

Bagheri, R., Venturini, P., & Lefevre, R. (2007). Invariants opératoires mobilisés en électromagnétisme et schèmes associés : une étude de cas chez les étudiants du premier cycle universitaire. In M. Merri (Dir.), *Activité humaine et conceptualisation : questions à Gérard Vergnaud* (pp. 813-823). Toulouse : Presses Universitaires du Mirail

Voir aussi : <http://w3.pum.univ-tlse2.fr/~Activite-humaine-et~.html>

Invariants opératoires mobilisés en électromagnétisme et schèmes associés : une étude de cas chez les étudiants du premier cycle universitaire

Roja BAGHERI-CROSSON (ATER), Patrice VENTURINI (MCF), Richard LEFÈVRE (PR.)
Laboratoire d'Etude des Méthodes Modernes d'Enseignement- LEMME- Université Paul Sabatier- Toulouse III-Bât
3R1b2,118, Route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex 4

rbagheri@cict.fr

patrice.venturini@cict.fr

lefevre@iufm-pacifique.nc

Tél: 0561556810

Fax: 0561558319

Résumé :

Nous proposons de présenter une partie d'un travail de thèse qui porte sur la manière dont est mobilisé le concept de champ magnétique et les concepts associés (de l'électromagnétisme) par des étudiants du DEUG Sciences de la Matière. En analysant leur utilisation dans diverses situations et en nous référant à la théorie des champs conceptuels (Vergnaud, 1990), nous avons identifié les invariants opératoires utilisés et les schèmes mis en œuvre.

Mots-clés : *Electromagnétisme, champ magnétique, invariant opératoire, schème, théorie des champs conceptuels.*

1 Introduction

Lors d'un travail antérieur (Bagheri, Venturini et Lefèvre, 2002) nous avons montré l'aspect quasi-formel des connaissances des étudiants sur la nature et les propriétés du champ magnétique. Cette première étude prospective a révélé de réelles difficultés en ce qui concerne la compréhension du concept de champ magnétique et l'explicitation des phénomènes :

- si les étudiants utilisent correctement leurs connaissances dans une situation particulière, celles-ci ne sont plus opératoires dans une situation voisine, différente dans la forme mais comparable sur le fond ;
- certains étudiants pensent que le champ n'existe que si ses effets peuvent être matérialisés et la plupart d'entre eux n'appréhende pas le sens physique des équations de Maxwell, fondamentales parce qu'elles résument l'essentiel des phénomènes électromagnétiques ;
- la majorité d'entre eux n'est pas en mesure de décrire complètement le champ magnétique créé par une bobine ou un aimant ; les propriétés même d'un champ vectoriel (en général) apparaissant d'ailleurs mal connues.

Après ce constat, nous avons poursuivi le travail en cherchant à étudier plus finement la manière dont ce concept est mobilisé par les étudiants et nous avons cherché à en rendre compte à l'aide de la théorie des champs conceptuels élaborée par Vergnaud (1990).

Avant d'évoquer la méthodologie utilisée puis les résultats obtenus ainsi que leur interprétation, nous rappellerons d'abord pour situer notre travail, quelques éléments issus des études didactiques relatives à l'électromagnétisme.

2 Etudes didactiques en électromagnétisme

Les travaux qui, en didactique de la physique ont porté sur l'électromagnétisme sont rares. Les résultats de recherche qui nous intéressent tout particulièrement sont les suivants :

- Venturini et Albe (2003) ont montré que les étudiants ont des difficultés à donner un sens physique aux concepts fondamentaux de l'électromagnétisme et à établir des liens entre eux.
- Tarisco Borges et Gilbert (1998) ont mené une étude sur les modèles mentaux concernant le magnétisme et ont identifié des obstacles dans l'utilisation du concept de champ magnétique et les concepts associés. Certains de ces obstacles sont de nature épistémologique (substantialisme) ou sont dus à l'utilisation de l'analogie. Ces chercheurs ont aussi montré que les étudiants utilisent leurs connaissances en électricité pour raisonner en magnétisme.

Ces études montrent d'une part que les difficultés sont nombreuses dans le domaine de l'électromagnétisme. D'autre part, aucune autre étude n'a, à notre connaissance, porté sur les conduites mises en œuvre par les étudiants lorsqu'ils utilisent le concept de champ magnétique, ni sur la relation qu'entretient ce dernier avec le champ électrique, d'où l'intérêt de notre travail.

