

Réponse aux critiques de J. Dayantis

M. DEMBNO-TCHAIKOWSKY

39 rue de la Frégère, F-34980 St Gély du Fesc

RÉSUMÉ. On fait observer que la divergence entre les deux thermodynamiques, dont l'existence est mise en doute par J. Dayantis, avait déjà été implicitement reconnue dans le cadre de la thermodynamique des processus hors équilibre. Puis, les critiques sur le manque de précision supposé de nos résultats sont expliquées comme étant dues à la non prise en compte par notre collègue de trois circonstances de nature purement expérimentale. On précise, ensuite, que le raisonnement utilisé pour démontrer le travail de détente des gaz n'est nullement de notre cru, mais est parfaitement classique. Enfin, en annexe, on montre l'équivalence théorique entre divers schémas de détente des gaz, dont celle à enthalpie constante de Joule-Kelvin et la nôtre.

ABSTRACT. It is firstly observed that the divergence between the two thermodynamics, the existence of which is doubted by J. Dayantis, has already been implicitly recognised in the context of non-equilibrium thermodynamics.

Secondly, the criticisms concerning the lack of precision in the results are explained as being due to J. Dayantis not taking into account three circumstances which are of a purely experimental nature. It is also shown that the arguments used to demonstrate the work of the expansion of gases are not at all the invention of the author but are perfectly classical.

Finally, in appendix, it is shown that there is theoretical equivalence between different methods for examining expansion in gases, namely that of constant enthalpy of Joule-Kelvin, and that of the author.

Les critiques exprimées par J. Dayantis à propos de notre article relatif au refroidissement des gaz en expansion [1] nous permettent de répondre en fournissant un certain nombre de remarques et

de précisions complémentaires, qui seront probablement utiles à mieux cerner le problème posé, car, nous l'admettons volontiers, il est irritant et son existence même est difficile à admettre. ¹

Ces critiques concernent essentiellement l'imprécision que notre collègue croit voir en nos résultats, ce qui nous défendrait de conclure à l'existence d'une divergence entre ces résultats et les précisions de la *TS*.

Qu'il nous soit permis, toutefois, de répondre d'abord à une observation de J. Dayantis, qui nous dit qu'à sa connaissance aucune incohérence entre les deux thermodynamiques n'aurait été mise en évidence à ce jour. Or, nous pouvons l'informer que, dans le cadre de la thermodynamique hors équilibre, cette divergence apparaît implicitement dans le calcul de l'effet "mécanocalorique", traité par S.R. de Groot et P. Mazur [2].

Pour tenter de comprendre comment une telle situation a pu se prolonger jusqu'à maintenant, on peut se demander si ce n'est pas du fait que les deux théories analysent les phénomènes à *des échelles d'observation différentes* : la *TC* à notre échelle "macroscopique" habituelle, sans chercher à déterminer la nature exacte des énergies en jeu, la *TS* à l'échelle des molécules, en poussant les investigations bien plus loin.

Dans ces conditions, on peut effectivement se demander si les expériences spécifiques à chacune des deux théories et leurs résultats peuvent être considérés comme équivalents, et donc difficilement comparables.

Ce que l'on peut noter, en tous les cas, c'est que dans le cadre de la *TC*, les effets thermiques se produisant nécessairement au cours des deux détente "fondamentales" de la *TC* *sont négligés* : dans les détente brusques de Joule, seul l'effet calorifique *globalement nul* est pris en compte, alors que dans les détente lentes de Joule-Kelvin, les capacités calorifiques des deux réservoirs sont admises comme étant infinies, d'où suppression (pour les gaz parfaits monoatomiques, du moins) de toute variation de température dans les réservoirs soumis aux écoulements gazeux.

Il est donc probable que notre expérience ait été la première, conçue et réalisée dans le but précis de mesurer *directement* l'énergie calorifique

¹ Il s'agit d'une divergence entre les prévisions de la thermodynamique classique (*TC*) et de la thermodynamique statistique (*TS*) concernant la valeur du refroidissement des gaz en détente, cette divergence allant du simple au double.

transférée tout au long des détentes d'un réservoir à l'autre dans diverses conditions de rapidité et de pression. Sa mise au point a été préparée avec soin, les matériaux utilisés et la méthode de mesure choisis d'après les critères de qualité et de facilité d'utilisation, les phénomènes parasites, inhérents à toute mesure, répertoriés et quantifiés. Nous avons estimé et écrit (p.99) que la précision de nos résultats –la pente de l'accroissement de la température en fonction de l'accroissement de la pression– pouvait être évaluée à 10 ou 15 %, et correspondait bien aux prévisions de la *TC*.

