

Analyse du raisonnement d'étudiants utilisant les concepts de base de l'électromagnétisme

**Analysis of students' reasoning using
the basic concepts of electromagnetism**

**Análisis del razonamiento de estudiantes
que utilizan los conceptos de base
del electromagnetismo**

**Analyse der Gedankengänge von Studenten,
die die Grundbegriffe des Elektromagnetismus
gebrauchen**

Roja BAGHERI-CROSSON et Patrice VENTURINI

EA 3692, LEMME (DESEI)
Université Toulouse 3
rbagheri@cict.fr
patrice.venturini@cict.fr

Résumé

De rares travaux en didactique de la physique portant sur l'électromagnétisme ont montré l'existence, chez les étudiants, de difficultés concernant la compréhension et l'utilisation du concept de champ magnétique et des

concepts associés. Afin de comprendre ces difficultés, nous avons étudié les raisonnements mis en œuvre par des étudiants issus du DEUG sciences de la matière, lorsqu'ils mobilisent dans différentes situations les concepts de base de l'électromagnétisme, en nous référant à la théorie des champs conceptuels. Nous avons pu ainsi identifier les invariants opératoires utilisés et l'organisation de leurs conduites. Il apparaît que les étudiants interrogés sont très peu nombreux à contrôler la pertinence et la cohérence de leurs propos, que les invariants opératoires sont utilisés de manière non contextualisée et très souvent sans qu'un sens physique leur soit associé.

Mots clés : électromagnétisme, champ magnétique, théorie des champs conceptuels, invariant opératoire, schème, enseignement universitaire.

Abstract

Few works concerning the teaching of electromagnetism in physics class deal with a pupil's difficulties in understanding and using magnetic fields and its associated concepts. In order to better comprehend these difficulties, the thought process of some undergraduate students was studied as they applied the basic "theory of conceptual fields" in electromagnetics in various situations. The study was thus able to identify certain "operational invariants" and student organizational behaviour and showed that few mastered either the pertinence or the coherence of their answers. Furthermore, the "operational invariants" were not adapted to a problem-solving situation and were often used without any relation to physics.

Keywords: electromagnetism, magnetic field, theory of conceptual fields, operational invariants, scheme, magnetic field, university education.

Resumen

Los muy pocos trabajos en didáctica de las ciencias físicas que se relacionan con el electromagnetismo han mostrado que existen dificultades para los estudiantes en cuanto a la comprensión y a la utilización del concepto de campo magnético y otros conceptos asociados. Para entender esas dificultades hemos estudiado los razonamientos aplicados por estudiantes de segundo curso universitario de Ciencias de la Materia cuando mobilizan los conceptos de base del electromagnetismo en diferentes situaciones y refiriéndonos a la teoría de los campos conceptuales. De este modo hemos podido identificar los invariantes operatorios utilizados y la organización de sus progresiones. Es patente que los estudiantes interrogados son muy pocos en controlar la pertinencia y la coherencia de sus respuestas y que utilizan los invariantes operatorios de modo no contextualizado y muy a menudo sin haberles asociado un sentido de ciencias físicas.

Palabras clave : electromagnetismo, campo magnético, teoría de los campos conceptuales, invariante operatorio, esquema, enseñanza universitaria.

Zusammenfassung

Einige seltene Arbeiten über die Didaktik der Physik, die sich auf den Elektromagnetismus beziehen, haben gezeigt, dass die Studenten auf Schwierigkeiten stoßen, um den Begriff von Magnetfeld und die damit verbundenen Begriffe zu verstehen und zu gebrauchen. Um diese Schwierigkeiten zu verstehen, haben wir die Gedankengänge untersucht, die die Studenten, die ein Grundstudium (DEUG) in den Erd- und Naturwissenschaften abgeschlossen haben, entwickeln, wenn sie in verschiedenen Situationen die Grundbegriffe des Elektromagnetismus einsetzen, wobei wir uns auf die Theorie der Begriffsfelder berufen. So haben wir die benutzten operativen Invarianten und die Organisation ihrer Verhalten identifizieren können. Es ist klar ersichtlich, dass sehr wenige der befragten Studenten die Stichhaltigkeit und die Kohärenz ihrer Äußerungen überprüfen, es zeigt sich auch, dass die operativen Invarianten auf eine nicht kontextuelle Weise benutzt werden und sehr oft, ohne dass eine physikalische Bedeutung mit ihnen verbunden ist.

Schlüsselwörter: *Elektromagnetismus, Magnetfeld, Theorie der Begriffsfelder, operative Invariante, Schema, Hochschulwesen.*

INTRODUCTION ET PROBLÉMATIQUE

Les travaux de recherche en didactique de la physique portant sur l'utilisation des concepts en électromagnétisme sont rares. Ceux qui ont été menés concernent les conceptions de jeunes élèves sur les phénomènes magnétiques, les difficultés éprouvées par des étudiants à donner du sens aux concepts et la propension à utiliser des procédures, les modèles mentaux relatifs au magnétisme, la nature du raisonnement en présence d'un champ, le type d'enseignement à dispenser pour améliorer la situation.

L'étude des conceptions sur les phénomènes magnétiques de certains des élèves marocains interrogés par Maarouf & Benyamna (1997) montre qu'ils ont une représentation de l'aimantation qui est « causale linéaire ». Celle-ci résulte du « passage de quelque chose d'un agent (source de champ magnétique, de tension, circuit) à un patient (objet à aimanter, circuit) », la « perte de ce quelque chose » entraînant une désaimantation. L'intermédiaire (médiateur entre agent et patient) peut être abstrait (force, énergie) ou de type substantialiste (électrons, ions, matière magnétique). Maarouf & Benyama (1997) constatent également une représentation conçue à partir des interactions magnétiques, attribuant au magnétisme « le statut d'une chose abstraite (force magnétique) ou d'une substance (matière de l'aimant, charges électriques) localisée dans les endroits précis des corps manipulés ».

Deux études mettent en évidence les difficultés d'étudiants à donner du sens aux concepts et la propension à utiliser des procédures. Ainsi, selon Venturini, Albe & Lascours (2000), les étudiants de licence (dans la limite de leur échantillon étudié) ont des difficultés à donner un sens physique aux concepts fondamentaux de l'électromagnétisme (champ magnétique, flux magnétique et induction) et à établir des liens entre eux. Ces étudiants disposent de connaissances parcellaires, liées à une situation particulière et utilisent les formules et les outils mathématiques de manière procédurale. Greca & Moreira (1997) parviennent à des conclusions sensiblement identiques en analysant la résolution de problèmes d'électromagnétisme faite par des élèves ingénieurs au Brésil. Ils constatent qu'ils utilisent des définitions et des formules qu'ils manipulent de manière routinière et témoignent d'une organisation cognitive très pauvre.

