

Causalité dans l'apprentissage des sciences

Andrée Tiberghien*

Résumé : Cet article présente comment sont abordées les questions de la causalité dans l'enseignement scientifique, en particulier de la physique, à des niveaux élémentaires (10 – 18 ans). Dans une première partie, nous partons des travaux piagétiens pour présenter l'importance de la causalité dans l'interprétation du monde matériel par les enfants. Nous abordons ensuite les travaux en didactique des sciences en nous appuyant sur ceux des années 80 et 90 et sur la revue faite dans quelques journaux essentiels en didactiques des sciences pour les années plus récentes. Cette étude nous a conduit à regrouper les résultats selon trois approches : la causalité chez les élèves, la conception d'un enseignement qui prend en compte la causalité, et l'évolution de la causalité chez les élèves avec un enseignement scientifique. Les résultats obtenus dans ces travaux variés se renforcent mutuellement sur un point essentiel. L'évolution chez les élèves d'une causalité simple vers une causalité complexe plus scientifique nécessite des acquis nombreux et de nature diverse relatifs aux connaissances spécifiques, aux raisonnements, et aussi à l'épistémologie. Les travaux montrent aussi que l'enseignement ne peut ignorer la causalité simple avec laquelle les élèves fonctionnent et que celle-ci n'est pas nécessairement un obstacle mais peut constituer un facteur d'apprentissage.

Mots clés : enseignement scientifique, apprentissage, causalité des élèves

Abstract: **Causality in science learning**. This paper presents how questions of causality are introduced in scientific education, in particular in physics at elementary levels (10-18 year old). In a first part, we start from Piagetian works to present the important role of causality in the children's interpretation of the material world. Then we discuss the studies in didactics of science done between 1980 and 1990 and we present a review of more recent publications in main journals in science education according three approaches: the students' causality, the design of teaching instruction taking into account the causality, and the evolution of the students' causality with scientific instruction. The results given in the different studies reinforce each other in regards to an essential point: the students' evolution from a simple causality to a more complex one, closer to the scientific causality, necessitates various acquisitions of different types: specific knowledge, reasoning, epistemology. The studies also show that

* UMR GRIC, équipe COAST, CNRS – Université Lumière Lyon 2, INRP, ENS-Lyon, ENS-LSH.

instruction cannot ignore students' simple causality, which is not necessarily an obstacle but can constitute a learning factor.

Key words: science education, students' causality, learning

L'importance de la causalité dans l'apprentissage des sciences relève de l'évidence. En revanche, son fonctionnement dans la vie quotidienne et dans les sciences (Hilton, 2002 ; Hilton & Slugoski, 2001) ainsi qu'en témoignent les débats des philosophes des sciences (Kisliker, ce livre) conduisent à penser que l'analyse de sa mise en œuvre dans l'enseignement scientifique pose des questions difficiles. Ce chapitre présente comment sont abordées ces questions dans les recherches sur l'enseignement et l'apprentissage de la physique à des niveaux élémentaires (10 – 18 ans). Dans une première partie, nous partons des travaux piagétiens pour présenter l'importance de la causalité dans l'interprétation du monde matériel par les enfants. Nous abordons ensuite les travaux en didactique des sciences en nous appuyant sur ceux des années 80 et 90 et sur la revue que nous avons faite dans quelques journaux essentiels en didactiques des sciences¹ pour les années plus récentes. Cette étude nous a conduit à regrouper les résultats selon trois approches : la causalité chez les élèves, la conception d'un enseignement qui prend en compte la causalité et l'évolution, avec un enseignement scientifique, de la causalité chez les élèves.

1. IMPORTANCE DE LA CAUSALITÉ DANS L'INTERPRÉTATION DU MONDE MATÉRIEL PAR LES ENFANTS

L'avant-propos du livre « les explications causales » (Piaget et Garcia, 1971) illustre bien la difficulté de l'étude de la causalité chez les enfants ou plus généralement les apprenants du point de vue de leur évolution : « ... le développement de la causalité ainsi comprise [au sens le plus large du terme, recouvrant toute explication d'un phénomène matériel] soulève des problèmes bien plus difficiles que l'étude des opérations du sujet². [...] Expliquer un phénomène

¹ Les journaux de la revue réalisée sont : International Journal of Science Education depuis 1998, Science Education depuis 1998 ; Journal of Research in Science Teaching depuis 2000, et le journal français Didaskalia depuis sa parution en 1993. Nous avons également cherché via la banque de données ERIC, les articles traitant de la causalité dans l'enseignement scientifique, ce qui nous a conduit à prendre quelques articles en psychologie. Cet article ne reprend pas toutes les publications qui abordent indirectement la causalité.

² « Les opérations reviennent à transformer le réel et correspondent ainsi à ce que le sujet peut faire des objets en ses manipulations déductives ou déductibles (c'est-à-dire d'abord matérielles, mais susceptibles d'une épuration formelle progressive), tandis que la causalité exprime ce que font les objets en agissant les uns sur les autres et sur le sujet [...]. » (Piaget, 1971, p. 11).

physique suppose certes l'emploi de telles opérations, car la recherche de la causalité en vient toujours à dépasser les observables et à recourir à des liaisons inférées, donc opératoires. Mais il s'y ajoute, et c'est là l'essentiel, les réponses de l'objet, car parler de causalité c'est supposer que les objets existent extérieurement à nous et qu'ils agissent les uns sur les autres indépendamment de nous : si le modèle causal adopté comporte une part inférentielle, c'est donc dans la seule intention d'atteindre ces propriétés de l'objet. » (p. 7). Nous ne développerons pas ici l'approche piagétienne de la relation entre causalité et les opérations de la pensée logique. Nous reprendrons seulement deux aspects des conclusions du livre « les explications causales » car ils se retrouvent dans les résultats présentés ici (Piaget, 1971).

Le premier aspect porte sur l'analyse de l'indifférenciation entre causalité et opérations. Les enfants analysent mal « du double point de vue opératoire et causal » leurs actions propres (p. 121). Ces actions propres sont, d'après Piaget, à l'origine de concepts indifférenciés. Ainsi entre le temps et la vitesse, les sujets peuvent, par exemple, avoir des jugements sur la vitesse du type : plus vite = plus loin = plus de temps aussi bien que du type : plus vite arrivé = moins de temps), ou encore entre la force et les mouvements où cette indifférenciation revient « à considérer l'élan, soit comme la source, soit comme le résultat des mouvements » (p. 121).

Le second aspect porte sur deux processus complémentaires qui jouent un rôle dans la différenciation progressive entre le logico-mathématique et le causal : l'effort de la représentation et l'intervention d'autorégulations. La représentation permet de se donner des tableaux d'ensemble simultanés d'événements passés, présents et futurs, demeurant successifs au plan des constatations perceptives. L'autorégulation permet au sujet d'effectuer « les coordinations dans les deux sens, direct et inverse (ou réciproque) et se transformer ainsi en opérations réversibles » (p. 124). Il montre remarquablement la difficulté relative à la succession dans l'espace et le temps : « autrement dit la plupart des actions causales étant irréversibles³, il est nécessaire pour qu'une action s'intériorise en opération qu'elle se différencie suffisamment des actions causales ou de l'aspect causal des actions en général, sinon l'indifférenciation constituera un facteur de retard » (p.115). C'est alors que le dépassement de cette difficulté passe par « la notion physique du virtuel [qui] porte sur des possibilités dont les compensations peuvent être

³ Par exemple quand l'enfant transvase un liquide dans un récipient de forme différente du récipient initial, il modifie la disposition spatiale d'une collection d'objets, ses « actions demeurent d'autant plus éloignées du statut d'opérations réversibles qu'elles [lui] paraissent de nature plus causale, en tant que la causalité introduit des effets nouveaux [...] » (p. 115).

simultanées, mais dont les réalisations ne sont que successives, tandis que tous les possibles demeurent simultanés pour la pensée du seul fait qu'ils sont conçus comme possibles : le propre du raisonnement hypothético-déductif est même de passer directement des possibles au nécessaire par la mise en connexion des premiers, sans l'intermédiaire du réel [...] » (p. 124).

Des travaux plus récents en psychologie menés sur les bébés et les très jeunes enfants montrent que la causalité est développée très tôt. Par exemple Corrigan et Denton (1996) discutent des primitives à l'origine de la causalité. Ces auteurs concluent qu'il y a des preuves suffisantes pour considérer que les concepts causaux implicites sont acquis vers deux ans. « Le développement le plus précoce qui permet à l'enfant de distinguer entre des événements et des non-événements peut avoir ses racines dans des processus perceptuels de base. [...] Très tôt dans la petite enfance, les bébés perçoivent les propriétés du mouvement d'un objet qui se déplace par rapport à un autre. A ce point, ils n'ont probablement pas la notion de puissance ou d'efficacité. Ils acquièrent vraisemblablement la notion de puissance, d'abord par leurs propres actions et plus tard en observant les actions d'autres personnes et des objets. Dans la seconde année de la vie, l'enfant est capable de se représenter des séquences complexes d'actions. Ces schémas des événements semblent organisés comme des informations causales (causal-enabling information). Si chercher des mécanismes causaux et faire attention à une structure causale est un développement primitif, alors la causalité devrait jouer un rôle critique dans de nombreux domaines de développement dès les premiers âges » (notre traduction, p. 175)⁴.

2. QUELQUES APPROCHES DE LA CAUSALITÉ DANS LES TRAVAUX SUR LES CONCEPTIONS EN DIDACTIQUE DE LA PHYSIQUE

Dans ses débuts, l'essentiel de la recherche en didactique des sciences a porté sur les difficultés d'acquisition des élèves. Au départ, ces travaux étaient peu fondés théoriquement et pourtant les résultats ont été fructueux. Cette étude des difficultés d'acquisition

⁴ « The earliest development which allows the infant to distinguish between events and nonevents may have its roots in basic perceptual processing. This distinction may be the basis of deciding what can and cannot be understood causally. [...]. Very early in infancy, infants perceive the motion properties of one object displaced onto another. At this point they probably do not have a notion of power or efficacy. Instead, they most likely acquire the notion of power, first through their own actions and later by examining the actions of other people and objects. In the second year of life, the infant is capable of representing complex sequences of actions. These schemas for events appear to be organized around causal-enabling information. If looking for causal mechanisms and attending to causal structure is a developmental primitive, then causality should play a critical role in many different domains of development from a very early age » (p.175).

des apprenants a conduit à construire un concept de la didactique : les *conceptions*. Une conception est un ensemble de propositions et/ou de procédures et/ou de savoir-faire qui rendent compte des conduites de l'apprenant dans un ensemble de situations. Pour notre compte, nous la spécifions dans le cas des savoirs relatifs au monde matériel.

