



Approches historique et didactique de la réversibilité

Historical and didactical approaches of reversibility

Martine MÉHEUT

IUFM de l'académie de Créteil
Laboratoire de didactique des sciences physiques, université Paris 7
Case 7086, 2, place Jussieu, 75251 Paris cedex 05, France.

Chantal DUPREZ

Université Lille 2

Isabelle KERMEN

Université d'Artois

Résumé

Nous analysons différentes facettes de la notion de réversibilité en relation avec l'histoire du second principe de la thermodynamique. Ceci nous permet de caractériser les approches développées dans les ouvrages d'enseignement de premier cycle universitaire. Nous étudions enfin, par des entretiens et des questionnaires, les représentations d'étudiants de niveau « licence » à ce sujet.

Mots clés : thermodynamique, réversibilité, histoire, manuels, étudiants.

Abstract

We propose an analysis of the notion of reversibility, in relation with the historical development of the second law of thermodynamics. Then we characterize pedagogical approaches of this notion as presented in first years university books. Interviews and questionnaires allow us to describe representations developed by bachelors of physics.

Key words : thermodynamics, reversibility, history, books, students.

1. PROBLÉMATIQUE

Le travail présenté ici se situe dans une perspective de développement de situations d'enseignement-apprentissage de la thermodynamique dans les premières années de l'enseignement universitaire. Nous nous intéressons plus particulièrement à la notion de réversibilité/irréversibilité d'une transformation, dont l'émergence est très liée à celle du second principe, qui « *fait la force du second principe* » (Planck, 1903, p. 84), dont « *l'assimilation constitue en fait la clef de la Thermodynamique – et de son utilisation pratique* » (Fer, 1970, p. 68).

Quelques travaux (Kesidou & Duit, 1993 ; Ben Zvi, 1999) proposent, pour des élèves de 15-16 ans, une première approche du second principe en termes de transformation et de dégradation de « l'énergie », ce terme désignant aussi bien des transferts d'énergie que l'énergie à proprement parler. Cette approche fait intervenir des notions faiblement définies telles que la qualité de « l'énergie » et le caractère naturel/artificiel, spontané/forcé, des transformations.

Au niveau universitaire, différentes approches du second principe ont été suggérées (Fuchs, 1987 ; Marcella, 1992 ; Baierlein, 1994 ; Thomsen & Bers, 1996 ; Leff, 1996). Ces suggestions ne sont pas argumentées par rapport aux difficultés et possibilités cognitives des étudiants, encore peu connues, et n'ont pas, semble-t-il, fait l'objet d'expérimentations contrôlées.

Les quelques études concernant les raisonnements des étudiants à ce sujet montrent que là où plusieurs éléments doivent intervenir dans le raisonnement, les étudiants ont tendance à se centrer sur un objet unique, à ne raisonner que sur une variable à la fois (Rozier & Viennot, 1991). Ils privilégient dans les raisonnements les variables les plus accessibles au sens commun. Ainsi, par exemple, les élèves ne retiennent-ils de l'entropie que ce qui se rattache aux variables spatiales (Gréa & Viard, 1994).

Que l'on se place dans le cadre de l'ingénierie didactique (Artigue, 1988) ou dans la perspective présentée par Kattmann *et al.* (1995) sous le terme de « *reconstruction didactique* », l'analyse des savoirs en jeu et des formes de pensée disponibles chez les étudiants constituent des étapes préalables à l'élaboration de contenus et de situations d'apprentissage. Nous reviendrons donc sur quelques étapes de la genèse historique de cette notion. Nous verrons ensuite comment elle est présentée dans des ouvrages de premier cycle universitaire. Nous analyserons enfin, par des entretiens et des questionnaires, quels types de raisonnement développent les étudiants pour répondre à des questions concernant la réversibilité d'une transformation.

Ces analyses ne sont pas totalement indépendantes. Certaines « erreurs » des étudiants ont en effet attiré notre attention sur l'une ou l'autre « *facette* » (Minstrell, 1992) de cette notion de réversibilité, ce qui nous a sug-

géré des directions d'analyse des manuels. Le retour aux textes historiques nous a conduites à pointer des « manques » dans les manuels, qui pourraient contribuer aux difficultés rencontrées par les étudiants et nous suggérer des directions de « reconstruction didactique ».

Il ne s'agit pas ici d'étudier des « conceptions du sens commun » ou « raisonnements spontanés » à propos de tel ou tel phénomène physique, mais plutôt de repérer, à travers les raisonnements des étudiants, résultant des enseignements habituels, les difficultés, les obstacles possibles à l'acquisition et au bon usage de cette notion. Comme bien souvent dans ce type d'études, il s'agit, dans un premier temps, de repérer des difficultés, des erreurs, qui perdurent après enseignement et de chercher à comprendre ce qui, dans ces « erreurs », peut être dû à l'enseignement et ce qui peut être attribué à des manières de penser préexistant à l'enseignement. Les résultats ainsi obtenus nous serviront ultérieurement pour analyser différentes approches de cette notion (Fuchs, 1987 ; Marcella, 1992 ; Baierlein, 1994 ; Thomsen & Bers, 1996 ; Leff, 1996), et en élaborer de nouvelles, argumentées non seulement en termes de contenu (« facettes » du concept mises en jeu), mais aussi par rapport aux possibilités et difficultés cognitives des élèves.

2. QUELQUES FACETTES DE LA NOTION DE RÉVERSIBILITÉ/IRRÉVERSIBILITÉ

Il ne s'agit pas ici de refaire une histoire de la thermodynamique, ou plus particulièrement du second principe. Il s'agit plutôt, en nous appuyant sur de tels travaux (Brunhes, 1909 ; Brush, 1976 ; Guedj, 2000 ; Pourprix, 2003) de dégager quelques repères utiles pour l'analyse de l'enseignement de ces notions et des raisonnements des étudiants.

Si le terme de « réversibilité » a été introduit par Thomson (Brush, 1976), cette notion est déjà présente dans les travaux de Carnot (1824), lorsqu'il associe l'optimisation de la « puissance motrice » obtenue au cours d'un cycle à la possibilité d'inverser les différentes opérations constituant ce cycle. Elle acquiert différentes facettes au cours de l'élaboration des deux principes de la thermodynamique. L'une de ces facettes est liée à des essais de caractérisation de transformations de l'énergie en termes de « dégradation » ou de « dissipation », en parallèle avec l'élaboration du premier principe de la thermodynamique. Une autre « facette » de cette notion concerne les évolutions des systèmes associées à ces transformations d'énergie ; la notion d'entropie et le second principe de la thermodynamique constituent des étapes essentielles dans le développement de cette approche. Ces deux approches apparaissent descriptives, que la description concerne des transformations d'énergie ou les évolutions des systèmes concomitantes. La recherche des

causes d'irréversibilité est présente dès les débuts mais il faut attendre le développement de la thermodynamique des phénomènes irréversibles pour voir se formaliser et s'opérationnaliser la prise en compte des causes d'irréversibilité.

Nous présentons par la suite quelques étapes du développement de cette notion, en situant les différentes contributions par rapport aux grandes lignes évoquées dans le paragraphe précédent (figure 1). Dans cette schématisation, nous voulons montrer que l'analyse des causes d'irréversibilité peut constituer un dénominateur commun aux trois points de vue, la dégradation de l'énergie, l'irréversibilité des évolutions des systèmes, la création d'entropie, pouvant s'expliquer par l'existence, la nature, l'importance des phénomènes dissipatifs et les inhomogénéités de grandeurs intensives.

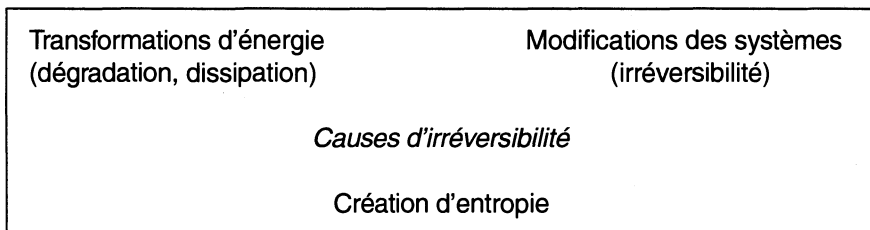


Figure 1 • Différentes « facettes » de la notion d'irréversibilité

2.1. Réversibilité et second principe de la thermodynamique

► CARNOT : optimiser la production de travail à partir de chaleur

Carnot (1824) s'intéresse à « *la question de savoir si la puissance motrice de la chaleur est limitée* » (Carnot, 1824, p. 6), à la valeur de cette limite et aux conditions dans lesquelles cette puissance motrice maximale peut être obtenue « *pour une quantité de calorique donnée, la différence des températures étant également donnée* » (Carnot, 1824, p. 14). Il n'est pas encore question de transformation de chaleur en travail, mais de production de puissance motrice à partir de chaleur ; comme indiqué par M. Guedj : « *Le travail et la chaleur sont considérés comme entretenant des relations du type "cause à effet", pour lesquelles toute transformation de travail en chaleur ou de chaleur en travail est exclue.* » (Guedj, 2000, p. 43).

Les facteurs évoqués par Carnot comme susceptibles de limiter la puissance motrice sont essentiellement les discontinuités de température : « *Cette condition se trouvera remplie si, comme nous l'avons remarqué plus haut, il ne se fait dans les corps aucun changement de température qui ne soit dû à un changement de volume, ou, ce qui est la même chose autrement*

exprimée, s'il n'y a jamais de contact entre des corps de températures sensiblement différentes. » (Carnot, 1824, p. 38).

