

# ARTICLES DE RECHERCHE

## La causalité dans le raisonnement des étudiants

### Temps et causalité dans les raisonnements des étudiants en physique

**Laurence VIENNOT**

Université Paris 7

Laboratoire de Didactique de la Physique  
dans l'Enseignement Supérieur

Tour 24 - 2 Place Jussieu

75251 Paris Cedex 05 case 7021

#### **Résumé**

*Cet article concerne la manière dont les étudiants comprennent les relations entre grandeurs physiques du point de vue du temps, en particulier celles qui concernent des grandeurs considérées au même instant. Des résultats d'enquêtes montrent qu'il y a là des difficultés importantes liées à la recherche de causes. Les caractéristiques principales du "raisonnement linéaire causal" à propos de phénomènes relevant d'analyses quasi-statiques sont décrites et illustrées. Ce texte se termine par une discussion sur les objectifs de l'enseignement.*

#### **Abstract**

*This paper deals with the way that students interpret relationships between physical quantities with respect to time, especially those involving physical quantities that are considered at the same time. Research findings show some important difficulties which are probably linked with a causal interpretation of phenomena. The main features of "linear causal reasoning" about systems, as opposed to a quasi-static analysis, are described and illustrated. The paper ends with a discussion about pedagogical goals.*

L'analyse causale des phénomènes, dans le domaine de la physique comme ailleurs, conduit à raisonner en termes de causes, antérieures à leurs effets. Le temps est naturellement présent dans notre recherche d'intelligence du monde, et s'y associe à l'idée de succession. Les réponses que nous apporte la science prennent, elles, la forme de relations dont un caractère fondamental est leur permanence dans le temps.

C'est à cette permanence que l'on s'intéresse dans cet article. Celle-ci s'oppose en effet, d'une certaine façon, au désir de comprendre en termes d'événements enchaînés dans une succession causale. On décrit dans ce qui suit, à propos de quelques thèmes de physique élémentaire, certaines tendances de raisonnement qu'une série d'enquêtes réparties sur quinze ans ont permis de repérer chez des étudiants en fin d'études secondaires ou à l'université. Ces tendances communes consistent à nier, implicitement ou non, le fait que toutes les grandeurs impliquées dans des relations où ne figurent pas le temps soient à considérer au même instant, et que chaque relation elle-même doive être satisfaite quelque soit cet instant. Une explicitation un peu lourde de ces contraintes conduirait à écrire, par exemple,  $\vec{F}(t) = m \vec{a}$  (même  $t$ ), quelque soit  $t$ . Sous cette forme, il semble qu'il s'agisse d'une trivialité. La suite devrait montrer que tel n'est pas le cas, contribuer à situer les difficultés correspondantes, et amorcer une réflexion sur les objectifs d'enseignement.

Il s'agit donc d'une contribution très spécifique, et limitée. Nulle pré-attention ici à survoler l'ensemble des questions que soulèvent temps et causalité en épistémologie, deux thèmes dont l'ampleur décourage toute tentative de synthèse rapide.

## 1. LE TEMPS, VARIABLE PRIVILÉGIÉE

D'une certaine façon, le temps est une variable privilégiée chez les étudiants. Interrogés sur la signification du mot constante (Viennot, 1982, 1992) dans un énoncé du type : "telle grandeur est une constante", les étudiants répondent le plus volontiers qu'il s'agit d'une grandeur indépendante du temps. On dit aussi, en des termes symptomatiquement ambigus, qu'une constante, c'est quelque chose qui vaut **toujours** la même chose. La variation d'une grandeur, dans un premier réflexe de raisonnement, est d'abord rapportée au temps. C'est aussi en relation avec cette remarque que l'on peut interpréter la préférence des étudiants pour une formulation du type "à telle chose donnée, telle autre est une constante" plutôt que "telle grandeur ne dépend que de telle autre". La première, en effet, évoque une permanence dans le temps qui entraîne une autre, alors que la seconde renvoie, ne serait-ce qu'implicitement, à des non-dépendances vis à vis d'autres grandeurs.

Est-ce à dire que la relation au temps des grandeurs physiques est manipulée avec précision ? Ce qui suit tend à montrer que c'est le contraire qui se produit quand certaines difficultés liées à l'analyse causale des phénomènes sont présentes.

## 2. QUAND IL FAUT TROUVER UNE CAUSE : DÉLOCALISATION TEMPORELLE DES GRANDEURS ET DES RELATIONS

Prenons l'affirmation commune, bien identifiée maintenant, consistant à dire qu'en haut d'une trajectoire de chute libre un mobile est soumis à une force nulle. "Vitesse nulle entraîne force nulle" : telle serait une traduction simplifiée de cette réponse. En fait, l'examen d'énoncés de ce type fait apparaître d'autres aspects tout aussi importants dans la compréhension des raisonnements associés. Ainsi celui-ci : "en haut de la trajectoire, il y a la pesanteur qui agit et aussi la force du lanceur". Très fréquents aussi sont les commentaires où il est question, pour la phase ascendante, de "la force de la masse vers le haut". C'est qu'il s'agit à chaque fois de trouver une cause pour une situation paradoxale au premier abord : une sorte de "suspension" en haut de la trajectoire, ou même une montée, malgré la pesanteur. Cette cause, on va la chercher dans le passé du mouvement, c'est le geste du lanceur. Et, pour faire le lien entre présent et passé, on imagine un stockage de la cause dans le mobile, cela devient "la force de la masse" : un "capital de force", selon l'expression d'un étudiant. Même si, dans la question, il s'agit bien de la force agissant sur la masse à l'instant  $t$  où la vitesse est nulle, la recherche d'une cause renvoie la réponse dans le passé, via l'idée de stockage (Viennot, 1979). On observe des effets analogues à propos de propagation de signaux mécaniques ou sonores, dont la vitesse est indûment associée aux conditions initiales, via l'idée de force stockée (Maurines, 1992).

