

Utilisation et compréhension du rôle de l'instrument de mesure sur des schémas et des montages électriques

SZCZYGIELSKI Christophe, LIRDEF, IUFM de Montpellier, szczygielski@free.fr

Mots clés : électrocinétique ; lecture de schémas électriques ; instruments de mesure ; voltmètre ; ampèremètre

Résumé

Cette étude didactique extraite d'une recherche sur la compréhension du concept de circuit électrique montre qu'une utilisation correcte des instruments de mesure n'implique pas la compréhension de leur rôle et des concepts de physique associés. L'étude porte sur une population particulière : des élèves de section professionnelle, préparant un BEP d'électrotechnicien. Ces derniers sont capables d'accomplir des tâches spécifiques relatives à certaines représentations sémiotiques du circuit électrique mais cet objet, à la fois mathématique et physique, n'est pas assimilé ou mal maîtrisé. Nous faisons l'hypothèse qu'ils éprouvent des difficultés à passer d'un registre sémiotique à l'autre et que le problème vient de l'absence de coordination entre les registres sémiotiques auxquels ils sont confrontés.

Introduction

Le concept de circuit électrique et l'utilisation d'instruments de mesure de la tension et de l'intensité du courant électrique sont abordés au collège. Le préambule du programme précise que l'enseignement de la physique-chimie doit permettre à l'élève d'être notamment capable de "*manipuler et d'expérimenter en éprouvant la résistance du réel, c'est à dire de participer à la conception d'un protocole et à sa mise en œuvre à l'aide d'outils appropriés*". Si le circuit électrique est abordé dès la classe de cinquième, il ne l'est que qualitativement, ce n'est qu'à partir de la classe de quatrième que les élèves utilisent des appareils de mesure. Le programme précise que "*l'intensité d'un courant électrique se mesure avec un ampèremètre branché en série*" et que les élèves doivent savoir "*faire un schéma, en respectant des conventions*", il en est de même pour la tension et le voltmètre. En seconde, et plus particulièrement en classe de BEP des métiers de l'électrotechnique, l'utilisation des appareils de mesure et les circuits électriques avec leur schématisation ne sont plus que des outils. En effet, les élèves disposent alors d'un vocabulaire issu d'un langage technique précis et adapté à leur métier avec lequel ils sont capables de raisonner sur les grandeurs électriques et de décrire des circuits électriques. Pour représenter ces derniers, l'électricien dispose d'une schématisation électrique normée. Cette recherche montre qu'une utilisation correcte de ces outils, le schéma électrique et les instruments de mesure, n'implique pas la compréhension de leurs rôles et des concepts de physiques associés.

Aspects théoriques et problématique

Notion de systèmes et de registres sémiotiques dans le cas de l'électricité

Pour Duval [Duval, 1993, p 37], "*la distinction entre un objet et sa représentation est (...) un point stratégique pour la compréhension des mathématiques*". Il définit les *représentations sémiotiques* comme "*des productions constituées par l'emploi de signes appartenant à un système de représentation qui a ses contraintes propres de signification et de fonctionnement*". Le fonctionnement de la pensée humaine se révèle inséparable de l'existence d'une diversité de registres sémiotiques de représentation qu'il définit comme étant tout système sémiotique permettant de remplir trois fonctions cognitives fondamentales liées à la *sémiosis* [Duval, 1995], c'est à dire l'appréhension ou la production d'une représentation sémiotique.

La première activité cognitive est la *formation d'une représentation identifiable* comme une représentation d'un registre donné [Duval, 1998]. Cette formation doit respecter des règles de conformité, dont la connaissance n'implique pas la compétence pour former des représentations, mais seulement celle pour les reconnaître. L'exemple du schéma ci-dessous est une des représentations possibles, dans le registre du schéma électrique, d'une portion de circuit électrique que le lecteur physicien saura appréhender.

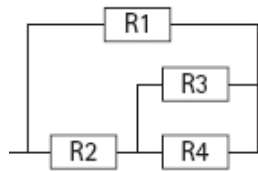


Figure 1 : portion de circuit avec des éléments en série et en parallèle

Le langage, en l'occurrence dans le cas de l'électricité, est aussi un registre et nous parlerons alors de registre du langage technique. L'énonciation de la phrase "*la résistance R3 est en parallèle avec R4*" est aussi *une représentation identifiable* [Duval, 1998], de la même portion de circuit électrique. La formation d'une *représentation identifiable* se fait en fonction de règles de conformité dont le rôle est d'assurer les conditions d'identification et de reconnaissance.

