

CONCEPTIONS DES ELEVES ET ANALOGIE EN SCIENCES

Illustrations sur les thèmes de l'énergie et de l'électricité

Carré des Sciences – Université de Mons

Pierre Gillis, Francesco Lo Bue & Soizic Mélin

Institut d'Administration scolaire – Université de Mons

Marc Demeuse, Arnaud Dehon, Céline Demierbe & Antoine Derobertmasure

Introduction

Dans le cadre d'une recherche en éducation¹ menée à l'Université de Mons par le Carré des Sciences et l'Institut d'Administration scolaire, un dispositif d'enseignement des sciences a été élaboré dans deux domaines : l'énergie et l'électricité. L'objectif de ce dispositif est de conduire tous les élèves à développer les compétences définies préalablement ; des outils de diagnostic et de remédiation immédiate ont été créés à cette fin, dans un cadre d'expérimentation en groupes (construction d'une éolienne dans le volet énergie et construction d'un jeu « électro » pour le volet électricité).

Basé sur les théories socioconstructivistes de l'apprentissage, le dispositif élaboré tient compte des images mentales préalables de tout individu. La construction du savoir et des savoir-faire repose sur un acquis ou une conception antérieure. La recherche a débuté par l'examen des conceptions des élèves de trois établissements d'enseignement secondaire du Hainaut sur les thèmes de l'énergie et l'électricité. L'objectif de cette étape était de réguler le dispositif élaboré afin qu'il soit davantage en adéquation avec les conceptions des élèves et d'effectuer les choix didactiques les plus pertinents.

L'analyse des conceptions occupe une place importante dans le travail qui a été mené. Dans cet article, nous nous focalisons d'une part sur les conceptions des élèves avant intervention de l'enseignant, avant apprentissage, et d'autre part sur les conceptions après expérimentation et apprentissage. Le premier objectif de l'article (partie 1) est d'informer les enseignants sur les différentes représentations qu'ont les élèves du premier degré de l'enseignement secondaire de manière à permettre d'élaborer des situations d'apprentissage qui en tiennent compte et de mieux comprendre les problèmes que les élèves peuvent rencontrer.

Nous nous sommes aussi interrogés sur les effets en aval des analogies et des images que nous introduisons lors de notre intervention : l'usage d'images ou d'analogies à visée didactique n'est-elle pas susceptible d'entraver une maîtrise ultérieure des concepts scientifiques ? Ce questionnement débouche sur une réflexion plus théorique. Les domaines de l'énergie et de l'électricité sont typiquement caractérisés par un hiatus important entre les conceptions scientifiques modernes et les images dominantes dans un public large. Certaines conceptions

¹ Recherche intitulée « *Développement d'outils de diagnostic et de remédiation immédiate au travers d'activités scientifiques au premier degré de l'enseignement secondaire* » (Demeuse, M., Gillis, P., Dehon, A., Demierbe, C., Derobertmasure, A., Lo Bue, F. & Mélin, S., 2008).

« non scientifiques » sont largement partagées, a fortiori par le « public » constitué par les élèves fréquentant les classes du début de l'enseignement secondaire. A vouloir parler à l'imagination des élèves, ne compromet-on pas la suite de la construction des savoirs dans le domaine investigué ? Le second objectif de cet article (partie 2) consiste à discuter « l'analogie fluide » mobilisée dans le domaine des enseignements relatifs à l'électricité pour faciliter la transposition didactique. Nous essayerons de montrer comment, moyennant une nécessaire prudence méthodologique, l'usage de l'analogie peut s'avérer bénéfique.

Première partie : Les conceptions des élèves en sciences : les thèmes de l'énergie et de l'électricité

Un peu de théorie...