Tarisco Borges & Gilbert (1998) ont examiné les modèles mentaux utilisés par des lycéens, des professeurs de physique, des techniciens et des ingénieurs anglais spécialistes en électricité. Leurs résultats révèlent l'existence de cinq modèles différents dans lesquels le magnétisme est respectivement conçu :

- à partir de l'attraction des objets environnants : « le magnétisme comme attraction » ;
- comme une région de l'espace où existent des interactions : « le magnétisme comme un nuage » ;
- comme résultant de l'interaction de charges électriques : « le magnétisme comme l'électricité » ;
- comme lié à des phénomènes de polarisation électrostatique : « le magnétisme comme une polarisation électrique » ;
- comme un champ : « le modèle du champ ».

La notion de champ magnétique reste donc confuse et l'interaction magnétique n'est que rarement explicitée. Enfin les auteurs soulignent le nombre important de réponses formulées en termes d'électricité.

L'étude de Viennot & Rainson (1992) concerne les types de raisonnement utilisés à propos du champ électrique. Ces chercheuses ont montré que des étudiants en classe de mathématiques spéciales technologiques, placés dans des situations où l'influence de plusieurs facteurs sur le champ électrique doit être prise en compte, privilégient un « raisonnement causal linéaire ». Un des obstacles qu'elles ont repéré est résumé dans la formule « champ [électrique] si mobilité ». Celle-ci traduit le fait que les étudiants raisonnent souvent comme si une cause n'existait qu'en cas d'effet manifeste.

Enfin Van Weren *et al.* (1982) constatent que des étudiants hollandais en première année universitaire ont mieux réussi à résoudre les problèmes après une reconstruction du cours classique d'électromagnétisme sous forme de deux programmes : un premier qui décrit le savoir concernant le cours d'électromagnétisme (les relations clés du domaines) et le second

qui décrit les actions et les méthodes de pensée qui sont pertinentes pour acquérir et utiliser ce savoir (schème de résolution d'un problème d'électromagnétisme).

Quel que soit le public, cette brève synthèse de résultats obtenus met en évidence l'existence de difficultés importantes liées à l'utilisation du concept de champ magnétique. Cependant aucune des études précédentes n'a analysé la genèse de ces difficultés, dans le but de mieux les comprendre. C'est pourquoi nous avons choisi d'examiner la manière dont les étudiants raisonnent lorsqu'ils utilisent le concept de champ magnétique et les concepts associés (Bagheri-Crosson, 2004). Cet article rapporte une partie de ce travail, centrée sur la manière dont ils organisent leurs conduites mentales dans cette situation.

Dans un premier temps, nous évoquons le cadre théorique sur lequel repose l'étude réalisée, basée essentiellement sur la théorie des champs conceptuels de Vergnaud (1990). Nous présentons ensuite la méthodologie utilisée qui décrira notamment la manière dont nous avons rendu compte des raisonnements des étudiants. Enfin la dernière partie de ce texte rapporte certains des résultats obtenus concernant leurs conduites et quelques interprétations possibles.

CADRE THÉORIQUE

La théorie des champs conceptuels de Vergnaud (1990) fournit un cadre théorique aux recherches sur les activités cognitives complexes, notamment celles qui relèvent des sciences et des techniques. Elle explique les processus de formation des concepts et leur utilisation, et c'est précisément cela que nous cherchons à comprendre dans le cas de l'électromagnétisme, comme Vergnaud lui-même a pu le faire dans le domaine des mathématiques.

Vergnaud (1990) définit la notion de champ conceptuel comme « un ensemble de situations dont le traitement implique des schèmes, concepts et théorèmes en étroite connexion, ainsi que les représentations langagières et symboliques susceptibles d'être utilisées pour les représenter ».

Il appelle schème « l'organisation invariante de la conduite pour une classe de situations donnée » en précisant que « c'est l'organisation qui est invariante, non pas la conduite ». Selon Vergnaud (1998), « le schème n'organise pas que la conduite observable, mais également l'activité de pensée sous-jacente ». Selon lui, cette organisation (le schème) est formée nécessairement de quatre composantes :

- « un but, des sous-buts et anticipations » ;
- « des règles d'action, de prise d'information et de contrôle » ;

- « des invariants opératoires, les concepts-en-acte et les théorèmes-en-acte ». Le mot « invariants » est utilisé car les relations et propriétés sont les mêmes pour un concept donné et le mot « opératoires » car les connaissances utilisées par le sujet sont opérationnelles dans l'action ;
- « des possibilités d'inférence en situation ».

Les concepts-en-acte et théorèmes-en-acte sont donc les éléments cognitifs (souvent implicites) qui permettent à l'action du sujet d'être opératoire :

- les théorèmes-en-acte sont des énoncés ou des propositions tenus pour vrais par le sujet dans l'action (mais qui peuvent en fait être vrais, partiellement vrais ou faux) ;
- les concepts-en-acte sont les objets et prédicats tenus pour pertinents par le sujet dans l'action (mais qui peuvent en fait ne pas être pertinents).

L'action dans laquelle les concepts-en-acte et les théorèmes-en-acte s'expriment peut aussi être une action « en pensée ». En effet, selon Vergnaud (2002), le schème organise le déroulement temporel de l'activité, quel que soit le type d'activité : « s'il est vrai que les gestes sont la meilleure preuve de l'existence de formes organisées de l'activité, les suites d'opérations, les enchaînements discursifs et les raisonnements sont aussi de bons exemples, lorsqu'on parvient à les analyser... ». Ces derniers sont alors à inférer à partir des observations faites.

Barth (1987) définit le concept comme « une idée abstraite et générale qui permet de caractériser des données sensibles et construites », comme par exemple le concept du champ magnétique. Vergnaud (1990) rend opératoire cette définition classique d'un concept en le décrivant comme un triplet de trois ensembles :

- l'ensemble des situations de référence (S) qui donnent du sens au concept ;
- l'ensemble des invariants opératoires de différents niveaux (I) qui sont constitutifs du concept (propriétés, relations, etc.) ;
- l'ensemble des signifiants ou systèmes symboliques (s) qui permettent de symboliser le concept, ses propriétés, et les situations qu'il permet de traiter.