3 Méthodologie

Le but de notre recherche est de comprendre comment le concept de champ magnétique est utilisé par les étudiants. Cela nous mène à appréhender et analyser leurs conduites mentales, dans différentes situations qui mettent en jeu ce concept. Ainsi, nous cherchons à identifier les buts ou les sous-buts que les étudiants se fixent, à connaître les invariants opératoires et règles d'action qu'ils utilisent et à repérer les inférences qu'ils effectuent afin d'atteindre les buts fixés. Nous cherchons ainsi à identifier leurs schèmes, autrement dit l'éventuelle organisation invariante qui sous-tend leur conduite. Pour ce faire, au cours d'un entretien, nous avons proposé aux étudiants des situations¹ qui ont pour objet de décrire, prévoir et interpréter des phénomènes électromagnétiques, mettant en jeu les différentes propriétés du champ magnétique. Nous leur avons proposé une première série de quatre situations prototypiques auxquelles ont succédé dans un ordre aléatoire, quatre situations ouvertes mais analogues quant aux invariants opératoires à mobiliser pour les résoudre. Nous avons fait le choix de ne pas proposer les situations ouvertes dans le même ordre que les situations classiques correspondantes pour que leur association ne soit pas immédiate.

Tous les entretiens ont été enregistrés en intégralité : les étudiants étaient invités à verbaliser leurs pensées de façon orale et écrite (papier-crayon). Nous leur avons demandé des explications complémentaires lorsque l'explicitation des éléments utilisés n'était pas visible au premier abord. Nous avons également testé la stabilité des réponses par le biais des relances (Weil-Barais, 1991). Chaque entretien a duré environ 80 min.

Ces entretiens du type semi-directif, ont été d'abord réalisés avec 10 étudiants volontaires dont 6 en Licence de Sciences Physiques, 2 en Licence de Physique mention « physique et applications »² et 2 en Licence de Physique³, tous issus d'un DEUG SMA. Nous avons poursuivi notre recherche en interrogeant 11 étudiants volontaires en fin de préparation CAPES, issus du même DEUG et de la même Licence (Sciences Physiques essentiellement) que les 10 autres étudiants interrogés : nous pouvons donc considérer qu'il s'agit d'une étude de cas.

4 Résultats

Une partie des résultats a déjà fait l'objet d'une communication (Bagheri, Venturini et Lefèvre 2003). Nous présenterons ici une autre partie de cette étude. Nous avons choisi de relater ici deux cas : Arnaud qui fait partie des étudiants qui ont manifesté plus de difficulté et Cyril semble mieux maîtriser les concepts de l'électromagnétisme parmi les huit premiers étudiants interrogés (cf.

¹ Deux de ces situations sont précisées dans la partie 4.

² Ces 8 étudiants ont obtenu une note entre 9 et 12 à l'épreuve de l'électromagnétisme en DEUG.

³ Ces 2 étudiants ont obtenu 18 à l'épreuve de l'électromagnétisme en DEUG.

méthodologie). Pour chacun des deux cas, nous avons développé, dans le cadre restreint de cette communication, uniquement les résultats concernant deux situations, une situation prototypique relative à l'induction et la situation correspondante plus ouverte. En effet, le phénomène d'induction occupe une place importante en électromagnétisme car il met en évidence le lien entre deux domaines de la physique, le magnétisme et l'électricité. Les autres situations qui ne sont pas évoquées ici, concernent l'action du champ magnétique sur le courant électrique, la propagation des ondes électromagnétiques, les sources du champ magnétique (et du champ électrique) et l'action du champ magnétique sur la matière⁴.

4.1 Situation 1 : « Aimant-spire » (l'induction)

Cette situation⁵ est relative à l'action du champ magnétique sur les charges électriques. Nous avons demandé aux étudiants d'interpréter le phénomène suivant en leur montrant la figure 1 : *On approche un aimant droit d'une spire, se passe-t-il quelque chose ? Si oui, interpréter le phénomène.*

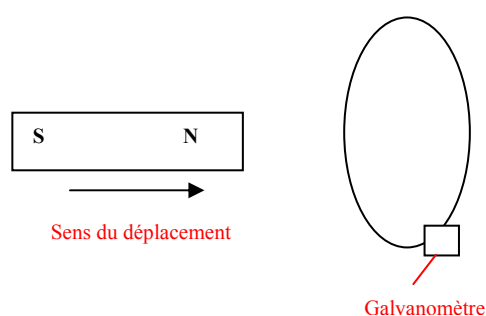


Figure 1 : document proposé aux étudiants

4.1.1 Arnaud

Nous présentons ci-dessous les explications spontanées⁶ des deux étudiants et les explications sollicitées⁷, ainsi que les raisonnements inférés⁸ et nos commentaires.

