

LA CONSERVATION, UN GRAND PRINCIPE

Jean-Louis Trelu
Jacques Toussaint

Cette réflexion met en évidence les difficultés rencontrées lors de la genèse d'un concept comme celui d'énergie, tant au plan épistémologique que pédagogique : quels sont les cheminements possibles, les obstacles à franchir ou contourner par les élèves dans un tel réseau multi-sémantique et peut-on en préciser les noeuds ? Par des essais de clarification et d'analyse de situations de classe à mettre en oeuvre, dont le mot énergie serait le pôle central, on tente de montrer des méthodes d'approche en terme de transferts et de conservation, d'un concept intégrateur d'un champ disciplinaire.

Cet article est le fruit du travail de deux groupes ayant choisi, l'un l'entrée transferts-transformations, l'autre l'entrée conservation lors de rencontres proposées par l'équipe de didactique des Sciences de l'INRP.

Les travaux de chacun des deux groupes ont rapidement montré la similitude des approches de chacun des thèmes.

L'étude des transformations et transferts, après une approche qualitative conduit, lorsqu'on introduit des mesures, à la recherche d'invariants ou à repérer des "pertes". Le physicien reconnaît là une démarche d'élaboration de la conservation.

L'étude de la conservation, elle, doit commencer par une mise en évidence qualitative des divers comportements possibles d'un système. On ne pourra quantifier, pour rechercher la conservation globale, que des paramètres ayant déjà été construits en partie, lors d'échanges avec d'autres systèmes.

S'attacher à une chaîne énergétique ou uniquement à un système ne permet pas d'affirmer que les deux types de démarche sont fondamentalement différents.

I. DU COTE DU SAVOIR

I.1. Les échos de l'université

. Que disent les scientifiques ?

**"derrière ce qui change il y a
"quelque chose" qui ne change pas"**

l'énergie : quantité,
nombre ou fonction ?

Pour le physicien une loi de conservation signifie qu'il existe un nombre que l'on peut calculer à un moment donné, puis, bien que la nature subisse de multiples variations, si l'on calcule cette quantité à un instant ultérieur, elle sera toujours la même : le nombre n'aura pas varié. Si l'on prend par exemple la conservation de l'énergie, c'est une quantité que l'on peut calculer suivant une certaine règle, et on obtient toujours le même nombre quoi qu'il arrive.

De toutes les lois de conservation, celle qui traite de l'énergie est la plus difficile, la plus abstraite, et cependant la plus utile. Dans ce cas nous avons un nombre qui ne varie pas avec le temps, et qui ne représente aucun objet particulier. On a ainsi découvert pour l'énergie une procédure avec une série de règles. A partir de chaque groupe de règles, on peut calculer un nombre pour chaque type d'énergie. En additionnant tous ces nombres ensemble, pour toutes les différentes formes d'énergie, on obtient toujours le même total. Mais il n'y a pas de véritables unités, pas de petits roulements à billes. C'est une abstraction purement mathématique : il y a un nombre qui reste le même, quel que soit l'instant où on le calcule (1). Pourtant il y a de nombreux cas, où ayant terminé les calculs, les nombres ne "marchent" pas. Cela amène à rechercher la justification des excédents ou déficits et les différentes formes (ou formules) appelées "formes d'énergie". D'où l'analogie monétaire très fréquente dans les ouvrages scientifiques : "dans le monde, il y a du changement". Du chaud devient tiède. Des corps tombent. Le feu brûle et les bûches se consomment.

énergie substance
ou "monnaie" ?

Ces transformations ne se font pas de façon arbitraire. Elles sont reliées entre elles par une sorte d'échange monétaire. **La monnaie**, ici, c'est **l'énergie**. Elle permet au physicien de tenir la comptabilité des phénomènes qu'il étudie.

(1) Richard FEYNMAN . **La nature de la physique**. Paris. Seuil. 1980

"Dans un canon, une charge de poudre explose. De l'énergie chimique (d'origine électromagnétique) est transformée partiellement en énergie cinétique (l'obus est lancé) et partiellement en énergie thermique (le canon s'échauffe). La somme des énergies cinétique et thermique, est égale à l'énergie chimique libérée. Il nous faut une unité d'échange. A la banque, on utilise le franc, ou le dollar. En physique, il existe plusieurs unités. Pour nous la plus utile sera "l'électron-volt". Le nom de cette unité pourrait laisser croire qu'elle ne peut s'appliquer qu'aux électrons. Il n'en n'est rien. Comme la valeur or n'est pas restreinte au commerce des bijoux, cette unité vaut bien au-delà. Voici quelques exemples. Un proton qui se déplace à 15 km par seconde possède une énergie cinétique d'un électron-volt. Un électron, plus léger, doté de la même énergie cinétique se déplace à 600 km par seconde..." (2). Poursuivons l'analogie monétaire : si chaque fait dans la société était considéré comme ayant la même valeur, alors l'échange serait très simple et il n'y aurait aucun besoin d'examiner les mérites respectifs de "marchandises" particulières. C'est à la nature qu'incombe la responsabilité de cette loi.

une loi absolue
ou limitée ?

Cette loi est-elle absolue ? Vers les années 1930, les physiciens découvraient l'existence du neutron, particule instable (demi-vie d'environ 15 mn), qui se transforme en un proton et un électron. Le bilan révélait moins d'énergie après la désintégration qu'avant. Confiant malgré tout dans la valeur de la loi, le physicien Fermi imagina l'existence d'une nouvelle particule, invisible, émise au moment de la réaction. Cette particule nommée "neutrino" (petit neutron), devait, par définition, posséder exactement l'énergie manquante et équilibrer le bilan énergétique de la réaction. Quelques années plus tard, cette particule fut effectivement détectée au laboratoire. Elle a progressivement pris une très grande importance en physique et en cosmologie. Cet événement est significatif. Il montre que la notion d'énergie est fructueuse et bien adaptée à la réalité. Pourtant, la loi de conservation n'est pas "absolue". Ses exigences sont reliées à la durée du phénomène observé. Tout se passe comme si l'énergie n'était pas conservée. Ces écarts jouent un rôle fondamental dans le comportement des particules individuelles. Au niveau de notre réalité quotidienne, qui implique des myriades de particules, ils se compensent et deviennent pratiquement

(2) Hubert REEVES. **Patience dans l'azur. L'évolution cosmique.** Paris. Seuil. 1981.

des problèmes
à prendre en
compte :

la réversibilité

le travail et
l'entropie

négligeables. La loi de conservation de l'énergie reprend alors ses exigences de précision.

Deux remarques peuvent être faites. Deux traits remarquables de l'énergie considérée comme une quantité sont sa **distribution** et sa **réversibilité**. C'est une chose de calculer et d'additionner toutes les formes avant et après un processus et d'essayer d'équilibrer l'équation, et c'est une toute autre chose de voir si elles sont "utilisables" ou non. Dans le cas du soleil et de la mer, si l'énergie s'obtient en faisant la somme d'un nombre énorme de petites quantités, si elle est largement distribuée, elle est pratiquement inutilisable. En principe, la plus grande partie de l'énergie convertie en descendant une colline peut être reconvertie pour remonter et ainsi de suite. Mieux encore, la plus grande part de l'énergie qui est convertie lorsqu'un véhicule s'arrête, peut, en principe, être récupérée et utilisée pour faire redémarrer le véhicule. Cependant, dans toutes les situations pratiques, non seulement les frottements sont responsables de la "dissipation" de l'énergie mécanique en énergie thermique, mais il est aussi nécessaire de tenir compte des contraintes d'ordre économique, technique, et d'environnement en essayant de rendre l'énergie disponible "utilisable" (cf. Council for Science and Society Report. 1979).

En physique, le concept d'énergie est fortement lié aux notions de "travail" et "d'entropie", concepts également complexes, quoique comme le dit Lehrman (1973), la vieille formule "l'énergie est la capacité de faire du travail" est à la fois inadéquate et trompeuse : l'entité "travail" ne se conserve pas. Le concept d'énergie est un outil analytique puissant, essentiel à la structure de la physique. Il est en relation avec nos idées sur le temps, l'espace et la gravité. Théobalds (1966) résume tout cela en disant : "demander ce qu'est l'énergie c'est comme se demander ce qu'est une charge électrique ou une particule newtonienne. La réponse à ces questions est qu'il n'y a pas de réponse, non pas par les faits mais par principe. Et cela signifie que la question ne devrait pas être posée. Il n'y a pas de structure pour l'énergie, parce que l'énergie est un concept fondamental de toute la physique de l'interaction ...".(3)

Conservons de ces propos qu'il faut rechercher une description la plus objective possible qui puisse recouvrir les préoccupations des différents domaines concernés, physique, technique, biologique et économique. Il semble

(3) D.M. WATTS. "The concepts force and energy", in P.J. KENNEDY and E. LORIA (ed). **Proceedings of the International Conference on Education for Physics Teaching**. Trieste. 1980.

pour cela nécessaire de recourir à la construction de la notion de système avec un caractère opératoire d'une part, accessible d'autre part, en même temps que celles d'énergie et de ses formes.

des projets pédagogiques existants

. Voyons, à présent, comment deux projets d'enseignement de l'énergie ont choisi de traiter le problème.(4)

- Le projet de G. Lemeignan et J. Agabra (collection Libres Parcours chez Hachette).

Dans ce projet le concept d'énergie se construit par un processus d'abstraction : "il existe quelque chose de commun contenu dans les réservoirs, mais ce quelque chose est très vague, il reste à définir. Ce sera la suite de l'apprentissage, avec les notions des formes, transfert, débit, conservation et dégradation de l'énergie qui le précisera".

Quant aux formes d'énergie, les auteurs proposent l'analogie "monétaire" précédemment citée : "de même que la fortune, possédée par une personne, peut être constituée d'éléments très divers, châteaux, bijoux, voitures etc... de même l'énergie est présente sous diverses formes, chimique, nucléaire..." Cette analogie restreint cependant l'acception du concept puisque, et les auteurs en sont conscients, elle ne permet pas d'inclure l'énergie cinétique qui n'est pas, elle, liée à la structure du système. Remarquons cependant, que lorsque Leibniz évoquait la dissipation de la force vive, lors de l'intervention de frottements par exemple, il comparait cette dissipation à de la petite monnaie !

- Le projet de Falk Hermann (5)

Objet d'un enseignement plus dilué, ce projet se situe aussi au niveau des enfants de collège (équivalent allemand). Le principe directeur du projet est le rôle essentiel que jouent en physique les grandeurs extensives fondamentales (celles qui expriment un "contenu"). Cet éclairage de la physique implique de considérer le principe de conserva-

(4) Jean-Louis MARTINAND. La construction de la notion d'énergie. in **Bulletin Aster** n° 20. INRP. Didactique des sciences expérimentales. 1983.

(5) FALK, HERMANN. **Neue Physik. Das Energiebuch.** Hambourg. Schroedel. 1981.

Livre du maître traduit par V. HOST.

Livre de l'élève, traduction partielle par J. AGABRA.

substantialisme

énergie et porteurs
d'énergie

tion comme secondaire, mais permet par contre d'accen-
tuer la description substantialiste, donc de permettre un
maniement facile de courants de transfert et de faire ap-
paraître les **flux** dans les actions de contact. Dans un
premier temps, il distingue l'énergie et ce qu'il appelle les
porteurs. Ceci amène à classer les divers phénomènes :

- . Courant d'énergie + charge électrique... Phénomènes électriques
- . Courant d'énergie + entropie... Phénomènes calorifiques
- . Courant d'énergie + matière... Phénomènes chimiques

Avec cette description, les formes d'énergie correspondent
aux porteurs, ce qui présente l'avantage d'une représenta-
tion aisée ; quant à l'énergie elle-même, elle correspond à
la charge énergétique de chaque porteur.

Pour Hermann, l'énergie est donc un élément invisible,
commun à tous les courants, qui assurent la marche des
machines, le chauffage, etc., les courants étant les for-
mes et ayant ainsi un aspect matériel.

En conclusion, ces deux projets, très différents, ont ce-
pendant une démarche commune à laquelle il semble dif-
ficile d'échapper : le recours à une classification, d'un
genre ou d'un autre, mais qui est au début de tout pro-
cessus d'abstraction. Néanmoins, on n'atteindra toute la
signification du concept d'énergie qu'en abordant le princi-
pe de conservation.

