

FAITS EXPERIMENTAUX ET FORMES DE RAISONNEMENT EN THERMODYNAMIQUE APPROCHE COMMUNE CHEZ LES APPRENANTS

Laurence Viennot, L.D.P.E.S., Université Denis Diderot, Paris, France

Introduction

Les sujets des nombreuses recherches menées lors des vingt dernières années sur les conceptions des apprenants ont d'abord été définis en fonction des chapitres traditionnels de la théorie acceptée. La chaleur et la température ont figuré parmi les premiers domaines étudiés, tout comme la pression des gaz et la structure particulaire de la matière. Il est ensuite rapidement apparu que des traits similaires de raisonnement étaient en jeu dans des réponses d'élèves portant sur des sujets très différents. Des recherches plus récentes au niveau de l'université se sont centrées sur ces aspects transversaux du raisonnement. Après un exposé des grandes lignes des résultats concernant les idées des élèves sur la chaleur et la température, ces formes générales de raisonnement seront illustrées par des exemples en thermodynamique. Des implications quant au choix des objectifs d'enseignement seront ensuite discutées.

Phénomènes impliquant la chaleur et la température : cadrage du point de vue du physicien

Dans la théorie physique, la "chaleur" désigne un type de transfert d'énergie entre deux systèmes, par exemple par conduction, et aussi l'énergie transférée par ce moyen. L'autre moyen de transférer l'énergie d'un système à un autre est le travail : par exemple le travail mécanique ou électrique. Les processus tels que la convection ou la radiation peuvent être rapportés à ces deux types fondamentaux de transfert - chaleur et travail - même si cela n'est pas trivial. En fait, en considérant les transferts d'énergie, le besoin d'une véritable distinction entre la chaleur et le travail ne se fait sentir que lorsque l'entropie est en jeu. Cela ne sera pas le cas dans ce chapitre, et je n'analyserai donc pas en détail le processus réel de transfert. Je parlerai seulement de "transfert de type chaleur" ou de "travail".

La température est l'une des quantités qui caractérise l'état d'un système. Sa définition théorique est quelque peu complexe. Mais dans les situations où il est possible d'utiliser la thermodynamique classique, cette grandeur intensive est simplement reliée à - en fait elle est proportionnelle à - l'énergie cinétique moyenne par particule.

Puisque l'énergie peut être transférée simultanément par plusieurs moyens, et puisque l'énergie des particules n'est pas uniquement sous forme cinétique, un transfert de type chaleur à un système n'entraîne pas nécessairement une augmentation de la température de ce système. Par exemple un transfert de type chaleur peut provoquer un changement d'état, et cela se produit sans aucune modification de la température (c'est alors l'énergie potentielle des particules qui est modifiée), ou encore une modification de la température peut se produire pendant la détente adiabatique d'un gaz, c'est à dire une détente sans aucun transfert de type chaleur. Un transfert de type chaleur peut même se produire d'une source "froide" à une source "chaude" (ce qui signifie respectivement "plus froid" et "plus chaud" que l'autre source), comme dans les réfrigérateurs.

Au sein de ce domaine complexe, une catégorie restreinte de phénomènes permet des prédictions plus simples : les phénomènes pour lesquels il se produit un seul transfert de type chaleur, avec simplement une variation de l'énergie cinétique moyenne des particules dans chacun des systèmes impliqués. Il est alors correct d'affirmer que l'énergie va du système le plus chaud au plus froid, jusqu'à ce que finalement les systèmes atteignent la même température. On peut remarquer que dans cette "catégorie restreinte", il serait possible, sans

aucun problème, d'assimiler la "chaleur" à une "énergie thermique", que celle-ci soit transférée ou stockée. Alors, la différence entre la chaleur et la température serait simplement que la température est une grandeur intensive alors que cela n'est pas le cas de l'énergie. En fait, comme cela est montré ci-dessus, l'écart conceptuel entre les deux grandeurs est bien plus important.

Dans ce bref résumé sont croisés deux champs conceptuels qui s'étendent au-delà des thèmes de la chaleur et de la température : la structure particulière de la matière (voir le chapitre E3 de M. Méheut, et aussi Lijnse et al., 1990), et le concept d'énergie. Ces deux thèmes très importants ne peuvent être traités en tant que tels dans les limites de ce chapitre. Ce qui suit est centré sur les formes de raisonnement des apprenants concernant les phénomènes physiques impliquant la chaleur et la température.

