

ECHANGES THERMIQUES

Jacqueline Agabra

Cet article s'inscrit dans le cadre d'une recherche plus large sur l'enseignement de l'énergie, à l'école élémentaire, dans les collèges et dans les lycées. On y trouvera une tentative d'utilisation de l'analyse historique et épistémologique du concept de chaleur pour mieux comprendre les représentations des enfants, mais aussi, en s'appuyant sur les travaux des enseignants du groupe de recherche réalisés en classe, des propositions d'objectifs et d'activités tenant compte des difficultés rencontrées au cours de la construction du concept.

PREMIERE PARTIE : ANALYSE DE LA MATIERE

1. A TRAVERS L'HISTOIRE DES SCIENCES : OU COMMENT EST-ON PASSE DE LA CHALEUR SENSIBLE A LA CHALEUR CONSIDEREE COMME UN MODE DE TRANSFERT DE L'ENERGIE

Nous n'avons pas comme projet de présenter ici une histoire exhaustive de la chaleur mais de pointer les difficultés historiques de la construction du concept en espérant que cela nous aidera à mieux comprendre le double statut de la chaleur, calorimétrique et énergétique.

L'histoire de la chaleur ne se réduit pas à celle de la lutte entre les théories substantialistes et les théories mécanistes. Il apparaît que sans la construction préalable de la différenciation entre température et quantité de chaleur, la théorie mécaniste était inopérante pour établir l'équivalence chaleur et travail, compte-tenu de l'impossibilité de décrire quantitativement des interactions à l'échelle microscopique avec les théories et le support expérimental de l'époque où le premier principe de la thermodynamique a été énoncé (Joule 1843-1850), même si cette théorie était nécessaire pour la fonder.

Ce qui suit n'est pas une histoire de la construction du concept de chaleur et des concepts liés ; nous voulons seulement montrer quels sont les points de rupture et le rôle spécifique des deux théories. Nous nous appuyons essentiellement sur deux ouvrages : Gaston Bachelard, **Etude de l'évolution d'un problème de physique : la propagation thermique dans les solides**. Paris. Vrin. 1973, et Francis

Halbwachs, **Histoire de la chaleur**. Paris. CUIDE n°17. Sept. 1980.

1.1. De l'intuition thermique à la calorimétrie, de l'Antiquité au XVIIIème siècle

. Des systèmes d'explications d'abord qualitatifs : les théories substantialistes et mécanistes de la chaleur

Chez la plupart des penseurs de l'Antiquité, il y a indistinction entre les concepts de chaleur et de température. Chez Aristote, la matière a quatre qualités fondamentales et opposées : chaud, froid, humide et sec. Il en déduit quatre couples possibles de qualités, en excluant les couples d'opposés, qui constituent les quatre éléments :

- le feu correspond au couple chaud-sec
- l'eau au froid-humide
- la terre au froid-sec
- l'air à l'humide-chaud.

Mais "absolument parlant, ils sont chacun une qualité propre : pour la terre c'est le sec, pour l'eau c'est le froid, pour le feu c'est le chaud et pour l'air l'humide"(1). Toutes les substances sont considérées comme des mélanges en proportions variables de ces quatre éléments et donc particulièrement de chaud et de froid.

indistinction première
des concepts : chaleur
température, matière

Mais on trouve aussi l'indistinction entre les qualités de la matière et la matière elle-même, le chaud et le froid considérés comme deux qualités opposées de la matière et non comme des degrés de "chaleur", et même substantialisées.

Chez Lucrèce, on parle de deux substances distinctes, le chaud qui s'écoule du soleil, et le froid qui s'écoule des rivières.

Cette "substantialisation" du chaud et du froid, au point de leur attribuer une pesanteur ("c'est par son élan au moment où elle est engendrée que la flamme peut s'élever") persistera jusqu'au XVIIIème siècle, ainsi que l'idée de mélange de ces deux substances.

Pourtant Platon antérieurement se représentait la chaleur, sous la forme de feu, comme une entité distincte de la température : "le feu qui par lui-même n'est ni brûlant, ni éclairant, pénètre dans un corps, met en mouvement les particules et les détache les unes des autres. Si le feu

(1) ARISTOTE. **Physique et métaphysique**. Paris. PUF.1966.

est éloigné, le corps se refroidit et l'air qui vient remplacer le feu comprime à nouveau les particules. L'échauffement s'accompagne de dilatation".

Parallèlement et conjointement se développeront des théories mécanistes de la chaleur. Elles vont coexister longtemps, jusqu'à la théorie cinétique de Boltzman (autour de 1870) et de ses successeurs.

L'histoire de la chaleur apparaît à certains comme un combat d'où la théorie substancialiste, erronée, est finalement et heureusement sortie vaincue. Halbwachs (2) insiste sur le fait que "cette vision est elle-même simpliste et erronée" car en effet "ces théories ne sont pas sur le même plan, elles ne parlent pas de la même chose".

la théorie substancialiste : des outils pour construire des concepts

- La théorie substancialiste met en jeu immédiatement une substance correspondant à une **quantité**, conservative et additive, et porte en elle le concept de quantité de chaleur dans les échanges thermiques. Elle permet de construire un concept opératoire, d'établir des relations. Elle a été historiquement -et elle est sans doute pédagogiquement- la mieux adaptée pour construire la différenciation entre chaleur et température sans qu'on n'ait rien besoin de savoir sur "la vraie nature de la chaleur".

La théorie substancialiste, qu'on retrouve au XVII^e siècle (Gilbert, Galilée, Gassendi, Boyle) reçoit un contenu opératoire avec la théorie du phlogistique (Becher et Stahl 1700-1720) appliquée aux réactions chimiques. C'est aussi vers 1720 que se développe la théorie du calorique (Wolf). Au début du XVIII^e siècle, cette théorie identifiant la chaleur à un fluide fournit un cadre conceptuel permettant d'interpréter l'ensemble des faits expérimentaux connus à cette époque. Et même l'échauffement d'un morceau de métal par martelage! : "le martelage fait gicler le calorique hors des pores du métal, comme giclerait l'eau d'une éponge que l'on soumettrait au même traitement. Lorsqu'on alèse l'âme d'un canon avec un outil, les copeaux arrachés par l'outil sont brûlants : c'est que les copeaux, tous menus, ne peuvent retenir le calorique qu'ils contiennent et celui-ci s'échappe en produisant une élévation de température".

Malgré le développement au XVIII^e siècle de thermomètres suffisamment précis, on continue à croire que le thermomètre détermine tout ce qu'on peut et tout ce

(2) Francis HALBWACHS, **Histoire de la chaleur**, Paris, CUIDE n°17, Septembre 1980.

qu'on a besoin de savoir sur la chaleur. Autrement dit, la chaleur n'est pas en relation avec le corps où elle se développe et un seul paramètre suffit à la caractériser. On n'a encore qu'un mot : "calor", pour désigner tous les caractères d'un phénomène complexe, et qu'un instrument.

Les théories mécanistes : des outils pour interpréter

- Les théories mécanistes ou cinétiques recherchent une interprétation du chaud et du froid en tant qu'états thermiques de la matière, ces états thermiques étant identifiés à des états mécaniques de mouvements ou de vibrations à l'échelle microscopique. Elles apparaissent d'abord comme une théorie de la température. C'est dans le traité de Lavoisier-Laplace qu'elles apparaissent sous un point de vue énergétique et que chaleur désigne la quantité de chaleur.

La théorie mécaniste s'est beaucoup développée, particulièrement à partir de la Renaissance. Au XVII^{ème} siècle, Bacon attribue le "chaud" aux mouvements internes de la matière. On retrouve cette conception chez Képler, Francis Bacon de Verulam, Descartes (1644), Bayle, Huygens (1690). Descartes la formule ainsi : "c'est une agitation des petites parties des corps terrestres qu'on nomme en eux chaleur (soit qu'elle soit excitée par la lumière du soleil ou par quelque autre cause) principalement lorsqu'elle est plus grande que de coutume et qu'elle peut mouvoir assez fort les nerfs de notre main pour être sentie : car cette dénomination de chaleur se rapporte à l'attouchement".

Halbwachs voit là une théorie de la température plutôt qu'une théorie de la chaleur. Cela ne nous paraît pas aussi net. Pour notre part, c'est une théorie de la "chaleur sensible" qui dépend bien sûr de la température, mais de bien d'autres grandeurs physiques. "La température n'est qu'une des variables d'un complexe" (Bachelard). La sensation ne peut fournir même un simple repérage des températures, lorsqu'on a affaire à des corps de substances et de masses différentes. La théorie de Descartes correspond au concept indifférencié chaleur-température. Les théories mécanistes, bien que très persistantes et constituant une doctrine dominante dans les milieux scientifiques du XVIII^{ème} siècle, resteront impuissantes à sortir du domaine qualitatif.

. Un atout décisif pour la théorie substantialiste : le passage au quantitatif

différenciation
chaleur - température :

C'est le passage au quantitatif qui permet la construction des concepts. On finit par se rendre compte que la rapidité de refroidissement de boulets, par exemple, ne dépend pas seulement de leur température et de leur surface extérieure, comme l'affirmait Newton, mais aussi de

leur substance. De même on finit par se rendre compte que la quantité de corps échauffé doit intervenir sans qu'on puisse affirmer s'il s'agit de son volume ou de sa masse. C'est à partir de la simple composition des idées de température et de masse que le concept de chaleur se distingue du concept de température.

quantité de chaleur

En 1747, Ritchmann introduit, avec le produit masse x température, la mesure de la "réserve calorique" que contient un corps, qui satisfait au principe d'additivité et qui s'appuie sur le principe d'indestructibilité de la chaleur.

chaleur spécifique

Pourtant le phénomène complet de l'échange thermique n'est pas encore clairement compris. Il reste à préciser le rôle spécifique de la substance. Lambert dégage clairement que "deux corps de même masse mais de nature différente réagissent différemment à la même quantité de chaleur". Puis Black (1760) met en place le concept de chaleur spécifique : "le mercure a moins de capacité pour la matière calorifique que l'eau ; il réclame une moins grande quantité de chaleur pour élever la température d'un même nombre de degré".

chaleur latente

Les changements d'état présentent à l'égard du concept de chaleur des difficultés considérables. Comment concevoir que la température cesse d'augmenter à l'instant même où les effets de la chaleur sont les plus spectaculaires ? C'est encore Black qui introduisit la notion de **chaleur latente**, ceci en contestant les idées qu'avaient à cette époque tous les physiciens.

