



Forum Physique

Envoyez vos questions, réponses ou articles au secrétariat de l'UPS.

- **Forum n° 1**

Où situer la limite de l'irréversibilité ?

Contribution de Jean-Michel LAFAILLE.

Résumé : Commentaires à propos d'un type d'exercices de thermodynamique, sensé mettre en évidence l'irréversibilité, mais dont il serait préférable de voir disparaître l'interprétation pour le moins douteuse.

Introduction

La détente irréversible de Joule/Gay-Lussac a inspiré des variantes dans quelques exercices. Hélas, si l'irréversibilité de l'expérience d'origine est claire, celle des autres cas envisagés n'est pas du tout évidente, ce qui conduit à des interprétations pour le moins douteuses.

L'exemple type de variante [1] correspond au cas d'un gaz contenu dans un récipient cylindrique, fermé dans sa partie supérieure par un piston sans frottement, le tout étant initialement en équilibre sous l'effet du poids du piston. Dans une première partie, on ajoute sur le piston une importante surcharge et on considère que le rééquilibrage correspond à une compression irréversible ; dans une seconde partie, on ajoute une succession de petites surcharges ayant le même total et on considère que le rééquilibrage est quasi réversible.

Le point embarrassant est que l'effet de la grande surcharge, même s'il peut sembler brutal, est en général quasi réversible (en l'absence de frottement).

1. Quasi réversibilité

Sous l'effet de la gravitation et de la réaction du piston, la surcharge ne peut pas descendre avec une accélération dépassant celle de la pesanteur (à cause de son inertie). Sa descente ne dépasse pas l'ordre de grandeur du mètre, donc sa vitesse ne dépasse pas quelques mètres par seconde : c'est tout à fait négligeable en comparaison des vitesses d'agitation thermique. La compression « brutale » est donc quasi réversible.

Plus précisément, il faudrait comparer la durée de la descente et la durée de « rééquilibrage » de la répartition statistique des vitesses (selon le facteur de Boltzmann). Seules les plus faibles vitesses sont perturbées de façon non négligeables ; or, dans les conditions usuelles, les temps moyens de collision sont tels que la répartition des vitesses est rééquilibrée quasi instantanément en comparaison de la durée de descente — il en serait peut-être autrement pour un fluide fortement visqueux, mais ce n'est pas le cas envisagé.

Remarque 1. Les exercices décrits supposent souvent la masse du piston « négligeable ». Ceci est plausible en comparaison de la masse de la surcharge ajoutée, mais plutôt improbable en comparaison de la masse du gaz.

Remarque 2. Étrangement, l'hypothèse de quasi réversibilité est généralement admise pour les compressions et détente intervenant dans les moteurs à explosion ; comment se fait-il que l'hypothèse contraire soit utilisée pour cette compression ?

2. Travail des forces pressantes

L'exercice calcule généralement le travail reçu par le gaz en considérant $\delta W = -p_{\text{ext}} dV$, où p_{ext} prend en compte l'action de la surcharge et est donc supérieure à la pression du gaz.

Remarque. Pour une pression extérieure p_0 , un piston de masse négligeable et une surcharge de masse M , la pression « moyenne » correspondante est $p_{\text{ext}} = p_0 + Mg/S$; comme beaucoup d'élèves confondent encore pression et force pressante, il s'agit d'un abus de notation un peu gênant.

Il me semble important de préciser que, dans les cas où le gaz est hors d'équilibre et n'a pas une pression uniforme (si le déséquilibre n'est pas trop violent, pour que la pression soit définie en chaque point), la notation p_{ext} désigne en fait la pression à la limite du système en contact avec l'extérieur (là où se produit la variation de volume correspondante).

Dans le cas étudié ici, puisque la compression est quasi réversible, la pression du gaz est quasi uniforme ; le travail reçu par le gaz est donc $\delta W = -p dV$; la différence est en fait reçue par le piston et la surcharge, dont l'énergie cinétique et l'énergie potentielle varient.

Mais surtout, une fois arrivé à la nouvelle position d'équilibre, l'ensemble du piston et de la surcharge continue à cause de son énergie cinétique... En fait, en l'absence de frottement, il oscille indéfiniment autour de l'équilibre [2].

3. Rôle des frottements

La nécessaire action d'un frottement, pour atteindre la nouvelle situation d'équilibre du piston, ne peut pas raisonnablement être obtenue par interaction entre le piston et le gaz : le gaz parfait est plutôt de viscosité négligeable, et il semble difficile d'imaginer un jeu de palettes mis en mouvement par le piston pour créer des remous suffisants.

Le principal frottement doit être envisagé entre le piston et la paroi latérale du récipient ; même pour un tube et un piston ajustés par un fin polissage à l'émeri, l'étanchéité implique un inévitable frottement. Ce sont donc ces solides qui « récupèrent » l'essentiel de l'énergie mécanique correspondante sous forme d'énergie interne, associée à une élévation de température. Or la capacité thermique des parties solides est très supérieure à celle du gaz, donc l'infime variation de température correspondante est quasi inobservable.

Le gaz subit pour sa part, en assez bonne approximation, une compression quasi réversible adiabatique.

Remarque. Si le frottement est faible (le piston effectue dans ce cas de nombreuses oscillations avant de se stabiliser à la nouvelle position d'équilibre), le gaz subit plutôt globalement l'équivalent d'une compression quasi statique isotherme, puisqu'il se rééquilibre au fur et à mesure (la position moyenne autour de laquelle s'effectuent les oscillations se décale progressivement en conséquence).

4. Conclusion

Ma conclusion est qu'il est utile de favoriser la communication pour contribuer à éliminer les exercices de ce genre pouvant encore « traîner » dans les manuels insuffisamment retravaillés — j'en ai encore très récemment rencontré, dans deux spécimens offerts par les éditions... [1] ..., d'où ma décision de proposer cet article.

Références

- [1] Je choisis ici délibérément de ne pas citer de référence — mon but n'est pas de pointer du doigt les collègues qui, probablement par faute de temps, se sont laissés entraîner à reproduire dans leurs ouvrages des variantes de cet exercice trouvées ailleurs.
- [2] Il me semble par contre intéressant de citer des livres où le point délicat de l'exercice est au moins évoqué (en envisageant des oscillations du piston, des remous dans le gaz associés à l'amortissement...) :
S. OLIVIER, *Thermodynamique – première année*, Éditions Tec & Doc.
P. GRÉCIAS & J.-P. MIGEON, *Physique – première année*, Éditions Tec & Doc.