La deuxième activité cognitive est le *traitement* d'une représentation c'est à dire la transformation de cette représentation dans le registre même où elle a été formée. Le traitement est une transformation interne à un registre. La *paraphrase*, par exemple, est un traitement dans le cas du langage, quant à l'*anamorphose*, elle est un traitement dans le cas d'un schéma. L'exemple ci-dessous présente une *anamorphose* entre deux schémas.

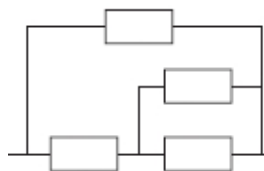


Figure 2 : configuration d'éléments en série et parallèle

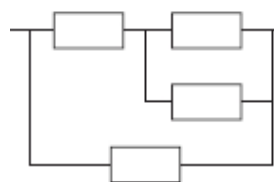


Figure 3 : même configuration après une anamorphose

La troisième activité cognitive est la *conversion* d'une représentation, c'est à dire la transformation de cette représentation en une représentation d'un autre registre en conservant la totalité ou une partie seulement du contenu de la représentation initiale. Par exemple l'*illustration* est la *conversion* d'une représentation linguistique en *représentation figurale*, en revanche la *description* est la conversion d'une *représentation non verbale* à une *représentation linguistique*.

Pour une appréhension conceptuelle des objets que Duval appelle *noésis*, il faut que l'objet ne soit pas confondu avec ses représentations possibles, et la coordination de plusieurs registres apparaît alors comme fondamentale. Dans le cas du circuit électrique, il existe plusieurs représentations sémiotiques possibles. L'une d'elles est la schématisation que nous avons appelé schématisation d'électrocinétique. Mais notons que les élèves en BEP des métiers de l'électrotechnique en utilisent une supplémentaire correspondant à la schématisation électrotechnique.

Duval définit la congruence entre "*deux représentations sémiotiquement différentes*", c'est à dire deux registres sémiotiques différents, lorsqu'il y a "*correspondance sémantique entre leurs unités signifiantes, univocité sémantique terminale et même ordre possible d'appréhension de ces unités dans les deux représentations*". Lorsque deux représentations sont congruentes, le passage de l'une à l'autre doit se faire spontanément, c'est à dire que des élèves doivent être capables de saisir qu'il s'agit du même objet présenté sous deux registres et donc être capables de passer d'un registre à l'autre.

Ce cas de figure a été mis en évidence dans le cas d'élèves en BEP des métiers de l'électrotechnique [Szczygielski, 2009]. En effet, ces derniers éprouvent des difficultés à coordonner les registres sémiotiques du schéma électrocinétique, celui du schéma électrotechnique et celui du langage technique. Cette dernière recherche montre que ces élèves adoptent des raisonnements spécifiques à chaque représentation sémiotique, électrocinétique ou électrotechnique, d'un même circuit électrique comme s'il s'agissait de circuits différents, montrant ainsi que le concept même de *circuit électrique* n'est pas assimilé ou mal maîtrisé.

Notion de lecture de schémas électriques

Dans les représentations schématiques des circuits électriques en particulier dans les manuels scolaires, des associations particulières d'éléments sont toujours représentées par les mêmes dessins. Avec ces schémas prototypiques qualifiés aussi de canoniques, les élèves acquièrent des connaissances prototypiques (Caillot, 1984) en ayant en mémoire ces configurations.