Idées des enfants sur quelques phénomènes thermodynamiques

Il est maintenant largement reconnu que les connaissances communes des apprenants et les formes de raisonnement sont d'une importance cruciale dans la conception des stratégies d'enseignement.

Cette section décrit les conceptions des adolescents entre 10 et 16 ans, avant, pendant ou après enseignement, avec une insistance particulière, dans le dernier cas, sur les difficultés qui persistent après enseignement. Les résultats rapportés sont principalement tirés de deux articles faisant un état des lieux (Erickson, 1985 ; Tiberghien, 1985 ; voir également Tiberghien, 1984) et dans lesquels plus de détails peuvent être obtenus.

Déclarations sur ce que sont la chaleur et de la température

Dans la plupart des commentaires d'élèves, la chaleur semble être simplement quelque chose de chaud qui chauffe les autres choses. Comme l'écrit Erickson (1985), ce "quelque chose" est assimilé soit à un corps chaud soit à une espèce de substance émise par la source chaude. Les réponses suivantes ont été obtenues lors d'une enquête auprès d'élèves de 12 à 16 ans à qui l'on demandait de "dire en quelques phrases ce qu'est la chaleur" (Engel, 1982).

" La chaleur est de l'air chaud "

" la chaleur est un fluide ou un solide qui chauffe... quand vous le touchez il semble chaud - si n'importe quoi a de la chaleur dedans "

Dans cette étude, un tiers des élèves plus âgés donnent toujours ces types de réponses, par opposition aux autres pour lesquels la "chaleur" est définie dans les termes d'énergie et de transfert :

" La chaleur est de l'énergie ; lorsque ça chauffe quelque chose , ça transfère l'énergie de chaleur à ce qui est chauffé. "

Selon Erickson (ibid.), " jusqu'à l'âge de 12-13 ans, les élèves sont familiers avec le terme température et sont capables d'utiliser un thermomètre pour évaluer la température des objets, mais ils comprennent ce concept de manière vraiment très limitée et l'utilisent rarement spontanément pour décrire l'état d'un objet ".

Quant à la différence entre chaleur et température, lorsqu'on interroge directement des enfants sur ce point, " le type de réponse le plus commun (représentant plus de 25% pour tous les niveaux d'âge) est qu'il n'y a pas de différence entre elles ". Erickson cite les autres réponses typiques (Engels, 1982) pour lesquels la température semble être soit " une mesure de la chaleur " soit " l'effet de la chaleur " :

" La température est la quantité de chaleur dans cet espace... ça vous indique la chaleur de l'eau ".

Comment les phénomènes sont-ils analysés ?

Ceci dit, les chercheurs s'accordent à concentrer leur attention sur les commentaires des élèves et sur leurs prédictions à propos de phénomènes impliquant la chaleur et la température, plus que sur les aspects purement déclaratifs de leurs connaissances.

D'un point de vue de physicien, les phénomènes mis en jeu dans ces études peuvent être classés selon deux catégories : d'une part la "catégorie restreinte" décrite ci-dessus (c'est à dire avec seulement un transfert de type chaleur et uniquement une variation de l'énergie cinétique moyenne des particules), et d'autre part les changements d'états.

Phénomènes de la "catégorie restreinte"

Dans la catégorie "restreinte", on trouve le fait expérimental que tous les objets en contact prolongé atteignent la même température finale. Cette idée n'est pas évidente pour les élèves. Les chercheurs rapportent certaines réponses qui semblent nier l'existence d'un équilibre thermodynamique entre les objets considérés.

Par exemple, lorsqu'on leur demande si deux assiettes, l'une en métal, l'autre en plastique, placées dans la même pièce, sont à la même température, la plupart des élèves considèrent que ce n'est pas le cas, même après enseignement (Engels & Driver, 1985). Tiberghien (1985) rapporte également que "différents matériaux (farine, clous, eau) placés pendant plusieurs heures dans un four à 60° sont, pour la majorité des élèves, à des températures différentes. Typiquement, " la farine est à moins de 60° car la farine ne s'échauffe pas beaucoup, les clous sont à plus de 60° parce que le fer chauffe plus vite, et l'eau est à 60° parce qu'elle prend la température de ce qui l'entoure ".

