

Analyse de productions graphiques d'élèves de troisième sur la poussée d'Archimède : causalité naturelle et cohérences sémiotiques

An analysis of 9th grade students' graphical productions on Archimedes' force : natural causality and semiotical coherences

Christian DÉPRET

Université Pierre Mendès France
Laboratoire des Sciences de l'Éducation
U.F.R. S.H.S., 1251 avenue Centrale
BP 47, Domaine Universitaire
38040 Grenoble cedex 9, France.

Résumé

L'étude des conceptions naturelles en physique s'inscrit dans la problématique de l'articulation des influences opératoires et causales (au sens piagétien). Dans ce cadre, on a relevé l'importance des formalismes graphiques. Nous analysons ici, dans leurs dimensions explicatives et formelles, les productions graphiques d'élèves de troisième sur la poussée d'Archimède. Les résultats montrent une grande cohérence dans les réponses des élèves. Ils vont dans le sens d'une résolution non cloisonnée,

où la forme graphique n'est pas un ensemble séparé où l'on projetterait une solution préalablement construite, mais plutôt un support imposant ses règles à la construction de la solution.

Mots clés : *explication causale, formalisme graphique, poussée d'Archimède, cohérence, articulation.*

Abstract

The study of natural conceptions in physics is related to the issue of articulating operatory and causal influences. In this domain, we stress the importance of graphical formalisms. In this research, we analyse graphical productions of fourteen years old students about Archimedes' force, through their explanative and formal dimensions. Results show a great coherence in students' responses. We also present evidence of an unseparated elaboration of solution : Graphical format is not a separate space where a previous elaborated solution is projected. It's undoubtedly a support, but it rather appears to be imposing its rules to the construction of the solution.

Key words : *causal explanation, graphical format, Archimedes' Force, coherence, articulation.*

Resumen

El estudio de las concepciones naturales en física se inscribe en la problemática de la articulación de las influencias operatorias y causales (en el sentido Piagetiano). En este marco, se extrajo la importancia de los formalismos gráficos. Aquí se analiza, en las dimensiones explicativas y formales, las producciones gráficas de los alumnos de troisième (cuarto año de la educación secundaria francesa) sobre el empuje de Arquímedes. Los resultados muestran una gran coherencia en las respuestas de los alumnos. Estos se dirigen en el sentido de una resolución no cerrada, donde la forma gráfica no es un conjunto separado que proyectaría una solución previamente construida, sino más bien un soporte que impone sus reglas a la construcción de la solución.

Palabras claves : *explicación causal, formalismo gráfico, empuje de Arquímedes, coherencia, articulación.*

1. INTRODUCTION

Les principaux travaux théoriques sur les conceptions naturelles ont été entrepris sur la base de la description piagétienne de l'articulation du logico-mathématique et de la causalité des objets, spatialisée et temporalisée, dans laquelle s'ancre la pensée symbolique (Piaget, 1947, 1971 ; Piaget & Garcia, 1987). En effet, Piaget propose une division fondamentale sur la base de laquelle s'articule sa théorie constructiviste. D'un côté il suppose des structures logiques qui vont permettre des actions logiques abstraites. De l'autre, avec la « causalité des objets », il fait intervenir la prise d'informations sur le réel qui exprime ce que font les objets en agissant les uns sur les autres. Cette dichotomie permet d'expliquer, d'une part la capacité humaine d'envisager des possibles, et d'autre part celle de rendre compte du nécessaire : c'est le postulat d'un dualisme entre formes logiques extra-temporelles et informations spatialisées et temporalisées. Notons que l'épistémologie génétique est bien nommée, en ce sens que cette position s'accorde avec les problématiques de l'épistémologie des sciences et notamment celle initiée par Kant d'un monde inaccessible en nature et reconstruit, d'une manière ou d'une autre selon les auteurs, par le sujet pensant (Bachelard, 1938 ; Eco, 1999 ; Kant, 1990). Dès lors, Piaget se heurte à la difficile tâche de séparer l'opérateur et le causal. Les opérations ne peuvent pas être premières puisque, dans leur fondement préopérateur, elles sont associées à la matière. L'indépendance de la pensée opératoire sur le causal est donc le produit d'une épuration. Inversement, ce ne peut être la causalité qui prime puisque les relations causales ne sont pas des données directement observables dans l'expérience immédiate des objets, et ne peuvent donc pas être appréhendées par abstraction simple sans recours aux opérations (Piaget, 1971). Pour Piaget, il y a donc nécessairement co-développement et co-différenciation de la causalité et des opérations. Cette réponse, intéressante pour une épistémologie génétique, est équivoque pour le questionnement didactique : la séparation, ou l'articulation, des influences opératoires et causales étant centrale dans les travaux sur les conceptions naturelles (Vicentini Missoni, 1989).

Tout en conservant la nécessaire articulation mise en évidence par Piaget, les essais théoriques ultérieurs se sont intéressés à des conceptualisations plus locales, en accord avec le développement des didactiques des disciplines. Les aspects sémiotiques et linguistiques y ont trouvé une place importante, encore amplifiée par l'arrivée des nouvelles technologies et des approches ergonomiques. Cette appropriation du questionnement psychologique par la didactique n'a pas conduit à un nouveau courant pédagogique prescriptif, mais à des didactiques des disciplines qui admettent la multi-dimensionnalité de leurs objets sans

renoncer à leurs études. On a vu apparaître des points de vue intégratifs et argumentés. Il en est ainsi de la théorie des champs conceptuels de G. Vergnaud où le concept est un triplet à la fois défini par ses dimensions opératoires, situationnelles et sémiotiques (Vergnaud, 1991). De même pour le point de vue d'A. Tiberghien, où les activités de modélisation mettent en jeu une articulation entre le niveau théorique, le niveau du modèle et celui du champ expérimental, à l'intérieur desquels on retrouvera les principes causaux, les relations mathématiques et les représentations symboliques, ainsi que les expressions du langage naturel (Tiberghien, 1994).

Sur le plan empirique, une majorité d'études a été consacrée à des notions introduites très tôt dans les cursus scolaires (primaire et secondaire). L'exemple des structures additives nous apparaît particulièrement parlant par sa simplicité apparente, révélant en fait une articulation des dimensions causales (ou temporelles) et opératoires (Vergnaud, 1981). Les difficultés conceptuelles révélées mettent en exergue le constat de Simon pour qui l'antipathie pour les mathématiques n'apparaît pas avec les premiers apprentissages du calcul mais avec les premiers énoncés de problèmes (Simon cité par Julo, 1995). Dit autrement, les difficultés conceptuelles apparaissent avec les premières formalisations de situations concrètes pour lesquelles l'expérience pense encore avoir son mot à dire (Bachelard, 1938). Cette résistance de la pensée commune (ou naturelle) a été l'objet de nombreuses études en didactique de la physique sur les conceptions naturelles (Viennot, 1995). Ces premières formalisations apparaissent en sciences physiques, dès le collège, dans trois domaines importants et en association avec un formalisme graphique précis :