Il associe cette optimisation de la puissance motrice à la possibilité d'effectuer les mêmes opérations en sens inverse : « *Toutes les opérations ci-dessus décrites peuvent être exécutées dans un sens et dans un ordre inverses.* » (Carnot, 1824, p. 35).

► THOMSON & TAIT : dissipation et dégradation de l'énergie

La contribution de Thomson & Tait (1852) participe très fortement du mouvement « énergétiste », qui constitue l'énergie comme grandeur fondamentale de la physique, et sa conservation comme principe. La question de l'irréversibilité apparaît ici très liée à celle de la dissipation (non-conservation) de l'énergie mécanique, ou de la dégradation (perte de qualité) de l'énergie, qui se conserve : « *La réponse apportée par Thomson à l'incompréhension de la transformation de chaleur en travail réside entièrement dans l'utilisation du terme "wasted", à la place de "annihilated". Ainsi, lors du fonctionnement des machines, de l'effet mécanique n'est pas perdu comme le pense Carnot, il est gaspillé, il devient inutile, impropre au fonctionnement d'une machine* » (Guedj, 2000, p. 170).

Si ces considérations semblent avoir permis à Thomson & Tait de concilier l'idée de « perte » d'effet mécanique avec la conservation de l'énergie, elles n'ont guère connu de développement opératoire. Il nous semble par ailleurs percevoir certaines ambiguïtés dans l'utilisation de ces notions. Ainsi la notion de « dissipation » apparaît-elle initialement appliquée à l'énergie mécanique, elle est ailleurs appliquée de manière plus générale à l'énergie. Dégradation et dissipation sont alors utilisées sans qu'une distinction claire ne soit faite dans l'usage de ces deux termes.

Ce point de vue a donné lieu à des essais de classification de différentes formes d'énergie, « *hautes* » et « *basses* » (Lodge, 1879, cité par Pourprix, 2003, p. 148), « *supérieures* » et « *inférieures* » (Brunhes, 1909). Notons que si la catégorisation de Lodge concerne uniquement les formes de transferts d'énergie, celle de Brunhes porte à la fois sur des formes d'énergie et des formes de transfert, la lumière et chaleur étant considérées par Brunhes comme des formes d'énergie inférieures, l'énergie mécanique, l'énergie potentielle élastique, électrique, chimique étant considérées comme des formes supérieures d'énergie. À cette hiérarchisation des formes d'énergie est associée une catégorisation des transformations en « *naturelles* » et « *artificielles* » ; il faut y ajouter les transformations « *indifférentes* » entre formes d'énergie supérieures (Brunhes, 1909).

Si cette approche en termes de qualité, de dissipation, dégradation, d'énergie, a pu, et peut encore s'avérer utile, pour accepter la conservation de l'énergie malgré son apparente « usure », et si elle a pu apparaître comme

une alternative possible à l'utilisation de la grandeur entropie, jugée « *bien délicate* » (Brunhes, 1909, p. 241), elle ne semble guère avoir ouvert de perspectives fructueuses.

► CLAUDIUS

Les contributions de Clausius (1868) apparaissent multiples : forte distinction entre transformations de l'énergie et modifications des systèmes, interprétation « microscopique » de l'énergie, introduction d'une nouvelle fonction d'état : l'entropie.

Clausius s'intéresse également aux transformations de l'énergie, principalement la transformation de chaleur en travail, et l'inverse. Les modifications de l'Univers associées à cette transformation d'énergie sont évoquées sous les termes de « *changement* » ou de « *modification* ». Ainsi, une transformation d'énergie peut être, ou non, compensée ; les changements ou modifications des systèmes pouvant être réversibles ou non. Il évoque différents phénomènes qui peuvent donner lieu à des transformations d'énergie non compensées : conceptions thermique et électrique. En ce qui concerne l'irréversibilité mécanique, deux aspects sont évoqués, de manière indépendante : les frottements d'une part, les déséquilibres mécaniques d'autre part.

« Les phénomènes qui peuvent donner lieu à des transformations non compensées sont, sinon dans leur essence, au moins dans leur apparence extérieure, d'espèces assez différentes. L'un des plus ordinaires est la transmission de la chaleur par simple conductibilité, qui a lieu au contact de deux corps de températures différentes. Nous mentionnerons en outre la production de chaleur par le frottement, ou par un courant électrique qui doit surmonter la résistance du conducteur, et les phénomènes dans lesquels une force qui effectue un travail n'a pas à vaincre une résistance qui lui soit égale, et produit par suite un mouvement très rapide, perceptible extérieurement, et dont la force vive se transforme en chaleur. » (Clausius, 1868, p. 158).

Un peu plus loin, il revient sur les conditions de la réversibilité, mécanique et thermique, en mettant l'accent sur les discontinuités de température et les déséquilibres mécaniques ; ceci l'amène à situer la réversibilité comme une limite théorique inatteignable : « *Si le changement a lieu de telle sorte que la force et la résistance soient égales, il pourra avoir lieu en sens inverse sous l'action des mêmes forces. Mais si un changement a lieu de telle sorte que la force l'emporte sur la résistance, il ne pourra pas s'effectuer en sens inverse sous l'influence des mêmes forces. Dans le premier cas, nous disons que le changement a lieu d'une manière réversible, dans le second qu'il a lieu d'une manière non réversible. À la rigueur la puissance doit toujours l'emporter sur la résistance ; mais comme l'excès ne doit pas avoir une grandeur déterminée, on peut s'imaginer qu'il devienne de plus en plus petit, de sorte qu'il s'approche autant que l'on voudra de zéro. On voit par là que le cas où*

la modification est réversible est une limite que l'on ne peut pas atteindre complètement, mais dont on peut s'approcher autant que l'on voudra. On peut donc, dans des conditions théoriques, parler de ce cas comme s'il était en effet réalisable, et il joue, comme limite même, un rôle important dans la théorie. » (Clausius, 1868, pp. 262-263).

L'introduction de l'entropie, et, auparavant, de la « valeur d'équivalence » d'une transformation, ouvre la porte à une approche quantitative de l'irréversibilité. Il s'agit de traduire de manière quantitative la « compensation » des transformations d'énergie dans un cycle réversible. Clausius définit la « valeur d'équivalence » d'une transformation de travail en chaleur, et inversement d'une transformation de chaleur en travail « [...] *la production de la quantité de chaleur Q à la température t au moyen de travail aura la valeur d'équivalence Q/T et le passage de la quantité de chaleur Q de la température t₁ à la température t₂ aura la valeur d'équivalence Q (1/T₁ - 1/T₂)* » (Clausius, 1868, p. 148).

En étudiant des cycles réversibles, puis non réversibles, il arrive à ce qui constitue un premier énoncé du second principe « *la somme algébrique de toutes les transformations qui se présentent dans un cycle fermé ne peut être que positive ; à la limite elle peut être nulle. [...] pour tout cycle fermé réversible on aura l'équation $\int \frac{\delta Q}{T} = 0$, et en général pour tout cycle fermé possible la relation $\int \frac{\delta Q}{T} \geq 0$.* » (Clausius, 1868, p. 256).

La « chaleur » est très présente dans ces raisonnements, « chaleur » qui peut exister sous différentes formes, et se transformer. On trouve ainsi la « *quantité de chaleur reçue par le gaz* », la « *chaleur libre* » ou « *chaleur réellement existante dans le corps* » (énergie interne cinétique), la « *chaleur consommée par le travail intérieur* » (variation de l'énergie interne potentielle) et enfin la « *chaleur consommée par le travail extérieur* ».

C'est en raisonnant sur le « travail intérieur » et donc sur l'arrangement des molécules que Clausius introduit de manière d'abord qualitative, le degré de division d'un système, qu'il propose ensuite de caractériser par une grandeur mathématique, la disgrégation, qui est la « *valeur de transformation de l'arrangement actuel des particules du corps* » (composante spatiale de l'entropie).

Il définit par ailleurs « *la valeur de transformation de la chaleur du corps comptée à partir d'un état initial donné* » (composante cinétique de l'entropie).

L'entropie, ou « contenu de transformation du corps », apparaît comme la somme de ces deux termes.

Dans le cas d'une transformation non réversible, la valeur d'équivalence de la transformation non compensée peut s'écrire $N = S - S_0 - \int \frac{\delta Q}{T}$.

La variation d'entropie $S-S_0$ apparaît donc comme la somme de deux termes, un terme $\int \frac{\delta Q}{T}$ lié à l'échange de chaleur (entropie échangée), et un terme N toujours positif (entropie créée).

► DUHEM : la formalisation « cinématique » de la réversibilité et les débuts de la thermodynamique des phénomènes irréversibles

Nous trouvons dans les travaux de Duhem (1911) deux types de contributions à la notion de réversibilité. L'une concerne la formalisation de la notion de réversibilité, propriété de l'évolution d'un système. L'autre marque la prise en compte des phénomènes, causes d'irréversibilité, elle concerne le calcul de la création d'entropie associée à des phénomènes de conduction de la chaleur, de conduction de l'électricité.

S'appuyant sur une description d'une modification d'un système comme une suite d'états de ce système, Duhem définit une « *modification réelle variable d'une manière continue* » dont la limite peut être une suite continue d'états d'équilibre ; sans doute peut-on voir là l'origine de la notion de transformation quasi-statique : « *Une modification réelle, variable d'une manière continue suivant une certaine loi, peut avoir pour forme limite une suite continue d'états d'équilibre du système.* » (Duhem, 1911, p. 308)

Ceci lui permet alors de définir une modification réversible (p. 311).

Il discute alors la différence entre « *suite continue d'états d'équilibre* » et « *modification réversible* » d'un système, montrant que ces deux notions ne sont pas équivalentes pour des systèmes « *affectés de frottement ou d'hystérésis* » (Duhem, 1911, p. 316), frottement et hystérésis étant pris ici au sens large et incluant les phénomènes de déformation permanente (inélasticité par exemple) et l'existence d'états métastables (faux équilibres).