Selon lui, le triplet (S, I, s) fait référence au processus de conceptualisation tout entier et nous aide à appréhender la manière dont les étudiants comprennent et utilisent les concepts (dans notre cas, en électromagnétisme). Cette approche appelle une méthodologie spécifique que nous allons maintenant décrire.

MÉTHODOLOGIE

Afin de comprendre la manière dont ils raisonnent lorsqu'ils sont confrontés à l'usage du concept de champ magnétique, nous avons observé et questionné des étudiants dans des situations qui mettent en jeu ce

concept et qui ont pour objet de décrire, prévoir et interpréter des phénomènes électromagnétiques. Nous avons ensuite analysé les données recueillies.

Les situations constituant le champ conceptuel

Nous avons proposé aux étudiants huit situations à analyser et à interpréter : quatre situations prototypiques étudiées en cours d'électromagnétisme, auxquelles ont succédé dans un ordre aléatoire quatre situations ouvertes, mais analogues à chacune des précédentes quant aux raisonnements à mettre en œuvre. Les situations classiques sont celles explicitées dans l'enseignement universitaire et présentes dans les ouvrages de physique de ce niveau. Les situations ouvertes sont des situations de la vie courante qui mettent en jeu les propriétés essentielles du champ magnétique. Les résultats que nous présentons ici sont liés à trois situations classiques et ouvertes : l'induction magnétique¹, l'action d'un champ magnétique sur un courant électrique et la propagation du champ magnétique. Les contenus détaillés de ces situations seront précisés plus loin.

Recueil des données

La verbalisation constituant d'après Vergnaud (1998) un moyen de « rendre compte de l'activité cognitive d'un sujet humain dans une tâche ou situation donnée », les étudiants étaient invités à verbaliser leurs pensées de façon orale et écrite. Cela constituait pour nous le moyen d'identifier, dans les raisonnements des étudiants, les buts qu'ils se fixent, de connaître les invariants opératoires qu'ils mobilisent et de repérer les inférences qu'ils effectuent afin d'atteindre les buts fixés. C'était également un moyen d'identifier l'éventuelle organisation invariante des conduites, autrement dit les schèmes mis en œuvre. Nous avons qualifié ces explications apportées par les étudiants de « spontanées ».

Avec les mêmes objectifs, nous avons ensuite cherché à obtenir des étudiants des explications complémentaires que nous avons désignées par « explications sollicitées », et la stabilité de leurs réponses a été testée par le biais des relances (Weil-Barais, 1991).

Ces entretiens ont été réalisés après l'enseignement de l'électromagnétisme dans le vide et avant celui dans la matière. Les étudiants étaient informés qu'ils allaient être interrogés sur leurs connaissances en électromagnétisme. Les entretiens ont eu lieu dans un laboratoire de l'université, ont duré chacun environ 80 minutes et ont été enregistrés et retranscrits en intégralité, en vue d'une analyse.

(1) L'induction magnétique est à la fois un concept et une propriété d'un concept (celle du champ magnétique).

Groupe d'étude

Ces entretiens de type semi-directif ont été réalisés avec 17 étudiants en licence de sciences physiques et de physique fondamentale, ou en préparation au CAPES, tous issus du même DEUG sciences de la matière et sélectionnés sur la base du volontariat. La taille de l'échantillon des étudiants interrogés nous conduit à considérer qu'il s'agit d'une étude de cas (Van der Maren, 1996).

Traitement des données

Afin de comprendre la manière dont les étudiants raisonnent face à une situation mettant en jeu les propriétés du champ magnétique, nous avons cherché à identifier les invariants opératoires utilisés implicitement ou explicitement et, grâce à l'articulation de ces invariants, nous avons inféré les raisonnements mis en œuvre. Nos propositions sur ce sujet ont donc un caractère hypothétique. Toutefois, les questions étant circonscrites, les invariants opératoires susceptibles d'être utilisés sont en nombre réduit. Cela facilite leur identification et conforte la probabilité que celle-ci soit pertinente. Par ailleurs, même si nous n'en présentons qu'une, il existe souvent plusieurs possibilités d'articulation de ces invariants, liées à une organisation chronologique différente du raisonnement. Ainsi le caractère hypothétique de la solution que nous proposons ne remet pas en question les conclusions qui seront tirées. Les raisonnements que nous avons reconstruits à partir des propos d'un étudiant constituent donc des « raisonnements inférés ».

Vocabulaire utilisé

Avant de présenter certains des résultats obtenus lors des entretiens avec les étudiants, nous souhaitons apporter quelques précisions sur le sens que nous donnons à certains termes que nous utilisons. Nous verrons, en prenant connaissance des résultats, que les conduites des étudiants sont caractérisées par la nature des invariants opératoires mobilisés, par leur possible contextualisation et par la nature du contrôle éventuellement effectué sur leurs raisonnements afin de vérifier leur cohérence. Les précisions de vocabulaire apportées ici concernent donc ces trois points, en sachant que les typologies correspondantes ont été établies de manière inductive et *a posteriori* par les chercheurs.

Les invariants concernés sont constitués par des relations mettant en jeu des éléments du réel et des éléments conceptuels. Par élément du réel, nous entendons tout ce qui concerne les faits, phénomènes (observés) et grandeurs mesurées dans une situation physique ; par élément conceptuel, tout ce qui concerne une construction humaine du scientifique ou de l'étudiant, à l'intérieur de la structure d'un modèle (Robardet & Guillaud, 1994, p. 82). Ces invariants, qui peuvent avoir une pertinence scientifique ou non, peuvent être :

- des invariants opératoires descriptifs mettant en relation deux éléments du réel que nous appelons « R-R » : il s'agit là des invariants opératoires phénoménologiques dépourvus de toute interprétation physique ;
- des invariants opératoires interprétatifs mettant en relation un élément du réel et un élément conceptuel vu dans l'enseignement secondaire, désignés par « R-C » ;
- des invariants opératoires interprétatifs mettant en relation deux éléments conceptuels vus dans l'enseignement secondaire, nommés « C-C » ;
- des invariants opératoires interprétatifs mettant en relation deux éléments conceptuels étudiés à l'université, désignés par « C-C-U ». Ces derniers sont donc des invariants correspondant à un niveau d'interprétation plus élaboré du phénomène.

Tous ces invariants peuvent être exprimés sous une forme :

- générique, c'est-à-dire formulés dans un contexte général en physique (par exemple, « un courant électrique crée un champ magnétique ») ;
- contextualisée, c'est-à-dire centrés sur la situation proposée (pour ces invariants, les caractéristiques des grandeurs physiques utilisées dans le raisonnement sont spécifiées).