De nombreux résultats sur les conceptions ont été obtenus dans différents domaines tels que la mécanique (voir par exemple McCloskey, 1983), la thermodynamique, l'optique. Ils présentent des caractéristiques communes. Il apparaît que même des étudiants ayant une formation universitaire de quatre années en physique interprètent des phénomènes apparemment simples de manière fondamentalement erronée du point de vue de la physique (par exemple le lancer d'une balle). Des interprétations similaires sont trouvées chez de plus jeunes élèves. La causalité intervient dans une grande partie de ces interprétations (Tiberghien, 1980 ; Andersson, 1986 ; Viennot, 1993). Nous présentons ci-dessous trois approches de cette causalité. L'une met l'accent sur l'expérience de l'enfant dans le monde des choses et présente des fonctionnements trouvés très fréquemment chez les élèves de l'enseignement primaire et secondaire. La seconde illustre une approche théorique en termes de théories naïves des élèves. La troisième analyse l'écart entre le fonctionnement de la causalité dans la vie quotidienne et le fonctionnement de la physique en termes de multifonctionnalité.

2.1 Causalité et expériences personnelles dans le monde des choses

Nous avons regroupé ici trois études qui mettent l'accent sur le rôle de l'action des apprenants dans un monde où les objets jouent un rôle essentiel.

2.1.1 Un noyau commun d'explications : la Gestalt expérientielle

Andersson (1986) considère qu'il existe un noyau commun d'explications et de prédictions dans des domaines aussi variés que l'électricité, l'optique, la mécanique la température et la chaleur. Il nomme « Gestalt expérientielle de la causalité (the experiential gestalt of causation) » ce noyau commun, en se référant à Lakoff & Johnson (1980)⁵. Il reprend la notion d'agent et de patient : l'agent provoque un changement physique de l'état du patient et il a un plan pour réaliser ce changement ; l'agent est responsable de la réalisation de ce plan et l'agent touche le patient soit directement soit via un instrument (il y a un recouvrement spatio-temporel entre ce que fait l'agent et le changement chez le patient). De plus, il y a aussi un

⁵ Lakoff, G. & Johnson, M. (1980). *Metaphors we live by*. Chicago: Chicago University Press.

effet sur l'agent lui-même via la rétroaction par la perception sensorielle. Par exemple l'enfant sent si un objet est lourd (ou léger), ou s'il est plus ou moins chaud (ou froid).

Andersson (1986) analyse des domaines où les élèves interprètent ou prédisent des situations en termes de causalité :

- On demande à des élèves de 12 à 14 ans, après avoir mis un cylindre en cuivre dans un récipient gradué rempli d'eau, de prévoir si des cylindres de même dimension (qu'ils ont devant eux) l'un en aluminium et l'autre en plomb que l'on plonge successivement dans ce récipient feraient monter le niveau de l'eau de la même façon. On trouve que des réponses 60% des élèves de 6ème, 50% de ceux de 5^{ème} et 40% de ceux de 4^{ème} prévoient que l'eau montera plus pour le cylindre en plomb que pour celui en aluminium ;
- On demande à des élèves de 12 à 15 ans si, quand on tourne le bouton, vers des graduations plus élevées, d'une plaque électrique sur laquelle est posée une casserole avec de l'eau qui bout à 100°C, la température de l'eau qui bout augmentera, 80% des élèves du niveau de la 6^{ème} et 54 % du niveau de la 3ème prévoient que la température augmentera ;
- Dans le cas des circuits électriques simples comportant des piles et des ampoules (similaires), on demande à des élèves de 12 à 15 ans si, quand on augmente le nombre de piles montées en série ou en parallèle⁶. La majorité des élèves prévoit que la ou les lampes vont briller plus quel que soit le montage. Si on augmente le nombre d'ampoules sans modifier le nombre de piles, alors une majorité d'élèves du niveau du collège va prévoir que les ampoules vont briller moins quel que soit le montage.

Ces trois exemples illustrent deux fonctionnements fréquents de la causalité chez les élèves. Pour le premier, les réponses données par les élèves jeunes pour justifier les prévisions peuvent être interprétées de deux façons. Pour Andersson, les élèves associent l'effort que peut exercer l'agent à l'effet obtenu, par exemple le plomb peut « faire plus de pression sur l'eau ». Nous proposons un autre type d'interprétation en faisant appel à la causalité matérielle d'Aristote présentée par Kuhn (1971) : le matériau ou plus généralement ce qui est « interne » à l'objet est la cause de propriétés ou d'actions de l'objet. Cette causalité est aussi fréquemment mise en œuvre par les enfants. Dans les deux autres exemples, le raisonnement utilisé est appelé « plus / plus » : plus la cause

⁶ Si les piles sont montées en parallèle les ampoules brillent pareil, si elles sont montées en série elles brillent plus (ou « sont grillées »).

augmente, plus l'effet augmente. On retrouve l'idée que la causalité est déterminée par une covariation (Rudolph & Försterling, 1997⁷ cité par Hilton & Slugoski, 2001). Ainsi, dès le début de l'école primaire, voire avant, dans un circuit électrique simple avec une ou plusieurs piles et une ou plusieurs ampoules, les élèves considèrent la pile comme la cause ; plus il y a de piles, plus la (ou les) lampe(s) vont briller.

2.1.2 Le rôle de l'ontologie

Toujours dans la perspective de l'importance des choses dans la compréhension du monde, on trouve les travaux d'Ogborn (1993), didacticien anglais de la physique. Il s'appuie sur les travaux de Piaget et considère que l'analyse de la manière dont les gens conceptualisent les objets et les événements, en admettant que les pouvoirs causaux puissent être des propriétés intrinsèques d'un objet ou d'un événement, doit être ontologique plutôt qu'épistémologique. Il explicite clairement son choix : « [...] nous pouvons conclure qu'il est parfaitement raisonnable d'accepter au moins l'intuition du sens commun pour laquelle personnes et objets ont la propriété de causer des événements, et par suite d'explorer les conséquences de cette assertion. [...] Les philosophes des sciences ont été beaucoup plus préoccupés par les fondements de la vérité (l'épistémologie) que par la nature fondamentale des choses telle que la science la pense (l'ontologie) » (p. 31). Il considère que la conceptualisation des objets et événements peut être étudiée chez les enfants et les adolescents en posant, au sujet d'une entité, des questions groupées sous trois rubriques : que peut-elle faire ? Que peut-on lui faire ? De quoi est-elle faite ? Dans le cas du mouvement, ses résultats montrent que les notions d'effort et de support sont des composantes essentielles des causes du mouvement (Bliss & Ogborn, 1994). La cause est un empêchement ou provoque un changement. « Ainsi, « tomber » peut être décrit comme la conséquence d'une absence de support (qui empêche la chute) qui est la cause de ce qui se produit. « Marcher » peut être décrit comme dû à un effort interne de la chose qui se déplace, également supportée par le sol. » (Ogborn, 1993, p. 36).

2.1.3 L'essentialisme

Une étude récente (Anh, Gelman, Amsterlaw, Hohenstein, & Kalish, 2000) avec des enfants de 7 – 9 ans confirme l'importance de la nature profonde des objets, ce qu'ils ont à l'intérieur peut être plus essentiel que ce qui est à l'extérieur. Ainsi pour la catégorisation, « les enfants sont plus influencés par des caractéristiques qui causent d'autres caractéristiques que par des caractéristiques qui sont des effets » (p. B41). On rejoint également les travaux suggérant

⁷ Rudolph, U., & Försterling, F. (1997). The psychological causality implicit in verbs: A review. *Psychological Bulletin*, 121, 192-212.

l'essentialisme chez les enfants. Anh et al. (2000) considèrent que les enfants favorisent les caractéristiques causales et de ce fait l'essentialisme psychologique devient un mécanisme cognitif intéressant du développement.

2.2 Causalité et théories naïves

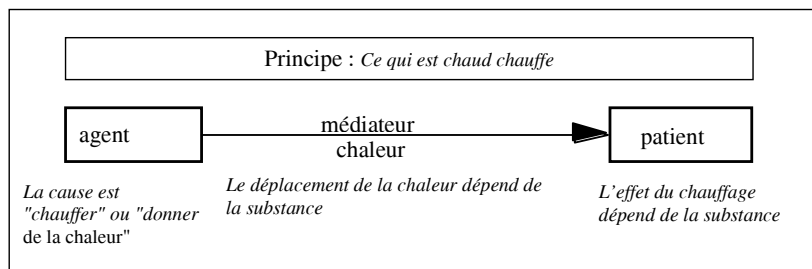
Pour interpréter le fonctionnement cognitif de l'enfant, certains psychologues considèrent que l'enfant a des cadres théoriques, ou encore des théories naïves. Il faut bien préciser que « le mot *théorie*, lorsqu'il s'applique à l'enfant, est utilisé pour qualifier une structure relationnelle et explicative et non une théorie scientifique explicite et bien formée » (Vosniadou & Brewer, 1992, note p. 47). Ces auteurs proposent des structures théoriques de deux ordres : un cadre théorique naïf, constitué de principes assez généraux sur le comportement des objets incluant le fonctionnement causal, et des théories spécifiques dans les domaines étudiés de la physique.

Une recherche menée en didactique des sciences s'est fondée sur le fonctionnement de la causalité comme base des théories naïves des élèves pour étudier leur apprentissage. La recherche a porté sur l'acquisition des concepts physiques, relatifs à diverses situations simples et courantes de chauffage et de refroidissement, par des élèves de 12 - 14 ans (6^{ème} et 5^{ème}) (Tiberghien 1980, 1989 a,b)⁸. Le but est de reconstruire, au moins partiellement, les cadres théoriques que l'élève met en œuvre dans les situations présentées dans l'enseignement ainsi que dans les questionnaires et entretiens. Une hypothèse pose que le domaine d'application d'un cadre théorique des élèves ne correspond pas nécessairement à celui d'un modèle théorique de la physique. De fait, pour la majorité des élèves, il est apparu un autre découpage du monde matériel que celui de la physique enseignée, qui présente traditionnellement les changements d'état et la conduction. La majorité des élèves proposent le même type d'interprétations pour chacun des trois champs : (1) les situations de chauffage dans lesquelles la source de chauffage et l'objet à chauffer sont en contact, (2) les situations de chauffage dans lesquelles la source de chauffage et l'objet à chauffer sont à distance, (3) les situations d'isolation. Ces champs donnent un découpage du monde matériel différent de celui fait habituellement dans l'enseignement de la physique. Les résultats sont présentés selon ces champs.

⁸ Les situations qui ont été utilisées dans les questionnaires et les entretiens mettent en jeu :
 - des sources de chauffage telles que camping gaz, four, cuisinière, radiateur
 - des objets chauffés : farine, sel, eau, chocolat, sucre, ou encore clous, poudre de fer, sable, métal, plastique, bois ou une pièce dans une maison
 - situations d'isolation telles que garder chaud ou froid un liquide ou un solide (bille, glace, café, eau chaude), isolation d'une maison.

