

Causalité et relation fonctionnelle : d'une discipline à l'autre

Laurence Viennot¹

Pourquoi ? La question revient dès la petite enfance, comme elle accompagne les recherches les plus sophistiquées. Jamais véritablement satisfaite, elle repousse sans cesse les limites du champ d'investigation, se déclenche sous des modalités multiples, emprunte éventuellement divers détours : Pour quelle raison ? Comment ça marche ? Est-il nécessaire que...sachant que... ? Est-il fréquent que...dans telles conditions ? Pour quoi faire ?

Cet ouvrage rassemble des contributions de spécialistes de différentes disciplines, biologie, géographie, mathématiques, physique, proposant les points de vue de chercheurs, de philosophes et de didacticiens sur les réponses qu'appellent ce lancinant « pourquoi » ?

L'angle choisi est inscrit dans le titre de cette introduction : « Causalité et relation fonctionnelle », avec, en filigrane, cette question: un décalage temporel s'insère-t-il nécessairement entre cause et effet ? La variable temps, la question des différentes échelles associées, occupent ainsi une place privilégiée dans ces discussions. On pourrait même envisager qu'elle introduise un « ou » disjonctif: « causalité ou relation fonctionnelle », la causalité restant confinée au domaine des histoires qu'on peut raconter : il se passe ceci, *donc - alors - ensuite* il se passe cela, tandis que des relations fonctionnelles

¹ Laboratoire de didactique des sciences physiques, UFR de Physique, Université Denis Diderot (Paris 7), viennotl@ccr.jussieu.fr

nous renseignent sur l'égalité maintenue à chaque instant de fonctions de plusieurs variables décrivant un système à l'équilibre, ou évoluant éventuellement « lentement », ce dernier terme étant évidemment à surveiller de près.

Mais d'abord, faut-il, en science, chercher des causes, et des réponses à d'illusoires « pourquoi » ? Evitant le ridicule d'affronter pareille question - répondra-t-on jamais vraiment « non » ?- les textes qui suivent tentent plutôt de clarifier ce que produisent les chercheurs, en pratique, pour répondre à ce fameux « pourquoi ? », et d'analyser les difficultés de ceux qui apprennent à ce propos.

Il est vrai qu'à contempler le déroulement des idées dans l'histoire, la recherche d'une cause, celle du mouvement par exemple, s'est souvent révélée remarquablement efficace pour bloquer l'accès à une compréhension des lois du domaine. Jérôme Viard nous en détaille un autre exemple à propos du rebond des corps réputés durs. On y voit un Huygens avancer dans l'explicitation des lois correspondantes, libéré du besoin d'explication, tandis que Leibniz s'y empêtre. Les implications de cette controverse longtemps niée sont d'un intérêt exemplaire, appuyé encore dans le texte de Viard par une expérimentation didactique où, comme en contrepoint, interviennent les mêmes débats et se joue le même enjeu : la définition de la dureté.

A l'opposé, la géographie nous offre l'image d'une discipline où le besoin d'explication apparaît comme un développement relativement récent, la question étant, sous la plume de François Durand-Dastès, de savoir pourquoi tel caractère de l'espace est situé « là et pas ailleurs », ou bien « là plus qu'ailleurs ». L'approche systémique qui emboîte le pas à cette question s'accompagne volontiers d'analyses synchroniques, lesquelles ne sont pas sans rappeler, par certains caractères, les analyses physiques quasi-statiques ou quasi-stationnaires, illustrées en chapitre 1.

Or précisément, en physique, les transformations ainsi décrites se distinguent nettement de celles pour lesquelles on ne peut négliger, par rapport aux durées caractéristiques de l'évolution globale, les temps de propagation des perturbations d'un bout à l'autre du système. Ces analyses dites « quasi-statiques » ont de quoi surprendre. Ainsi, la relation des gaz parfaits peut servir d'exemple emblématique de contrainte *permanente* posée entre valeurs de variables prises *au même instant*, pour une transformation d'un tel gaz déclarée quasi-statique. Mais comment les molécules d'un gaz se préviennent-elles quasiment

instantanément – soi-disant - de ce qu'il se passe à un bout du récipient, par exemple le mouvement d'un piston, comment mettre en œuvre des liens cause-effet simples, en bonne succession chronologique ? Comment une transformation peut-elle se faire sur la base de soi disant états d'équilibre : choquante antinomie. L'approche systémique quasi-statique, pourrait-on dire, garde la relation synchronique et met la causalité dehors.

Mais entre causalité et relation fonctionnelle, ce n'est pas nécessairement l'opposition qui sera soulignée.

C'est un texte tout en nuances que nous livre Claude Debru, pour revenir sur les points de vue de Kant et Helmholtz, y soulignant les passages consacrés à la causalité et au temps, avec, chez le premier, la coexistence possible de la cause et de l'effet. Claude Debru analyse ensuite comment s'effectue, chez Mach, le passage de la notion de causalité à celle de fonction.

Michel Paty, de son côté, s'attache à clarifier, à distinguer et à situer l'une par rapport à l'autre les notions de causalité et de déterminisme, tout en soulignant les difficultés de compréhension associées. Les contraintes que la relativité a posées à la causalité, la façon dont le déterminisme a pu être (cru) ébranlé par les phénomènes de chaos, autant d'événements analysés par l'auteur. La physique quantique est enfin l'occasion pour lui de mettre au premier plan la notion de « nécessité ».

La nature probabiliste de la description quantique, qui est, dans ce cas, un aspect véritablement constitutif, rejoint d'autres domaines pour contraindre à une extension majeure de l'idée de relation, vers celle de relation stochastique. François Durand-Dastès évoque ainsi des débats, en géographie, qui traduisent la difficulté, encore, à situer déterminisme et aléatoire l'un par rapport à l'autre.

Dans le champ des mathématiques aussi, Michèle Artigue et Bernard Parzysz le montrent bien, se posent des questions non sans rapport avec celles soulevées plus haut : présence communément observée, et inappropriée, de nuances causales ou du moins temporelles dans l'interprétation de relations logiques, comme dans celles de notions probabilistes. La rationalité mathématique se trouve ainsi communément teintée d'éléments d'interprétation tout à fait étrangers, en principe, à son fonctionnement orthodoxe. Ces éléments apparaissent d'ailleurs, sous la plume des auteurs, comme ayant été relativement étrangers, également, aux préoccupations des didacticiens

des mathématiques. Il est d'autant plus appréciable d'en apercevoir ici une analyse.

Mais ce sont sans doute les deux exposés concernant la biologie, de Michel Morange et de Jacques Ricard, qui éloigneront le plus le lecteur d'une conception par trop bi-polaire de la question du pourquoi, « histoire causale » d'un côté, relation fonctionnelle ou stochastique de l'autre.

