# En lisant le B.U.P.
# Réponses aux critiques des bases de la thermodynamique

par G. LAVERTU

L'article «les bases de la thermodynamique» [1] avec sa mise au point [2] a suscité quelques réactions tentant de perpétuer les erreurs passées.

En [3] l'auteur se déclare d'accord avec les définitions de chaleur et travail de [1] qui expriment en effet de façon concise les remarques et citations hésitantes de son texte où il était question de poulies, de fils, et de douaniers. Certes la direction était bonne, mais la définition donnée en [1] est suffisamment claire, précise et incontestable par ses conséquences qu'elle n'a pas besoin de ce type d'explications pour la préciser. L'auteur se déclare de plus d'accord avec la définition de l'énergie interne et l'énoncé du premier principe admis en [1], où ils ne constituent pas une innovation, bien que le constat de [3] selon lequel chacun s'accorderait dessus soit malheureusement inexact. L'auteur est donc d'accord avec les bases de la thermodynamique de [1], et, n'ayant pas trouvé d'erreur dans une démonstration de [1], il approuve en fait sans le vouloir l'article qu'il prétend contester.

Ainsi la démontration de $\delta W = - pdV$ n'est pas contestée. C'est bien le travail élémentaire reçu par le fluide, sous la seule hypothèse restrictive qu'il reste équibare. Précisons d'ailleurs à ce sujet que s'il ne l'est pas, le travail élémentaire s'exprime toujours par la seule pression intérieure ; soit $x_p$ l'abscisse de la frontière plane S entre le fluide étudié et le piston, le fond étant à une abscisse inférieure. La pression p sur cette surface étant p $(x_p, y, z)$, il est facile de montrer, en appliquant la définition que :

$$\delta W = - dx_p \iint_S p\,(x_p, y, z)\, \delta y \delta z$$

Cela fournit un élément de réponse à [3]
où il était demandé à partir de quelle vitesse du piston il faudrait remplacer $-pdV$ et par quelle expression. Bien entendu, $p(x_p, y, z)$

représente aussi bien la pression du fluide que la pression du piston à cette abscisse, car la pression à l'intérieur d'un système thermodynamique est une grandeur continue, sinon on aboutirait à des accélérations infinies. C'est ainsi qu'à l'intérieur de notre piston, on peut établir en considérant l'accélération d'une tranche $\delta x$ de piston d'épaisseur e, et avec l'origine sur S, que $p(x) = p + (p_e - p)\, x/e$. Cette remarque constitue également réponse à une critique de [6], qui considérait a priori une discontinuité.

Dans la démonstration de $\delta W = -p_e dV$ [3] se trouvent par contre plusieurs erreurs :

1º) «La thermodynamique ne s'intéresse qu'aux états d'équilibre et devrait s'appeler thermostatique». On fait en réalité de la thermodynamique dès que l'on utilise des grandeurs de nature thermodynamique, c'est-à-dire statistique : température, pression, chaleur, travail, etc... Le théorème de l'état initial et de l'état final utilisé ici-même en [3] n'est évidemment pas un théorème de thermostatique.

2º) «Le piston est supposé sans frottement, bien qu'il se soit déplacé entre deux états d'équilibre et qu'aucune force autre que les forces de pression ne se soit exercée sur lui». Ces hypothèses paraissent contradictoires, il faudrait expliquer à ce stade ce qui peut arrêter le piston, et il semble qu'une confusion soit faite entre état d'équilibre et état d'énergie cinétique nulle.

3º) «Le piston est immobile avant et après la transformation, donc $dK = 0$». En réalité, seul $\Delta K = 0$. Une fonction n'est pas identiquement nulle parce qu'elle est nulle en deux points.