On ne peut donc exclure de tout projet d'enseignement
sur l'énergie une phase de mesures qui, peu ou prou, con-
duira à cette idée de conservation, point de passage obli-
gé si l'on veut s'extraire d'une simple description substan-
tialiste et atteindre une conception relationnelle physi-
quement rigoureuse.

. Histoire d'un concept

La façon dont, historiquement, s'est constituée la notion
d'énergie est éclairante quant aux deux approches, en
termes de transferts d'une part, de recherche de conser-
vation d'autre part.

On reconnaît habituellement deux grands courants qui ont
conduit, par leur fusion au milieu du XIX^{ème} siècle, à
élaborer le concept que l'on connaît aujourd'hui. Dans
chacun des deux, le courant mécaniste d'un côté, le cou-
rant des thermiciens de l'autre, on peut déceler ces deux
sortes d'approches. C'est de la confrontation, et du dépass-
ement apporté par chacune d'elle qu'est née une grandeur
cohérente et intégratrice.

▷ L'approche en termes de mécanique (6)

- Aspect statique

des propriétés des
"machines simples"...
... à une relation
d'équivalence,

entre une action et
un effet,

pour dégager un
principe général...

Dans les travaux de statique de Descartes, le concept de travail est utilisé par ses propriétés opératoires, tirées du fonctionnement des machines simples (poulie, plan incliné, vis, levier, treuil ...) Mais si la théorie de ces machines simples repose sur le principe d'égalité du travail moteur et du travail résistant, Descartes ressent la nécessité d'introduire une nouvelle grandeur, de concevoir un concept global immédiatement généralisable. C'est l'affirmation d'une relation d'équivalence entre les valeurs du produit : poids par hauteur, applicable à toutes les machines, donc détachée de la notion même de machine.

Mais cette équivalence entre deux grandeurs ne peut conduire à la définition de l'énergie, grandeur constante. Il faut encore franchir une étape : exprimer le travail moteur par un nombre positif et le travail résistant par un nombre négatif, afin que les variations totales soient nulles.

- Aspect cinétique

de la quantité de
mouvement aux
forces vives

S'appuyant sur des arguments théologiques ("...de peur d'attribuer au créateur de l'inconstance..."), Descartes a l'intuition de la conservation d'une quantité qui dépend du mouvement et de la matière (nous disons aujourd'hui de la vitesse et de la masse). Mais, pour Leibniz, cette compensation entre masse et vitesse ne peut expliquer l'impossibilité du mouvement perpétuel ; il faut donc chercher une autre représentation de la "force motrice". Mettant en relation la variation des "forces vives" avec le travail des forces appliquées au système, il énonce le théorème de l'énergie cinétique, qui prépare la généralisation du concept.

▷ L'approche en terme de "chaleur" (7)

deux théories vont
aussi s'affronter

Deux courants de pensée vont alors s'affronter, celui des "substantialistes" et celui des "mécanistes". Les second finiront au cours de l'histoire par l'emporter. Ces deux théories ne sont pas cependant à considérer sur le même plan, elles ne parlent pas de la même chose, en ce qui

(6) Francis HALBWACHS. **Histoire de l'Energie mécanique.** CUIDE n° 18. Janvier 1981.

(7) Francis HALBWACHS. **"Histoire de la chaleur"** CUIDE n° 17. Septembre 1980.

mais en utilisant
des itinéraires
différents

l'une, basée sur une
substance qui se
conserve

l'autre s'intéressant
aux transferts entre
particules

naissance et
mort

concerne la forme du concept à dégager et particulièrement de la distinction entre chaleur et température. La théorie mécanique cherche une interprétation du chaud et du froid en tant qu'états thermiques de la matière, tels que nous les font connaître nos sensations. Le mot chaleur est alors toujours accompagné par le mot **d'état** ou de **degré**.

La théorie mécanique est une théorie, non de la chaleur, mais de la **température**, et ceci jusqu'à une étape avancée, jusqu'au traité de Lavoisier-Laplace, où apparaît un point de vue énergétique, et où ainsi le mot chaleur désigne **la quantité de chaleur contenue dans un corps matériel**.

Au contraire la théorie substantialiste met en jeu, dès le début, directement une substance correspondant à **une quantité qui**, comme pour chaque substance, **est conservative et additive**. Elle porte donc avec elle, au moins potentiellement, les caractères opératoires de la "quantité de chaleur."

L'existence d'une telle substance se réfère à une conception plus métaphysique que scientifique. Ce point de vue erroné fut peu à peu refoulé et battu en brèche par l'autre théorie.

La théorie mécanique, très ancienne, attribue dès le XIII^{ème} Siècle, avec Roger Bacon, le "chaud" a des mouvements internes de la matière, distincts de ses mouvements externes, et aux efforts "contradictaires" des particules qui forment les corps. Elle deviendra cohérente vers 1860 (Clausius, Maxwell) et décrite avec précision par Boltzmann (1870) et Gibbs (1900).

Peut-on, mieux que Meyerson, exprimer la convergence des deux approches du concept d'énergie : une approche par recherche d'une grandeur conservative, l'autre par égalisation des valeurs de deux formes qui s'échangent.

"Ce que nous appelons le principe de la conservation de l'énergie a consisté à démontrer qu'aussi bien la chaleur que l'énergie mécanique prises isolément, peuvent naître et périr, mais qu'alors la disparition de l'énergie est accompagnée de l'apparition d'une certaine quantité d'énergie calorifique et vice versa." (8)

"Il ne nous reste plus qu'un énoncé pour le principe de conservation de l'énergie, il y a quelque chose qui demeure constant ... en passant du système classique au système énergétique, on a réalisé un progrès ; mais ce progrès

(8) Emile MEYERSON. **Identité et réalité**. Paris. Vrin. 1907.5^e éd. 1951.

en même temps, est insuffisant". (9)

. Un aperçu curriculaire

Comparons les anciens et les nouveaux programmes tant en primaire qu'au collège sur le thème de notre propos.

AU COURS MOYEN

AVANT	APRES
<p>Provoquer un mouvement en utilisant l'électricité (moteur d'un jouet à pile, ...), le travail musculaire (bicyclette, essoreuse à salade, batteur à manivelle,...), la déformation d'un objet élastique (jouets à ressorts ou à élastique, ...), le vent (moulinet, maquette d'éolienne ou de moulin à vent, ...), la chute d'un poids (horloge, tournebroche, moulin à sable,...).</p> <p>Produire de la chaleur ou de la lumière à partir d'un combustible, de l'électricité (chauffage, éclairage), du soleil (maquette de four solaire ; enflammer du papier avec une loupe : précautions à l'égard de ce type de risque d'incendie).</p> <p>Identifier dans des circonstances familières et variées la ou les sources d'énergie utilisées (appareils ménagers, réveil, automobile,...).</p> <p>S'interroger sur les conditions d'utilisation qui contribuent aux économies d'énergie (techniques d'isolation, mode d'utilisation des appareils, des véhicules, etc).</p>	<ul style="list-style-type: none"> . Les différentes sources d'énergie (minérale, hydraulique, solaire, nucléaire) . Consommation et économie d'énergie en France (chauffage solaire, isolation thermique etc...)

(9) Henri POINCARÉ. *La Science et l'hypothèse*. Paris. Flammarion. 1950.

AU COLLEGE EN 3ème

<p>1 . Travail et puissance</p> <ul style="list-style-type: none"> . définition du travail mécanique à rattacher à l'idée d'une "conservation" . dispositifs de transmission de puissance. <p>2 . Quelques exemples de transferts d'énergie</p> <ul style="list-style-type: none"> . notion d'énergie cinétique illustrée par des exemples;sa proportionnalité au carré de la vitesse . chaleur comme forme d'énergie . notion de rendement . énergie électrique et vie quotidienne. . l'ensemble du chapitre, dès le choix d'une définition du travail d'une force, est dominé par la notion <u>de conservation de l'énergie</u> : simultanément apparaît la notion de dégradation de l'énergie en chaleur. Ces acquisitions seront utilisées pour poser correctement quelques problèmes que ne peut ignorer le citoyen : consommation d'énergie et mode de vie ; pollution thermique ; sources actuelles d'énergie ; sources de remplacement et leurs possibilités réelles ; charlatanisme (moteur à eau), etc. 	<p>L'énergie électrique.</p> <p>Notions sommaires sur la puissance et l'énergie électriques. Puissance consommée par une lampe. Relation $P = U.I$</p> <p>Energie consommée par un appareil de chauffage, quantité de chaleur.</p> <p>Energie consommée par une installation, par un appareil électro-ménager : le compteur électrique.</p>
--	--

Il est aisé de remarquer la simplification aux termes de transfert et de consommation dans l'approche du concept d'énergie ; évolution qui vient de se produire dans les programmes de sciences physiques. La délimitation et la définition du système de référence n'est pas évoquée, et, nous le verrons un peu plus loin, cette notion est un possible parmi les possibles dans l'accès au concept. "Energie", un mot courant, très employé par tous les medias, qui gardera son mystère jusqu'à ce que nos enfants arrivent en second cycle scientifique.

I.2. Construire un concept : oui, mais en précisant certaines notions

Pour construire la notion d'énergie, le physicien ne peut éluder le problème de la définition d'un système : qu'est-ce qu'un système pour lui, quels types de systèmes utilise-t-on, quelles en sont les propriétés ? Voilà un ensemble de questions auxquelles il faut répondre afin d'avoir un langage commun d'une part, des significations précises pour chaque terme utilisé d'autre part.

Dans ce paragraphe, nous allons prendre quelques termes de ce type et en préciser le (ou les) sens scientifique(s). Chacun est un noeud du réseau qui sous-tend l'énergie, et a été rencontré lors de phases d'enseignement, mais ces termes ont-ils la même signification pour tous ?

. Système ?

pour le thermodynamicien : un système peut être fermé,

Un **système** est un corps ou un ensemble de corps de masse déterminée et délimité dans l'espace. Nous aurons à distinguer le système du reste du monde que nous appellerons le "milieu extérieur." La surface de contour qui sépare le système du milieu extérieur peut être une surface idéale, mais elle est le plus souvent matérialisée par des parois réelles. Un système peut échanger avec le milieu extérieur de l'énergie mécanique, calorifique, électrique, etc. Nous considérerons le plus souvent des systèmes dont la masse et la composition chimique restent invariables. Les parois sont alors imperméables à la matière. Nous appellerons de tels systèmes des **systèmes fermés**.

ouvert,...

Dans certains cas, nous aurons à considérer des systèmes qui sont susceptibles d'échanger de la matière avec le milieu extérieur et nous admettrons l'existence de parois spéciales dites "semi-perméables" qui ont la propriété de laisser filtrer certaines substances chimiques et de s'opposer au passage d'autres substances. De tels systèmes dont la masse et la composition chimique peuvent varier sont dits **systèmes ouverts**. (10)

ou isolé.

Un système est dit **isolé** si le milieu extérieur n'exerce sur lui aucune action de quelque nature que ce soit. Un fil électrique est isolé pour éviter toute interaction électrique (court-circuit) avec le milieu extérieur.

L'emballage d'une crème glacée est un isolant thermique

(10) A. KASTLER. Cours de thermodynamique de G. Bruhat. Paris. Masson, 1962.

pour éviter tout échange de chaleur avec le milieu extérieur. Deux boxeurs et un ring forment un système mécaniquement isolé dans la mesure où ils n'échangent pas de coups avec le milieu extérieur, l'arbitre notamment. (11)

. Conservation - Quantification ?

Aujourd'hui, pour le physicien, la conservation de l'énergie est un principe, c'est-à-dire qu'on doit admettre sa validité. Tout juste peut-on penser à le vérifier expérimentalement. Mais avant d'aboutir à lui conférer un statut d'axiome, de nombreuses approches numériques ont été nécessaires lors de l'évolution historique. Très souvent ces séries fastidieuses de mesures cherchaient à "montrer" la conservation préconçue. Meyerson questionne : "la conservation de l'énergie est-elle une loi empirique ? Les physiciens ont quelquefois trouvé commode de la traiter comme telle ; mais H. Poincaré, en procédant ainsi, a eu soin d'avertir le lecteur que cette conception n'est pas conforme à la vérité historique. En effet, il faut alors, négligeant complètement le développement que nous avons tenté de retracer, prendre pour point de départ les travaux de Joule, en les considérant, non pas comme une vérification du principe (ce qu'ils étaient en réalité), mais comme une démonstration expérimentale. Mais les résultats de Joule s'y prêtent encore infiniment moins que ceux de Lavoisier pour la conservation de la matière : les chiffres du physicien anglais varient dans des limites extraordinairement larges ... Alors il devient vraiment difficile de supposer qu'un savant consciencieux, en se fondant uniquement sur ces données expérimentales, eût pu arriver à la conclusion que l'équivalent (mécanique de la chaleur) devait constituer, dans toutes les conditions, une donnée invariable".