Dans la même ligne, il n'est pas évident pour les adolescents que le chauffage de tout matériau entraîne une augmentation de la température de celui-ci. Ainsi, toujours selon Tiberghien, " avant enseignement, seulement un tiers des élèves pense que la température du sable, du sucre et de l'eau augmente lorsqu'ils sont chauffés. Beaucoup d'entre eux prédisent que le sable ne sera pas chaud " parce que le sable ne peut pas chauffer ", alors que l'eau peut chauffer. Pour eux, la capacité à être chauffé est une propriété " naturelle " des substances particulières. Après enseignement, plus de 50% des élèves reconnaissent que la température de ces trois substances augmente lorsqu'elles sont chauffées, mais cela reste un concept difficile pour eux ".

Toutes ces difficultés n'apparaissent pas pour les mélanges homogènes de liquides. Dans ce cas, l'existence d'une température finale unique est bien acceptée par les élèves. La question est alors de prédire qualitativement ou quantitativement cette valeur finale. Plusieurs enquêtes (Stavy & Berkovitz, 1980 ; Driver & Russel, 1981 ; Strauss, 1981 ; Engels, 1982) ont utilisé à ce propos des expériences de mélange entre des quantités d'eau de températures initiales identiques ou différentes. Dans les deux cas, des prédictions qualitatives ou quantitatives étaient demandées. Le cas des températures initiales identiques s'est révélé plus facile à traiter, et les questions quantitatives plus difficiles que les qualitatives. Les stratégies consistant à additionner ou soustraire les températures initiales ont été encore observées chez des élèves âgés de 16 ans (Engels, 1982).

Finalement, toujours dans la catégorie "restreinte" (seulement un transfert de chaleur et une variation de la seule énergie cinétique), des questions portent sur la plus ou moins grande efficacité de divers matériaux pour l'isolation thermique d'objets variés. La réponse correcte nécessite, dans ce cas, de considérer une propriété d'un matériau donné - être un bon ou un mauvais conducteur - avec une attention particulière accordée à l'idée de transfert entre deux autres systèmes. Cette idée de transfert intervient également dans le thème difficile des sensations tactiles produites par des matériaux variés à la même température.

De manière prévisible, la plupart des explications des élèves pour de tels problèmes repose sur une propriété du matériau. Mais dans bien des commentaires, la propriété de l'objet est liée de manière dissymétrique à l'une des catégories " chaud " ou " froid ", comme si une situation particulière avait été utilisée pour assigner un lien intrinsèque entre le matériau et l'une des extrémités particulières du continuum chaud-froid. La plupart de ces explications semblent prendre en compte le matériau envisagé et seulement l'un des autres systèmes impliqués : le corps à isoler ou l'air ambiant, avec ou sans l'intervention de la "chaleur". Tiberghien (1985) cite quelques exemples de telles explications :

(pour isoler un roulement à bille froid), “ l’aluminium garde mieux le froid ” (11 ans) ;

(pour isoler une boisson chaude), “ le verre enveloppé dans le vêtement sera plus chaud que les autres puisqu’il est enveloppé dans le vêtement ” (11 ans) ;

“ le métal refroidit les choses, le métal est froid ” (12 ans)

“ je pense que ça (le métal) gardera (la glace) gelée plus facilement, parce que ça (le coton) est plus chaud et garde mieux le chaud ” (12 ans)

Ces explications sont prédominantes avant enseignement et elles peuvent être remplacées peu à peu, après enseignement, par d’autres qui ne suggèrent pas de dissymétrie relative au “ chaud ” et “ froid ”, telles que (Tiberghien, *ibid.*) :

“ le matériau transmet de la chaleur plus ou moins vite ; la chaleur se propage, bouge dans le matériau, plus ou moins vite ”.

Dire plus simplement que “ le matériau est un conducteur ou un isolant ” ne garantit pas que le problème de transfert est convenablement compris. Par exemple, un élève qui avait choisi la feuille d’aluminium pour garder le roulement à bille froid s’exprime ainsi (Tiberghien, *ibid.*) :

“ parce que le métal garde le froid, l’aluminium est un conducteur.

..... Oui parce qu’il prendra la température de la bille.. et il la gardera pendant longtemps. ” (12 ans)

La question de symétrie du rôle entre les systèmes interagissant (la source “chaude” et la source “froide”) est l’un des points les plus critiques, nous y reviendrons.

Changements d’états

Considérons maintenant les changements d’états. Il apparaît que la stabilité de la température pendant un changement d’état n’est pas connue avant enseignement, et que cela crée une réelle surprise lorsqu’elle est observée. Après enseignement, ce point semble être largement accepté, même si une telle stabilité à travers le temps est souvent comprise comme affectée par le taux de chauffage, selon deux études (Driver & Russel, 1981 ; Andersson, 1979).