4º) Après avoir affirmé $\delta W = -p_e dV$ pour le fluide, [3] dit pourtant plus loin et à juste titre que ce résultat n'était valable que pour le système fluide + piston + cylindre, résultat d'ailleurs indiqué en [1]. Indiquons les énoncés corrects auxquels [3] aurait du aboutir :
Le travail élémentaire de compression reçu par un fluide est $\delta W = -pdV$ ; il n'est égal à $-p_e dV$ que si la transformation est quasi-statique puisqu'alors $p = p_e$. D'autre part, entre deux états d'énergie cinétique nulle du piston (qui ne sont pas en général des états d'équilibre), et en l'absence de force de frottement, le travail reçu par

le fluide, toujours égal à $\int_1^2 -pdV$, est aussi égal sous les hypothèses restrictives indiquées à $\int_1^2 -p_e dV$.

Les erreurs de raisonnement n'expliquent pas seules le mauvais résultat obtenu en [3]. L'essentiel est en amont : en [1] on utilise les bases admises, alors qu'en [3] on les oublie, ce qui rend vaine leur acceptation. Ainsi [3] admet que le piston reçoit le travail pdV de la part du fluide, ce qui est exact, mais où est la démonstration ? Celle-ci montrerait tout aussi bien que le fluide reçoit –pdV de la part du piston puisque dans ce cas il y a bien échange car les vitesses macroscopiques sont les mêmes.

On trouve pour la même raison (oubli des bases) plusieurs remarques fausses et curieuses, présentées sans la moindre justification, par exemple :

«Le seul système qui puisse être considéré est le système piston + fluide + cylindre». Pour quelle raison ? Où serait l'erreur dans l'étude du fluide seul présentée en [1] ?

«Quel est le travail reçu par le fluide ? La question n'a pas à mon avis de réponse bien définie». Alors pourquoi avoir présenté une réponse bien définie quoique fausse ? Cette remarque est particulièrement significative du flou qui régnait jusqu'à présent en thermodynamique, et auquel [1] a voulu porter remède.

«Cela n'a pas de sens de parler de la chaleur ou du travail reçu par un sous-système de la part de l'autre». Les définitions ont pourtant tout leur sens, par contre quel sens y a-t-il à distinguer système et sous-système sans définir la distinction ? Un sous-système est aussi un système.

«Par un raccourci assez incorrect, on parle du travail reçu par le fluide». Rien n'est pourtant plus correct.

La critique de la définition de la température à partir de l'Ecm n'est pas valable non plus. Il est possible que l'Ecm d'un système quelconque ne dépende pas que de la température, mais cela ne gêne pas la définition donnée. Il suffit que le paramètre concerné, la pression par exemple, soit identique pour les deux systèmes comparés.

Passons à la compression brusque pour le système à un compartiment. Aucune solution ne peut être qualifiée de juste dans l'absolu, sa validité ne pouvant être jugée que par rapport à l'énoncé, pourvu que celui-ci soit bien conçu, ce qui ne veut pas dire exact, car la réalité est très complexe. Soit d'abord un énoncé indiquant qu'on néglige toute fuite au niveau du piston, tout échange de chaleur, tout gradient de pression à l'intérieur et à l'extérieur, tous les frottemetns (donc en particulier toute cause pouvant arrêter le piston) ; la solution est l'oscillation non amortie indiquée en [1]. Parmi tous les éléments négligés un énoncé peut en sélectionner un seul. Soit donc un énoncé ne négligeant plus le frottement cylindre-piston, qu'on peut modéliser par un type fluide ou solide, et précisant que le gaz ne reçoit toujours aucune chaleur : la solution a encore été indiquée en [1].

Soit maintenant un énoncé négligeant tout sauf les frottements internes du système gazeux dûs à sa viscosité, (mais négligeant les frottements gaz-parois). La réponse partielle, indiquant seulement l'état final et non l'évolution qui y conduit, a été rappelée en [3], c'est celle que l'on attend dans les concours ; elle est exacte, sinon sa démonstration, car on est dans le cas particulier où le travail reçu par le gaz est bien égal à $\int_1^2 -p_e dV$. On ne peut que rejoindre [3] en constatant que cette hypothèse est indispensable à l'énoncé pour la réponse attendue et qu'elle ne figure jamais.