1. Des conceptions ?

La perception qu'un individu a du monde est incomplète et dépend des sens et de la structure cognitive de l'observateur : on ne voit pas le monde, on se le représente (Jarrosson, 1992). Bien que le terme « représentation » ne soit pas l'unique manière pour désigner ce phénomène de construction mentale individuelle, de nombreux auteurs (Giordan *et al.*, 1987 ; Larochelle & Désautels, 1992 ; Joshua & Dupin, 1993 ; Fourez, 2001 ; Verhaeghe, Wolfs, Simon & Compère, 2004) s'accordent, avec Astolfi et Develay (1989, p. 31), sur le fait « *que tout apprentissage vient interférer avec un « déjà-là » conceptuel qui, même s'il est faux sur le plan scientifique, sert de systèmes d'explication efficace et fonctionnel pour l'apprenant* ». , Une conception peut se définir comme « *l'explication que se fait l'individu du monde qui l'entoure, et ce via des modèles explicatifs dont il dispose. Ceux-ci sont inadaptés et peuvent donc induire des idées fausses* » (Verhaeghe, Wolfs, Simon & Compère, 2004, p. 88).

Dans une perspective constructiviste, il faut une réorganisation, une adaptation ou encore une modification des schèmes existants afin de faire évoluer l'apprenant vers une conception du monde plus adaptée (Giordan *et al.*, 1987 ; Astolfi & Develay, 1989 ; Larochelle & Désautels, 1992 ; Bertrand, 1998 ; Verhaeghe, Wolfs, Simon & Compère, 2004). Il faut alors susciter un état de déséquilibre qui se transforme en équilibration majorante (Montangero & Maurice-Naville, 1994) par transformation des schèmes.

Une situation-problème peut conduire à cette situation de déséquilibre : pour résoudre le problème l'élève utilise ses conceptions, dans le cas où elles s'avèrent non viables, il est face à un obstacle qui une fois résolu entraîne un changement de conception (Giordan *et al.*, 1987 ; Astolfi & Develay, 1989 ; Verhaeghe, Wolfs, Simon & Compère, 2004). Ce processus dialectique, de thèse-antithèse (Fourez, 2001), ou ce conflit cognitif (Larochelle & Désautels, 1992), est facilité lorsque les élèves peuvent effectivement échanger à propos de leurs conceptions (Astolfi & Develay, 1989 ; Verhaeghe, Wolfs, Simon & Compère, 2004).

La notion de représentation est donc essentielle lorsqu'il s'agit de déterminer des choix didactiques (Giordan et al, 1987 ; Verhaeghe, Wolfs, Simon & Compère, 2004 ; Mathy, 2006).

2. Pourquoi étudier les représentations des élèves ?

Bachelard (1999, p. 21) fut l'un des premiers à s'intéresser à l'étude des représentations ou conceptions mentales des élèves : « *J'ai souvent été frappé du fait que les professeurs de sciences, plus encore que les autres si c'est possible, ne comprennent pas que l'on ne comprenne pas. [...] Ils n'ont pas réfléchi au fait que l'adolescent arrive dans la classe de Physique avec des connaissances empiriques déjà constituées. Il s'agit alors, non pas d'acquérir une culture expérimentale, mais bien de changer de culture expérimentale, de renverser les obstacles déjà amoncelés par la vie quotidienne* ». Si de nombreuses disciplines, comme la philosophie ou encore la sociologie, s'y sont intéressées, l'analyse des conceptions des apprenants a également un intérêt important dans le domaine de la didactique, ceci afin de mettre en place des situations d'apprentissages qui soient de véritables outils pédagogiques efficaces (Verhaeghe, Wolfs, Simon & Compère, 2004). Elles constituent une véritable grille d'analyse (Giordan *et al.*, 1987 ; Verhaeghe, Wolfs, Simon & Compère, 2004) déterminant les orientations pédagogiques nécessaires pour qu'il y ait apprentissage au sens constructiviste. Deux types de facteurs peuvent être pris en compte : des facteurs inéluctables (les conceptions sont inévitablement présentes) et des facteurs d'objectifs (il y a un intérêt non négligeable à les étudier) (Verhaeghe, Wolfs, Simon & Compère, 2004).