La critique de J. Dayantis qui, à première vue, peut paraître parfaitement légitime, a été faite, toutefois, sans tenir compte des trois circonstances suivantes :

- 1) Ce n'est pas la différence des pressions initiales entre les deux réservoirs qui est la quantité significative pour la différence de température à obtenir, mais bien la quantité de gaz *introduite* dans le réservoir *B*, et qui se traduit *par le transfert de l'enthalpie hdm*. Or, si les capacités volumiques des deux réservoirs sont égales à un litre, ce qui est approximativement le cas dans nos expériences, il y a lieu de *diviser par deux* la pression différentielle initiale des deux réservoirs pour obtenir la valeur significative cherchée.
- 2) La mesure des variations de la température s'effectuait sur la paroi externe du réservoir *B*. Pour déterminer la quantité de chaleur dégagée par la compression du gaz dans *B*, il faut tenir compte *de la somme* de la capacité calorifique de ce gaz et de celle du réservoir *B*, qui est voisine de 100 cal/degré. Ceci explique la valeur relativement faible des variations de température mesurées, qui n'a rien à voir directement avec les variations simultanées de pression du gaz pénétrant dans *B*.
- 3) Enfin, un phénomène parasite, que notre collègue ne pouvait prévoir : la perte de chaleur *par conduction* entre les deux réservoirs, l'un se refroidissant, l'autre s'échauffant. Ces pertes de chaleur ne sont pas négligeables, et d'autant plus élevées que les durées des détentes sont longues et les différences de pression en jeu importantes. Leur effet est de diminuer la différence de température *globale* observée, en infléchissant la droite exprimant le rapport $\Delta T/\Delta P$. Ce phénomène a été représenté sur la figure 6, p. 98 de notre article : la partie significative de ces droites, correspondant au résultat annoncé, varie de 1 à 2 minutes selon les cas.

Une autre observation de J. Dayantis mérite, à notre avis, une analyse particulièrement complète : selon J. Dayantis l'éjection d'un gaz à partir d'un réservoir sous pression par un orifice (comme dans notre expérience), et la détente à enthalpie constante de Joule-Kelvin *ne sont pas équivalentes*.

Nous ne sommes pas de cet avis, et avons donc traité ce sujet en annexe, en tentant de démontrer notre point de vue à l'aide d'une comparaison au moyen de 7 schémas d'expériences possibles à imaginer et à comparer aisément, en partant de l'expérience à enthalpie constante de JK et en aboutissant à la détente brusque de Joule, en passant par la nôtre. Il nous paraît théoriquement certain que, mis à part quelques écarts dus à des dispositions particulières de l'orifice d'évacuation, *toutes* les détentes ainsi examinées conduisent toujours au transfert d'une énergie globale $5kT/2$ par molécule évacuée prévue par la TC .

Enfin, pour terminer, nous rappelons que les raisonnements utilisés dans notre article pour définir le travail effectué par un gaz s'échappant en jet de l'orifice d'un réservoir sous pression, *n'est pas de notre cru*, mais est classique, et se retrouve dans divers ouvrages de thermodynamique ou de mécanique des fluides (voir, notamment, la bibliographie de notre précédent article).

Références

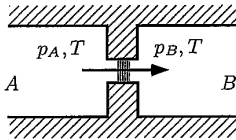
- [1] M. Dembno-Tchaikowsky, Ann. Fond. Louis de Broglie, **13**(1), 85(1987).
- [2] S.R. de Groot, P. Mazur, *Non equilibrium thermodynamics*, North Holland Pub. Cy, Amsterdam 1962

Annexe.

Divers schémas de détente irréversibles de gaz parfaits monoatomiques, plus ou moins rapides, et équivalentes. On suppose le transfert de la *même* quantité m de gaz, et donc de la *même* enthalpie $h = \Delta n \times 5kT/2$ (Δn étant le nombre de molécules transférées), et du *même* travail $\tau = p_A \Delta V_A = p_B \Delta V_B = \Delta n kT$.

1. Les deux façons équivalentes de représenter l'expérience de détente de Joule-Kelvin.

1.A Représentation classique:

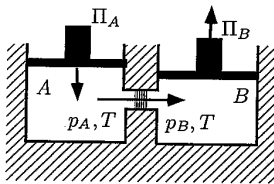


p_A, p_B et T constants. Pas d'échange de chaleur avec l'extérieur.