Michel Morange, à travers trois exemples extrêmement parlants, souligne la diversité des statuts de l'explication en biologie, depuis l'idée de cause identifiable, déterminante, en tout cas utile à considérer comme telle lorsqu'il s'agit de soigner, jusqu'à la prise en compte de facteurs multiples dont certains définissent plus des conditions de possibilité que des moteurs directs de changement. Ce texte illustre avec force le jeu des contraintes que posent les gènes, des conditions imposées par le milieu, de l'histoire des organismes, et par là disqualifie toute position exclusivement centrée sur l'un des pôles d'un débat qui opposerait la vision sélective à un déterminisme moléculaire. Montrant combien s'imposent l'idée que le vivant relève du fonctionnement intégré de multiples composants élémentaires, et celle de propriété émergente d'un système, il contribue à rendre particulièrement bienvenu l'exposé de Jacques Ricard.

J. Ricard, en effet, présente un cadre d'interprétation des propriétés des systèmes relevant de la théorie de l'information de Shannon. Il introduit une fonction simple mesurant l'« information » d'un système composé, liée à la différence de deux fonctions de type entropie, associées respectivement aux états différents que l'on obtient d'une part par la mise en contact de deux (sous-)systèmes, d'autre part par simple croisement des possibilités offertes par ces systèmes considérés indépendamment. Cette fonction sert à définir les notions de complexité – à ne pas confondre avec complication – et d'émergence d'une manière limpide d'un point de vue formel. Le lecteur éprouvera peut-être, par la même occasion, combien l'intuition, elle, peine à faire rentrer ses habitudes interprétatives dans ce schéma unificateur. Celui-ci se révèle puissant et fécond : Jacques Ricard y rattache notamment une vision renouvelée de l'idée de flèche du temps, non soumise ici à celle d'évolution statistique d'un grand nombre d'individus.

Avec ces quelques regards croisés, d'une discipline à l'autre, l'objectif est évidemment d'enrichir l'expérience que chaque lecteur a de son propre domaine de familiarité. Et si, dépassant un hommage

sacrificiel au dieu de l'interdisciplinarité, il s'agit de mener de *véritables* entreprises, de recherche, d'enseignement, d'ingénierie, associant plusieurs disciplines, une perception un peu affinée des rouages de l'explication dans chacune d'entre elles ne semble pas du luxe. Souhaitons que, au delà du plaisir d'une rencontre inhabituelle et agréablement tonique, cet ouvrage contribue à faire avancer la réflexion sur ce point.

Ce livre est issu de la rencontre organisée le 13 Mars 2002 par l'Ecole Doctorale « Savoirs scientifiques. Epistémologie, histoire des sciences et didactique » de l'Université Denis Diderot (Paris 7), sur le thème « Causalité et relation fonctionnelle ».

Raisonnement commun en physique : relations fonctionnelles, chronologie et causalité

Laurence Viennot¹

Résumé

Une tendance forte du raisonnement commun en physique consiste à mener l'explication de phénomènes relatifs aux systèmes physiques comme des histoires. Ce mode d'analyse enchaîne des maillons à structure simple : cause « alors » effet, chacun de ces aspects étant spécifié par une seule variable. Favorisée par l'ambiguïté verbale (« alors ») et symbolique (la flèche), une chronologie se superpose plus ou moins implicitement à l'enchaînement explicatif. Une distance considérable sépare cette approche de l'analyse quasi-statique qui prévaut dans de nombreux domaines d'enseignement de la physique. Ceci conduit aux questions suivantes : plus ou moins grande facilité d'accès à l'explication pour des phénomènes respectivement transitoires ou stationnaires, nécessaire prise en compte d'échelles de temps distinctes pour un même phénomène, résonance fréquente et parfois dommageable entre le souhait de motiver l'auditoire et l'adoption d'argumentations en termes d'histoire. On évoque enfin l'intérêt de promouvoir dans l'enseignement une connaissance clarifiée des distinctions discutées ici, dont le champ d'utilité ne se limite d'ailleurs pas aux sciences physiques.

¹ Voir note 1, p.1.

Introduction

Lorsqu'on analyse un phénomène, il semble naturel de se demander pourquoi il se produit, cela d'autant plus que ce phénomène est surprenant. Certes la vie courante nous habitue à toutes sortes d'évènements dont bien peu de gens se soucient de conduire une analyse. Mais s'il s'agit d'analyser, le désir d'explication se profile vite à l'horizon - *pourquoi ?* – au-delà de la seule analyse des conditions d'occurrence.

Autre façon de procéder : mettre en relation des grandeurs que l'on a pu, d'une façon ou d'une autre, attacher à certains aspects du phénomène. En physique, les relations auxquelles on aboutit sont très souvent fonctionnelles², c'est-à-dire qu'elles déclarent l'égalité entre valeurs de deux fonctions des grandeurs impliquées, grandeurs à considérer, très souvent, au même instant³.

Les deux aspects – souvent associés à une distinction entre le *pourquoi* et le *comment*⁴ – semblent, à première vue, aussi harmonieusement complémentaires qu'individuellement fructueux.

En fait, les analyses imbriquées du contenu de la physique et des tendances de raisonnement communément observées contraignent à revenir sur l'idée qu'une telle complémentarité coule de source. C'est la raison pour laquelle un rapprochement d'études sur la causalité paraît très opportun pour éclairer des questions posées certes depuis longtemps mais peut-être bien cruciales, notamment pour l'enseignement. Une implication forte du thème de la causalité dans la communication de connaissances : c'est bien ce que laisse présager ce jugement de Kuhn (1971 : 9) : « la notion de cause a des composantes linguistiques et psychologiques essentielles. »

² Ceci s'oppose, en particulier, aux relations stochastiques entre événements, qui mettent en jeu des probabilités d'occurrence.

³ Contrairement aux relations qui décrivent une conservation, portant sur les valeurs que prend une fonction de plusieurs grandeurs à deux instants différents, ou une propagation, c'est-à-dire rendant compte de ce qui se passe « plus tard, plus loin », compte tenu de ce qui se passe quelque part.

⁴ Distinction coïncidant elle-même partiellement avec ce qui distingue des catégories de relation causale chez divers auteurs: causalités efficiente (Aristote) *versus* causalité formelle (Aristote) ou légale (Halbwachs, in Bunge *et al.* 1971 : 28), ou encore causalité hétérogène *versus* homogène, voire bathyène (Halbwachs in Bunge *et al.* 1971 : 31) , ce qui n'épuise pas les catégories de causalité proposées. Comme le remarquent entre autres auteurs contemporains Kuhn (in Bunge *et al.* 1971 : 10) et Halbwachs (In Bunge *et al.* 1971 : 81), l'attribution de ces distinctions est beaucoup moins évidente qu'il n'y paraît, étant donné les possibilités de transformation verbale et surtout formelle de beaucoup d'explications de phénomènes physiques.

Recherche de « cause »⁵ : blocages historiques et actuels

Sans prétendre conduire ici - ni d'ailleurs l'avoir jamais fait - un vaste balayage de la question, je rappelle d'abord quelques points de vue d'auteurs exprimant très clairement que la recherche de causes - pour reprendre le terme même qu'ils utilisent - a pu être un facteur de blocage, aussi bien historiquement qu'actuellement chez des personnes en situation d'apprendre la physique.

Un premier exemple en mécanique.