Quant au contrôle fait par les étudiants sur leur raisonnement, il concerne la mise en relation critique de leurs propos avec les buts fixés au départ et / ou avec les savoirs scientifiques, ainsi que la vérification de la cohérence du raisonnement effectué. Le contrôle est présent et productif lorsqu'il aboutit à une solution correcte et pertinente, mais le raisonnement peut apparaître dénué de tout contrôle apparent.

RÉSULTATS

Nous explicitons, dans le cadre restreint de ce texte, les deux modes les plus fréquents d'organisation des conduites mises en œuvre dans les raisonnements (70 % des 272 observations effectuées⁽²⁾) et un des modes d'organisation les plus rares (3 % des observations effectuées). Afin de les présenter, en illustrant ainsi la manière dont nous avons travaillé, nous proposons quelques extraits significatifs des réponses de trois étudiants chez qui on les rencontre. On retrouve en effet chez eux, dans la très grande majorité des situations physiques à interpréter, une organisation similaire des conduites lorsqu'ils sont dans le même mode d'explication (spontané ou sollicité). On peut donc assimiler cette organisation à un schème, que l'on retrouve aussi chez d'autres étudiants.

(2) Les 272 observations correspondent à 17 étudiants observés dans 8 situations différentes, à la fois en situation d'explication « spontanée » et en situation d'explication « sollicitée ».

Organisation des conduites les plus courantes

Nous évoquons ici les réponses de Florent (étudiant en licence de physique fondamentale) et Arnaud (étudiant en licence de sciences physiques), dont les conduites face à des situations prototypiques sont organisées selon les deux modes les plus courants. Prenons par exemple, dans le cas de Florent, la situation prototypique « aimant-spire » relative au phénomène d'induction et, dans le cas d'Arnaud, la situation prototypique « rails de Laplace » relative à l'action d'un champ sur un courant.

Premier type de conduite courante

La situation « aimant-spire » est liée au phénomène d'induction, et concerne la variation du flux du champ magnétique à travers un circuit simple (une spire). Nous avons demandé aux étudiants d'interpréter le phénomène en leur montrant la figure ci-dessous : « on approche un aimant droit d'une spire, se passe-t-il quelque chose ? Si oui, interpréter le phénomène ».

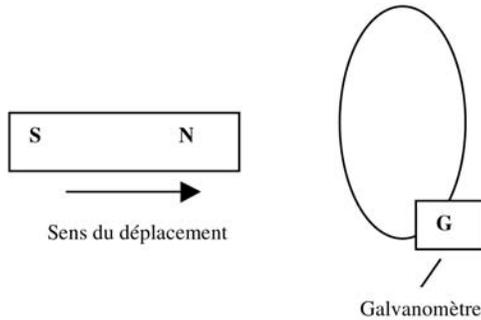


Figure 1 • Situation prototypique liée au phénomène d'induction et proposée à l'interprétation des étudiants

Un des enjeux de l'enseignement³ à propos de cette situation étant l'apparition d'un courant électrique à partir d'une variation du flux magnétique, la réponse que l'on peut attendre des étudiants est voisine de la forme suivante : « quand on déplace l'aimant, le flux de son champ magnétique à travers la spire varie et crée un champ électrique auquel on peut associer une force électromotrice induite $\varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt}$ mettant les électrons de la spire conductrice en mouvement. Le sens du courant électrique est tel qu'il obéit à la loi de Lenz ».

(3) Les enjeux de l'enseignement de l'électromagnétisme dans les deux premières années d'université ont été identifiés à partir de l'analyse des ouvrages courants d'enseignement universitaire et validés par le co-auteur d'un des ouvrages les plus connus, professeur des universités.

Lorsqu'il est en situation de donner une explication spontanée, Florent commence par évoquer l'existence d'un champ magnétique qu'il associe probablement à l'aimant, s'arrête alors et évoque pour finir la source du champ magnétique : « tout déplacement d'électrons crée un champ magnétique ».

A partir des explications fournies par Florent de manière spontanée, nous inférons le raisonnement suivant, cette inférence conservant, comme toutes celles qui suivent, un caractère hypothétique (cf. plus haut la partie « traitement des données ») :

- un aimant crée un champ magnétique (invariant opératoire de type « R-C ») ;
- un déplacement d'électrons crée un champ magnétique (invariant opératoire de type « C-C »).

Si le premier invariant est justifié par la présence visible d'un aimant en mouvement, l'existence éventuelle d'un déplacement d'électrons n'est avérée ni dans la situation, ni dans son analyse, si bien que le second invariant, qui sur le plan formel est pertinent, apparaît ici sans lien logique avec le précédent. De fait, il n'existe donc pas de contrôle apparent et productif sur le raisonnement. Il n'existe pas non plus d'articulation entre les invariants opératoires utilisés qui sont simplement formulés en juxtaposition. De plus, les invariants ne sont pas contextualisés sur la situation proposée : le champ magnétique n'est par exemple pas spécifié en un ou plusieurs points de la figure.

En résumant l'analyse précédente, nous pouvons dire que Florent formule des invariants opératoires « R-C » et « C-C » de manière générique et ne procède à aucun contrôle apparent et productif du raisonnement.

Deuxième type de conduite courante

Exemple 1

A la suite des propos précédents concernant la situation « aimant-spire », nous sollicitons des explications complémentaires auprès de Florent. Après quelques moments de réflexion, il fournit la réponse suivante : « il y a un courant, le déplacement [variation] du champ magnétique crée un champ électrique qui met les électrons en mouvement dans la spire ».

A partir des explications fournies par Florent, nous inférons le raisonnement suivant :

- un aimant crée un champ magnétique (invariant opératoire de type « R-C ») ;
- quand on déplace l'aimant, on déplace (fait varier) le champ magnétique en tout point (invariant opératoire de type « R-C ») ;
- le déplacement (la variation) du champ magnétique crée un champ électrique (invariant opératoire de type « C-C ») ;
- il existe des charges mobiles dans la spire conductrice (invariant opératoire de type « R-C ») ;

- le champ électrique agit sur des charges électriques pour les déplacer (invariant opératoire de type « C-C »).