Il semble également difficile d’admettre que, une fois le changement d’état terminé, la nouvelle phase se comporte normalement, c’est à dire que la température augmente lors d’un chauffage. Tiberghien (1984, 1985) indique que dans un groupe d’élèves à qui l’on demandait d’expliquer pourquoi un morceau de zinc placé dans un four à 1000°C avait des valeurs successives de la température de 30°, 70°, 200°, 420°, 420°, 420°, 20% d’entre eux répondaient, que “ c’est la plus haute température possible pour le zinc ”, et ceci après enseignement des changements d’état. Pour les valeurs ultérieures de la température, 70% des prédictions étaient que “ la température reste toujours à 420° ”. Les élèves suédois pensent également souvent que 100°C est “ la température maximum de l’eau ” (Andersson, 1979).

Je propose les hypothèses suivantes :

- Cette répugnance à admettre un comportement normal pour la phase obtenue après un changement d’état pourrait bien dépendre des phénomènes considérés. En particulier, les enfants pourraient probablement admettre que le fait de chauffer un cube de glace le fait d’abord fondre, puis entraîne une augmentation de la température de l’eau obtenue, contrairement à ce qu’ils disent du zinc.
- Cela pourrait tenir au fait que les températures très élevées et très basses ne s’imaginent pas facilement. En effet, les valeurs extrêmes ne peuvent être mises en relation avec l’expérience personnelle d’un éventail de température plus restreint.
- Cela pourrait être dû à une rupture dans la manière de raisonner. Le changement d’état force à laisser de côté les règles valables dans la “ catégorie restreinte ” des phénomènes, à savoir : si un corps est chauffé, sa température augmente. Cela peut paraître arbitraire aux enfants et les décourager de revenir à cette règle lorsqu’ils considèrent la phase obtenue après le changement d’état.

En l’absence de tout support expérimental, il n’est pas possible d’en dire beaucoup plus sur ces hypothèses. Mais, dans une perspective d’enseignement-apprentissage, la dernière remarque

suggère de prendre le plus sérieusement possible l'argument de Erickson (1985) en faveur de présentations d'explications, par exemple sur le point d'ébullition de l'eau :

“ ... Cette compréhension semblerait nécessiter quelques explications sur ce qui se produit dans le liquide, au niveau moléculaire, de manière à donner du sens à l'invariance de la température. ”

Ainsi, pour ce qui est des transferts simples de chaleur comme des changements d'états, “ apprendre des faits ” semble insuffisant pour atteindre une compréhension cohérente des concepts en jeu. Cette idée conduit à analyser les types de raisonnement qui interviennent communément dans ce domaine.

Formes communes de raisonnement concernant les systèmes

Aspects transversaux du raisonnement : premiers indices

Un des principaux résultats concernant les idées des élèves sur la chaleur et la température est que, lorsqu'ils analysent un transfert de chaleur, les enfants ont du mal à prendre en compte à la fois les sources chaude et froide. Ceci peut être rapproché de l'hésitation des enfants à considérer les deux cotés d'un piston en mouvement lorsqu'ils analysent les forces liées à la pression agissant sur cet objet (Séré, 1985 ; Méheut, 1996). Il semblerait que deux causes soient trop pour un effet donné. A la fin de leur livre sur les idées des élèves en science, Driver et al. (1985) écrivent la conclusion suivante : “ Ces idées récurrentes...dérivent souvent d'un raisonnement causal linéaire où une seule action produit un seul effet ”. Andersson (1986), Gutierrez et Ogborn (1992) ont également souligné la structure causale simple communément observée dans les raisonnements des apprenants.

Transversale par rapport aux contenus scientifiques proprement dits, cette tendance de raisonnement est d'autant plus résistante à l'enseignement (Viennot, 1993a). Ainsi, à propos du transfert de chaleur le long d'une barre de métal (Rozier 1987, Viennot 1996), les étudiants de niveau universitaire utilisent un “ raisonnement séquentiel ” - qui est extrêmement commun en électricité (voir aussi le chapitre C2) - c'est à dire qu'ils raisonnent comme si la chaleur était quelque chose qui partait de la source chaude le long de la barre, sans tenir compte de ce qui est situé en aval. Comme les enfants, ils ont les plus grandes difficultés à prendre en compte à la fois et sur le même plan la zone de “ départ ” (chaude) et la zone “ d'arrivée ” (froide) de la chaleur lors du transfert.