"La fusion était universellement considérée comme produite par l'apport d'une toute petite quantité de chaleur à un corps solide, après que celui-ci ait été chauffé jusqu'à son point de fusion et le retour à l'état liquide était considéré comme produit par une très petite diminution de la quantité de chaleur, après que le corps ait été refroidi jusqu'au même degré. On croyait que cette petite addition de chaleur au cours de la fusion était nécessaire pour produire la petite élévation de température indiquée par un thermomètre placé dans le liquide résultant...". Black trouva "bientôt des raisons pour rejeter cette opinion en contradiction avec beaucoup de faits observables, lorsqu'on les considère attentivement" et l'opinion qu'il se forma à partir de l'observation attentive des faits et des phénomènes est la suivante : "quand la glace ou une autre substance est fondue, je pense qu'elle reçoit une beaucoup plus grande quantité de chaleur qu'on ne peut le percevoir immédiatement après par le moyen du thermomètre. Une grande quantité de chaleur pénètre la substance dans cette occasion sans la rendre apparemment plus chaude d'après ce qu'on peut observer avec cet instrument. Cette chaleur doit être apportée à la substance pour la porter à

l'état liquide et j'affirme que cette addition de chaleur est la cause principale et immédiate de la liquéfaction produite". Un des arguments frappants de Black est l'allure très lente et progressive du dégel : "s'il suffisait d'une très petite addition de chaleur apportée par l'air au printemps pour réduire en eau les immenses quantités de neige et de glace formées au cours de l'hiver, alors cette fusion s'opèrerait en quelques minutes et il se produirait chaque fois des inondations catastrophiques". Il est remarquable que cette conséquence simple n'ait pas été aperçue immédiatement par tous les savants de l'époque.

Pour préciser les concepts, Black mesure la quantité de chaleur absorbée par la fusion de la glace, par la méthode des mélanges, ou inversement la quantité de chaleur dégagée par la solidification en étudiant le phénomène de surfusion. L'égalité de ces deux quantités achève de fonder tout le système opératoire : la grande quantité de chaleur absorbée au cours de la fusion n'est pas détruite, mais elle reste cachée, latente et peut être complètement récupérée à partir du liquide en le congelant.

Le principe de conservation de la chaleur est ainsi étendu en l'appliquant à la chaleur "latente" comme à la chaleur "sensible" avec élévation de température.

conservation de la chaleur

Black prend parti pour la théorie du calorique : "Lorsque nous observons que ce que nous appelons chaleur disparaît au cours de la liquéfaction de la glace, et réapparaît dans la congélation de l'eau, et un grand nombre de phénomènes analogues, nous pouvons difficilement éviter de penser à une **substance** qui peut s'unir avec les particules de l'eau de la même manière que, disons, les particules du Sel de Glauber s'unissent."

. Intérêts et limites des théories substantialistes

les théories substantialistes triomphent avec la calorimétrie

Il faut noter que toutes les expériences de Black et toutes les mesures calorimétriques s'accordent très bien avec la théorie substantialiste.

Cependant plusieurs points posent problème à cette époque. Si on peut penser naturellement la chaleur comme un fluide et qu'on dispose ainsi d'un cadre puissant pour construire les concepts de la calorimétrie, malheureusement elle n'en a pas toutes les propriétés, particulièrement celles liées à l'inertie : échec des tentatives pour mettre en évidence le poids du calorique, absence de phénomènes d'oscillations avant d'atteindre un état d'équilibre comme c'est le cas pour un gaz ou pour le "fluide électrique" qui avait été étudié quelques années auparavant. Toutefois la puissance opératoire de la théorie substantialiste est telle que dans leur "Mémoire sur la

mais les théories
mécanistes
préparent l'Energé-
tique

chaleur", en 1784, Lavoisier et Laplace exposent les deux modèles et refusent de choisir : "Peut-être sont-elles toutes les deux exactes". Pourtant leur exposé de la théorie mécanique marque un progrès essentiel en ce qui concerne l'aspect énergétique de la chaleur.

"Les autres physiciens considèrent seulement la chaleur comme le résultat de vibrations imperceptibles des molécules de la matière, les espaces vides entre les molécules leur permettant de vibrer dans tous les sens. Ce mouvement invisible est la chaleur. Sur la base du principe de conservation de la force vive, on peut exprimer ainsi cette définition : la chaleur est la force vive de ces vibrations, c'est-à-dire la somme des produits de la masse de chaque molécule par le carré de la vitesse".

1.2. De la calorimétrie à l'énergétique

Il est certain qu'une des sources de la conception mécaniste de la chaleur est dans l'existence de l'obtention de la chaleur par des chocs et des mouvements.

Francis Bacon de Verulan (1620) explique : "Dans tous ces exemples, de la chaleur est produite ou apparaît tout à coup dans ces corps, qui ne l'ont pas reçue de façon ordinaire par communication avec d'autres corps. Mais la seule cause de sa production est une force ou un choc mécanique ou une violence mécanique... Le plus ordinaire et même peut-être le seul effet d'une force ou d'un choc mécanique sur un corps est la production de quelque sorte de mouvement affectant le corps".

chaleur-travail :
d'abord un rapport de
causalité réciproque

Nous avons vu, cependant, qu'on peut expliquer qualitativement ces phénomènes avec la théorie substantialiste. De même, Sadi Carnot dans ses "réflexions sur la puissance motrice du feu" (1824) s'appuie au départ sur cette théorie.

Mais il faut bien remarquer que si on obtient bien du travail à partir de chaleur et réciproquement, ces faits ne suffisent pas à faire de la chaleur une grandeur énergétique. Dans le cadre de la théorie substantialiste, la chaleur n'est aucunement une équivalence du travail. Si on adopte le point de vue substantialiste, la chaleur est un fluide, le travail une grandeur abstraite, produit d'une force par un déplacement. Ces deux grandeurs n'ont en commun qu'un rapport de causalité réciproque. Encore une fois, l'approche qualitative donne trop vite raison aux théories. Et c'est en dehors du cadre de ces théories sur la nature de la chaleur que s'élabore le principe d'équivalence chaleur-travail. Si la théorie du calorique rend bien

premier échec du calorique : production d'une quantité illimitée de chaleur à partir de travail

compte de la conservation de la chaleur dans les échanges purement thermiques, et si dans ce contexte expérimental limité la chaleur apparaît comme une fonction d'état, ce n'est pas toujours le cas.

Rumford (1798), par des expériences précises, montre qu'on peut changer l'état d'un système en lui "enlevant de la chaleur" et le ramener ensuite dans son état initial en lui ajoutant, non pas de la chaleur mais du travail, de plusieurs façons : en frottant deux parties du système ensemble ou par le passage d'un courant électrique dans une résistance. Il montre qu'il est possible d'enlever une quantité illimitée de chaleur d'un système à condition seulement qu'on lui fournisse du travail en rapport avec la chaleur retirée. Mais ses contemporains restent encore très attachés à la théorie substantialiste.

équivalence énergétique chaleur-travail

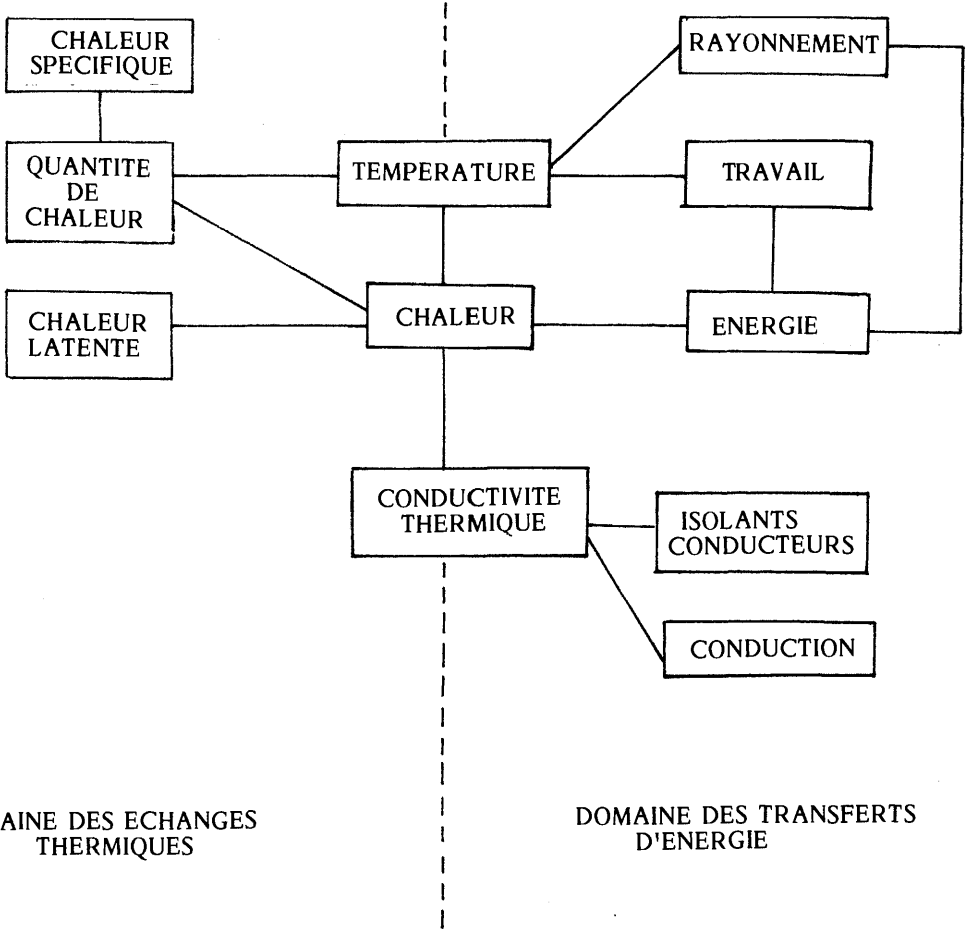
C'est seulement en 1843 que Joule établit définitivement l'équivalence chaleur-travail. La théorie mécaniste peut seule permettre l'expression du premier principe de la thermodynamique. **La quantité de chaleur mesurée par la calorimétrie devient une mesure de la quantité d'énergie transférée à un système.** La thermodynamique en cours d'élaboration tranche en faveur de la théorie mécaniste. Elle deviendra peu à peu cohérente à partir de 1860 (Clausius - Maxwell), 1870 (Boltzmann), 1900 (Gibbs). Enfin la thermodynamique statistique est une théorie mécaniste.

1.3. Modèle substantialiste et/ou mécaniste ?

On peut tenter d'établir une ligne de partage qui séparerait les domaines où l'emploi de l'un ou l'autre modèle se trouve le mieux adapté parce que le plus opératoire. Le diagramme proposé est bien sûr très réducteur : il est proposé comme un "outil pour penser" les représentations des élèves.

MODELE SUBSTANCIALISTE

MODELE MECANISTE



DOMAINE DES ECHANGES THERMIQUES

DOMAINE DES TRANSFERTS D'ENERGIE

2. POINTS DE VUE SUR LES CONCEPTS

Notre objet n'est pas de faire le point sur le concept d'énergie, mais de pointer quelques difficultés relatives au concept de chaleur, dans l'enseignement jusqu'à la classe de 1ère.