Les interprétations, données pour les deux premiers champs qui se distinguent par la distance entre la source de chauffage et l'objet à chauffer, diffèrent d'autant plus que les élèves sont jeunes. A l'école primaire, les élèves mettent en jeu l'idée de chaleur comme médiateur seulement pour le deuxième champ ; dans le premier il y a action directe. Au début du collège, le plus souvent, les élèves font intervenir la chaleur quand ils interprètent des situations où la source et objet à chauffer sont en contact. C'est pour cela que par la suite nous détaillons seulement le deuxième champ (figure 1).

« Théorie naïve » des élèves



« Champ expérimental » des élèves

Situations de chauffage dans lesquelles la source de chauffage et l'objet à chauffer sont à distance (mésospace).

Quelques faits

- * Quand on plonge la cuillère dans l'eau chaude :
 - le manche de la cuillère en métal va devenir chaud à partir du bas jusqu'à l'extrémité ;
 - le manche de la cuillère en bois ou en plastique ne deviendra pas chaud.
- * Quand on chauffe de l'eau, elle devient de plus en plus chaude ; quand on chauffe de la farine, elle noircit ; quand on chauffe du sucre, il fond.

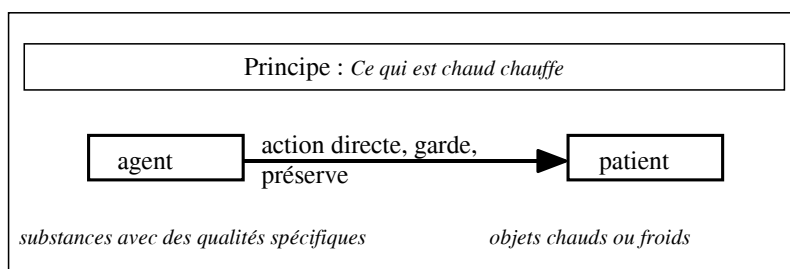
Figure 1 : Structure de connaissances des élèves dans le cas des situations où ce qui chauffe (cause) et l'objet à chauffer (effet) sont à distance.

Au niveau théorique, le « principe » : ce qui est chaud chauffe, ou ce qui est froid refroidit, s'applique à l'agent qui chauffe et au patient qui est chauffé. Notons que ce principe est aussi en vigueur pour le cas où il y a contact entre la source et ce qui est chauffé. L'agent chauffe et donne de la chaleur, en particulier dès que l'agent et le patient sont à distance. Cette chaleur se transmet et ainsi chauffe à

mesure qu'elle se déplace. Selon le type de substance, cette chaleur se transmet plus ou moins bien.

Dans le troisième champ, l'isolation, il y a toujours un raisonnement causal, mais il est fondé sur la nature (qualité intrinsèque) de la substance (figure 2). La théorie comporte encore un raisonnement causal. Le principe : « ce qui est chaud chauffe (ou froid refroidit) », met en jeu la causalité matérielle suivante : certaines substances ont la propriété de garder le chaud ou le froid. Les élèves justifient ou associent à cette propriété celle d'être chaude ou froide par nature, comme cela se fait pour solide, lourd, etc. Ainsi, dans le raisonnement causal, l'agent est la substance (ou une de ses propriétés) avec laquelle est fait le récipient. Cette substance, par nature, peut ou ne peut pas isoler. Le « patient » est l'objet, chaud ou froid, qui doit être isolé. L'action est de garder ou conserver, elle correspond à un non-changement (figure 2). Par exemple dans une situation où il y a un liquide chaud dans des récipients faits de différentes matières, ou encore un objet chaud que l'on peut entourer de matériaux différents afin que le liquide ou l'objet reste chaud le plus longtemps possible, le choix se fait à partir de la nature (qualité intrinsèque) des matériaux.

« Théorie naïve » des élèves



« Champ expérimental » des élèves

Situations d'isolation		
Quelques faits		
Coton	garde bien	les objets chauds
Aluminium	garde bien	les objets froids

Figure 2 : Structure de connaissances des élèves des situations d'isolation

Pour ces trois champs, les « théories élèves » construites par le chercheur comportent des principes causaux très généraux pouvant directement s'appliquer à une grande variété de situations. Le type de causalité, pour les situations de chauffage est différent de celui pour les situations d'isolation. Dans le premier cas, elle est efficiente, la cause est une action (chauffer) et permet de faire appel à un médiateur, la chaleur, dans le deuxième cas, elle est matérielle, la cause est la substance elle-même. Ceci justifie les deux cadres théoriques qui, comme nous l'avons noté, ne correspondent pas aux phénoménologies traditionnelles de la physique enseignée. Pour les élèves, d'une part les changements d'état ne sont pas distingués des autres situations de chauffage, et d'autre part les situations d'isolation sont expliquées différemment des situations de chauffage ; la causalité matérielle ne permet pas de faire intervenir un médiateur comme la chaleur.

Ces résultats montrent que les « théories naïves » des élèves construites à partir de la causalité permettent d'analyser de manière relativement autonome, c'est-à-dire sans référence à la physique, le fonctionnement de l'élève.

2.3 Causalité et approche multifonctionnelle de la physique

Nous présentons ici une analyse de la causalité faite dans une perspective différente de la précédente. Le fonctionnement des élèves est comparé à celui de la physique. Par rapport aux travaux présentés ci-dessus, les niveaux d'enseignement sont plus élevés, fin du lycée et début de l'université.

Pour Viennot (1993) « 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. » (p. 14).

Comme Andersson (1986), Viennot cherche des raisonnements communs trouvés dans des études portant sur différents domaines de la physique comme la mécanique ou la thermodynamique. Pour Viennot « 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 quel que soit cet instant. Une explication un peu lourde de ces contraintes conduirait à écrire, par exemple, $F(t) = ma$ (même t), quel que soit t » (p.14). Viennot considère que pour les étudiants, le temps est une variable privilégiée. Nous reprenons deux exemples analysés par Viennot.

Une des questions posées dans un questionnaire porte sur ce que devient un objet lâché dans un véhicule qui se trouve, à module de vitesse constant, dans un virage suivant les situations suivantes : les deux virages sont à l'horizontale et ont le même rayon de courbure, l'un est en cours depuis longtemps et l'autre s'amorce tout juste à la suite d'une ligne droite. A l'instant considéré, l'accélération est la même dans les deux cas. Les étudiants (450 en première année d'université et en classes préparatoires aux grandes écoles) font massivement une différence entre les deux situations (plus de 70% dans tous les groupes interrogés). L'explication causale donnée par les étudiants comporte l'idée que l'objet lâché a stocké quelque chose qu'ils nomment: « inertie », « élan », « force », « force centrifuge ». Ce stockage relève de la phase antérieure, laquelle est différente pour le cas où le virage est en cours depuis longtemps ou s'amorce. 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 (Viennot, 1979). Notons qu'on retrouve l'indifférenciation entre la force et les mouvements analysée par Piaget.

En thermodynamique, pour expliquer pourquoi le volume d'un gaz parfait dans une enceinte à volume variable (avec un piston), augmente lors d'un chauffage isobare (pression constante), 43% des

étudiants (trois premières années d'université, N=120) font des commentaires du type : « Q (chaleur reçue) T p V ». Il y a deux temps dans cette réponse. Dans le premier temps « Q (chaleur reçue) T p » (1993, p. 20), 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. Viennot ajoute l'idée d'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 » » (1993, p. 20-21). Viennot poursuit en notant qu'en anglais et en espagnol on retrouve ce terme intermédiaire (« then » ou « entonces »). On retrouve des difficultés semblables de compréhension des régimes permanents ; ce n'est plus la succession qui est utilisée par les étudiants mais l'aspect temporaire. Par exemple pour expliquer la compression adiabatique (sans échange de chaleur) d'un gaz parfait, un étudiant va dire que le nombre de chocs augmente, alors que la température augmente et que les chocs entre molécules dégagent de la chaleur à l'extérieur du système (contraire à l'hypothèse adiabatique). Mais en même temps il va dire que « c'est seulement pendant que leur nombre augmente que les chocs dégagent davantage de chaleur », ainsi la chaleur n'est transférée à l'extérieur que temporairement et ensuite, il n'y a plus de transfert de chaleur, et aux yeux de l'étudiant l'hypothèse adiabatique est respectée.

Ainsi, Viennot montre que ce mode de raisonnement causal qui enchaîne successivement les événements, dont ceux intermédiaires dans la chaîne sont temporaires, est très utilisé dans la vie quotidienne et facilité par le langage naturel. De plus ce type d'explication est facilement accepté, mais il est loin du raisonnement de la physique en termes de dépendances multifonctionnelles.

On peut relier cette analyse à celles qui considèrent qu'un raisonnement en physique met aussi en jeu la causalité. Ces deux considérations sont compatibles si l'on distingue différents niveaux de fonctionnement de la physique en se référant à la modélisation. Même si l'on ne prend que deux niveaux principaux, le champ expérimental et les théories et modèles physiques, on peut alors distinguer :

- le fonctionnement du modèle physique où il y a des dépendances multifonctionnelles et un langage formel ;
- la description des événements du champ expérimental en langage naturel ;

- la relation entre ces événements dans le champ expérimental et leur interprétation en termes de grandeurs physiques où la mesure et son traitement interviennent souvent.

La causalité n'est en jeu que dans les deux derniers cas, « dès qu'on conçoit d'un point de vue physique l'interaction des systèmes physiques concrets » (Kisler citant Putman, ce livre).

Pour l'apprentissage de la physique, il serait probablement fructueux d'aider les apprenants à prendre conscience de cette différence des fonctionnements. On pourrait aussi reprendre la distinction posée par Piaget quand il analyse la différenciation entre la causalité et les opérations logico-mathématiques. Or, comme le présente très clairement Viennot, en particulier dans l'enseignement ou la vulgarisation, on tend à vouloir expliquer comme si les deux « niveaux », le réel d'une part et les théories physiques d'autre part, fonctionnaient de la même façon. Ce choix peut être pertinent, mais doit être conscient, et dans le cas de l'enseignement on ne peut s'y limiter. Il nous semble important que l'enseignement prenne explicitement en compte ces distinctions qui sont d'ordre épistémologique (Duschl, 2000 ; Tiberghien, 2000). Ceci n'occulte pas la difficulté de conceptualisation de systèmes à variables multiples (Kuhn, Black ; Keselman & Kaplan, 2000).