Autre exemple dans un domaine proche : une question d'examen de première année universitaire dont les réponses ont été analysées (Viennot, 1979) porte sur la condition de compression minimum pour qu'à la détente, un ressort posé verticalement au sol éjecte une masse simplement posée sur son extrémité supérieure. L'approche adaptée à cette question est en termes d'énergie potentielle, mais beaucoup d'étudiants (50%,  $N=416$ ) se lancent plutôt dans des comparaisons de type bilan de forces. Ceci est impropre pour plusieurs raisons. Remarquons simplement que la masse, au moment du décollage, ne subit aucune force vers le haut de la part du ressort. De plus, comparer la force du ressort sur la masse à celle de la masse sur le ressort, stratégie souvent adoptée, ne constitue pas, en bonne physique, un bilan de forces susceptible de décider du mouvement d'un objet donné, puisque précisément ces deux forces agissent sur des objets différents.

Le point ici est que ces tentatives inadaptées, au demeurant très fréquentes, se fondent sur une vision causale : quelque chose doit pousser plus fort que le poids, et ce ne peut être que le ressort. Cette idée, faute de se raccorder facilement à la description du physicien, va chercher l'agent "le plus fort", là encore dans le passé. Au plan verbal, rien ne situe dans le temps les termes évoqués - "*le ressort doit pousser plus fort que le poids de la masse*" - sinon parfois la mention "*à la compression maximum*". Mais les expressions algébriques associées sont révélatrices. Souvent inhomogènes (c'est une

caractéristique habituelle de ce genre de raisonnement), elles peuvent prendre par exemple les formes suivantes :

$$k(z_1 - z_0) > mg$$

$$k(z_1 - z_0) > mgz_0$$

$$(1/2) k(z_1 - z_0)^2 > mgz_0$$

où  $z_1$  et  $z_0$  sont respectivement les altitudes de l'extrémité du ressort à la compression maximum et au décollage.

La relation " $\vec{\Sigma F} = \text{un vecteur vers le haut}$ ", probablement sous-jacente à ces tentatives, est pratiquée de façon délocalisée dans le temps : les différents termes qu'y mettent ces étudiants ne sont pas relatifs au même instant.

Dernier exemple (Viennot, 1979), l'idée de stockage associée à celle de cause recherchée dans le passé peut également rendre compte de grandes différences dans les réponses d'étudiants à propos de deux situations pourtant équivalentes pour la question posée : deux virages à l'horizontale et de même rayon de courbure, l'un en cours depuis longtemps et l'autre qui s'amorce tout juste à la suite d'une ligne droite. La question, dont peu importent ici les détails, porte sur ce que devient un objet lâché dans un véhicule qui se trouve dans chacune de ces situations, à module de vitesse constant. A l'instant considéré, l'accélération est la même dans les deux cas et les réponses correctes sont identiques. Les étudiants (première année à l'université et classes préparatoires aux grandes écoles,  $N=450$ ), font massivement la différence (>70% dans tous les groupes interrogés). Pour eux, le mouvement de l'objet lâché s'explique par ce qu'il a stocké ("inertie", "élan", "force", "force centrifuge"), faute de s'expliquer par une cause bien évidente. Ce stockage relève de la phase antérieure, laquelle est différente dans les deux cas. Leur préférence va vers la prédiction d'un mouvement radial pour le virage en cours et d'un mouvement tangentiel pour celui qui s'amorce (sans que la distinction des référentiels, mentionnée dans la question, ne soit nécessairement reprise dans les réponses : autre problème bien connu (Saltiel & Malgrange, 1980).

### 3. SITUATIONS DE PROBLÈMES ET DÉLOCALISATION TEMPORELLE DES GRANDEURS ET DES RELATIONS

S'il est si peu évident pour les étudiants que les relations ne mentionnant pas le temps sont à comprendre comme impliquant des grandeurs toutes relatives au même instant, si l'interprétation causale de la situation proposée est un point si sensible, alors on peut s'attendre à d'importantes différences dans la façon dont les étudiants résolvent des problèmes selon le contexte spatio-temporel proposé. S. Fauconnet (1981, 1983) a mené une recherche sur ce point. On aborde avec cette étude le domaine plus complexe des systèmes composés de plusieurs sous-systèmes identifiés, et plus généralement celui des problèmes à plusieurs variables envisagés dans une **analyse quasi-sta-**

**tique** (comme en mécanique ou en thermodynamique) ou quasi-stationnaire (comme en électrocinétique). Outre la **permanence des relations** dans le temps, qui signe ce caractère quasi-statique ou quasi-stationnaire, ces problèmes nécessitent la prise en compte de **l'évolution simultanée d'un grand nombre de variables**.