Nous l'interrogeons ensuite sur l'intensité du courant électrique liée à la mise en mouvement des électrons. Selon lui, « elle dépend de la vitesse d'approche de l'aimant... car plus le champ magnétique varie rapidement, plus le champ électrique est grand et plus le courant est important ». A notre demande, il traduit mathématiquement ce phénomène par la relation suivante : $\text{rot } \vec{B} = \frac{\vec{E}}{\epsilon_0}$, sans pouvoir apporter de commentaire, ni préciser ce que signifie « rotationnel ».

A partir des explications fournies par Florent, nous inférons le raisonnement suivant :

- si on déplace un aimant, on fait déplacer (varier) le champ magnétique en tout point (invariant opératoire de type « R-C ») ;
- le déplacement (variation) du champ magnétique crée un champ électrique (invariant opératoire de type « C-C ») ;
- le champ électrique crée un courant électrique (invariant opératoire de type « C-C ») ;
- plus on approche rapidement un aimant d'une spire, plus l'intensité du courant est grande (invariant opératoire de type « R-C »).

Contrairement à la conduite précédente, nous constatons que les invariants opératoires mobilisés sont articulés les uns aux autres et donc combinés. Nous considérons que cette combinaison est formelle car les réponses de Florent à d'autres questions ont montré que cet étudiant n'attribue pas de signifiés physiques aux signifiants utilisés (par exemple, il ne peut répondre aux questions « comment le champ électrique met-il les électrons en mouvement ? » ou « que signifie rotationnel ? »). Les invariants sont toujours mobilisés de manière générique : par exemple le sens du courant induit et les caractéristiques du champ électrique ne sont pas précisées. Par ailleurs, aucun contrôle ne semble effectué sur le raisonnement et sur sa traduction mathématique. Si, dans le premier cas, on peut supposer qu'il n'aurait rien apporté, il aurait permis dans le second de revenir sur la relation proposée qui ne présente aucune dépendance avec le temps, contrairement à ce que laisse entendre l'explication fournie par Florent dans laquelle la vitesse de déplacement de l'aimant intervient.

Exemple 2

Nous rapportons ici une partie des explications « sollicitées » fournies par Arnaud lorsqu'il devait interpréter la situation prototypique « rails de Laplace ». Cette situation concerne la force de Laplace liée à l'action d'un champ magnétique sur un élément de circuit, dans lequel circule un courant.

Les étudiants devaient répondre, en s'aidant de la figure 2, à la question suivante : « un circuit composé d'une barre conductrice mobile sur deux rails conducteurs fixes, d'un générateur et d'un interrupteur est plongé dans un champ magnétique constant (stationnaire et uniforme) et perpendiculaire au plan des rails. Quand on ferme l'interrupteur, la barre se déplace. Interprétez le phénomène. »

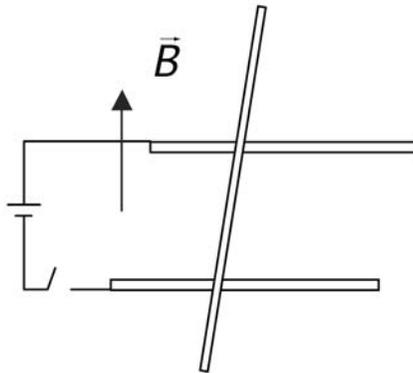


Figure 2 • Rails de Laplace

Un des enjeux de l'enseignement étant de mettre en évidence la force résultant de l'action d'un champ magnétique sur un conducteur, nous attendions des étudiants une réponse du type : « lorsqu'un courant circule dans un fil conducteur plongé dans un champ magnétique, celui-ci subit l'action d'une force, appelée force de Laplace telle que $\vec{F} = \int Id\vec{l} \wedge \vec{B}_a$. Sa direction est perpendiculaire à la direction du champ magnétique et à celle du courant électrique qui circule dans la barre ; son sens est tel que le trièdre $(\vec{i}, \vec{B}, \vec{F})$ soit direct. Le rail étant mobile, en fonction de la nature des frottements, il est susceptible de se déplacer vers la gauche sur le schéma ».

Selon Arnaud, qui avait été sollicité à nouveau pour expliquer pourquoi la barre se déplace, « une force est créée qui agit sur la barre, c'est les forces de Lorentz qui sont dues au champ magnétique ».

À partir des explications fournies par Arnaud, nous inférons le raisonnement suivant :

- une mise en mouvement est causée par une force (invariant opératoire de type « R-C ») ;
- un champ magnétique crée des forces de Lorentz (invariant opératoire de type « C-C ») ;
- les forces de Lorentz causent le mouvement de la barre (invariant opératoire de type « R-C »).

À la question « la barre bouge-t-elle en l'absence du champ magnétique ? », il répond en écrivant la relation mathématique $\vec{F} = q \vec{E} \dots$ sans apporter d'autre commentaire.

Les invariants opératoires mobilisés par Arnaud apparaissent articulés les uns aux autres et donc combinés. Nous considérons que cette combinaison est formelle car dans cette question comme dans d'autres, il associe la présence d'un champ magnétique à l'existence d'une force « magnétique », qu'il nomme systématiquement « force de Lorentz » : cette dernière paraît de ce fait plus apparentée à un signifiant qu'à un signifié. Les invariants sont formulés de manière générique : les caractéristiques de la force ne sont pas spécifiées, ni reliées à celles du champ. Enfin, il n'assure pas de contrôle sur ses propos : d'une part, il ne s'interroge pas sur la réalité physique de la force de Lorentz et sur son adéquation à la situation proposée, d'autre part, il propose l'existence d'un champ électrique pour expliquer le mouvement, alors que rien dans l'énoncé ne laisse supposer sa présence.

Conclusion

A partir des analyses précédentes, nous pouvons dire que Florent et Arnaud combinent de manière formelle des invariants opératoires « R-C » et « C-C » en les formulant sous forme générique et ne procèdent à aucun contrôle apparent et productif du raisonnement.

Organisation rare des conduites

Exemple 1

Nous rapportons ici une partie des explications « sollicitées » fournies par Frédéric (étudiant en licence de physique fondamentale) lorsqu'il a dû expliquer le fonctionnement du téléphone portable en répondant à la question non prototypique : « on émet un signal ici avec un téléphone portable, comment peut-on le recevoir dans une autre ville ou à l'autre bout de la ville ? ».