– tout d'abord en électricité, où l'expérience commune, pourtant bien éloignée de l'étude des circuits électriques, impose son flot de raisonnement séquentiel (Closset, 1989) et d'analogies structurantes (Gentner & Gentner, 1983), en association avec le formalisme du schéma de principe (Johsua & Dupin, 1989). Ce dernier, fidèle à sa nature sémiotique, joue son rôle de support et d'apport au raisonnement. En effet, le schéma de principe, s'il permet une lecture « *simple* » (Johsua & Dupin, 1993, p. 316) du montage physique correspondant, apporte avec lui des lectures prototypiques. Ces dernières pouvant être de nature métaphorique, avec l'importation de propriétés d'autres systèmes (analogie aux circuits hydrauliques, à l'écoulement d'une foule, à une voie ferrée, etc.), ou géométriques, avec l'accentuation des propriétés syntaxiques propres au formalisme (forme générale du schéma ou d'une de ses parties, symétrie apparente, taille respective des éléments, etc.) ;

– ensuite, en optique (Viennot, 1995) avec la difficulté du « rayon lumineux » si facilement matérialisé dans les schématismes géométriques. Dès lors, quand on sait la tendance à réifier, on sent la pente glissante.

Rappelons la recherche de Lerouge (1993) où il est demandé si deux droites ont un ou plusieurs points d'intersection, et cela à partir de représentations de droites se coupant selon des angles différents. Le cas d'orthogonalité ne pose pas de problèmes aux élèves de 3^{ème}, mais pour un angle suffisamment plat on relève jusqu'à 57 % de réponses erronées dans lesquelles les deux droites partagent plusieurs points. Ce résultat est interprété comme une contagion du signifié mathématique par le signifiant graphique, pour lequel les lignes tracées se chevauchent effectivement d'autant plus que l'angle se rapproche de 180°. Une droite n'est pas une ligne et un « [...] *rayon lumineux n'est pas un objet matériel* » (Viennot, 1995, p. 26). Pourtant, les « rayons de construction », outils géométriques de construction des images en optique, peuvent changer de statut et devenir des éléments constitutifs de l'image. C'est parfois le cas dans les expériences mettant en jeu des lentilles et des caches, ce qui provoque la disparition abusive de tout ou partie de l'image (Viennot, 1995) ;

– enfin, en mécanique, où la référence à des situations réelles est évidente, parfois soulignée par l'enseignement, et tout aussi source de « dérapages conceptuels ». Nous rappelons à ce sujet les propos virulents de Bachelard : « *On répugne à faire violence au « sens commun ». Et dans les méthodes d'enseignement élémentaire, on recule comme à plaisir, les heures d'initiations viriles, on souhaite garder la tradition de la science élémentaire, de la science facile ; on se fait un devoir de faire participer l'étudiant à l'immobilité de la connaissance première.* » (Bachelard, 1953, p. 213). Le côté dynamique de ces problèmes de mécanique renforce d'autant plus la référence à un réel temporalisé, mis en évidence par Viennot (1979) avec l'adhérence force-vitesse (i.e. un amalgame entre ces deux grandeurs, voir page 94), et intimement lié à l'idée de cause (Piaget, 1971 ; Ogborn, 1993). On sait donc que, dans ce domaine de la mécanique, les explications, débordées par la pensée naturelle, peuvent vite devenir confuses. Cela est d'autant plus vrai que les représentations graphiques associées sont, de prime abord, moins abstraites qu'en électricité ou en optique : on rencontre, au gré des pages des manuels de physique, des illustrations colorées, semblables à celles des bandes dessinées, et sur lesquelles des forces sont accolées. Pourtant, derrière cette simplicité apparente, il y a, en plus du juste choix des forces, la nécessité de maîtriser le formalisme vectoriel (direction, sens, norme) et le point d'application (centre de gravité, centre de poussée).

Donc, cette maîtrise des formalismes peut être, au collège, une difficulté importante, d'autant qu'elle prend parfois, par rapport à l'enseignement de la discipline, le statut de notion implicite (Chevallard, 1985). Dès lors, on est en droit de se demander si le schéma en dynamique élémentaire n'apporte pas avec lui, comme le schéma de principe en

électricité ou les « rayons de construction » en optique, sa propre logique de raisonnement, risquant de biaiser les acquisitions en cours.

Ce questionnement nous a conduit à imposer le format graphique à de jeunes élèves aux prises avec un des premiers problèmes de mécanique où deux forces, la poussée d'Archimède et le poids, entrent en jeu. Nous nous intéressons tout autant au format de la réponse apportée qu'à la réponse elle-même, et ce, en passant par les interrogations suivantes :

– 1. Tout d'abord nous voudrions vérifier si, en utilisant la forme graphique, les sujets se centrent tout aussi fortement sur l'explication du mouvement, c'est-à-dire si l'on peut retrouver (et sous quelle forme) une adhérence force/vitesse ;

– 2. Nous voulons ensuite observer le formalisme graphique choisi par les sujets : correspond-il aux conventions graphiques adoptées à ce niveau scolaire ? En quoi s'en écarte-t-il ?

– 3. Ensuite, peut-on dégager des liens entre formalisme graphique et explication causale ? Le formalisme gêne-t-il l'élaboration de la réponse ? Ces deux axes sont-ils indépendants ?

– 4. Enfin, peut-on, à travers les réponses exprimées, dégager les principes causaux qu'utilisent les sujets pour expliquer le phénomène décrit dans l'énoncé ? Quels sont-ils ?

2. LE CADRE DE L'ÉTUDE PRINCIPALE

2.1. Procédure et sujets

Nous avons réalisé en 1999 une enquête sur les conceptions que les enfants ont de la poussée d'Archimède. Ce recueil d'informations a eu lieu auprès d'élèves de troisième (97 élèves répartis dans 5 classes) dans la semaine qui suivait la fin de l'enseignement sur la poussée d'Archimède. Il s'agissait, pour ces élèves, de compléter un questionnaire comportant dix exercices sur la poussée d'Archimède (voir la note à la fin de l'article). Ce questionnaire fut rempli dans le cadre du cours de sciences physiques sous la surveillance de l'enseignant et, le cas échéant, de l'auteur. Le temps imparti était d'une heure et permettait à tous les élèves de rendre un questionnaire qu'ils jugeaient complet. Par ailleurs, plusieurs versions de ces questionnaires furent proposées, ces versions se distinguant par l'ordre des exercices (aucun effet d'ordre n'a été relevé).

Quatre exercices nécessitaient la réalisation d'un calcul ; deux exercices consistaient en des questions de type « vrai/faux », relevées dans des manuels scolaires, et portant sur les déterminants de la poussée d'Archimède ; deux exercices consistaient en des explorations expérimentales sur des dimensions spatio-temporelles de situations mettant en jeu la poussée d'Archimède (dont nous ne parlerons pas ici) ; un exercice était une question ouverte sur la flottaison ; enfin, nous proposons un exercice de production graphique.