Une étude plus récente (Penner, 2000) conforte l'hypothèse que la majorité des élèves, plus jeunes (niveau collège), que dans le cas des travaux de Viennot, considère que des phénomènes, même complexes, sont la conséquence directe d'un mécanisme causal singulier. Cependant, avec un enseignement adapté, ils peuvent commencer à différencier les descriptions de phénomènes complexes à un niveau local de celles à un niveau global. Plus précisément, l'étude porte sur la compréhension de phénomènes émergents. Dans ce cas, « les propriétés attribuables à un système [global] pris dans son ensemble ne sont pas des propriétés de chacun des systèmes qui le composent. C'est-à-dire, dans de nombreux systèmes, l'émergence des propriétés du système global est le résultat des interactions sous-jacentes entre les systèmes qui le composent » (notre traduction, p. 785). La méthode de recherche utilisée a comporté un entretien individuel avec quatre élèves, puis un temps relativement long d'enseignement, neuf séances (hors classe) d'environ une heure s'étalant sur deux mois. Lors de l'entretien initial, quatre différents types de situations émergentes ont été proposés : la formation de la pente d'un talus (matière inanimée), la forme en V d'un vol d'oiseaux (animaux), la formation d'un bouchon (circulation sur les routes) (humain), la formation d'une forêt à maturité (plante). Une cinquième situation a été ajoutée, car elle met en jeu à la fois les phénomènes d'émergence et de planification, il s'agit de la formation d'un défilé d'un groupe de personnes. L'enseignement a été centré sur la compréhension du fonctionnement d'un système émergent

artificiel qui peut être manipulé ou simulé sur ordinateur. Ce système présente la particularité que ses règles de fonctionnement au niveau local sont présentées explicitement et que les configurations obtenues au niveau global sont aisément perceptibles. La raison essentielle du choix de ce système est qu'il ne nécessite pas de connaissances initiales très importantes. En effet, l'auteur considère, en accord avec tous les résultats présentés ici, que les connaissances initiales des élèves peuvent jouer un rôle déterminant.

Les conclusions donnent quelques points intéressants, sur la difficulté à ne pas mobiliser une causalité simple dans une interprétation de phénomènes complexes, et en même temps que des évolutions peuvent apparaître chez les élèves. Les entretiens finaux montrent que, pour les cinq scénarios, les élèves attribuent à la configuration globale soit les actions d'un leader (par exemple dans le vol des oies, une des oies est leader), soit les effets d'un germe (par exemple dans le cas du bouchon, la cause est un accident de voiture ou la construction d'une route). Cependant, il y a une exception dans le cas de la constitution d'un talus pour lequel les élèves n'identifient ni leader, ni germe, mais considèrent simplement que les facteurs causaux ne sont pas facilement identifiables. Il faut aussi noter qu'à propos d'un bouchon de la circulation (voitures), un élève fait appel à sa propre expérience, quelquefois il n'y a pas de cause précise, il se contente alors de décrire. En aucun cas, les élèves ne différencient la forme au niveau global des interactions au niveau local. En revanche, au cours de l'enseignement, l'auteur montre qu'une différenciation apparaît explicitement chez les élèves entre les niveaux de description locaux et globaux. « Comme le résume un élève, les règles vous disent seulement comment la nouvelle génération se fait ; c'est-à-dire qu'elles décrivent les interactions à un niveau local et non global » (notre traduction, p. 803).

Ces résultats montrent que l'enseignement a permis de développer le rôle des règles, et ainsi de distinguer ces règles de fonctionnement au niveau local de la causalité du phénomène émergent. On peut considérer, en se référant à Piaget, qu'il y a un début de la différenciation entre la causalité et les opérations logico-mathématiques. Cependant, les élèves ne sont pas encore capables de transférer cette différenciation dans des situations pour lesquelles ils ne connaissent pas ou mal les règles au niveau local.

Il est également important de souligner une des difficultés explicitées par Viennot qui vient d'une contrainte de l'enseignement : la communication. Comme le soulignent Hilton et Sulgoski (2001) : « [...] l'explication causale étant une forme de conversation, elle doit en suivre les règles [de la conversation]. De bonnes explications

doivent alors suivre les maximes de Grice (1975)⁹, équilibrant la vérité, l'informativité, la pertinence, et la clarté. » (p.194, notre traduction). Or dans l'analyse critique de Viennot, on a des données qui sont de l'ordre de l'explication causale et qui vont respecter ces règles de la conversation. On voit ici un exemple des difficultés de l'enseignement avec des contraintes qui ne sont pas évidentes à concilier comme celles de la conversation, et celles de la rigueur de la discipline à transmettre.

3 CAUSALITÉ ET ENSEIGNEMENT DE LA PHYSIQUE

Nous présentons d'abord une analyse d'une séquence d'enseignement, qui montre l'écart entre l'apprentissage effectif des élèves et le savoir à enseigner. Nous montrons ensuite comment des chercheurs ont élaboré des séquences d'enseignement en considérant que, d'une part la causalité est un aspect essentiel du fonctionnement des élèves sur lequel on peut s'appuyer pour les aider à construire de nouveaux savoirs, et d'autre part le savoir à enseigner peut être construit à partir d'un fonctionnement causal plus ou moins complexe.

3.1 Écart entre apprentissage effectif et savoir à enseigner

L'étude de l'évolution des interprétations des élèves avec l'enseignement officiel a été réalisée dans des classes « habituelles » de 6ème et 5ème (12 - 14 ans) des collèges. Les différentes données (questionnaires, entretiens, observations, copies des élèves) permettent de préciser l'évolution des conceptions de la majorité des élèves. Le contenu de l'enseignement comporte en particulier les changements d'état solide – liquide (glace - eau, et métaux), liquide - gaz (ébullition de l'eau), les notions de conducteurs et d'isolant.

L'évolution des élèves a été analysée à partir de la reconstruction des « théories naïves » des élèves présentées ci-dessus. Dans le cas du chauffage de diverses substances, les résultats, après enseignement, montrent que le cadre théorique des élèves n'est pas fondamentalement modifié après enseignement des changements d'état. La plupart des élèves gardent le même type de raisonnement causal. En revanche, plus de 70% (sur 250 élèves) ont acquis un fait nouveau : la stabilité de la température d'ébullition de l'eau et la valeur de cette température. La stabilité devient une propriété de l'eau du type : l'eau (liquide) ne peut pas devenir plus chaude que 100°C (à la pression atmosphérique). Ainsi les élèves intègrent ces nouvelles connaissances dans leur structure initiale (voir figure 1) en donnant à l'eau une nouvelle propriété, celle d'avoir une température maximum quand on la chauffe.

⁹ Grice, H.P. (1975). Logic and conversation. In P. Cole & J.L. Morgan (Eds.), *Syntax and semantics*, Vol.3: Speech acts. New York: Academic Press.

Pour les situations où la source de chauffage et l'objet à chauffer sont à distance, on a le même type d'apprentissage. Après enseignement, les mots « conducteur » et « isolant » sont ajoutés et associés respectivement à la chaleur qui « se déplace » ou « ne se déplace pas » dans une substance donnée. Ainsi, la substance est caractérisée par des qualités¹⁰ telles que conducteur et isolant de la chaleur (voir deuxième partie de la figure 3).

Afin de pouvoir comparer le savoir à enseigner aux cadres théoriques des élèves, la même catégorisation est utilisée, d'une part théorie et modèle et d'autre part le champ expérimental. De plus la théorie du savoir enseigné a été explicitée en termes de causalité. Dans le cas des situations de chauffage et d'isolation, nous sommes partis des principes de la thermodynamique que nous avons reformulés (rappelez que le niveau de l'enseignement est le début du collège) (figure 3).

Savoir à enseigner

Théorie /Modèle

S'il y a une différence de température T entre deux « choses »	alors il y a transfert de chaleur (spontané) entre la « chose » à la température la plus élevée vers celle à la température la moins élevée jusqu'à égalité des températures.	le transfert est plus ou moins facile selon la substance du média (isolant ou conducteur)
--	---	---

Champ expérimental : chauffage, refroidissement, situations d'isolation

Les conceptions d'une grande partie des élèves à la fin de la séquence d'enseignement

Théorie /Modèle

Si quelque chose est chaud (source)	alors il donne de la chaleur qui est transférée (se déplace) de la source vers l'objet à chauffer	le transfert est plus ou moins facile selon la substance du média (isolant ou conducteur)
-------------------------------------	---	---

Champ expérimental : chauffage, et éventuellement refroidissement

Figure 3 : Comparaison du savoir à enseigner et des connaissances acquises par la majorité des élèves.

¹⁰ Nous utilisons le mot qualité pour expliciter que c'est inhérent à la substance.

La figure 3 montre que la conséquence en termes de transfert (les deux colonnes de droite) est la même pour l'élève et le savoir à enseigner, alors que *la condition du transfert est radicalement différente*. Dans le savoir à enseigner, la cause est une différence de températures entre deux systèmes, pour l'élève c'est encore une propriété d'un objet (être chaud). Cet écart est représentatif d'une des difficultés majeures de l'acquisition des théories physiques : en physique on considère la différence des états d'un système grâce aux grandeurs de tension : température, potentiel, hauteur, etc.. Le temps n'intervient pas dans cette modélisation. Pour l'élève, le temps est présent et à chaque moment il y a une cause qui précède l'effet comme l'a montré Viennot (1993).

Ainsi pour certaines situations, l'identité de « comportement » des systèmes pour l'élève et le savoir à enseigner est possible mais l'écart persiste à un niveau profond de la connaissance. Cette similarité des « comportements » permet de comprendre que, malgré cette différence fondamentale, de nombreux problèmes peuvent être résolus correctement car l'élève a acquis le lexique de la physique et une partie de l'interprétation (ici transfert de chaleur). Cette analyse a permis de comparer les connaissances grâce à une reconstruction à la fois du savoir à enseigner et des connaissances de l'élève en termes de structure théorique causale et de champ expérimental. Elle met en lumière que l'on peut acquérir des connaissances de physique sans pour autant en maîtriser leur sens. En revanche elle ne permet pas pour autant de proposer des situations d'enseignement. Le paragraphe suivant propose une piste dans cette direction.

3.2 Séquences d'enseignement à partir du raisonnement causal sur les circuits électriques et l'énergie

Les résultats présentés ci-dessus ont conduit de nombreux didacticiens à concevoir des séquences d'enseignement à partir d'une hypothèse constructiviste, c'est-à-dire au sens où les élèves apprennent à partir de ce qu'ils savent déjà. Dans les cas présentés, les concepteurs des séquences se sont appuyés sur le fonctionnement de la causalité chez les élèves pour le domaine de la physique à enseigner. Nous avons recensé trois cas, deux sur l'enseignement des circuits électriques, l'un au niveau du collège (Tiberghien, Psillos, & Koumaras, 1995) l'autre au niveau du lycée (Frederiksen, White & Gutwill, 1999), un troisième sur l'enseignement de l'énergie mais seulement pour la partie introductive au niveau de la 1^{ère} (Tiberghien & Megalakaki, 1995).