Un des enjeux de l'enseignement étant la propagation de proche en proche des ondes électromagnétiques, et de manière incidente l'induction, la réponse attendue des étudiants comportait tout ou partie des éléments suivants : « les communications par téléphone mobile cellulaire sont transmises grâce aux ondes électromagnétiques qui se propagent entre les mobiles et les stations-relais. L'onde électromagnétique est composée d'un champ magnétique et d'un champ électrique variables, dont les variations réciproques sont liées et assurent ainsi la propagation de proche en proche de l'onde électromagnétique. Après avoir été relayée, l'onde électromagnétique émise par le téléphone appelant parvient à l'antenne du téléphone portable

destinataire et selon la forme de l'antenne (circulaire ou rectiligne), la variation des champs électrique ou magnétique met en mouvement ses électrons libres. Il y a donc apparition d'un courant électrique qui est ensuite converti en son ».

Interrogé sur la transmission de l'onde électromagnétique, Frédéric énonce : « elle se propage, l'air c'est un milieu conducteur [silence] mais qu'est-ce je dis, on n'a pas besoin de support pour cette propagation, oui c'est une propagation de proche en proche... il y a le champ magnétique qui varie qui crée le champ électrique et ainsi de suite... c'est le phénomène d'induction, je dirais que les champs stationnaires ne provoquent pas de mouvement / non je dis une bêtise, euh / ça ne veut rien dire... ben c'est bien l'induction, il y a \vec{B} qui varie qui crée \vec{E} et ainsi de suite... ». A notre demande de représentation de l'onde électromagnétique, il propose le schéma suivant (voir figure 3) et énonce « le vecteur \vec{k} est la direction de la propagation, les deux champs vont varier dans ce plan... ».

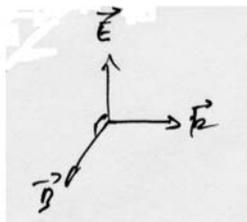


Figure 3 • Représentation de l'onde électromagnétique selon Frédéric

A partir des explications fournies par Frédéric de manière sollicitée, nous inférons le raisonnement suivant :

- l'onde se propage d'un téléphone à l'autre (invariant opératoire de type « R-C ») ;
- un milieu conducteur permet la propagation d'une onde électromagnétique (invariant opératoire de type « C-C-U ») ;
- l'air permet à l'onde de se propager (invariant opératoire de type « R-C »).

Puis le raisonnement continue :

- la propagation des ondes électromagnétiques ne nécessite pas de support matériel de propagation (invariant opératoire de type « C-C-U ») ;
- le champ magnétique variable crée un champ électrique (invariant opératoire de type « C-C-U ») ;
- le champ électrique variable crée un champ magnétique (invariant opératoire de type « C-C-U ») ;
- l'onde électromagnétique se propage sans support matériel et de proche en proche (invariant opératoire de type « C-C-U »).

Et enfin, le raisonnement se termine :

- le plan dans lequel varient le champ magnétique et le champ électrique est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde (invariant opératoire de type « C-C-U ») ;
- dans ce plan, le champ électrique et le champ magnétique restent perpendiculaires l'un à l'autre (invariant opératoire de type « C-C-U »).

Nous constatons sur cet exemple que les invariants opératoires mobilisés sont articulés les uns aux autres et donc combinés. Ces combinaisons se font à chaque fois avec un contrôle productif sur la signification et la cohérence des propos tenus, ce qui amène Frédéric à réorienter son raisonnement ou à le confirmer. Certains invariants sont partiellement contextualisés (par exemple la direction des champs électrique et magnétique est précisée, la nature de leur variation ne l'est pas).

Exemple 2

Nous rapportons ici une partie des explications « spontanées » fournies par Frédéric lorsqu'il a dû interpréter la situation prototypique mettant en jeu la force de Laplace.

Il identifie tout d'abord le phénomène et énonce : « on a un courant qui circule, des électrons en mouvement dans un champ magnétique et ils vont être soumis à la force de Lorentz. Je dis une bêtise peut-être / euh non là c'est la force de Laplace oui. La force de Laplace, c'est $\vec{F} = Id\vec{l} \wedge \vec{B}$, oui je pense que c'est ça ! Ben en fait la force de Laplace va agir sur tout le circuit mais comme la partie gauche est fixe, c'est juste la barre qui est mobile qui se déplace vers la gauche ou droite selon le sens du courant ».

A partir des explications fournies par Frédéric, nous inférons le raisonnement suivant :

- un mouvement (ici celui de la barre, annoncé dans la question) est causé par l'action d'une force (invariant opératoire du type « R-C ») ;
- des charges en mouvement soumises à un champ magnétique subissent la force de Lorentz (invariant opératoire de type « C-C-U ») ;
- lorsqu'un courant circule dans le circuit, des électrons se déplacent (invariant opératoire de type « C-C ») ;
- les électrons en mouvement dans le circuit électrique sont soumis à la force de Lorentz (invariant opératoire de type « C-C-U »).

Puis le raisonnement se poursuit :

- un élément de circuit plongé dans un champ magnétique et parcouru par un courant subit l'action de la force de Laplace (invariant opératoire du type « C-C ») ;
- le rail étant mobile et soumis à une force, il se déplace en fonction du sens du courant (invariant opératoire du type « R-C »).

Tout comme dans l'exemple précédent, les invariants opératoires mobilisés sont articulés les uns aux autres et donc combinés ; Frédéric se soucie du sens physique de ses propos et exerce un contrôle productif du raisonnement qui l'amène ici à abandonner la force de Lorentz. Certains invariants sont partiellement contextualisés (par exemple, le sens du déplacement de la barre n'est que partiellement évoqué).

Conclusion

A partir des deux exemples précédents et de l'analyse que nous en avons faite, nous pouvons dire que Frédéric combine de manière signifiante des invariants opératoires « R-C », « C-C » et « C-C-U » formulés de manière partiellement contextualisée, et procède à un contrôle productif du raisonnement.

Discussion

L'étude réalisée a permis d'isoler l'organisation des deux conduites les plus courantes : formulation (43 % des observations et ce fréquemment pendant la phase « spontanée ») ou combinaison formelle (27 % des observations) d'invariants opératoires « R-C » ou « C-C », énoncés de manière générique et sans contrôle apparent du raisonnement. A l'opposé, la combinaison signifiante d'invariants opératoires « R-C », « C-C » et « C-C-U », énoncés de manière partiellement contextualisée avec contrôle productif du raisonnement, constitue l'organisation d'une des conduites les plus rares (3 % des observations).

Ces résultats ne font pas apparaître de différence entre les étudiants en licence de notre échantillon et ceux en préparation au CAPES de sciences physiques. Ils mettent en évidence différents comportements : utilisation formelle des invariants opératoires ; absence de contextualisation ; faible mobilisation des connaissances universitaires ; juxtaposition sans combinaison d'invariants opératoires dans les raisonnements ; absence de contrôle sur les raisonnements effectués ; difficulté à fournir des explications de manière « spontanée ».