2.2. L'exercice de production graphique

L'exercice dont il sera principalement question ici est un exercice classique de production graphique en sciences physiques, où il s'agit de tracer les forces agissant sur des solides : « *Deux corps de même volume sont lâchés sous l'eau. L'un remonte vers la surface, l'autre s'enfonce. Représentez toutes les forces qui agissent sur ces deux corps.* »

Il était accompagné d'une représentation (à compléter) d'un récipient rempli. La représentation correcte attendue est présentée à la figure 1 (sans le nom des forces). Elle correspond aux connaissances supposées des élèves et, sur le plan du formalisme graphique, aux conventions adoptées en 3^{ème} pour les problèmes de mécanique :

- une force est représentée par un vecteur ancré au centre de gravité du corps pour le poids et au centre de poussée pour la poussée d'Archimède (centres non différenciés, en 3^{ème}, pour les solides homogènes) ;

- ce vecteur est orienté suivant la direction et le sens de la force, sa norme en représente l'intensité.

La force « poids », P , est définie par la masse, m , et la constante de gravitation, g , dans la relation $P = m \cdot g$. Cette relation peut être vectorialisée, le vecteur g pointant vers le centre de gravité du globe terrestre, ce qui correspond approximativement à la verticale, dans le sens haut-bas.

La force « poussée d'Archimède », P_a , est définie par la masse volumique du liquide ρ_1 , le volume du liquide déplacé, V_1 , et la constante de gravitation, g , dans la relation $P_a = \rho_1 \cdot V_1 \cdot g$, ce qui correspond au poids du liquide déplacé. Cette relation peut être vectorialisée, auquel cas un signe moins s'insère, la poussée d'Archimède s'exerçant dans la même direction que le poids mais en sens contraire.

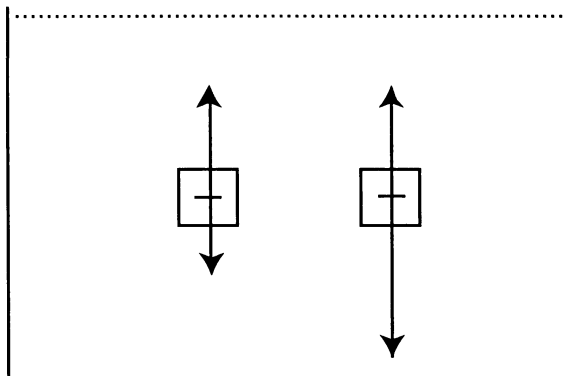


Figure 1 : **Solution attendue**

La poussée d'Archimède subie par un corps complètement immergé dépend donc de son volume et de la nature du liquide. Ici, deux solides de même volume, immergés dans un même liquide, subissent la même poussée d'Archimède. Puisque, lâchés sans vitesse initiale, le premier corps remonte vers la surface alors que le second coule, ces deux corps ne subissent pas la même force « poids ».

Les connaissances (hors formalisme graphique) nécessaires à la résolution de ce problème sont les suivantes :

- C1. Un corps immergé subit la poussée d'Archimède, qui s'exerce de bas en haut ;
- C2. Un corps qui appartient au champ gravitationnel subit le poids, qui s'exerce de haut en bas ;
- C3. La poussée d'Archimède dépend du volume du corps et de la nature du liquide dans lequel il est immergé. On en déduit (ou l'on connaît seulement) la règle suivante : « *Même volume dans même liquide donne même poussée d'Archimède* » ;
- C4. Un solide lâché sans vitesse initiale se déplace dans le sens de la résultante des forces qu'il subit.

Nous avons testé les connaissances déclaratives C1, C2 et C3 dans un autre exercice du questionnaire (donc sur les mêmes sujets) à l'aide de questions « vrai/faux ». Les affirmations proposées et les résultats correspondants sont les suivants :

- Q1 : « *Sur un corps entièrement immergé, la poussée d'Archimède s'exerce verticalement de bas en haut* » – « vrai » pour 87,6 % des sujets ;

– Q2 : « *Un corps qui appartient au champ gravitationnel subit le poids, qui s'exerce de haut en bas* » - « vrai » pour 94,6 % des sujets ;

– Q3 : « *La poussée d'Archimède dépend du volume de l'objet* » et « *La poussée d'Archimède dépend de la nature du fluide* » - « vrai » et « vrai » pour 70,1 % des sujets.

Quant à la connaissance C4, nous l'avions, elle aussi, testée dans un exercice exploratoire se rapprochant d'un jeu de prédictions que nous n'exposerons pas ici (sur ce point voir « 3. Résultats et interprétations »).

2.3. Analyse a priori

En dehors de productions marginales, les aspects potentiels des réponses se définissent par les dimensions que les sujets peuvent manipuler dans les schémas et qui sont les suivantes :

- type de vecteur (flèche pointant vers le solide, depuis le solide, groupe de flèches) ;
- présence de vecteurs horizontaux (ou « poussées latérales ») ;
- nombre de vecteurs verticaux (par solide) ;
- type de variation d'un solide à l'autre (inversion ou allongement ou suppression d'un vecteur).

Le nombre de vecteurs verticaux et le type de variation entre les deux solides sont directement liés à l'explication causale du phénomène : si ce nombre n'est pas le bon, la représentation est nécessairement fautive ; de même si le type de variation n'est pas correct la réponse est fautive. Néanmoins des réponses correctes sur ces deux seules dimensions devraient permettre à l'élève d'exprimer oralement la réponse attendue. Le type de vecteur est lié au formalisme : on peut en effet produire une représentation correcte des forces qui s'exercent sur l'objet en posant une autre convention graphique. La présence de vecteurs horizontaux est à la fois liée au formalisme et à l'explication causale, mais est indépendante de la dimension verticale : la présence de vecteurs horizontaux est une erreur ; néanmoins, la représentation peut être exacte dans sa dimension verticale.

Nous détaillons ci-dessous les aspects potentiels des réponses.

2.3.1. Type de vecteur

Nous parlerons de vecteur « pression » lorsqu'il y a des groupes de petites flèches pointant vers une face du corps (figure 2a). Un groupe de petites flèches est compté pour un vecteur. Nous parlerons ensuite de

vecteur « poussée » pour une flèche pointant vers une face du corps (figure 2b). Enfin, nous parlerons de vecteur « force » pour une flèche partant du corps et pointant vers l'extérieur (figure 2c). L'ancrage d'un tel vecteur pouvant être fait sur le bord du corps ou à l'intérieur de celui-ci.

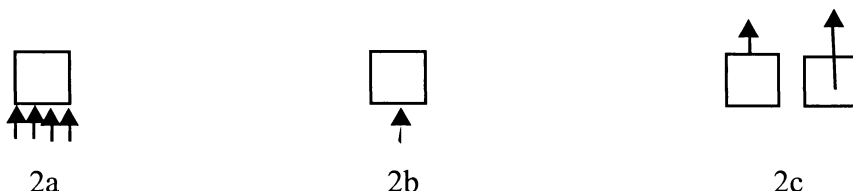


Figure 2 : Trois types de vecteurs : 2a « pression » ; 2b « poussée » ; 2c « force »

2.3.2. Orientation et nombre de vecteurs

Pour l'orientation nous étudierons de manière détaillée les vecteurs verticaux qui sont déterminants dans cet exercice. Quant aux vecteurs horizontaux, nous ne distinguerons que la présence ou l'absence de ceux-ci (voir figure 3). Pour la réponse correcte aucun vecteur horizontal ne doit apparaître.