Explications « spontanées » et raisonnement « inféré » :

- Prise d'information sur le réel : Arnaud reconnaît l'aimant et la spire sur le dessin.
- Identification du phénomène : il associe des éléments du réel au phénomène d'induction.

⁴ Cela nous était impossible de présenter les résultats concernant toutes les situations dans cet article.

⁵ Nous attendons des étudiants le raisonnement impliquant tout ou partie des éléments suivants : « quand on déplace l'aimant, le flux du champ magnétique de ce dernier à travers la spire varie et crée une force électromotrice induite qui met les électrons de la spire conductrice en mouvement. Cette force électromotrice correspond à l'intégration du champ électrique le long du contour de la spire créé par la variation du flux magnétique à travers la spire (ou bien la f.é.m. est liée à un champ électrique suivant les contours de la spire) ».

⁶ Sans sollicitation supplémentaire de notre part (raisonnements produits à l'aide des apprentissages antérieurs).

⁷ Explications produites à la suite de questions et de relances de notre part.

⁸ Ce sont les raisonnements identifiés par le chercheur à partir des propos tenus par les étudiants. En effet, nous identifions les invariants opératoires utilisés et nous inférons le raisonnement de l'étudiant en l'articulant. Ces propositions ont 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. Cependant, même si nous n'en présentons qu'une, il existe souvent plusieurs possibilités d'articulation liées à une organisation chronologique différente du raisonnement. Ce caractère éventuel ne remet pas en question les conclusions qui seront tirées.

- Description du phénomène : cet étudiant pense qu'une brusque variation du champ magnétique crée un courant électrique dans la spire. Nous estimons que les théorèmes-en-acte suivants sont à l'origine de ce raisonnement : 1) « un aimant crée un champ magnétique » ; 2) « le déplacement de l'aimant entraîne la variation du champ magnétique » ; 3) « la variation du champ magnétique crée un courant électrique ».

Commentaire :

- La réponse de cet étudiant est acceptable. Cependant, les invariants opératoires concernant la création du champ électrique et la force électromotrice (due à la variation du champ magnétique) ne sont pas explicités. Les invariants opératoires mobilisés sont peu élaborés.
- La variation du champ magnétique à l'origine du phénomène n'est pas localisée en un ou plusieurs points. En effet, il s'agit d'un invariant opératoire « non contextualisé » sur cette situation.

Explications « sollicitées » :

Objet de la question	Réponse de l'étudiant	Raisonnement inféré
Création du courant électrique	<i>« On fait déplacer un champ magnétique et une force est créée qui met les électrons de la spire en mouvement ».</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Un aimant crée un champ magnétique (théorème-en-acte). - Si on déplace un aimant, on déplace le champ magnétique en tout point (théorème-en-acte). - S'il y a un courant, alors il y a une mise en mouvement des électrons (théorème-en-acte). - Un mouvement est causé par une force (théorème-en-acte). - La force est due au champ magnétique qui se déplace (inférence).
L'intensité du courant	<i>« L'intensité dépend de la rapidité avec laquelle on déplace l'aimant ».</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Si on déplace un aimant, on déplace son champ magnétique (théorème-en-acte). - Plus on déplace rapidement l'aimant, plus le champ magnétique varie (se déplace) rapidement en tout point (théorème-en-acte). - L'intensité du courant dépend de la rapidité de variation du champ magnétique (théorème-en-acte).
Traduction mathématique du phénomène	Il ne sait pas traduire sous forme mathématique.	