Ainsi, la plupart des étudiants interviewés formule ou combine de manière formelle des invariants opératoires sans s'interroger sur les significés physiques correspondants. Ils semblent mobiliser de cette manière des connaissances que nous appelons « prêtes à utiliser », qui peuvent être adaptées ou non à la situation proposée. De plus, la plupart des invariants opératoires utilisés sont énoncés de manière générique, sans les contextualiser à la situation particulière qui est à analyser.

Les connaissances universitaires apparaissent faiblement mobilisées. Sur l'ensemble de l'étude réalisée, seulement cinq étudiants mobilisent des invariants opératoires interprétatifs de niveau universitaire, et un seul de

manière signifiante. Ainsi par exemple, les concepts de moment magnétique, de flux, de force électromotrice sont absents des propos de la plupart des étudiants. L'utilisation prépondérante de connaissances issues du secondaire n'est pas sans poser de questions sur la nature de l'enseignement universitaire dispensé.

De plus, une partie des étudiants interrogés met en œuvre plusieurs raisonnements impliquant des invariants (théorèmes-en-acte) sans que ceux-ci soient liés et combinés entre eux. Cette constatation a également été faite par exemple par Greca & Moreira (1997) pour ce qui concerne la résolution de problèmes en électromagnétisme. Dans l'étude qu'ils ont réalisée, les étudiants utilisent les outils mathématiques de manière procédurale et travaillent principalement en juxtaposant des énoncés non reliés les uns aux autres, et non interprétés suivant un modèle mental. Venturini & Albe (2002) sont d'ailleurs parvenus à la même conclusion lors d'une étude sur l'électromagnétisme à ce même niveau universitaire.

Par ailleurs, si pour Richard (1990), « une théorie du fonctionnement cognitif doit comporter des mécanismes de remise en cause des interprétations [...] dans certaines conditions, l'interprétation construite est abandonnée et la construction d'une autre interprétation est entreprise », nous constatons que cette « remise en cause des interprétations », ou contrôle, n'apparaît pratiquement pas dans les raisonnements des étudiants interrogés. A l'exception d'un étudiant (Frédéric), le contrôle productif est quasiment inexistant et les contrôles improductifs ou épisodiquement productifs demeurent rares. Nous pouvons peut-être relier cette situation à l'absence de signifié physique déjà évoqué, voire à l'absence des invariants nécessaires, ou encore à la difficulté de fixer des buts à atteindre. En effet, selon Vergnaud (1990), « le fonctionnement cognitif du sujet en situation dépend de l'état de ses connaissances ».

Enfin, on remarque une difficulté à fournir des explications de manière « spontanée », d'autant plus perceptible que, comme dans le cas de Florent présenté plus haut, les propos des étudiants sont généralement beaucoup plus étoffés lors d'explications sollicitées. Ce comportement différent peut être probablement rattaché au décalage entre la forme prédictive de la connaissance et sa forme opératoire utilisée en résolution de problèmes (Vergnaud, 2001), ainsi qu'à la difficulté de fixer des buts au raisonnement.

L'analyse des schèmes de raisonnement mis en œuvre par les étudiants, grâce à la théorie des champs conceptuels de Vergnaud, a permis de dépasser le simple constat des difficultés classiquement pointées par les études menées sur l'utilisation des concepts de l'électromagnétisme. S'il reste encore à étudier plus finement ces raisonnements à l'aide des sciences cognitives, nous pouvons cependant émettre des hypothèses (qui seront à vérifier) sur les éléments liés à de tels comportements intellectuels :

- *le type d'enseignement reçu par les étudiants* : ces derniers sont rarement en situation d'interprétation, de formalisation de concepts et d'analyse critique de leurs propos. L'enseignement de l'électromagnétisme tel qu'il est pratiqué actuellement à l'université exige essentiellement en effet, selon les étudiants, la mise en œuvre des procédures de résolution de problème, aussi bien lors des séances de travaux dirigés qu'au moment des évaluations (Venturini, Albe & Lascours, 2000) ;
- *les rapports aux savoirs de la physique*, dont la plupart comportent une forte composante utilitaire, liée à des perspectives scolaires à court terme (Venturini & Albe, 2002) : les étudiants n'éprouvent pas de réel intérêt pour la physique, les apprentissages effectués sont uniquement destinés à l'obtention a minima du diplôme visé et ne permettent pas une maîtrise conceptuelle avérée ;
- *les obstacles épistémologiques* : l'électromagnétisme comporte un grand nombre de concepts formels relationnels, c'est-à-dire qui n'ont d'existence que par rapport à d'autres concepts, eux-mêmes complexes (vitesse, charge, force, etc.) L'histoire des sciences montre d'ailleurs l'existence de difficultés du même type dans la construction du savoir savant, comme par exemple la difficulté à appréhender la relation entre le champ électrique et le champ magnétique en régime variable, ou à interpréter le phénomène de propagation du champ magnétique ou des ondes électromagnétiques.

Enfin, même si accéder au raisonnement d'un individu reste toujours délicat, il semble que la méthode d'investigation utilisée pour rendre opérationnelle la théorie des champs conceptuels dans le domaine de l'électromagnétisme (qui lui était jusqu'à présent étranger), ait produit un certain nombre de résultats intéressants à approfondir à l'aide d'autres outils. Parmi ces résultats, notons ceux qui paraissent les plus importants, à savoir l'absence de contrôle sur les propos tenus et l'absence de signifiés physiques associés aux invariants, absences qui sont très probablement liées.