Le nombre de vecteurs verticaux par solide peut être de 1, de 2 ou de plus. Deux vecteurs sont nécessaires à l'expression de la bonne réponse. Tous les cas sont présentés en même temps que les types de variations dans les paragraphes suivants.

2.3.3. Types de variation des vecteurs d'un corps à l'autre

Afin de ne pas alourdir cette présentation des aspects potentiels des réponses, nous ne présentons que les solutions pertinentes vis à vis du mouvement à expliquer (un corps monte, l'autre descend). Nous reviendrons sur ce point dans la partie « 3. Résultats et interprétations ».

Cas « un vecteur »

Pour les cas où un seul vecteur est utilisé, une seule variation d'un solide à l'autre est possible. C'est l'inversion du vecteur utilisé (exemple : corps A avec poussée vers le haut, corps B avec poussée vers le bas) et cela avec ou sans variation quantitative.

En fonction du type de vecteurs, et des vecteurs horizontaux, il existe 6 possibilités (figure 3), auxquelles il faut rajouter les représentations mixtes qui mélangent les types de vecteur (exemple : vecteur « poussée » pour le premier solide et vecteur « force » pour le second).

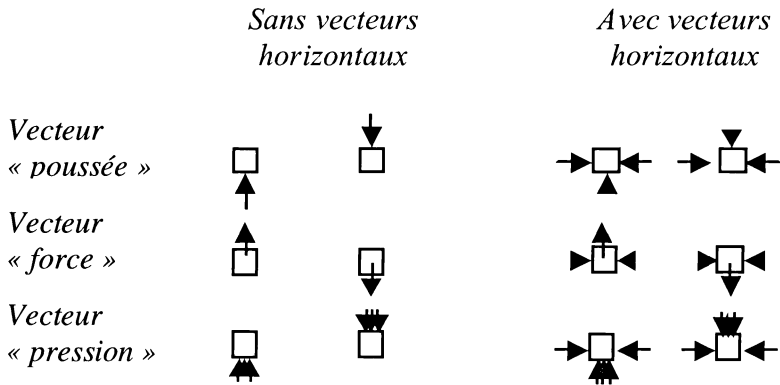


Figure 3 : **Inversion « un vecteur » (trois types de vecteur et présence/absence de vecteurs horizontaux)**

Cas « deux vecteurs »

Pour les cas où deux vecteurs sont utilisés, seuls quatre types de variation peuvent expliquer le mouvement. Le corps subit, soit deux forces allant dans le même sens, soit deux forces opposées d'intensité différente. On sépare les cas d'inversion, qui correspondent au changement de sens d'une force d'un corps à l'autre sans changement d'intensité, et les cas de variation qui correspondent à un changement d'intensité. Le seuil choisi pour juger d'un changement d'intensité correspond à une variation graphique de plus d'un centimètre.

1. L'**inversion simple** pour laquelle la force la plus importante (en intensité) est inversée. On peut toujours rencontrer plusieurs variations en fonction du type de vecteur (dont des cas mixtes) et de la présence/absence de vecteurs horizontaux. Nous ne donnons plus une représentation de tous les cas possibles comme à la figure 3, mais seulement un exemple (figure 4a).

2. La **double inversion** pour laquelle les deux forces sont inversées (figure 4b).

3. La **covariation** pour laquelle un vecteur s'allonge alors que l'autre se réduit (figure 4c).

4. La **variation simple** pour laquelle un vecteur subit une variation quantitative (réduction ou allongement), alors que l'autre est inchangé. La bonne réponse prend place dans cette catégorie (figure 4d).

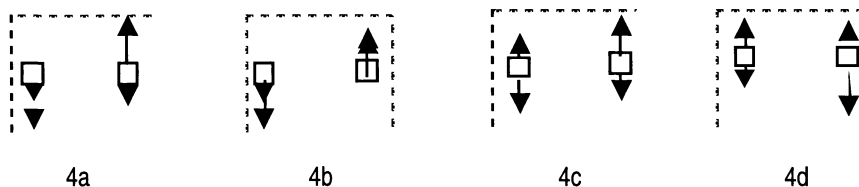


Figure 4 : Exemples pour les types de variation à deux vecteurs avec des vecteurs « force » : 4a « inversion simple » ; 4b « double inversion » ; 4c « covariation » ; 4d « variation simple »

Autres cas

Nous ne détaillons pas les aspects potentiels des réponses mettant en jeu plus de 2 vecteurs verticaux, ni les cas où le nombre de vecteurs verticaux varie d'un solide à l'autre par la suppression ou l'ajout d'un vecteur (voir « 3. Résultats et interprétations »).

3. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

Sur les 97 élèves interrogés dans cette étude, nous avons dénombré 10 non-réponses et 10 réponses marginales. Ces dernières représentaient des ressorts (4 réponses rappelant la traditionnelle mesure de la valeur de la poussée d'Archimède à l'aide d'un dynamomètre), des trajectoires (3) ou des corps seuls (3). Nous avons classé les 77 réponses dans le tableau 1. Ce tableau est la réduction de l'ensemble des réponses potentielles, telles qu'elles viennent d'être présentées selon les différentes variables dans l'analyse *a priori*, aux réponses observées.

Nous présentons ces résultats dans les paragraphes qui suivent en reprenant les quatre interrogations soulevées en introduction.


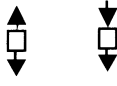
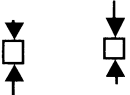

			Vecteur « pression »	Vecteur « poussée »	Vecteur « force »	Totaux	
Un vecteur (Inversion) 		Sans vecteurs horizontaux	3	8	4	15 19 %	35 %
		Avec vecteurs horizontaux	1	<u>10</u>	1	12 16 %	
Deux vecteurs	Inversion simple 	Sans vecteurs horizontaux	0	<u>5</u>	5	5 6 %	9 %
		Avec vecteurs horizontaux	0	2	2	2 3 %	
	Covariation 	Sans vecteurs horizontaux	2	<u>12</u>	5	19 25 %	43 %
		Avec vecteurs horizontaux	4	10	0	14 18 %	
	Variation simple 	Sans vecteurs horizontaux	0	1	<u>3</u>	4 5 %	8 %
		Avec vecteurs horizontaux	0	2	0	2 3 %	
Trois vecteurs			1	0	3	4 5 %	
<i>Totaux</i>			11	43 56 %	16 21 %	77 100 %	
				7 soit 9 % mixtes			

Tableau 1 : Réponses au problème des deux corps immergés : types, effectifs et pourcentages des schémas avec une explication vectorielle (les schémas à gauche correspondent aux cas majoritaires, dont les effectifs sont soulignés, pour l'inversion, l'inversion simple, la covariation et la variation simple ; la case grisée correspond à la solution attendue)

3.1. Première interrogation : l'explication du mouvement

Dans l'analyse *a priori* nous nous étions limités à la présentation des aspects potentiels des réponses pertinentes vis à vis des mouvements à expliquer. Les résultats justifient cette limitation : toutes les réponses vectorielles exprimées (indépendamment du nombre de vecteurs utilisés) expliquent le mouvement, c'est-à-dire que l'addition des vecteurs représentés correspond, en sens et en direction, au mouvement de chaque solide.