Pour le problème à deux compartiments, la solution de l'énoncé qui néglige toute cause d'amortissement est l'oscillation non amortie, comme indiqué en [1]. Si la cause d'amortissement est le frottement piston-cylindre, la solution a également été ébauchée en [1]. Si la cause d'amortissement est la viscosité des gaz, aucune solution valable n'a été publiée à ce jour dans le B.U.P. La solution partielle présentée en [4] est fausse car elle s'appuie sur un principe n° 4 d'entropie maximum qui n'existe pas, et qui traduit en fait un piston diathermane contraire à l'hypothèse de l'énoncé. Cela a été dit et répété [5], [1], [9]. Il est par contre exact en [4] de se référer au déterminisme pour conclure que le problème a une solution dès lors que toutes les données nécessaires sont présentes ; il faut donc présenter les hypothèses de viscosité et résoudre l'évolution du système conduisant à l'état final car le déterminisme ne dit pas que l'on peut trouver un état final sans passer par l'étude de l'évolution qui y conduit ; il ne dit pas non plus que c'est impossible. On a pu trouver l'état final sans l'évolution dans le cas du frottement fluide cylindre-piston et dans le cas du gaz visqueux avec un seul compartiment. On ne peut pas dans le cas du frottement solide piston-cylindre, et ici on ne peut pas pas non plus.

En [6] les auteurs proposent une autre démarche pour baser la thermodynamique, mais n'ont pas tenté de montrer les erreurs de [1] sur les désaccords. La démarche de [6] est condamnée au départ car elle n'a pas de base microscopique. Or la thermodynamique, c'est bien l'étude statistique des systèmes comprenant un très grand nombre de particules. Il n'est donc pas perçu que les travaux macroscopique et microscopique sont différents et que la chaleur est une forme de travail microscopique.

Les grandeurs K, Ecm et même T sont inconnues. Sans base microscopique, l'énoncé du premier principe est voué à l'échec : on peut voir en effet la définition simultanée de deux grandeurs U et $\varepsilon$ par une seule relation $\varepsilon_M + U = \varepsilon$ , seul $\varepsilon_m$ étant connu à ce stade ; l'aspect statistique indiquant que U est définie par les seuls paramètres macroscopiques, essentiel dans le premier principe, est absent. La définition de Q s'avère tout aussi impossible, ainsi «la chaleur est l'énergie interne reçue du milieu extérieur». Or le système ne reçoit pas d'énergie interne qui est un paramètre d'état, il ne peut recevoir que travail et chaleur ; d'autre part la propriété $Q = \Delta U$ n'est valable, avec des conditions restrictives, que pour un solide. Il est donc exclu de définir ainsi la chaleur. Ce texte confirme par contre la nécessité absolue d'écrire [1].

Une autre critique [7] affirme qu'on ne peut définir l'énergie cinétique ordonnée en ignorant son évolution. L'ordre se définit au contraire à un instant donné par comparaison des individus d'une population à cet instant. Ainsi un défilé militaire est ordonné si les vitesses de chacun sont égales à chaque instant ; il reste ordonné si cette vitesse commune n'est pas constante dans le temps, malgré les fluctuations. On ne peut comme en [7] condamner une démarche qui indique ses justifications d'un laconique «on ne peut pas». Les cases du découpage de [1] ne sont pas nécessairement des systèmes ouverts comme l'indique [7], on voit bien par exemple une case de gaz constituer un système ouvert et une case de solide constituer un système fermé ; cela est sans importance pour l'étude présentée, qui concerne un instant déterminé. Les points M ont effectivement peu d'intérêt car ils dépendent du découpage, ils ne servent que d'étape pour atteindre le champ $\vec{v}_m$, qui lui n'en dépend pas d'après le principe n° (–1) de la thermodynamique posé en [1] ; il n'y a donc pas d'intérêt à évoquer en [7] les fluctuations de ces points M. Un bien mauvais jugement de [7] est de déclarer qu'on se désintéresse de l'évolution d'un système parce qu'on étudie dans un paragraphe donné d'un article plus vaste l'état d'un instant. Rappelons ainsi qu'il est indiqué en [1] et dans ces lignes qu'on ne peut trouver la solution de l'exercice à deux compartiments qu'en suivant l'évolution du système, ce qui est fortement combattu par d'autres critiques. Au demeurant il s'agit de décomposer l'énergie cinétique globale, elle-même définie à un instant donné.