Une question que nos ancêtres se sont posée de manière aigüe est de savoir ce qu'il advient du mouvement d'un objet solidaire d'un autre lui-même en mouvement, lorsque le lien - « l'entraînement » - disparaît. A l'époque de Galilée, il s'agissait de savoir si une pierre lâchée du haut du mât d'un navire en marche allait tomber au pied de ce mât, ou bien derrière. Dès la fin du seizième siècle, Bruno⁶ (1584) avait pressenti la réponse:

"Toutes choses qui se trouvent sur la terre se meuvent avec la terre. La pierre jetée vers la hune reviendra en bas de quelque manière que le navire se meuve."

Mais, comme le souligne Koyré (1966), il lui fallait une "vertu impressée", autrement dit une cause interne au mobile, pour expliquer que la pierre garde, pendant sa chute libre, un mouvement analogue à celui du bateau:

"...la pierre qui part de la main de celui qui est porté par le navire, et par conséquent se meut selon le mouvement de celui-ci, possède une certaine vertu impressée..."⁷.

La bataille intellectuelle fit rage pendant plusieurs décades. Presque soixante ans après Bruno, cet exposé de Gassendi (1642)⁸

⁵ Dans la suite de ce paragraphe, les guillemets seront omis, mais le mot n'est employé qu'en référence aux auteurs cités. Libre à chacun de considérer que ce terme est insuffisamment précis. Nous ne rentrons pas ici dans un débat serré sur les catégories de cause établies, d'Aristote aux philosophes contemporains (voir note précédente). Halbwachs parle, notamment, de « causalité légale » pour ce qui, ici, apparaît comme une mise en relation fonctionnelle. La suite du texte détaille des critères qui nous semblent utilement discriminants pour caractériser un type d'analyse de phénomène physique, sans qu'une limitation de la pertinence d'emploi des expressions « relation causale » ou « causalité » soit au coeur du débat.

⁶ Bruno (1584, (1830):170), cité par M.A.Tonnellat (1971 : 30): comme le souligne M.A.Tonnellat, il posait ainsi les bases du principe de relativité, qui interdit "de déceler le mouvement d'un système mécanique par des expériences réalisées à bord de ce système lui-même". Voir aussi Saltiel (1978).

⁷ Bruno, De Motu, cité par Koyré (1966 : 173).

⁸ Gassendi, De Motu, cité par Koyré (1966 : 316). Voir aussi Viennot (1979 : 113-130).

marquait le chemin parcouru en remettant la force à sa place, c'est-à-dire dans le moteur:

"il paraît que la force active, qui est la cause de la projection, est dans le projetant lui-même, et nullement dans la chose projetée, qui est purement passive. Ce qu'il y a dans la chose projetée, c'est du mouvement, lequel, bien qu'il soit appelé force, impetus, etc...(comme nous l'avons fait nous-même lorsqu'afin d'être plus facilement compris nous avons gardé des appellations familières) n'est cependant, en réalité, rien d'autre que le mouvement même.....Or rien n'empêche que le moteur soit séparé, ou même périsse, et que le mouvement reçu perdure. Car on ne requiert pas le moteur afin que, en dehors du mouvement, il transmette au mobile une force, qui ensuite produirait le mouvement ; mais il suffit qu'il produise dans le mobile un mouvement, qui puisse continuer sans lui. Or le mouvement peut le faire, car telle est la propriété de sa nature, pourvu qu'il ait un sujet perdurable, et que rien de contraire ne lui arrive; il a la propriété de persévérer sans action continue de sa cause."

Ce texte est tout à fait remarquable, car non seulement il énonce des idées qui se révéleront extrêmement fructueuses, mais il analyse l'obstacle principal à cette compréhension du mouvement: il ne faut pas rechercher l'"action continue de sa cause", car le mouvement peut se passer de cause pour perdurer.

Cet obstacle se révèle également tout à fait important pour nos étudiants, pour qui le moteur du mouvement constitue un ancrage paralysant pour le raisonnement. Impossible, sur cette base, d'accepter l'absence de mouvement propre à un mobile et l'équivalence des référentiels galiléens, dont aucun ne constituerait un mouvement plus « réel » qu'un autre⁹.

Difficile aussi d'accepter qu'un objet dont les physiciens disent bizarrement qu'il est en chute libre puisse être en train de s'élever en l'air ou avoir en haut de la trajectoire une vitesse nulle, ceci sous la seule action¹⁰, , prétendent encore les physiciens, de son poids. Alors il est fréquent que l'étudiant s'arrange : « en haut de la trajectoire, il y a la pesanteur et la force du geste du lanceur qui agissent »¹¹. Il est vrai, la cause de cette ascension, c'est le geste du lanceur. Cette cause-

⁹ Le sens et la direction sont d'ailleurs les moins acceptés en tant qu'aspects susceptibles de dépendre du référentiel, cela aussi bien pour des enfants de 11 ans que pour des étudiants à l'entrée à l'université. Voir pour les enfants : Maury *et al.* 1977, pour les étudiants : Saltiel 1978, Saltiel & Malgrange 1979, pour un résumé : Viennot 1996 (et 2001), chapitres 2 et 7.

¹⁰ Ceci suppose que la résistance de l'air peut, dans la situation proposée, être négligée devant le poids du mobile.

¹¹ Pour un résumé sur cet aspect : Viennot 1996 (et 2001), chapitre 3.

là étant antérieure à l'instant considéré est à stocker dans l'objet¹², sachant que l'action contraire de la pesanteur est elle, bien présente au cours de la montée du mobile. C'est du moins ce que l'on croit comprendre devant des expressions d'étudiants telles que « la force de la masse », « la force vers le haut », « un capital de force vers le haut » : s'agirait-il de désigner, à propos du mouvement, « l'action continue de sa cause », celle que Gassendi disait ne plus devoir chercher ?

Quant à la troisième loi de Newton¹³, dite des actions réciproques, elle heurte de plein fouet le désir de comprendre le pourquoi des choses, dès qu'un objet détermine par contact l'accélération d'un autre, ainsi lorsqu'un lutteur l'emporte sur l'autre. Elle se trouve alors violée dans des proportions impressionnantes dans les commentaires d'étudiants et même dans certains textes scolaires¹⁴.

La présentation de Jérôme Viard sur la compréhension du rebond de billes dures, apporte également des éléments de réflexion tout à fait pertinents en matière de blocages associés à la recherche de causes, ceci du double point de vue historique et didactique.

Il n'est donc pas certain que recherche des causes et progrès de la description des phénomènes physiques se concilient si facilement.

Il peut même arriver que l'opposition entre ces deux aspects soit érigée en élément contribuant à constituer une catégorie de style de recherche. M.J. Nye (1993)¹⁵ cite ainsi Blackett (1962) : « Rutherford dit qu'il fût frappé, au congrès de physique Solvay de 1911 à Bruxelles, par le fait que les continentaux ne semblaient pas le moins du monde intéressés à constituer une base physique à la théorie de Planck. Ils se contentent tout à fait d'expliquer tout sur la base d'une certaine hypothèse et ne se cassent pas la tête quant à la cause réelle d'une chose. Je dois dire, je crois, que le point de vue anglais est beaucoup plus physique et bien préférable ».