Notons la distinction entre transformations réelles et transformations limites, les notions de « *suite continue d'états d'équilibre* » et de « *modification réversible* » ne s'appliquant qu'à des transformations fictives.

2.2. Au-delà du second principe : premiers pas de la thermodynamique des phénomènes irréversibles

Les travaux de Duhem relatifs à la production d'entropie liée à des phénomènes de transport (Duhem, 1911), ceux de Gibbs (1899) et De Donder & Van Rysselberghe (1936) concernant la création d'entropie au cours de réactions chimiques, ont conduit à exprimer la production d'entropie liée à des processus irréversibles « *comme une somme de produits de forces généralisées (ou affinités) par les vitesses correspondantes (ou « flux »*

généralisés) des processus irréversibles » (Prigogine, 1968, p. 43), les « forces » pouvant être considérées comme les causes des flux traduisant les phénomènes irréversibles. Ces grandeurs, flux et forces, sont des grandeurs phénoménologiques, non déductibles d'une théorie générale, et ne sont pas définies de manière univoque. En l'absence de réaction chimique, les forces sont fonction des dérivées spatiales des champs de grandeurs intensives (température dans le cas de la conduction thermique, tension électrique dans le cas de la conduction électrique, pression, densité de particules dans le cas de la diffusion, vitesses pour la viscosité). Dans le cas par exemple de la production d'entropie associée à la conduction de la chaleur, on prend en général comme « force » le gradient de température, qui peut être considéré comme la cause du « flux » de chaleur. Dans le cas d'une réaction chimique, la « force » est $\frac{A}{T}$ (A : affinité chimique), le « flux » est la vitesse de réaction.

Notons que si le système n'est le siège d'aucun phénomène « dissipatif » par rapport à la perturbation qui lui est imposée, il ne peut revenir à l'équilibre et oscillera indéfiniment (pendule sans frottement, boucle supraconductrice, par exemple). Si l'expression du flux en fonction du gradient ne comporte pas de terme constant, on peut réduire l'entropie créée et la faire tendre vers zéro en « décomposant » la transformation en transformations élémentaires (transformation quasi-statique) ; si l'expression du flux en fonction du gradient comporte un terme constant, il s'agit d'un phénomène « à seuil » (frottement solide par exemple), on ne peut réduire l'entropie créée autant que l'on veut, on ne peut « tendre vers » la réversibilité (Latour, 1997).

Notons également que cette approche des phénomènes irréversibles suppose que les grandeurs évoquées puissent être définies au cours de la transformation, au moins localement.

2.3. Pour conclure

On voit donc, à partir des premières réflexions de Carnot sur l'optimisation de la « *puissance motrice du feu* », se différencier progressivement plusieurs points de vue :

- un point de vue en termes de transformation d'énergie, qui conduit aux idées de qualité d'énergie, de dissipation, et de dégradation ;
- un point de vue « cinématique », qui s'intéresse à la caractérisation des évolutions des systèmes et conduit à définir précisément les transformations limites « suites continues d'états d'équilibre » et les transformations réversibles ;
- une approche en termes de production d'entropie, qui conduit à prendre en compte les « causes » de l'irréversibilité : forces généralisées (affinité chimique d'un système, gradients des grandeurs intensives) d'une part, processus dissipatifs d'autre part (diffusion, conduction électrique, thermique,

frottements, viscosité, réactions chimiques, etc.) et à une formalisation mathématique des « effets » de ces différentes causes d'irréversibilité.

De ces différents points de vue, nous allons voir lesquels sont privilégiés dans les ouvrages de premier cycle de l'enseignement supérieur actuel en France.

3. LA RÉVERSIBILITÉ DANS LES MANUELS D'ENSEIGNEMENT

Nous avons étudié des manuels récents (parus depuis moins de dix ans) concernant l'enseignement de la thermodynamique physique en DEUG et classes préparatoires scientifiques (première et deuxième année de l'enseignement supérieur) sachant que la plupart de ces ouvrages s'adresse indifféremment à ces deux populations d'étudiants.

Nous avons repéré la première apparition des termes réversible/irréversible, les définitions qui en étaient données et cherché à les situer par rapport aux différentes facettes de cette notion présentées par la figure 1.

Nous avons constaté que l'approche « cinématique » occupe une place importante, et est en général utilisée pour introduire, et définir, la notion de réversibilité ; l'énoncé du second principe, qui établit un lien entre réversibilité et variation d'entropie, vient plus tard. La recherche des « causes d'irréversibilité » est inégalement développée.

3. 1. Points de vue « cinématiques »

Parmi les quatorze ouvrages analysés, sept donnent une place importante à la notion de transformation quasi-statique, le caractère quasi-statique étant une condition nécessaire (non suffisante) pour qu'une transformation soit réversible. Pour qu'une transformation quasi-statique soit réversible, il faut y ajouter d'autres conditions, dont l'expression diffère légèrement selon les auteurs :

- « *Lorsque l'évolution est quasi-statique, il est parfois possible a priori de revenir de l'état final à l'état initial par les mêmes étapes intermédiaires : une telle évolution quasi-statique est alors réversible* » (Faverjon, 2003, p.72) ;
- « *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* » (Lhuillier & Rous, 1998, p. 118).

Les autres ouvrages ne font pas usage de la notion de transformation quasi-statique pour définir la réversibilité. Ainsi trois ouvrages définissent-ils une transformation réversible comme une suite continue d'états d'équilibre thermodynamique :

- « *C'est une transformation qui se fait par une suite continue d'états d'équilibre, la condition d'équilibre concernant aussi bien le système étudié que le milieu extérieur avec lequel il interagit* » (Faroux & Renault, 1997, p. 15) ;
- « *Transformation réversible : qui passe par une succession d'un nombre infini d'états d'équilibre avec l'extérieur* » (Le Rille, 2001, p. 3).

La définition proposée par Brébec (1996) renvoie aux équations d'évolution du système : « *Les transformations réelles spontanées d'un système isolé ont un sens d'évolution qui correspond au sens d'écoulement du temps. Leurs équations d'évolution ne sont pas invariantes par changement de ce sens d'écoulement.*

De telles transformations sont dites irréversibles.

Lorsque les équations sont invariantes par changement du sens d'écoulement du temps, les évolutions correspondantes sont dites réversibles. » (Brébec, 1996, p. 149).

Cette définition est reformulée en faisant davantage appel à l'intuition et au sens commun « *le film projeté à l'endroit est identique au film projeté à l'envers* ». (Brébec, 1996, p. 149).

Trois ouvrages s'appuient sur la variation d'entropie pour définir la réversibilité.

3.2. Entropie et second principe

La notion de réversibilité apparaît dans tous les ouvrages dans le chapitre consacré à l'énoncé du second principe, qui est exprimé en termes de variation d'entropie. La formulation du second principe apparaît dans la plupart des ouvrages (11/14) après définition de la réversibilité : « *L'entropie d'un système isolé, évoluant de manière irréversible, croît jusqu'à l'établissement d'un état d'équilibre. Si cette évolution est réversible, l'entropie de ce système reste constante.* » (Brébec, 1996, p. 150).

Dans trois ouvrages, c'est la variation d'entropie qui permet au contraire la caractérisation d'une transformation comme réversible ou irréversible : « *L'égalité $S_c = 0$ correspond à des transformations limites dites réversibles, pour lesquelles le sens de l'écoulement du temps n'a aucune influence* » (Pérez, 2001, p. 104)

3.3. Causes d'irréversibilité

L'idée de gradients, de non-uniformité des grandeurs intensives, peut être considérée comme sous jacente aux notions de transformation quasi-statique et à la distinction entre transformation quasi-statique et transformation réversible (équilibre interne, équilibre du système avec l'extérieur). On retrouve cette même idée dans l'analyse des causes d'irréversibilité qui apparaît dans certains ouvrages.

Cinq ouvrages ne développent pas cette question ; les autres évoquent, de manière plus ou moins structurée, quelques phénomènes dissipatifs, sans discuter la possibilité, ou non, suivant la nature des phénomènes dissipatifs intervenant dans le fonctionnement du système, de réduire l'irréversibilité en réduisant les gradients des grandeurs intensives. Phénomènes dissipatifs et gradients apparaissent comme des facteurs d'irréversibilité indépendants.

« Il existe plusieurs causes d'irréversibilité :

- tout d'abord les frottements d'un système mécanique qui "consomment" de l'énergie mécanique transformée en chaleur,

- ensuite, la non uniformité des grandeurs intensives dans le système, comme la pression pour la détente de Joule ou la température lorsque l'on met en contact deux corps à des températures initialement différentes. » (Lorenceau & Restagno, 2003, p. 45).

3.4. Discussion

Ainsi les manuels privilégient-ils une définition de la réversibilité comme caractérisant l'évolution d'un système. Cette approche, que nous avons appelée « cinématique », peut se révéler difficile à mettre en oeuvre. Comment savoir si l'évolution d'un système est réversible ? Les équations d'évolution du système sont rarement connues. La démarche la plus fréquemment proposée aux étudiants consiste à utiliser la notion de transformation quasi-statique. Mais comment savoir si une transformation peut être considérée comme quasi-statique ? Et comment savoir si une transformation peut être inversée ? Cela demande en fait de connaître les phénomènes dissipatifs susceptibles de se produire au sein du système.