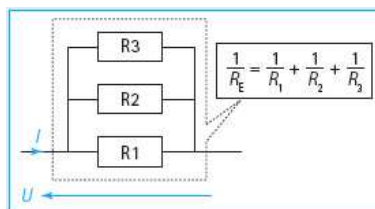


Figure 4 : configuration prototypique d'éléments en parallèle

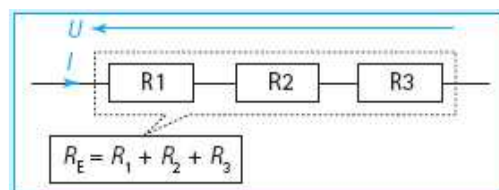


Figure 5 : configuration prototypique d'éléments en série

Dans la lecture de schéma électrique, les étudiants et élèves se laissent perturber par ces configurations bien connues d'éléments associés en série ou en parallèle. Ils décodent selon les lois de la perception au détriment des lois de l'électricité et de la topologie du circuit. Caillot (Caillot, 1988) a montré que les "*effets perceptifs priment sur la sémantique de la représentation graphique*". Reconnaître des éléments en série ou en parallèle dans un circuit électrocinétique procède de la catégorisation. Celle-ci s'effectue de la façon suivante : la proximité d'éléments est équivalente à leur appartenance à une même structure, la continuité d'éléments orientés dans le même sens est équivalente à leur appartenance à une structure en série, la présence d'éléments de symétrie comme par exemple un axe de symétrie est équivalente à l'existence d'éléments en dérivation.

Problématique

Nous faisons l'hypothèse dans cette recherche que les élèves éprouvent des difficultés à passer d'un registre sémiotique à l'autre. Les problèmes de compréhension des élèves concernant l'utilisation des instruments de mesure vient notamment de l'absence de coordination entre les registres sémiotiques du schéma électrocinétique et du langage technique.

Afin de déterminer s'il y a ou non, coordination entre certains des registres auxquels sont confrontés les élèves, nous allons dans cette recherche, tester certaines de ces relations entre registres sémiotiques, puis entre les registres et le réel c'est à dire le montage du circuit électrique.

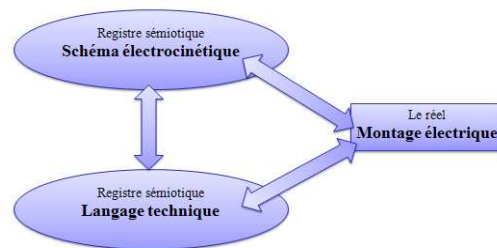


Figure 6 : relations testées entre registres sémiotiques ainsi que le réel

Pour cela nous allons évaluer chez un groupe d'élèves en classe de BEP des métiers de l'électrotechnique, les fonctions cognitives définies par Duval dans le cas de l'utilisation des instruments de mesure élémentaires en électricité : l'ampèremètre et le voltmètre. Ces appareils de mesure se connectant soit en série soit en dérivation, ce groupe d'élèves est confronté aux configurations bien connues, dans chacun des registres puis dans le réel.

La fonction de traitement dans le registre de la schématisation électrocinétique

Nous avons choisi de tester la fonction de *traitement* dans le registre de la schématisation électrocinétique avec deux problèmes posés sous forme de questionnaires papier-crayon à des élèves de première et deuxième année de BEP des métiers de l'électrotechnique (43 pour le premier problème, 42 pour le deuxième), issus de plusieurs classes du lycée de Dammarie-les-Lys. Dans ces deux problèmes l'objectif était de savoir si les élèves sont capables de reconnaître un schéma ayant subi une *anamorphose*, c'est à dire une transformation dans le registre même où il a été formé.

Dans le premier problème, le but pour les élèves était d'identifier les schémas équivalents à un schéma de base parmi cinq autres schémas. Parmi ceux-ci certains étaient dans d'autres

configurations. La proposition " *Il n'y a pas de schéma équivalent*" était aussi un choix possible. Ces schémas comportaient des éléments (résistances et générateurs) placés horizontalement, seuls les instruments de mesures et la masse changeaient de place.

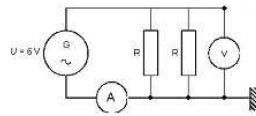
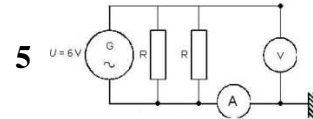
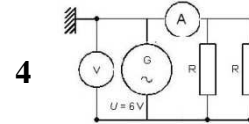
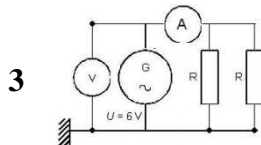
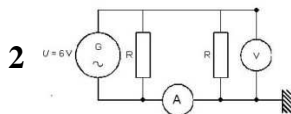
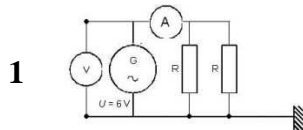


Schéma de base



6 Il n'y a pas de schéma équivalent

Le Tableau 1 explicite l'ensemble des réponses faites par les élèves, les réponses multiples étaient possibles.