¹² Si l'on ne qualifie de relation « causale » entre événements qu'une relation engageant au moins deux systèmes différents (entre autres conditions ; Bunge 1971 : 189), on ne peut parler de « cause » sans faire intervenir un objet extérieur au mobile . En fait, l'idée d'une sorte de moteur interne au mobile, l'impetus des théories pré-Galiléennes, était une évolution considérable par rapport aux antiques recherches de tourbillons (Aristote, sur les traces de Platon , voir Koyré, 1966 : 22) supposés pousser le projectile de l'extérieur.

¹³ Cette loi pose que lorsque deux objets (A et B) sont en interaction, l'action de l'un (A) sur l'autre (B) est exactement opposée à l'action réciproque (B sur A) *au même instant*.

¹⁴ Brasquet (1999), Menigaux (1986), Viennot (1982, 1989).

¹⁵ Article communiqué par Jean Gayon, cours commun aux DEA de l'école doctorale Savoirs Scientifiques. Epistémologie, histoire des sciences et didactique : *L'histoire des sciences. Questions, méthodes, catégories fondamentales*, 2000.

Ainsi la recherche de causes pourrait constituer un obstacle au moins provisoire au progrès de la connaissance, mais, dans la bouche d'un éminent promoteur de cette connaissance, ce serait aussi la marque d'une démarche véritablement « physique », en tout cas préférable au froid déroulement des implications d'une relation posée au départ (« assumption »).

Pour tenter d'éclairer un tel débat, ou au moins y situer quelques questions cruciales pour l'enseignement, il est particulièrement important, me semble-t-il, d'envisager comment une approche donnée se concilie avec l'idée de chronologie¹⁶. La réponse à cette question est tout à fait contrastée selon que l'on s'intéresse à ce qui provoque un phénomène ou aux relations associées à chaque état du système envisagé. Ce contraste se manifeste dans ce qui oppose souvent la théorie enseignée, d'ailleurs à des niveaux réputés « élémentaires », et les argumentations communément recueillies chez ceux qui apprennent. Nous verrons combien se trouvent facilement brouillées la considération des transformations, elle-même sous-jacente à l'idée d'événement¹⁷, d'une part, et la considération de permanences et d'états, de l'autre¹⁸.

¹⁶ Parmi les conditions d'attribution du label « relation causale entre événements » proposées, figure le « principe des actions retardées », c'est à dire la nécessité d' « un délai (positif ou nul) entre la cause et l'effet » (Bunge 1971). Certains textes ne commentent pas particulièrement pas la distinction entre l'idée d'un délai strictement positif et celle d'un délai nul (tel Bunge, cit.). Halbwachs fait état très précisément de la place que cette distinction occupe en physique (1971 :56) et conclut (1971 :71) : « On voit que, même au niveau de la théorie quantique des champs, qui est probablement le niveau sous-jacent à la mécanique quantique elle-même, le principe de l'action retardée dans les relations causales entre événements séparés dans l'espace et le temps possède une validité universelle et joue un rôle important dans la structure même de la théorie. » . Voir aussi De Kleer & Brown (1983) et leur « principe d'asymétrie » - la cause précède l'effet -, nécessaire selon eux à un système cognitif pour comprendre le fonctionnement d'un système physique.

¹⁷ L'idée d'événement implique en outre celle de situation précise dans le temps et l'espace. Halbwachs (1971 : 43, 56), citant Bunge (1959), fait la distinction entre et « processus » continu et « événement » , ce dernier terme étant associé à l'expression « transformations brusques ».

¹⁸ J. Piaget, dans son ouvrage « les explications causales », évoque ce double aspect (1971 :11). :« Expliquer un effet par un ensemble de conditions considérées comme causales revient à montrer, d'une part, par quelles transformations il a été produit, et, d'autre part, comment la nouveauté du résultat correspond à certaines transmissions à partir des états initiaux : or ce double aspect de production et de conservation caractérise les transformations opératoires aussi bien que causales (...) ».

A remarquer aussi, le point de vue de J.M. Levy-Leblond, qui souligne (1996 : 151) : « Insistons : sauf irrégularité majeure, la variation temporelle d'un phénomène sur une durée infinie (pour tous les instants) est déterminée par une connaissance instantanée,

Approches fonctionnelles et raisonnement linéaire causal

Le cas des transformations quasi-statiques

Imaginons deux ressorts bout à bout, suspendus au plafond (encadré 1). Un ressort : raideur k , longueur à vide l_0 , allongement Δl , l'intensité de la force qui s'exerce sur son extrémité basse F (ajouter l'indice 1 pour le ressort du bas, 2 pour le ressort du haut). On s'en souvient peut-être, « on a » $F = k\Delta l$ pour chaque ressort. Les relations entre les deux parties du système sont $F_1 = F_2$, $\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2$. Difficile de faire plus simple.

La transformation d'un tel système lorsqu'on tire dessus, si elle est décrite en ces termes, est un bon représentant de ce que l'on nomme une transformation quasi-statique, même si cette dénomination savante n'apparaît habituellement dans l'enseignement qu'à propos de thermodynamique, donc à l'université.

Les caractères d'une telle analyse sont les suivants :

- Il y a *plusieurs grandeurs* en cause, certaines étant souvent appelées variables dans la mesure où elles sont susceptibles de prendre des valeurs différentes au cours de la transformation.

- Ces variables évoluent *simultanément*.

- Elles le font sous la contrainte *permanente* de quelques lois simples.

En fait, ce que l'on fait en traitant de cette manière l'allongement d'un ensemble composite de ressorts, c'est exploiter les relations qu'il serait plus explicite d'écrire ainsi :

$$F_1(t) = F_2(\text{même } t), \Delta l(t) = \Delta l_1(\text{même } t) + \Delta l_2(\text{même } t), \text{ etc.}$$

Pourquoi tant de précisions pour une situation banale traitable avec des relations bien simples ? C'est qu'il pourrait en être autrement. Il pourrait y avoir propagation plus ou moins lente d'un ébranlement le long du système de ressorts : un tremblement de terre n'est rien d'autre. Alors, on n'aurait plus cette propriété que nous assenons à nos élèves sans leur en avouer, d'ailleurs, l'invraisemblance : l'analyse quasi-statique traite le problème comme si toutes les particules de ce système complexe étaient averties *en même temps* que quelque chose se passe lorsqu'on agit sur le bout du ressort. Toutes les variables sont

donc intemporelle. Ainsi donc, la relation entre constance et variation, examinée à la loupe de la formalisation, perd son caractère apparemment antinomique. (...) on peut trouver de la constance au sein même de la variation ».

Ces jeux d'interprétation rendus possibles par les équations différentielles sont également relevés par Halbwachs (1971 : 81).

alors censées s'aligner *instantanément* sur les valeurs qui satisfont les relations posées plus haut¹⁹.

Aussi invraisemblable qu'elle paraisse de prime abord, cette démarche d'analyse est efficace pour traiter le genre de problème habituellement dans le sillage scolaire d'un tel dispositif : « de combien se déplace le point de jonction quand on déplace l'extrémité inférieure de 10 cm ? » etc. L'échelle de temps des aspects propagatifs est tellement plus petite que celle des phénomènes que l'on observe que l'on peut s'appuyer sur les relations simples données plus haut, en négligeant, par rapport aux durées d'évolution globale du système, le temps que prennent les molécules du ressort pour se mettre d'accord entre elles.