Commentaire :

- Arnaud « matérialise » le champ magnétique en utilisant le terme « *déplacement du champ* ». A un aimant semble associée une zone de l'espace dans laquelle il y aurait un champ. Si on déplace l'aimant, on déplace la « zone » en même temps, comme si on déplaçait l'ombre d'un objet avec cet objet. Le champ n'est donc pas considéré comme une propriété de chaque point de l'espace, résultant des différentes interactions magnétiques en ce point. Arnaud ne possède donc qu'une vision globalisée du champ magnétique.
- L'explicitation de la réponse fournie de manière spontanée par Arnaud se limite à introduire l'existence d'une force afin d'expliquer le mouvement des électrons. Son raisonnement concernant ce phénomène correspond au schéma suivant :

$$F$$

$$\Delta \vec{B} \Rightarrow i$$

Selon lui, quand le champ magnétique de l'aimant varie en tout point de l'espace, une force se crée et met en mouvement les électrons de la spire. Cependant, cette variation n'est pas localisée dans l'espace et Arnaud ne semble pas connaître la nature exacte des relations entre ces paramètres. Les invariants opératoires concernant le flux du champ magnétique et la création d'un champ électrique restent également absents. Par ailleurs, il ne s'interroge pas davantage sur l'origine et la nature de la « *force* » et la façon dont elle est créée.

- Selon Arnaud, la relation $\Delta \vec{B} \Rightarrow i$ est complétée par : $\Delta \vec{B} = f(\vec{v})$ (vitesse de déplacement de l'aimant). L'intensité du courant électrique créé est associée à la vitesse de déplacement de cette « zone ». Nous retrouvons encore une fois la vision non localisée du champ magnétique.
- Nous constatons qu'Arnaud enchaîne les raisonnements en utilisant des signifiants (\vec{B} , \vec{v} , i , \vec{F}) exprimés en langage naturel, sans y associer un sens physique.

4.1.2 Cyril

Explication « spontanée » et raisonnement « inféré » :

- Prise d'information sur le réel : Cyril reconnaît l'aimant et résume la situation, il s'assure si le galvanomètre dessiné sur la figure est bien un ampèremètre.
- Identification du phénomène : il associe des éléments du réel au phénomène d'induction.
- Description du phénomène : Cyril pense que la variation du champ magnétique à l'intérieur de la spire crée un courant électrique dans cette dernière (théorème-en-acte). Nous supposons que ce raisonnement découle des théorèmes-en-acte suivants : 1) « un aimant crée un champ magnétique (théorème-en-acte) qui a déjà été utilisé lors d'autres situations » ; 2) « le déplacement de l'aimant entraîne la variation du champ magnétique au niveau de la spire ».

Commentaire :

- L'invariant opératoire mobilisé (exprimé sous forme incomplète) n'est pas contextualisé sur cette situation. Par exemple, Cyril ne donne pas de précision sur le sens du courant électrique apparu dans la spire. Il localise la variation du champ magnétique au niveau de la spire sans toutefois préciser si c'est le contour ou la surface qui est concerné(e).

Explications « sollicitées » :

Objet de la question	Réponse de l'étudiant	Raisonnement inféré
<p>Création du courant électrique</p>	<ul style="list-style-type: none"> - La variation du champ magnétique dans la spire crée un champ électrique. Ce dernier mettra les électrons de la spire en mouvement. - « <i>Le champ électrique fait un cercle</i> ». 	<ul style="list-style-type: none"> - La variation du champ magnétique dans une surface fermée crée un champ électrique (théorème-en-acte). - Il existe des charges mobiles dans la spire conductrice (théorème-en-acte). - Le champ électrique agit sur un électron en le déplaçant (théorème-en-acte). - Les charges électriques se déplacent sur un cercle (la spire). - Le champ électrique est donc circulaire (inférence).
<p>L'intensité du courant électrique</p>	<p>L'intensité du courant électrique dépend de la variation du champ magnétique.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Si on déplace un aimant, on fait varier le champ magnétique en tous les points (théorème-en-acte). - Plus le champ varie rapidement, plus l'intensité du courant est grande (théorème-en-acte).
<p>Traduction mathématique du phénomène</p>	$\frac{d\vec{B}}{dt} = k\vec{E}$ <p>« <i>Le champ électrique et le champ magnétique sont liés ...lorsque l'un varie, l'autre est créé de façon constante</i> ».</p>	

Commentaire :