Le principe de conservation étant admis, la modélisation mathématique va conduire à décrire un système par des fonctions d'état, les variations de ces fonctions représentant l'évolution du système.

Une fonction d'état est "une grandeur qui s'exprime en fonction des variables macroscopiques qui caractérisent un état d'équilibre du système", telles que la température T , la pression P ou le volume V de ce système. Toute combinaison de ces variables peut donc être considérée

(11) **Dictionnaire de Physique et de Chimie.** G.R.E.P. Paris. Hachette. 1978.

comme une fonction d'état, mais le physicien n'utilise que quelques combinaisons particulières.

Les deux fonctions d'état fondamentales sont l'**Energie interne U**, et l'**Entropie S**, et l'on peut en définir d'autres à partir de ces deux-ci.

Si la valeur précise de ces fonctions n'est, en général, pas connue (elles sont définies "à une constante près"), le principe de conservation leur confère une propriété importante : lors d'une transformation cyclique réversible (on revient finalement au point de départ par une infinité d'états d'équilibre), leur variation est nulle. Pour un système isolé, le Premier Principe (ou principe de conservation) se traduit par la constance de l'Energie interne, et le second principe, par l'accroissement de l'Entropie d'un système.

. Substance - Fonction ?

Energie-chose ou Energie-relation ? Les points de vue ont évolué en général en fonction du type d'approche qui était privilégié. Mais même aujourd'hui, si l'aspect fonctionnel est préféré, l'aspect substantiel reste un outil de raisonnement.

Au début du XVIIIème Siècle, cette théorie identifiant la chaleur à une substance qui pénètre les corps dans tout leur volume, et qui est, en tant que substance, essentiellement indestructible et incréable, fournissait à son tour un cadre conceptuel très utile pour interpréter l'ensemble des faits expérimentaux connus à cette époque concernant la chaleur et la température. Celle-ci était considérée comme un "degré", un niveau ou une intensité du calorique. Lorsque deux corps à des températures différentes sont mis en contact, ou à proximité l'un de l'autre, le calorique s'écoule du corps le plus chaud dans le corps le plus froid, jusqu'à ce que leurs températures se soient égalisées, de la même façon que s'écoule l'eau entre deux récipients remplis à des niveaux différents, lorsqu'on les fait communiquer par un tuyau, ou de la même façon que s'écoule l'air entre deux récipients remplis à des pressions différentes lorsqu'on les met en communication par un tuyau. (12)

Mais une telle description ne fait pas l'unanimité, chez les Physiciens, on s'en doute, mais aussi chez les philoso-

la chaleur (comme transfert d'énergie thermique) a été, et reste, le domaine privilégié d'une description matérialiste de l'énergie.

(12) Francis HALBWACHS. **L'histoire de la chaleur.** C.U.I.D.E. N° 17, sept. 1980.

le foyer actif du réel

phes des Sciences, et ce dès le début du XXème Siècle (Cassirer 1910). (13)

"Dans les sciences de la nature le réel prévaut et, avec l'énergie nous tenons "le foyer actif du réel". L'énergie par ses manifestations perceptibles est partout, ce que nous voyons n'est rien d'autre que de l'énergie rayonnante, la lumière déclenchant au niveau de notre rétine des réactions chimiques dont nous ressentons l'effet. Le toucher, l'odorat, le goût impliquent des opérations qui nous renseignent sur l'agencement de notre environnement. Nul n'est donc besoin de "chosifier" l'énergie, son existence liée à ses effets se traduit en fait par une somme de "modalités opératoires effectives et possibles".

. Irréversibilité - Dégradation ?

Il est une notion dont la conceptualisation n'est pas évidente : c'est celle d'irréversibilité, pourtant tout naturellement liée à celle d'évolution. Pour la comprendre, il faut effectivement faire appel au renversement du temps (cf. ci-après), mais pour la décrire on doit utiliser les outils statistiques qu'ont construits les études des phénomènes dûs au hasard. Le caractère déterministe de l'expérience première crée alors un obstacle au sens de Bachelard. Dans le cas de l'énergie, on est plus enclin à qualifier de pertes ce qui est une forme moins utilisable, une forme dégradée : la chaleur. C'est, en fait, un état plus désordonné de la matière ... mais finalement plus probable.

croissance du temps...

= augmentation du désordre par des processus irréversibles

Un processus est dit **irréversible** si le processus obtenu en changeant le signe du temps (celui qu'on observerait en projetant le film à l'envers) est tel qu'il n'apparaît pratiquement jamais en réalité. Mais tous les systèmes macroscopiques hors équilibre évoluent vers l'équilibre, c'est-à-dire vers une situation de plus grand désordre. Nous voyons donc que tous ces systèmes présentent un comportement irréversible. Dans la vie courante, nous rencontrons constamment des systèmes qui ne sont pas en équilibre, c'est pourquoi le temps semble s'écouler dans un sens bien déterminé qui nous permet de distinguer clairement le passé du futur. Ainsi nous savons bien que les êtres vivants naissent, grandissent et meurent. Nous n'observons jamais le processus obtenu en changeant le signe du temps (possible en principe, mais extraordinairement improbable) où l'on verrait quelqu'un se lever de sa tombe,

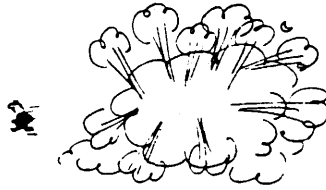
(13) Ernst CASSIRER. **Substance et fonction** (1910). Paris. Les Editions de Minuit. 1977.

puis devenir de plus en plus jeune pour disparaître dans le ventre de sa mère. (14)

1.



2.



3.

2.



THE SATURDAY EVENING POST

1, 2, puis 3 ? ...

la nature est un ensemble de systèmes particulièrement bien ordonnés..

l'ordre initial (au début de la vie) correspond à une valeur faible de l'entropie,

qui va croître globalement comme celle de tout système évoluant spontanément

Un système isolé quelconque tend à atteindre une situation de désordre maximal, c'est-à-dire celle où son entropie est maximale. Ceci a été le principe-clé contenu dans nos postulats statistiques fondamentaux. Des situations illustrant ce principe sont extrêmement courantes.

Considérons un animal ou tout autre organisme biologique. Bien qu'il soit constitué d'atomes simples (tels que le carbone, l'hydrogène, l'oxygène ou l'azote), ceux-ci ne sont pas simplement mélangés au hasard. En fait, ils sont assemblés d'une manière très élégante pour donner naissance à un système hautement ordonné.

Supposons qu'un animal soit enfermé dans une boîte de manière qu'il soit complètement isolé. Sa structure hautement ordonnée ne pourrait être maintenue. En accord avec le principe d'accroissement de l'entropie, l'animal ne survivrait pas et son organisation élaborée de macromolécules complexes se dégraderait progressivement en un mélange beaucoup plus désordonné de molécules organiques simples.

Le principe d'accroissement de l'entropie donne donc l'impression d'un monde évoluant vers une situation de plus en plus désordonnée. Même sans considérer tout l'Univers (qui, peut-être, ne peut pas être valablement considéré comme un système isolé), nous pouvons certainement dire que toute transformation se produisant spontanément dans un système isolé a une direction privilégiée, celle d'une évolution vers une situation toujours plus désordonnée(15). Parmi les grands principes de conservation, celui de l'énergie a montré que, s'il correspond à un invariant comparable aux autres en ce sens qu'il émane, comme les

(14) Frederick REIF. **Thermodynamique statistique. Cours de Berkeley.** Paris. Armand Colin. 1972.

(15) F. REIF - op. cit. p. 299, 300.

dans le cas de l'énergie, sa conservation doit comprendre la faculté de dégradation, comme lors d'échange de monnaie

autres des opérations réversibles de la pensée logico-mathématique, il ne correspond pas à une réversibilité physique ou à une "renversabilité" du même type que les autres. La "dégradation" de l'énergie en chaleur a montré depuis qu'un tel monnayage n'est effectivement pas réversible, c'est-à-dire que, si l'énergie se conserve, elle descend par contre une pente, avec le fractionnement, qu'elle ne peut plus remonter en système clos parce que ce fractionnement s'accompagne de brassage (J. Piaget).

2. REPRESENTATIONS ET QUOTIDIEN

2.1. Schèmes familiaux et pensée scientifique (16)

quand l'enfant mêle l'inconnu au connu

L'enfant comme l'adulte "non expert" construit consciemment ou non des outils lui permettant d'anticiper les résultats de ses propres actions ou les effets de phénomènes naturels. Dans son exploration du monde il se trouve confronté à des actions, des objets nouveaux, des situations au cours desquelles disparaît, ou s'altère, ce qu'il connaît déjà. Par la recherche d'analogies ou d'oppositions, il mêle le connu à l'inconnu en essayant de ramener l'inconnu au connu (17). Depuis l'Antiquité grecque deux points de vue se sont affrontés pour combattre les "disparitions", on peut les résumer par deux formules bien connues :

trouver un moyen d'expliquer ces disparitions

- "Tout agent pâtit en agissant". On admet que la production de l'effet se fait au détriment de la cause. Il y a en quelque sorte "consommation" de la cause.

d'un côté à l'autre

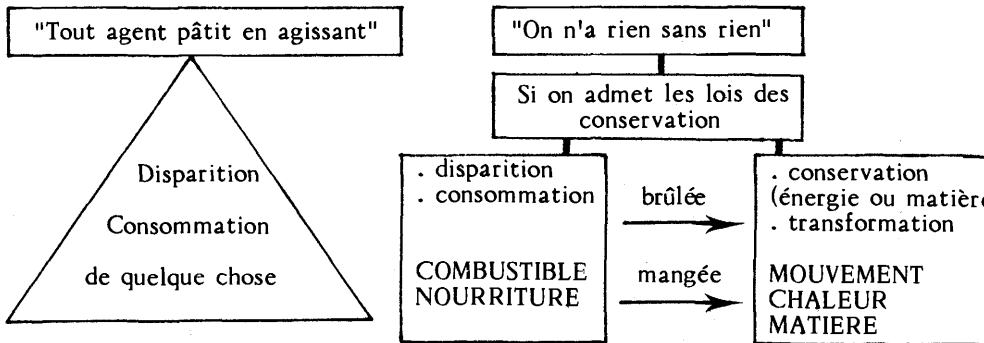
- "Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme". On cherche ce qui a pu se conserver en se transformant pour expliquer les "disparitions".

Une dualité apparaît entre les termes Consommation-Disparition, Conservation-Transformation, opposition dépassée par les lois de la conservation : ce qui disparaît d'un côté apparaît de l'autre en "quantité équivalente suivant le modèle des vases communicants. "Ce modèle pouvant être considéré comme un P-prim c'est-à-dire une

(16) voir Jacqueline AGABRA et Brigitte PETERFALVI, in rapport interne INRP, octobre 1983.

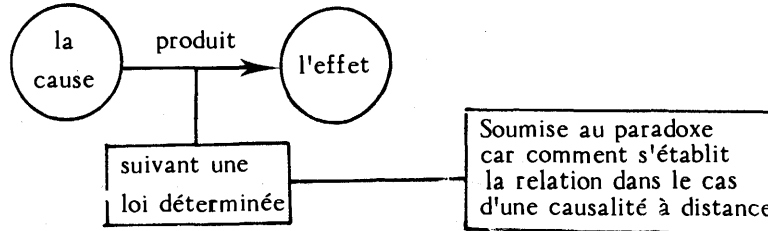
(17) Michel FOUCAULT. **Les mots et les choses**. Paris. Gallimard. 1966

matrice de nos représentations, un paradigme à partir duquel on peut se représenter les phénomènes".



Le **Pourquoi** ? Question si souvent posée aux enfants en situation d'exploration. A cette question du pourquoi les scientifiques répondent ainsi :

pourquoi pas ?