L'insistance sur cet exemple tient à plusieurs choses.

L'une est que la simultanéité des changements de valeur des variables est non seulement invraisemblable au sens strict, elle est aussi facilement niée dans les argumentations de nos élèves. Ainsi l'exemple, relevé par Fauconnet (1981), d'un élève qui commence par mettre en relation la force exercée par l'expérimentateur et l'allongement total (10cm et non l'allongement – moindre – du ressort du bas), trouve donc une trop grande valeur de cette force, déclare que celle-ci se transmet « alors » au ressort du haut, dont il surévalue de ce fait l'allongement, qu'il trouve supérieur (15cm) à l'allongement total. Le commentaire de cet élève enfonce le clou : « le premier ressort (en bas) devrait s'allonger et l'autre, au bout d'un moment, il devrait s'allonger aussi ». Dans la formulation de l'élève, il s'agit d'une histoire, qui commence en bas et finit en haut. L'histoire finit mal, puisque le déplacement du point de jonction est trouvé supérieur à celui de l'extrémité du bas, ce qui est totalement invraisemblable. Qu'à cela ne tienne ! Dans le cadre d'une histoire, on ne revient pas en arrière : le déplacement local, en bas, a servi au début de l'histoire, on n'y revient plus. En l'occurrence, le déroulement de l'histoire se calque sur celui de la résolution : cela ne favorise pas la prise en compte *simultanée* de toutes les caractéristiques de la situation.

Encadré 1

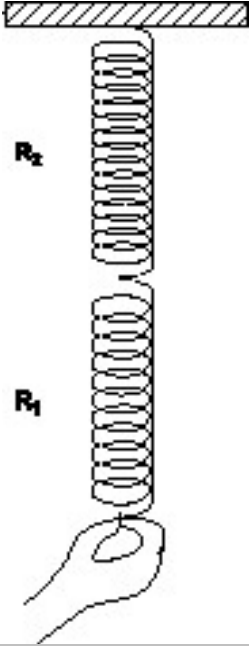
¹⁹ Sur le principe des actions retardées, voir note 16.

Question d'enquête : une transformation quasi statique.
(Fauconnet 1981),

Extension de deux ressorts bout à bout

On tire sur l'extrémité inférieure du ressort du bas et on le déplace de 10 cm. Quel est le déplacement du point de jonction entre les ressorts et quelle est la valeur de la force exercée ? Notations et valeurs numériques:

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



Ces considérations amènent à discuter une seconde caractéristique de ce type de raisonnement : la réduction du nombre des variables prises en compte à un stade donné de l'argumentation. Une tendance de raisonnement très communément observée est de réduire de fait le nombre des variables impliquées dans une relation fonctionnelle, les traitant comme si certaines étaient constantes ou nulles, ou bien encore relevaient d'une covariation quasi-fonctionnelle. Ici, cet aspect est patent : au mépris de l'additivité des allongements ($\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2$), l'élève oublie que Δl n'est pas Δl_1 . Mais cette réduction de l'analyse est dans la ligne de la vision chronologique évoquée plus haut : on s'occupe *d'abord* du bas, et en bas, c'est Δl qui compte.

Sur la base de cet exemple, on peut, en contraste avec cette analyse quasi-statique qui cadre de façon si générale ce que l'on enseigne au lycée²⁰ ou en premier cycle universitaire et même au delà, introduire

²⁰ A titre d'exemple, on peut estimer à 10/13 la proportion des items du programme de Terminale scientifique actuel (MEN 2001) qui impliquent des relations proprement quasi-statiques (relation caractéristique d'un ressort, du type $F=kx$), quasi-stationnaire (loi

des caractéristiques de raisonnement que Rozier²¹ range sous l'expression « raisonnement linéaire causal » :

- les événements envisagés sont souvent décrits à l'aide d'une seule grandeur, et en tout cas *simplement* ;
- ces événements sont, plus ou moins explicitement, compris comme *successifs*,
- et donc comme *temporaires*.

Cette forme de raisonnement en terme d'histoire a été observée chez les élèves et les étudiants, dans une étendue de contextes et avec des fréquences impressionnantes. Rozier (1988) caractérise deux variantes .

Si le système envisagé comporte une structure spatiale marquée, le héros de l'histoire reste souvent le même d'un bout à l'autre, sous des dénominations variées, ainsi : l'électricité, le courant, pour un circuit électrique en série²², la chaleur pour un échangeur de chaleur, la tension pour une série de ressorts bout à bout. Prend alors une importance remarquable la tendance à réduire le nombre des variables en cause, tout spécialement par fusion de deux d'entre elles réputées covariantes : tension et intensité, chaleur et température, etc. Le raisonnement systémique requis cède alors la place à l'évocation d'aventures du héros, et souvent de son épuisement progressif.

En revanche, si le théâtre des opérations est localisé, comme pour un gaz à l'intérieur d'un pneu de voiture, ou d'un cylindre fermé par un piston mobile, c'est plutôt à un défilement que l'on assiste, diverses variables occupant successivement le devant de la scène. Ainsi à propos du chauffage isobare quasi-statique²³ d'un gaz, dans le cylindre évoqué plus haut : « on chauffe le gaz, alors la température

d'Ohm, $U=RI$), ou différentielle impliquant le même instant pour toutes les grandeurs et dérivées impliquées (notamment en mécanique, voir note 18), voire apparemment intemporelle (mais de fait quasi-stationnaire, telle la relation entre angle de diffraction, longueur d'onde et largeur de l'ouverture), alors même qu'un thème majeur annoncé est celui « du déterminisme et de la causalité » (p 74). C'est le moment de rappeler que l'évolution d'un circuit électrique, dans l'analyse quasi stationnaire (qui porte à dire notamment que l'intensité est la même partout à chaque instant dans un circuit série) ne répond pas de manière simple au qualificatif de « causale », puisqu'elle suppose la simultanéité des changements en des lieux distincts.

²¹ Rozier 1988, Rozier & Viennot 1991 et pour un résumé sur ce paragraphe : Viennot 1996, Chapitre 5. Voir aussi Andersson 1986, Gutierrez & Ogborn 1992.

²² Le raisonnement séquentiel – non systémique - en électricité est une tendance majeure de raisonnement dans ce domaine, étudiée depuis vingt ans : Shipstone *et al.* (1985), Closset (1983, 1989).