2.1. L'équivalence chaleur-travail

Le premier principe affirme que lorsqu'un système passe d'un état à un autre, la variation de son énergie ne dépend que de ses états, ce qu'on exprime simplement en disant que l'énergie U d'un système est une fonction d'état, ou que dU est une différentielle totale.

le premier principe :
l'énergie est une
fonction d'état

L'énergie totale d'un système est la somme de son énergie mécanique et de son énergie interne. Si le système est macroscopiquement au repos, son énergie se réduit à son énergie interne.

Le premier principe reconnaît deux modes de transfert de l'énergie pouvant intervenir **indifféremment** dans l'expression **quantitative** du bilan énergétique lorsque le système passe de l'état A à l'état B : la chaleur Q et le travail W .

$$U_B - U_A = W + Q$$

2.2. La chaleur est un mode particulier de transfert de l'énergie

En quoi diffèrent qualitativement des transferts d'énergie quantitativement équivalents :

"Les systèmes macroscopiques non isolés peuvent interagir et échanger de l'énergie. Un exemple est l'échange de travail visible à l'échelle macroscopique entre deux systèmes. Il est tout à fait possible que deux systèmes macroscopiques A et A' interagissent dans certaines conditions sans échanger aucun travail macroscopique.

Ce type d'**interaction**, que nous appellerons thermique, apparaît parce que l'énergie peut être transférée d'un système à l'autre à l'**échelle atomique**. L'énergie ainsi transférée s'appelle chaleur"(3).

(3) Frederik REIF. **Thermodynamique statistique**. Cours de Berkeley. Paris. Colin. 1972.

chaleur
mode de transfert
à l'échelle atomique

le terme "échanges"
d'usage courant est mal
adapté lorsqu'on consi-
dère une situation
déterminée

On peut déjà faire deux remarques :

- l'interaction thermique est caractérisée par un transfert d'énergie à **l'échelle atomique**.

Ce critère marque la frontière entre travail et chaleur. Nous précisons plus loin les implications de cette caractéristique.

- à propos du terme "échange": dans le même paragraphe, on trouve à la fois "échanger" et "transférer" de l'énergie. Le terme "échanges", d'usage courant, est mal adapté lorsqu'on considère une situation déterminée. Il est bien clair que, lorsqu'on fait interagir les deux systèmes A et A', il y a transfert d'énergie en ce sens que, par exemple, s'il n'y a pas d'autre interaction qu'entre A et A', l'augmentation d'énergie de l'un est égale à la diminution d'énergie de l'autre conformément au principe de conservation.

2.3. L'énergie est toujours conservée : la chaleur et le travail ne le sont pas en général

il n'y a pas plus de
"contenu de chaleur"
qu'il n'y a de
"contenu de travail"

Le premier principe fonde **l'équivalence** chaleur-travail en ce qui concerne le bilan énergétique. Cela veut dire par exemple qu'on peut enlever autant de chaleur que l'on veut à un système à condition de lui fournir du travail (frottement de deux parties d'un système l'une sur l'autre). Le modèle chaleur-fluide ne fonctionne plus, car il n'y a pas conservation de ce fluide. Il faut aussi assurer les conséquences logiques du premier principe. La chaleur de la calorimétrie n'est **que** de la chaleur, additive et conservative et **pas** de l'énergie. Toute la science calorimétrique ne dit que cela. **Dans ce contexte des purs échanges thermiques, on peut parler de stockage de la chaleur** car si on amène un corps de l'état A à B en lui fournissant une quantité de chaleur Q, on le ramène à état initial en lui enlevant la même quantité de chaleur Q. Mais ce n'est pas vrai dans les interactions quelconques. Une fois le transfert d'énergie terminé, ni le travail ni la chaleur mis en jeu pendant celui-ci n'apparaissent plus. Seul garde son sens l'énergie interne ; on ne peut donc pas parler de "contenu de chaleur", pas plus que l'on ne parle de "contenu de travail" ! Il faut prendre conscience que, si l'on n'est pas choqué par la première expression, alors qu'on l'est par l'autre, c'est à cause de "l'expérience sensible" que l'on a de la chaleur et de la persistance, inconsciente du modèle substantialiste.

Qu'est-ce qui permet de rattacher la chaleur à l'énergie ? Ce n'est pas parce qu'on peut obtenir du mouvement à partir d'un fluide que l'on chauffe, qu'on peut affirmer que la chaleur est une grandeur énergétique. De même la

notion de travail préexiste à la notion d'énergie, et il ne suffit pas de dire qu'on obtient du mouvement ou une élévation de température avec une force dont le point d'application se déplace. C'est parce que, quelles que soient toutes **les façons** dont on s'y prend pour faire passer un système de l'état A à l'état B, la somme de deux quantités, **définies par ailleurs**, de travail W , et de chaleur Q d'autre part, est toujours la même, alors seulement W et Q trouvent leur statut de modes de transfert "équivalents" de l'énergie.

2.4. A quels critères reconnaît-on un transfert sous forme de chaleur ?

Peut-on préciser sous quelles formes se feront les transferts d'énergie ? La notion de paramètres extérieurs au système peut être utile.

Il s'agit "de certains paramètres qui sont macroscopiquement mesurables et qui affectent le mouvement des particules. Par exemple le système peut être placé dans un champ magnétique B ou un champ électrique E . La présence de ces champs affectant le mouvement des particules du système, B ou E sont des paramètres extérieurs. De même supposons qu'un gaz soit placé dans une boîte de dimensions L_x, L_y, L_z . Chaque molécule du gaz doit alors se déplacer en restant à l'intérieur de la boîte. Les dimensions sont donc des paramètres extérieurs du gaz"⁽⁴⁾.

Dans tous les cas, **le travail reçu** par le système (qu'il soit moteur ou résistant) peut être aussi calculé **à partir des modifications du milieu extérieur** qui lui sont liées.

Si les paramètres extérieurs restent constants (par exemple système au repos indéformable), il y aura interaction thermique entre les systèmes.

Le principe zéro de la thermodynamique permet d'introduire la notion de température absolue T . "Si deux systèmes sont en "équilibre thermique (c'est-à-dire que leur état ne varie pas si on les met en interaction thermique) avec un même troisième, ils sont en équilibre thermique entre eux".

L'ensemble de tous les systèmes en équilibre thermique constitue une classe d'équivalence caractérisée par le paramètre T , appelé température absolue. Dans la pratique, on détermine la température mesurée avec un thermomètre particulier. C'est un fait d'expérience courante que si

(4) F. REIF. op. cit.

peut-on reconnaître un transfert d'énergie sous forme de chaleur ?

pour deux systèmes A et A', $\theta_A \neq \theta_{A'}$, ils ne sont pas en équilibre. Ils échangent de l'énergie sous forme de chaleur. Si au contraire $\theta_A = \theta_{A'}$, les températures étant toujours mesurées avec le même thermomètre, les deux systèmes n'échangent pas de chaleur.

Peut-on plus précisément donner quelques critères pour reconnaître la forme de transfert ?

- premier critère : la condition nécessaire et suffisante pour qu'il y ait transfert de chaleur entre deux systèmes est que **leur température soit différente.**

- deuxième critère : si les paramètres extérieurs d'un système restent inchangés au cours d'une interaction, il n'échange que de la chaleur avec l'extérieur : la chaleur correspond à **un transfert à l'échelle atomique.**

Les critères portant sur les effets observés -comme par exemple l'élévation de température du système- **ne sont pas pertinents.** Ce n'est pas par l'observation des effets que l'on peut dire comment a lieu le transfert. Le premier principe ne dit que cela : si l'énergie d'un système a varié de ΔU (avec variation de température par exemple) cette variation peut être obtenue **indifféremment** par chaleur, par travail ou par les deux. Une élévation de température ne traduit pas que l'interaction a été thermique. Il n'est donc **pas possible** de dire :

- . un système dont la température augmente a **reçu** de la chaleur
- . un système dont la température a augmenté a **emmagasiné** de la chaleur.

On parle couramment des "modes de transfert ou de propagation de la chaleur". Si on conserve le critère : la chaleur est un transfert à l'échelle atomique, on peut retenir deux mécanismes :

- 1) le transfert par conduction, c'est à dire par chocs entre particules de proche en proche, et qui nécessite donc le contact entre les systèmes en interaction.
- 2) le transfert par rayonnement, c'est à dire par interaction entre rayonnement et particules qui peut se faire à distance, même dans le vide. Ce type de transfert cesse aussi lorsque les corps en présence ont même température.

On retrouve une classification assez usuelle (en excluant la convection qui ne correspond pas une interaction purement thermique : il y a déplacement macroscopique, c'est-à-dire travail).

Mais ce n'est guère satisfaisant, car cela ne rend pas compte des propriétés du rayonnement qui fait bien autre chose qu'élever la température d'un système : il suffit de penser à un récepteur radio ou télévision, à des cellules photoélectriques, au bronzage, à la photosynthèse. L'interaction matière-rayonnement est complexe et ne contribue

pas seulement à augmenter le désordre dans la matière. Aussi la tendance actuelle est de réserver le terme de chaleur au transfert par conduction. Dans ces conditions il faudrait donc ajouter un dernier critère pour identifier un transfert d'énergie sous forme de chaleur :

- troisième critère : il doit y avoir **contact entre les systèmes en interaction.**

2.5. Des ambiguïtés dans le vocabulaire dont il est difficile de se débarrasser

Ayant reconnu le caractère énergétique de la chaleur, que penser des termes Energie thermique ou Energie calorifique souvent utilisés ? Ces termes sont référés tantôt au contenu d'énergie d'un système -l'énergie thermique des mers par exemple- tantôt à un mode de transfert particulier, auquel cas ils sont synonymes de chaleur et donc inutiles.

Dans le premier cas, ils font référence à l'énergie interne contenue dans un système "chaud" qui se refroidirait produisant un effet souhaité. Il faut rapprocher ces termes d'autres très utilisés comme énergie nucléaire, chimique, solaire, etc... La qualification d'une énergie par ces adjectifs n'a pas de sens pour le physicien. Mais elle en a un si on change de pratiques de référence. La qualification d'une forme d'énergie sert à caractériser les modifications subies par un système dont l'énergie interne a varié dans des conditions technologiques données. On peut récuser totalement l'emploi des termes Energie thermique ou calorifique car il entretient une confusion avec la chaleur, qui est un mode de transfert et qui est communément et abusivement, comme nous l'avons indiqué, liée à des variations de température. Car on pourrait être amené à dire qu'on a stocké de l'énergie thermique alors qu'il paraît inacceptable de dire qu'on a stocké de la chaleur ! Nous verrons ce que proposent programmes et manuels à ce sujet.

3. QUELS CONTENUS DANS L'ENSEIGNEMENT ?

Tous les travaux réalisés en classe sur lesquels nous nous sommes appuyés se situent dans le cadre des actuels programmes. Les modifications en cours des contenus et des instructions concernant l'enseignement des sciences ne nous paraissent pas devoir remettre en question nos analyses qui devront toutefois être resituées dans leur nouveau contexte.