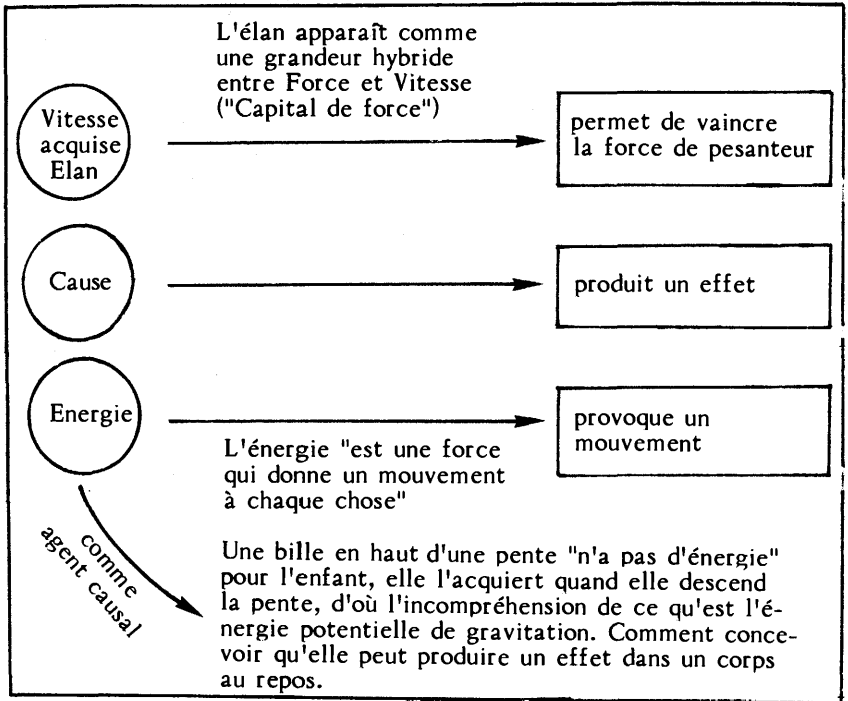


pour l'enfant nécessité est de partir de son expérience

En fait l'enfant au cours de la formation de la pensée causale, perçoit bien le paradoxe entre la relation de "production de la cause par l'effet et l'hétérogénéité de "nature" de la cause et de l'effet ; il établit de plus des "ponts", des "relations de similarité" (principe qui consiste à supposer que les propriétés de la cause sont semblables ou correspondent aux propriétés de l'effet (18). Ainsi si l'on considère des véhicules en mouvement ou mis en mouvement il est possible de dire que l'enfant traduit ses représentations à partir de son vécu sensori-moteur.

(18) cf Evelyne CAUZINILLE, Jacques MATHIEU, Annick WEIL-BARAIS. **Les savants en herbe**. Berne. Peter Lang. 1983.

de la
cause
à
l'effet



D'autre part si la "cause" (moteur, force) peut produire un mouvement, une absence de cause, stoppe le mouvement, annule la vitesse (cas d'un enfant qui tire un jouet celui-ci se met en mouvement dans la direction de la force). Nous allons retrouver ces types de relations causales implicitement dans les différentes réponses des enfants, elles traduisent le vécu de l'enfant par rapport à des situations variées qui pourront lui être proposées tant à la maison qu'en classe mais comment recueillir lors de ces situations, les représentations enfantines ?

2.2. A la récolte de représentations (19)

Comment connaître les représentations des enfants ? Le maître dans sa classe se préoccupe bien plus souvent de ce que l'enfant doit savoir, des progrès à réaliser, que de ce qu'il sait déjà ou croît savoir. En fait, connaître le

(19) Activités d'éveil scientifiques à l'école élémentaire. *Recherches pédagogiques* n° 108. Paris. INRP. 1980. pp 29-53.

une récolte nécessaire

point de départ de l'enfant, si confus soit-il, est source d'enseignement. La pensée spontanée demeure un "mythe", ce qui ne signifie pas que l'enfant n'a rien à dire d'une façon spontanée ; la difficulté pour l'adulte est d'obtenir cette situation privilégiée où l'enfant se sent libre de s'exprimer.

Rappelons ici les principales techniques utilisées pour s'informer des représentations des enfants.

. L'entretien

Quand il est possible matériellement c'est la forme relation adulte-enfant qui prime. Cependant cet entretien peut s'élargir, au niveau d'un groupe plus ou moins étendu. L'élève questionné de façon individuelle pourra expliciter ses modes de raisonnement et l'on pourra recueillir le cheminement de sa pensée.

. L'observation in situ

les outils de la récolte

C'est observer les échanges, les communications interactives entre les enfants eux-mêmes, voir comment les renseignements donnés par les uns sont utilisés par les autres. Une telle situation, pour conserver la richesse des échanges, nécessite plusieurs "observateurs" extérieurs ce qui n'est pas toujours aisé à réaliser.

. L'analyse de document "papier-crayon"

- Le questionnaire individuel facile à mettre en oeuvre est le plus courant, il se passe en respectant un protocole bien déterminé. Suivant la pertinence, l'ouverture plus ou moins grande des questions, l'analyse des résultats est parfois rendue difficile. Citons par exemple les questions posées en mai 1981 à deux CM d'une école d'Aix-en-Provence (20).

1 - qu'est-ce que l'énergie ?

2 - avez-vous entendu ce mot ? quand ?
à quel propos ?

3 - qu'est-ce que cela représente pour vous ?

Les questions ont été écrites au tableau. Les enfants répondent individuellement. Il n'y a pas de limite de temps imposée.

- Des situations déclenchantes peuvent aussi être

(20) Louis HOT. "Enquête sur les représentations relatives à l'énergie". Document interne INRP. 1982.

proposées. Il peut s'agir d'une situation expérimentale prédéfinie par le maître ou de situations problèmes faisant suite à une ou plusieurs activités de classe. Les traces de ces diverses situations seront ensuite source d'informations pour le maître car elles sont symptomatiques de représentations sous-jacentes.

. Formulation de l'acquis (dans une perspective d'évaluation de la démarche pédagogique).

Par l'observation phénoménologique de ce qui se produit au cours de véritables phases de formulation de l'acquis, il sera possible de repérer les obstacles épistémologiques que recélaient ces formulations. L'enfant a-t-il fait évoluer ou non ce qu'il savait ou croyait savoir ou bien est-il en deçà d'un obstacle épistémologique qui n'a donc pas été véritablement dominé. Il est alors possible de prévoir de véritables tests d'acquisition.

2.3. Les représentations les plus fréquentes

des modèles implicites
multi-média aux
représentations repérées

Sans vouloir rentrer dans une présentation détaillée du "comment s'est faite la récolte" il nous est apparu utile à ce stade de notre travail de pointer les représentations les plus caractéristiques des modèles implicites véhiculés par les élèves (et le corps social in extenso...) dans le but de repérer dans une situation donnée ce qui peut être sujet à "dépassement", à franchissement "d'obstacles objectivés" comme nous le verrons au chapitre suivant.

La variété des situations (séquences de classe, questionnaires, entretiens...) a permis de dégager certaines constantes dans l'édification de catégories qui, même si elles paraissent quelque peu hétérogènes, n'en sont pas moins utiles pour clarifier et organiser les exemples rencontrés. Nous distinguerons quatre domaines successifs et ordonnés :

un essai de clarification

1. Les constatations immédiates où l'énergie est synonyme d'évidence : "elle existe, elle est là" avec son aspect utilitaire - "on ne peut pas s'en passer".

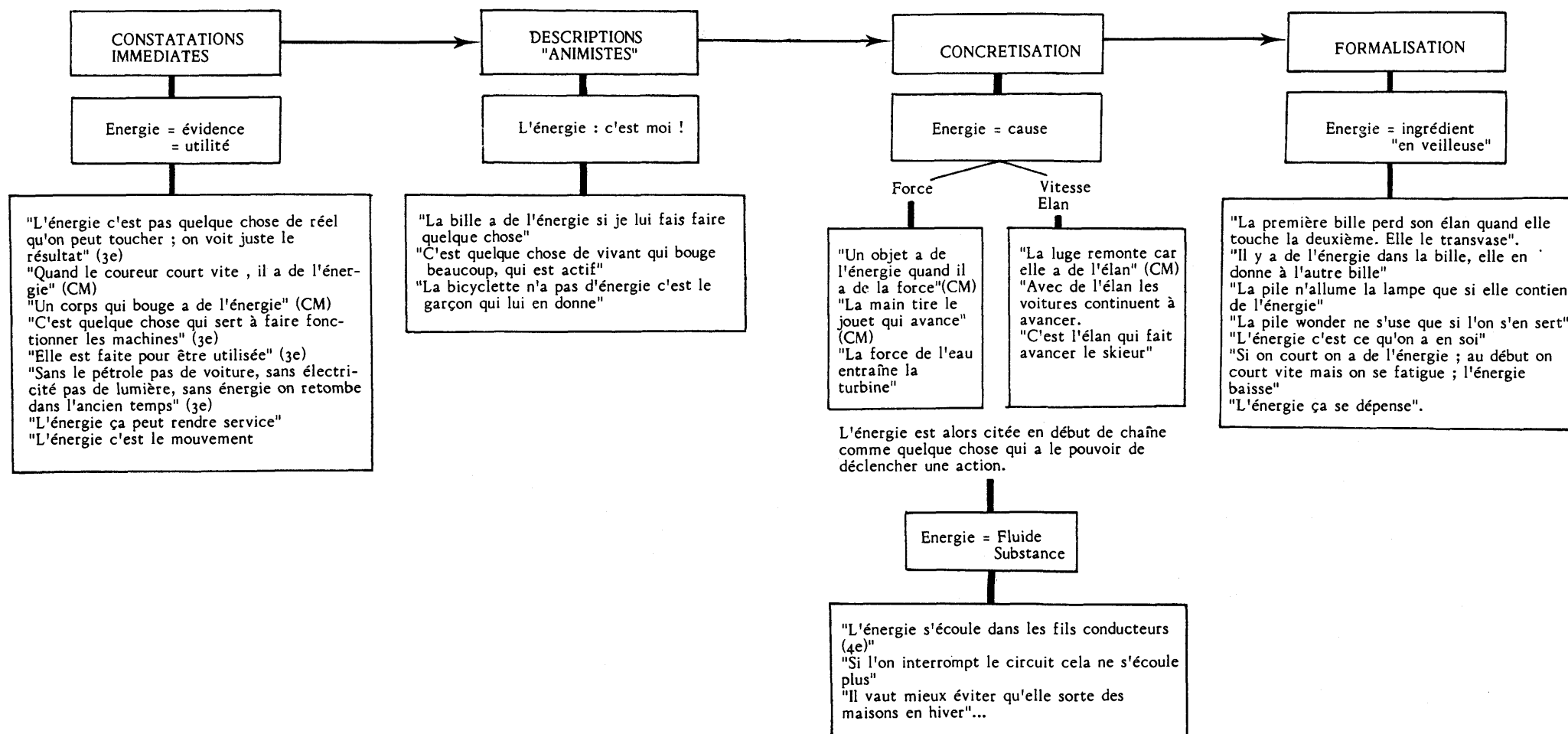
2. L'énergie c'est moi !... j'en possède et j'en donne. Nous retrouverons quelques représentations animistes ou anthropomorphiques.

3. La concrétisation : ce domaine regroupe un certain nombre de représentations de type causal et/ou substantialiste.

4. La formalisation : l'énergie apparaît alors comme un contenu du contenant qui est bien là et qui ne demande qu'à "servir" (21).

Le tableau suivant est un essai de classification des représentations recueillies lors de séquences de classe tant à l'école primaire qu'au collège.

(21) cf à ce propos les travaux de Michael D. Watts de l'Institut pour l'Education Technologique de l'Université de Surrey, Guildford, Grande Bretagne (1982), publiés sous le titre "L'Education Scientifique répond-elle aux besoins des jeunes à leur sortie de l'école?".



3. DES OBJECTIFS-OBSTACLES FRANCHISSABLES

Afin de faciliter au sein d'une classe la mise en place et l'organisation du concept, tout en tenant compte des représentations évoquées au paragraphe précédent, il nous appartient de sélectionner les obstacles de natures très diverses que nos élèves auront à franchir : quels sauts intellectuels leur demande-t-on, à quelles capacités (en termes de comportement) faisons-nous référence ? Quelles sont les "insuffisances" liées à l'analyse de la matière, mais aussi quels sont les possibles, les obstacles franchissables ?