Par exemple, l'une des situations étudiées par S. Fauconnet est un système de deux ressorts (de raideurs  $k_1, k_2$ ) pendus au plafond bout à bout, et dont on déplace l'extrémité inférieure. Les relations qui doivent être satisfaites en permanence entre force extérieure ( $F_{\text{ext}}$ ), tensions  $T_1, T_2$ , et allongements  $\Delta l_{\text{Total}}, \Delta l_1, \Delta l_2$  (chaque indice renvoyant à un ressort) sont :

$$T_1 = k_1 \Delta l_1 \quad T_2 = k_2 \Delta l_2 \quad F_{\text{ext}} = T_1 = T_2$$

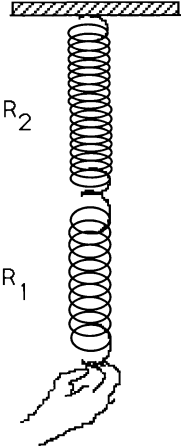
$$\Delta l_{\text{Total}} = \Delta l_1 + \Delta l_2$$

Une écriture quelque peu lourde, mais explicite, retraduirait ainsi les contraintes rappelées plus haut :

$$T_1(t) = k_1 \Delta l_1(t) \quad T_2(t) = k_2 \Delta l_2(t) \quad F_{\text{ext}}(t) = T_1(t) = T_2(t)$$

$$\Delta l_{\text{Total}}(t) = \Delta l_1(t) + \Delta l_2(t)$$

Serge Fauconnet a choisi de présenter à des étudiants de fin de Seconde deux problèmes mettant en scène le même système, ici l'ensemble des deux ressorts en question, et les mêmes équations. L'un des problèmes évoque la transformation d'un tel système (version "*transformation*", voir encadré 1). L'autre (version "*états*") propose la comparaison de deux systèmes statiques identiques, l'un dans l'état initial et l'autre dans l'état final de la transformation évoquée dans l'autre version. On donne l'allongement total final et on demande le déplacement du point de jonction des ressorts.



QUESTION (résumée) :

On tire sur l'extrémité inférieure et on la déplace de 10 cm. Quel est le déplacement du point de jonction des ressorts et quelle force extérieure doit-on exercer?

Notations et valeurs numériques :

$T_1, T_2$  : tensions des ressorts  $R_1, R_2$   
 $k_1, k_2$  : constantes de raideur  
 $k_1 = 3 \text{ N/cm}, k_2 = 2 \text{ N/cm}$   
 $\Delta l_1, \Delta l_2$  : allongements des ressorts

Encadré 1 : Résumé d'une question portant sur la transformation d'un système mécanique

Les résultats font apparaître des différences importantes dans les réponses d'élèves de Terminale et de DEUG (populations rassemblées, respectivement N=93 et N=87) à ces deux problèmes. Ainsi la relation  $F_{\text{ext}} = T_1 = T_2$  apparaît plus souvent en version "transformation" (60% contre 32%), tandis que la relation erronée  $F_{\text{ext}} = T_1 + T_2$  apparaît plus souvent en version "états" (32% contre 17%). Cette dernière relation accompagne probablement une vision statique d'une force extérieure s'opposant aux résistances conjointes et simultanées des deux ressorts. La relation correcte, elle, peut correspondre à une analyse conforme à l'analyse du physicien, mais aussi parfois à une lecture du problème en termes de transmission différée. Certains expriment clairement ce dernier point de vue, comme en témoigne la réponse résumée dans l'encadré 2.

Une réponse typique	Structure du raisonnement
$F_{\text{ext}} = T_1 = k_1 \Delta l_1$ $= 3 \cdot 10 = 30 \text{ N}$ <p>La force <math>T_1</math> est <b>alors</b> transmise à <math>R_2</math> :  <math>30 \text{ N} = k_2 \Delta l_2</math></p> $\Delta l_2 = 15 \text{ cm}$ <p>Le premier ressort devrait s'allonger et l'autre, <b>au bout d'un certain moment</b>, il devrait s'allonger aussi.</p>	<p>L'allongement de <math>R_1</math> est assimilé au déplacement de l'extrémité inférieure : analyse <b>locale</b></p> <p>...une nuance <b>temporelle</b>...</p> <p>on trouve une valeur supérieure au déplacement de l'extrémité inférieure!</p> <p>confirmation du caractère <b>chronologique</b> de l'analyse</p>