Nous avons examiné plusieurs manuels de tous les niveaux. Notre objectif n'est pas de vanter les mérites de certains ou d'en critiquer d'autres. Nous voulons seulement pointer les grandes difficultés, que nous rencontrons tous, à éviter les pièges du langage courant. Pour rester compréhensibles, nous usons du vocabulaire usuel qui n'a rien de scientifique, nous employons des métaphores si parlantes qu'elles s'imposent souvent au détriment d'une construction correcte des concepts.

3.1. A l'école primaire

à l'école primaire

Les formulations sont très proches de celles de la vie courante en général : "conserver le chaud et le froid", "se protéger du chaud et du froid".

Lorsqu'il est employé, le mot chaleur est alors strictement synonyme du "chaud" par opposition au "froid". Cependant on trouve quelquefois des formulations plus élaborées : "des matériaux isolants pour la chaleur" ou "récupération de la chaleur, diminution des pertes de chaleur", mais qui n'apportent rien de plus en ce qui concerne le concept lui-même.

Parfois les objectifs sont plus ambitieux : par exemple mettre en évidence "la nécessité d'apporter de la chaleur au glaçon pour le faire fondre". Mais d'autres formulations étaient possibles. Les enfants ont à cet âge des représentations fortes sur les "pouvoirs" du chaud et du froid. Ainsi si on met des glaçons dans de l'eau à température ambiante, les enfants pensent ce sont les **glaçons** qui **donnent du froid**; mais à l'inverse, lorsqu'on plonge un glaçon dans de l'eau chaude, c'est elle qui a cette fois le rôle actif et ils disent que l'eau donne de la chaleur au glaçon.

3.2. Dans le premier cycle

. en Sixième

en Sixième

Le problème de la distinction chaleur-température est à peine effleuré dans la plupart des ouvrages, conformément aux instructions d'ailleurs. Tous pensent que c'est difficile :

"Nous avons parlé dans cette leçon de chaleur et de température. Qu'est-ce que la chaleur ? Qu'est-ce que la température ? Il est trop tôt pour répondre à ces questions : vous comprendrez mieux ces notions plus tard. Retenez que la température vous est indiquée par le thermomètre et qu'un apport de chaleur, qui souvent élève la température des corps, peut avoir aussi d'autres effets, changer l'état d'un corps, le vaporiser par exemple. Vous

pouvez aussi prévoir qu'une perte de chaleur aura les effets inverses et c'est à cela que vous devez réfléchir dans quelques-uns des exercices suivants".

Mais dans aucun ouvrage on ne trouve une amorce de la construction d'une différenciation des concepts.

. en Cinquième

en Cinquième

Comparons ce que deux manuels disent à propos de l'observation courante qu'un corps froid se réchauffe en présence d'un corps chaud.

1er manuel

2ème manuel

"Le corps froid reçoit de la chaleur du corps chaud et sa température augmente. Inversement la température du corps chaud diminue car il cède de la chaleur au corps froid".

"Quand deux corps sont à températures différentes, le corps le plus chaud est la source de chaleur et le corps le plus froid s'échauffe. On dit que la chaleur se propage à partir de la source".

Ici la notion de transfert est très explicitement liée aux effets observés. On se place résolument dans le domaine purement thermique.

Là, on part de la différence de température entre les corps pour parler de propagation de chaleur. On parle aussi de "source de chaleur" et on ne dit rien de son évolution thermique. Rien est très clair. Peut-être y-a-t-il une perspective énergétique à long terme. Nous reviendrons plus loin sur ce problème.

. en Quatrième

en Quatrième

Bien qu'explicitement au programme, cette notion n'est jamais construite, bien qu'utilisée. Actuellement il faut attendre la Première avec la calorimétrie !

L'énergie électrique et les effets thermiques du courant font la charnière entre la chaleur grandeur calorimétrique et la chaleur grandeur énergétique.

. en Troisième

en Troisième

Chaleur et énergie ont partie liée. On est surtout frappé par le manque de cohérence. Certaines choses sont affirmées, d'autres, que les premières impliquent, ne le sont pas. Les habitudes de langage s'imposent plus forte-

ment que la simple logique. Nous sommes tous menacés par ce danger et il est souvent plus facile de le dénoncer chez les autres que de le débusquer dans son propre discours. Ainsi on peut lire (c'est nous qui soulignons) :

" **Transformation** d'un travail moteur en énergie cinétique"
 " **Dissipation** d'énergie cinétique en chaleur... Il se confirme ainsi que la chaleur doit être considérée comme une des formes de l'énergie"

Qu'est-ce que ces affirmations impliquent quant à ce que l'on peut dire et ce que l'on ne peut pas dire ?

* Que la chaleur (forme d'énergie) pourrait être contenue dans un système au même titre qu'une autre forme d'énergie.

pourquoi un "contenu de chaleur"

C'est d'ailleurs ce qu'on trouve fréquemment dans beaucoup de livres sous l'expression "stockage de chaleur". Baptisée souvent énergie thermique ou calorifique à cette occasion, la chaleur figure aux côtés des autres formes d'énergie : nucléaire, mécanique, chimique etc...

et pourquoi pas un "contenu de travail" ?

* qu'on pourrait dire de même du travail (qui se "transforme" en énergie cinétique), mais on ne le dit pas, car personne n'arrive à imaginer ce que serait un contenu de travail.

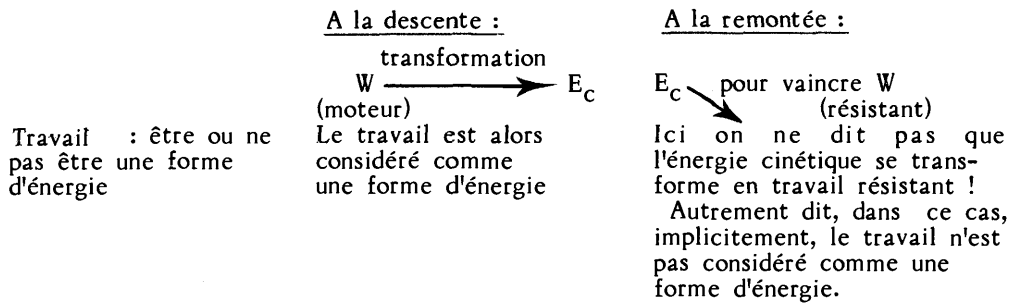
On s'aperçoit que chaleur et travail sont traités de façon dissymétrique, même si on se trouve dans le cadre -implicite il est vrai- du premier principe, et même dans des ouvrages où, pour certains exemples, on traite parallèlement les deux notions.

le travail moteur ne se transforme pas en énergie

il n'y a pas disparition d'énergie pour vaincre un travail moteur

D'autre part en affirmant la **transformation** d'un travail moteur **en** énergie cinétique, par exemple lors de la descente d'un corps le long d'une pente, on laisse croire qu'on peut **obtenir de l'énergie** sous une certaine forme en (ici cinétique) **au détriment** d'un travail. A la remontée, le problème est traité tout à fait différemment. Cette énergie cinétique "disparaîtrait" pour "**vaincre** le travail d'une force résistante", dit l'ouvrage.

On notera la dissymétrie des énoncés :



Même si la notion d'énergie potentielle de gravitation n'est pas explicitement au programme, elle apparaît dans ce schéma totalement inutile aux enfants. Cette présentation prépare mal à l'acquisition de cette notion qui est encore très difficilement comprise en classe de Première.

. en Première

en première

Nous avons comparé l'approche des notions de chaleur et de travail dans deux manuels.

Premier manuel :

travail

- Le travail est introduit en premier, indépendamment de toute notion énergétique : la définition est tout à fait opératoire et on peut "voir" s'il y a ou non un travail mécanique au cours d'une interaction.

chaleur

Puis le travail apparaît comme un mode de transfert de l'énergie, lié aux variations des deux formes de l'énergie mécanique, E_c et E_p .

- La démarche est totalement différente pour la chaleur, introduite pour combler le déficit énergétique lorsque l'énergie mécanique ne se conserve pas, et une interprétation microscopique est proposée. A propos de l'échauffement des freins, les auteurs concluent :

"l'interaction entre les particules du disque et celles des patins engendre des forces de frottements.

Le travail de ces forces provoque une augmentation de l'agitation désordonnée des particules, c'est-à-dire une augmentation de l'énergie d'agitation thermique. On observe alors un effet thermique.

... L'énergie mécanique disparue se trouve répartie entre les particules qui voient leur énergie cinétique d'agitation thermique et leur énergie potentielle d'interaction accrues".

le travail est un mode de transfert de l'énergie; il peut provoquer des effets thermiques ou des effets mécaniques

Ainsi le travail peut provoquer :

- soit des effets mécaniques macroscopiques
- soit des effets thermiques interprétables comme des effets mécaniques microscopiques et désordonnés.

Le travail est ici défini indépendamment de ses effets et représente un **mode de transfert de l'énergie**.

Les auteurs traitent différemment la chaleur. A propos des freins toujours, on peut lire:

"Pour qu'ils reviennent à leur température initiale, ils doivent perdre de l'énergie, c'est-à-dire que l'énergie mécanique microscopique des particules doit décroître. Nous dirons qu'ils doivent céder de la chaleur".

Ainsi **la chaleur** se trouve liée à **"ses effets"** : les variations de température.

Pourtant, plus loin on peut lire :

*Notons que l'expression usuelle de source de chaleur est douteuse parce que basée sur la confusion entre l'énergie fournie par la source et le mode de transfert de cette énergie. **Un corps ne stocke pas de chaleur mais de l'énergie.** Le corps 2 est dit corps froid (expression d'ailleurs douteuse)."*

Dans la suite de l'ouvrage, on trouve confirmé ce double point de vue sur la chaleur :

- d'une part on affirme que la chaleur est un mode de transfert de l'énergie, comme le travail
- d'autre part, elle est classée avec les "autres formes d'énergie".

"Energie thermique

*Nous savons que la chaleur est un mode de transfert d'énergie, appelée énergie calorifique ou **énergie thermique**, et qu'un système ne peut stocker de la chaleur.*

. Energie électrique → énergie rayonnante : la transformation 1 est obtenue dans une lampe électroluminescente improprement appelée "tube néon"

. Energie chimique → énergie rayonnante : la transformation 2 est réalisée par le ver luisant aux dépens de son énergie interne

. Energie mécanique → énergie rayonnante : la transformation 3 est observée (dans une salle obscure) en cassant un sucre dans l'air

. Energie thermique → énergie rayonnante : la transformation 4 est produite par un radiateur en fonctionnement qui émet un rayonnement infrarouge (que nous ressentons)

. Energie de masse → énergie rayonnante : la transformation 5 est un rayonnement émis par des corps radioactifs (cf. classe terminale)."

... On voit bien là quelles sont les difficultés à s'en tenir à un point de vue si on ne veut pas rompre totalement avec tous les usages habituels.