3.1. La notion d'objectif-obstacle

des objectifs de contenu
et de comportement

Le terme d'objectif est largement utilisé depuis de nombreuses années et l'on peut trouver dans un grand nombre d'ouvrages des listes ou tableaux d'objectifs, où l'on distingue souvent les objectifs de contenu ou de connaissance et les objectifs comportementaux, d'attitude ou de méthode. Les premiers ne présentent pas ou peu de difficulté à définir et les critères d'évaluation en découlent assez facilement. Par contre, pour les seconds, leurs définitions sont moins évidentes et les critères d'évaluation voguent fréquemment dans un "flou artistique" renforcé par le très grand éventail de leurs libellés. C'est une des raisons essentielles qui ont conduit la pédagogie par objectifs à ne rester bien souvent qu'une suite de déclarations de bonnes intentions dans l'esprit des maîtres, sans vraiment franchir le cap de l'opérationnalisation. Pour passer à l'étape qui suit la liste d'objectifs-intention et rendre utilisables dans une situation de classe ces longues listes, il faut choisir certains de ces objectifs pertinents par rapport aux projets du maître. Mais pour choisir il faut définir des critères de choix, en relation avec les possibilités et les capacités des élèves.

trop nombreux pour
être opérationnels

les relier aux obstacles
épistémologiques

En liaison avec l'analyse épistémologique de la matière à enseigner, un critère possible est celui d'obstacle à la pensée scientifique, au sens où Bachelard a défini le concept d'obstacle épistémologique. Comme le précise Jean-Louis Martinand : "il ne s'agit pas pour nous de transformer en objectifs les obstacles repérés par Bachelard, il s'agit de faire rejoindre deux courants : celui des pédagogues qui cherchent à travers les objectifs à rendre plus efficaces les actions didactiques et celui des épistémologues qui s'intéressent aux difficultés qu'affronte la pensée scientifique".

et aux représentations
des élèves

La tâche du didacticien est donc, à la lumière des obstacles relevés par l'épistémologue et l'historien des sciences, en prenant en compte les représentations les plus fréquentes des élèves ainsi que les notions essentielles de la discipline, de déterminer un nombre restreint d'objectifs correspondant à des progrès que pourra réaliser l'élève. Ces progrès, qui ne peuvent être acquis spontanément, doivent avoir une place prépondérante dans la construction de la pensée scientifique, qu'ils relèvent du domaine des contenus ou de celui des attitudes et des capacités correspondantes.

et se fixer pour but le
dépassement de quel-
ques uns

Supposer que la pensée scientifique s'élabore par dépassements d'obstacles est une hypothèse que l'histoire a fréquemment validée, et qu'il nous importe de vérifier dans le cadre de situations éducatives où interfèrent le savoir à enseigner, les intentions du maître et les modes de raisonnement des élèves. La référence à la notion d'objectifs-obstacles doit contribuer à cette démonstration.

3.2. Des obstacles à franchir

. Obstacles liés aux contenus scientifiques

confusion entre force
et énergie comme cause
de mouvement

Au sujet de la "conservation de la force", Helmholtz affirmait qu'il était impossible de créer une force motrice durable à partir de rien, pour conclure "que la nature dans son ensemble renferme une réserve de force qui ne peut en aucune façon être ni augmentée ni réduite ; la quantité de force existant dans la nature est par conséquent aussi éternelle et aussi inaltérable que la quantité de matière". Cette assimilation **Force-Energie** se retrouve dans les premières formulations des enfants :

"la voiture se déplace parce qu'elle a de la force"

"l'eau c'est comme l'essence, elle a de la force"

"la force c'est l'électricité".

mais le mouvement
perpétuel est impos-
sible

En dehors de ces déductions purement causales, dominantes il est vrai dans la science socialisée, il en existe d'autres où la causalité est moins directement mise en jeu ; la démonstration de l'impossibilité du mouvement perpétuel en fait partie. Meyerson remarque que pour Leibniz cette impossibilité n'est qu'un simple corollaire du principe causal, alors que pour Carnot, si elle est démontrée pour de seules actions mécaniques, le doute persiste pour les phénomènes électriques et thermiques, et pour Helmholtz c'est une vérité d'expérience. En fait l'observation quotidienne ne nous donne en aucune façon la conviction de son impossibilité, et la foule des "inventeurs" qui s'y est intéressée nous en donne la preuve. Meyerson en

conclut "qu'il ne suffit pas de faire des expériences sans succès pour montrer l'insolubilité du problème. Ainsi la conservation de l'énergie, tout comme l'inertie, comme la conservation de la matière n'est ni empirique, ni apriorique ; elle est plausible".

l'approche de la conservation nécessite la définition du système

Autre exemple d'obstacle du même type, la notion de **système** : la loi de conservation est valable pour un système qualifié d'isolé. Pour vérifier que ce système n'échange rien avec l'extérieur, il faut être à même de déceler un éventuel échange, un transfert hypothétique, une variation de l'énergie interne de ce système, de voir s'il a subi des transformations. Il apparaît alors que l'on peut énoncer de telles lois :

- en considérant un système isolé dans lequel la quantité de "quelque chose" reste constante
- en considérant la manière de mesurer les augmentations et les diminutions de la quantité totale dans un système ouvert.

et celle de système isolé

La signification du terme **isolé** explique les deux formulations de la loi : il n'y a dans ce cas ni échange de matière, ni échange d'énergie.

La conservation de l'énergie peut nous laisser croire que nous avons de l'énergie à volonté. Dans le système Nature, l'énergie ne se perdrait ni ne se gagnerait ? Cependant l'énergie de tous les atomes de la mer, leur agitation thermique, nous est pratiquement inutilisable. Existence n'est donc pas disponibilité : la conservation de l'énergie signifie que l'énergie totale dans l'univers reste constante. L'important pour des enfants, comme pour des adultes, est de se situer par rapport aux autres, mais aussi par rapport aux éléments qui les entourent : tout réside dans le choix du référentiel ... du système auquel on appartient. La notion de système, liée à l'enfant, existentialise l'approche.

deux exemples pris au niveau des enfants

La définition du système dont on parle est donc, au niveau des enfants, une première "mise en place conceptuelle" indispensable. Prenons deux exemples, le premier est celui d'un pendule : au départ il semble suffisant de prendre le seul pendule comme système pour étudier son mouvement ; mais il devient vite nécessaire d'élargir le système à l'air ambiant lorsque les enfants remarquent que ce pendule s'arrête, qu'il y a des frottements. Le second est celui d'un circuit électrique simple constitué d'une pile et d'une ampoule : les deux éléments sont suffisants pour comprendre la notion de circuit et de courant électrique, mais lorsque les enfants s'aperçoivent que la pile "s'use", il faut inclure l'air am-

biant dans le système. Ceci montre que cette notion de système est nécessaire à élaborer pour rendre pertinente la notion de transfert, puis pour aller à la conservation.

pour aller vers l'Energie Interne et les transferts entre systèmes

Si l'on convient que tout système physique contient de l'énergie, en ce sens qu'il peut en échanger avec d'autres systèmes, l'énergie interne (comme fonction d'état) permet de décrire l'état du système, un nouvel obstacle apparaît, celui d'**interaction**, car il y a interaction dans et hors du système.

Dans le système, les éléments qui le constituent interagissent, et son "contenu" peut être caractérisé. Si deux systèmes interagissent, il y a alors transfert d'énergie, ce transfert étant orienté d'un système vers l'autre (et ce processus n'est pas renversable dans les mêmes conditions). S'il y a transfert il y a nécessairement interaction ... mais il peut y avoir interaction sans transfert. Il devient indispensable de préciser ce que l'on entend par transfert d'énergie, ce que l'on peut observer dans notre environnement.

Nous distinguerons quatre modes de transfert, liés à quatre types d'interaction entre deux systèmes :

quels modes de transfert faut-il retenir ?

- **le travail mécanique** : c'est le travail des forces exercées par un système sur un autre ; on constate qu'il y a augmentation de l'énergie interne du premier et diminution de celle du second, mais qu'en même temps il y a mise en mouvement ou maintien du mouvement ordonné de la matière ;

- **le travail électrique** : ce sont les forces de nature électrique qui sont en jeu ici entre deux systèmes qui échangent de l'énergie, échange accompagné d'une mise en mouvement ordonné ou d'un maintien en mouvement de charges électriques ;

- **le transfert par rayonnement**, qui s'effectue grâce aux ondes électromagnétiques, sans support matériel, et éventuellement sur de très grandes distances. D'une certaine façon on peut dire que tout transfert d'énergie qui n'est pas de l'un des trois autres types (mécanique, électrique ou chaleur) est un transfert par rayonnement, même si historiquement on a souvent inclus le rayonnement dans la chaleur ;

- **le transfert thermique ou chaleur**, qui nécessite un contact entre les deux systèmes : il s'accompagne toujours d'un transfert d'agitation désordonnée des particules des deux systèmes dans le voisinage du contact.

Dernier obstacle que nous citerons dans cette catégorie, c'est celui de la notion de **processus irréversible** concernant les phénomènes physiques. "S'il est clair pour beaucoup, note Feynman, que les phénomènes naturels

L'irréversibilité des phénomènes physiques

sont irréversibles (une tasse lâchée se casse ; quand on parle, la voix s'envole dans l'air et ne revient pas s'engouffrer dans la bouche ; toute l'évolution des vivants s'effectue à sens unique ...), si le monde réel est fait d'atomes, que nous soyons nous-mêmes faits d'atomes et obéissions aux lois physiques, l'interprétation la plus simple de cette irréversibilité de tous les phénomènes serait que certaines lois du mouvement des atomes définissent un sens privilégié - que certains mouvements atomiques ne puissent avoir lieu dans les deux sens ... Ce fonctionnement à sens unique des interactions entre les choses serait la cause de l'apparent déroulement à sens unique de tous les phénomènes naturels. Mais on n'a rien trouvé de semblable jusqu'à présent : la loi de la gravitation est réversible dans le temps, les lois de l'électricité, du magnétisme, des interactions nucléaires et de la radioactivité bêta sont réversibles par rapport au temps (quoiqu'un doute subsiste pour la dernière de ces lois) ..."

Dans le cas des transferts d'énergie, cet obstacle se retrouve dans le processus de dégradation ; des points de vue linguistique et physique ce processus est effectivement irréversible : ce qui est dégradé n'est plus utilisable (par exemple les fruits qui mûrissent, l'essoreuse à salade qui tourne finit par s'arrêter ...).

. les obstacles linguistiques

Les mots d'Energie, Conservation, Système, Interaction, Transfert, Transformation ...sont introduits par les scientifiques pour expliciter un signifié, une loi, un principe.

Ces mêmes mots véhiculés par les médias prennent des connotations variées et persistent dans un implicite intellectuel et conceptuel ; l'esprit humain fait un genre d'almalgame inconscient, qu'il finit par avoir des difficultés à concilier, à intégrer, à s'approprier.

Le vocabulaire actuel et celui des médias n'ont pas de cohérence. Par exemple le terme "énergie" est utilisé pour désigner un mode de transfert et non pas un contenu : ainsi "énergie rayonnante" est utilisée à la place de "transfert d'énergie par rayonnement", "énergie électrique" est utilisée à la place de "travail électrique", "chaleur", "énergie thermique", "énergie calorifique" relèvent du même genre de confusion. On pourrait citer encore d'autres exemples de ce type et l'on conçoit que le langage puisse faire obstacle à la compréhension, à la conceptualisation chez les enfants.

. les obstacles liés au développement de l'enfant

Aborder l'énergie par ses propriétés de conservation, donc chercher à faire reconnaître aux enfants les caractéristi-

ques d'une relation de conservation, va aller à l'encontre du mode de raisonnement qu'ils pratiquent plus facilement : la relation causale.

Le schème causal possède effectivement une prégnance et un caractère explicatif bien supérieurs au schème conservatif, même au stade des premières années d'études universitaires.

Et ceci d'autant plus qu'une relation de conservation proprement dite n'est pas une identité, mais une relation d'équivalence à travers un changement. Autrement dit, une loi de conservation ira très souvent de pair avec une loi de transformation : certaines choses changent, mais de façon telle que dans les mêmes conditions d'autres ne changent pas.

Autre obstacle à cette construction qui va apparaître chez les enfants, la difficulté à s'attacher à une propriété particulière : il semble que l'attention des enfants se porte avant tout sur la découverte même de l'invariant en tant que quantité composée, appliquée aux objets, plus qu'à l'explication proprement dite du phénomène : c'est la difficulté de la généralisation et de l'abstraction des phénomènes observés.