Bien sûr, pour les représentations à un seul vecteur, on peut s'interroger, malgré la consigne, sur le sens à donner à ce vecteur : s'agit-il d'une volonté de représenter une force résultante ou plutôt de représenter directement le déplacement de l'objet décrit dans l'énoncé ? En d'autres termes, il peut tout aussi bien s'agir d'une description du mouvement (la représentation d'une vitesse) que d'une explication de ce mouvement (représentation d'une force). Le nom des forces est très rarement précisé (15 % des réponses), et aucune représentation n'indique expressément un vecteur vitesse. Par ailleurs, sur le plan du formalisme, on observe des variations sur les types de vecteur (vecteur « pression », vecteur « poussée » ou vecteur « force »). Ces indices ne nous permettent donc pas de conclure. Néanmoins, toujours sur le plan du formalisme, la proportion importante (45 %) de schémas dans lesquels on trouve des vecteurs horizontaux qui s'ajoutent à ce vecteur isolé n'est cohérente qu'avec une interprétation en termes de forces.

Il y a, dans cette univocité de l'explication du mouvement, une contradiction troublante avec l'incapacité à produire la solution correcte : sur les 50 élèves qui représentent plusieurs forces, 6 seulement produisent des forces verticales correctes (8 % des réponses totales – voir tableau 1). Quant aux élèves qui se contentent d'un seul vecteur, ils déclarent pourtant, à 89 %, que le solide devrait subir deux forces (croisement des connaissances C1 et C2 pour ces élèves). Dès lors, il semble que l'élève s'engage dans la résolution du problème avec l'explication du mouvement comme premier objectif, qui primerait en particulier sur l'expression des forces en présence.

Cette importance de l'explication du mouvement peut faire penser à l'adhérence force-vitesse, bien qu'il soit impossible de la mettre en évidence ici (les solides étant initialement au repos, la correspondance « résultante des forces/vitesse » est juste). En effet, ce raisonnement intuitif a, d'après Viennot, les caractéristiques suivantes.

« – *S'il existe une vitesse ou une composante de vitesse dans une direction donnée, alors il existe une force de même direction. [...]*

– *Si la vitesse d'un mobile est nulle, la force exercée sur ce mobile est nulle aussi. [...]*

– *Si les vitesses sont différentes en direction et/ou en module, ou plus généralement si les mouvements de deux mobiles sont différents, alors les forces exercées sur ces mobiles sont différentes.* » (Viennot, 1979, pp. 25-28).

La première caractéristique peut expliquer l'importance surprenante des réponses à un seul vecteur. La dernière caractéristique peut expliquer, quant à elle, la difficulté que nous observons chez les élèves à ne pas faire varier la poussée d'Archimède entre les deux solides (voir « 3.4. Quatrième interrogation : les explications causales »).

3.2. Deuxième interrogation : le formalisme graphique

Les conventions graphiques sont très peu respectées et donnent pour les types de vecteur les résultats qui suivent (voir tableau 1).

Il n'y a que 21 % de vecteurs « force », et ceux-ci sont pour la plupart ancrés sur le bord du corps. Il y a 14 % de vecteurs « pression » et 56 % de vecteurs « poussée ». Néanmoins, les types de vecteurs sont utilisés de manière très cohérente. En effet, on ne compte que 9 % de représentations mixtes mélangeant vecteur « force » et vecteur « poussée » (voir dans le tableau 1 les deux cases fusionnées). De plus, ces cas mixtes apparaissent tous dans le cas d'inversion à deux vecteurs où le format graphique est en contradiction avec l'explication causale (voir « 3.3. Troisième interrogation : formalisme et explication causale »).

Une première interprétation de la prévalence des représentations utilisant des vecteurs « poussée » (56 %) tiendrait dans le terme même de « poussée d'Archimède ». Si le langage parle de « poussée », pourquoi pas les représentations graphiques ? On sait l'importance que le langage peut prendre dans les constructions de concepts en physique (Collet, 1997). Nous avons donc mené une étude similaire auprès de 50 élèves de la même population. La tâche consistait simplement à tracer les forces qui s'exercent sur un corps en chute libre (poids). Aucun vecteur de type « poussée » n'est apparu. L'utilisation de vecteurs « poussée » ne semble donc pas de l'ordre d'un formalisme décontextualisé que les élèves auraient adopté préférentiellement aux vecteurs « force », mais semble plutôt liée à la nature du phénomène étudié.

En dehors d'une interprétation linguistique, ce résultat est cohérent avec une autre vue théorique liée à l'ontologie des forces. En effet, si la causalité se construit sur la notion égocentrique d'agent actif (Piaget, 1937 ;

Ogborn & Bliss, 1990), alors la représentation d'une force est d'abord (i.e. tant que cette construction est satisfaisante pour le sujet) construite par anthropomorphisme, comme l'action d'un « quelque chose » sur un autre « quelque chose ». Ainsi, deux objets se tirent et se poussent plus volontiers qu'ils n'exercent une force l'un sur l'autre (Viennot, 1995) : un objet en chute libre ne sera, dès lors, non pas poussé vers la terre par quelque chose, mais tiré par la terre (acteur) vers elle (représentation de type vecteur « force » : flèche partant de l'objet et pointant vers la terre). Inversement un corps immergé ne sera pas tiré par l'air, mais poussé par l'eau (acteur) vers la surface (représentation de type vecteur « poussée »). Notons, à propos de la force de pesanteur, que des résultats plus nuancés que le nôtre, qui a été obtenu après l'enseignement relatif au poids, ont été relevés. Ils mettent en évidence des conceptions variées dans lesquelles on trouve des actions de « *quelque chose qui est en dessous* » – des « tractions » –, mais aussi des actions de « *quelque chose qui le pousse d'en haut* » – des « poussées » – (Lemeignan & Weil-Barais, 1993, p. 95).

Quant aux vecteurs horizontaux, qui sont toujours de type « poussée » ou « pression », ceux-ci apparaissent dans 40 % des cas (le chiffre n'apparaît pas directement dans le tableau 1, mais est facilement obtenu par addition). Un grand nombre de représentations est donc faussé par la présence de ces vecteurs horizontaux et cela dans tous les types d'explication. Mais il est essentiel de noter encore une fois que ces vecteurs horizontaux sont utilisés de manière très cohérente avec le reste de la représentation et, en particulier, avec le type de vecteur. En effet, comme le montre le tableau 2, les élèves choisissent un formalisme et s'y tiennent (les chiffres entre parenthèses sont toujours la conséquence des deux cases fusionnées dans le tableau 1). Un test du χ^2 (l'effectif théorique minimum de 5,52 rend ce test valide) pour le tableau 2 donne (χ^2 (ddl=1) = 7,99, $p < .01$).