Deuxième manuel :

Dans le cas des systèmes mécaniques non conservatifs, les

le statut ambigu de la chaleur

mêmes effets obtenus par :	<p>auteurs introduisent la notion "d'énergie du système au repos", qui n'est autre que l'énergie interne du système, somme de l'énergie cinétique d'agitation thermique et de l'énergie potentielle d'interaction des particules. L'état microscopique d'un système est alors caractérisé par un certain nombre de paramètres.</p> <p>Les auteurs s'interrogent alors sur toutes les façons de faire varier l'état d'un système au repos (un récipient plein d'eau) c'est-à-dire son énergie interne :</p>
travail	<p>- soit par le travail d'une force extérieure (par exemple expérience de Joule)</p> <p>- soit sans travail d'une force extérieure, par exemple par simple contact du système avec l'air ambiant à température supérieure . Le transfert d'énergie s'effectue alors sous forme de chaleur du corps chaud vers le corps froid.</p>
chaleur	<p>Ici la définition de la chaleur n'est pas liée à l'effet obtenu : la chaleur s'affirme comme un mode de transfert particulier, qui nécessite deux conditions.</p> <p style="padding-left: 20px;">a) le contact entre les systèmes</p> <p style="padding-left: 20px;">b) une différence de température entre eux</p>
rayonnement	<p>- soit en plaçant un récipient noirci au soleil, alors que l'eau et l'air sont dans ce cas à la même température. Ce troisième mode de transfert sans contact est le rayonnement.</p>

DEUXIEME PARTIE : REPRESENTATIONS ET QUOTIDIEN

Certaines des représentations des enfants concernant les phénomènes purement thermiques sont déjà bien connues. Nous nous proposons d'en éclairer quelques aspects à partir de l'étude historique et épistémologique des concepts de chaleur et de température présentée dans la première partie.

Nous nous sommes appuyés essentiellement sur des travaux d'enfants portant sur des isolants thermiques. Nous essayerons de montrer que les représentations ne doivent pas seulement être considérées comme des obstacles à l'enseignement des notions. Leur singulière résistance au changement a des raisons qu'il s'agit de comprendre, mais aussi elles offrent des points d'appui trop souvent négligés.

Nous avons regroupé les représentations repérées sous cinq rubriques, centrées sur des concepts ou des relations entre concepts :

1 : Relations matière-température-chaleur

- 2 : Indifférenciation chaleur-température
- 3 : Substantialisation du chaud et du froid
- 4 : Conservation ou non conservation du "fluide calorique"
- 5 : Indistinction énergie-transfert d'énergie.
Substantialisation de l'énergie.

On peut également signaler une association froid-humidité souvent utilisée par les enfants.

1. RELATION SUBSTANCE - TEMPERATURE - CHALEUR

REPRESENTATIONS:

Certaines substances sont considérées comme "naturellement" plus chaudes (ou plus froides) que d'autres. "Elles tiennent chaud". Elles sont "froides" au toucher. Les plus couramment citées sont, pour les premières, la laine, la fourrure, tout ce qui est utilisé pour se réchauffer. Pour les secondes, le métal, le marbre etc...

Ces substances sont considérées comme des sources de chaleur primaires. Ainsi les enfants pensent que si on enveloppe une bouteille d'eau fraîche avec de la laine, celle-ci va la réchauffer.

D'autres substances comme le polystyrène, dont la fonction est d'isoler, sont diversement considérées.

Elles peuvent être vues comme des sources de chaleur primaires ou secondaires ou comme des sources de froid, ou simplement comme des obstacles.

Examinons en détail ce problème de la sensation thermique. C'est ainsi que débute souvent l'étude de la température : "notion de température par le toucher, le thermomètre". Or nous avons pu voir que malgré les progrès des thermomètres, au XVIIIe siècle, il subsiste de nombreuses difficultés dans l'analyse correcte des phénomènes thermiques.

origine sensible du
complexe matière-
température-chaleur

Nous savons que la sensation est impropre à vérifier la seule égalité des températures : plusieurs corps de substances variées, laissés dans une même pièce pour y atteindre ce qu'on appelle l'équilibre thermique, ne donnent pas la même sensation de "chaud" au toucher. Pour mieux "démontrer" l'imperfection de nos sens, on réalise communément l'expérience qui consiste, après avoir plongé une main dans de l'eau chaude et l'autre dans l'eau froide, à réunir les deux dans une même eau tiède qui paraît à la fois chaude et froide suivant la main .

"On suppose que les observations peuvent être rectifiées

par un emploi judicieux du tact thermique. En réalité, l'incapacité de ce tact a des causes profondes. En effet, **la température n'est qu'une des variables d'un complexe** (c'est nous qui soulignons) qui, dans la sensation moins encore que dans toute expérience de physique, ne se laisse pas analyser⁽⁵⁾.

Ce **n'est pas à la température** que nous sommes sensibles, mais la sensation est engagée dans le phénomène de propagation de la chaleur, pris avec toutes ses variables : la conductivité de la substance, sa température, sa chaleur massique, la surface de contact ...

"imperfection" de nos sens et/ou complexité de la sensation thermique

Examinons maintenant deux séries d'expériences très courantes et destinées à mettre en évidence "la relativité" de nos sensations, et à justifier l'emploi d'un instrument "objectif", le thermomètre.

1ère série :

. recueillir les diverses sensations thermiques fournies par différents objets d'une même pièce puis mesurer leurs températures (identiques) avec un thermomètre.

2ème série :

. plonger les mains gauche et droite dans de l'eau tiède après les avoir plongées respectivement dans l'eau froide ou chaude.

Ces deux séries d'expériences ne sont pas à mettre sur le même plan. Bien sûr, dans les deux cas, pour une même température, la sensation de la main est différente. Mais affirmer à la suite de cela que la main est un instrument de mesure imparfait de la température d'un corps est une conclusion qui masque la complexité du phénomène en réduisant la description de l'expérience thermique à la donnée d'une seule grandeur, la température. **"La température n'est pas, comme on serait tenté de le croire, un élément descriptif naturellement clair.**

Elle ne peut être précisée si les autres éléments de l'expérience thermique restent confus."⁽⁶⁾

(5)Gaston BACHELARD. **Etude sur l'évolution d'un problème physique : la propagation thermique dans les solides.** Paris. Vrin. 1973.

(6)Gaston BACHELARD. op. cit.

l'interprétation des sensations thermiques n'est pas évidente

la main n'est pas seulement un mauvais indicateur de la température. Elle fournit des renseignements pertinents sur les caractéristiques thermiques des objets

Dans la première série d'expériences :

"Le marbre de la cheminée paraîtra toujours froid, le tapis de la pièce toujours chaud : ces sensations ne sont pas contestables et "si on prétend partir de la seule sensation de température, on n'arrive pas à mettre correctement en relation deux objets différents" (7). Il n'y a pas dans ce cas imperfection de nos sens par rapport à un instrument physique - ici le thermomètre. Autre chose que la température de l'objet est engagée dans notre sensation.

Dans la deuxième série d'expériences :

Tous les paramètres autres que la température sont identiques. En mettant en défaut les sensations thermiques, on laisse croire que la main est un mauvais indicateur de la température. Oui, mais a contrario on ne dit rien des autres paramètres significatifs (conduction, capacité calorifique...) auxquelles la main est aussi sensible.

On peut d'ailleurs "objectiver" les sensations recueillies à l'aide de la mesure des températures de l'objet et de la main, avant et après contact, à l'aide d'un thermomètre à cristaux liquides. On peut observer que les variations locales diffèrent, signalant l'existence d'un échange thermique, et ne sont pas les mêmes suivant l'objet touché, avec des écarts très significatifs entre les corps isolants et les conducteurs thermiques.

Les résultats d'un questionnaire proposé à 700 élèves, dans le cadre d'une recherche INRP-LIRESPT de Paris VII (8), montrent que moins d'un tiers des élèves, au début de cinquième, admet que différentes substances côte à côte dans une même pièce sont à la même température. Les auteurs ajoutent :

"cette notion d'équilibre thermique, que nous avons particulièrement étudiée chez les élèves de 5e, est probablement très difficile à acquérir. Leur conviction, basée sur la sensation, est si forte qu'il leur arrive de mettre en doute le bon fonctionnement du thermomètre".

(7) Gaston BACHELARD. op. cit.

(8) **Chaud...froid...pas si simple.** Paris. INRP. Coll. Rencontres pédagogiques. 1985.n°3.

Le mot "conviction" paraît laisser entendre qu'il s'agit chez les enfants d'une sorte d'opinion, fortement enracinée, qu'heureusement la science objective pourrâéfuter. Nous pensons qu'il y a au contraire une réalité objective dans les sensations différenciées qu'on éprouve au toucher de corps à la même température, qui peut conduire à des classements, et que c'est seulement parce qu'on ne cherche pas systématiquement le rôle de tous les facteurs physiques de la variabilité de ces sensations que la notion d'équilibre thermique est difficile à construire.

On retrouve ces difficultés lorsqu'on étudie l'échauffement d'un corps avec une source de chaleur. Dans la recherche déjà citée, on posait à des élèves de Cinquième les questions suivantes :

On met sur les plaques électriques d'une cuisinière trois casseroles, l'une pleine de sucre, l'autre pleine de sable et la troisième pleine d'eau. Il y a un thermomètre dans chaque casserole.

Au bout d'un petit moment, si tu touches ce qu'il y a dans la casserole et si tu lis sur le thermomètre, est-ce que :

	tu te brûleras			la température aura augmenté			Explique ta réponse pour la température ?
	OUI	NON	je ne sais pas	OUI	NON	je ne sais pas	
pour le sable							
pour le sucre							
pour l'eau							

Le dépouillement des réponses révèle que "pour la majorité des élèves, la température de l'eau augmente, pour 56 % celle du sucre augmente, et pour 47 % celle du sable. Corrélativement, 85 % affirment qu'ils se brûleront avec l'eau, 60 % avec le sucre, 32 % avec le sable". Nous ne suivrons pas les auteurs qui trouvent ces résultats "tout à fait surprenants" et qui ajoutent "beaucoup classent a priori sans explication les substances : celles qui, par nature, peuvent chauffer et celles qui ne peuvent pas. Certains font appel à leur expérience personnelle."

les expériences
quotidiennes prouvent
que les corps ont des
comportements ther-
miques différents

Il apparaît clairement qu'il existe, fortement enraciné dans le vécu, l'idée d'un comportement thermique spécifique des corps ou de leur substance, que ce soit en ce qui concerne leur capacité d'échauffement ou la sensation de chaud ou de froid qu'ils procurent. Il ne faut donc pas s'étonner des réponses des enfants, ni surtout les rejeter dans la pensée préscientifique sans en tirer parti car elles sont la racine même de la construction des concepts de quantité de chaleur, de conductivité thermique, de capacité calorifique et de leur différenciation avec le concept de température. C'est à rester uniquement qualitative, comme dans la pensée aristotélicienne, qu'elles constituent seulement un obstacle, alors qu'elles sont un point d'appui. En conclusion, il ne faut pas voir le "tact thermique" comme l'appelle Bachelard comme un indicateur imprécis et peu fidèle de la température, mais comme un outil de découverte de facteurs pertinents.