En fait, Rozier (ibid.) a observé, au niveau de l'université, une énorme résistance de tendances communes qu'elle a rattachées au “ raisonnement causal linéaire ” et qu'elle a analysées comme suit.

L'analyse quasi statique des systèmes

Rappelons d'abord quelques uns des aspects principaux de la théorie admise.

L'analyse des systèmes met en jeu plusieurs grandeurs physiques. Lorsque des systèmes à plusieurs variables sont transformés, ils peuvent, sous certaines conditions, être analysés de manière quasi statique. Cela signifie que les grandeurs qui caractérisent l'état du système évoluent *simultanément* sous la contrainte *permanente* de lois simples. “ Simple ” exclut les lois de propagation d'un côté du système à un autre. En d'autres termes, “ quasi statique ” et “ propagatif ” sont deux adjectifs exclusifs. Par exemple, en thermodynamique, une transformation quasi statique d'un gaz parfait est telle que, à chaque instant, la relation $PV = nRT$ (avec des notations classiques) se comporte comme si le système était de manière permanente à l'équilibre thermodynamique. Ce type d'analyse peut être opposé aux tendances de raisonnements décrites ci-dessous, illustrées par des exemples en thermodynamique.

Réduction du nombre de variables

Une tendance extrêmement générale et bien connue dans la résolution de problèmes à plusieurs variables est d'oublier certaines des variables pertinentes. Cela est illustré en particulier par un test proposé à des élèves d'université (Rozier, 1987 ; Rozier & Viennot, 1991). Une

compression adiabatique d'un gaz parfait est présentée. Il est indiqué que " la pression et la température augmentent toutes les deux ". La question est " pouvez-vous expliquer pourquoi , en termes de particules? " Près de la moitié des élèves de niveaux variés à l'université ont donné des réponses telles que :

" Le volume diminue ; donc il y a plus de molécules par unité de volume et la pression augmente "

" Le volume diminue, donc les molécules sont plus proches les unes des autres ; donc il y a plus de chocs et la pression augmente "

Ces réponses peuvent être résumées de manière générale comme ci-dessous :

V diminue → n augmente... → P augmente

En ce qui concerne la pression, ces réponses reflètent un lien exclusif entre cette grandeur et la densité des particules (n). L'autre facteur pertinent, la vitesse quadratique moyenne des particules, est ignoré. Cela constitue *une association préférentielle* entre la pression et la densité des particules, aux dépens de l'aspect cinétique. De cette façon, le rôle de la température est ignoré. Méheut (1996) a également observé que les élèves ont plus de difficultés à comprendre la dépendance entre la pression et la " force de collision " (liée à la vitesse des particules) qu'entre la pression et la densité des particules.

Raisonnement avec de telles chaînes linéaires pour des problèmes à variables multiples conduit en fait à des arguments *ad hoc* et à des incohérences. Par exemple, on ne peut pas " expliquer " à la fois la faible pression en altitude par l'implication " la densité (n) des particules diminue → la pression P diminue " et la manière dont fonctionne un ballon à air chaud par " air chaud dans le ballon → la densité (n) des particules diminue ", sans s'exposer à une contradiction concernant la pression dans le ballon d'air chaud, qui n'est évidemment pas inférieure à la pression extérieure. Dans les deux cas, en utilisant la relation $P=nkT$ (valable pour les gaz parfaits, où k est la constante de Boltzmann), il est nécessaire de spécifier ce qui se produit pour la troisième variable pertinente, c'est à dire la température absolue T. L'implication " la densité (n) des particules diminue → la pression p diminue " - n'est valable que pour une température constante. En altitude, n et T sont tous deux plus faibles qu'au niveau de la mer, alors que dans un ballon d'air chaud, n est plus faible, mais T est plus élevée que l'air extérieur, ce qui explique que la pression interne P ne soit pas plus faible qu'à l'extérieur du ballon.