- Cyril ne fournit pas l'équation Maxwell- Faraday de manière correcte. Cependant, il tente de vérifier la cohérence de cette expression mathématique en l'expliquant. Il ne sait traduire correctement la circulation du champ électrique sous forme mathématique. Selon lui, cette circulation correspondrait à $\oint_C \vec{E} d\vec{l}$ ($\neq \text{rot}\vec{E}$).
- Les invariants opératoires concernant la création d'une force électromotrice et le flux du champ magnétique sont absents de l'explicitation. Si la force électromotrice n'est pas forcément nécessaire dans le cadre d'une explication qualitative, le flux est utile, puisque la variation du champ magnétique évoquée ne constitue qu'un cas particulier d'une variation du flux magnétique à travers la spire.
- Cyril semble avoir une vision claire de l'existence du couplage entre le champ magnétique et le champ électrique. Cependant, la formulation de cet invariant opératoire n'est pas contextualisée sur cette situation.

Situation 2 : « Barrière à carte magnétique »

Les étudiants devaient expliquer le fonctionnement d'une barrière à carte magnétique, comme celle utilisée pour contrôler l'accès à un parking automobile, en mobilisant les invariants opératoires relatifs au phénomène d'induction⁹ déjà utilisés pour la situation « aimant-spire ».

4.1.3 Arnaud

Explication « spontanée » :

Arnaud ne fournit aucun raisonnement de manière spontanée. En effet, il n'associe aucun élément du réel à des invariants opératoires et n'identifie aucun but ou sous-buts.

Explications « sollicitées » :

Objet de la question	Réponse de l'étudiant	Raisonnement inféré
La carte magnétique	« C'est des cartes avec des champs...avec une sorte d'aimant ».	La carte possède des propriétés magnétiques donc elle contient un aimant (inférence).
Le fonctionnement de la barrière	<ul style="list-style-type: none">- « Euh, en parallèle avec l'expérience de la spire, le champ magnétique on est obligé de le faire varier ». Cela entraîne la création d'un courant électrique dans la bobine qui se trouve dans le boîtier, quand on approche la carte.- « Le courant créé est différent de carte à carte, c'est une sorte de code qui crée une sorte de champ magnétique qui est émis différemment vers le boîtier ».	<ul style="list-style-type: none">- La variation du champ magnétique crée un courant électrique (théorème-en-acte).- Chaque carte possède un champ magnétique différent (inférence).

Commentaire :

- Arnaud raisonne de la manière suivante : « carte magnétique \Rightarrow propriétés magnétiques (champ magnétique) \Rightarrow aimant dans la carte ». Il associe donc l'objet du réel (la carte) à un signifiant du type langage naturel (champ), lui-même associé à un autre objet du réel (l'aimant). Cet étudiant ne donne aucun sens physique aux signifiants utilisés.

⁹ Nous attendons des étudiants le raisonnement impliquant tout ou partie des éléments suivants : « la carte magnétique contient un circuit LC produisant un champ magnétique. Quand nous approchons la carte magnétique du boîtier, le flux du champ magnétique à travers ce dernier varie et entraîne la production d'une force électromotrice qui induira un courant électrique et un champ magnétique qui s'oppose à l'augmentation du flux de \vec{B} de la carte. Cette force électromotrice met en mouvement les électrons libres d'une spire conductrice d'une bobine se trouvant dans le boîtier. Le courant induit dans la spire commande la fermeture d'un circuit pour lever la barrière ».

- Arnaud effectue une analogie avec la situation « aimant-spire ». Nous constatons qu'il n'évoque toujours pas la création d'un champ électrique et d'une force électromotrice quand le champ magnétique varie à travers une surface fermée (d'ailleurs il n'évoque pas non plus cette condition).
- Selon lui, il faudrait un « code » pour l'identification de la carte mais il n'est pas en mesure d'approfondir sa réponse. Par ailleurs, il utilise les termes « une sorte de code » et « une sorte de champ » qui témoignent de sa difficulté à rendre compte de la situation.

4.1.4 Cyril

Explication « spontanée » et raisonnement « inféré » :

- Prise d'information sur le réel : Cyril demande si le mouvement de la carte est indispensable.
- Identification du phénomène : « *il faut qu'il y ait quelque chose dans la carte qui soit caractéristique/ enfin qui code pour que tout le monde ne puisse pas ouvrir. Donc il y a une interaction entre la carte et le boîtier* ». Nous supposons que les théorèmes-en-acte suivants sont à l'origine de cette réponse : 1) « on met la carte devant le boîtier. Cela implique l'existence d'une interaction entre la carte et le boîtier » ; 2) « une vérification des droits doit se faire. Cela implique donc l'identification de la carte ».

