

**SUR LA DISTINCTION
TRANSFORMATIONS QUASISTATIQUES /
TRANSFORMATIONS RÉVERSIBLES
en thermodynamique élémentaire**

**M.J. COTTEREAU, professeur
Université de Rouen, URA-CNRS 230
76821 Mont-Saint-Aignan**

Depuis maintenant un certain nombre d'années il est apparu nécessaire, dans l'enseignement de la thermodynamique de base, de faire la distinction entre transformations réversibles et transformations quasi-statiques. L'objet de cette note est de montrer que loin de simplifier la présentation de la thermodynamique à des débutants cette distinction conduit à des ambiguïtés supplémentaires. Nous essaierons de montrer que cette distinction est en fait sans réalité. Afin de convaincre le lecteur je citerai la manière dont le sujet est abordé dans quelques ouvrages de thermodynamique élémentaire (c'est-à-dire destinés aux élèves de 1er cycle universitaire ou de classes préparatoires aux grandes écoles), en particulier parmi les plus récents. Je commencerai par celui de Michel Hulin et al. "Thermodynamique" Dunod 1994 dont l'analyse me permettra de dégager l'essentiel de mon propos.

Les notions transformations quasi-statiques - transformations réversibles sont clairement précisées page 6. Je cite :

"Le système passe d'un état d'équilibre à un autre par une transformation. Au cours des transformations réelles le système est en général hors équilibre (exemple du bloc de métal ci-dessus). La thermodynamique fait usage de transformations "idéalisées". Certaines procèdent très lentement de sorte que le système puisse toujours être très proche d'un état d'équilibre : une telle transformation est dite *quasistatique*. Si, *de plus*, on s'arrange pour que le "reste de l'Univers" - l'extérieur du système - subisse également une évolution quasistatique, la transformation sera dite *réversible* (cf. chapitre 4, § 2). Mais, comme on s'intéresse essentiellement au système, la distinction n'est pas absolument fondamentale. Dans les transformations irréversibles seuls les états initial et final sont des états d'équilibre".

Dans cette présentation la distinction n'apparaît donc pas pour la transformation subie par le système qu'on étudie mais pour la transformation mettant en jeu système + extérieur. Cependant il pousse, très logiquement, la distinction jusqu'à écrire (page 46) que la variation élémentaire d'entropie d'un système est donnée par la relation :

$$\delta Q_{q,s} = T dS \quad (\text{et non } \delta Q_{re,v} = T dS \text{ comme dans la plupart des ouvrages}).$$

Les auteurs précisent d'ailleurs : " $\delta Q_{q,s}$ indique la quantité de chaleur échangée par le système dans une transformation quasi-statique (qui n'a donc point besoin d'être réversible)".

Les auteurs reviennent d'ailleurs sur la distinction quasi-statique - réversible à la page 72 de leur ouvrage en donnant comme exemple pour distinguer les deux notions celui d'un poids (le système) accroché à un fil qui descend lentement sous l'action de la pesanteur soit parce qu'on ralentit la descente par un frein, soit parce que son poids est contrebalancé par un contrepoids accroché à l'autre extrémité d'un fil s'enroulant sur une poulie. Cet exemple est en parfait accord avec leurs définitions de la réversibilité et de la quasi-staticité. Les auteurs cependant insistent sur le caractère ambigu de la distinction pages 73-74. Je cite à nouveau :

Remarque : Nous avons vu qu'il est possible d'évaluer, par (4.1) la variation d'entropie d'un système (S) impliqué dans une transformation, pourvu qu'elle soit quasistatique, et même si elle n'est pas réversible. Ce type a l'avantage d'être rapide, et de centrer l'attention sur le seul système (S), auquel on s'intéresse ; il présente le danger de suggérer parfois des réponses fallacieuses, en faisant perdre de vue l'irréversibilité fondamentale de certains processus qui ne sont que quasistatiques (analogues à la chute très lente d'une masse obtenue par freinage) : comme on se refuse à analyser les causes d'irréversibilité (les forces de frottement dans notre analogie mécanique) on peut avoir tendance à les oublier.

Si l'on craint de tomber dans ce type de piège, il reste toujours possible de remplacer une transformation quasistatique quelconque par une transformation réversible. Il suffit pour cela de se doter (sur le papier !) de toute une série de thermostats ou de réservoirs divers de telle sorte que l'entropie du système global () = (système (S) + réservoirs) demeure invariante. Ce type d'analyse est naturellement plus lourd, mais il est plus sûr et permet de suivre avec précision les transferts d'entropie entre le système "intéressant", (S), et son environnement. Ces avantages justifient le très fréquent recours aux transformations réversibles des raisonnements de la thermodynamique : la suite de ce chapitre en donnera de multiples exemples".