Encadré 2 : Une réponse typique à la question de l'encadré 1

Tout commence au point où l'on tire : la relation erronée  $F_{\text{ext}} = k_1 \Delta l_{\text{Total}}$  traduit une analyse très locale ( $\Delta l_{\text{Total}}$  est le déplacement du point du bas), qui ignore le fait que les deux ressorts se déforment en même temps (en fait  $F_{\text{ext}} = k_1 \Delta l_1 = k_1(\Delta l_{\text{Total}} - \Delta l_2)$ ). La suite explicite la non-simultanéité des allongements : "au bout d'un certain temps, la force se transmet au ressort de dessus". Cette "mise en histoire" de l'analyse peut attirer la sympathie du physicien scrupuleux, qui sait bien qu'en toute rigueur, l'information ne se transmet pas instantanément dans un système. Mais il faut savoir ce qu'elle coûte : le renoncement aux relations caractéristiques des ressorts données plus haut, et parfois, comme dans la réponse paraphrasée ci-dessus, un résultat absurde (compte tenu des valeurs des raideurs, le point de jonction des ressorts se déplacerait plus que l'extrémité inférieure !). Une étude parallèle menée sur une situation de vases communicants, analogue du point de vue des équations en cause, amène à des résultats en tout point similaires : centration initiale sur le point où a lieu l'action extérieure, "mise en histoire" de la transmission des volumes déplacés, toutes choses qui apparaissent préférentiellement en version "transformation".

De cette étude très riche il faut sans doute conclure que, pour des problèmes relevant d'un jeu d'équations analogues, de grandes différences se manifestent quant aux raisonnements qu'ils suscitent chez les étudiants selon leur contenu spatio-temporel et selon la façon dont ils appellent, ou non, une interprétation causale. Une situation de transformation perceptible dans l'espace et dans le temps, associée à l'évocation d'un agent humain conduit plus fréquemment les élèves à bousculer le caractère quasi-statique de la description - au profit d'une "mise en histoire" - que la comparaison de deux systèmes constitués des mêmes éléments, immobiles, chacun dans un état différent.

Au passage, l'étude de S. Fauconnet montre bien qu'il serait mal avisé d'étudier les processus de résolution de problèmes chez les élèves sans faire intervenir l'influence des contenus particuliers en cause, à structure formelle donnée.

#### **4. TRANSFORMATIONS QUASI-STATIQUES OU QUASI-STATIONNAIRES DANS LES RAISONNEMENTS COMMUNS : LES CARACTÉRISTIQUES DE BASE DU RAISONNEMENT LINÉAIRE CAUSAL**

La recherche de S. Fauconnet a ouvert la voie à des études importantes sur les raisonnements à propos de systèmes définis par plusieurs variables.

Le raisonnement séquentiel en électrocinétique (Closset, 1983) consiste toujours, dans ses diverses formes, à ignorer la validité simultanée et permanente des équations représentant le régime stationnaire des circuits électriques, ou encore à nier l'influence mutuelle permanente de tous les éléments du circuit. Là encore, c'est plus volontiers une histoire que l'on raconte, quelque chose (qui peut être, selon le niveau et la question, "de l'électricité", "du courant" ou "de la tension", ou même "la phase") partant du générateur pour subir ensuite des aventures locales sans rétroaction de l'aval sur l'amont.

Par rapport à l'étude pionnière de S. Fauconnet, on trouve essentiellement, à propos d'électrocinétique, une différence d'échelle : c'est d'un véritable raz-de-marée qu'il s'agit. Le raisonnement séquentiel en électrocinétique est un des plus "gros" phénomènes observables en matière de raisonnement commun. A (presque) tout niveau de formation (Closset, 1983) et dans tous les pays où l'on a pris la peine d'enquêter (Shipstone & al, 1988), on trouve largement cette tendance. Mais cette différence d'importance mise à part, on est, pour les circuits comme pour les ressorts bout à bout, dans une situation où une structure spatiale guide le raisonnement et suggère un "parcours de causalité", donc aussi des décalages temporels entre phénomènes. C'est d'ailleurs encore le cas pour des situations de propagation de la chaleur

(Rozier, 1988) ou d'hydrodynamique (Closset, 1992) qui, de façon prévisible, donnèrent lieu à des résultats de même nature.

Qu'en est-il, plus largement, pour les transformations quasi-statiques de **systèmes à plusieurs variables sans structure spatiale marquée** ? Une recherche centrée sur la thermodynamique (Rozier, 1988) répond largement à cette question. Elle resitue, par la même occasion, les résultats précédents dans une description plus générale.

Un premier aspect du raisonnement commun sur les problèmes à plusieurs variables est son aspect linéaire. On entend par là le fait que les explications sont de la forme :  $\Phi_1 \rightarrow \Phi_2 \rightarrow \Phi_3 \rightarrow \dots \Phi_N \rightarrow \dots$ , chaque phénomène  $\Phi$  mentionné étant spécifié à l'aide d'une seule variable.

Par exemple, pour expliquer l'augmentation de pression lors d'une compression adiabatique d'un gaz parfait, les étudiants (trois premières années universitaires et classes préparatoires, résultats rassemblés) fournissent des argumentations du type :

$V$  (volume)  $\searrow$   $n$  (densité particulaire)  $\nearrow$  *chocs* (nombre de chocs par...)  $\nearrow$   $p$  (pression)  $\nearrow$

Le facteur cinétique est oublié. Les exemples de telles réductions dans l'analyse des facteurs intervenant dans les phénomènes physiques sont légion (Viennot, 1992) mais ce n'est pas le sujet ici.

Venons-en donc au second aspect marquant du raisonnement commun, qui est plus directement lié à l'approche causale.