2.1. Facteurs inéluctables

Les conceptions des élèves sont inévitablement présentes : tout individu se représente la réalité. Dès lors, tout apprentissage se réalise sur la base de cette image conceptuelle : la conception de l'élève est le point d'ancrage à toute construction de savoir (Giordan *et al.*, 1987). Le modèle « émetteur-récepteur » qui veut que l'enseignant détienne la connaissance et l'expose à l'élève qui l'intègre automatiquement (par simple juxtaposition d'information) ne peut être efficace car « *le sujet n'acquiert qu'une illusion de savoir, un savoir purement verbal, l'application stéréotypée d'une recette* » (Giordan *et al.*, 1987, p. 91). L'élève « efface » certaines connaissances précaires au profit de ses conceptions profondes, certains apprentissages n'ayant pas véritablement été intégrés. Il est donc nécessaire de partir des conceptions des élèves pour créer des conditions d'apprentissage davantage favorables et pertinentes, même si ces conceptions peuvent être erronées et fortement persistantes (Jarrosion, 1992). Les préconceptions ont également une influence sur les conduites et les communications de chacun en tant qu'individu social. Action et conception des élèves sont étroitement liées (Giordan *et al.*, 1987). La composante sociale des conceptions ne doit pas non plus être négligée. Elle peut permettre de comprendre les réactions des élèves. Les représentations sociales sont un « *mode de connaissance particulier dont il faut tenir compte*

dans la relation pédagogique » (Giordan *et al.*, 1987, p. 101) et elles se manifestent à travers certaines caractéristiques économiques, religieuses, politiques, psychologiques...

2.2. Facteurs d'objectifs

Si l'enseignant n'a que très peu de prise par rapport aux caractéristiques propres aux élèves et s'il veut mettre en place des dispositifs d'enseignement efficaces, il doit considérer ce « déjà-là ». De nombreux auteurs (Giordan *et al.*, 1987 ; Joshua & Dupin, 1993 ; Verhaeghe, Wolfs, Simon & Compère, 2004 ; Mathy, 2006) envisagent les conceptions des élèves dans une optique de diagnostic : on doit les étudier pour mettre en évidence les difficultés ou obstacles que pourrait rencontrer chaque élève et pour déterminer son cadre de référence : on réalise la « cartographie » des conceptions (Astolfi & Develay, 1989, p. 34). L'analyse des conceptions ne doit donc pas être superficielle, elle doit pouvoir mettre en évidence « le modèle explicatif sous-jacent » (Verhaeghe, Wolfs, Simon & Compère, 2004) et déterminer les options didactiques ou pédagogiques qui conduisent à une meilleure différenciation des besoins et des solutions, et à des remédiations plus efficaces. Dans ce cadre, l'erreur n'est pas proscrite, mais peut être le point de départ à une mise à l'épreuve des conceptions en vue de les réadapter si nécessaire.

Commentaire [MD21] : ????

...Et de pratique

Dans la recherche dont est issu cet article, l'analyse des conceptions répondait à un objectif de régulation du dispositif d'enseignement mis au point. Dès lors, l'analyse des conceptions s'est limitée à une prise d'information, via schématisation, portant sur l'évolution des conceptions avant et après apprentissage des notions abordées. A partir de deux modèles d'analyse issus de la littérature scientifique (Astolfi & Develay, 1989 ; Giordan & de Vecchi, 1990 ; Astolfi, Darot, Ginsburger-Vogel & toussaint, 1997), l'étude des conceptions des élèves a porté sur quatre caractéristiques des schémas : les références (« théorie » dont s'inspire l'élève), la viabilité (la conception peut-elle être concrétiser et fonctionner en réalité ?), les signifiants (quels éléments sont dessinés ?) et les opérations mentales (l'élève a-t-il atteint le « réalisme intellectuel² » (Deldime & Vermeulen, 1980).