4. REPRÉSENTATIONS DES ÉTUDIANTS

L'analyse des manuels d'enseignement donne à penser que l'enseignement usuel privilégie une approche « cinématique » de la notion de réversibilité, au détriment d'une étude structurée des causes possibles d'irréversibilité. Il nous a semblé intéressant d'étudier les effets de cet enseignement en termes de « représentations » que les étudiants ont pu construire de cette notion de réversibilité. Nous empruntons cette notion de représentation à la psychologie sociale (Schiele, 1976). L'enseignement universitaire fonctionnant à ce jour sur un mode plutôt transmissif que constructiviste, il s'agit d'étudier comment une notion scientifique peut être assimilée par les étudiants, compte tenu des formes de pensée disponibles. Il ne s'agit pas ici d'établir des liens de causalité entre l'usage de tel ou tel ouvrage et un type d'erreur donné, mais plus modestement de repérer des difficultés qui

perdurent après enseignement et de chercher à comprendre ce qui, dans ces « erreurs », peut être mis en relation avec des tendances générales de l'enseignement repérées par l'analyse des manuels et ce qui peut être attribué à des formes de pensée préexistant à l'enseignement.

Ceci apportera des informations utiles à des essais de « reconstruction didactique » concernant l'enseignement de cette notion, en nous permettant d'apprécier les points d'ancrage possibles d'une démarche de construction de cette notion, et le chemin à parcourir.

4.1. Méthodologie de l'étude de représentations

Afin de répondre à ces questions, nous avons d'abord réalisé dix entretiens auprès d'étudiants ayant au moins un niveau licence en physique.

Le protocole d'entretien (annexe 1) comporte une demande de définitions et d'exemples de transformations réversibles ou irréversibles. On demande ensuite aux étudiants de caractériser des transformations présentant des caractéristiques variées, et d'argumenter leurs réponses. En proposant différents types de transformations, on cherche à voir quelles caractéristiques les étudiants prennent en considération pour décider de la réversibilité d'une transformation. Sont proposées :

- deux transformations dans lesquelles un système revient à son état initial, sans que l'environnement n'y revienne (T1 et T3),
- deux transformations dans lesquelles les inhomogénéités de variables intensives (pression ou température) sont faibles (T2 et T4),
- deux transformations dans lesquelles cette inhomogénéité est grande, et les phénomènes dissipatifs importants (T5 et T6).

À partir des résultats obtenus, des questions ont été mises au point et réparties en trois questionnaires. Ces questionnaires ont été proposés à des étudiants préparant un CAPES de physique-chimie dans différents IUFM, avant les « révisions » de thermodynamique. Les résultats obtenus apportent donc des informations sur les difficultés qui persistent après enseignement en DEUG et licence. Ces questionnaires comportaient différentes questions, très proches de celles utilisées dans les entretiens. Nous présenterons ici les résultats de l'analyse des réponses des étudiants à trois de ces questions. Ces questions concernent des transformations dues à des discontinuités de pression :

- un cycle irréversible (retour à l'état initial d'un système sans que l'environnement n'y revienne) (T3),
- une transformation pour laquelle les inhomogénéités de pression sont faibles (T2),
- une transformation dans laquelle les phénomènes dissipatifs sont importants (T6).

4.2. Résultats des entretiens

Il s'agit donc d'étudier les facettes de la notion de réversibilité mobilisées par les étudiants pour caractériser différentes transformations. La méthode d'analyse relève d'une analyse thématique classique (voir par exemple Bardin, 1993 ; Guilbert & Meloche, 1993). Les propos des étudiants sont découpés en « unités de signification », que l'on regroupe ensuite en catégories. Ces catégories résultent de la confrontation des propos des étudiants à l'analyse présentée au §2. Il s'agit en effet d'analyser quelles sont les « facettes » de la notion de réversibilité disponibles chez les étudiants après enseignement de cette notion. Les étudiants privilégient-ils certaines de ces facettes ? Certaines questions les conduisent-ils à mobiliser préférentiellement l'une ou l'autre de ces facettes ? C'est à ces questions que nous essaierons de répondre.

Comme nous le verrons, certaines facettes de la notion de réversibilité sont absentes, ou presque, des réponses des étudiants ; d'autres sont beaucoup plus fréquentes, sous des formes diverses. Nous présentons dans un premier temps les « facettes » de la notion de réversibilité qui émergent de cette analyse, en les situant par rapport à celles issues des analyses déjà présentées. Nous présentons ensuite les profils de réponses des étudiants. Nous discutons enfin les liens entre les questions et les facettes du concept mobilisées.

4.2.1. Les catégories d'analyse des propos des étudiants

4.2.1.1. Les facettes « cinématiques »

En confrontant les propos tenus par les étudiants aux résultats des analyses précédentes, on constate que les étudiants ne raisonnent pas en termes de transformations d'énergie, mais plutôt en termes d'évolution des systèmes ; l'approche « cinématique » est fortement prépondérante (catégories A, B, C, D).

A - Possibilité du retour à l'état initial ou « restaurabilité »

Un argument très fréquemment utilisé (40 occurrences) concerne la possibilité de retour à l'état initial. Il est utilisé par neuf étudiants sur les dix interviewés ; un seul n'y fait jamais appel.

Pour certains étudiants, ce retour à l'état initial doit de plus pouvoir être effectué « sans action extérieure », « sans apport d'énergie » : « *Parce que sinon sans action extérieure on peut pas rétablir une température de vingt degrés et de quatre-vingt degrés* » (E1-T5).

À quoi s'applique cette possibilité du retour à l'état initial ? S'agit-il de l'Univers ou seulement d'une partie, « le système » ? Ce n'est en général

pas précisé : « Une transformation réversible c'est que on part d'un état initial à un état final et on peut revenir de l'état final à l'état initial. » (E4-Def).

Dans certains cas, néanmoins, il est clair qu'il s'agit du retour d'un système à son état initial, sans prise en compte de l'environnement : « À long terme c'est réversible ; le cube va reprendre une température de vingt degrés Celsius. » (E1-T1).

On trouve là une confusion assez répandue chez les étudiants entre cyclique et réversible : « Dans le fonctionnement du piston d'un moteur on a toujours les mêmes états qui reviennent ; pour moi cela veut dire que c'est réversible. » (E1-Def).

Un seul étudiant évoque une modification de la source pour justifier l'irréversibilité : « On pourra plus négliger la différence de température du bain par rapport à la première expérience » (E9-T1)

B - Renversabilité de la transformation

Les arguments en termes de « renversabilité », de possibilité d'inverser la transformation, de retour à l'état initial « par le même chemin » (15 occurrences) apparaissent de manière moins fréquente que les précédents. Huit étudiants sur les dix interviewés y font néanmoins appel, mais de manière plus occasionnelle. Les formulations restent assez vagues :

- « C'est quelque chose qui, s'il le veut, peut revenir en arrière. » (E7-Def) ;
- « On peut faire marche arrière dans l'évolution du système. » (E3-Def).

C - Suite d'états

Nous avons classé ici les arguments dans lesquels il est question de « succession d'états », sans qu'il s'agisse nécessairement d'une définition très précise d'une transformation quasi-statique. Ce type d'arguments (20 occurrences) est utilisé par sept étudiants sur les dix :

- « Il y a une continuité dans les états donc par lesquels passe le système pour aller d'un état 1 à un état 2. » (E3-T2) ;
- « Ça se rapproche plus d'une transformation réversible puisqu'on passe par des états successifs. » (E3-T5) ;
- « Si on ouvre le robinet un tout petit peu moins qu'une seconde on a toujours une suite d'états d'équilibre. » (E8-T2).

D - Lente = réversible ; rapide = irréversible

Un argument également très fréquent (25 occurrences) est celui de la vitesse/lenteur de la transformation ; ce type d'arguments apparaît chez huit étudiants.

Une transformation « lente » serait réversible, une transformation « rapide » serait irréversible :

- « *On m'a toujours dit que quand la transformation était lente elle était réversible.* » (E1-T5) ;
- « *Là je verrais bien réversible parce que cela va se faire relativement lentement.* » (E5-T4).

4.2.1.2. Production d'entropie

L'approche en termes de production d'entropie apparaît de manière moins importante (catégorie E).

L'entropie apparaît parfois (8 occurrences), de manière un peu incantatoire, sans grande justification. Il est vrai que les étudiants ne sont guère en situation de développer les calculs qui leur fourniraient des arguments plus précis :

- « *Donc quand ΔS est positif ça veut dire qu'il y a une augmentation du désordre moléculaire, et donc pour moi cela veut dire que la réaction est irréversible.* » (E1-T3) ;
- « *C'est dû à l'entropie en fait parce qu'il y a une entropie qui est créée [...] à cause de la rapidité du phénomène.* » (E9-Def).

Quatre étudiants y font appel. Un seul l'utilise pour plusieurs situations.

4.2.1.3. Causes d'irréversibilité : gradients et phénomènes dissipatifs

Un seul étudiant raisonne en termes de gradients et de phénomènes dissipatifs (catégories F et G) : « *Peut-être que là dans la mesure où on n'a peut-être pas des grosses différences de températures [...] peut-être c'est plus facile d'imaginer quelque chose de réversible.* » (E5-T4).

Cet étudiant évoque les frottements pour répondre sur la réversibilité d'une transformation : « *Il y a des frottements [...] Pour moi les frottements c'est aussi une cause d'irréversibilité d'une transformation.* » (E5-T6).

De telles considérations n'apparaissent chez aucun autre étudiant interviewé. Il semble que la question de l'existence, de l'importance, des phénomènes dissipatifs soit largement ignorée.

4.2.1.4. Autres catégories de réponses

H - Naturelle-spontanée/contrôlée

Un étudiant (quatre occurrences) argumente à plusieurs reprises en opposant transformation « naturelle, spontanée » à transformation « contrôlée » :

- « *La réaction réversible n'est pas naturelle ; elle ne se fait pas spontanément.* » (E8-Def) ;
- « *Dans ma définition une transformation irréversible c'est une transformation naturelle spontanée, et ça enfin pour réaliser celle-là il faut une action extérieure.* » (E8-T3).