Requis d'expliquer pourquoi le volume augmente lors du chauffage isobare d'un gaz parfait, de nombreux étudiants (mêmes types de populations) manifestent à nouveau la tendance aux argumentations linéaires. Les commentaires du type " $Q$  (*chaleur reçue*)  $\rightarrow T \nearrow \rightarrow p \nearrow \rightarrow V \nearrow$ " abondent (43%, N=120).

Mais là, on assiste en outre à ce qui peut apparaître comme une franche contradiction entre un élément de la réponse,  $p \nearrow$ , et l'énoncé "on chauffe à pression constante". Qu'en est-il ?

La clef de cette énigme réside dans le fait que la réponse commune se fait sur fond de chronologie. Implicite chez la plupart, celle-ci est parfois clairement explicitée. Il y a deux temps dans cette réponse. Dans un premier temps, " $Q$  (*chaleur reçue*)  $\rightarrow T \nearrow \rightarrow p \nearrow$ ", *le piston est bloqué*, et dans un second temps "*le piston est relâché, le volume augmente et la pression reprend la valeur extérieure*". Ainsi aménagée, chacune des étapes de l'explication est bien cohérente, et, **en fin de compte**, la pression rejoint la contrainte de l'énoncé.

C'est le moment de remarquer une systématique ambiguïté du langage. On pourrait croire qu'une bonne traduction des flèches horizontales utilisées



plus haut pour résumer les argumentations serait un “donc” logique. S’il s’agit d’une histoire, la flèche recouvre un indicateur de chronologie : “ensuite”. Mais c’est un terme parfaitement intermédiaire qui vient naturellement dans l’argumentation : “alors”. Le tableau 1 montre que le français n’est pas la seule langue à offrir pareille commodité.

Statut ↓	Français	Anglais	Espagnol
Logique	donc	therefore	por eso
Intermédiaire	alors	then	entonces
Chronologique	ensuite	later on	despues

Tableau 1 : Plusieurs langues, même dérive de signification

En résumé, les caractères du raisonnement linéaire causal sont les suivants :

- ce raisonnement enchaîne linéairement des phénomènes ( $\Phi$ ) spécifiés chacun à l’aide d’une seule variable:  $\Phi_1 \rightarrow \Phi_2 \rightarrow \Phi_3 \rightarrow \dots \rightarrow \Phi_N \rightarrow$ ,
- la relation conduisant de chaque phénomène au suivant a un statut ambigu, intermédiaire entre une implication logique et une indication de succession chronologique.

Cet aspect temporel donne à l’argumentation un statut proche de celui d’une histoire enchaînant des phénomènes simples. Il s’oppose, rappelons-le, à l’analyse quasi-statique où toutes les variables évoluent en même temps.

## 5. RAISONNEMENT LINÉAIRE CAUSAL ET DIFFICULTÉ DE CONCEVOIR LES RÉGIMES PERMANENTS

Une conséquence immédiate de l’introduction d’une succession temporelle dans l’argumentation est que chacun des phénomènes observés s’inscrit dans une durée - d’existence ou d’évocation, on ne sait trop - qui est nécessairement limitée. Compris comme **successifs**, les événements le sont aussi comme **temporaires**. Cela peut conduire à une grande tolérance vis-à-vis d’argumentations qui, lues sans cette clef, apparaissent au physicien comme génératrices de contradictions ou d’absurdités. Ceci a déjà été illustré plus haut, à propos de l’élément de réponse “p/” qui, donné à propos du chauffage isobare d’un gaz parfait, contredit, mais temporairement seulement, l’énoncé. On peut s’attendre, à ce point de l’exposé, à ce que le cas des régimes permanents soit particulièrement propice à l’apparition de divergences entre l’analyse du physicien et celle qu’offre le raisonnement linéaire causal.

C'est d'abord à propos de la compression adiabatique d'un gaz parfait que cette difficulté a été débusquée (Rozier, 1988). Priés d'expliquer pourquoi la température  $T$  augmente, de nombreux étudiants (42%,  $N=140$ ) donnent une argumentation du type " $V \searrow \rightarrow n \nearrow \rightarrow \text{Chocs} \nearrow \rightarrow T \nearrow$ ", avec parfois la précision : "*les chocs entre molécules dégagent de la chaleur*". Devant un tel commentaire, une question devrait surgir : comment cela peut-il durer ? Si un récipient thermiquement isolé comporte à l'intérieur un générateur permanent de chaleur, à savoir les chocs entre molécules, le phénomène va diverger, et on voit mal d'autre issue que l'explosion. Ce raisonnement par l'absurde ne se produit pas chez les étudiants. Il n'est pratiquement jamais évoqué par des enseignants en formation ( $N=85$ ) à qui l'on demande ce qu'ils répondraient si un de leurs élèves leur proposait cette argumentation (Viennot & Kaminski, 1991). La question de la permanence, c'est le moins qu'on puisse dire, n'occupe pas le devant de la scène. Et certains étudiants à qui on la soumet explicitement s'en tirent parfois par cette réponse : "*C'est seulement pendant que leur nombre augmente que les chocs dégagent davantage de chaleur*". On retrouve là cette transposition du découpage de l'argumentation dans un découpage temporel des phénomènes. Dans cette perspective, la question de la permanence, le raisonnement par l'absurde, n'ont plus aucune prise sur l'analyse.