Dans cette partie, l'accent est davantage placé sur l'étude des références employées par les élèves pour représenter le fonctionnement d'une éolienne dans le cas de l'énergie et d'un jeu d'électro dans le cas de l'électricité.

² Cette caractéristique fait appel à une orientation développementale et à un niveau d'abstraction de la conception. Au niveau graphique, l'élève du degré inférieur (vers 12 ans) passe du « réalisme manqué » lorsqu'il échouait au « réalisme intellectuel » (Deldime & Vermeulen, 1980, p. 127) défini comme le stade où l'enfant tente de représenter tout ce qu'il sait et plus seulement ce qu'il voit. Ce stade est caractérisé par (Deldime & Vermeulen, 1980) : la transparence, la diversité des points de vue, le doublement des organes pairs dans les représentations de profil, l'usage du détail exemplaire, l'inscription de légendes (imposé dans la consigne lors de la recherche).

1. Energie (fonctionnement d'une éolienne)

Les dessins proposés par les enfants³ peuvent être subdivisés en deux groupes distincts : les dessins explicatifs et les dessins figuratifs. Ce qui différencie les deux groupes porte sur la tentative d'explication du fonctionnement de l'éolienne : les dessins explicatifs sont plus complets et montrent comment fonctionne une éolienne. Au sein de ces deux groupes, les dessins sont catégorisés en fonction de la référence théorique sur laquelle ils se basent. Chacune de ces catégories est illustrée par des exemples repris des schémas réalisés par les élèves. Ces catégories sont exhaustives (tous les schémas peuvent se ranger dans l'une de ces catégories) sans pour autant être exclusives : certains dessins se réfèrent à plusieurs catégories.

1.1. Schémas du type figuratif

a. « Magique »

L'élève dessine l'éolienne et l'ampoule sans présenter de connexion qui relie les deux éléments. On n'y décèle aucune tentative d'explication du fonctionnement. La seule présence de l'éolienne à proximité de l'ampoule permet à celle-ci de fonctionner.

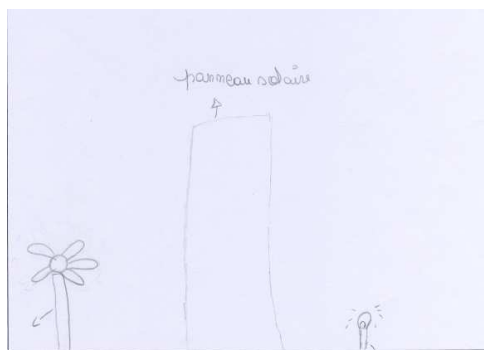


Figure 1 – Schéma du type « magique »

Dans l'exemple proposé, bien qu'un élément extérieur apparaisse (le panneau solaire), l'élève ne propose pas d'explication de fonctionnement. On ne peut comprendre l'incandescence de l'ampoule par l'éolienne, l'ampoule s'allumant « comme par magie ».

b. « Unique »

L'élève ne présente que l'éolienne, l'ampoule n'est pas représenté, malgré les consignes.

³ Cent dix-neuf élèves ont participé à l'expérience relative à l'énergie.

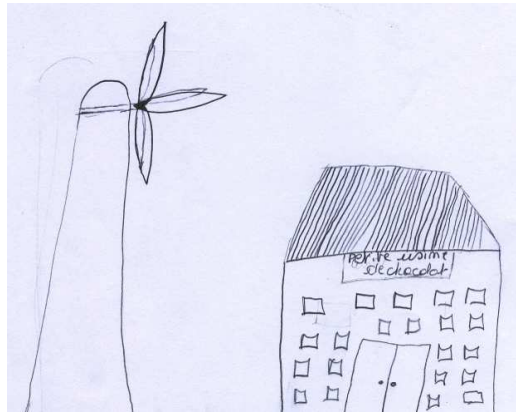


Figure 2 – Schéma du typez « unique »

Bien que l'élève représente certains détails (usine de chocolat), son dessin ne représente que l'éolienne (pas de présence d'ampoule, de connexion...).

c. « Lampe »

L'éolienne et l'ampoule ne forment qu'un seul élément : l'ampoule est attachée à l'éolienne. L'élève n'envisage pas la possibilité d'une connexion autre que proche.