Dans le cas des circuits électriques, comme le soulignent Frederiksen, White et Gutwill (1999) de nombreuses séquences d'enseignements sur les circuits électriques sont centrées sur la résolution de problèmes quantitatifs. « Le type de raisonnement qui est en jeu dans de tels problèmes est basé sur des contraintes qui ont la

forme d'équations algébriques. La difficulté est qu'on ne montre pas aux élèves comment la théorie quantitative est reliée conceptuellement au modèle causal de ce qui arrive dans le circuit. Les concepts abstraits comme la tension sont de simples variables dans une équation (par exemple U dans la loi d'Ohm) » (notre traduction, p. 810).

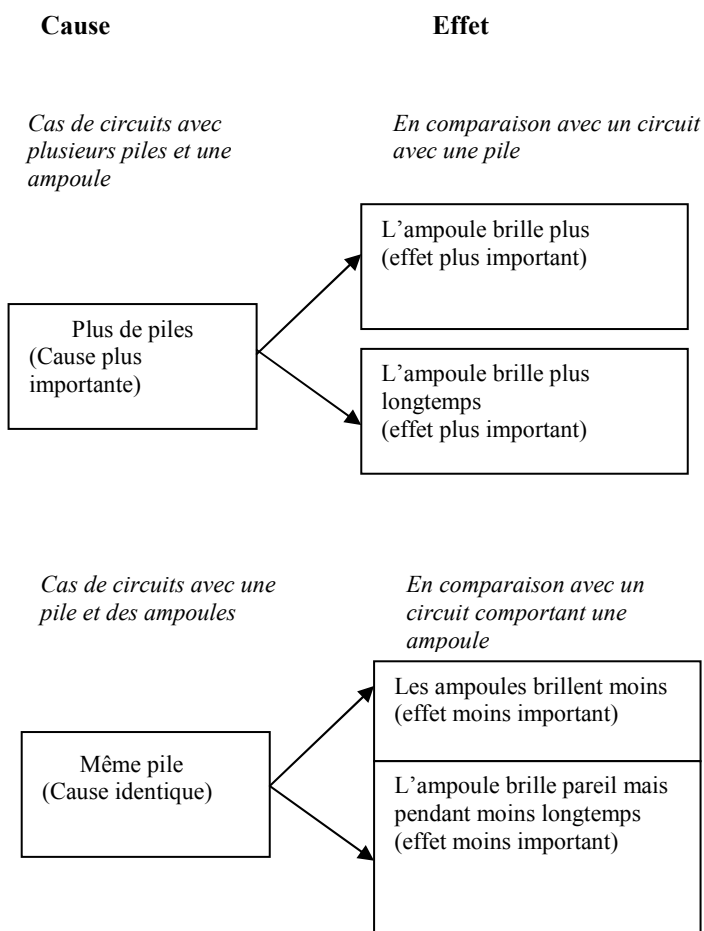


Figure 4 : Relations causales visant à différencier des événements que la physique relie aux concepts de tension, d'intensité d'une part et d'énergie et de puissance d'autre part.

En ce qui concerne l'enseignement au niveau du collège, les concepteurs ont utilisé le fonctionnement de la causalité pour aider les élèves à différencier les effets de l'augmentation du nombre de

pires en série ou en parallèle. Pour l'élève l'effet de l'augmentation du nombre de piles, qu'elles soient en série ou en parallèle, doit a priori être effectif et donc perceptible. Il est difficile aux élèves d'accepter que la cause soit modifiée (plusieurs piles) et qu'il semble qu'il n'y ait aucun effet, la brillance des ampoules étant la même. L'enseignement habituel qui se limite à l'électrocinétique ne prend pas en compte, dans le cas où les piles sont en parallèle, l'effet qui consiste en une durée de vie différente pour les piles en parallèle et pour une seule pile. Ainsi dans la physique enseignée, quand les piles sont en série l'effet est pris en compte dans l'enseignement de l'électrocinétique, alors que quand elles sont en parallèle l'effet du nombre de piles est pris en compte dans le domaine de l'énergie. Traditionnellement l'enseignement va séparer ces deux domaines. Dans cette séquence au contraire, la mise en évidence des deux effets est présentée et discutée (voir figure 4). Cette prise en compte de l'aspect énergétique a semblé indispensable aux concepteurs pour que les élèves comprennent les concepts enseignés ; nous partageons ce point de vue, qui est conforté par les résultats obtenus à l'issue de l'enseignement sur l'apprentissage des élèves.

Dans un premier temps de cette séquence, le nombre de piles en parallèle (ou la taille) est associé à leur durée de fonctionnement et à la quantité stockée (appelée énergie). Cette quantité stockée est différenciée du courant. En revanche, la tension est reliée à la brillance de l'ampoule et il n'y a pas encore de différenciation nette entre courant et tension.

Dans un deuxième temps, pour aider les élèves à cette différenciation entre courant et tension, l'équipe grecque a fait le choix de passer par l'électrostatique afin d'introduire un mécanisme de fonctionnement de la pile, celui d'accumulation de charges dans un lieu précis de l'espace. Ce choix permet d'introduire un raisonnement causal sur le mécanisme de « mise en marche » du flux de charges, c'est-à-dire le courant. Nous ne détaillons pas ce point, nous soulignons seulement que cette étude a montré le bénéfice pour l'apprentissage d'introduire un mécanisme causal de fonctionnement sur lequel l'élève peut s'appuyer pour différencier des grandeurs physiques.

Cette même orientation a été reprise, plus récemment, par White et Frederiksen (1998) avec des élèves au niveau du lycée (USA). Ils partent « de la perspective théorique que des théories complexes en sciences sont développées via des processus d'élaboration successive et de raffinement dans lequel les modèles scientifiques sont créés et modifiés pour rendre compte de nouveaux phénomènes qui sont découverts en explorant un domaine » (p. 7). Ainsi, pour les circuits électriques, domaine comme nous l'avons présenté ci-dessus difficile pour les élèves, ils ont construit des séquences où trois modèles successifs sont présentés et mis en relations. (Frederiksen, White &

Gutwill, 1999). Ils ont trouvé que fournir aux élèves des explications du courant en termes de comportement de particules chargées les aide à comprendre le concept de tension. Les trois modèles proposés sont associés à des simulations. Ces modèles sont : le modèle particulaire (de plus bas niveau) qui correspond à des surfaces qui pourraient être des tranches d'un résistor. Ces surfaces comportent un ensemble de particules chargées négativement qui se repoussent selon l'inverse du carré de leur distance (loi de Coulomb)¹¹. Le modèle global (aggregate model) permet de raisonner en termes de différence de charges dans des surfaces adjacentes d'un circuit, ces différences conduisant à un flux de charges qui peut être calculé par une loi de flux ($I = K \cdot V$). Il est fondé sur la causalité entre la différence de potentiel et le flux (plus V est grand (cause) plus I est grand (effet)). Ce modèle relie l'électrostatique au flux de charges. Le raisonnement causal de ce modèle peut aussi être appliqué à l'ensemble des circuits qui comportent une pile et des résistors. La pile est modélisée comme un dispositif qui essaye de maintenir une différence constante de charges entre ses pôles. Enfin, le troisième modèle est algébrique, il comporte les équations standard quantitatives des circuits de courant continu. Les auteurs ont expérimenté deux séquences d'enseignement construites à partir de ces modèles, l'une ne présentant que les circuits à l'équilibre et l'autre introduisant les aspects transitoires (ce que permet le modèle global (aggregate model)). La comparaison des deux groupes d'élèves ayant suivi ces séquences montre clairement que l'accès au mécanisme de fonctionnement en régime transitoire est un élément qui favorise nettement la compréhension conceptuelle. En particulier, les simulations qui montrent les changements de flux de courant qui se produisent quand les différences de potentiel varient, permettent aux élèves de mieux se rendre compte du lien causal entre la tension et le courant.

On retrouve ainsi le même type de résultat que dans le cas précédent : l'importance d'un mécanisme causal de fonctionnement pour aider à différencier des grandeurs. On peut considérer que, pour les élèves, cette différenciation devient alors nécessaire.

Un troisième exemple (Tiberghien & Megalakaki, 1995) porte sur l'introduction de l'énergie au niveau du lycée. La séquence

¹¹ La simulation comporte deux surfaces qui peuvent être reliées. Au l'un n'a aucune particule, l'autre a des particules chargées qui se repoussent. Puis les deux surfaces sont reliées, au bout d'un certain temps il y a la même densité de particule dans les deux. Les auteurs proposent deux règles simples :

- les électrons se déplaceront des surfaces qui ont une plus grande population vers celles qui ont une population plus faible ;
- quand deux surfaces ont les mêmes densités de particules, il n'y aura plus de mouvement d'ensemble d'une surface à l'autre.

d'enseignement vise à aider les élèves à construire une première notion d'énergie à partir de leur idée causale du fonctionnement d'une pile dans un circuit électrique simple. Dans cet enseignement, le circuit électrique n'est plus un système isolé, mais son interaction avec l'environnement (qui est éclairé et chauffé par l'ampoule) est prise en compte. A partir d'un modèle simple introduisant l'énergie par ses propriétés, les élèves doivent construire une représentation symbolique nommée chaîne énergétique en termes de réservoir, de transformateurs et de transfert d'énergie. Là aussi les résultats montrent que la causalité a permis aux élèves, à l'aide de modèles très simples, de conceptualiser l'énergie avec les propriétés de stockage, de transformation, de transfert. Cette conceptualisation comporte une différenciation entre le fonctionnement en termes d'objets et d'événements et celui d'un modèle, tout en établissant des liens significatifs entre des deux fonctionnements.

Ces exemples montrent que la prise en compte du raisonnement causal des élèves dans la conception de séquences d'enseignement est possible, mais qu'elle nécessite un travail considérable sur le contenu à enseigner. Ce contenu doit être adapté au fonctionnement causal accessible aux élèves tout en restant pertinent d'un certain point de vue scientifique qu'il est alors nécessaire d'explicitier. Cette adaptation permet aux élèves de construire une compréhension des concepts scientifiques. Il faut cependant noter que les scientifiques experts risquent de ne pas reconnaître le contenu de l'enseignement résultant de cette adaptation comme conforme à la physique. Le débat reste ouvert.

4 EVOLUTION VERS UN RAISONNEMENT CAUSAL COMPLEXE ET QUELQUES CONDITIONS DE L'ÉVOLUTION

Depuis environ cinq ans, dans les publications sur l'éducation scientifique, il apparaît que la causalité n'est plus abordée comme un thème central. En revanche, la causalité est mise en jeu dans l'étude du fonctionnement des élèves, en relation avec le raisonnement scientifique, les jugements, les systèmes explicatifs ou encore l'épistémologie sous jacente.