Schémas retenus dans au moins un choix	
Schéma 1 (correct)	7 %
Schéma 2	9 %
Schéma 3 (correct)	14 %
Schéma 4 (correct)	33 %
Schéma 5	37 %
Proposition 6	0%

Tableau 1 : schéma équivalent

Nous constatons que les bonnes réponses ont été très peu retenues, excepté le schéma 4 retenu par 33 % des élèves. En revanche, le schéma 5, qui n'est pas un schéma équivalent, a été retenu par 37% des élèves. Ces deux schémas n'ont subi qu'une légère modification du schéma initial. Pour le schéma 5, il s'agit d'un déplacement de l'ampèremètre et pour le schéma 4, du déplacement de l'ensemble voltmètre-masse. Il est probable que les élèves se sont basés sur des arguments essentiellement graphiques et non pas physiques pour fonder leurs choix, en effet le rôle de l'ampèremètre dans le schéma 5 est fondamentalement différent de celui du schéma de base.

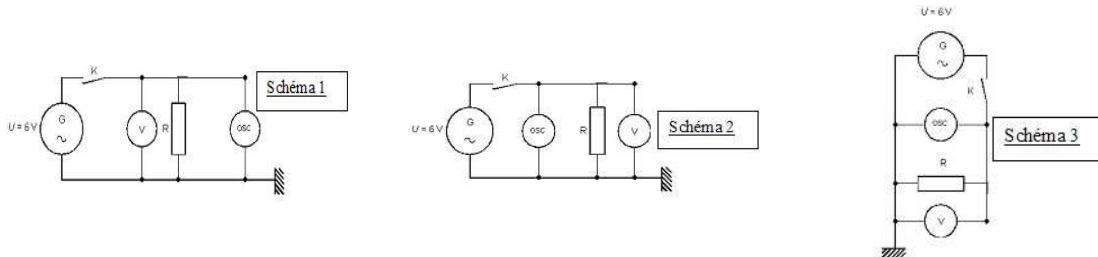
Le Tableau 2 : explicite l'ensemble des bonnes réponses. Une bonne réponse ne contenant aucune proposition de schéma faux, une réponse partielle est donc constituée de un ou deux schémas parmi les schémas 1, 3 ou 4.

Bonne réponse complète, schémas 1, 3 et 4		9%	
Bonne réponse partielle avec aucun schéma faux inclus.	2 Schémas sur 3	9%	} 25%
	1 Schéma sur 3	16%	
Total			34%

Tableau 2 : analyse des bonnes réponses

Nous constatons qu'une faible part des élèves, 9%, est capable d'identifier tous les schémas équivalents, un quart seulement est capable d'identifier un ou deux schémas, et finalement un tiers seulement (34%) est capable de trouver un, deux ou les trois schémas équivalents sur les six proposés.

Dans le deuxième problème où tous les schémas étaient homologues et dans des configurations prototypiques [Caillot, 1988], l'objectif était de savoir si les élèves sont capables de reconnaître qu'il s'agit du même schéma et donc de reconnaître que le rôle des instruments est identique. Le but était pour les élèves était de déterminer le rôle de deux instruments de mesure, un voltmètre et un oscilloscope.



Quel est le rôle du voltmètre ?	Schéma 1	Schéma 2	Schéma 3
Mesure la tension aux bornes de R. (a)	12%	70%	78%
Mesure la tension aux bornes du générateur. (b)	55%	14%	10%
Mesure la tension aux bornes de R et du générateur. (c)	28%	16%	12%
Mesure autre chose (à préciser). (d)	5%	0%	0%
Quel est le rôle de l'oscilloscope ?	Schéma 1	Schéma 2	Schéma 3
Mesure la tension aux bornes de R. (a)	57%	14%	9%
Mesure la tension aux bornes du générateur. (b)	10%	56%	63%
Mesure la tension aux bornes de R et du générateur. (c)	19%	16%	16%
Mesure autre chose (à préciser). (d)	14%	14%	12%

Tableau 3 : rôle des instruments de mesure

L'analyse des réponses des résultats du deuxième questionnaire (Tableau 3) montre que la quasi totalité des élèves connaît le rôle de ces instruments de mesure : le voltmètre et l'oscilloscope permettent de mesurer une tension. En revanche, la bonne réponse, "*mesure la tension aux bornes de R et du générateur (c)*" est largement minoritaire dans chacun des trois problèmes. Nous pouvons donc considérer que pour une très grande majorité d'élève (environ 85 %), un instrument connecté aux bornes de dipôles en parallèle, ne mesure la tension qu'aux bornes d'un seul.