I - Pas d'échanges avec l'extérieur

On voit apparaître ici un argument inattendu (huit occurrences) ; quatre étudiants y font appel : « *Y'a pas d'échanges vis à vis de l'extérieur, pour moi elle est réversible.* » (E8-T1).

J - La réversibilité n'existe pas

Un dernier type d'arguments apparaît chez quatre étudiants (5 occurrences), argument fort sensé, que nous avons évoqué dans l'analyse de contenu, à savoir que la réversibilité n'existe pas :

- « *Ben voilà justement c'est le problème pour moi les transformations réversibles ça n'existe pas.* » (E3-T4) ;
- « *Alors on va dire que les transformations réversibles n'existent pas, donc c'est toujours irréversible.* » (E5-T4).

4.2.2. Synthèse des résultats

Le tableau suivant (tableau 2) présente les résultats de l'analyse des arguments utilisés par les étudiants interviewés pour répondre de la réversibilité ou de l'irréversibilité des transformations qui leur sont proposées.

Pour chaque étape de l'entretien : demande de définition (Déf.), demande d'exemples (Ex.), demande de caractérisation d'une transformation (T1 à T6), nous indiquons les arguments utilisés par les étudiants pour caractériser une transformation comme réversible, ou irréversible. Il s'agit de repérer si certains étudiants font appel de manière préférentielle à certaines facettes du concept de réversibilité, si certaines questions suscitent spécifiquement l'utilisation de certaines facettes. Si le même type d'arguments apparaît de manière répétitive à propos d'une même situation, nous ne le comptons qu'une fois.

	Déf.	Ex.	T1	T2	T3	T4	T5	T6
E1	A	AEJ	A	D	D	A	A D	AD
E2	B	D	A	D	DE	AE	A	?
E3	A	D	I	BCDE	I	AJ	BCI	IJ
E4	A	A	A	A	ACD	A	AI	A
E5	C	BCD	BD	CD	D	DJF	CD	CDG
E6	BC		A	C	ACI	A	A	B
E7	BJ	ABCD	I	D	D	A	AI	AD
E8	CH	B	BC	BC	BCH	CDH	A	CH
E9		ABCDE	AF	CD	BCE	AE	A	ACDE
E10	B	A	A	A	A		A	B

Tableau 1 • **Catégories d'arguments mobilisés par les étudiants pour répondre sur la réversibilité d'une transformation** (les deux cases vides correspondent à des questions non posées, le « ? » à une réponse non argumentée par l'étudiant)

Nous retrouvons dans ce tableau la prépondérance des catégories correspondant à une approche « cinématique ».

On la trouve principalement sous une forme réduite au « retour possible du système à l'état initial » (catégorie A), éventuellement assortie de conditions « sans action extérieure » ou « sans échanges avec l'extérieur »... Ce type d'argument traduit une confusion entre transformation réversible et cycle.

D'autres formes apparaissent également de manière significative : vitesse de la transformation (catégorie D), suite d'états d'équilibres (catégorie C), renversabilité (catégorie B).

En ce qui concerne les gradients de grandeurs intensives (catégorie F), il semble qu'à ce type de considérations se soient substituées des considérations du type « quasi-statique, suite d'états d'équilibre, lent/rapide ». L'existence de phénomènes dissipatifs (catégorie G) est très peu évoquée.

Si on analyse les réponses, question par question, on constate que la majorité des étudiants (7/10) caractérisent de manière correcte la dernière transformation (T6) comme irréversible, l'argument répandu (mais insuffisant en général) en termes de possibilité/impossibilité de retour du système à l'état initial (catégorie A) conduisant ici à une réponse correcte. Ce même argument conduit à des réponses incorrectes pour les transformations T1 et T4 : cinq considèrent T1 comme réversible « *car le cube revient à son état initial* », sept considèrent T4 comme irréversible « *car on ne peut pas reconstituer le glaçon* ». L'expérience de Clément-Desormes (T2) est considérée comme irréversible (8/10) du fait de la « *rapidité* » de l'ouverture de la soupape (catégorie D). Les transformations T3 et T5 donnent lieu à des réponses plus mélangées, faisant intervenir deux arguments contradictoires : la possibilité du retour à l'état initial (catégorie A) et le caractère quasi-statique ou non (catégorie C).

Les critères qu'ils utilisent étant partiels, approximatifs, les étudiants peuvent se trouver pris dans des contradictions.

Ainsi, par exemple, l'étudiant E1, à propos de la transformation T6 (détente à travers un bouchon poreux), se trouve dans une contradiction lorsque, utilisant un argument de type « lenteur de la transformation », il conclut à la réversibilité de la transformation et, utilisant un argument de type « retour à l'état initial sans action extérieure », il arrive à une conclusion opposée : « *On m'a toujours dit en cours que quand la transformation était lente elle était réversible, mais je vois pas comment elle pourrait être réversible une fois qu'on a la même pression dans les deux compartiments ; il faut une action extérieure pour renverser la situation.* » (E1-T6).

L'étudiant E8 se trouve pris à plusieurs reprises dans une contradiction entre deux de ses arguments, un argument de type « suite d'états

d'équilibre » et un argument de type « une transformation naturelle est irréversible » :

- « *J pense qu'on aura une suite d'états d'équilibre [...] en fait j'ai des arguments pour et contre à chaque fois oui mais en fait c'est la transformation naturelle de si on réchauffe un glaçon il se transforme en eau.* » (E8-T4) ;

- « *Si l bouchon laisse passer lentement on peut considérer qu'il y a des états d'équilibre entre deux, qu'en fait c'est encore contradictoire [...] parce que c'est la réaction naturelle.* » (E8-T6).

4.3. Résultats des questionnaires

Nous présentons ici les réponses à trois questions concernant des transformations faisant intervenir la pression. Ces questions reprennent les transformations T2, T3 et T6 étudiées en entretien.

4.3.1 Cycle irréversible

Cette question concerne la transformation T3 étudiée en entretien. La situation proposée (figure 2) comporte un gaz placé dans un récipient fermé par un piston (I). Les parois du récipient ne sont pas isolantes, c'est-à-dire qu'à la fin de la transformation, le gaz est à la température ambiante. Une masse M est placée sur le piston. Il apparaît alors une différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur, le gaz subit une compression. Après avoir oscillé, le piston s'arrête à sa position d'équilibre (II) en raison des forces de frottement et de la viscosité du gaz. Si on enlève la masse M , apparaît à nouveau une différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur. Le piston remonte, oscille et s'arrête à la position d'équilibre. Le gaz retrouve son état initial (III).

N=44

Soit un récipient fermé par un piston mobile horizontal de masse négligeable, de surface 10 cm^2 . Le récipient contient un gaz parfait. Les parois laissent passer la chaleur. Dans l'état initial (situation I), le gaz est à la température T_0 identique à la température extérieure. Le piston est à l'équilibre.

On place une masse $M=1\text{kg}$ sur le piston. Le piston se déplace jusqu'à ce qu'il atteigne une position d'équilibre où la température est à nouveau T_0 (situation II).

On enlève la masse M . Le piston revient à la position initiale et le gaz est à la température T_0 (situation III).

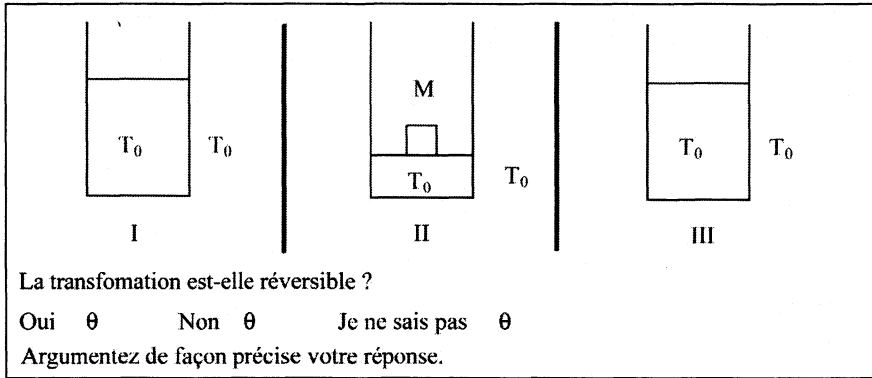


Figure 2 • Transformation due à une discontinuité de pression avec retour du système à l'état initial

La transformation est irréversible puisqu'elle comporte deux transformations successives produites par des différences de pression importantes entre la pression extérieure et la pression du gaz enfermé dans le récipient fermé par un piston. La question est posée pour tester si les étudiants se centrent sur le gaz dans leur analyse et concluent à la réversibilité de la transformation ou s'ils peuvent prendre en compte l'environnement qui a changé entre la situation I et la situation III. En effet, comme le montre la figure 3, dans la situation II, la masse M se trouve au niveau de la position d'équilibre du piston, correspondant à l'égalité des pressions extérieure et intérieure. Pour que le piston remonte, on enlève M qui se trouve dans la position basse. Les situations I et III ne sont donc pas identiques. L'énergie potentielle de la masse M dans la situation I a été transformée en énergie interne de l'environnement en raison de la viscosité du gaz et des frottements. On pourrait dire qu'il y a eu dissipation de l'énergie mécanique.