	Avec vecteurs horizontaux	Sans vecteurs horizontaux
Poussée ou pression (verticalement)	27 (29 max.) <i>Cohérence sémiotique</i>	26 (31 max.) <i>Cohérence sémiotique</i>
Force (verticalement)	1 (3 max.) <i>Incohérence sémiotique</i>	12 (17 max.) <i>Cohérence sémiotique</i>

Tableau 2 : Effectifs pour la cohérence sémiotique entre les vecteurs horizontaux et verticaux (entre parenthèses les effectifs maximums avec l'inclusion des cas mixtes)

Une interprétation du nombre important de vecteurs horizontaux, et des vecteurs « pression », mais aussi des vecteurs « poussée » tient à l'explication de la poussée d'Archimède comme résultante des forces de pression (figure 5).

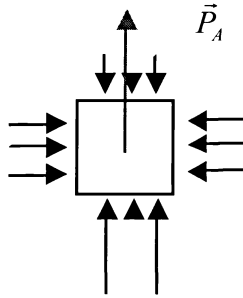


Figure 5 : **Représentation de l'explication de la poussée d'Archimède comme résultante des forces de pression**

On voit que ce schéma utilise des poussées latérales (vecteurs horizontaux) et des vecteurs « pression ». Nous avons pu montrer dans une autre partie de cette étude (non publiée) que les représentations par les vecteurs « poussée » ou « pression » sont significativement plus nombreuses pour les classes où le schéma explicatif de la poussée d'Archimède est présenté en cours : 46 % des élèves des classes où le schéma n'est pas présenté utilisent des représentations avec des vecteurs « force », contre 13 % des élèves des autres classes (pour toutes ces classes le schéma explicatif de la poussée d'Archimède figurait dans le manuel scolaire).

3.3. Troisième interrogation : formalisme et explication causale

Nous avons déjà remarqué l'importance des réponses à un seul vecteur (35 %) et souligné que ces réponses étaient en contradiction avec les connaissances exprimées des élèves. Comme nous l'avions énoncé dans l'analyse *a priori*, les possibilités de variation entre les deux solides se réduisent dans ce cas à l'inversion du vecteur. Mais nous notons que dans 100 % des cas, il s'agit d'inversion avec déplacement du vecteur, c'est-à-dire avec la conservation du type de vecteur (voir tableau 1). Le formalisme adopté par l'élève est donc respecté.

Les représentations à deux vecteurs concernent 60 % des réponses. Elles se répartissent dans trois des quatre types de variations présentés dans l'analyse *a priori* : 9 % sont des inversions simples, 43 % des covariations et 8 % des variations simples (voir tableau 1).

Nous notons l'absence de cas de double inversion qui, rappelons-le, implique la superposition de vecteurs. L'absence de ces cas de double inversion est, pour plusieurs raisons, très parlante. D'abord, nous n'avons trouvé *a priori* aucune raison, au niveau de l'explication causale, pour que le cas de double inversion soit absent. Ensuite, les cas d'inversions simples sont tous sans déplacement du vecteur, et donc, là aussi, vierges de toute superposition de vecteurs. Toutefois, ces inversions sans déplacement du vecteur conduisent obligatoirement à des représentations mixtes du point de vue du type de vecteur : le vecteur étant inversé sans être déplacé, il change de type (les vecteurs « force » deviennent des vecteurs « poussée », et inversement – voir figure 6). Enfin, ces représentations mixtes sont les seules réponses où le formalisme choisi par l'élève n'est pas respecté.

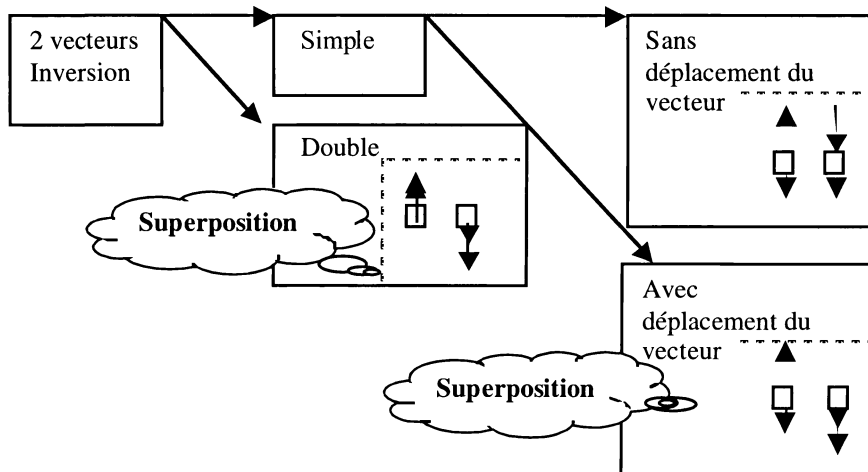


Figure 6 : L'évitement des superpositions de vecteurs dans les cas d'inversions à deux vecteurs, impasse conduisant au cas mixte (qui mélange vecteurs « force » et « poussée »)

On peut donc émettre ici l'hypothèse d'un évitement des superpositions, qui conduirait les élèves à une alternative délicate pour toutes les situations d'inversions à deux vecteurs. Ils devraient alors choisir entre la superposition (rejetée) et la mixité du type de vecteur (préférée) (voir figure 6). Cette dernière solution correspondant aux seuls cas où la cohérence sémiotique des représentations est bafouée. Enfin, cette impasse des inversions à deux vecteurs pourrait expliquer la préférence donnée

aux représentations à un vecteur, ou à la covariation pour les représentations à deux vecteurs. La dominance du cas de covariation est aussi interprétée dans les parties suivantes.

Nous ne présentons pas les quatre représentations qui mettent en jeu trois vecteurs, et dont nous n'avons pas détaillé les formats possibles dans l'analyse *a priori*.

3.4. Quatrième interrogation : les explications causales

Le lecteur aura remarqué que nous n'avons pas développé dans l'analyse *a priori* les aspects potentiels des réponses pour lesquelles le nombre de vecteurs aurait varié d'un solide à l'autre. Ce développement aurait été particulièrement lourd et nous avons choisi, *a posteriori*, de ne pas le présenter. En effet, aucun cas de ce type n'est apparu. Cela montre, une fois de plus, une certaine cohérence des réponses d'élèves. Ils semblent considérer, à juste titre, que les solides, placés dans des conditions similaires, subissent le même nombre de forces. En cela, les élèves n'apparaissent pas être perturbés par le mouvement.

Les résultats sur les variations d'un solide à l'autre (inversion « un vecteur », inversion simple « deux vecteurs » etc.), que nous avons déjà entrevus au point précédent, nous semblent montrer une structure intéressante. Nous avons tenté de voir, en utilisant la démarche suivante, dans quelle mesure le niveau scolaire les prédisait. Nous avons relevé les moyennes trimestrielles des élèves en physique. Puis nous avons affiné cette variable en en dégrèvant l'effet de la classe. Enfin, nous avons discrétisé ces résidus en trois modalités. Nous avons ainsi obtenu une variable ordinale « niveau en physique » séparant les élèves en « faibles », « moyens » et « bons ». Puis nous avons construit un tableau croisé avec, en colonne, cette variable et, en ligne, les types de variations, en excluant les productions à trois vecteurs (4 élèves).