Pour le schéma 1, la proposition majoritaire retenue pour le voltmètre est la *mesure de la tension aux bornes du générateur (b)* avec 55%, et pour l'oscilloscope la *mesure de la tension aux bornes de la résistance (a)* avec 58%. Pour le schéma 2, la proposition majoritaire retenue pour le voltmètre est la *mesure de la tension aux bornes du générateur (b)* avec 70%, et pour l'oscilloscope la *mesure de la tension aux bornes de la résistance (a)* avec 56%. Pour le schéma 3, qui est identique au schéma 2 mais présenté verticalement, les résultats sont proches. Or, entre les schémas 1 et 2, la place des instruments de mesure a été échangée. Il semble donc que pour une majorité d'élèves, l'appareil de mesure ne donne la tension qu'aux bornes du dipôle immédiatement à gauche ou immédiatement au dessus.

Finalement, même lorsque des schémas sont dans des configurations équivalentes et dans des dispositions prototypiques (Caillot et al., 1984), c'est à dire que seul l'ordre des éléments en

parallèles est modifié, il semble que les effets perceptifs ne soient pas déterminants dans la lecture. Ainsi, lorsque les élèves en BEP électrotechnique lisent des schémas électrocinétiques, ils ne donnent pas de sens à leur lecture.

Nous constatons que les réponses obtenues aux questions sont différentes pour chacun de ces schémas correspondant pourtant au même circuit électrique. Ainsi, sur les deux problèmes, les élèves ont globalement échoué dans la fonction de traitement de schémas électrocinétiques d'un circuit électrique.

La fonction de conversion entre les registres du langage technique et du schéma électrocinétique

Pour tester la troisième activité définie par Duval, une expérimentation a consisté à faire réaliser par des élèves une action identique dans les registres du langage technique, puis dans celui du schéma électrocinétique et enfin dans le réel c'est à dire sur un montage. Cette action consistait à placer un ampèremètre permettant de mesurer l'intensité du courant traversant certains éléments d'un circuit : des résistances. Huit entretiens ont été réalisés avec des élèves de première et deuxième année de BEP des métiers de l'électrotechnique, considérés comme de bons élèves dans les disciplines professionnelles mais aussi en mathématiques et en sciences physiques, en fin d'année scolaire, et hors temps scolaire. Le schéma et le montage leurs étaient fournis. Le protocole expérimental prévoyait tout d'abord de demander aux élèves de préciser oralement les actions qu'ils allaient mener, ensuite de modifier le schéma fourni puis enfin de procéder à la modification du montage correspondant. Deux circuits étaient proposés.

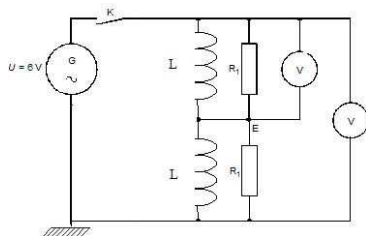


Figure 7 : schéma attendu à représenter à partir d'un montage

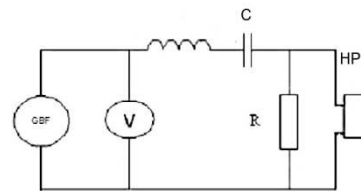


Figure 8 : schéma d'un montage à réaliser

L'analyse des propos des élèves a montré qu'ils ont *formé une représentation identifiable* dans le registre du langage technique du câblage d'un ampèremètre dans un circuit électrique correspondant à la première fonction cognitive définie par Duval. Ils ont la "*connaissance des règles de conformité*" c'est à dire qu'il savent comment il faut placer un ampèremètre avec "*l'énonciation d'une phrase compréhensible*" [Duval, 1993]. Ainsi, leurs propos ont été clairs et explicites. Pour Maxime à propos de l'ampèremètre : "*Je ne peux pas le placer en dérivation. J'ai fait un devoir d'atelier, et en dérivation c'était pas bon donc en série*". Par ailleurs dans la suite de ses propos, "*il faut que je mesure l'intensité qui rentre ou qui ressort ? (...) Si je veux celle qui rentre, je mettrai ici (...) J'en placerai un ici et à la sortie*", il a montré les deux côtés de l'élément. Il sait donc qu'un ampèremètre doit être connecté en série et connaît la signification du mot *série*. En ce qui concerne Asad ses propos ont montré que lui aussi sait comment doit être placé un ampèremètre : "*je le place entre les éléments*".