Une autre manière commune de réduire le nombre des variables effectivement considérées est de combiner deux variables comme si elles étaient deux facettes d'une même notion. " L'agitation thermique " est l'une de ces notions souvent utilisées par les apprenants et par les auteurs de manuels scolaires, sorte de conglomérat entre deux grandeurs, ici la vitesse des particules et la distance moyenne entre celles-ci. Des affirmations telles que " les particules ont besoin de plus de place pour s'agiter ", " dans les solides, les particules ne peuvent pas bouger ", " l'agitation thermique est plus intense dans les gaz ", sont très souvent observées (Rozier & Viennot, 1991). En fait, " l'agitation thermique ", comprise comme l'énergie cinétique moyenne des particules, est seulement une fonction de la température (lorsque la thermodynamique classique est valable), et donc la distance moyenne entre les particules n'est pas un paramètre pertinent à cet égard. A l'équilibre thermique entre un gaz et un liquide par exemple, la température et donc " l'agitation thermique " sont les mêmes dans les deux phases.

Causalité et chronologie : le raisonnement causal linéaire

Un autre aspect de raisonnement commun est dégagé par Rozier (ibid.). Requis " d'expliquer " l'augmentation de volume résultant du chauffage (quasi statique) isobare d'un gaz, près de 40% d'étudiants d'échantillons universitaires variés ont donné des réponses du type suivant :

" La température du gaz augmente. On sait que $PV = nRT$, donc à volume constant, la pression augmente : le piston est libre de glisser, donc il se déplace et le volume augmente "

La structure linéaire de cette réponse est évidente :

Approvisionnement de chaleur → T augmente → P augmente → V augmente.

Plus surprenante est la contradiction introduite entre cette réponse et les données, où la pression est dite constante.

Cette réponse apparemment contradictoire peut être comprise si les événements décrits n'étaient pas considérés comme simultanés (comme dans une analyse quasi statique). En effet, quelques élèves stipulent clairement qu'il y a deux étapes dans cet argument :

Première étape : Approvisionnement de chaleur \rightarrow T augmente \rightarrow P augmente, le volume restant constant.

Deuxième étape : P augmente \rightarrow V augmente, le piston est alors libéré.

Ceci suggère de reconsidérer le statut des flèches dans les arguments linéaires tels que ceux résumés ci-dessus. Ces flèches ne signifient pas seulement "donc" mais également "ensuite". Le mot totalement ambivalent "alors" (ou les mots équivalents "then" en anglais, "entonces" en espagnol) favorise ce mélange entre ces niveaux logique et chronologique.

Pour résumer les résultats de Rozier, un "raisonnement causal linéaire" est souvent observé.

Sa structure est celle d'une chaîne $\Phi_1 \rightarrow \Phi_2 \rightarrow \dots \rightarrow \Phi_n$, dans laquelle chaque phénomène Φ est spécifié par une seule grandeur, et où la causalité exprimée par une flèche a un contenu à la fois logique et chronologique. Dans leur ensemble, de tels arguments ressemblent à des histoires comprenant des événements simples et des épisodes successifs.

L'état stationnaire : un cas oublié

Comprendre les phénomènes comme successifs conduit à les considérer comme temporaires, ou du moins masque un raisonnement en terme de permanence. C'est en effet ce qu'observe Rozier. Un argument rencontré fréquemment pour expliquer une augmentation de la température dans un gaz comprimé de manière adiabatique, "les chocs entre molécules produisent de la chaleur", n'est presque jamais confronté, ni par les élèves ni par les enseignants, au résultat à long terme de ce phénomène supposé, c'est à dire une explosion. Les états stables de déséquilibre, par exemple dans une serre ou dans un bolomètre, font souvent émerger des commentaires tels que : "il rentre plus d'énergie qu'il n'en sort, donc la température est plus haute". Ce qui résulterait à long terme de flux non équilibrés, encore une fois une explosion, n'est pas envisagé. Ce centrage implicite sur une phase de changement bloque un contrôle de validité qui reposerait sur une analyse de l'évolution à long terme du système (voir aussi Viennot, 1993b).

L'importance des taux de changement dans les raisonnements des étudiants est également soulignée par Kesidou et al. (1995). Ces auteurs rapportent le cas d'élèves âgés entre 15 et 16 ans qui nient l'égalisation de la température pour un morceau de métal à 20°C placé dans de l'eau à 80°C, en indiquant que les taux de variation de la température sont différents pour les deux corps en contact. Ceci montre combien il peut être difficile de réconcilier des idées sur les changements et celle d'un état final stationnaire.