Ce n'est donc pas par hasard que les explications usuelles de vulgarisation sur des phénomènes tels que l'effet de serre se centrent avec une telle prédilection, mais pratiquement toujours sans le dire, sur les régimes transitoires plutôt que sur les régimes permanents. Qui n'a lu de ces textes où l'on explique l'effet de serre en disant qu'il fait plus chaud à l'intérieur parce qu'il rentre plus d'énergie qu'il n'en sort ? On voit mal comment la chose peut durer sans risques importants pour l'installation, mais là encore, la question n'est pas posée. On tient une explication - un surplus d'énergie à l'entrée - qui est aussi le début de l'histoire, et lorsque l'épisode suivant - il fait chaud - se produit, il n'y a plus de question d'énergie ni de permanence qui soit encore d'actualité. Les bilans d'énergie, envisagés toujours temporairement, ne peuvent avoir de conséquences dramatiquement divergentes.

Cela dit, il suffit d'essayer d'expliquer verbalement l'effet de serre en termes de déplacement d'un régime permanent (de non-équilibre) pour mesurer la complexité du raisonnement. Et l'on se surprendra facilement, devant cette complexité, à séquentialiser la description en évoquant successivement bilans énergétiques et variations de température, tel cet essai : "*le système, vitre comprise, reçoit un peu plus d'énergie qu'il ne peut en émettre, compte tenu de la bande passante du verre, alors sa température augmente, si bien qu'il émet un peu plus d'énergie dans cette bande, alors le bilan est encore déséquilibré mais moins qu'avant, etc. jusqu'à ce qu'il puisse sortir autant d'énergie qu'il en rentre*", ou bien l'équivalent pour un refroidissement de la serre.

Envisager la simultanéité de plusieurs phénomènes est déjà difficile. Lorsqu'il s'agit de simultanéité d'évolutions, c'est encore moins naturel (voir

aussi Ménigaux, 1992). Les physiciens font appel à la démarche différentielle pour légitimer et rendre fructueuse l'approche esquissée dans l'explication ci-dessus. Par passage à la limite, cette procédure conduit à des résultats analytiques respectant les contraintes rappelées plus haut : permanence des relations, simultanéité des évolutions. C'est le prix à payer pour maîtriser le passage du désir initial d'explication - il rentre plus d'énergie qu'il n'en sort - avec la description du régime permanent et de son éventuelle évolution quasi-statique. Ce prix est conceptuellement très élevé. Accéder à la maîtrise d'une telle procédure n'est évidemment pas simple, mais il apparaît aussi qu'il est même difficile de comprendre ce qu'elle effectue (Artigue, Ménigaux & Viennot, 1990). Les explications vulgarisantes évoquées au début de cette discussion en témoignent largement.

## 6. RAISONNEMENT LINÉAIRE CAUSAL ET COMPRÉHENSION DE TEXTE

A propos de cet exemple de l'effet de serre, on pourrait dénoncer la désinvolture ou le défaut de vigilance de l'explication, et s'en tenir là. Ce serait négliger le plus important : la satisfaction engendrée par ce type d'explications chez ceux qui la reçoivent. Peut-être mesure-t-on encore mieux cette faveur lorsqu'elle se manifeste à propos d'un texte ne comportant pas d'erreurs de physique, mais dont la compréhension est distordue par un effet de proximité qui met en quelque sorte le raisonnement linéaire causal des étudiants "en résonance".

Ainsi des étudiants (Math. Sup, Math. Spé, Licence, I.U.T., résultats rassemblés (Rozier, 1988) ont été d'abord priés de lire le texte suivant (Valentin, 1983) :

*"L'énergie d'agitation que possède en moyenne chaque molécule est suffisante pour empêcher les molécules des gaz qui nous environnent de se lier les unes aux autres : dans un gaz, les molécules passent leur temps à se cogner et à rebondir de façon aléatoire. Mais, si l'on abaisse la température, le système pourra se liquéfier et même se solidifier. Ces phénomènes surviennent quand, à force de diminuer la température, les molécules ont une énergie cinétique moyenne si basse qu'elles ne peuvent plus résister à l'attraction électromagnétique qu'elles exercent les unes sur les autres : elles commencent par s'agglutiner dans l'état liquide et finissent par se lier dans l'état solide".*

La question posée ensuite porte sur l'affirmation suivante :

*"A un instant donné de la liquéfaction, l'énergie cinétique moyenne d'une molécule du gaz est supérieure à celle d'une molécule apparte-*

*nant au liquide (liquide et vapeur sont en équilibre thermique à l'instant considéré)".*

On demande aux étudiants s'ils pensent, d'une part que le texte suggère l'affirmation, d'autre part que l'affirmation est vraie. Une écrasante majorité considère que le texte suggère l'affirmation (77%, N=181), et que celle-ci est vraie (80%). L'auteur précise bien lui-même une page plus loin, qu'à l'équilibre thermodynamique, les énergies cinétiques moléculaires moyennes sont les mêmes dans le liquide et dans le gaz. L'affirmation est donc fautive. Elle n'est pas contenue dans le texte. Pourtant, ces étudiants ont cru l'y lire. Comment interpréter ce résultat ?