La position de ces auteurs n'est donc pas très éloignée de la mienne. Il me semble cependant que le danger de conserver la distinction réside dans le fait que l'adjectif réversible qualifie la transformation dans son ensemble et l'adjectif quasi-statique uniquement le système étudié. Or tous les autres adjectifs utilisés pour qualifier une transformation (isobare, isotherme...) s'adressent toujours à la transformation subie par le système. Pourquoi diable l'adjectif réversible ferait-il exception ? Du point de vue de l'enseignant il me semble que la définition claire du système étudié et de son extérieur est l'une des notions fondamentales à inculquer, le mélange entre les propriétés de l'un et de l'autre est dangereux.

Dans un ouvrage antérieur cosigné également par M. Hulin [Jean-Pierre Maury, Michel Hulin, "Thermodynamique les deux principes", Armand Colin collection U, 1986] la difficulté de la distinction avait d'ailleurs conduit les auteurs à une complication encore plus grande. Il est fait distinction entre systèmes simples et systèmes quelconques ce qui amène (page 105) aux résultats, je cite :

"Pour un processus réversible d'un système quelconque

$$\delta Q_{rev} = TdS$$

Pour un processus quasi-statique d'un système simple

$$\delta Q_{qs} = TdS$$

Pour les systèmes simples transformations quasi-statiques et réversibles sont identiques".

La distinction entre réversibilité et quasistaticité présentée dans cette analyse concerne donc les systèmes possédant des contraintes internes et il est nécessaire d'évaluer la réversibilité ou l'irréversibilité de la levée de ces contraintes internes. Une analyse détaillée de sous-systèmes adéquats simples et des contraintes permet là encore d'éviter la distinction.

Examinons maintenant d'autres ouvrages. Le problème est exposé comme suit par Claire Lhuillier Jean Rous dans "Introduction à la Thermodynamique" Dunod 1992 (page 118)

:

Définition : nous avons défini au chapitre 5, § I.5, les transformations quasi-statiques comme des transformations que l'on peut assimiler à une succession d'états d'équilibre.

En ce sens la détente de Joule (détente dans le vide) si elle est suffisamment lente pourrait être assimilée à une transformation quasi-statique. Nous allons maintenant introduire un nouveau critère, celui de réversibilité : une transformation quasi-statique est réversible si on peut la décrire dans un sens ou dans l'autre en changeant le signe de la cause extérieure infiniment petite qui pilote son évolution.

Par exemple une détente isotherme ou adiabatique quasi-statique est réversible (on peut la transformer en compression) ; par contre la détente de Joule n'est pas réversible (on ne peut pas faire rentrer les molécules dans le compartiment où elles étaient initialement par inversion des conditions extérieures).

Là il me semble que la distinction entre le système étudié et l'extérieur n'étant pas clairement faite cela conduit à une erreur. Si l'on dit : le système étudié est le gaz restant dans la bouteille lorsqu'on arrête le processus il est alors peut-être possible de considérer la transformation pour ce système comme réversible si elle est suffisamment lente. Pour l'ensemble des molécules de gaz présentes dans la bouteille au début de la détente la transformation n'est pas, bien sûr, une succession d'états d'équilibre !

Dans un ouvrage plus ancien (L. Couture et al, Thermodynamique classique et propriétés de la matière" Dunod Université 1980) la distinction entre réversibilité et quasi-staticité réside également dans le choix de ce que qualifie le mot réversible : (page 14)

"Une transformation sera dite réversible si elle est quasistatique et si, de plus il existe une transformation permettant de ramener le système et le milieu extérieur (l'univers) à leurs états initiaux. Une transformation quasistatique peut ne pas être réversible. Ainsi, le passage d'un courant électrique dans une résistance peut être rendu quasistatique ; cependant la chaleur dégagée par effet Joule ne peut produire de courant. Il en est de même pour toute transformation mettant en jeu des phénomènes dissipatifs : conceptions électrique et thermique, diffusion viscosité, réaction chimique..."