²³ Quasistatique : le système est en équilibre thermodynamique à chaque instant.

augmente, alors la pression augmente, alors le volume augmente »²⁴. Ici l'histoire finit bien puisque qu'il est exact que le volume augmente. C'était d'ailleurs indiqué dans l'énoncé du questionnaire d'enquête, la consigne étant d'expliquer pourquoi. Le problème est que le cœur de l'argumentation – la pression augmente – est en franche contradiction avec la contrainte posée au départ : le chauffage est isobare. L'argument communément invoqué, soit spontanément soit en réponse à l'objection d'incohérence présentée par le professeur, est que « *dans un premier temps* le piston est bloqué, la température augmente, *et puis* on lâche le piston, *alors* la pression reprend sa valeur » (celle de l'extérieur). Comme pour les ressorts décrits plus haut, la chronologie dispense - provisoirement - de comparaisons embarrassantes. Elle permet des arrangements successifs avec chaque variable, pour ce qu'elle peut expliquer au moment où on vient la chercher. Et l'on y gagne non seulement en simplicité, mais aussi en vraisemblance : qu'est-ce que signifie cette histoire de physiciens, qui racontent, sous la bannière de l'analyse quasi-statique, qu'un piston peut se déplacer sans que quelque chose pousse plus fort d'un côté que de l'autre ? Très fructueux de toutes sortes de point de vue, le point de vue quasi-statique semble une offense au désir d'expliquer. Autant la relation des gaz parfaits $PV = nkT$ impose bien clairement que, lorsque la température augmente²⁵, à pression constante, le volume augmente aussi, autant cette relation ne porte en elle aucun élément qui permette d'accepter l'idée d'un mouvement sans moteur, la même pression s'exerçant de part et d'autre du piston. Les charmes des procédures différentielles et du passage à la limite qu'elles impliquent ne se dévoilent qu'aux experts.

La flèche du temps ?

L'argument chronologique analysé ci-dessus - « *dans un premier temps (...), et puis (...), alors (...)* » n'est pas toujours explicitement fourni, et de loin. Il surgit le plus souvent, chez les étudiants, pour parer une objection d'incohérence. Autrement, c'est le confort de l'ambiguïté qui domine, par exemple celle du symbole « flèche ». En effet, une flèche posée entre deux prédicats pourrait représenter une

²⁴ Sylvie Rozier (1988) enregistre plus de 40% de commentaires de ce type dans diverses populations de niveau universitaire : classes préparatoires et maîtrise.

²⁵ Même cela, dans le cas d'un chauffage isobare, ne s'explique pas si facilement par la théorie, mais c'est exact, et semble évident.

implication logique : *donc*. Nulle nécessité d'impliquer le temps dans ce cas. Autre éventualité : la flèche pourrait signifier le déclenchement d'un événement ultérieur *plus tard, ensuite*. Le travail de Rozier fournit des éléments notables en faveur de l'hypothèse suivante : bien des flèches exhibées à l'appui d'une explication ont en fait une signification ambiguë, fusionnant les aspects logique et chronologique. C'est aussi le cas des connecteurs « alors », « then », « entonces » présents dans probablement de multiples autres langues (tableau 1).

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

Tableau 1: Plusieurs langues, même ambiguïté du connecteur de statut intermédiaire

Dans le même ordre d'idée, il est souvent surprenant de relever combien de fois, lors d'une explication, on emploie le futur, typiquement : « Quand on enfonce le piston, le volume du gaz diminue, la pression *va* augmenter »²⁶. Sans doute, en utilisant cette forme, ne pense-t-on pas véritablement à souligner le décalage temporel qu'elle semble impliquer. Mais c'est une forme qui suggère au moins l'idée de conséquence – encore un terme piégé, pétri de temps. Ce futur si communément associé à ce que l'on dit *après* avoir évoqué un aspect du phénomène porte la même ambiguïté que celle relevée en tableau 1²⁷.

²⁶ On ne commente pas ici la réduction impropre du nombre de variables prises en compte.

²⁷ On peut observer la suggestion d'un déroulement chronologique par simple succession d'affirmations, avec toutes les ambiguïtés afférentes. Ainsi : « Suspendre un objet à un ressort revient à faire agir le poids de l'objet sur l'extrémité du ressort, qui s'allonge. » (Chatroux & Scodel, 1981 : 137). Or, à l'instant où l'on suspend l'objet en le lâchant, celui-ci exerce sur le ressort une force nulle ou très faible, en proportion de l'allongement *présent* de ce ressort. *Ensuite*, le ressort s'allonge. Ce n'est qu'à la position d'équilibre – *ultérieurement* atteinte – que l'action de l'objet sur le ressort a la même intensité que le poids.

La simultanéité de l'évolution des variables dans une transformation quasi-statique²⁸ n'est donc pas inscrite dans les formes d'explication communément observées. Si « causalité légale » il y a, on observe bien souvent que celle-ci n'est guère en résonance avec le désir d'expliquer de non spécialistes en physique.

On peut s'attendre, dans ces conditions, à voir surgir des problèmes à propos de la permanence des états de non-équilibre.

Permanence : problèmes

La permanence d'un état de non-équilibre a de quoi surprendre : pourquoi fait-il plus chaud dans une serre qu'à l'extérieur ? La réponse ne peut pas évacuer l'existence de deux phénomènes simultanés : l'entrée de rayonnement, et la sortie de rayonnement, en l'occurrence et pour dire vite. De même que les ressorts nous ont servi de prototype pour introduire les transformations quasi-statiques, la serre sera notre illustration emblématique d'un régime permanent de non-équilibre : *non-équilibre* parce qu'il y fait plus chaud qu'à l'extérieur et moins qu'à la surface de l'astre solaire, *permanent* parce que la température peut en principe y rester stable au cours du temps, pendant un bon moment²⁹. On peut en dire autant d'une étoile, du corps humain, et, en changeant quelques noms de variables, d'une foule de systèmes, y compris sans doute en économie. Dans tous ces cas, il faut se préoccuper de plusieurs choses qui se produisent *en même temps*, à l'échelle de temps des évolutions globales du système. Notamment, dans le cas de la serre, en cas de régime permanent il n'entre pas plus d'énergie qu'il n'en sort (encadré 2).

Qu'observe-t-on dans les explications courantes de la serre, à la question de savoir *pourquoi* il y fait plus chaud qu'à l'extérieur ? Sous forme verbale ou graphique, un raz de marée de « rayonnement piégé », et de « rayonnement qui ne peut plus sortir », les dessins confirmant qu' « il rentre plus d'énergie qu'il n'en sort ».

²⁸ Autrement dit, le cas considéré dans presque toute la physique dite élémentaire.

²⁹ Tant que les températures des corps en question et les conditions de l'échange énergétique restent stables.

Encadré 2

Un régime permanent de non équilibre : contraste entre analyses.

Explications communément observées

“Dans une serre, il fait plus chaud parce que les rayons sont piégés.”
 “Il rentre plus d’énergie qu’il n’en sort.”

a)

b)

c)

Exemples de schémas

très fréquemment proposés par des enseignants en situation d’expliquer l’effet de serre

L’explication commune se fonde, sans l’expliciter, sur un régime transitoire de réchauffement

Une représentation simplifiée de régime permanent

Cette représentation (avec bilan équilibré entrée/sortie: $P_0=P_v$; $P_s=2P_0$) ne suggère aucune explication simple.

Source : Viennot 1996.