Avec prudence, d'abord. On est là à un niveau de conjecture qui interdit d'être péremptoire. Par exemple, on pourrait dire simplement que, puisque les étudiants pensent que l'affirmation est vraie, ils ont tout simplement cru lire ce qu'ils pensaient déjà. Mais ces précautions n'empêchent pas d'établir des rapprochements et de poser des interrogations, dont celle-ci : pourquoi les étudiants pensent-ils que l'affirmation est vraie ?

Un retour sur la structure du texte conduit à constater qu'il est marqué par une succession d'indicateurs de chronologie : "Si... pourra... quand... à force de... ne peuvent plus... commencent par... finissent par...". Cette structure peut se schématiser par la chaîne suivante :

(gaz)  $T \searrow \rightarrow e_c$  (énergie cinétique moyenne..)  $\searrow \rightarrow$  les interactions gagnent  $\rightarrow$  état liquide  $\rightarrow \rightarrow$  état solide.

La tendance commune à inclure du temps dans l'explication trouve ici un terrain de choix. Le texte peut alors être lu comme une histoire. Au début de l'histoire : le gaz. Plus tard : le liquide. Entre-temps : la diminution de la température, puis celle de l'énergie cinétique moléculaire moyenne. Dans l'affirmation proposée, les deux phases sont à l'équilibre, c'est-à-dire présentes simultanément, à la même température. Il semble, à travers les réponses des étudiants, que la structure chronologique attribuée au texte ait balayé l'idée de simultanéité présente dans l'énoncé, et se traduise logiquement par l'idée que l'énergie cinétique moyenne est plus faible dans une phase, celle "de la fin", que dans l'autre, celle "du début".

La subtilité de cette analyse peut laisser certains sceptiques. Le taux massif de lecture distordue ne peut, lui, laisser indifférent.

## 7. EN CONCLUSION : QUELQUES ÉLÉMENTS POUR DISCUTER LES OBJECTIFS D'ENSEIGNEMENT

L'indifférence n'est pas, d'habitude, la première caractéristique des débats soulevés par ce type de résultats. C'est qu'ils touchent de très près nos manières de raisonner les plus familières, et pas seulement en physique.

Familières, elles le sont parce que satisfaisantes par leur simplicité et leur inscription dans le registre des histoires, celui de notre vécu quotidien. Ces modes de raisonnement nous apparaissent également très fructueux car ils semblent parvenir à leurs fins, alors qu'en fait ils sont la plupart du temps téléguidés par une conclusion connue d'avance. A chaque conclusion visée, sa chaîne explicative. Si l'on invoque par exemple une diminution de la densité particulaire, ce peut être une fois pour expliquer que la pression est faible en altitude (sans parler de température), une autre pour expliquer l'ascension d'une montgolfière (sans dire qu'alors la pression n'est pas pour autant diminuée à l'intérieur). On se garde bien de confronter une explication à une autre : le but, alors, n'est pas de théoriser, mais de signaler les facteurs importants et de donner une sorte de vision du phénomène. L'économie et son cortège d'explications des effets d'une hausse ou d'une baisse du dollar, par exemple, renvoient bien souvent à cette même constatation.

Enfin ces raisonnements sont très voisins, en surface, de ceux que les scientifiques mettent en jeu avec profit. Ils se rapprochent des discours entre pairs, où les fréquents raccourcis de langage peuvent laisser croire qu'on ne s'inquiète pas des facteurs non mentionnés. Le souci de vulgariser, ou tout simplement de "faire passer" leur message, peut conduire ces mêmes scientifiques à mettre leurs explications en résonance avec les tendances naturelles de leur public, à savoir le raisonnement linéaire causal : les phénomènes importants y apparaissent bien dégagés, et l'auditoire est heureux d'avoir l'impression de comprendre.

Là se trouve l'un des enjeux importants dans cette discussion : l'impression de comprendre. L'autre enjeu est l'éducation du raisonnement à plusieurs variables, la cohérence qui s'y attache, et le prix que cela coûte. Au moment de fixer les objectifs d'un enseignement, quel qu'il soit, ces enjeux méritent examen et discussion. Les situations de physique, en effet, mais aussi la vie tout court, sont des problèmes à plusieurs variables.

Si l'on prend, par exemple, l'enseignement de physique délivré dans l'enseignement secondaire français, on observe qu'il n'y figure pratiquement pas d'incitations à raisonner sur des dépendances multifonctionnelles. Bien entendu, les relations ("formules") enseignées mettent en jeu plusieurs grandeurs. Mais c'est le plus souvent sous forme de valeurs numériques, et non de variables, que ces grandeurs interviennent dans les activités proposées aux élèves. Quand, de son côté, l'enseignement des mathématiques se centre sur les fonctions d'une variable, il ne faut pas s'étonner que les élèves soient bien

désarmés devant les problèmes multifonctionnels. Plus largement, sur le rôle du temps en physique, sur le statut des lois où cette variable ne figure pas, on trouve encore peu, dans les textes officiels, d'encouragements à faire réfléchir les élèves. C'est que des objectifs qui ne correspondent pas à un contenu particulier trouvent difficilement leur place dans des libellés de programme. On les voit actuellement poindre dans les "exigences et apprentissages" attendus (voir par exemple, le programme de Quatrième (grade 8), 1993) et dans les textes d'accompagnement illustrant l'esprit et les activités suggérées pour ces enseignements (par exemple, celui de Seconde (grade 10), 1993, paragraphe "dépendances mutuelles entre grandeurs et cas limites"). De telles incitations prendront véritablement leur effet quand la nature des activités proposées aux élèves sera comprise comme largement aussi importante que la liste des contenus à traiter.