		Niveau en physique			Totaux
		Faible	Moyen	Bon	
Type de variation d'un solide à l'autre	Non-réponses et réponses marginales	11	6	3	20
	Inversion, un vecteur	12	13	2	27
	Inversion simple, deux vecteurs	0	4	3	7
	Covariation, deux vecteurs	7	8	18	33
	Variation simple, deux vecteurs	1	1	4	6
	Totaux	31	32	30	93

Tableau 3 : **Tableau croisé (effectifs) : type de variation d'un solide à l'autre * Niveau en physique**

La faiblesse des effectifs ne nous autorise pas à réaliser un test du χ^2 . Nous disposons bien d'autres tests pour les tableaux croisant des variables nominales (le Lambda et le Tau de Goodman & Kruskal seraient ici pertinents). Mais nous pouvons aussi émettre l'hypothèse d'un ordonnancement des types de variations. De manière abrupte, on peut considérer les différentes variations comme une évolution du qualitatif au quantitatif, qui dénoterait une maîtrise opératoire. Cela s'articulant, comme suit, avec la nécessité d'intégrer les deux forces connues (poids et poussée d'Archimède), même si cette intégration doit compliquer l'élaboration de la solution et en particulier l'explication du mouvement :

- 1. Non-réponses ;
- 2. Inversion (1 vecteur) : changement du sens de la force ;
- 3. Inversion (2 vecteurs) : changement du sens d'une seule force ;
- 4. Covariation (2 vecteurs) : changement quantitatif de toutes les forces ;
- 5. Variation « un vecteur » (2 vecteurs) : changement quantitatif de la seule force nécessaire.

On peut, dans cette hypothèse, utiliser le d de Somer, qui testera ici la prédiction des types de variations par le niveau scolaire. Cette statistique nous donne : d de Somer = .40, $p < .001$.

On peut lire dans le tableau 3 cette évolution des types de variations en fonction du niveau en physique (les cases grisées correspondent aux valeurs maximales en ligne). Interprétons maintenant plus précisément cette évolution des variations.

Le passage des cas de non-réponse à l'inversion à un vecteur dénote une différence qualitative indubitable. De même, le passage de la représentation à un vecteur aux représentations à deux vecteurs, correspond à l'intégration des forces connues. Cela se fait d'abord sur la base de l'inversion à un vecteur : on obtient l'inversion simple à deux vecteurs. Mais cette variation, on l'a vu, conduit à une incohérence du formalisme. Elle ne concerne que peu d'élèves, et peut être considérée comme transitoire. Dès lors, il ne reste plus que deux possibilités, qui impliquent le passage au quantitatif : la covariation et la variation simple. C'est la covariation, majoritairement choisie, qui correspond au palier suivant. Tout d'abord, on pourrait dire naïvement que ce cas permet d'expliquer « deux fois plus » le phénomène. Mais, il nous apparaît surtout être lié à un principe de simplicité ou d'unité d'explication du phénomène, bien qu'à première vue un plus grand nombre de forces varie. En effet, à un niveau perceptif, un corps coule alors que l'autre va flotter. C'est toute la difficulté du phénomène de flottaison qui est d'abord perçu comme un phénomène unique, alors qu'il doit, pour être maîtrisé, être compris comme un rapport entre deux forces (Guillaud, 1992 ; Robardet & Guillaud, 1997). La conception unitaire du phénomène est cohérente avec d'autres résultats trouvés sur la poussée d'Archimède :

- les élèves déclarent que la poussée d'Archimède dépend du poids de l'objet, mélangeant poussée d'Archimède et flottaison (question « vrai/faux » de notre questionnaire : « *La poussée d'Archimède dépend du poids de l'objet* », « vrai » pour 49,5 % des sujets) ;

- les élèves donnent une explication du phénomène de flottaison par une caractéristique du corps (analyse de la question ouverte de notre questionnaire : « *Pourquoi, dans l'eau, seuls certains corps flottent ?* », 40 % des sujets répondent par une caractéristique du corps) ;

- l'obstacle substantialiste (Bachelard, 1934), que l'on retrouve aussi dans les expressions du langage courant, amène à parler d'une caractéristique de « flottabilité » (Guillaud, 1992).

Cette conception, associée à la nécessité de représenter les deux forces de poids et de poussée d'Archimède, induirait le raisonnement naïf suivant, qui ignore l'information d'égalité des volumes : il y a le corps qui flotte (mouvement ascendant) et le corps qui coule (mouvement descendant). Le corps qui flotte est un peu moins lourd et flotte mieux que

le corps qui coule, et inversement le corps qui coule est un peu plus lourd et flotte moins bien.

Évidemment ce raisonnement n'est qu'une supposition. Toutefois, nous avons dans la question ouverte du questionnaire (« *Pourquoi, dans l'eau, seuls certains corps flottent ?* ») des réponses qui se rapprochaient de ce raisonnement : « *Parce que les corps plus lourds flottent moins bien que les corps moins lourds* », élève de 3^{ème}.

L'appariement poids/poussée d'Archimède conduirait alors à la covariation. Ou encore, pour le dire en termes causaux : on a une cause unique et s'il faut malgré tout représenter la flottaison comme un rapport de deux forces subies par l'objet (on en a noté plus haut les réticences), alors elles covarient. Ces différents arguments rendraient le cas de variation simple plus difficile à produire, puisqu'il nécessite de découper le phénomène en deux causes distinctes et indépendantes.

4. CONCLUSION

L'analyse que nous avons menée met en évidence des résultats de prime abord très différents. Premièrement, nous relevons des résultats « bruts » : les élèves se centrent sur l'explication du mouvement. Ils ne respectent que minoritairement les conventions graphiques (21 % des vecteurs « force », pour la plupart mal ancrés). Ils font intervenir des vecteurs horizontaux, mélangeant deux niveaux d'explication du phénomène. Néanmoins, pour ce point précis, on pourrait trouver une explication à la lumière des schémas présentés en cours. Ils utilisent, pour plus d'un tiers, des représentations monovectorielles simplistes eu égard au problème posé. Enfin, sur 97 élèves, 3 seulement produisent la solution attendue. De là, à un cuisant constat d'échec pour l'enseignement, et toute la cascade de conclusions sur les élèves eux-mêmes qui s'ensuit généralement, il n'y a qu'un pas. Mais c'est un pas de trop.

En effet, dans un second temps, une analyse approfondie nous révèle d'autres résultats. Nous montrons une grande cohérence dans les productions d'élèves, qui invite à modérer le prime jugement. Cela validant d'ailleurs tout à fait le statut, fondamental, de l'erreur en didactique. Cette cohérence apparaît, en premier lieu, isolée dans les formalismes. Ainsi, on remarque une cohérence interne à la représentation graphique de chaque élève sur la dimension « type de vecteurs verticaux », qui n'est mise à mal que par 7 élèves (sur 77) et cela dans un cas bien particulier. Les élèves choisissent donc un formalisme et s'y tiennent. Le non-respect des conventions graphiques devrait-il être relu à la lumière de cette étonnante « rigueur naturelle » ? On note aussi une cohérence interne aux

représentations sur l'articulation des dimensions « type de vecteurs verticaux » et « vecteurs horizontaux ». Elle est d'autant plus remarquable que ces dimensions apparaissent, *a priori*, indépendantes. Enfin, la cohérence interne aux représentations se révèle encore dans l'explication du phénomène : quelle que soit l'explication choisie, le nombre de forces ne varie pas d'un solide à l'autre (alors que la suppression d'une force résoudrait, pour l'élève, bien des problèmes...)