En bref, il est commun d'expliquer les états stationnaires avec des arguments implicitement centrés sur une phase particulière du changement, ou de se centrer sur une phase du changement sans considérer de manière cohérente la fin de l'histoire. En conséquence, le rôle joué par le temps semble souvent totalement occulté dans les arguments des élèves. Reprenons par exemple le commentaire cité plus haut : (dans un four à 60°C) "les clous sont à plus de 60°C parce que le métal chauffe plus vite". Manifestement (selon l'auteur de ce chapitre), les élèves qui ont donné cette réponse se sont centrés sur un *taux de changement* et non sur l'état d'équilibre final (*permanent*), sans faire de distinction claire entre ces aspects.

En conclusion : quelques lignes directrices pour le choix des objectifs d'enseignement

Les principaux aspects du "raisonnement causal linéaire" analysés ci-dessus semblent être largement partagés par les étudiants universitaires et les enfants. Pourtant, raisonner de manière cohérente selon les règles reconnues de la thermodynamique nécessite deux composantes essentielles qui sont en contradiction avec ces tendances communes de raisonnement:

- 1- identifier les systèmes pertinents et leurs caractéristiques pertinentes pour prédire les transferts de type chaleur plutôt que d'assigner simplement à des objets des propriétés

intrinsèquement liées à l'une des catégories : " chaud " ou " froid " ; plus généralement, considérer plusieurs causes pour un effet, contrairement au raisonnement causal linéaire.

2- distinguer clairement ce qui concerne d'une part les changements et d'autre part les états stationnaires.

Il est d'autant plus important, lors de la conception d'une séquence d'enseignement, de spécifier très précisément les objectifs conceptuels correspondants.

Bien entendu, ces objectifs doivent s'accorder avec l'analyse des phénomènes que donne la physique acceptée. Mais cette compatibilité est à rechercher à un niveau qui reste à définir. Les enseignants sont alors confrontés à des choix.

Ainsi, la question des explications à proposer aux apprenants est un problème crucial. Etant donné la complexité des phénomènes thermodynamiques, on peut suggérer d'adopter les attitudes suivantes (Rozier & Viennot, 1991) :

L'une d'entre elles est d'être extrêmement prudent quant au degré " d'explication " effectivement visé, et de spécifier ce que les arguments proposés ne réussissent pas à expliquer.

Par exemple :

" Les solides se dilatent lorsqu'ils sont chauffés (ou se contractent quand ils sont refroidis), mais nous ne pouvons pas (encore) expliquer pourquoi. Savoir que " l'agitation thermique " (énergie cinétique moyenne des particules) augmente (ou diminue) dans ce cas n'est pas suffisant pour expliquer pourquoi le solide se dilate (ou se contracte). En effet, les particules peuvent vibrer plus ou moins intensément, et rester autour de la même place sans que leur position moyenne ne dérive. "

On peut également travailler avec des explications " molles " qui sont centrées sur *une* variable prédominante, sans néanmoins cacher les dangers de leur extension sans précaution à d'autres cas. Par exemple, l'idée que " à haute altitude, il y a moins de molécules, et donc la pression est plus faible " nécessite l'ajout : " ce raisonnement fonctionne seulement si les molécules ont (à peu près, admettons) la même vitesse moyenne dans les deux situations comparées. "

Ce raisonnement qualitatif plus " serré " peut être considéré comme trop exigeant pour une population donnée, mais en fait le degré de cohérence requis peut être choisi dans un continuum qui s'étend des connaissances factuelles à la théorie acceptée. Par exemple, on peut juger approprié, pour une population donnée d'enfants, d'enseigner qu'au niveau de la mer l'eau bout à 100°C, et ceci sans la moindre explication. Mais si l'on introduit clairement certains facteurs qui n'affectent pas la température d'ébullition, tels que la quantité d'eau ou l'intensité du chauffage, cela constitue déjà le début d'un raisonnement à plusieurs variables.

Toujours dans un esprit d'adaptation réaliste à l'apprenant, on peut contester l'opportunité de viser une distinction claire entre chaleur et température . Mais si l'on décide de relever ce défi, il faut décider lequel des objectifs conceptuels suivants est fixé : le caractère intensif (respectivement extensif) de la température (respectivement chaleur), l'identification des systèmes et des paramètres pertinents, la distinction entre les phénomènes de la " catégorie restreinte " (seulement un transfert de chaleur et une variation de l'énergie cinétique) et des autres phénomènes (par exemple, les changements d'états).