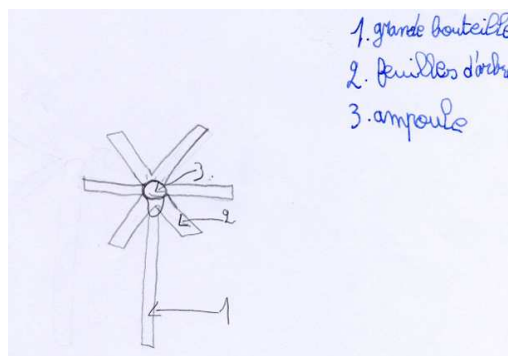


Figure 3 – Schéma du type « lampe »

1.2. Schémas du type explicatif

a. « Axial »

Sur ce type de dessins, l'axe de rotor et l'ampoule sont sur un même niveau, l'élève dessinant même une butte pour assurer cette horizontalité.

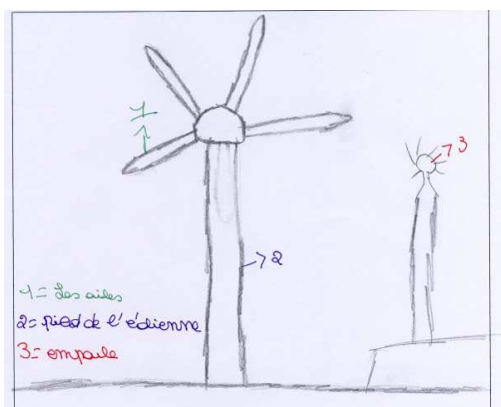


Figure 4 – Schéma du type axial

Bien que la connexion ne soit pas représentée graphiquement, la position de l'axe de rotor et de l'ampoule, sur une même horizontale, donne une explication du fonctionnement de l'éolienne : pour que le transfert d'énergie soit possible, ces deux éléments doivent être à même hauteur. La connexion n'est pas expliquée, mais le fonctionnement est garanti par un niveau. Il ne s'agit pas d'une représentation purement figurative car la position des éléments a toute son importance.

b. « Prise de courant »

L'ampoule est reliée à l'éolienne par un câble ou une prise.

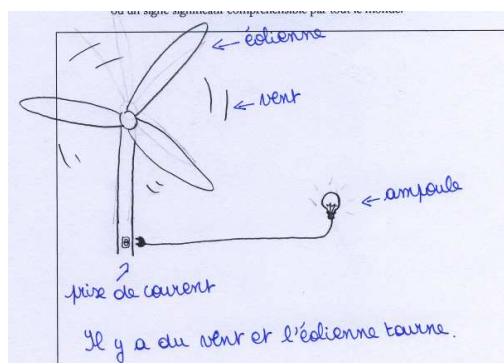


Figure 5 – Schéma du type « prise de courant »

L'élève explique le fonctionnement de l'ampoule et de l'éolienne comme un circuit électrique de maison. L'éolienne crée un courant permettant ainsi d'y connecter directement l'ampoule par une prise. Le seul mouvement de l'hélice produit ce courant.

c. « Expérimental »

Il s'agit d'une représentation expérimentale en ce sens que l'élève dessine l'expérience réalisée. Il ne s'agit plus de représenter l'éolienne telle qu'elle apparaît dans le réel, mais de la dessiner telle qu'elle fut construite en classe.