Il est affirmé en [7] que l'énergie cinétique désordonnée peut contenir de l'énergie cinétique ordonnée, car il suffirait d'imaginer des tourbillons ; il suffisait au contraire de bien lire pour voir que la définition est générale, y compris en cas de tourbillons. Il est très mal venu d'indiquer que c'est ici ce qu'il y a de pire en [1], mais qu'est-ce qui est pire en [1], mais qu'est-ce qui est pire en [7], le manque de fondement de cette remarque ou le fait de vouloir remplacer le centre d'inertie par un hypothétique centre géométrique pour appliquer le théorème de Koenig ? Le centre d'inertie est toujours bien connu, mais qu'est-ce qu'un centre géométrique pour une case de forme et de composition quelconques ? Et quel est l'énoncé du théorème de Koenig ?

Rappelons les succès de la définition de $\delta W$ par moyennes spatiales : 0 pour la réaction sur un solide qui roule sans glisser, $\vec{B} \bullet d\vec{M}$ $\delta V$,$-pdV$,$UIdt$. Il est indiqué en [7] que les moyennes temporelles sont préférables, mais il faudrait pour appuyer cette assertion présenter les mêmes résultats par cette méthode, puis présenter un exemple où les moyennes temporelles donnent un résultat meilleur. M. Grandjean, de Dijon, s'étonne que la chaleur soit microscopiquement du travail et enseigne que la chaleur est une fonction d'état confondue avec l'Ecm. Les questions posées ne concernent pas les innovations de [1], mais des points normalement bien connus et son ton discourtois n'engage pas à y répondre.

Bien que ces différentes critiques n'aient en rien affecté l'édifice construit en [1] et [2], cela ne signifie pas qu'aucune retouche n'était possible. Ainsi un lapsus doit être corrigé en page 1497 dans le a) où il faut lire :

$$\Delta (U + K) = \Delta U_1 + \Delta K_1 + \Delta U_2 + \Delta K_2 = Q_1 + Q_2 = 0$$

G. HATAB a signalé que l'énergie interne doit comporter éventuellement un terme représentant l'énergie propre des particules.

Entre autres remarques pertinentes, J. SORNETTE a indiqué que la formule $W = -\int p_e dV$ était valable sous conditions entre états de vitesse nulle du piston. Il a montré également qu'en tenant compte de l'onde stationnaire dans le cylindre de l'exercice à un compartiment on aboutit à une condition plus restrictive (mais vérifiée sur l'exemple) que celle indiquée en [1] pour justifier l'équibarisme.

Je les en remercie vivement, ainsi que M. SERRERO pour sa critique attentive.

## BIBLIOGRAPHIE

[1] G. Lavertu, Les bases de la thermodynamique, B.U.P. n° 719.

[2] G. Lavertu, Mise au point sur les bases de la thermodynamique, B.U.P. n° 725.

[3] J.P. Barrat, Remarques sur les bases de la thermodynamique, B.U.P. n° 724.

[4] J.P. Barrat, Sur un problème (élémentaire ?) de thermodynamique, B.U.P. n° 662.

[5] J. Jacquesson, Objections, B.U.P. n° 685.

[6] J.M. Mercier, G. Zanchi, J.P. Pérez, Énergie mécanique, énergie interne et premier principe de la thermodynamique, B.U.P. n° 724.

[7] H. Bacry, En lisant le B.U.P., B.U.P. n° 727.

[8] D. Grandjean, Remarques sur la thermodynamique. Vices et vertus de la thermodynamique, B.U.P. n° 728.

[9] J. Dousset, En lisant le B.U.P., B.U.P. n° 729.