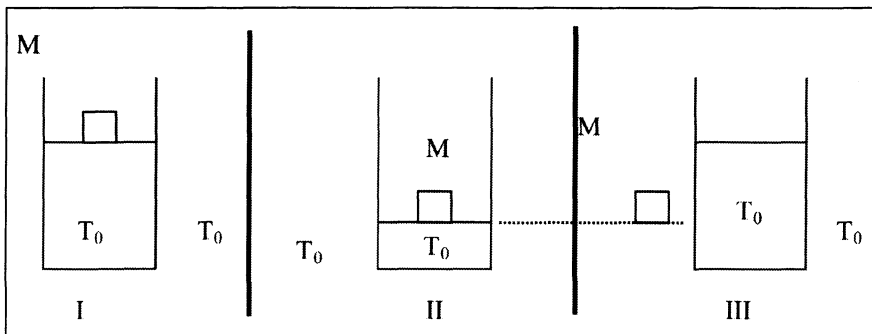


Figure 3 • Différence entre la situation I et la situation III

Une moitié (48 %) des étudiants répond, à juste titre, que cette transformation est irréversible. Les principaux arguments sont que la transformation ne peut être considérée comme une suite d'états d'équilibre (catégorie C, 34 %) et/ou qu'elle est brutale (catégorie D, 21 %) : « *Si la masse est posée brutalement, la transformation ne passera pas par une série d'états d'équilibre, il n'y aura donc pas réversibilité* » ; « *La transformation est rapide (passage « brutal » de l'état d'équilibre I à l'état d'équilibre II) dans les deux cas (II-III). La transformation est donc irréversible* ».

Par contre, environ une autre moitié des étudiants (45 %) répond de manière incorrecte que la transformation est réversible, l'argument principal (39 %) étant le retour à l'état initial du piston, du gaz, ou plus vaguement du système (catégorie A) :

- « *Le système retrouve à la fin le même état qu'au départ* » ;
- « *On retrouve l'état initial du gaz* » ;
- « *Le piston reprend sa position initiale avec les mêmes conditions, c'est donc une transformation réversible* » ;
- « *Une fois la masse retirée du piston, le piston reprend sa position initiale et le système retrouve sa pression et sa température initiales* ».

Aucun étudiant ne prend en compte le changement de position de la masse M et aucun ne fait intervenir les phénomènes dissipatifs dans l'analyse alors que le piston s'arrête à la position d'équilibre en raison des frottements solides et de la viscosité du gaz.

18 % répondent qu'ils ne savent pas ou ne répondent pas.

4.3.2. Transformation due à une discontinuité de pression avec des phénomènes dissipatifs importants

Cette question concerne la transformation T6 étudiée en entretien. La situation proposée (figure 4) est la situation couramment étudiée d'une détente irréversible de Joule Thomson. Un tuyau est séparé en deux par un bouchon poreux qui laisse diffuser du gaz de 1 vers 2, la pression P_1 étant supérieure à la pression P_2 . Il est précisé dans la question que la diffusion s'opère de façon très lente afin de tester si les étudiants utilisent ce critère et concluent de façon erronée que la transformation est réversible ou s'ils reconnaissent l'irréversibilité de la transformation et, dans ce cas, quels arguments ils utilisent ?

N=44

Un tuyau est séparé en deux par un bouchon poreux qui laisse diffuser du gaz de façon très lente. La pression d'un côté du tuyau est $P_1 = 2 \text{ atm}$, de l'autre à $P_2 = 1 \text{ atm}$. La température est identique des deux côtés. Cette détente est-elle réversible ?

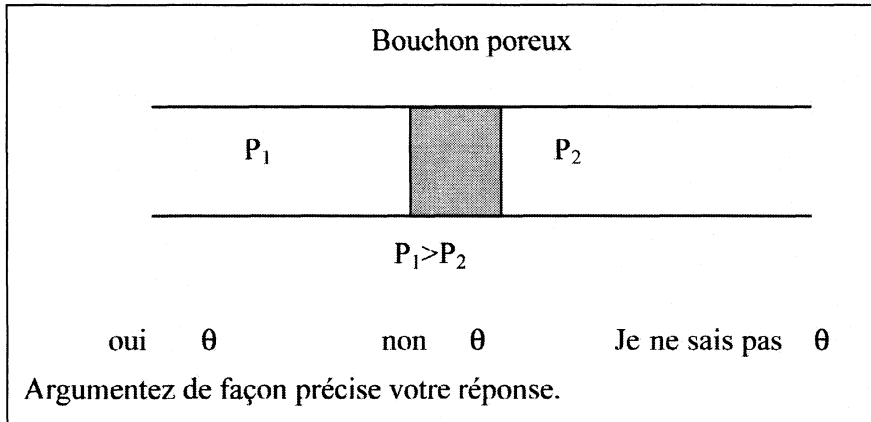


Figure 4 • Transformation due à une discontinuité de pression avec phénomènes dissipatifs importants

45 % des étudiants répondent de manière erronée que la transformation est réversible, les arguments majoritaires étant (D) la lenteur de la transformation (32 %) et/ou (C) la décomposition de la transformation en une suite d'états d'équilibre (23 %) :

- « Car le bouchon poreux laisse diffuser du gaz de façon très lente . Si la diffusion était rapide nous aurions eu une transformation irréversible » ;
- « Comme elle est très lente, on peut définir à chaque instant P et $T \Rightarrow$ succession d'états d'équilibre, \Rightarrow donc elle est quasi-statique et inversable, donc elle est réversible ».

Or, dans le cas de la détente de Joule-Thomson, la transformation ne peut être considérée comme une suite d'états d'équilibre en raison du flux de matière induit par la différence de pression de part et d'autre du bouchon.

39 % des étudiants répondent correctement que la transformation est irréversible. Les arguments sont très dispersés. L'argument majoritaire (9 %) est que le retour à l'état initial n'est pas possible :

- « Pour être réversible, il faudrait que les particules dans le compartiment 2 reviennent dans le compartiment 1. Statistiquement possible mais de trop faible probabilité » ;
- « Sans action extérieure, le système constitué par les deux gaz ne peut pas évoluer en sens inverse ».

Seuls deux étudiants soulignent la différence de pression entre les deux compartiments : « Les transformations réversibles se faisant pour de petites variations de P à $P+dP$ ».

16 % répondent qu'ils ne savent pas ou ne répondent pas.

4. 3.3. Transformation due à une faible discontinuité de pression

La question (figure 5) concerne la transformation T2 de l'entretien. Il s'agit de l'expérience de Clément-Desormes où une surpression faible (1 % par rapport à la pression atmosphérique) est créée en introduisant de l'air dans un récipient et en s'intéressant à la détente produite quand on met le récipient en contact avec l'atmosphère extérieure pendant un court instant à l'aide d'une soupape.

N=67

On dispose d'un récipient de volume 20L, contenant de l'air assimilé à un gaz parfait. La température est la température ambiante ($t = 20^{\circ}\text{C}$). Le récipient est muni d'un tube en U contenant de l'eau. L'air est à la pression P_1 telle que la différence de niveau d'eau dans les deux tubes soit $h = 10\text{ cm}$. Le récipient peut être mis en contact avec l'atmosphère extérieure par l'intermédiaire d'une soupape qui permet l'entrée ou la sortie d'air. On soulève la soupape que l'on lâche le plus rapidement possible. La pression dans le récipient devient alors la pression atmosphérique $P_{\text{atm}} = 1\text{ atm}$

La transformation réalisée est-elle réversible ?

oui non Je ne sais pas

Argumentez de façon précise votre réponse

Figure 5 • Transformation due à une faible discontinuité de pression

La surpression étant faible, il est possible de considérer que la transformation est proche d'une transformation réversible sans qu'elle soit rigoureusement réversible. Les deux réponses, transformation réversible ou transformation irréversible, peuvent donc être acceptées comme correctes.

La réponse quasi-unanime (84 %) est l'irréversibilité de la transformation. L'argument majoritaire (D) est la brutalité ou la rapidité de la transformation (63 %). Ce résultat n'est sans doute pas indépendant du fait que, dans la formulation de la question, il est précisé qu'on lâche rapidement la soupape. Cette précision est apportée pour que l'étudiant en déduise que l'échange thermique est très faible et que l'on peut considérer la détente comme adiabatique. Un certain nombre d'étudiants associe automatiquement le mot « rapide » à l'irréversibilité de la transformation :

- « Elle est irréversible car on lâche le plus rapidement possible la soupape » ;
- « La soupape est soulevée de façon très rapide, donc l'air dans le récipient passe rapidement de P_1 à P_{atm} » ;

alors que la rapidité du changement de pression est liée à la faible différence des pressions entre le récipient et l'atmosphère.

27 % des arguments concernent l'impossibilité de retrouver l'état initial (catégorie A) : « Si on réouvre la soupape, il est impossible que la pression à l'intérieur du récipient redevienne supérieure à P_1 . »

36 % des étudiants considèrent que la transformation n'est pas une suite d'états d'équilibre (catégorie C) alors que la différence de pression est faible : « Si on avait fait varier la pression par palier en laissant à chaque instant le système revenir à un état d'équilibre, la transformation aurait été réversible ».

Les étudiants qui répondent que la transformation est réversible (12 %) reconnaissent l'expérience de Clément-Desormes, mais donnent une justification inexacte, ou ne donnent aucune justification.

4.3.4. Synthèse des résultats

Le tableau 3 présente la fréquence des différents types d'arguments utilisés par les étudiants pour caractériser chacune de ces transformations. Trois catégories d'arguments apparaissent de manière importante en réponse à ces différentes questions, même si leur pondération dépend des questions. Il s'agit des catégories A, C et D. La transformation T3 se révèle particulièrement favorable aux arguments de type A (retour du système à l'état initial), la transformation T2 aux arguments de type D. Les arguments de type C sont plus également répartis. La catégorie B est moins utilisée. Les autres types d'arguments (faisant intervenir l'entropie, les phénomènes dissipatifs, etc.) apparaissent de manière négligeable.