. Les obstacles liés à l'approche méthodologique

Ils pourront être d'ordre technique ou bien d'ordre pédagogique :

- la diversité des situations de transfert d'énergie ne permettra pas toujours la reconnaissance immédiate du "passage" d'une grandeur entre les systèmes mis en jeu : les enfants reconnaissent assez bien un transfert de la source vers le récepteur quand le récepteur est de même nature que la source, par exemple entre une pile et une ampoule. Mais cette reconnaissance devient plus délicate si les natures sont différentes, par exemple entre un pistolet à ressort et une fléchette ;
- l'observation est aussi cause fréquente d'obstacle : les phénomènes qu'on peut étudier semblent parfois si simples qu'il est difficile de savoir si l'enfant se trouve effectivement devant un problème à résoudre, ou si, placé devant un fait très habituel et "qui se comprend de lui-même", il se contente d'une simple description, d'une succession dans le temps ;
- la capacité à séparer les variables qui interviennent dans la description d'un phénomène naturel pour en faire une analyse scientifique ne va pas non plus de soi : l'esprit préscientifique est immédiatement capté par l'aspect global de ce phénomène et il faut un effort pour dégager les différents paramètres mis en jeu et se centrer sur leurs relations ;

- le recours aux grandeurs mesurables est aussi cause d'obstacles : les problèmes liés à la quantification des situations rencontrées dans le cadre de la classe sont souvent source d'ambiguïté, de confusions, dont il n'est parfois pas aisé de sortir. Sans vouloir minimiser l'importance des mesures en physique, leur impact, leur pertinence est très souvent discutable sur le plan de l'organisation intra-conceptuelle, de la trame et des choix pédagogiques. Il y a cependant des approches qui demeurent plus "possibles" que d'autres, et nous allons en rencontrer dans le paragraphe suivant.

3.3. Quels obstacles sont franchissables ?

Au vu des observations réalisées dans les classes, il apparaît qu'il est possible de faire "ressentir", de "sensibiliser" des enfants de l'école élémentaire et du premier cycle des collèges aux concepts précédemment exposés, à condition que les enseignants soient conscients des difficultés, des obstacles qu'ils doivent faire franchir à leurs élèves, des transpositions didactiques qu'ils devront mettre en place afin de guider au mieux les "apprenants" dans une trame, un réseau sémantique et conceptuel délicat, difficile à appréhender sans outil fonctionnel ni une réflexion personnelle "éclairée".

Ainsi de nombreux travaux ont montré qu'il est envisageable de :

- montrer qu'on ne peut pas obtenir d'énergie à partir de rien ("On n'a rien sans rien"...)
 - montrer qu'un système donné est porteur d'une certaine "capacité", d'un certain "contenu"
 - montrer que cette "capacité", ce "contenu" qu'il possède, peut se transférer, se "transporter", se transborder"
 - montrer que cette "capacité à" ne fonctionne pas dans les deux sens.

En multipliant les exemples, au niveau mécanique pour commencer (pour leur plus grande simplicité), les enfants dès l'école élémentaire pourront approcher l'idée que "quelque chose se transmet", que globalement et dans des domaines privilégiés, ce quelque chose peut rester "pareil", tout en restant conscient qu'une représentation substantialiste de l'énergie (que l'on met en jeu ici) est loin d'être innée pour ces enfants.

Essayons, à présent, de mettre en relation sous la forme d'un tableau les représentations les plus fréquentes qui ont été relevées dans le chapitre précédent avec les obstacles

que nous venons d'évoquer, pour tenter de préciser quelques objectifs-obstacles utilisables dans les niveaux d'enseignement où les équipes ont travaillé. (voir pages 74 et 75)

4. DES EXEMPLES DE SITUATIONS DIDACTIQUES

des difficultés existent ;
les prendre en compte
et faire preuve d'imagination
et de réflexion

Si l'on se réfère à une suite de séquences de classe caractérisées par leur fonction déclenchante et liées à un réseau d'obstacles à franchir, prédéterminés par le maître, il sera alors possible de faire évoluer les représentations des enfants et d'atteindre des niveaux de formulations de plus en plus élaborés à partir d'une "zone" conceptuelle donnée. Si la prise de conscience par le maître de la réalité intellectuelle des représentations enfantines, tant sociales qu'économiques et intuitives, semble fondamentale comme préalable à toute démarche pédagogique réfléchie, le choix des situations didactiques à proposer n'en demeure pas moins délicat et difficile.

Les deux situations présentées et analysées dans les pages qui vont suivre proviennent d'un travail de recherche réalisé par des professeurs d'Ecole Normale avec les maîtres d'école primaire et la participation interactive des enfants. Elles ne sont ni des exemples, ni des "modèles" mais simplement des possibles parmi d'autres.

4.1. Jouons à la luge (22)

L'analyse de la matière montre que l'approche du concept d'énergie peut être guidée par deux points de vue complémentaires : l'échange et la conservation.

De nombreux travaux montrent que la première approche, souvent motivée par des préoccupations d'ordre technologique (mettre des véhicules en mouvement, produire de l'électricité isoler du "froid" et du "chaud"...), est réalisable dès l'école élémentaire. A ce niveau les enfants sont capables d'isoler le système (ou objet) SOURCE (pile, ressort comprimé, eau maintenue en altitude ...) du système (ou objet) RECEPTEUR (ampoule, moteur, flèche, roue à aubes ...).

Le premier système capable de produire un effet visible

(22) D'après le travail réalisé par Jean-Claude GENZLING (EN de Colmar) avec la collaboration de Frank TEMME, CPEN et Daniel RIBER, instituteur.

Identification des Représentations	Opérations logico-mathématiques en jeu	Obstacles rencontrés
Energie-Force "La voiture se déplace parce qu'elle a de la force"	Mise en relation causale mouvement-force	- Langage : assimilation force-action avec le mouvement - description pré-newtonnienne du mouvement
Energie-Elan "La flèche a de l'énergie quand elle vole. (Quand elle s'arrête) elle est épuisée. Elle s'est volatilisée. Elle s'est envolée".	Le mouvement est caractérisé par une propriété intrinsèque: l'élan. Cette propriété disparaît quand le mouvement s'arrête : relation entre effet et cause.	Connaissance générale: une propriété n'existe que si elle est apparente. L'abstraction n'est pas encore possible.
Energie-Evidence "C'est quelque chose de vivant, qui bouge beaucoup ou qui produit des choses, qui est actif".	simple constatation (première description du phénomène, sans recherche de variable)	- animisme des objets - anthropomorphisme
Energie-Carburant "Une pile non usée a de l'énergie quand elle peut allumer une ou plusieurs ampoules".	Mise en relation causale entre l'évolution et la consommation.	L'énergie se consomme (pas de conservation)
Energie-Fluide "L'énergie passe sur la première lampe, qui ralentit l'énergie pour la deuxième et la troisième. L'énergie n'arrive pas assez vite pour la quatrième et la cinquième lampe".	Symbolisation : l'énergie est une grandeur qui peut être transférée entre les éléments d'un système (ou entre des systèmes reliés)	Substantialisme : l'énergie est considérée comme un fluide dont l'écoulement s'épuise le long du parcours.

Aspect explicatif	Objectif-Obstacle	Moyens de dépassement
La force c'est l'action qui met en mouvement un système.	Différencier force et mouvement : la force change le mouvement du système, l'énergie est la capacité de ce système à évoluer.	La force est une action extérieure au système, l'énergie une propriété interne. Il faut préciser la définition de systèmes par regroupements de nombreux exemples.
Le mouvement est caractérisé par ses conditions initiales.	Définir un mouvement comme une relation entre coordonnées d'espace et le temps. La "capacité" du mouvement peut exister même sans évidence de mouvement.	Etude de la vitesse, paramètre reliant espace et temps. L'énergie d'un système peut se déterminer à partir de sa vitesse.
L'activité d'un objet ou d'un être vivant est un état différent de l'immobilisme.	Qualifier tout système (immobile ou non) d'une capacité à évoluer.	Chercher à décrire l'évolution à venir d'un objet ou d'un être à partir de l'observation de son état actuel et de son passé.
Il faut remplir un "réservoir" pour permettre une évolution.	Reconnaître et désigner des changements de capacités d'un objet ou d'un être quant à son évolution.	S'attacher à faire le bilan des transformations d'énergie.
Analogie entre énergie et mouvement : dans une chaîne il y a transmission de quelque chose.	Caractériser l'énergie comme un paramètre physique, alors que le mouvement n'est qu'une relation.	Définir et mesurer les paramètres dont dépend l'énergie au cours de transformations.

un sujet glissant

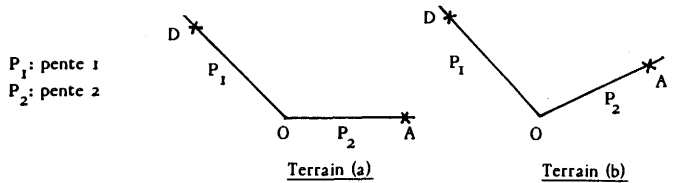
(échauffement, changement d'état, mouvement ...) au niveau du second système, possède une "capacité à", une potentialité que nous appellerons énergie.

Le deuxième système peut à son tour acquérir cette potentialité et la transférer à un troisième système. L'idée d'énergie est alors liée, comme nous l'avons déjà évoqué, à l'idée de chaîne causale. L'énergie ou la capacité d'un système à produire un effet peut s'épuiser, elle peut être plus ou moins grande avant tout échange (ou transfert) vers un autre système ; l'effet produit peut varier tant en durée qu'en intensité dans le même sens.

La deuxième approche en terme de conservation davantage "physique" paraît plus difficile. Elle nécessite que l'on focalise son attention sur un système qui évolue, et que l'on examine les changements (ou transformations) qui se produisent en son sein. A priori toute étude quantitative est exclue car, en général, elle s'appuie justement sur l'idée de conservation que l'on cherche à établir.

Les difficultés ne sont pas seulement d'ordre expérimental ou liées au choix d'une situation ; on peut se demander en effet si l'idée même de conservation, non fondée ici sur le vécu réel des enfants, peut être intégrée à sa fonction opératoire. S'il est vrai que la conservation de la matière, ou la conservation de la masse etc ... ne sont guère accessibles avant un certain âge, il en est de même de la conservation de l'énergie. Cependant, même si le principe général de la conservation de l'énergie reste une préoccupation lointaine de l'enfant de l'école élémentaire, on peut néanmoins s'interroger et essayer de construire partiellement cette notion par l'étude de quelques situations motivantes liées au vécu de l'enfant.

Ainsi pour luger, dans la situation de départ, l'enfant a le choix entre deux terrains :



Le choix individuel sera guidé par la pratique personnelle de chaque enfant, en tenant compte des avantages et/ou des inconvénients de chaque terrain. La majorité des enfants sait qu'en (b) la luge remontera la pente OA et qu'en (a) elle s'arrêtera aussi mais "plus tard".

Pourquoi cette situation ? Elle permet aisément de :
- cerner dans un premier temps les représentations des enfants liées à l'énergie de mouvement ou cinétique, son origine, sa transformation éventuelle en énergie dite

- poser un problème, réalisable en classe à l'aide d'une maquette, résolu expérimentalement (bille roulant sur un rail)
- rechercher si une grandeur se conserve au cours du mouvement de la bille (conservation de l'énergie mécanique)

Résumons quelques réponses d'enfants obtenues lors des premières discussions en classe.

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> . La vitesse de la luge peut dépendre : . de l'inclinaison de la pente . de la longueur de la pente . de la luge . de la neige . de la hauteur de la neige . du poids de la luge . du point de départ . de la façon de s'asseoir sur la luge . de la masse portée par la luge | <ul style="list-style-type: none"> L'élan de la luge peut dépendre : . de l'inclinaison de la pente . de la hauteur du point de départ . de la poussée des jambes . de l'état de la neige . du poids de la luge . de la poussée des jambes au départ . de la vitesse... |
|--|---|

Remarquons que l'élan peut dépendre de la vitesse, et vice-versa, mais les enfants ne confondent pas vraiment les deux grandeurs. La vitesse apparaît comme une conséquence de l'élan acquis par un mystérieux mécanisme d'échange.

