la mousse de se réchauffer a lieu entre le

liquide formant la mousse et les bulles de gaz. En effet, la surface d'échange entre les bulles de gaz et le liquide est très grande, et l'expérience montre que la mousse gonfle dans sa totalité, et non à partir de la surface externe en contact avec l'air ambiant.

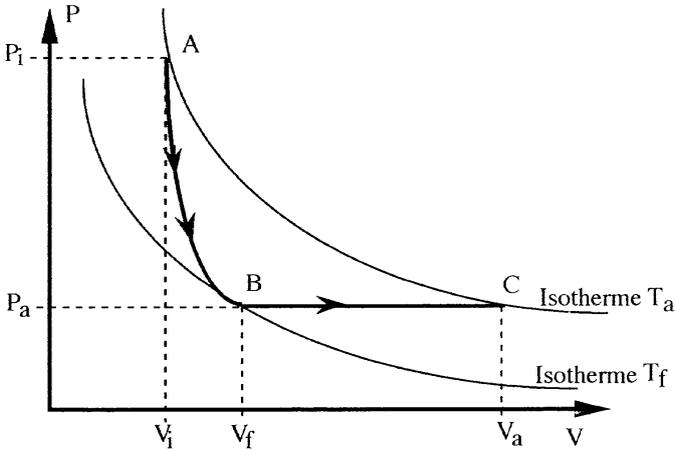


Figure 2 : Représentation en coordonnées de Clapeyron (P,V) de la transformation thermodynamique subie par la mousse. La transformation A → B est adiabatique (décrite par la loi de Laplace $PV^\gamma = C^{te}$) et la transformation B → C est isobare.

L'application de la relation (1) et de la loi de Laplace permet de déterminer T_f et V_f :

$$T_f = T_a \left(\frac{P_i}{P_a} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \quad (2)$$

$$V_f = V_i \left(\frac{P_i}{P_a} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (3)$$

Entre B et C, il est aisé de montrer que la variation de volume est :

$$V_a = V_f \left(\frac{P_a}{P_i} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \quad (4)$$

La variation totale de volume peut être déterminée en remarquant que les points A et C sont sur la même isotherme T_a . On en déduit que :

$$\frac{V_a}{V_i} = \frac{P_i}{P_a} \quad (5)$$

3. RÉSULTATS OBTENUS

Nous avons mesuré la pression interne d'une bombe de mousse à raser à l'aide d'un manomètre à membrane ; on a obtenu : $P_i = 4 \text{ bars}^2$. L'application de la relation (5) permet de trouver le rapport d'augmentation de volume de la mousse : $V_a/V_i = 4$. Les variations de volume pendant les deux transformations sont : $V_f/V_i = 2,69$, et $V_a/V_f = 1,3$, ce qui montre que la transformation isobare n'est pas négligeable dans le processus d'expansion de la mousse. La température à la fin de la détente adiabatique en prenant $T_a = 293 \text{ K}$ (20°C) est $T_f = 197 \text{ K}$ (-76°C), ce qui est assez surprenant. On pourrait s'attendre à ce que le liquide se mette à geler au contact de ce gaz à très basse température. En fait, il n'en est rien. La masse volumique de la mousse détendue que nous avons mesurée est de l'ordre de 80 g/litre . Si nous raisonnons sur 1 litre de mousse, nous pouvons dire que le volume de gaz piégé au sein des bulles est au maximum de l'ordre du litre, ce qui correspond à une masse de l'ordre de 1 gramme. Le rapport de la masse de gaz et de la masse de liquide dans la mousse est de l'ordre de $1/80$. De même, le rapport de la chaleur molaire à pression constante C_p du gaz et de la chaleur molaire C du liquide est de l'ordre de $0,24$ (cet ordre de grandeur est estimé en prenant l'eau comme liquide). L'équation de conservation de l'enthalpie permet d'écrire, pour une mousse constituée d'une masse m_g de gaz et d'une masse m_L de liquide :

$$m_L C \Delta T_L = m_g C_p \Delta T$$

avec $\Delta T = 96 \text{ K}$ (variation de température du gaz entre le point B et le point C) et ΔT_L la variation de température du liquide. Avec les ordres de grandeurs précédents, on déduit que $\Delta T_L = 0,003 \times 96 = 0,3 \text{ K}$. La variation de température du liquide est infime, et explique le fait que le fluide reste sous sa phase liquide.

2. La valeur de cette pression justifie la dénomination de «bombe» !!!

4. CONCLUSION

Cette expérience de détente d'une mousse sous pression peut être très facilement réalisée en salle de cours afin d'illustrer la notion de transformation thermodynamique. Il est sans doute possible de traiter le sujet plus profondément avec des mousses très diverses : les bombes de crème Chantilly sous pression par exemple, que le constructeur préconise de refroidir avant l'utilisation, ou encore les glaces à l'italienne... Enfin, et ce domaine est très vaste, nous n'avons pas abordé le processus de transfert thermique entre le liquide et le gaz contenu dans les bulles de mousse : il fait intervenir une surface d'échange très grande, qui est à la base même de la notion de mousse.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier MM. Gilles CHARLES et Jean-Luc THÉBAULT pour leur aide lors des mesures.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. WALKER : «*Le Carnaval de la Physique*», Dunod (1988) et ses chroniques mensuelles dans «Pour la Science» qui sont malheureusement terminées.
- [2] A. ARBOUET : «*L'expérience de Clément & Desormes automatisée*», Bulletin de l'Union des Physiciens, Vol. 69, juin 1995, pp. 1079-1083.
- [3] J. MOTTMANN : «*Laboratory experiment for the ratio of specific heats of air*», American Journal of Physics, Vol 63 (3), march 1995, pp. 259-260.
- [4] J.-Ph. PEREZ et A. ROMULUS : «*Thermodynamique*», Masson (1993).
- [5] H. LUMBROSO : «*Thermodynamique, cent exercices et problèmes résolus*», McGRAW-HILL Inc. (1979).