Peut-être aussi ces préoccupations prendront-elles d'autant mieux racine dans l'enseignement qu'elles apparaîtront comme gérables simplement. Il n'est pas nécessaire d'introduire les dérivées partielles pour introduire une analyse des dépendances multiples et montrer les contraintes correspondantes : des questions sur ce que devient la surface d'un rectangle quand longueur et/ou largeur sont modifiées peuvent y suffire. Quant au rôle du temps dans les relations entre grandeurs, la plus simple des actions est de ne pas (ne plus ?) le considérer comme évident. Envisager l'éventualité d'une interprétation causale, d'une lecture chronologique des relations par les élèves, c'est être ouvert dans le dialogue à des indices qui risquent autrement de passer inaperçus. Peut-être faut-il avoir vu une étudiante en formation au métier d'enseignant s'émerveiller que l'on puisse continuer à appliquer la formule  $\vec{F} = q \vec{v} \wedge \vec{B}$ , même pour une particule évoluant dans un champ non uniforme, "parce que tout est modifié en même temps mais la formule tient toujours", pour considérer que les objectifs d'enseignement discutés ici méritent véritablement de l'être ?

Mais surtout, c'est le champ d'intervention considérable de ces préoccupations qui donne à penser. En tout domaine, il importe de savoir juger si l'on peut conclure ou non, si les chaînes explicatives qu'on se voit présenter sont d'authentiques chaînes d'implications, ou bien seulement des argumentations qui n'ont de contraignantes que l'apparence.

De tels objectifs ne peuvent s'inscrire que dans le long terme. Mais dire cela, ce n'est pas renoncer d'avance.

## BIBLIOGRAPHIE :

ARTIGUE M., MENIGAUX J. & VIENNOT L.(1990). Some aspects of students conceptions and difficulties about differentials. *European Journal of Physics*, 11, pp. 262-267.

CLOSSET J.L. (1983). *Le raisonnement séquentiel en électrocinétique*. Thèse de troisième cycle, Université Paris 7-L.D.P.E.S.

CLOSSET J.L. (1992). Raisonnements en électricité et en électrodynamique. *Aster*, 14, pp. 143-155.

FAUCONNET S. (1981). *Etude de résolution de problèmes : quelques problèmes de même structure en physique*. Thèse de troisième cycle, Université Paris 7-L.D.P.E.S.

FAUCONNET S. (1983). Etude de résolution de problèmes analogues. In *Atelier International d'été : Recherche en didactique de la physique*. Paris, C.N.R.S.

MAURINES L. (1992). Spontaneous reasoning on the propagation of visible mechanical signals. *International Journal of Science Education*, 14, 3, pp. 279-293.

MAURINES L. (1992). Les élèves et la propagation des signaux sonores. *Deuxième Séminaire National de Recherche en Didactique des Sciences Physiques*, Sète, pp. 47-56.

MENIGAUX J. (1991). Raisonnements des lycéens et des étudiants en mécanique du solide. *Premier Séminaire National de Recherche en Didactique des Sciences Physiques*, Grenoble, pp. 16-25 et *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 738, pp. 1419-1429.

ROZIER S. (1988). *Le raisonnement linéaire causal en thermodynamique classique élémentaire*. Thèse, Université Paris 7-L.D.P.E.S.

ROZIER S. & VIENNOT L. (1991). Students' reasonings in thermodynamics. *International Journal of Science Education*, 13, 2, pp. 159-170.

SALTIEL E. & MALGRANGE J.L. (1980). "Spontaneous" ways of reasoning in elementary kinematics. *European Journal of Physics*, 1, pp. 73-80.

SHIPSTONE D.M., RHONECK V., JUNG W., KARQVIST C., DUPIN J.J., JOHSUA S. & LICHT P. (1988). A study of students' understanding of electricity in five European countries. *International Journal of Science Education*, 10, 3, pp. 303-316.

VALENTIN L. (1983). *L'univers mécanique*. Paris, Hermann.

VIENNOT L. (1979). *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*. Paris, Hermann.

VIENNOT L. (1982). L'implicite en physique : les étudiants et les constantes. *European Journal of Physics*, 3, pp.174-180.

VIENNOT L. & KAMINSKI W. (1991). Participation des maîtres aux modes de raisonnement des élèves. *Enseñanza de las Ciencias*, 9, 1, pp. 3-9.

VIENNOT L. (1992). Raisonnement à plusieurs variables : tendances de la pensée commune. *Aster*, 14, pp. 127-141.