L'origine de l'élan pose problème : il est tantôt donné par la pente, tantôt donné au départ en "poussant" avec les jambes. La référence existentielle liées aux disciplines sportives est très prégnante, le mot énergie n'intervenant que pour expliquer la relation entre élan et vitesse.

Quelles sont maintenant les questions qu'il est possible (par exemple) de poser aux enfants :

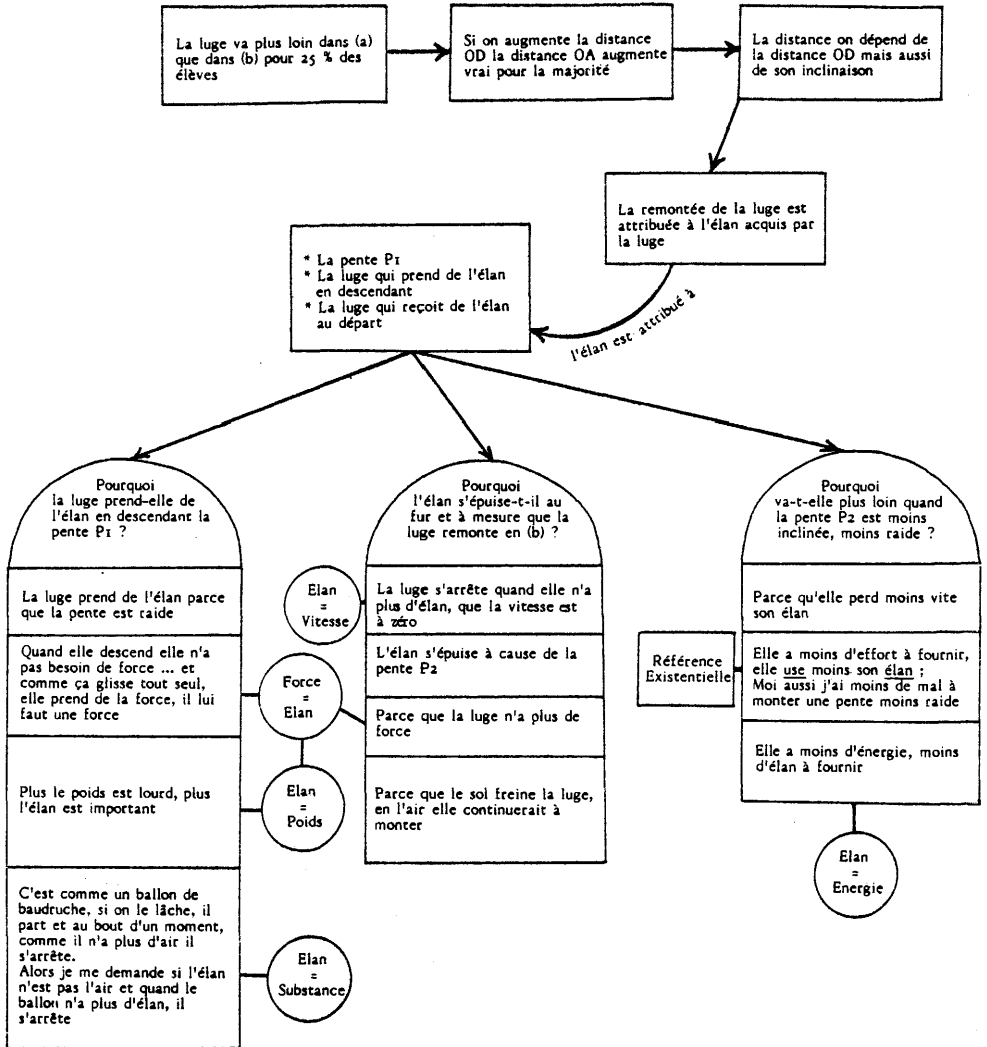
- . quelle est la position du point d'arrivée de la luge ?
- . pourquoi la luge remonte-t-elle jusqu'au point A sur la pente P_2 ?
- . pourquoi en descendant sur la pente P_1 la luge prend-elle de l'élan ?
- . pourquoi la luge ne va-t-elle pas plus loin ?
- . pourquoi la luge n'a-t-elle plus d'élan au point A ?
- . pourquoi l'élan s'épuise-t-il au fur et à mesure que

la luge remonte la pente P_2 ?

- de quoi peut dépendre la vitesse de la luge ?
- de quoi peut dépendre l'élan de la luge ?

A ces questions, voici quelques réponses des enfants que nous avons essayé de regrouper et de classer.

Que disent les enfants ?



L'élan souvent cité par les enfants pourrait désigner l'énergie cinétique ; les enfants emploient aussi le mot force et même le mot énergie. L'élan est caractéristique d'un corps en mouvement (il pourrait d'ailleurs aussi désigner la quantité de mouvement).

de l'élan, toujours de l'élan

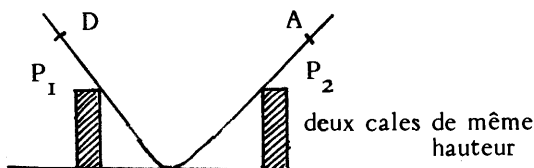
D'où vient-il ? il est en général la cause du mouvement : c'est la poussée reçue par la luge au départ, c'est aussi la raideur de la pente P_1 , mais encore c'est la luge qui l'acquiert elle-même en descendant. En aucun cas cet élan, qui ne peut être confondu avec la vitesse, n'est dû à la transformation d'une autre grandeur liée à la position de la luge.

Quel est son rôle ? il est la cause du mouvement sur la pente remontante mais cet élan s'épuise lorsque la luge remonte et, devient nul, lorsqu'elle s'arrête. Il se "consomme plus ou moins vite" suivant la raideur de la pente.

Remarquons cependant que, pour les enfants, si la pente P_1 peut donner de l'élan, la pente P_2 elle n'en reçoit pas ; sa "disparition" est reliée à l'inclinaison de la pente P_2 mais aussi à l'existence de forces de frottements.

jouons aux billes mais en réfléchissant

A partir de l'analyse que nous venons succinctement de réaliser il est possible de proposer ensuite des activités de résolution de problème à partir d'un matériel simple (rail + bille) à partir duquel les enfants pourront faire varier les différentes inclinaisons des pentes P_1 et P_2 et observer notamment que la bille remonte à la même hauteur, même si intuitivement ils ressentent l'effective intervention des forces de frottement.



A partir d'un problème comme "De quoi peut dépendre la distance parcourue par la bille", les enfants sont amenés à formuler avec une précision croissante ce qu'ils ont observé.

Les énoncés suivants ont été recueillis après un travail collectif de mise en forme du contenu.

E_1	La bille part au dessus de la cale 1 et arrive toujours au dessus de la cale 2, peu importe l'inclinaison de P_2	L'inclinaison de 2 n'intervient pas
E_2	La bille part d'une hauteur donnée sur la pente 1 et arrive toujours à la même hauteur sur la pente 2, quelle que soit l'inclinaison de la pente 2	L'inclinaison de 1 n'intervient pas
E_3	La bille part d'une hauteur donnée sur la pente 1 et arrive toujours à la même hauteur sur la pente 2, quelles que soient les inclinaisons des pentes 1 et 2	Peu importe les inclinaisons de 1 et de 2
E_4	La luge part d'une hauteur donnée sur la pente 1 et n'arrive pas tout à fait à la même hauteur sur la pente 2 à cause des forces de frottements	Retour à la luge
E_5	Idem que 4 mais pour la bille	
E_6	En descendant la pente P_1 , l'énergie de hauteur se transforme en énergie de vitesse. En remontant la pente 2 l'énergie de vitesse se transforme en énergie de hauteur. Au point A elle n'a plus que de l'énergie de hauteur. Aux points D et A la bille a la même énergie de hauteur	
		Question posée : "y-a-t-il quelque chose qui reste pareil au cours du mouvement ?"

Les énoncés E_3 et E_5 établissent une relation **spatiale** entre le point de départ et le point d'arrivée de la bille : la hauteur à l'arrivée est la même (ou presque) que la hauteur au départ ; ce constat est vrai quelle que soit la masse de la bille et quelle que soit l'inclinaison des pentes P_1 et P_2 . Par ailleurs en observant le mouvement de la bille les enfants voient que **lorsque sa hauteur diminue, sa vitesse augmente et réciproquement**. Les enfants peuvent-ils concevoir que quelque chose se conserve au cours de ce mouvement ? Spontanément non, mais on peut provoquer cette idée en reformulant la phrase soulignée ci-dessus à l'aide d'un vocabulaire différent : lorsque la bille perd de la hauteur, elle gagne de la vitesse et, lorsqu'elle gagne de la hauteur, elle perd de la vitesse.

Par la question amenant en fin de séquence à la formulation de l'énoncé E_6 , on peut observer un changement total de point de vue entre E_5 et E_6 , E_5 est inclu dans E_6 , et nous approchons la notion de conservation sur le plan qualitatif avec une sensibilisation à la quantification par la notion de transfert d'énergie de hauteur en énergie cinétique. Pour arriver à la notion de conservation, l'idée de pente, d'inclinaison, reste un obstacle bloquant, elle induit celle de hauteur, de vitesse.

Au plan qualitatif, h varie et v varie.

En réalité la masse n'intervient pas.

C'est le rapport $\frac{E}{m} = \frac{v^2}{2} + g \times h$ qui reste constant.

La seule façon d'aller plus loin sur le plan quantitatif serait de créer un logiciel qui puisse repérer h , v et donner le nombre $\frac{v^2}{2} + gh$ avec le schéma de l'expérience. Les enfants ont bien séparé des variables mais, si la conclusion est correcte du point de vue mécaniste, elle reste fragile du point de vue énergétique ; l'enfant ne peut pas savoir que le paramètre hauteur est plus pertinent que le paramètre pente. Ce choix de la variable pertinente demeure un obstacle d'ordre psycho-génétique. En CP l'enfant ne pourra pas le surmonter ; l'adulte non spécialisé le dépassera en opérant comme les enfants, en donnant toute une série de variables sans choisir forcément la plus pertinente.

Pour conclure, peut-on dire que les enfants ont accédé à la notion de conservation de l'énergie ? Au plan général certes non, mais dans ce cas particulier une telle succession de séquences peut constituer le point d'appui qui permettra à l'enfant de saisir ce principe le jour où une situation nouvelle lui sera présentée.

4.2. A partir de la visite d'une centrale hydroélectrique(23)

. Les points essentiels de la progression

les enfants avaient visité, quelque temps auparavant, une petite centrale hydroélectrique, visite au cours de laquelle des commentaires avaient été donnés par les enseignants et un responsable de la centrale. Les objectifs de l'activité en classe sont centrés sur la notion d'énergie sous ses aspects mécaniques (énergie de position, énergie de vi-

(23) Le texte du compte rendu de cet ensemble de séquences est paru dans le bulletin Aster n°20 (p. 55 et suivantes), rédigé par Louis Hot. Il s'agit d'une activité réalisée avec 25 enfants d'une classe de CM1 (9 à 10 ans) durant quatre séances.

tesse, transferts ...). Au cours de la première séance, la maîtresse demande aux enfants d'écrire un texte sur la visite de la centrale et de l'accompagner éventuellement d'un dessin. Elle espère ainsi recueillir les représentations les plus courantes chez les enfants. La seconde séance est centrée sur l'observation puis sur les commentaires des enfants de quatre diapositives représentant des éléments importants de la centrale : les réflexions des enfants sont enregistrées avec un magnétophone ; les diapositives ayant été projetées sans ordre, on leur demande de les placer dans un ordre logique en explicitant leurs critères de classement. Au cours de la troisième séance les enfants ont présenté des propositions d'expériences visant à montrer comment transformer l'énergie de position en énergie de vitesse. L'idée de faire tourner une turbine par le jet d'une vapeur produite par chauffage est émise par un enfant et la quatrième séance consistera à réaliser une maquette sur ce principe.

. Quelques expressions caractéristiques d'enfants

De nombreuses formulations ont été proposées au cours des diverses activités et nous en retiendrons quelques unes qui semblent caractéristiques, d'une part du niveau spontané de cet âge, d'autre part de l'évolution obtenue en fonction des objectifs de la maîtresse.

E1 : Nous avons vu de l'eau qui bouillonnait dans un bassin. Un monsieur nous a dit que c'était pour faire de l'électricité.

Cette expression est uniquement descriptive et l'idée de l'enfant est imprégnée de phénoménisme : le rapprochement du bouillonnement et de l'électricité.