	T3	T6	T2
A en %	41	9	27
B en %	7	2	12
C en %	41	23	39
D en %	21	36	63

Tableau 2 • Principales catégories d'arguments utilisées par les étudiants pour caractériser des transformations

5. CONCLUSIONS

L'analyse de manuels d'enseignement universitaire, et un retour sur le développement de la notion de réversibilité, nous ont montré que l'enseignement privilégie une approche « cinématique » de cette notion, au détri-

ment de l'analyse des « causes » possibles d'irréversibilité, phénomènes dissipatifs et gradients de grandeurs intensives. Ceci conduit à une définition peu opératoire de la réversibilité à ce niveau : comment savoir si l'univers peut revenir à son état initial, comment savoir si les équations d'évolution du système sont symétriques par rapport au temps ?

Des entretiens réalisés auprès de dix étudiants montrent que ces étudiants ne disposent pas de critères qui leur permettent d'analyser les situations et de conclure de façon sûre à la réversibilité ou non réversibilité de la transformation (ou, plus précisément, à la plus ou moins grande irréversibilité de la transformation). Ils utilisent des arguments souvent incomplets. La diversité des transformations proposées en entretien nous a montré que ces arguments partiels peuvent faire illusion, en conduisant, dans certaines situations, à des réponses correctes. Cela nous permet par contre de repérer des types de transformations susceptibles de « mettre en évidence » ces formes de raisonnement, dans lesquelles les notions du sens commun semblent encore très présentes, et les facettes de la notion de réversibilité thermodynamique bien érodées.

Les arguments les plus souvent invoqués sont :

- le retour possible du système (sans prise en compte de l'environnement) à son état initial,
- la lenteur/rapidité de la transformation,
- le caractère « quasi-statique » de la transformation,
- la possibilité d'inverser la transformation, cette notion restant assez vague.

Les questionnaires nous ont permis, pour différentes transformations, d'évaluer l'importance de ces différents arguments auprès d'étudiants titulaires d'une licence de physique.

Les entretiens nous ont également montré que certaines des situations de questionnement étaient favorables à la mise en contradiction de ces manières de raisonner, avec prise de conscience par les étudiants. Nous trouvons là des exemples de contradiction entre schèmes de pensée ou contradiction intra-psychique (Piaget, 1974), qui pourront être utilisés dans des stratégies d'apprentissage.

6. PERSPECTIVES

Ces premières analyses, analyse « épistémologique » des différentes facettes de la notion de réversibilité thermodynamique et analyse « didactique » de certains effets de l'enseignement usuel, permettront de situer différentes démarches pédagogiques que nous avons déjà pu repérer (Fuchs, 1987 ; Marcella, 1992 ; Baierlein, 1994 ; Thomsen & Bers, 1996 ; Leff, 1996). Elles seront par ailleurs utilisées pour la conception et l'expérimenta-

tion de nouvelles situations d'enseignement-apprentissage. Pour l'élaboration de ces situations, nous prendrons en compte (Méheut & Psillos, 2004), outre les trois dimensions des analyses préalables suggérées dans le cadre de l'ingénierie didactique (Artigue, 1988), une quatrième dimension qui concerne la motivation des élèves et la signification sociale des problèmes traités (Katman *et al.*, 1995). En ce qui concerne la reconstruction des savoirs, les résultats obtenus ici nous conduisent à envisager une approche plus « phénoménologique » donnant davantage d'importance à l'analyse des « causes » d'irréversibilité (inhomogénéités et phénomènes dissipatifs), et à proposer de raisonner non plus en termes dichotomiques (réversible/irréversible) mais en termes de réduction de l'irréversibilité. Une approche nous semble apporter une contribution intéressante à cette entreprise de « reconstruction didactique » : celle de J. Ogborn (1990) et R. Booahan (1996) qui propose une étude des différentes causes des changements. Nous pourrions nous appuyer par ailleurs sur l'approche développée par M. Welzel & G. Pospiech (2001) qui donne une large place à l'analyse de phénomènes et d'appareils « de la vie quotidienne », ce qui nous semble pouvoir contribuer à une recontextualisation de ces savoirs plus signifiante pour les étudiants.

BIBLIOGRAPHIE

- ARTIGUE M. (1988). Ingénierie didactique. *Recherches en didactique des mathématiques*, vol. 9, n° 3, pp. 281-308.
- BAIERLEIN R. (1994). Entropy and the second law: A pedagogical alternative. *American Journal of Physics*, vol. 62, n° 1, pp. 15-26.
- BARDIN L. (1993). *L'analyse de contenu*. Paris, PUF.
- BEN ZVI R. (1999). Non-science oriented students and the second law of thermodynamics. *International Journal of Science Education*, vol. 21, n° 12, pp. 1251-1267.
- BOOHAN R. (1996). Using a picture language to teach about processes of change. In G. Welford, J. Osborne & P. Scott (éds), *Research in Science Education in Europe Current Issues and Themes*. London, The Falmer press, pp. 85-99.
- BRUNHES B. (1909). *La dégradation de l'énergie*. Paris, Flammarion (réédition, 1991).
- BRUSH S.G. (1976). *The kind of motion we call heat. A history of the kinetic theory of gases in the 19th century*. Amsterdam, North Holland.
- CARNOT S. (1824). *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. Paris, Chez Bachelier, (réédition, Jacques Gabay, 1990).
- CLAUSIUS R. (1868). *Théorie mécanique de la chaleur*. Paris, Eugène Lacroix, (réédition, Jacques Gabay, 1991).
- DE DONDER T. & VAN RYSSELBERGHE P. (1936). *L'affinité*. Paris, Gauthier-Villars.
- DUHEM P. (1911). *Traité d'énergétique*. Paris, Gauthier-Villars (réédition, Jacques Gabay, 1997).
- FER F. (1970). *Thermodynamique macroscopique*. Paris, Gordon & Breach.
- FUCHS H. U. (1987). Entropy in the teaching of introductory thermodynamics. *American Journal of physics*, vol. 55, n° 3, pp. 215-219.
- GIBBS J.-W. (1899). *Équilibre des systèmes chimiques*. Paris, Gauthier-Villars.

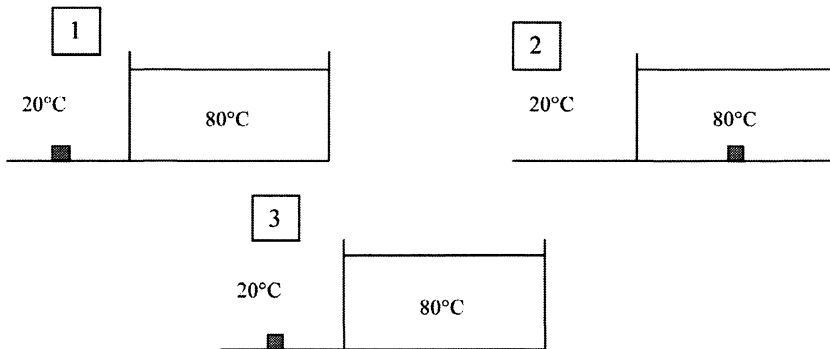
- GRÉA J. & VIARD J. (1995). From Language to Concept Appropriation in Physics. Two Cases Studies. In C. Bernadini, C. Tarsitani & M. Vincentini (éds), *Proceedings of the International Conference : Thinking Physics for Teaching*, Roma 1994. New York, Plenum Press, pp. 97-106.
- GUEDJ M. (2000). *L'émergence du principe de conservation de l'énergie et la construction de la thermodynamique*. Thèse de doctorat, université Paris 7.
- GUILBERT L. & MELOCHE D. (1993). L'idée de science chez des enseignants en formation : un lien entre l'histoire des sciences et l'hétérogénéité des visions. *Didaskalia*, n° 2, pp. 7-30.
- KATTMANN U., DUIT R., GROPENGIEBER H. & KOMOREK M. (1995). *A Model of Educational Reconstruction*, Paper presented at The NARST Annual Meeting, San Francisco.
- KESIDOU S. & DUIT R. (1993). Students' Conceptions of the Second Law of Thermodynamics, An interpretative Study. *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 30, n° 1, pp. 85-106.
- LATOUB B. (1997). *Leçons de thermodynamique*. Paris, Ellipses.
- LEFF H. S. (1996). Thermodynamic entropy : The spreading and sharing of energy. *American Journal of Physics*, vol. 64, n° 10, pp. 1261-1271.
- MARCELLA T. V. (1992). Entropy production and the second law of thermodynamics : An introduction to second law analysis. *American Journal of Physics*, vol. 60, n° 10, pp. 888-895
- MÉHEUT M. & PSILLOS D. (2004). Teaching-learning sequences: aims and tools for science education research. *International Journal of Science Education*, vol. 26, n° 5, pp. 515-535.
- MINSTRELL J. (1992). Facets of students' knowledge and relevant instruction. In R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderer (éds), *Research in Physics learning : Theoretical Issues and Empirical Studies*. Kiel, IPN, pp. 110-128.
- OGBORN J. (1990). Energy, change, difference and danger. *School Science Review*, vol. 72, n° 259, pp. 81-85.
- PIAGET J. (1974). *Recherches sur la contradiction*. Paris, PUF.
- PLANCK M. (1903). *Treatise on Thermodynamics*. London, Longmans.
- POURPRIX B. (2003). *La fécondité des erreurs*. Villeneuve d'Ascq, Presses Universitaires du Septentrion.
- PRIGOGINE I. (1968). *Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles*. Paris, Dunod (réédition, Jacques Gabay, 1996).
- ROZIER S. & VIENNOT L. (1991). Students' reasonings in thermodynamics. *International Journal of Science Education*, vol. 13, n° 2, pp. 159-170.
- SCHIELE B. (1976). Note pour une analyse de la notion de coupure épistémologique. Les représentations. *Recherche et formation*, vol. 6, n° 2-3, pp. 43-98.
- THOMSEN J. S. & BERS H. C. (1996). The reversible process : A zero-entropy-production limit. *American Journal of Physics*, vol. 64, n° 5, pp. 580-583
- THOMSON W. (1852) On a universal tendency in nature to the dissipation of mechanical energy. *Philosophical Magazine*, n° 4, pp. 304-306.
- WELZEL M. & POSPIECH G. (2001). Research Based and Content Guided Design of a Teaching-Learning Sequence. In D. Psillos, P. Kariotoglou, V. Tselfes, G. Bisdikian, G. Fassopoulos, E. Hatzikraniotis & M. Kallery (éds), *Proceedings of the Third International Conference on Science Education Research in the Knowledge Based Society*. Thessaloniki, Art of Text, pp. 242-244.
- MANUELS D'ENSEIGNEMENT ANALYSÉS
- BRÉBEC J.-M. (1996). *H-prépa Thermodynamique 1^{re} année*. Paris, Hachette.
- COULON C., LE BOITEUX S. & SEGONDS P. (1997). *Cours de Physique. Thermodynamique*. Paris, Dunod.
- FAROUX J.-P. & RENAULT J. (1997). *Thermodynamique*. Paris, Dunod.
- FAVERJON G. (2003). *Les nouveaux précés Bréal. Thermodynamique PCSI*. Rosny sous Bois, Bréal.