4.1 Les preuves expérimentales comme facteur d'évolution

Plusieurs recherches en didactique des sciences montrent que la simple présentation de preuves expérimentales n'est pas suffisante pour modifier les connaissances des élèves. Park et Pak (1997) sont partis de ce résultat pour mener une étude systématique de l'influence des idées causales initiales dans un domaine donné (les circuits électriques) sur l'évaluation d'une preuve expérimentale¹² (grade 8, 4^{ème}, en France). Ils considèrent que « l'inférence causale

¹² Nous avons traduit le terme anglais « evidence » par preuve expérimentale

est un aspect majeur caractérisant le raisonnement scientifique » (notre traduction, p. 58). Leur méthode a comporté dans un premier temps un questionnaire pour connaître les idées préalables des élèves (49 élèves) sur l'électricité et plus particulièrement si, avant l'observation d'un phénomène, les élèves ont des idées causales sur la relation entre des variables. Les questions ont porté sur le rôle du nombre de piles reliées en série ou en parallèle, l'épaisseur ou la longueur d'un fil résistant (nichrome), la présence d'un aimant sur la brillance d'une lampe. Sept semaines après, une série d'expériences a été présentée aux élèves et 14 d'entre eux ont été interviewés pour déterminer si leurs réponses étaient fondées sur leurs idées préalables ou sur les preuves expérimentales et si leurs réponses étaient corrélées au type d'idées préalables qu'ils avaient concernant la variable. Les questions posées, toutes en référence à un montage comportant une pile, une ampoule, une résistance, étaient similaires : quelle lampe brille le plus ? Qu'est ce qui fait que la lampe brille plus (ou pareil) que l'autre ? Est-ce qu'une autre pile modifie la brillance de l'ampoule ? Comment sais-tu cela ? (notée ultérieurement question type A) Qu'est ce qui vous a conduit à répondre ainsi ? (notée ultérieurement question type B) Pourquoi penses-tu ainsi ? Les chercheurs ont obtenu un total de 392 réponses (28 réponses par étudiants).

Ils ont trouvé que 41% des réponses aux questions de type A sont fondées sur les idées en dépit de la présentation de preuves expérimentales et qu'il y en avait encore 34% aux questions de type B. Ils ont également trouvé que si les élèves s'attendent à ce que la modification d'une variable soit la cause d'une modification d'un effet, alors ils reconnaissent mieux les preuves expérimentales même si l'observation va à l'encontre de leur prévision. Ceci a des implications sur l'enseignement. Il semble qu'à moins que les élèves ne perçoivent au préalable une relation causale entre deux variables, ils prêteront peu d'attention aux preuves expérimentales. Sans précaution préalable qui tient compte des idées initiales des élèves, la réalisation d'une expérience a donc bien peu de chances de convaincre les élèves, même si les événements observés vont à l'encontre de ce qu'ils pensent.

Une recherche plus ancienne a illustré ce point (Tiberghien, 1980). Elle a été menée dans le cadre d'un enseignement expérimental à un groupe de 8 élèves de 5^{ème} pendant 11 séances au cours duquel un même groupe de deux élèves a été filmé (le contenu de l'enseignement était proche de celui du programme de 5^{ème} du moment¹³). Nous présentons l'évolution d'une élève qui, avant

¹³ Progression réalisée : 1. La chaleur comme transfert ; 2. Les « sources » de chaleur (étude des « objets » qui chauffent dans notre environnement) ; 3. Égalité des températures des objets dans une pièce ; 4. Une condition de transfert : la différence de température ; 5.

enseignement, a deux types d'interprétations pour le chauffage et l'isolation (figures 1 et 2). Par exemple lors de l'entretien avant enseignement, cette élève fait appel au transfert de chaleur pour interpréter des situations de chauffage, en revanche elle choisit un récipient en métal (parmi d'autres en polystyrène, en verre, en carton) pour garder un glaçon le plus longtemps possible, avec l'argument : « *le métal refroidit les choses, le métal est froid* ».

Lors des deux premières séances d'enseignement, elle fait des expériences qui contredisent ses prédictions, ce qu'elle reconnaît sur le moment, mais à la séance suivante (une semaine après), elle revient au point de vue qu'elle a exprimé lors de l'entretien préalable. Lors de la septième séance, le problème posé portait sur la différence de sensation quand on touche deux matériaux différents tels que le coton et le cuivre. Précédemment cette élève a étudié l'égalité des températures des objets en contact et s'en rappelle. Pour essayer de résoudre le problème de cette différence de sensation, avec l'aide de l'enseignante, elle propose de réaliser deux expériences (de nombreux matériaux étaient disponibles) :

- envelopper un glaçon dans une feuille de cuivre et un autre dans du coton ;
- chauffer deux plaques de ces deux mêmes matériaux à une extrémité et les toucher à l'autre.

Avant ces expériences, elle dit que le coton et le cuivre sont à la même température, mais elle prédit à nouveau que le glaçon restera plus longtemps dans le cuivre que dans le coton : « *Je pense que celui-là (glaçon dans un tissu en laine) fondra plus vite que celui-là (glaçon dans cuivre), c'est que ça (la laine) donne de la chaleur* ». On retrouve l'interprétation causale où l'agent causal est une qualité de la substance. Quand elle observe les résultats de ces deux expériences, elle dit : « *le froid du glaçon s'imbibe dans la matière (le cuivre) et s'en va et là (coton) il le garde.... Ici (cuivre) ça va s'en aller la chaleur ou le froid.* »

Cette nouvelle interprétation comporte un changement dans la sélection des objets, dans leurs rôles et leurs propriétés :

- le froid (ou la chaleur), en jeu dans l'action, vient de l'objet isolé (glaçon) qui a un rôle actif. Alors cet objet a un double statut : l'un lié à la cause puisqu'il donne la chaleur ou le froid et l'autre lié à l'effet puisque la conservation de son état de chaud ou de froid est l'objectif de l'isolation ;

Transfert de quantité de chaleur ; 6. Effets de la chaleur (changements d'état) ; 7. Perception d'objets au toucher (isolants et conducteurs) à la température ambiante ; 8. Conducteurs, isolants (retour sur la notion). Dans cet enseignement, nous considérons seulement une quantité physique : la conductivité et non la chaleur spécifique. Seules des prédictions « grossières » sont permises.

- le récipient (ou sa substance) a encore un rôle actif mais différent. Ce rôle est relié à un nouveau mécanisme intermédiaire : la possibilité de déplacement de la chaleur ou du froid. Il n'agit plus directement en gardant le chaud ou le froid ou même en chauffant ou refroidissant.

Le changement se situe dans la sélection des objets, leurs rôles y compris dans la causalité et dans la façon dont ils sont mis en relation. La qualité de la substance n'est plus la cause de garder le chaud ou le froid, mais devient une condition, elle permet au chaud ou au froid de « s'en aller ». De plus le champ de validité de ce cadre théorique s'est considérablement élargi. Cette élève met en œuvre le cadre théorique « action changement » en appliquant la règle : « le déplacement de la chaleur dépend de la substance » qu'elle réservait auparavant à des situations de chauffage.

Cet exemple met en évidence l'évolution de l'élève dans un court laps de temps. Cependant cette présentation ne doit pas masquer que cette élève a déjà travaillé sur le thème pendant 9 heures réparties sur 6 semaines (1h 30 par semaine), durée à laquelle il faudrait rajouter celle de l'entretien individuel d'environ une heure. Ainsi elle a acquis de nombreuses connaissances, en particulier l'égalité des températures des objets en contact, avant l'évolution présentée ici.

Ainsi, en ce qui concerne le rôle des preuves expérimentales dans l'apprentissage, il semble que la plus grande prudence s'impose quant à leur effet bénéfique systématique, ce qui ne conduit pas à nier leur importance. Une étude récente (Lawson, 2002) a porté sur les arguments utilisés par des étudiants en formation initiale de maîtres au niveau de la licence en biologie qui ont à tester expérimentalement des hypothèses proposées. Ces hypothèses visaient à interpréter deux faits expérimentaux¹⁴. Il apparaît que lorsque les agents causaux sont observables, les étudiants réussissent beaucoup mieux. D'après l'auteur, « le taux élevé de succès et la performance relativement faible sur les hypothèses restantes qui mettent en jeu des agents causaux non observables [...] étayent l'hypothèse que l'abstraction de l'agent causal [...] affecte la performance du test d'hypothèse »¹⁵ (notre traduction, p. 247). En fait l'auteur nuance ce résultat dans le cas où l'agent causal n'est pas observable mais est

¹⁴ Il s'agit d'une bougie allumée maintenue au fond d'une casserole, contenant de l'eau, par de la pâte à modeler. On recouvre la bougie avec un cylindre, la bougie s'éteint rapidement et le niveau de l'eau monte. Les questions sont : Pourquoi la flamme s'éteint-elle ? Pourquoi le niveau de l'eau monte-t-il ?

¹⁵ « the high success rate and the relatively poorer performance on the remaining hypotheses that involves unobservable causal agents [...] provides some support for the hypothesis that the abstractness of the hypothesized causal agent affects hypothesis-testing performance »

directement associé à un observable (par exemple l'air n'est pas directement observable mais fait des bulles dans l'eau).

L'ensemble de ces résultats ouvre le débat sur la relation entre abstraction et preuve expérimentale. Actuellement plusieurs auteurs soulignent que l'abstraction nécessite de nombreuses connaissances et relations entre connaissances (Ohlsson & Lehtinen, 1997). Ainsi on peut se demander si c'est seulement le processus d'abstraction qui est en jeu dans cet échec présenté par Lawson (2002) ou si, c'est le manque de connaissances suffisantes sur un domaine qui est aussi en cause. A l'heure actuelle, la majorité des résultats va dans le sens que la prise en compte d'une preuve expérimentale par l'élève nécessiterait un cadre théorique et des connaissances préalables associées qui permettraient de l'intégrer. Ceci conduit à considérer que l'apprentissage des sciences nécessite de nombreuses acquisitions, même si elles peuvent apparaître minimales pour l'expert. Nous partageons l'hypothèse de Vosniadou et Brewer (1992) qui considèrent que l'évolution se fait par des micro changements progressifs distribués tout au long du temps. Ce point de vue conduit à des travaux étudiant, à un grain fin, les productions des élèves sur de longues durées. Ainsi, pour comprendre les relations entre apprentissage et l'enseignement, il ne suffit pas d'étudier seulement la causalité, ou l'intégration des preuves expérimentales, mais toutes les acquisitions connexes qui permettent l'évolution.