Cette idée est aussi présente dans les documents officiels, tel un document d'accompagnement de programme récent pour le cycle des collèges³⁰, et dans une foule de documents de vulgarisation. C'est donc sur un régime transitoire bien particulier que se fonde l'explication commune : celui du réchauffement. On ne se préoccupe pas du fait que, la nuit, il fait encore – heureusement – plus chaud dans la serre qu'à l'extérieur, alors qu'il sort plus d'énergie qu'il n'en rentre. Quant au transitoire de réchauffement, il ne faudrait pas que cela dure trop, car la serre exploserait. Mais la permanence n'est pas envisagée, car à elle seule, elle n'explique rien, et surtout pas comment on en est venu là.

Ce n'est pas le schéma équilibrant le bilan d'énergie qui répond à cette question³¹ et l'on préfère une histoire simple - de l'énergie est piégée - non située précisément dans le temps³²

En bref, un bilan d'entrée/sortie équilibré se prête aux calculs de grandeurs décrivant l'état du système, mais il est un piètre support pour l'explication de ce mystère : comment en est-on venu là ? Les argumentations communément observées se situent, elles, sans le dire, du côté d'une histoire *particulière*, celle d'un régime *transitoire* avec une cause dominante, voire exclusive ; elles se soucient bien rarement des conséquences de leurs propositions *dans la durée*. Pourvu que l'on tienne l'explication, tant pis si la serre explose.

Remarques finales

Même restreint à la causalité dans les explications en physique, ce texte bref laisse beaucoup d'aspects de côté, notamment la difficile distinction entre déterminisme et causalité³³, la fréquente relecture dissymétrique des relations conduisant à attribuer parfois indûment un statut de cause exclusive à un membre d'une égalité³⁴, l'effet étant

³⁰ Ministère de l'Éducation Nationale et de la Recherche 1998.

³¹ C'est lui qui sera demandé en examen ou concours, et qui est utilisé largement, lorsqu'il s'agit de faire le calcul de la température intérieure dans telle ou telle condition d'éclairement (*à un instant donné*).

³² Bien entendu, cette « situation » doit se faire compte tenu de l'échelle de temps d'évolution du phénomène en cause.

³³ Ce texte de Bachelard (1934/1971 : 115) suggère bien déjà le caractère de non évidence de cette distinction : « En effet la psychologie de l'idée de cause s'est constituée sans s'astreindre aux définitions ultra-précises que nous réclamions pour fonder le Déterminisme. De la cause à l'effet, il y a une liaison qui, jusqu'à un certain point, subsiste en dépit des défigurations partielles de la cause et de l'effet. La causalité est donc beaucoup plus générale que le déterminisme. »

³⁴ Rainson (1995), Rainson & Viennot (1998).

supposé se trouver dans l'autre, la confusion entre « cause efficiente » et « cause contingente »³⁵, entre autres aspects notoirement importants.

Si l'accent est mis ici sur l'aspect chronologique, c'est qu'il semble d'une particulière importance étant donné la manière dont fonctionnent ces analyses très largement utilisées, quasi-statiques proprement dites, ou quasi-stationnaires, comme on dit par exemple à propos des circuits électriques. Ces deux derniers cas recouvrent un énorme champ d'analyse, où se trouve aussi bien le fonctionnement d'une pompe à chaleur que celui de réactifs en équilibre chimique. Certes, au sens précédent, le temps est absent, mais les relations fonctionnelles qui décrivent ces états permettent fort bien de relier entre elles des variations de grandeurs. Deux échelles de temps s'imbriquent alors, celle des temps courts qui établissent l'équilibre³⁶ et celle d'une évolution beaucoup plus lente qui caractérise la transformation la plus facilement observable, telle celle d'un condensateur qui se charge via un circuit série où l'intensité varie au cours du temps, mais où aussi, à échéance beaucoup plus brève (on dit « à chaque instant »), les électrons et le champ parviennent à se mettre d'accord pour que cette intensité soit la même partout dans ce circuit. Les relations de ces deux échelles à l'explication du phénomène sont bien différentes, tandis que les signes utilisés, mots ou flèches, tendent à les brouiller.

Un aspect fort important de la question est que le discours de vulgarisation ou simplement celui qui vise à accrocher l'attention prend naturellement les formes du raisonnement linéaire causal décrit plus haut. L'orateur qui s'adresse au novice avec la double intention de faire comprendre et de plaire adopte le style du conteur. Imaginons : « la pression de radiation diminue, *alors* l'étoile va s'effondrer, mais ceci va faire monter la température, ce qui *rend possible* certaines réactions nucléaires, ce qui *va* bloquer l'effondrement, *jusqu'à ce que* ». On reconnaît là la forme privilégiée de la vulgarisation. Cela ne va pas nécessairement avec un message sans pertinence scientifique, certains sujets se prêtant fort bien à ce style - « Patience dans l'azur »³⁷ : il s'y passe des histoires passionnantes. Mais il n'y a pas de physique facile, car le moindre

³⁵ Cette confusion classique est encore récemment observée par Besson (2001) : aussi bien dans une population d'étudiants de première année universitaire (N=46) que chez des enseignants de physique consultés (N= 23), l'interaction entre l'eau et le tympan du plongeur est de type gravitationnel pour 9 personnes sur 10

³⁶ Pour cela, il n'est pas nécessaire que la transformation soit réversible : la détente de gaz dite de Joule-Kelvin, isentropique, est un prototype de transformation quasi statique irréversible.

³⁷ Reeves, H. 1981.

ressort – d’ailleurs beaucoup moins motivant qu’une étoile - oppose déjà une résistance forte aux tentations d’analyse exclusivement historique, en forme de chaînes causales simples et déroulées dans le temps³⁸. Si l’enseignement vise non seulement la motivation, mais aussi la cohérence, il croise nécessairement les questions soulevées plus haut, tout particulièrement celles des échelles de temps qui s’associent respectivement à l’équilibre ou à la permanence provisoires, d’une part, et aux transformations qui, toutes, augmentent l’entropie de l’univers par réduction de ces différences qui mènent le monde, d’autre part.

En bref, savoir distinguer ces échelles de temps tout en conciliant les analyses qu’elles rendent pertinentes est un véritable enjeu pour l’apprentissage des sciences physiques, et très vraisemblablement celui de nombreux autres domaines.

L’analyse d’aspects analogues dans le déroulement historique des théories scientifiques, la reconnaissance d’enjeux similaires dans d’autres disciplines, la recherche d’une précision accrue pour cerner le rôle de signes langagiers et graphiques souvent complices d’ambiguïtés nullement anodines, sont parmi les apports espérés de ce croisement de points de vue. Puisse-t-il contribuer à une meilleure maîtrise de cet équilibre didactique délicat entre le souhait de satisfaire un auditoire, en lui racontant une histoire, et celui de faire de la science, en explicitant clairement, à chaque fois, à quel jeu on joue.