Les capacités calorifiques des réservoirs A et B sont tacitement admises comme infinies. L'expérience est à la fois adiabatique et isotherme.

Remarque. Il est clair que les valeurs de l'enthalpie et du travail transférés sont indépendantes de la valeur de la pression à l'aval p_B .

1.B Représentation non classique avec deux pistons:



p_A, p_B et T constants. Pas d'échange de chaleur avec l'extérieur.

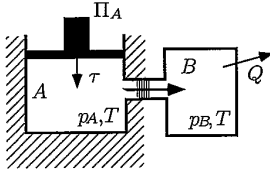
Les capacités calorifiques des réservoirs A et B sont finies. L'expérience est à la fois adiabatique et isotherme.

Remarque. La remarque du cas 1.A reste valable. Elle est encore manifestement vraie dans les deux cas pour la limite $p_B = 0$.

Observation d'ordre général. Il semble bien que la représentation 1.B est plus suggestive que 1.A, et montre intuitivement que le travail $p_A \Delta V_A = p_B \Delta V_B = kT \Delta n$ transite nécessairement par le canal en plus de l'énergie interne $\Delta n \times 3kT/2$.

2. Les deux représentations complémentaires nécessaires pour le passage de l'expérience de Joule-Kelvin à celle de l'auteur, qui lui est équivalente et fait l'objet du 3ème paragraphe de l'annexe.

2.A Expérience 1.B modifiée, avec le réservoir aval B de volume invariable:



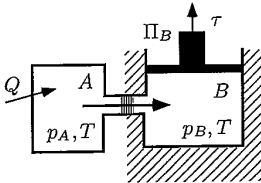
$$Q = p_A \Delta V_A = V_B \Delta p_B = kT \Delta n$$

$$\tau = -p_A \Delta V_A$$

p_A et T constants, p_B variable. A n'absorbe pas de chaleur, B dégage l'équivalent de $kT \Delta n = p_A \Delta V_A$.

Le remplacement du piston aval B par un réservoir invariable transforme le travail $p_A \Delta V_A$ transféré en chaleur équivalente dégagée par B . L'expérience est isotherme.

2.B Expérience 1.B modifiée, avec le réservoir amont A de volume invariable:



$$Q = V_A \Delta p_A = p_B \Delta V_B = kT \Delta n$$

$$\tau = p_B \Delta V_B$$

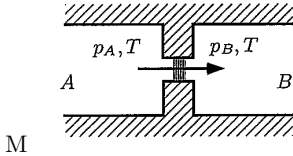
p_B et T constants, p_A variable. A absorbe l'équivalent de $kT \Delta n = p_B \Delta V_B$. B ne dégage pas de chaleur.

Le raisonnement est le même que ci-dessus, mais c'est la chaleur $Q = V_A \Delta p_A = kT \Delta n$ qui est absorbée par A et transférée en B , où le piston produit le travail équivalent $\tau = p_B \Delta V_B$. L'expérience est isotherme.

Observation d'ordre général. Ces deux expériences peuvent reconstituer soit l'expérience de Joule-Kelvin (par le réservoir A de 2.A et le réservoir B de 2.B), soit celle de l'auteur (par le réservoir A de 2.B et le réservoir B de 2.A).

3. Les deux façons équivalentes de représenter l'expérience de détente de l'auteur.

3.A Représentation isotherme (théorique):

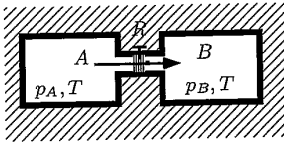


$$Q = kT \Delta n$$

La seule différence avec les cas précédents est la mise en place du robinet R pouvant faire varier la vitesse de la détente.

p_A et p_B variables, T constante.
Chaleur Q absorbée par A et dégagée par B .

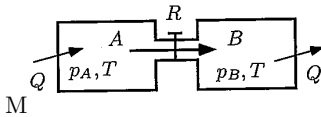
3.B Représentation adiabatique (réalisée):



C'est la même expérience. Les différences de température étant faibles, l'expérience peut aussi être considérée comme étant isotherme.

p_A, p_B, T_A et T_B variables. Le système contient le gaz plus les réservoirs.

4. Comparaison avec la détente rapide de Joule:



p_B initiale nulle.

Il devient manifeste qu'il s'agit d'une expérience équivalente à celle de l'auteur, avec ouverture totale du robinet R .

p_A, p_B, T_A et T_B variables pendant la détente. La chaleur absorbée par A (indéterminée) est égale à la chaleur dégagée par B .