2. INDIFFERENCIATION CHALEUR - TEMPERATURE

REPRESENTATIONS

Les énoncés des enfants contiennent indifféremment les mots chaleur ou température. Par exemple à propos de l'action de l'eau du robinet sur des glaçons :

"on produit un contraste de chaleur et de fraîcheur avec une température plus chaude que le glaçon qui le fait fondre peu à peu"

ou

"la chaleur de l'eau fait fondre le givre"

En fait, il est fréquent que les enfants donnent le premier rôle à la différence de température qui est le seul paramètre pris en compte. Jamais la quantité des substances en présence n'est envisagée quant aux effets observés. Ainsi il suffirait de mettre en contact une casserole contenant de l'eau froide avec une flamme à température supérieure à 100° pour que l'eau bout : ce que dément l'expérience. Comme nous l'avons vu à propos de la construction historique du concept de quantité de chaleur, longtemps la température a été considérée comme mesure de "la chaleur d'un corps".

Examinons aussi une expérience classiquement utilisée pour "démontrer" la différence entre chaleur et température : celle qui consiste à mettre en évidence la

la fixité de la température pendant les changements d'état : les faits ne parlent pas

fixité de la température pendant toute la durée d'un changement d'état, par exemple pendant l'ébullition de l'eau, alors qu'on continue à chauffer.

Nous avons vu dans l'histoire des sciences que ces observations, correctement faites, étaient mal interprétées et qu'on pensait justement qu'une fois le processus de changement d'état amorcé, une très petite quantité de chaleur en rapport avec "la très petite variation de température était suffisante pour qu'il se poursuive".

Pour interpréter correctement cette expérience, il faut déjà être capable de faire la distinction entre chaleur et température, ce à quoi justement cette expérience est supposée conduire les élèves ; car on pourrait tout aussi bien penser que sitôt amorcé le changement d'état, la substance ayant absorbé tout le fluide-chaleur qu'elle pouvait n'en absorber plus et que toute la chaleur produite par la source de chauffage est perdue dans l'environnement. Les faits ne parlent pas d'eux-mêmes comme le prétend l'empirisme.

C'est bien aussi ce que note l'équipe du LIRESPT :

"Compte tenu de ces résultats, la possibilité d'une première approche de la distinction entre chaleur et température grâce à l'étude de l'ébullition de l'eau semble problématique. En effet, dans le cas de l'ébullition de l'eau les élèves peuvent correctement décrire l'expérience. Cependant, dans la mesure où la température est attachée à la substance, quelle différenciation entre température et chaleur peut-on envisager ?"

on ne peut pas se limiter à une approche strictement qualitative pour la construction de la distinction entre chaleur et température

On peut donc dire qu'on ne saurait faire construire la distinction chaleur-température sur cette expérience (même si en retirant la source de chaleur l'ébullition cesse). Il semble qu'il faille passer par le quantitatif, tout au moins par la réalisation d'expériences qui permettent de faire varier les effets, même si on ne fait pas à proprement parler des mesures et si on se contente d'observer les sens de variation.

Or que trouve-t-on le plus souvent ?

- soit une approche de type intuitif. On parle par exemple de "propagation de la chaleur" repérée par le toucher et au mieux par le seul thermomètre.

- ou bien on se pose des questions sur les mécanismes : est-ce que le chaud (ou la chaleur) entre, sort -ou bien le froid- ou est-ce que c'est l'air qui l'empêche etc...

une alliance objective : le modèle substantialiste et les échanges purement thermiques

L'histoire des sciences montre que la construction des concepts fondamentaux de quantité de chaleur, chaleur latente, chaleur spécifique et de température s'est faite sans rien savoir de la vraie nature de la chaleur. Toute la calorimétrie s'accommoda fort bien du modèle substantialiste, d'une "matière calorique" certes **impondé-**

nable mais conservative et additive.

3. SUBSTANCIALISATION DU CHAUD ET DU FROID

REPRESENTATIONS

"le polystyrène absorbe la chaleur et la garde"

"le polystyrène laisse rentrer le froid"

"le polystyrène garde le froid et ne laisse pas entrer la chaleur."

Nous distinguerons dans ces représentations :

1° - le modèle substantialiste

2° - le caractère absolu et opposé des deux entités : le chaud et le froid

En l'absence de tout autre modèle (qui serait fourni explicitement par les programmes par exemple) les enfants utilisent spontanément un modèle substantialiste qui, nous l'avons vu, a permis la construction de la calorimétrie.

De nombreuses expériences réalisées en classe consistent à placer des corps chaud ou froid dans des boîtes isolantes. On constate que, dans les deux cas, la température du corps intérieur varie, mais moins vite que si on enlève la boîte. Ces expériences peuvent très bien s'interpréter avec le modèle substantialiste.

Mais elles peuvent également être interprétées par un modèle à deux fluides : un fluide chaud se trouve en concurrence avec un fluide froid. Aucune expérience en classe ne peut réfuter ce modèle.

Les enfants proposent souvent des interprétations en terme de compétition entre chaud et froid :

- *Si on place un glaçon dans une boisson pour "rafraîchir", c'est le glaçon qui "donne du froid à l'eau".*

- *Mais si au contraire le glaçon est mis dans l'eau chaude, c'est l'eau chaude qui donne "de la chaleur au glaçon".*

Ils admettent difficilement qu'un corps "froid" comme l'eau du robinet puisse être source de chaleur pour un corps plus froid que lui.

Comment l'enfant se représente-t-il ces fluides chaud et froid ? Cela dépend des situations.

- Par exemple, il imagine un fluide particulier qui se propage dans une cuillère métallique plongée dans un liquide chaud.

- Par contre, dans les expériences de mélanges d'eau à des températures différentes ou de fusion de glaçon dans l'eau ou l'air, il identifie les fluides chaud et froid à la matière elle-même : eau chaude ou air froid.

Les états intermédiaires sont obtenus par mélange

- . soit des substances chaudes et froides
- . soit des fluides chauds et froids.

4. CONSERVATION OU NON-CONSERVATION DU "FLUIDE CALORIQUE"

REPRESENTATIONS

Compte-tenu de la non-différenciation chaleur-température chez les enfants, on serait tenté de dire qu'ils n'envisagent pas la conservation.

Ensuite, lorsque ces concepts sont distingués, au contraire la conservation semble aller de soi, la chaleur étant fortement substantialisée lorsque la conservation de la matière est reconnue par l'enfant.

le biais des expériences simples dans l'air ambiant...

Les comptes-rendus de travaux de classe portent souvent sur des expériences d'interaction thermique avec l'air ambiant. Or un système comme l'air ambiant se comporte pratiquement toujours comme source ou puits de chaleur, c'est-à-dire qu'on ne voit pas varier sa température, qu'il ne paraît aucunement modifié par l'interaction thermique (sauf dans le cas très manifeste de l'utilisation d'appareils de chauffage ou par le soleil) compte tenu de la très grande différence de "taille" entre les systèmes en interaction. Dans ces conditions la conservation du fluide calorique est impossible à mettre en évidence.

Nous n'avons fait aucune investigation systématique dans ce domaine. Des expériences comme celles rapportées dans la thèse de Marie-Anne Pierrard (9), et dont voici un extrait, pourraient servir de point d'appui.

(9) voir l'article de Marie-Anne PIERRARD, infra.

Réalisation de mélanges d'eau froide et d'eau chaude par les enfants.

Ces mélanges seront faits suivant des consignes notées au tableau :

- mélanger de l'eau froide et de l'eau chaude
- pour mesurer l'eau, l'unité de volume sera le pot de verre
- prendre chaque fois des volumes formés d'un nombre entier d'unités; noter chaque fois :

*la situation avant V et T d'eau froide
 V et T d'eau chaude

*la situation après V et T du mélange

Une courte discussion a lieu à propos des mélanges d'eau chaude et d'eau froide faits dans la vie courante (bain) : il faut agiter l'eau pour que le mélange se fasse bien, pour avoir la même température dans tout le mélange.

.....

Le maître demande aux élèves s'ils ont une idée de la température du mélange qu'ils vont obtenir. Il y a peu de réponses (s'il y a un même nombre de pots, la température sera comprise entre les deux ; peut-être de l'eau tiède ; ça dépend du nombre de pots ; la température du mélange sera plus haute que 0). Les élèves font leurs mélanges et notent les conditions d'expérience et les résultats dans un tableau identique au tableau adopté pour la classe.

.....

Recherche d'une règle à partir des résultats expérimentaux.

Des élèves font des remarques ("ça ressemble à une addition...") et l'idée que ces résultats doivent suivre une règle commence à se dégager.

Par groupes de trois, les élèves disposent de quatre tableaux différents de résultats et recherchent quelle règle ils peuvent suivre. Un groupe cherche si la température du mélange est "au milieu" des deux autres, un autre calcule une moyenne (sans le savoir), beaucoup font des calculs à partir des nombres figurant dans les tableaux. Les cahiers de brouillon de différents groupes figurent en annexe.

Les élèves qui pensent avoir obtenu un résultat viennent l'exposer. Les enfants cherchent des cas où la règle proposée (température au milieu des températures d'eau froide et d'eau chaude) fonctionne, et d'autres où elle ne fonctionne pas. Ils constatent que, quand les nombres de pots d'eau froide et d'eau chaude sont très différents, la règle ne s'applique pas ; quand ces nombres sont les mêmes, elle s'applique. Une règle est alors énoncée :

- quand les volumes sont égaux, on peut calculer la température du mélange
- quand on met plus d'eau chaude que d'eau froide, la température du mélange est plus près de l'eau chaude que de celle de l'eau froide et inversement.

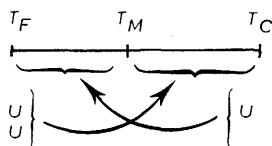
.....

Recherche d'une méthode pour calculer la température du mélange quand les volumes sont différents.

.....

Le maître pose ensuite la question de savoir si on peut calculer la température du mélange quand V_C est différent de V_F . Il fait rappeler les données expérimentales qui interviennent (volumes et températures d'eau froide et d'eau chaude), et demande aux élèves d'exposer leurs idées. Ils font des calculs partant de calculs de moyenne.

Ils n'obtiennent aucun résultat satisfaisant et le maître leur propose alors la droite numérique des températures comme instrument de recherche. Des élèves reportent les températures de quelques expériences prises au hasard sur des droites numériques des températures".



En conclusion, peut-on faire l'économie d'expériences de type calorimétrique ? Sinon, même en utilisant un thermomètre que peut-on réellement construire de plus que ce qu'apporte le vécu ?

5. INDISTINCTION ENERGIE ET TRANSFERT D'ENERGIE. SUBSTANCIALISATION DE L'ENERGIE

REPRESENTATIONS

Elles sont socialement répandues : dans toutes les brochures, les ouvrages et même les manuels, on parle indifféremment de transfert et de stockage de chaleur. Dans les situations où diverses "formes d'énergie" sont en jeu, on observe un emploi indifférencié des termes : chaleur, énergie calorifique ou thermique.