Ces résultats ne doivent pas occulter l'importance des situations et en particulier des interactions sociales où intervient l'élève, en particulier le rôle des questions qui lui sont posées. Ainsi Hilton (2002) dans un travail récent de psychologie sur la causalité montre que lorsque la question comporte explicitement la demande de considérer les preuves (*evidence* en anglais) et les alternatives, les élèves sont plus performants que sans cette demande. Dans ce cas un grand nombre d'élèves se satisfont de leurs hypothèses initiales sans les tester.

4.2 Les explications causales dans les situations d'enseignement

Pour cette question des explications causales nous avons seulement repris l'entrée par le fonctionnement des explications et celle par les stratégies d'apprentissage ; le point de vue épistémologique des élèves a également été inclus dans cette partie car il conduit à des analyses renforçant les résultats obtenus sur les explications.

4.2.1 La causalité dans les explications

Pour Gilbert, Boulter et Rutherford (1998a, b) aucune explication n'est appropriée à toutes les circonstances. Ces auteurs ont proposé cinq types d'explication : intentionnelle (justification d'actions), descriptive (clarification d'une signification), interprétative (citation

d'une théorie), causale, prédictive (déduction d'un événement futur). Ils considèrent que la valeur d'une explication est jugée par rapport à sa performance selon quatre critères d'égal statut : plausibilité, parcimonie, possibilité de généralisation, et sa fécondité (son caractère fructueux).

Les livres scolaires anglais, analysés avec cette approche, comportent majoritairement des explications descriptives et interprétatives et de plus ces explications sont proposées sans que les questions auxquelles elles répondent soient explicitement discutées. Les explications causales et prédictives sont quasi inexistantes bien qu'elles soient importantes si l'enseignement des sciences vise à faire comprendre notre environnement matériel. Les explications descriptives s'appuient largement sur l'observation. Gilbert et al. (ibid) font remarquer que les individus en général et les étudiants en sciences en particulier voient ce qu'ils s'attendent à voir : la prise en compte des faits saillants est guidée par la théorie. Or, de nombreuses tâches demandées pendant les travaux pratiques au niveau du lycée dans plusieurs pays européens portent sur la description des observations (Tiberghien et al., 2001). On rejoint les résultats discutés ci-dessus sur le rôle des preuves expérimentales. Tous ces résultats conduisent à considérer le rôle crucial des explications causales des élèves dans l'apprentissage des sciences et à suggérer qu'aussi bien les concepteurs de programme que les professeurs en tiennent compte pour choisir des expériences.

4.2.2 Causalité dans les stratégies d'apprentissage

Les travaux dans le champ des stratégies d'apprentissage des élèves, ont aussi conduit à étudier les explications causales. Nous avons retenu deux études. L'une (Meyer & Woodruff, 1997) est centrée sur l'importance de la co-construction d'explications consensuelles au sein de petits groupes d'élèves. L'autre (Chin & Brown, 2000) porte sur les approches des élèves en surface ou en profondeur dans l'apprentissage des sciences. Ces approches sont caractérisées en particulier par la nature des explications et celle des questions posées.

La première étude (Meyer & Woodruff, 1997) porte sur l'évolution des explications données au sein d'un petit groupe. En particulier ces auteurs ont étudié la convergence c'est-à-dire les processus discursifs qui se produisent quand les participants essaient d'augmenter leurs connaissances communes, ce qui suppose une convergence vers de nouvelles propositions. Il apparaît que « les élèves convergent sur des variables pertinentes [à leurs yeux] et que le nouvel ensemble de propositions valides est fondamentalement causal (notre traduction, p. 188). Les élèves se posent des questions du type « c'est probablement ... » ou « et si... ». Les étudiants convergent alors vers une idée fondée sur une variable qui leur paraît

évidente. Les chercheurs ont aussi trouvé que, lorsque les élèves recherchent des preuves expérimentales, ils élaborent des questions hypothétiques particulières qui orientent leurs manipulations et leurs conclusions. De plus, les auteurs considèrent que « si à partir d'une connaissance partagée, le groupe peut à la fois construire un consensus et expliquer un effet alors [...] aucune action ultérieure n'est nécessaire. [...] Finalement, quand le groupe arrive à une compréhension commune, on pourrait s'attendre à ce que le consensus soit ensuite démontré dans un discours cohérent – comment l'explication devient compatible avec les conditions. [...] Ce cas est rare, même dans des activités de manipulations » (notre traduction, p. 189).

Ces auteurs ont fait travailler un groupe d'élèves de 5^{ème} (grade 7) sur la lumière et les ombres (au Canada). Cet enseignement a duré 90 minutes par jour pendant deux semaines, 10h 30 au total, plus le pré- et le post-tests. Les résultats montrent que les élèves observés ont évolué du point de vue de la causalité. Elle est passée de simples attentes d'un effet vers un raisonnement causal complexe.

Avant enseignement, comme dans d'autres travaux, les élèves ne proposent pas de justifications causales mettant en jeu la taille ou la distance des objets ou encore n'utilisent pas de méthode (simuler des rayons rectilignes pour considérer la largeur de l'ombre). Dans leurs prévisions sur l'ombre obtenue avec un montage comportant une lampe, un objet et un écran, les élèves semblent incertains sur la taille de l'ombre (grande ou petite). Par exemple un élève écrit : « Chaque fois qu'il y a quelque chose qui bloque la lumière et l'empêche d'aller où elle veut, il y a une ombre qui a la forme de l'objet ».

Ces résultats confirment ceux déjà obtenus dans d'autres pays. On peut noter que les explications ou justifications causales sont bien différentes de celles obtenues dans des situations de chauffage ou de refroidissement. Cette différence peut être interprétée par celle des rôles de la source de lumière et de la « source » de chauffage. Si l'on augmente la puissance d'une source lumineuse (par exemple une lampe), la taille de l'ombre qui est le trait saillant de l'effet ne va pas changer, alors que si l'on fait augmenter la source de chauffage, le trait saillant de l'effet (chaud, nombre et taille des bulles de l'eau qui bout, etc.) va être modifié.

A la fin de l'enseignement, lors de la dernière expérience présentée, les élèves ont convergé vers un concept plus fonctionnel pour l'ensemble des expériences antérieures. Ainsi lors des séances antérieures, leurs explications proposent un comportement de la lumière spécifique de la situation : dans certains cas la lumière réfléchit, dans d'autres elle s'adapte (au trou dans un écran intermédiaire), ou encore elle se resserre (pour passer dans un petit trou). A la fin de l'enseignement les élèves mettent en jeu un même comportement de la lumière pour toutes les situations. Comme l'écrivent les auteurs,

les élèves sont passés d' « un concept référent » de ce qu'est une ombre (une forme noire d'un objet) vers un concept d' « ordre supérieur », qui est organisé autour du problème, une ombre comme le résultat de la façon dont se comporte la lumière avec les objets. La forme n'est plus une propriété invariante des ombres mais une variable dépendante contingente de facteurs relatifs. [...]. Ce mouvement vers une cohérence est en partie dû à la tâche elle-même ; nous avons demandé aux élèves de donner une seule explication pour les quatre effets » (p. 189).

Ces auteurs concluent sur l'intérêt de la forme de travail en petits groupes d'investigation de différents phénomènes avec des discussions visant un consensus. Celle-ci permet aux élèves non seulement de développer leurs connaissances sur les phénomènes mais aussi sur le fonctionnement de la physique en particulier ils ont compris pourquoi les scientifiques modélisent la lumière par des rayons.

L'autre étude (Chin & Brown, 2000) part de l'idée que pour étudier l'apprentissage des sciences, une bonne catégorisation des différences entre apprenants est celle de leurs stratégies d'apprentissage. Dans ces stratégies, l'explication est essentielle « puisque l'explication et la compréhension du pourquoi et du comment une chose arrive sont les buts majeurs de la science dans son ensemble » (notre traduction, p. 111). Les études sur l'explication, dont celle de Meyer et Woodruff (1997) présentée ci-dessus ont montré une tendance progressive des explications pré-causales vers des explications causales qui se centrent sur des relations cause-effet.

Ici, les auteurs ont construit cinq catégories « qui éclaireraient les différences entre approches en profondeur et de surface dans l'apprentissage » : la pensée générative, la nature des explications, la formulation de questions, l'activité métacognitive, l'approche des tâches. Nous détaillons leur analyse sur la nature des explications car la causalité y intervient. Cette analyse comporte quatre niveaux principaux que nous précisons car ils permettent d'apprécier la variété des explications proposées par les élèves.

Niveau 1. Les réponses reformulent la question. Les auteurs donnent comme exemple la réponse d'un élève à la question pourquoi la température de l'eau reste constante quand elle bout : « parce qu'elle ne peut pas devenir plus chaude ». Remarquons que nous ne partageons pas le choix de la catégorisation de cette réponse, car comme nous l'avons écrit ci-dessus, l'idée que l'eau « ne peut pas », n'est pas dans la question, elle est introduite par l'élève pour exprimer une qualité de l'eau qui est d'avoir une température maximum. Cette remarque n'enlève pas l'idée d'un premier niveau d'explication qui peut correspondre à une reformulation et aussi qui peut faire appel à une causalité de type matérielle si l'on se réfère aux types de causalité d'Aristote cités par Kuhn (1971).

Niveau 2. Appelé, boîte noire, ce niveau correspond à des explications qui ne font aucune référence à un mécanisme causal. Par exemple à une question demandant de prévoir si quand on rajoute du sel à de l'eau, elle chaufferait plus vite, un élève dit : « parce que ... juste ajouter quelque chose pourrait l'aider ». Il s'agit d'une réponse vague dans laquelle aucune relation cause - effet n'est spécifiée et il n'y a pas de référents.

Niveau 3. Il ne réfère qu'à ce qui est visible. Pour expliquer pourquoi la température de la fusion de la glace avec du sel est plus basse que celle de la glace seule, un élève dit qu'il a probablement mis plus de glace dans le récipient, ce qui fait que c'est plus froid. On retrouve ici des explications déjà mentionnées ci-dessus, et qu'on a qualifié de raisonnement « plus / plus ».

Niveau 4. Il décrit des entités théoriques non observables et des relations cause – effet. Par exemple pour expliquer pourquoi le point d'ébullition de l'eau avec du sel est supérieur à celui de l'eau un élève explique : « le sel dedans ... rend l'eau plus épaisse. Et ça a pris plus de chaleur pour fondre l'eau qui a du sel dedans ... Il (le sel) remplit un tas d'espaces vides entre les molécules [d'eau]. Et alors la chaleur ne pourrait pas passer à travers les particules de sel et chauffer l'eau » (notre traduction, p. 122). Notons que ce type d'explications met en jeu une causalité complexe mais cela n'implique pas que les idées exprimées soient correctes scientifiquement. Plus généralement les élèves peuvent avoir une approche en profondeur même si leurs idées ne sont pas conformes au savoir à enseigner.