En revanche, dans le registre du schéma électrocinétique, les modifications des schémas effectuées par les élèves pour placer un ampèremètre, ne correspondaient pas toujours aux propos tenus à l'oral quelques instants auparavant.

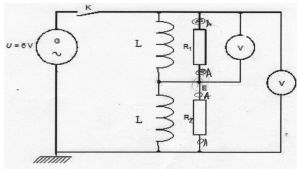


Figure 9 : Schéma modifié par Maxime

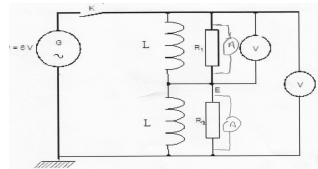


Figure 10 : Schéma modifié par Asad

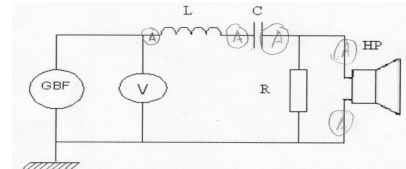


Figure 11 : Schéma modifié par Aymeric

Alors que Maxime a placé deux ampèremètres pour mesurer le courant traversant chacune des résistances, soit quatre symboles placés en série sur le schéma conformément à ses propos oraux, Asad a placé, quant à lui, chacun des ampèremètres en dérivation avec les éléments. Aymeric a placé, comme Maxime, un ampèremètre de chaque côté de chacun des éléments dont il devait mesurer le courant, la bobine et le condensateur. Les ampèremètres ont été placés convenablement, c'est à dire en série.

Dans le réel, ces trois élèves ont systématiquement placé les ampèremètres en dérivation des éléments lors des modifications de montages.

Il semble donc que pour ces élèves, les trois tâches proposées dans les différents registres sémiotiques et le réel soient traitées indépendamment les unes des autres confirmant ainsi que le concept de circuit électrique n'est pas maîtrisé [Szczygielski, 2009]. Les règles de branchement d'un ampèremètre ne sont pas maîtrisées dans le réel et pas toujours dans le registre du schéma électrocinétique.

Sur le fonctionnement de l'instrument de mesure

Lors de certains des entretiens, et avec pour toute information, le schéma électrocinétique ci-dessous, il a été demandé aux élèves de déterminer ce qu'indiquent les instruments de mesure.

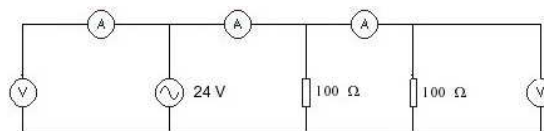


Figure 12 : schéma atypique

Ce problème est atypique pour plusieurs raisons. Premièrement, les problèmes scolaires proposent en général de calculer des valeurs de grandeurs (I_1 , I_2 , ...) avec des symboles représentés sur un schéma, et ne demandent jamais de préciser ce que pourrait indiquer un instrument de mesure de ces mêmes grandeurs. Deuxièmement, les problèmes scolaires ne proposent jamais des cas de figure physiquement inutiles tels qu'un ampèremètre placé en série avec un voltmètre puisque l'ampèremètre devrait indiquer une valeur nulle. Chacun des élèves, libre de résoudre le problème posé à sa convenance a numéroté les ampèremètres et nommé chaque valeur d'intensité du courant par I_1 , I_2 et I_3 de gauche à droite. Nous avons repris cette notation.

Michael a fait des calculs en pensant qu'un courant traverse le voltmètre de gauche. Ses propos " I_1 est placé comme I_3 car V c'est comme un fil" montrent qu'il ne connaît pas les propriétés élémentaires du voltmètre, notamment concernant sa résistance. Mohammed a fait lui aussi des calculs en pensant qu'un courant traverse le voltmètre de gauche.