Ces termes désignent indifféremment le contenu d'énergie sous une forme particulière, et un mode de transfert de l'énergie. La distinction entre ces deux concepts n'est d'ailleurs pas évidente car la tendance à substantialiser l'énergie reste très forte et dans ce cas il n'y a aucune différence à faire entre ce qui est contenu dans un système et ce qui est transféré d'un système à un autre. Il faut d'ailleurs noter que ce modèle substantialiste s'accorde très bien avec le principe de conservation de l'énergie, comme il s'accorde avec la conservation de la chaleur dans les échanges purement thermiques.

Il y a donc beaucoup de difficultés à réserver le mot chaleur au transfert et à refuser "stockage de la chaleur".

Nous avons aussi signalé les obstacles liés à la reconnaissance d'un transfert de chaleur par observation des effets observés, c'est-à-dire la tendance à lier la définition de la chaleur à ses effets - élévation de température ou changement d'état.

TROISIEME PARTIE : LES OBJECTIFS FRANCHISSABLES

1. LA NOTION D'OBJECTIF-OBSTACLE

La notion d'objectif-obstacle intègre et dépasse la notion d'obstacle associé souvent aux représentations en mettant l'accent sur l'aspect dynamisant de l'obstacle et sur le pouvoir heuristique des représentations (voir Annexe 1 pour plus de détails sur cette notion).

Nous avons fait correspondre aux cinq groupes de représentations du chapitre précédent un certain nombre d'objectifs-obstacles. On les trouvera regroupés dans le tableau suivant.

Le terme d'objectif-obstacle renvoie à une stratégie pédagogique, à un choix de situations permettant l'élaboration de formulations qui peu à peu conduisent à la construction des concepts : nous aborderons ces points dans le chapitre suivant.

2. QUELS OBJECTIFS-OBSTACLES POUR LES NOTIONS DE TEMPERATURE ET DE CHALEUR ?

2.1. Tableau des objectifs-obstacles

Le passage des représentations aux objectifs-obstacles apparaît dans les intitulés des quatre colonnes de ce tableau. Les propositions retenues s'appuient à la fois sur un travail a priori résultant de l'analyse épistémologique et de l'histoire des concepts et, bien sûr, sur l'analyse à posteriori des travaux faits en classe et des questionnaires qui permettent de dégager les représentations des élèves et de mettre en évidence non seulement les difficultés mais aussi ce qui est faisable à un certain niveau.

CHALEUR - TEMPÉRATURE : TABLEAU DES OBJECTIFS-OBSTACLES

Représentations	Obstacles-empêchement (aspects négatifs)	Obstacles-appuis (aspects positifs)	Objectifs-obstacles
Indifférenciation chaleur - température substance	<ul style="list-style-type: none"> . Croyance en l'existence de corps chauds ou froids par nature . Confusion isolants - sources de chaleur 	<ul style="list-style-type: none"> . Les comportements thermiques des substances ne sont pas identiques et ne dépendent pas uniquement de leur température 	<p>Objectivation des sensations :</p> <ul style="list-style-type: none"> - la main n'est pas seulement sensible à la température d'un corps. - Tous les objets produisent une modification locale de la température de la peau. Les corps à la température de la pièce, qui paraissent "chauds" produisent un abaissement de la température moindre de ceux qui paraissent "froids".
Indifférenciation chaleur - température	<ul style="list-style-type: none"> . Croyance que la température est le seul paramètre opérant dans les échanges thermiques des autres paramètres ne sont pas pris en compte (masse, substance ...) . Impossibilité de construire la notion quantitative de quantité de chaleur. 		<p>Construction de la notion d'échange thermique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - L'évolution thermique d'un système ne dépend pas que de sa température et de celle des autres systèmes avec lesquels il est en contact. - Lorsqu'on se limite à, des échanges entre deux masses d'eau, il existe un invariant $m \times \Delta \theta$: c'est la quantité de chaleur fournie ou reçue.
Substantialisation de la chaleur	<ul style="list-style-type: none"> . Impossibilité de construire correctement l'équivalence chaleur - travail. La chaleur apparaît comme un simple agent causal du mouvement. 	<p>Modèle permettant des mesures et la construction des grandeurs quantitatives : quantité de chaleur, chaleur massique, chaleur latente ...</p>	<p>Dans le 1er cycle (jusqu'en 3e) : aucun dans le cadre des échanges purement thermique</p> <p>En 3e et dans le second cycle :</p> <ul style="list-style-type: none"> - La chaleur n'est qu'un mode de transfert de l'énergie; elle ne peut être stockée. - On peut obtenir une quantité illimitée de chaleur à partir de travail.
Conservation - Non conservation de la chaleur	<ul style="list-style-type: none"> . Conservation : voir substantialisation . Non conservation : impossibilité de construire la notion de quantité de chaleur 	<p>Conservation : voir substantialisation</p>	<p>voir substantialisation</p>
Confusion Energie - Transfert d'énergie	<ul style="list-style-type: none"> . Impossibilité de construire (ou de comprendre), le principe d'équivalence . Croyance que la forme de transfert de l'énergie détermine certains effets spécifiques c'est-à-dire détermine la forme d'énergie stockée dans un système. 		<p>On ne définit pas la chaleur par ses effets.</p> <ul style="list-style-type: none"> - On peut obtenir des effets thermiques (changement de température, changement d'état) sans transfert de chaleur.

2.2. Vers une construction des concepts

. Dans le cadre des échanges purement thermiques

la possibilité d'atteindre **la différenciation entre** les deux concepts **chaleur et température** nous paraît passer par une approche quantitative, et d'abord semi-quantitative (recherche de facteurs).

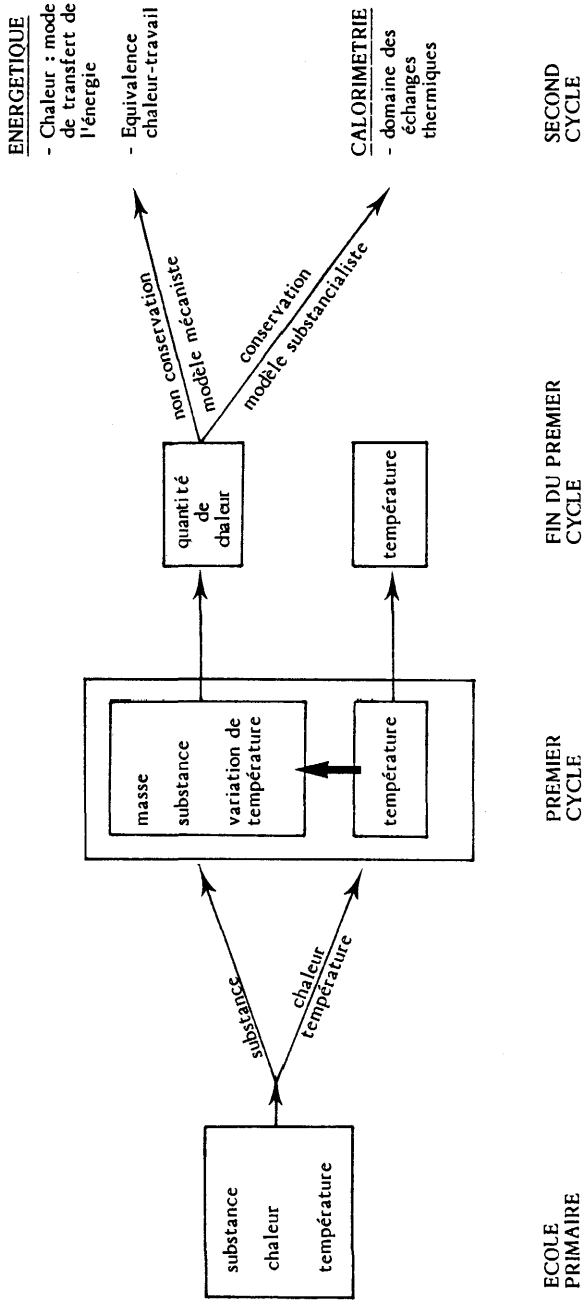
Il en est de même pour le concept de **conservation** de la chaleur qui s'appuie sur la notion de quantité de chaleur et s'accommode très bien du modèle substantialiste.

Le **modèle substantialiste fonctionnant très correctement** dans ce cadre limité, il est très difficile et sans doute inutile de le remplacer par le modèle mécaniste d'agitation thermique. Par contre, on pourrait préciser le rôle spécifique des corps chauds et froids et le sens de transfert du pseudo-fluide calorique. On peut interpréter tous les échanges purement thermiques en disant que la chaleur s'écoule toujours du corps chaud (celui qui a la température la plus élevée) vers le corps froid. La chaleur cesse de s'écouler lorsque la température est la même (même niveau). On parle alors d'équilibre thermique. La chaleur s'écoule (se propage) mieux dans certaines substances (conducteurs) que dans d'autres (isolants).

. Dans le cadre des transferts d'énergie

Il s'agit surtout de montrer qu'une élévation de température ne permet pas de conclure à un transfert d'énergie sous forme de chaleur. On ne définit pas la chaleur par ses effets et cela n'a pas de sens de parler de stockage de la chaleur. La non-conservation de la chaleur dans le cadre du premier principe de la thermodynamique, où chaleur et travail sont deux modes de transfert quantitativement équivalents, impose de **renoncer au modèle substantialiste**.

Le tableau suivant résume comment on peut concevoir la différenciation et la construction progressive des concepts.



QUATRIEME PARTIE : SITUATIONS ET FORMULATIONS

1. PRESENTATION

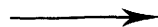
Notre objectif est d'analyser quelques situations expérimentales, dont la plupart sont bien connues, pour essayer de voir ce qui peut être dit et ce qui ne peut pas être dit à partir d'elles. Il s'agit de s'interroger sur leurs limites mais aussi sur ce qui reste souvent implicite et qui peut aider à la construction des concepts.

Les situations proposées ont été regroupées sous les mêmes rubriques déjà utilisées pour les représentations et les objectifs-obstacles. A l'intérieur de chaque groupe, il ne faut pas toujours chercher une progression d'une situation à celle qui suit.

A une situation donnée peuvent correspondre souvent plusieurs formulations. Cela veut dire que les formulations proposées sont toutes possibles : elles se complètent souvent mais certaines paraissent mieux adaptées à certains niveaux ou à certains contextes. D'autres, bien sûr, seraient possibles.

2. PANORAMA DE SITUATIONS ET DE FORMULATIONS

On trouvera, dans les tableaux des pages suivantes, un essai de mise en relation systématique entre les situations didactiques et les formulations qui peuvent correspondre à chacune avec le plus de précision.