Commentaire :

- Cyril fournit une explication personnelle, très générale et non contextualisée du phénomène sans approfondir sa réponse. En effet, il produit le raisonnement suivant : « on dispose d'une carte et d'un boîtier et une action a lieu (la barrière se lève), cela implique l'existence d'une interaction entre la carte et le boîtier ». Il ne semble pas se rendre compte immédiatement que le phénomène d'induction soit une solution possible dans cette situation lorsqu'il demande si le mouvement est indispensable.
- Cyril n'émet pas d'hypothèse non plus sur la nature de « l'interaction » entre la carte et le boîtier (ex : gravitationnelle, électrostatique, magnétique etc...).

Explications « sollicitées » :

Objet de la question	Réponse de l'étudiant	Raisonnement inféré
La carte magnétique	Il y a une partie magnétisée sur la carte comme un aimant. Elle est codée avec des dipôles orientés comme la limaille de fer.	<ul style="list-style-type: none"> - La carte a des propriétés magnétiques (théorème-en-cte). - Il y a des dipôles magnétiques (limailles) dans la carte (inférence)

Objet de la question	Réponse de l'étudiant	Raisonnement inféré
<p>Le fonctionnement de la barrière</p>	<p>« Quand on approche la carte, on varie le champ magnétique au niveau du boîtier et cela entraîne la création d'un courant dans ce dernier pour lever la barrière ».</p> <p>« Il y a peut-être des bobines » dans le boîtier.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - La carte a des propriétés magnétiques (théorème-en-acte). - Si on déplace la carte, alors on fait varier le champ magnétique en tout point du boîtier (théorème-en-acte). - La variation du champ magnétique entraîne la création d'un courant électrique (théorème-en-acte). - Pour avoir ce courant, il faut des bobines (inférence).

Commentaire :

- Cyril mobilise pour cette situation des connaissances identiques à celles qui ont été utilisées pour la situation « aimant-spire » sans les formaliser. Il semble que le fait que nous ayons mis l'accent sur un élément de la situation (carte magnétique), associé à l'analyse globale précédente, lui ait permis de contextualiser partiellement les invariants opératoires concernant le phénomène d'induction sur cette situation. Nous remarquons que cela n'a pas été fait de manière spontanée.
- Il n'évoque pas ici la création du champ électrique. Cependant, cela a été fait pour la situation « aimant-spire » et Cyril semble identifier le phénomène d'induction. En revanche, les invariants opératoires relatifs aux concepts de flux et de force électromotrice sont toujours absents chez cet étudiant.
- Cyril explique l'identification de la carte à l'aide des invariants opératoires concernant l'action du champ magnétique sur la matière¹⁰.

5 Analyse des résultats

5.1 Les invariants opératoires utilisés

L'invariant « la variation du champ magnétique (ou déplacement de l'aimant) crée un courant électrique » est stabilisé chez les deux étudiants. Nous avons constaté lors des autres situations dont les résultats ne sont pas présentés dans cette communication¹¹, que d'autres invariants opératoires comme « le courant électrique crée un champ magnétique » et « l'aimant crée un champ magnétique » sont stabilisés et pertinents dans le raisonnement des deux étudiants. Ces invariants sont utilisés de manière implicite lors des deux situations concernant le phénomène d'induction. Cependant, ces invariants opératoires ne sont pas contextualisés sur la situation proposée ; nous pouvons probablement voir là l'effet des répétitions de ces situations dans l'enseignement de l'électromagnétisme. Certains invariants opératoires comme celui de flux ou de force électromotrice qui permettent d'expliquer l'ensemble des phénomènes d'induction, sont absents chez les deux étudiants.

Cependant, nous avons remarqué que ces deux étudiants utilisent des invariants opératoires de nature différente¹². Ces derniers sont de nature descriptive et demeurent au niveau phénoménologique chez Arnaud. De plus, ces invariants descriptifs ne sont pas formulés de manière

¹⁰ Cette situation n'est pas présentée ici et fait l'objet d'une autre communication (Bagheri, Venturini et Lefèvre, 2003).

¹¹ Cf. Bagheri, Venturini et Lefèvre (2003).