- FRÈRE C. & KREMPF P. (1999). *Thermodynamique, 2^e année*. Paris, Ellipses.
- GRECIAS P. (1999). *Exercices et problèmes de physique, Thermodynamique*. Paris, Tec & Doc.
- LAVERTU G. (1997). *Thermodynamique*. Paris, Vuibert.
- LE HIR J. (1999). *Thermodynamique*. Paris, Dunod.
- LE RILLE A. (2001). *Thermodynamique. Exercices et problèmes corrigés, rappels de cours*. Paris, Dunod.
- LHUILIER C. & ROUS J. (1998). *Introduction à la thermodynamique*. Paris, Dunod.
- LORENCEAU E. & RESTAGNO F. (2003). *Aide-Mémoire, Thermodynamique*. Paris, Dunod.
- MAÎTRE C. (1995). *Thermodynamique*. Paris, Masson.
- OLIVIER S. & GIE H. (1998). *Thermodynamique 1^{re} et 2^e année*. Paris, Lavoisier.
- PÉREZ J.-P. (2001). *Thermodynamique - Fondements et applications*. Paris, Masson.

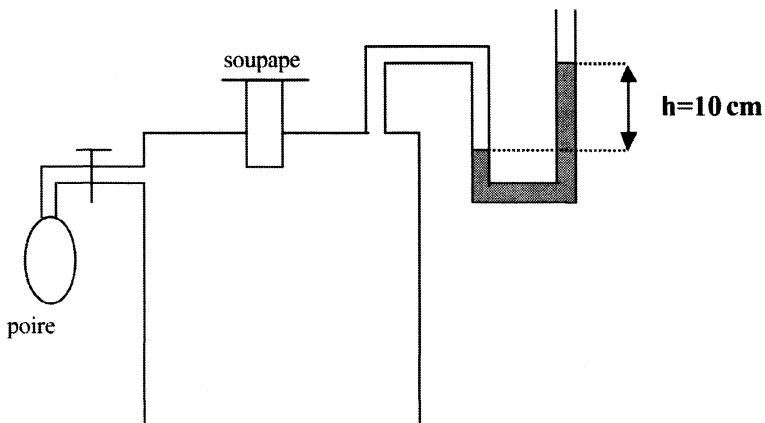
ANNEXE

Protocole de l'entretien sur transformations réversible et irréversible

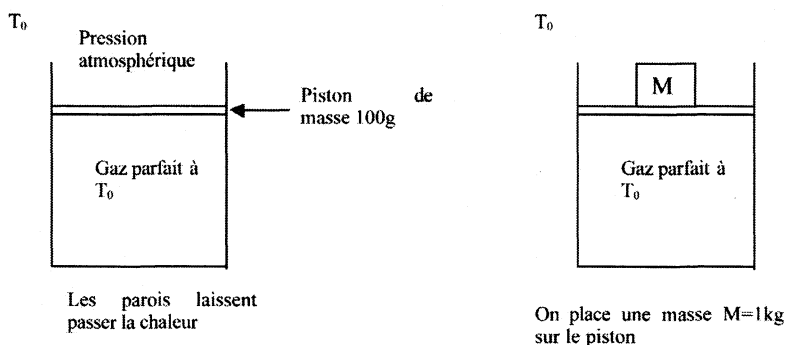
- 1) Un de vos camarades a entendu parler de transformations réversibles et irréversibles et il ne sait pas ce que c'est. Qu'est ce que vous lui diriez pour lui expliquer ce qu'est une transformation réversible ou irréversible ?
- 2) Pouvez-vous me donner un exemple de transformation réversible et un exemple de transformation irréversible.
- 3) Voici une situation avec un petit cube de métal de volume 8 cm^3 , par exemple, qui est à la température ambiante et 100 L d'eau à 80° Celsius . On met le cube dans l'eau et on attend qu'il prenne la température de 80° Celsius . Ensuite on le reprend et on le remet à la température ambiante. La transformation est-elle réversible ou irréversible ?



- 4) On réalise devant l'étudiant la manipulation de Clément-Desormes. (À l'aide d'une poire, on envoie de l'air dans la bonbonne. On ferme le robinet lorsque la surpression est d'environ 10 cm d'eau. On précise à l'étudiant que cette situation est pour nous la situation initiale. On soulève ensuite la soupape rapidement. L'air qui s'échappe de la bonbonne produit un bruit.) On demande alors : « Est-ce que la transformation est réversible ou irréversible ? »

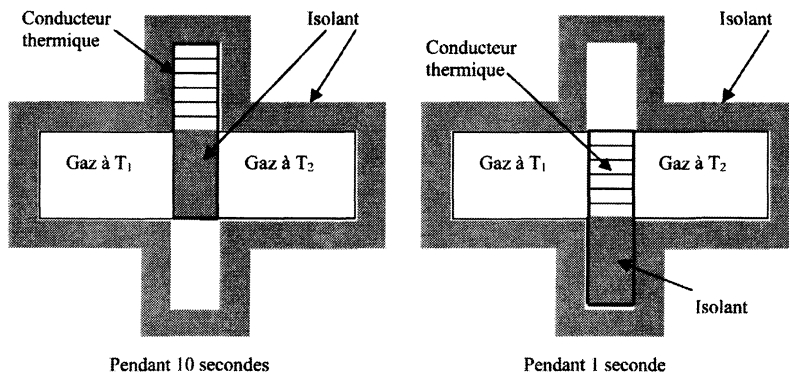


5) On a un récipient dont les parois laissent passer la chaleur. Il y a un gaz parfait dans le récipient qui est à la température ambiante T_0 . Un piston léger ($m=100g$) ferme le récipient de manière étanche. La pression atmosphérique s'exerce au-dessus du piston. Ensuite, on ajoute une masse M de 1 kg au-dessus du piston. À votre avis que se passe-t-il ? Est-ce que la transformation est réversible ou irréversible ?

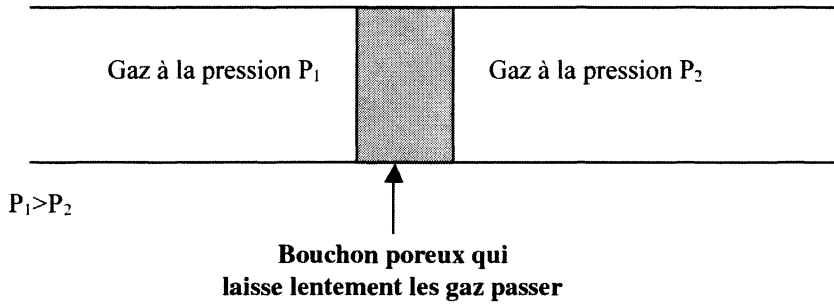


6) Un glaçon d'eau de 8 cm^3 de volume est à la température de $-0,2^\circ\text{C}$. Il est donc proche de zéro degré. On place ce glaçon dans un récipient qui contient 10L d'eau liquide à la température de $+0,5^\circ\text{C}$. Est-ce que la transformation est réversible ou irréversible ?

7) Deux récipients fermés contiennent chacun un gaz parfait. Les volumes sont identiques dans les deux récipients. Dans l'un des récipients, la température est de 20°C , dans l'autre de 80°C . L'ensemble est isolé de l'extérieur, il n'y a pas d'échange de chaleur possible avec l'extérieur. On réalise une transformation telle que les deux récipients sont isolés thermiquement pendant dix secondes grâce à un matériau isolant représenté par les stries. Ensuite pendant une seconde la chaleur peut passer (le matériau conducteur de la chaleur est représenté par le grisé). La manipulation de va et vient isolant-conducteur est répétée autant de fois qu'il le faut pour que les températures deviennent égales dans les deux compartiments. Est-ce que la transformation est réversible ou irréversible ?



8) Un gaz à la pression P_1 est dans la partie gauche du tuyau. Dans la partie droite, la pression vaut P_2 . Le tuyau ne laisse pas passer la chaleur. Un bouchon poreux laisse passer lentement le gaz d'un côté du compartiment vers l'autre. Est-ce que la transformation est réversible ou irréversible ?



Cet article a été reçu le 10/12/2002 et accepté le 30/09/2004.