Là aussi l'exemple donné me semble malheureux. Les phénomènes dissipatifs sont effectivement des causes fréquentes, ou même les seules causes d'irréversibilité. C'est dans cette situation qu'il faut bien distinguer état d'équilibre et état stationnaire, l'affirmation que le passage d'un courant électrique dans une résistance peut être rendu quasistatique ne me semble pas évidente ! Si on utilise la résistance pour chauffer un fluide on peut rendre la transformation réversible pour le fluide considéré ; il suffit en effet d'imposer à la température de la résistance d'être à chaque instant très proche de celle du fluide. Par ailleurs on sait rendre réversible le fonctionnement d'une pile si on peut justement négliger l'effet Joule !

Dans l'ouvrage de Pérez et Romulus : "Thermodynamique, fondements et applications, Masson 1993", la difficulté est réglée d'un trait de plume :

L'entropie est définie (page 103) par la relation $\Delta S = S^r + S^p$ donnant la variation d'entropie d'un système fermé comme la somme du terme de productions S^p et du terme

$$S^r = \int \frac{\delta Q}{T}, \text{ selon la présentation de Priogogine.}$$

L'égalité $S^p = 0$ correspond à des transformations limites dites réversibles.

Poursuivant cette manière élégante de présentation, l'équilibre thermodynamique, si difficile à définir par des considérations "terre à terre", est défini par (page 107) : "un système est en équilibre thermodynamique lorsqu'il est stationnaire et que sa production d'entropie est nulle". Les auteurs font la remarque suivante :

"Dans beaucoup d'exposés traditionnels, on introduit d'abord le concept d'équilibre thermodynamique, sans référence à une production d'entropie nulle, puis celui d'une succession de tels états que l'on qualifie d'évolution quasistatique. Dans notre présentation, une telle évolution est réversible, ce qui rend superflu le mot quasistatique".

Cette remarque qui devrait me satisfaire ne me satisfait cependant pas. En effet lorsqu'on enseigne la thermodynamique à des débutants le problème se pose dans l'autre sens. A partir de la description des modes opératoires mis en jeu il s'agit de déterminer si le système subit une transformation réversible (ou proche de cette transformation) et donc si la création d'entropie est nulle.

CONCLUSION

Il me semble avoir montré que dans tous les ouvrages cités la distinction entre réversibilité et quasi-staticité ne concerne pas en réalité le système étudié mais l'ensemble système + extérieur. Cette logique poursuivie jusqu'au bout amène à écrire :

$dS = \frac{\delta Q_{q.s}}{T}$ et non $\frac{\delta Q_{rev}}{T}$ ce qui m'apparaît comme dangereux. Plus fondamentalement le fait d'attribuer la qualité "réversible" à l'ensemble de la transformation, et non pas à la transformation subie par le système seul, me semble en contradiction avec la pratique habituelle de la thermodynamique. On distingue bien le système de son extérieur.

Il me semble bien plus important de bien montrer qu'une transformation subie par un système ne peut être une succession d'états d'équilibre que si à la fois l'équilibre mécanique et l'équilibre thermique sont peu perturbés dans la transformation idéalisée. Dans ces conditions il est toujours possible de montrer que par un choix convenable de l'extérieur une modification infinitésimale judicieuse des contraintes extérieures permet d'inverser le sens de la transformation. Cette propriété permet bien souvent de définir le caractère irréversible de la transformation sans examen minutieux des causes d'irréversibilité.

Je suis tout à fait conscient que je ne propose pas, pour autant, une présentation bien définie des bases de la thermodynamique qui font appel à ces notions de réversibilité. Il reste toujours difficile de définir, sans pétition de principes, ce qu'est un état d'équilibre (stationnarité des variables d'états, les variables étant elles-même définies à l'équilibre) et donc une succession d'états d'équilibre. Quand faut-il introduire la notion d'équilibre thermodynamique local ? Comment faut-il introduire l'entropie ? Appel à une présentation axiomatique du 2^o principe ou démarche historique par l'analyse des cycles mono et dithermes ?

Enfin, en tant qu'enseignant, je suis obligé de constater que je ne peux me permettre d'éviter l'emploi du mot quasi-statique qui apparaît dans les programmes et les textes d'épreuves de concours, par exemple. Mon embarras est donc grand, n'en percevant pas la pertinence et donc l'utilité.

Remerciements :

Cette note doit beaucoup aux nombreuses discussions tenues avec mes collègues de l'Université de Rouen, Pierre Valentin, Claude Thénard et Bruno Chéron, sur la manière d'enseigner la thermodynamique.

Je suis particulièrement reconnaissant à Pierre Valentin qui m'a donné le goût de l'enseignement de cette discipline.