CONCLUSION

Les travaux déjà réalisés en électromagnétisme ont tous fait état des difficultés qu'ont les étudiants à apprendre ce domaine de la physique, quel que soit leur niveau. Pour essayer de comprendre ces difficultés, nous avons étudié les raisonnements mis en œuvre par des étudiants post-DEUG lorsqu'ils mobilisent les concepts de base de l'électromagnétisme, en utilisant la théorie des champs conceptuels de Vergnaud. En analysant leurs propos spontanés ou sollicités, formulés pour interpréter un ensemble de situations (prototypiques ou non), nous avons pu identifier les invariants opératoires qu'ils utilisent implicitement ou explicitement, et inférer les modes d'organisation de leur conduite. Dans le cas le plus fréquent, les étudiants formulent, en les juxtaposant ou en les combinant, des invariants opératoires reliant un

élément du réel à un élément conceptuel, ou reliant entre eux deux éléments conceptuels abordés dans l'enseignement secondaire. Ceux-ci sont énoncés sans contrôle de la part des étudiants, de manière formelle et générique. Dans un des cas les plus rares, les invariants sont énoncés de manière significative et partiellement contextualisée, combinés entre eux, et ils concernent aussi la mise en relation de concepts abordés à l'université. Les propos tenus sont contrôlés régulièrement pour s'assurer de leur cohérence et de leur pertinence vis-à-vis des savoirs scientifiques, des autres éléments du raisonnement et des buts fixés. L'absence de contrôle sur les raisonnements, l'absence d'attribution de signifié physique aux invariants utilisés et leur formulation de manière générique constituent donc des éléments caractéristiques d'une majorité de conduites des étudiants, lorsqu'ils interprètent une situation mettant en jeu les propriétés du champ magnétique.

Cette étude a ouvert une voie visant à mieux comprendre leurs difficultés. Elle gagnerait à être prolongée :

- en poursuivant l'analyse de l'activité cognitive des étudiants dans le domaine de l'électromagnétisme, par l'intermédiaire d'autres travaux de la psychologie cognitive ou plus largement des sciences cognitives, notamment ceux sur la mémoire (Jacob, 1998) et sur la structuration des connaissances (Bastien, 1997). Cette analyse pourrait d'ailleurs s'étaler dans le temps, du début des cours magistraux à quelques semaines après la fin du module sur l'électromagnétisme, pour repérer d'éventuelles évolutions dans les invariants utilisés et l'organisation des conduites dans les raisonnements ;
- en cherchant à mettre au point des ingénieries didactiques susceptibles de faire évoluer l'organisation des conduites dans les raisonnements, et à les évaluer. Elles devraient comporter des activités de contextualisation et d'explicitation systématique des concepts. En effet, notre classification des concepts a montré que les invariants universitaires ne sont pas utilisés ni compris. Dans ces activités, les étudiants auraient en plus à critiquer leur raisonnement et à en fixer régulièrement les buts. Ces activités pourraient être associées à un travail métacognitif (Dokic, 1997 ; Jacob, 1998, 2002 ; Pacherie, 2000).

Quelle que soit la piste que nous poursuivrons pour la suite de ce travail, nous adhérons, comme d'autres, à cette idée de Vergnaud (1990) selon laquelle une collaboration des didacticiens et des chercheurs en psychologie cognitive (ou plus généralement dans le domaine des sciences cognitives) serait fructueuse.

BIBLIOGRAPHIE

- BAGHERI-CROSSON R. (2004). *Mobilisation du concept de champ magnétique par des étudiants issus du DEUG sciences de la matière : analyse didactique à partir de la théorie des champs conceptuels*, thèse, université Paul-Sabatier, Toulouse.
- BARTH B. (1987). *L'apprentissage de l'abstraction*. Paris : Retz.
- BASTIEN C. (1997). *Les connaissances de l'enfant à l'adulte*. Paris : Armand Colin.
- DOKIC J. (1997). Compétence sémantique et psychologie du raisonnement. *Revue philosophique*, n° 2, p. 171-182.
- GRECA M. & MOREIRA M. (1997). The kinds of mental representation - models propositions and images - used by college physics students regarding the concept of field. *International Journal of Science Education*, vol. 19, n° 6, p. 711-724.
- JACOB P. (1998). Memory, learning and metacognition. In *Proceedings Conference on memory*, n° 321 (2-3), p. 253-259.
- JACOB P. (2002). "Seeing, perceiving and knowing". In *Analytic Philosophy on Knowledge and Cognition*, Paris Summer School / Carleton University, Ottawa.
- MAAROUF A. & BENYAMNA S. (1997). La construction des sciences physiques par les représentations et les erreurs : cas des phénomènes magnétiques. *Didaskalia*, n° 11, p. 101-118.
- PACHERIE E. (2000). Conscious experience and concept forming abilities. *Acta Analytica*, n° 26.
- RICHARD J.-F. (1990). *Les activités mentales : comprendre, raisonner, trouver des solutions*. Paris : Armand Colin.
- ROBARDET G. & GUILLAUD J.-C. (1994). *Éléments d'épistémologie et de didactique des sciences physiques*. Grenoble : IUFM.
- TARISCO BORGES A. & GIBERT J. (1998). Models of Magnetism. *International Journal of Science Education*, vol. 20, n° 3, p. 361-378.
- VAN DER MAREN J.-M. (1996). *Méthode de recherche pour l'éducation*. Montréal : De Boeck.
- VAN WEREEN J., DE MUL F., PETERS M. et al. (1982). Teaching problem-solving in physics: a course in electromagnetism. *American association of Physics Teachers*, vol. 50, n° 8, p. 725-732.
- VENTURINI P., ALBE V. & LASCOURS J. (2000). « Rapport des étudiants au champ et au flux magnétiques ». In A. Chabchoub. *Rapports au savoir et apprentissage des sciences : actes du V^e colloque international de didactique et d'épistémologie des sciences*, Sfax, Tunis : ATRD, p. 175-186.
- VENTURINI P. & ALBE V. (2002). Interprétation des similitudes et différences dans la maîtrise conceptuelle d'étudiants en électromagnétisme à partir de leur(s) rapport(s) au(x) savoir(s). *Aster*, n° 35, p. 165-186.
- VERGNAUD G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Recherche en didactique des mathématiques*, vol. 10, n° 2-3, p. 133-170.
- VERGNAUD G. (1998). « Qu'est ce que la pensée ? ». In G. Vergnaud. *Actes du colloque : « Qu'est ce que la pensée ? Compétences complexes dans l'éducation et le travail »*, Suresne. Paris : université Paris 8 (cédérom).
- VERGNAUD G. (2001). « Forme opératoire et forme prédicative de la connaissance ». In J. Portugais. *La notion de compétence en enseignement des mathématiques, analyse didactique des effets de son introduction sur les pratiques et sur la formation : actes du colloque GDM*, Montréal.
- VERGNAUD G. (2002). *Communication personnelle*, 31 décembre 2002, Paris.
- VIENNOT L. & RAINSON S. (1992). Students' reasoning about the superposition of electric field. *International Journal Science of Education*, vol. 14, n° 4, p. 475-487.
- WEIL-BARAIS A. (1991). *La recherche en psychologie*. Paris : Dunod.

Cet article a été reçu le 07/11/2005 et accepté le 01/02/2006.