E2 : L'électricité est faite de courant que les fleuves ont en descendant.

Ici l'expression de l'enfant révèle un obstacle linguistique véhiculé par la polysémie du mot courant : courant électrique et courant d'un fleuve.

E3 : Une usine hydroélectrique est une usine qui fabrique de l'électricité avec de l'eau. L'eau passe dans la turbine et va dans l'alternateur. L'eau se produit en électricité.

Chez cet enfant les éléments de la situation et leurs enchaînements ne sont pas bien perçus et conduisent à une description syncrétique de la transformation.

E4 : J'ai vu l'eau qui passait dans de gros tuyaux et ensuite elle allait dans la turbine qui la transforme en électricité et ensuite passe dans le disjoncteur.

L'idée de transformation apparaît dans cette expression,

mais en restant au niveau de la description chronologique des diverses étapes, sans relation causale entre elles.

E5 : L'électricité est faite avec l'eau. L'eau passe par une turbine. Après elle passe dans quelque chose qui produit de l'électricité. Après, l'électricité, on la fait passer dans des fils électriques.

Ici aussi, la description est uniquement chronologique entre les éléments de la chaîne de transformations et l'on voit apparaître l'obstacle substantialiste : l'électricité dans les fils.

E6 : C'est l'eau (qui fait tourner la turbine). Comme elle va très très vite, elle fait tourner les pales et ça rejoint l'axe qui va dans l'alternateur qui fait l'électricité.

Le rôle du mouvement de l'eau est perçu : l'eau a une fonction causale ; mais il reste dans cette expression une part d'animisme : l'eau "fait tourner" les pales et l'alternateur "fait" l'électricité. La nécessité d'une source (énergétique) n'est pas entrevue.

E7 : Maintenant qu'elle va fort, elle fait tourner les pales et ressort par les bouches.

Le cheminement de l'eau semble compris et, dans cette formulation, apparaît une cause au mouvement des mécanismes, une capacité (la "force") de l'eau.

E8 : Ce qui fait tourner la turbine, c'est l'eau. Comme elle arrive très fort par le tuyau, ça la fait tourner très très vite.

Dans la chaîne cinématique il y a transmission d'une grandeur liée à la "force" et la vitesse. Mais cette transmission semble s'accompagner d'une amplification : il n'y a pas encore de recherche de conservation.

E9 : (L'eau va très fort) parce qu'elle vient de très haut, donc elle a beaucoup de force.

Mise en relation causale entre la hauteur de la source et la capacité de l'agent : on a ici une première idée de l'énergie de position (l'énergie potentielle de gravitation du physicien).

E10 : La turbine tourne pour entraîner un axe qui va à l'alternateur. L'alternateur produit de l'électricité pour la distribuer dans la ville ou le village, par les fils électriques, par le disjoncteur etc ...

La chaîne cinématique se précise et l'électricité, capacité extraite du mouvement, n'est plus une grandeur substantialiste, du moins elle peut apparaître sous des formes diverses.

. Essai de classification en niveaux de formulation

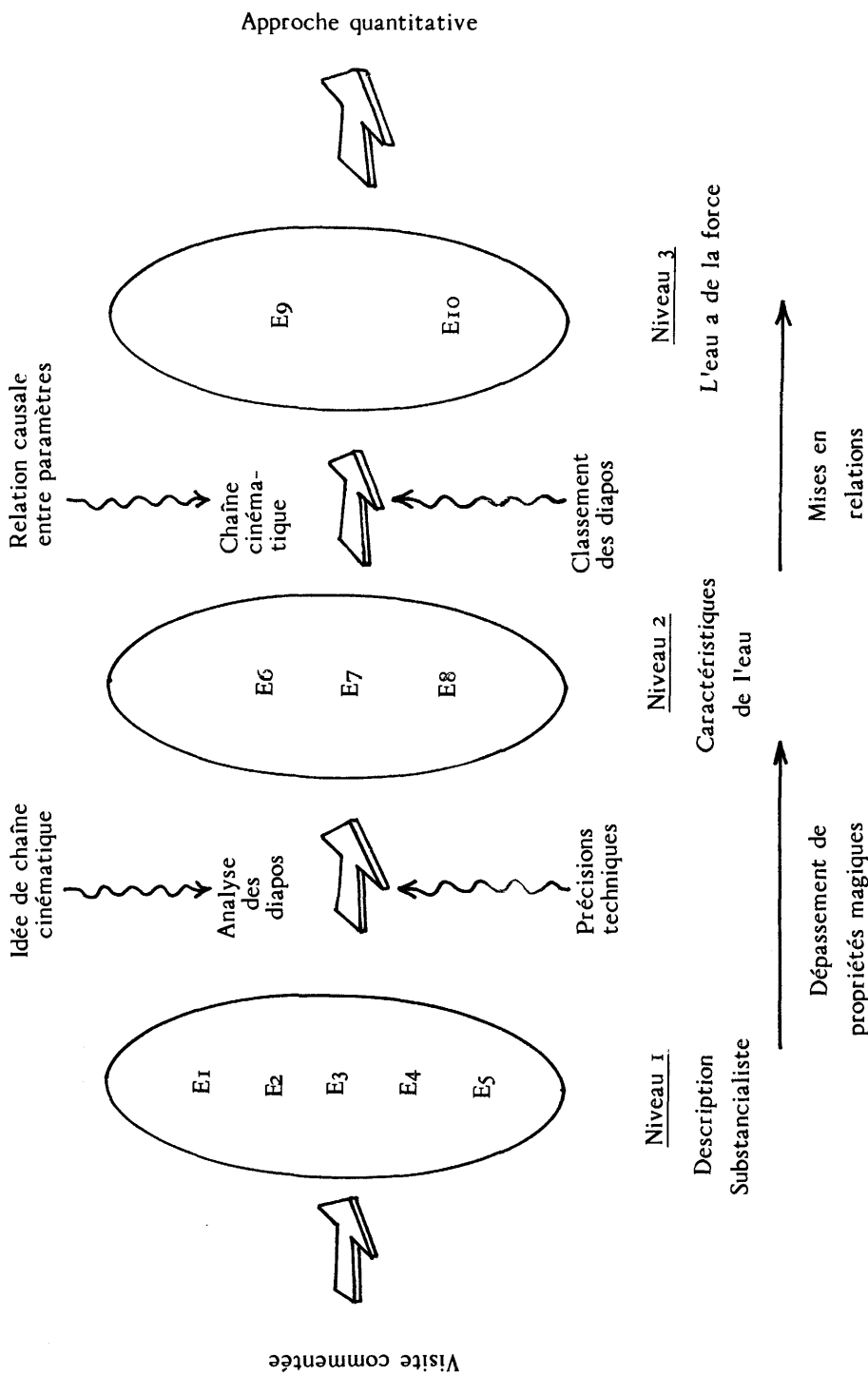
Compte tenu de la nature des activités mises en jeu, des interventions de la maîtresse et de la structuration progressive qui s'opère dans l'esprit des enfants, on peut classer ces formulations en trois niveaux, caractérisé chacun par un obstacle primordial qu'une situation déclenchante a permis en grande partie de dépasser.

- un premier niveau, décrit par les exemples E_1 à E_5 , qu'on peut qualifier de niveau descriptif, tant dans le domaine spatial que chronologique, et pour lequel l'obstacle substantialiste est très prégnant.

- un second niveau qui s'appuie sur les exemples E_6 , E_7 et E_8 où les enfants centrent leurs explications sur l'agent moteur qu'est l'eau, et dont ils dégagent petit à petit les caractéristiques cinétiques (vitesse et force) pour les relier à l'action de rotation de la turbine. A ce niveau, les paramètres spécifiés ne sont pas encore reliés entre eux, mais la fonction de l'eau est comprise. Il n'y a plus d'interpénétration des fonctions comme chez E_3 : un obstacle technique (la fonction de chaque élément³ de la chaîne) semble dépassé.

. Le troisième niveau correspond aux formulations E_9 et E_{10} : les relations causales sont clairement exprimées entre les paramètres isolés précédemment, l'eau en tant qu'agent, la hauteur de chute, la force, l'électricité ... La chaîne cinématique n'est plus seulement une succession d'objets techniques intervenant successivement, mais chacun est l'effet d'une cause qui le précède, et la cause d'un effet qui lui succède. On est en voie vers la recherche d'une grandeur commune à tous ces maillons et qui passe de l'un à l'autre. La possibilité d'une origine non mécanique de cette grandeur (la nature thermique émise par un enfant, et acceptée par la classe) est une avancée vers la généralisation qui conduira à l'énergie.

Néanmoins, comme le note Louis Hot, au cours de ces diverses séances les enfants n'ont pas utilisé spontanément le mot énergie, et, si les exemples donnés dans le compte rendu peuvent laisser croire que la notion est en partie dégagée, les réponses des élèves dans la dernière séquence montrent qu'il n'en est rien. Et même si le terme énergie a été prononcé, sur proposition de la maîtresse, les enfants n'en ont pas exprimé le besoin, preuve que le concept n'est pas encore opératoire pour eux puisqu'il n'est pas besoin de le qualifier.



. Les obstacles qui bloquent chaque niveau et les moyens de leur dépassement

Les niveaux qui viennent d'être définis relèvent de nombreuses représentations mais qui conduisent toutes au même genre d'obstacle, au sens précisé dans le chapitre précédent. Pour dépasser ces obstacles la maîtresse va avoir, par ses interventions, ses questionnements, ses reformulations, un rôle prépondérant.

- niveau 1 : le langage des enfants est peu précis, et l'énoncé spontané des éléments ne relève d'aucun ordre dans la chaîne mécanique. Il s'ensuit une confusion entre les caractéristiques observables des mouvements et les paramètres judicieux qui permettent de les décrire. Toutes les expressions des enfants revêtent un caractère animiste, qui fait obstacle, tout comme l'attachement à une substance commune.

On est ici dans le domaine de l'énergie-évidence. C'est l'analyse plus précise du système que constitue la centrale qui va permettre de dépasser cet obstacle. La maîtresse y parviendra en projetant aux enfants les quatre diapositives et en leur demandant de les classer. Les précisions techniques apportées par ces photographies vont permettre aux enfants de ne plus raisonner en terme de transmission ou transformations un peu magiques.

- niveau 2 : les paramètres qui caractérisent le système sont à présent séparés mais pas encore reliés : la centrale n'est pas conçue comme un seul système mais comme l'adjonction d'éléments en liaison par l'intermédiaire d'un agent. L'attention est concentrée sur le mouvement et ses transmissions, d'où des expressions en terme de force et de vitesse.

On est dans le domaine de l'énergie-force, les actions n'étant pas perçues comme internes au système. C'est en demandant le classement des diapositives et sa justification que la maîtresse va faire prendre conscience aux enfants de l'unité de système, dans lequel les diverses transformations internes portent sur une grandeur commune.

- niveau 3 : les relations causales entre paramètres sont reconnues et l'idée d'une grandeur qui, par diverses transformations, traverse le système en provenant de l'amont ("très haut") et en sortant vers l'aval (la ville, le village) est sous-jacente.

Mais à ce niveau, ce fluide qui se transforme tient encore beaucoup de l'analogie avec le mouvement. Pour progresser vers la notion d'énergie et la caractériser comme paramètre physique il faudra d'une part confronter les enfants à des situations similaires, ce que proposera la maî-

tresse dans la quatrième séance, d'autre part dépasser le niveau d'analyse simplement qualitatif pour aborder la quantification des paramètres, sans laquelle la conservation ne peut apparaître.

. Essai de schématisation de la succession des séquences

Ce schéma tente de représenter l'ensemble des séquences, repérées par niveaux de formulation, tels qu'ils viennent d'être décrits, en faisant figurer les obstacles qui leur sont attachés ainsi que les situations qui ont permis, dans l'exemple choisi, de les dépasser. Ce n'est qu'une façon analytique de "lire" la progression de la classe. On peut dire que l'on a là une mini-trame conceptuelle afférente à une situation d'enseignement du concept d'énergie. C'est un grand nombre de trames de ce type qui, assemblées, constitueront un outil didactique pour les maîtres.

Jean Louis TRELLU
Collège Louis Lumière, Marly-le-Roi
Equipe de didactique des sciences
expérimentales, INRP

Jacques TOUSSAINT
Ecole Normale d'Orléans
Equipe de didactique des sciences
expérimentales, INRP

*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.