Références

- Andersson, B. 1986. The experiential Gestalt of Causation: a common core to pupils preconceptions in science. *European Journal of Science Education*, 8 (3), pp. 155-171.
- Aristote. *Leçons de physique*. Traduction de J. Barthelemy de Saint Hilaire, rev. P. Mathias, présentation J.L. Poirier, Presses Pocket.
- Bachelard, G. 1934 (1971). *Le nouvel esprit scientifique*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Besson U. 2001. *Une approche mésoscopique pour l’enseignement de la statique des fluides. Étude des raisonnements des apprenants, élaboration et expérimentation d’une séquence d’enseignement*, Thèse de Doctorat en Didactique des Disciplines, Université "Denis Diderot" (Paris 7).
- Blackett, P.M.S. 1962. « Memories of Rutherford » In J.B. Birks (Ed.) : *Rutherford at Manchester*, London : Heywood, pp. 102-113 (pp. 111-112).
- Brasquet, M. 1999. Actions, interactions et schématisation,, *Bulletin de l’Union des Physiciens* n° 816, pp. 1220-1236.

³⁸ L’annexe fournit ainsi un exemple de texte inspiré par le désir de faire comprendre (un changement de phase), et dont l’effet involontaire est d’éloigner le lecteur moyen d’une analyse acceptée scientifiquement (celle de la coexistence de deux phases).

- Bruno, G. 1584. La Cena de le Ceneri III, 5 *Opere Italiane*, (Ed. Wagner, 1830).
- Bunge, M. 1959. Causality, Cambridge : Harvard University Press.
- Bunge, M., Halbwachs, F., Kuhn, T.S., Piaget J. & Rosenfeld, L. 1971. *Les théories de la causalité*. Paris : PUF. Gutierrez, R. & Ogborn, J. 1992. A causal framework for analysing alternative conceptions, *International Journal of Science Education*. 14 (2), pp. 201-220.
- Chatroux & Scodel, *Physique*, classe de seconde, 1981, Paris : Bordas.
- Closset J.-L. 1983. *Le raisonnement séquentiel en électrocinétique*. Paris, Thèse, Université "Denis Diderot" (Paris 7).
- Closset J.-L. 1989. Les obstacles à l'apprentissage de l'électrocinétique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 716, pp. 931-950.
- De Kleer J. & Brown, J.S. 1983. Assumptions and ambiguities in mechanistic mental models. In Genter & Stevens (Eds), *Mental models*. New Jersey, Lawrence Erlbaum.
- Fauconnet, S. 1981. *Etude de résolution de problèmes: quelques problèmes de même structure en physique*, Thèse de troisième cycle, Université "Denis Diderot" (Paris 7).
- Groupe Technique Disciplinaire de Physique 1993. *Document d'accompagnement du programme de Troisième*. Ministère de L'Education Nationale et de la Culture, Paris.
- Gutierrez, R. et Ogborn, J. 1992. A causal framework for analysing alternative conceptions, *International Journal of Science Education*. 14 (2), pp. 201-220.
- Koyré, A., 1966. *Etudes Galiléennes*. Paris: Hermann.
- Levy-Leblond, J.M. 1996. *Aux contraires*. Paris : Gallimard.
- Mauzy, L., Saltiel, E. & Viennot, L. 1977. Etude de la notion de mouvement chez l'enfant à partir des changements de repère, *Revue Française de Pédagogie*, 40, pp. 15-29.
- Menigaux, J. 1986. La schématisation des interactions en classe de troisième, *Bulletin de l'Union des Physiciens* n° 683, pp. 761-778.
- Ministère de l'Education Nationale, de la Recherche et de la Technologie (1998, rééd. 1999). L'effet de serre. In *Programmes et Accompagnement du cycle central (5me, 4me)*, Paris : CNDP, pp. 92-93.
- Ministère de l'Education Nationale, 2001. *Bulletin Officiel du Ministère de l'Education Nationale et du Ministère de la Recherche* n°4, Programme de Physique-Chimie, Classe terminale de la série scientifique, pp.74-105.
- Nye, M.J. 1993. National Styles ? French and English Chemistry in the Nineteenth and Early Twentieth Centuries, *Osiris*, Second Series, 8, pp. 30-52.
- Piaget, J. & Garcia, R. 1971. *Les explications causales*. Paris : PUF.
- Reeves, H. 1981. *Patience dans l'azur*. Paris : Seuil.
- Rozier S. 1988. *Le raisonnement linéaire causal en thermodynamique classique élémentaire*. Paris, Thèse, Université "Denis Diderot" (Paris 7).
- Rozier, S. & Viennot, 1991. Students' reasoning in elementary thermodynamics, *International Journal of Science Education*, 13 (2), pp. 159-170.
- Saltiel, E. 1978. *Concepts cinématiques et raisonnement naturels: étude de la compréhension des changements de référentiels galiléens par les étudiants en sciences*, Thèse d'état. Université "Denis Diderot" (Paris 7).
- Saltiel, E. & Malgrange, J.L. 1979. Les raisonnements naturels en cinématique élémentaire. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 616, pp. 1325-1355.
- Shipstone, D. 1985. Electricity in simple circuits. *Children's Ideas in Science*. Milton Keynes: Open University Press, pp. 33-51.
- Tonnellat, M.A. 1971. *Histoire du principe de relativité*. Paris : Flammarion.
- Valentin, L. 1983. *L'univers mécanique*, Paris : Hermann.
- Viennot, L. 1979. le raisonnement spontané en dynamique élémentaire. Paris : Hermann.
- Viennot, L. 1982. L'Action et la Réaction sont-elles bien (égales et) opposées ? *Bulletin de l'Union des Physiciens* n° 640, pp. 479-488.

- Viennot, L. 1989. Bilans de force et loi des actions réciproques. Analyse des difficultés des élèves et enjeux didactiques. *Bulletin de l'Union des Physiciens* n° 716, pp. 951-971.
- Viennot, L. 1993. Temps et causalité dans les raisonnements des étudiants, *Didaskalia* 1, pp. 13-27.
- Viennot, L. 1996. Raisonner en physique. La part du sens commun. Bruxelles : De Boeck Université ; 2001 : *Reasoning in Physics, the part of common sense*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Annexe

Passage d'un article de Didaskalia (Viennot, 1993) fondé sur l'étude de Rozier (1988), également cité dans Viennot 1996.

A propos de (...) l'effet de serre, on pourrait incriminer la désinvolture ou le défaut de vigilance de l'explication (*commune*), et s'en tenir là. Ce serait négliger le plus important: la satisfaction engendrée par ce type d'explication 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 (Mathématiques Supérieures, Mathématiques Spéciales, Licence, I.U.T., résultats rassemblés) ont été d'abord priés de lire le texte suivant (Valentin 1983)³⁹

"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"

³⁹ La suite de ce texte précise bien qu'à l'équilibre thermodynamique, l'énergie cinétique moyenne par particule est la même dans les deux phases .

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

On demande aux étudiants (*de première année universitaire*) s'ils pensent, d'une part que le texte suggère l'affirmation, d'autre part que l'affirmation est juste. Une écrasante majorité considère que le texte suggère l'affirmation (77%, N=181), et que celle-ci est correcte (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 incorrecte. 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 juste, ils ont tout simplement cru lire ce qu'ils pensaient déjà. Mais pourquoi le pensent-ils?

Un retour sur la structure du texte conduit à la remarque suivante: celui-ci 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 (température) décroît → e_c (énergie cinétique moyenne..) décroît → les interactions gagnent → état liquide → → état solide.

La tendance commune à mettre 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 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".