De plus, les attitudes suggérées ci-dessus concernant les explications et les réserves correspondantes sont des composantes intrinsèques de la modélisation scientifique. Lorsque l'on sélectionne les objectifs d'un enseignement, on peut décider ou non de rendre explicite la question de la modélisation. Le lecteur trouvera dans les chapitres E3 (Méheut) et E4 (Psillos) de ce livre quelques analyses d'expériences concernant des séquences d'enseignement centrées sur la modélisation. Ces études constituent un complément nécessaire à ce chapitre.

Références

Andersson, B. (1979). Some aspects of children understanding of boiling point. in Proceedings of an International Seminar on Cognitive Development Research in Science and Mathematics. University of Leeds, Leeds

Andersson, B.(1986). The experimental gestalt of causation: a common core to pupils preconceptions in science. European Journal of Science Education, 8(2), 155-171.

Driver, R. & Russel, T. (1981). An investigation of the ideas of heat, temperature and change of state of children aged between 8 and 14 years, unpublished manuscript, University of Leeds, Leeds.

Driver, R., Guesnes, E. & Tiberghien, A. (1985). Some Features of Children's Ideas and their Implications for Teaching, In R. Driver, E. Guesnes, & A. Tiberghien (Eds.), Childrens' Ideas in Science. (pp.193-201). Milton Keynes: Open University Press.

Engels, E.(1982). The development of understanding of selected aspects of pressure, heat and evolution in pupils aged between 12-16 years. Unpublished PhD thesis, University of Leeds, Leeds.

Engel-Clough, E. & Driver, R. (1985). Secondary students' conceptions of the conduction of heat: bringing together personal and scientific views. Physics Education, 20, 176-182.

Erickson, G. (1980). Children's viewpoints of heat: A second look. Science Education, 64(3), 323-336.

Erickson, G. (1985). Heat and Temperature, part A, In R. Driver, E. Guesnes & A. Tiberghien (Eds.), Childrens' Ideas in Science. (pp.52-84). Milton Keynes: Open University Press.52-84

Gutiérrez, R. & Ogborn, J. (1992). A causal framework for analysing alternative conceptions. International Journal of Science Education ,14(2), 201-220.

Kesidou, S., Duit, R. & Glynn S.M. (1995). Conceptual Development in Physics: Students' Understanding of Heat. In S.M. Glynn and R. Duit (Eds), Learning Science in the Schools. (pp.. 179-198). Mahwah NJ: Lawrence-Erlbaum.

Lijnse, P., Licht, P., de Vos, W. and Waarlo, A.J. (Eds). Relating macroscopic Phenomena to Microscopic Particles. A central problem in secondary science education. Proceedings of a seminar. CD-β University of Utrecht, Utrecht.

Méheut, M. (1996). Designing a learning sequence about a prequantitative kinetic model of gases: the parts played by questions and by a computer simulation. International Journal of Science Education (to be published).

Rozier S. (1987). Le raisonnement lineaire causal en thermodynamique classique élémentaire, unpublished thesis, University of Paris 7.

Rozier S. & Viennot, L. (1991). Students' reasonings in thermodynamics. International Journal of Science Education, 13(2), 159-170.

Séré, M.G. (1985). The gaseous state, In R. Driver, E. Guesnes & A. Tiberghien (Eds.), Childrens' Ideas in Science. (pp.105-123). Milton Keynes: Open University Press.

Stavy & Berkovitz, B. (1980). Cognitive conflict as a basis for teaching quantitative aspects of the concept of temperature. Science Education, 64 (5), 679-692.

Strauss, S. (1981). U-Shaped Behavioural Growth Academic Press: Orlando and London

Tiberghien, A. (1984). Critical review on the research aimed at elucidating the sense that the notion of temperature and heat have for students aged 10 to 16 years, In Research on Physics Education, Proceedings of an International Workshop, la Londe les Maures, .CNRS, Paris, 75-90

Tiberghien, A. (1985), Heat and Temperature, part B, In R. Driver, E. Guesnes & A. Tiberghien (Eds.), Childrens' Ideas in Science. (pp. 52-84). Milton Keynes: Open University Press.

Viennot, L. (1993a). Fundamental patterns in common reasoning: examples in physics, In P.Lijnse (Ed.), European Research in Science Education, Proceedings of the first PhD Summerschool. (pp.33-47). CD-β University of Utrecht, Utrecht.

Viennot, L. (1993b). Temps et Causalité dans les raisonnements des étudiants en physique, Didaskalia, 1, 13-27.