¹² Ceci est vrai pour toutes les situations proposées.

correcte (il possède une vision globalisée et non pas localisée du champ). Les rares invariants opératoires d'interprétation sont d'un niveau élémentaire et ceux du « niveau supérieur » sont absents dans le raisonnement d'Arnaud. Cyril, au contraire, utilise parfois des invariants plus abstraits permettant une interprétation physique. Par exemple, il évoque la création du champ électrique et le couplage entre le champ électrique et le champ magnétique pour expliquer le phénomène d'induction. Cette interprétation est toutefois incomplète. Elle demeure appliquée au cas présenté, ne peut en tant que telle être généralisée à l'ensemble des phénomènes d'induction (l'absence d'invariants relatifs au flux) et n'est pas quantitative (l'absence de la force électromotrice et de l'équation de Maxwell).

5.2 L'organisation des conduites

5.2.1 Situation classique (« aimant-spire »)

a) En ce qui concerne le raisonnement spontané, les deux étudiants se comportent quasiment de la même manière :

- La première phase consiste très fréquemment en une phase de recherche au cours de laquelle ils procèdent à une prise d'information sur le réel (le dessin). Par exemple, pour la première situation, ils résument la situation verbalement (on approche l'aimant de la spire, il y a un ampèremètre...).
- Lors de la deuxième phase, ils associent un objet du réel (l'aimant) à un invariant opératoire très classique. Ici, ils emploient les théorèmes-en-acte « la variation du champ magnétique crée un courant électrique » ou « le déplacement de l'aimant crée un courant électrique » dans le cas d'Arnaud et « un aimant crée un champ magnétique ». Leurs raisonnements spontanés s'arrêtent donc à la formulation classique d'un ou plusieurs invariant(s) opératoire(s) (dont la formulation n'est pas contextualisée sur la situation proposée) en relation directe avec leurs perceptions du réel. Cyril définit mieux les invariants opératoires qu'il utilise. Par exemple, il localise la variation du champ magnétique « au niveau de la spire », ce qui n'est pas le cas pour Arnaud. Ce dernier fournit des explications proches du phénomène observé (du réel) de nature « descriptive » ou « interprétatifs » d'un niveau élémentaire qui n'atteignent jamais un « niveau supérieur ». Les questions posées aux deux étudiants montrent que cette limitation dans leurs réponses n'est pas le fait du hasard. En effet, les signifiés physiques liés aux invariants opératoires utilisés posent problème.
- Un point différencie les deux étudiants : Arnaud a souvent de longues hésitations avant d'identifier le but à atteindre ou de formuler une proposition, alors que Cyril semble maîtriser ses propos. Ceci est vrai pour toutes les situations proposées.

b) Quant aux raisonnements sollicités, les deux étudiants ne se comportent pas exactement de la même manière :

- Ils commencent par utiliser des invariants opératoires qui sont acceptables scientifiquement. Arnaud semble avoir des raisonnements très liés aux signifiants (langage naturel) et il les enchaîne sans aucune prise de contrôle (s'il y en a un, il n'est ni apparent ni productif). Par exemple, lors de la situation « aimant-spire », il énonce que le « déplacement »¹³ du champ magnétique crée une force qui met les électrons en mouvement dans la spire. Il ne s'interroge à aucun moment sur l'origine et la nature de cette force. Cyril dispose de davantage d'invariants opératoires et leurs associe parfois quelques signifiés physiques. Il procède souvent à une combinaison d'invariants opératoires de niveau élémentaire afin d'aboutir au but autrement dit expliquer le phénomène.
- Les deux étudiants abordent un phénomène dans son aspect particulier et non pas dans un contexte général dans lequel la reconnaissance d'un phénomène d'induction consiste en une identification de la variation du flux du champ magnétique à l'origine du phénomène,

¹³ Arnaud a utilisé une seule fois le terme « variation » du champ magnétique.

l'identification de la cause de cette variation etc.... C'est également ainsi que le phénomène d'induction est abordé dans l'enseignement de l'électromagnétisme.