Troisièmement, nous mettons en évidence des invariants entre les réponses d'élèves dans les explications causales du phénomène et cela en lien avec les formalismes. Il ne s'agit plus de cohérence interne à la production d'un élève, puisqu'on ne compare pas des dimensions appartenant à une même réponse, mais d'une cohérence des productions du groupe d'élèves. Ainsi, tous évitent les explications impliquant la superposition des vecteurs. Et toutes les productions, pour le cas d'inversion simple à deux vecteurs, sont des cas d'incohérence sémiotique du point de vue des types de vecteurs, et ce sont les seuls. Ces résultats sont des arguments pour une articulation consensuelle des formalismes avec les explications causales. Enfin, nous observons une prédiction des types d'explications par le niveau scolaire. Les interprétations de ce résultat sont principalement de nature causale et opératoire, mais les deux résultats précédents montrent que ces dimensions ne sont pas indépendantes du formalisme. Pour approfondir ce lien, il conviendrait de procéder à l'étude longitudinale des types d'explications afin d'en montrer l'ordonnancement, et cela corrélativement à l'étude des formalismes. Si nous retrouvions cet ordonnancement en « intra-élève », nous pourrions l'interpréter en termes d'étapes dans l'évolution vers la réponse correcte. Alors, on pourrait envisager que les situations d'incohérences sémiotiques (comme celle liée à l'inversion simple) soient elles-mêmes les déclencheurs de processus dialectiques conduisant à l'élaboration d'autres explications (comme la covariation). Ceci étant avancé en référence à la dynamique piagétienne selon laquelle « [...] *le moteur des différenciations [de notions ou structures causales] sont (donc) à chercher dans les processus dialectiques que provoquent les contradictions.* » (Piaget, 1971, p. 121).

Loin d'un constat d'échec, l'étude des productions graphiques de ces élèves nous révèle donc des dynamiques sous-jacentes cohérentes, et une causalité qui n'est pas figée, puisqu'elle s'articule avec des registres sémiotiques. Comme nous l'avons suspecté en introduction, le schéma en dynamique élémentaire joue son rôle de système de code, et impose ses règles à l'élaboration de la solution. On ne peut bien sûr pas qualifier ici son intervention en termes de pertes ou profits. Mais on insistera sur l'importance à accorder, dans l'enseignement, aux formalismes qui y sont utilisés : ils sont porteurs de sens.

NOTE

L'auteur tient à la disposition de tout lecteur souhaitant le consulter le questionnaire complet dont est extrait l'exercice de production graphique, objet du présent article.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mes collègues du laboratoire, et en particulier Erica De Vries pour ses lectures attentives des ébauches de cet article et pour la pertinence de ses conseils, ainsi que Jacques Baillé pour son soutien. Je remercie aussi les enseignants qui m'ont accepté sans hésitation au sein de leurs classes, et bien sûr les élèves desdites classes.

BIBLIOGRAPHIE

- BACHELARD G. (1934). *Le nouvel esprit scientifique*. Paris, PUF.
- BACHELARD G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris, Vrin.
- BACHELARD G. (1953). *Le matérialisme rationnel*. Paris, PUF.
- CLOSSET J.-L. (1989). Les obstacles à l'apprentissage de l'électrocinétique. *Bulletin de l'union des physiciens*, n° 716, pp. 931-950.
- CHEVALLARD Y. (1985). *La transposition didactique*. Grenoble, La Pensée sauvage.
- COLLET G. (1997). Définition de règles d'appariement linguistiques pour l'analyse didactique d'une tâche de modélisation en physique. *Informations In Cognito*, n° 7, pp. 5-16.
- ECO U. (1999). *Kant et l'ornithorynque*. Paris, Grasset.
- GENTNER D. & GENTNER D.R. (1983). Flowing waters or teeming crowds : Mental models of electricity. In D. Gentner & A.L. Stevens (Éds), *Mental Models*. New-York, Lawrence Erlbaum Associates, pp. 99-129.
- GUILLAUD J.-C. (1992). *Quelques aspects de l'expérimentation d'un contenu d'enseignement : cas de la poussée d'Archimède en classe de 3^{ème}*. Mémoire de D.E.A., Grenoble, Université Joseph Fourier.
- JOHSUA S. & DUPIN J.-J. (1989). *Représentations et modélisations : Le « débat scientifique » dans la classe et l'apprentissage de la physique*. Berne, Peter Lang.
- JOHSUA S. & DUPIN J.-J. (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris, PUF.
- JULO J. (1995). *Représentation des problèmes et réussite en mathématiques*. Rennes, Presses Universitaires de Rennes.
- KANT E. (1990). *Critique de la raison pure*. Paris, Gallimard.
- LEMEIGNAN G. & WEIL-BARAIS A. (1993). *Construire des concepts en physique*. Paris, Hachette.
- LEROUGE A. (1993). Contagion de signifiant et contagion de référence : sur la conceptualisation mathématique de l'intersection de deux droites. *Les sciences de l'éducation*, vol. 1-3, pp. 119-135.

- OGBORN J. & BLISS J. (1990). A Psycho-Logic of Motion. *European Journal of Psychology of Education*, vol. 5, n° 4, pp. 379-390.
- OGBORN J. (1993). Approche théorique et empirique de la causalité. *Didaskalia*, n° 1, pp. 29-47.
- PIAGET J. (1937). *La construction du réel chez l'enfant*. Neuchâtel, Delachaux & Niestlé.
- PIAGET J. (1947). *La psychologie de l'intelligence*. Paris, A. Colin.
- PIAGET J. (1971). *Les explications causales*. Paris, PUF.
- PIAGET J. & GARCIA R. (1987). *Vers une logique des significations*. Genève, Murionde.
- ROBARDET G. & GUILLAUD J.-C. (1997). *Éléments de didactique des sciences physiques*. Paris, PUF.
- TIBERGHEN A. (1994). Modeling as a basis for analysing teaching-learning situations. *Learning and Instruction*, vol. 4, pp. 71-87.
- VERGNAUD G. (1981). *L'enfant, la mathématique et la réalité*. Berne, Peter Lang.
- VERGNAUD G. (1991). La théorie des champs conceptuels. *Recherche en Didactique des Mathématiques*, vol. 10, n° 23, pp. 133-170.
- VIENNOT L. (1979). *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*. Paris, Hermann.
- VIENNOT L. (1995). *Raisonnement en physique*. Bruxelles, De Boeck Université.
- VICENTINI MISSIONI M. (1989). État des recherches sur les schémas de connaissances communes, alternatifs à la connaissance scientifique. In A. Giordan & A. Henriquez (Éds), *Psychologie génétique et didactique des sciences*. Berne, Peter Lang, pp. 127-151.

Cet article a été reçu le 06/12/01 et accepté le 16/04/02.