Conclusion

Durant leur formation, les élèves de BEP d'électrotechnique excellent dans certaines tâches, en particulier dans la réalisation des montages électriques qui sont pratiquement effectuées sans faute. L'objectif du référentiel du diplôme est donc atteint et ces élèves sont opérationnels pour leur vie professionnelle.

Mais à la lueur des résultats de cette étude didactique, nous constatons que les élèves ont une méconnaissance des propriétés élémentaires des instruments qu'ils utilisent pourtant fréquemment. Ainsi, dans les deux questionnaires papier-crayon, il apparaît que les élèves ne savent pas, entre autres, qu'un voltmètre mesure la tension de tous les dipôles placés en parallèle avec lui et les entretiens montrent que les élèves ignorent qu'un voltmètre a une résistance infinie. Finalement, une lecture correcte d'un schéma électrocinétique n'implique pas, de la part des élèves, la compréhension des phénomènes physiques qui lui sont liés.

Les entretiens montrent que ces élèves ont certes acquis des connaissances, mais relativement à des registres sémiotiques.

Dans le registre du langage technique, les élèves verbalisent parfaitement leurs connaissances. Ils forment en particulier des *représentations identifiables* des connexions séries et parallèles et sont capables de décrire un montage qu'ils ont sous les yeux. Ils forment aussi des *représentations identifiables* des procédures de connexion des instruments de mesure, ampèremètre ou un voltmètre. Ils sont donc capables d'effectuer des *traitements* dans ce registre, en décrivant le protocole de modification de montage électrique.

Dans le registre du schéma électrocinétique, les élèves forment aussi des *représentations identifiables* des connexions séries et parallèles. En ce qui concerne l'activité de *traitement*, les élèves sont capables de modifier un schéma électrocinétique en plaçant de façon correcte un instrument de mesure, en revanche dans le cas de l'*anamorphose*, une forme de *traitement* particulier, ils éprouvent des difficultés : en effet, une faible part des élèves est capable de reconnaître un schéma présenté d'une autre façon.

La *conversion* posent des problèmes à ces élèves, les entretiens montrent que les trois tâches identiques, proposées dans les différents registres sémiotiques et le réel soient traitées indépendamment les unes des autres avec des réussites différentes. Les élèves ne *coordonnent* pas l'objet circuit électrique, objet à la fois mathématique et physique, entre les différents registres sémiotiques, révélant que celui-ci n'est pas assimilé ou mal maîtrisé.

Au cours de leur formation, les élèves préparant un BEP pour devenir électrotechnicien, reçoivent un enseignement cloisonné qui ne les conduit qu'à des tâches de traitement n'utilisant qu'un seul registre sémiotique. L'absence de tâche permettant aux élèves une coordination de l'ensemble des registres relatifs aux circuits électriques ne les amène pas à donner du sens à ce qu'il font même si leurs gestes techniques (réalisation de câblages professionnels) sont satisfaisants.

Bibliographie

- Caillot, M. & Cauzinille-Marmeche, E. (1984). Rôle des schémas prototypiques dans la résolution de problèmes. In A. Giordan & J.-L. Martinand (dir.). *Signes et discours dans l'éducation et la vulgarisation scientifique* (pp 405-413), Paris : Université Paris 7.
- Caillot, M. (1988). Circuits électriques : schématisation et résolution de problèmes. *Technologies, Idéologies, Pratiques*, VII, 2, 59-83.

Duval, R. (1993). Registres de représentation sémiotique et fonctionnement cognitif de la pensée. *Annales de didactique et de sciences cognitives*, 37- 65.

Duval, R. (1995). *Sémiosis et pensée humaine*. Berne : Ed. Peter Lang.

Duval, R. (1996). Quel cognitif retenir en didactique des mathématiques. *Recherche en didactique des mathématiques, IREM de Strasbourg*, 48(16-3), 348-382.

Duval, R. (1998). Signes et objets, Trois grandes étapes dans la problématique des rapports entre représentation et objet. *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives*, 139-163.

Ministère de l'Education Nationale (2002). *Brevet d'Etudes Professionnelles des métiers de l'électrotechnique*. Paris : Direction de l'Enseignement Scolaire.

Szczygielski, C. (2008). *Le schéma en électricité : Eléments d'histoire et problèmes didactiques*. Thèse. Montpellier : Université Montpellier II.

Szczygielski, C. (A paraître). Compréhension du concept de circuit électrique à travers différents systèmes sémiotiques. *Aster*, 48.