Groupe 1 : INDIFFERENCIATION - CHALEUR - TEMPERATURE - SUBSTANCE

Situations	Formulations
<p>1 - Main droite dans eau chaude 2 - Main gauche dans eau froide 3 - Main droite et gauche dans eau tiède</p> <p>On touche différents corps placés dans une pièce avec la main et mesure de la température de la pièce et des corps avec un thermomètre - contact (à cristaux liquides)</p> <p>On maintient le contact quelques secondes et mesure de la température des parties qui ont été en contact.</p> <p>Mêmes expériences avec des objets placés dans un four tiède ou une yaourtière. ou dans un réfrigérateur</p> <p>On mesure ensuite les températures avec un thermomètre après avoir laissé les objets un certain temps dans la pièce</p>	<p>. Le toucher n'est pas un bon instrument de repérage de la température</p> <p>. Certains objets (plus précisément certaines substances placées dans une pièce paraissent plus chauds que d'autres. Pourtant le thermomètre indique la même température qui est aussi celle de la pièce. On dit qu'il y a <u>équilibre thermique</u> entre la pièce et les différents objets.</p> <p>Lorsqu'on touche un objet placé dans une pièce, pendant un certain temps, il y a augmentation de la température de l'objet et diminution de la température de la surface de la main. Le toucher modifie les températures de l'objet et de la main.</p> <p>. <u>La main et le thermomètre ne donnent pas les mêmes indications</u> lorsqu'on les met en contact avec des corps en équilibre thermique entre eux. Les corps qui au toucher paraissent les plus froids sont ceux qui provoquent les abaissements de températures les plus chauds (et inversement). Cet abaissement dépend non seulement de <u>la température</u> du corps mais aussi de <u>la masse</u> et de <u>la substance</u>.</p> <p>. Plus généralement, lorsqu'on laisse un temps suffisant des objets dans un four ou un réfrigérateur, ils prennent tous la température du milieu ambiant (à condition qu'il n'y ait pas de changement d'état) quels que soient leur substance, masse, forme, couleur ...</p> <p>. Bien que les températures initiales soient les mêmes les objets ne se refroidissent (ou ne se réchauffent) pas tous avec la même vitesse. La vitesse de refroidissement (ou d'échauffement) dépend entre autres de la substance, de la masse et pas seulement de la température.</p>

<p>On chauffe de la même façon différentes substances (eau, sable, huile - même quantité etc ...) et on mesure la température après un certain temps.</p>	<ul style="list-style-type: none"> La température atteinte, dépend de la substance. Certaines substances s'échauffent plus vite que d'autres.
<p>On met en contact des corps à température différentes</p>	<ul style="list-style-type: none"> La température du corps froid (celui qui a la température la plus basse) augmente. Celle du corps chaud diminue. On dit qu'il y a échange thermique. Avec un modèle substantialiste on peut dire que de la chaleur passe du corps chaud au corps froid. La température finale est la même. On dit que les corps sont en <u>équilibre thermique</u> entre eux. Si deux corps sont en équilibre thermique avec un même troisième, ils sont en équilibre thermique entre eux. Tout objet (qui n'est pas une source de chaleur) placé en temps suffisant dans une pièce, prend la température de celle-ci. Il y a <u>échange thermique</u> entre l'objet et l'air de la pièce, mais la température de l'air ambiant n'est pas sensiblement affectée.
<p>On entoure un thermomètre avec différentes substances : laine, polystyrène, plumes etc...</p>	<ul style="list-style-type: none"> La laine, le polystyrène, les plumes etc... corps "chauds" au toucher, ne provoquent pas d'élévation de la température. Ce ne sont pas <u>des sources de chaleur</u>. <p>Les notions de chaud et froid ne sont pas absolus. Un corps dit "froid" peut-être considéré comme chaud lorsqu'il est mis en contact avec un corps plus froid que lui et se refroidira encore.</p>

Groupe 2 : INDIFFERENCIATION CHALEUR - TEMPERATURE

<p>On chauffe de la même façon des quantités d'eau différentes pendant le même temps.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Si on chauffe de la même façon des quantités d'eau différentes, l'élévation de température est d'autant plus élevée que la quantité d'eau est petite. Lorsqu'on met en contact un corps avec une "source de chaleur", la vitesse de l'élévation de la température ne dépend pas que de la température de la source : elle dépend de la masse de la substance chauffée de température initiale de la nature de la substance mais aussi elle est plus rapide avec deux sources qu'une.
-------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

On mélange une même quantité d'eau chaude avec différentes quantités d'eau froide et on mesure la température finale.

Se rapporte aussi à substantialisation
conservation - non conservation.

On fait bouillir de l'eau en la chauffant.

On fait fondre de la paraffine en la chauffant

On n'arrive pas à porter à ébullition une très grande quantité d'eau avec la même source de chaleur - dont la température est bien supérieure à celle de l'ébullition de l'eau

On constate que laissé à l'air ambiant un glaçon fond, de l'eau froide se réchauffe de l'eau chaude se refroidit.

. Si on mélange des quantités d'eau à des températures différentes, la température finale du mélange ne dépend pas que des températures initiales.

Elle dépend aussi des masses en présence.

. Lorsqu'on met en contact deux corps à des températures différentes, (ici deux quantités d'eau) l'augmentation de température du plus froid n'est pas égale à la diminution de température du plus chaud.

. Le produit de la masse d'une des quantités d'eau (m) par sa variation de température (Δt) jusqu'à l'équilibre thermique est un invariant : c'est la quantité de chaleur cédée par l'eau la plus chaude et absorbée par l'eau la plus froide.

. Pour maintenir la fusion ou l'ébullition, il faut continuer à chauffer, mais la température n'augmente pas température de changement d'état.

. Il n'y a pas de "preuves" pour affirmer que le corps "absorbe" de la chaleur pendant un changement d'état du type ébullition ou fusion, à partir de cette seule expérience

. Au cours d'un changement d'état la température reste constante. Mais il ne suffit pas pour obtenir la fusion ou l'ébullition d'une substance de la mettre en contact avec une source de chaleur dont la température est supérieure à la température de fusion ou d'ébullition.

. Une source de chaleur est un corps capable de conserver une température sensiblement constante au cours d'un échange thermique avec un autre corps. L'air ambiant peut dans la plupart des cas être considéré comme une source de chaleur pour les corps qui ne le sont pas eux-mêmes.

. Il peut être considéré comme un "puits de chaleur" dans le cas où le corps en contact sont à température supérieure à la température ambiante.

Groupe 3 et 4 : SUBSTANCIALISATION DE LA CHALEUR
 CONSERVATION/NON CONSERVATION DE LA CHALEUR

Constatations de la vie courante concernant l'utilisation de différents matériaux : bois, fer, aluminium...

Expériences classiques de chauffage de types de différentes matières

On touche des substances conductrices ou isolantes de la chaleur.. On mesure la température des surfaces en contact, main et objet, après quelques instants

On étudie le refroidissement ou le réchauffement en fonction du temps (mesure de la température) de corps entourés de différents isolants.

On chauffe de l'eau avec un thermoplongeur placé soit au fond du récipient soit près de la surface et on mesure les températures de l'eau à différentes profondeurs.

On observe un mobile au dessus d'un radiateur, d'une bougie.

On réalise des échanges thermiques en empêchant le mélange de matière, par exemple en enfermant des glaçons dans un sac de plastique.

. La chaleur se propage plus ou moins vite suivant les substances.

Les substances dans lesquelles la chaleur se propage le plus vite sont appelées conducteurs thermiques. Les autres sont des isolants thermiques.

. Les conducteurs paraissent plus froids au toucher que les isolants. Les conducteurs provoquent une plus grande diminution de la température locale de la main que les isolants.

. Un isolant ralentit le refroidissement d'un corps plus chaud que le milieu extérieur. De même un isolant ralentit le réchauffement d'un corps plus froid que le milieu extérieur.

L'efficacité d'un isolant peut-être repéré par la mesure de la température du corps qu'il entoure cette efficacité dépend :

la nature de l'isolant de son épaisseur
 mais aussi elle dépend de l'écart de température entre le corps et le milieu extérieur.

. En aucun cas la température finale ne peut être différente de celle du milieu ambiant. Un isolant n'est pas une source de chaleur.

. Un liquide ou un gaz chauffé dans sa partie inférieure se met en mouvement et véhicule de la chaleur à distance de la source : c'est le phénomène de convection.

. Bien que les matières chaudes et froides ne se mélangent pas, on obtient un échange thermique, c'est à dire le corps chaud se refroidit pendant que le corps froid se réchauffe sans transfert de matière. La chaleur peut en quelque sorte être "séparée" du corps qui la transporte.

Groupe 5 : CONFUSION ENERGIE - TRANSFERT D'ENERGIE

<p>Situations de la vie courante, par exemple :</p> <ul style="list-style-type: none"> - chauffage des aliments - échauffement des freins - bouilloire électrique etc... 	<p>. Il y a de nombreuses façons pour provoquer une élévation de température d'un corps :</p> <ul style="list-style-type: none"> - par contact avec une source chaude (conduction thermique) - par l'intermédiaire d'un fluide chaud en mouvement (convection) - à distance même dans le vide (rayonnement) - par frottement ou chocs (travail d'une force) - par le passage du courant dans une résistance (travail électrique) <p>La nature de l'effet observé - ici une élévation de température, ne renseigne pas sur le mode de transfert d'énergie : il peut être de la chaleur, du rayonnement ou du travail mécanique ou électrique.</p> <p>. Inversement par transfert d'énergie sous forme de chaleur on peut obtenir des effets différents :</p> <ul style="list-style-type: none"> - une élévation de température - un changement d'état - du mouvement, - une réaction chimique <p>Un système peut produire indéfiniment de la chaleur lorsqu'on lui fournit du travail : il n'y a pas conservation de la chaleur lorsqu'on sort du cadre des échanges d'énergie purement thermiques.</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Jacqueline AGABRA
Ecole Normale de Bonneuil

*Cet article s'inscrit dans le cadre d'une recherche plus large, qui a déjà donné lieu à la publication de **Procédures d'apprentissage en sciences expérimentales**, collection Rapports de Recherche. n°3. 1985. INRP.*

Le premier rapport décrivait le cadre méthodologique de la recherche et caractérisait les éléments généraux de sa problématique (analyse de la matière et définition

de trames conceptuelles, étude des représentations, caractérisation des situations de structuration...).

Deux articles de la présente publication reprennent de façon plus détaillée certains aspects de la construction du concept d'énergie et de sa structuration progressive au cours de la scolarité.

Nous remercions tout particulièrement Marc Antoine, Yveline Baumes, Jean-Loup Canal, Bernard Charpentier, Robert Charrier, Annick Chauzeix, Jacqueline Cohen-Tannoudji, Eliane Darot, Martine Flécher, Jean-Claude Genzling, Yvonne Guy, Danièle Joumard, Michel Ledoux, Jean-Louis Marazzani, Marie-Anne Pierrard, Danièle Ragil, Claude Reynaud, Marie-Claude Royet, Michel Sanner, Catherine Théret, Jean-Pierre Viala et Jean-Marie Vivier qui ont participé aux groupes de travail de cette recherche et dont les productions ont servi de base à cet article.