Ces différents niveaux montrent tout d'abord que les explications peuvent être catégorisées selon des critères pertinents pour l'enseignement. Ces critères sont utiles pour le professeur quand il doit choisir une aide adaptée à chaque élève. Ils confirment les résultats présentés précédemment : les explications causales complexes nécessitent des mises en relation entre des éléments divers de connaissances qui nécessitent donc des acquisitions antérieures. On retrouve aussi chez Metz (1991) le même type de progression pour des enfants plus jeunes : des explications qui se centrent sur la "fonction" de l'objet (Phase 1), celles qui mettent l'accent sur les "connections" reliant les connections spatiales et les relations physiques entre des parties de systèmes (Phase 2), et les explications « mécanistes » qui sont fondamentalement plus adéquates (Phase 3).

4.2.3 Causalité et épistémologie des élèves

D'autres études sur l'apprentissage abordent les questions d'épistémologie de l'élève. Deux articles (Duschl, 2000 ; Chin & Malhotra, 2002) convergent et confortent d'autres résultats montrent l'épistémologie acquise le plus souvent par les élèves. Pour ces au-

teurs, les croyances de base sur ce qu'est le savoir et quand il devrait être modifié, consistent pour les élèves en un savoir scientifique qui a une structure causale simple et qu'il faut changer quand des expériences montrent de résultats nouveaux et manifestement évidents. Driver, Leach, Millar, et Scott (1996) précisent l'idée de ce qu'est un résultat expérimental évident. Pour ces auteurs, une croyance largement partagée quel que soit l'âge est que « le savoir fiable est nécessairement fondé sur une preuve perceptuelle directe » (p. 98). (cité par Duschl, 2001, p.191).

Ces résultats sont cohérents avec une pratique habituelle dans l'enseignement. La majorité des activités demandées lors des travaux pratiques portent sur l'observation comme nous l'avons déjà mentionné.

Un autre travail sur l'épistémologie des élèves a porté en particulier sur leurs raisonnements à propos des conclusions que l'on peut tirer d'une recherche expérimentale (Hogan & Maglienti, 2001). Cette étude examine les critères que des élèves de collège, des adultes non scientifiques, des techniciens et des scientifiques utilisent pour évaluer la validité des conclusions tirées de propositions d'étudiants hypothétiques à partir d'un ensemble de preuves expérimentales. Les résultats intéressants, dans la perspective du fonctionnement de la causalité, montrent que « les élèves construisent leurs propres conclusions sur les liens causaux après avoir pris connaissance des résultats expérimentaux proposés et qu'ils donnent une valeur élevée aux conclusions proposées si elles sont en accord avec leurs propres conclusions, et faible si c'est le contraire » (p. 672). De même en ce qui concerne la cohérence, ils évaluent positivement les conclusions si leur cohérence est celle des idées initiales des élèves sur les mécanismes causaux en jeu. Généralement, une analyse plus fine conduit à mettre en contraste deux groupes, celui des élèves et celui des scientifiques. Il apparaît que les scientifiques mettent en priorité la cohérence entre données empiriques et conclusions, tandis que les élèves utilisent plus souvent leurs points de vue et leurs inférences personnelles comme critères de jugement de la plausibilité des conclusions.

CONCLUSION

Les travaux qui abordent la causalité soit directement soit par les explications, les stratégies d'apprentissage ou encore par l'épistémologie des élèves ont des résultats qui se renforcent mutuellement. L'évolution, d'une causalité simple à une causalité complexe associée à une approche multifonctionnelle, nécessite des acquis aussi bien au niveau des connaissances spécifiques, des raisonnements, que de l'épistémologie. Les travaux récents montrent l'importance des métaconnaissances en particulier la prise de conscience du fonctionnement des sciences, et de son propre fonctionne-

ment sur la distinction entre le champ expérimental et la théorie et les modèles, sur le rôle des données expérimentales, le fonctionnement des preuves.

Les travaux montrent aussi que l'enseignement ne peut ignorer la causalité simple avec laquelle les élèves fonctionnent et que celle-ci n'est pas nécessairement un obstacle mais peut constituer un facteur d'apprentissage. Il s'agit alors de ne pas la mettre de côté mais de la faire évoluer. Ceci nécessite que le fonctionnement de la causalité soit étudié de manière fine dans différentes disciplines sans négliger le cas de la vie quotidienne

Références

- Andersson, B. (1986). The experiential gestalt of causation: a common core to pupils' preconceptions in science. *European Journal of Science Education*, 8(2), 155-171.
- Ahn, W.-K., Gelman, S. A., Jennifer A. Amsterlaw, Hohenstein, J., & Kalish, C. W. (2000). Causal status effect in children's categorization. *Cognition*, 76, B35-B43.
- Bliss, J., Ogborn, J. (1994). Force and motion from the beginning. *Learning and Instruction*, 4, 7-25.
- Chin, C., & Brown, D. E. (2000). Learning in science: a comparison of deep and surface approaches. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(2), 109-138.
- Chin, C. A., & Malhotra, B. A. (2002). Epistemologically authentic inquiry in schools: a theoretical framework for evaluating inquiry tasks. *Science Education*, 86, 175-218.
- Corrigan, R., & Denton, P. (1996). Causal understanding as a developmental primitive. *Developmental review*, 16, 162-202.
- Driver, R., Leach, J., Millar, R., & Scott, P. (1996). *Young people's images of science*. Buckingham: Open University Press.
- Duschl, R. A. (2000). Making the nature of science explicit. In R. Millar & J. Leach & J. Osborne (Eds.), *Improving science education: the contribution of research* (pp. 187-206). Buckingham UK: Open University Press.
- Fredericksen, J. R., White, B. Y., & Gutwill, J. (1999). Dynamic mental models in learning science: the importance of constructing derivational linkages among models. *Journal of Research in Science Teaching*, 36(7), 806-836.
- Gilbert, J. K., Boulter, C., & Rutherford, M. (1998a). Models in explanations, part 1: Horses for courses? *International Journal of Science Education*, 20(1), 83-97.
- Gilbert, J. K., Boulter, C., & Rutherford, M. (1998b). Models in explanations, part 2: Whose voice? Whose ears? *International Journal of Science Education*, 20(2), 187-203.

- Hilton, D. J. (2002). Thinking about causality: pragmatic, social and scientific rationality. In P. Carruthers & S. Stich & M. Siegal (Eds.), *The cognitive basis of science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hilton, D. J., & Slugoski, B. R. (2001). Conversational process in reasoning and explanation. In A. Tesser & N. Schwartz (Eds.), *Blackwell handbook of social psychology: intraindividual processes* (pp. 181-206). Malden, Ma: Blackwell publishers.
- Hogan, K., & Maglienti, M. (2001). Comparing the epistemological underpinnings of students' and scientist' reasoning about conclusions. *Journal of Research in Science Teaching*, 38(6), 663-687.
- Kuhn, D., Black, J., Keselman, A., & Kaplan, D. (2000). The development of cognitive skills to support inquiry learning. *Cognition and instruction*, 18(4), 495-523.
- Kuhn, T. S. (1971). Les notions de causalité dans le développement physique. In M. Bunge & F. Halbwachs & T. S. Kuhn & L. Rosenfeld (Eds.), *Les théories de la causalité* (pp. 7-18). Paris: Presses Universitaires de France.
- Lawson, A. E. (2002). Sound and faulty arguments generated by preservice biology teachers when testing hypotheses involving unobservable entities. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(3), 237-252.
- McCloskey, M. (1983). L'intuition en physique. *Pour la science*, 68, 68-76.
- Metz, K. (1991). Development of explanation: incremental and fundamental change in children's physics knowledge. *Journal of Research in Science Teaching*, 28, 785-798.
- Meyer, K., & Woodruff, E. (1997). Consensually driven explanation in science teaching. *Science Education*, 80, 173-192.
- Ogborn, J. (1993). Approches théorique et empirique de la causalité. *Didaskalia*, 1, 29-47.
- Ohlsson, S., & Lehtinen, E. (1997). Abstraction and the acquisition of complex ideas. *International Journal of Science Education*, 27(1), 37-48.
- Park, J., & Pak, S. (1997). Students' responses to experimental evidence based on perceptions of causality and availability of evidence. *Journal of Research in Science Teaching*, 34(1), 57-67.
- Penner, D. E. (2000). Explaining systems: investigating middle school students' understanding of emergent phenomena. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(8), 784-806.
- Piaget, J., & Garcia, R. (1971). Les explications causales. Paris: Presses Universitaires de France.
- Tiberghien, A. (1980). Modes and conditions of learning. An example: the learning of some aspects of the concept of heat. In W. F. Archenhold & R. Driver & A. Orton & C. Wood-Robinson (Eds.), *Cognitive Development Research in Science and Mathematics. Proceedings of an International Seminar* (pp. 288-309). Leeds: University of Leeds.
- Tiberghien, A. (1989a). Phénomènes et situations matérielles: quelles interprétations pour l'élève et pour le physicien? In N. Bednars et C.

- Garnier (Eds.), *Construction des savoirs* (pp. 93-102). Ottawa: CIRADE. Editions d'agence d'ARC.
- Tiberghien, A. (1989b). Difficultés dans l'apprentissage de la physique: la structuration du monde matériel en physique et dans la vie quotidienne. In N. Bednars & C. Garnier (Eds.) (pp. 228-239). Ottawa: CIRADE. Editions d'agence d'ARC.
- Tiberghien, A. (1994). Modelling as a basis for analyzing teaching-learning situations. *Learning and Instruction*, 4(1), 71-87.
- Tiberghien, A., & Megalakaki, O. (1995). Characterisation of a modelling activity case of a first qualitative approach of energy concept. *European Journal of Psychology of Education*, X(4), 369-383.
- Tiberghien, A., Psillos, D., & Koumaras, P. (1995). Physics instruction from epistemological and didactical bases. *Instructional science*, 22, 423-444.
- Tiberghien, A. (2000). Designing teaching situations in the secondary school. In R. Millar, J. Leach & J. Osborne (Eds.), *Improving science education: The contribution of research* (pp. 27-47). Buckingham, UK: Open University Press.
- Tiberghien, A., Veillard, L., Le Maréchal, J.-F., Buty, C., & Millar, R. H. (2001). An analysis of labwork tasks used in science teaching at upper secondary school and university levels in several European countries. *Science Education*, 85, 483-508.
- Viennot, L. (1979). *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*. Paris: Herman.
- Viennot, L. (1993). Temps et causalité dans les raisonnements des étudiants en physique. *Didaskalia*, 1, 13-27.
- Vosniadou, S., & Brewer, W. F. (1992). Mental models of the earth: A study of conceptual change in childhood. *Cognitive Psychology*, 24, 535-585.
- White, B. Y., & Fredericksen, J. R. (1998). Inquiry, metacognition, and metacognition: making science accessible to all students. *Cognition and instruction*, 16(1), 3-118.