5.2.2 Situation ouverte (« barrière à carte magnétique »)

- Face à une situation ouverte, Arnaud ne fournit aucune réponse de manière spontanée¹⁴. En effet, il n'associe aucun élément du réel à des invariants opératoires correspondants et par conséquent, il n'identifie aucun but, ce qui n'est pas le cas pour Cyril. Ce dernier procède par une prise d'information sur le réel, suivie d'un début d'explication du phénomène sans pour autant l'identifier et le décrire immédiatement.
- L'analogie entre les deux situations (classique et ouverte) n'a été faite par les deux étudiants que lorsque nous avons sollicité des réponses et approfondissements en mettant l'accent sur un élément du réel (la carte magnétique). Les raisonnements des deux étudiants n'atteignent pas un niveau supérieur et les explications sont formelles. Cela est peut-être dû au fait qu'ils n'identifient pas entièrement le réel afin d'émettre des hypothèses qui les conduiront à interpréter le phénomène. Cela veut dire qu'ils éprouvent des difficultés à identifier les éléments pertinents d'une situation ouverte alors que cela n'est pas le cas pour une situation prototypique. Il ne faut pas oublier que certains invariants opératoires (exemple : le flux et la force électromotrice) sont absents chez ces étudiants. Lors de la situation « barrière à carte magnétique », Cyril a également mis en relation deux phénomènes différents en effectuant une analogie non seulement avec la situation prototypique correspondante mais aussi, avec la situation « aimant-limaille de fer »¹⁵ pour expliquer la composition de la carte. Arnaud a mobilisé les invariants opératoires utilisés lors de la situation classique sans approfondir sa réponse : « *en parallèle avec l'expérience de la spire, le champ magnétique on est obligé de le faire varier* ». Quant à la carte magnétique, il pense que « *c'est des cartes avec des champs...une sorte d'aimant* ». Il n'apporte aucune précision à cette réponse. Cette explication approximative témoigne qu'il éprouve davantage de difficulté que Cyril pour rendre compte du phénomène.

6 Conclusion

En nous basant sur la théorie des champs conceptuels de Gérard Vergnaud (1990), nous avons essayé de saisir la dynamique du fonctionnement cognitif de l'étudiant. C'est l'accès au schème (l'organisation de l'activité dans une situation donnée) de l'étudiant qui nous permet d'atteindre ce but. Les résultats des entretiens avec Arnaud et Cyril par exemple, montrent que leurs conduites sont organisées de façon quasiment identique face à une situation-problème classique. Cependant, Cyril semble contrôler davantage l'usage et la succession des invariants opératoires, quelle que soit la nature de la situation. La correspondance « réel- invariants opératoires » est partielle chez les deux étudiants. La correspondance « invariants opératoires- signifiés physiques » est au contraire souvent inexistante et semble poser davantage de problème chez Arnaud. Ce dernier privilégie, dans les raisonnements sollicités, l'usage non contrôlé des signifiants du type symbolique auxquels il n'associe pas les signifiés correspondants (dans le champ de la physique). L'exploitation des résultats obtenus pour les autres étudiants se poursuit et révèle que leur portée semble plus générale et les conclusions proposées ici ne sont pas spécifiques des deux seuls étudiants évoqués. Ces résultats semblent permettre également de faire émerger une typologie des conduites.

¹⁴ Ceci est valable pour toutes les situations ouvertes proposées.

¹⁵ Cette situation a également été proposée aux étudiants et met en évidence l'action du champ magnétique sur la matière.

7 Références bibliographiques

Bagheri R., Venturini P. et Lefèvre R. (2002) Le concept de champ magnétique et les phénomènes associés chez les étudiants du premier cycle à l'université, in *Les Dossiers de Sciences de l'Education*, n°8 : pp. 23-32.

Bagheri R., Venturini P., Lefèvre R. (2003) La mobilisation du concept de champ magnétique par des étudiants en premier cycle universitaire, in Actes du Colloque International sur l'enseignement des sciences, « *Expérimentation et Construction des concepts* », IUFM de Charleville-Mézières, 12, 13 et 14 Mai 2003 (à paraître).

Tarciso Borges A., Gilbert J. K. (1998) Models of Magnetism, in *International Journal of Science Education*, vol. 20, n°3, pp. 361- 378.

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), in *Aster*, n°35 : pp. 165-186.

Vergnaud G. (1990) La théorie des champs conceptuels, in *Recherche en Didactique des Mathématiques*, vol.10, n°23, pp. 133- 170.

Weil-Barais A. (1991) *La recherche en psychologie*, Paris : Dunod.