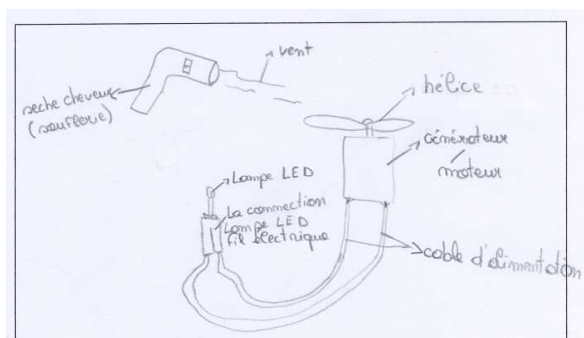


Figure 6 – Schéma du type expérimental

L'élève se réfère à des conceptions empiriques issues du montage réalisé lors de l'expérimentation. Pour la plupart des élèves, le dessin proposé après l'apprentissage est celui-ci. La conception s'est transformée en une conception ancrée dans le quotidien scolaire sans distanciation conceptuelle : l'élève ne transfère pas son savoir empirique en un savoir conceptuel.

d. Proche du modèle attendu

Il s'agit du type de dessins le plus proche du modèle attendu. L'élève a dessiné l'éolienne en y plaçant tous les éléments attendus et en les positionnant convenablement. Certains détails peuvent toutefois manquer mais ce type de dessin est le plus proche du modèle théorique : l'élève a une bonne représentation du concept.

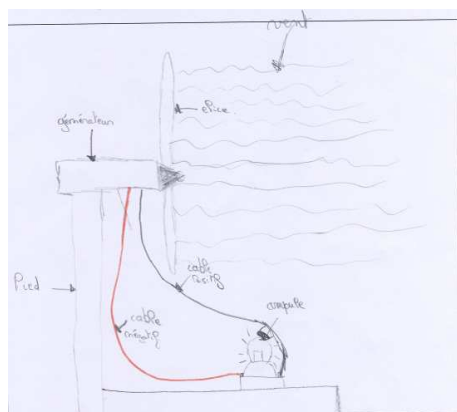


Figure 7 – Schéma proche du modèle attendu

Sur la figure ci-dessus, l'élève a placé les éléments essentiels : hélices, axe de rotor, le générateur, le mat, les connexions et l'ampoule. Bien qu'il ne représente pas l'intérieur du générateur (cf. opérations mentales), on peut voir que les fils électriques y sont raccordés et qu'ils forment un circuit avec l'ampoule. Le dessin pourrait être plus précis, mais il se rapproche fortement du modèle attendu, indiquant que la conception de l'élève est avancée dans la mesure où on peut y déduire des références théoriques mûres.

1.3. Fréquences d'apparition des différents types de dessins

Les différentes catégories présentées, il est intéressant de voir le poids de chacune d'elles. Le tableau qui suit reprend les fréquences d'apparition des différents types de dessin avant et après l'apprentissage.

Tableau 1 – Fréquences des différentes catégories de dessins (N = 119)

| Catégories de dessins | Avant | Après |
|----------------------------------|--------------------|---------------------|
| Magique | 13 (10,93%) | 2 (1,68%) |
| Unique | 11 (9,24%) | 0 |
| Lampe | 6 (5,04%) | 0 |
| Axial | 4 (3,36%) | 0 |
| Prise de courant | 65 (54,62%) | 4 (3,36%) |
| Expérimental | 1 (0,84%) | 100 (84,03%) |
| Correct | 3 (2,52%) | 7 (5,88%) |
| Autres ⁴ | 2 (1,68%) | 0 |
| Pas de conception ou pas de test | 14 (11,76%) | 6 (5,04%) |

La conception majoritairement partagée, avant l'apprentissage, est celle qui a été appelée « prise de courant ». Pour plus de la moitié des élèves interrogés, l'éolienne est un générateur de courant qui par connexions électriques permet d'alimenter une ampoule. Il s'agit d'une conception déjà bien avancée, mais qui demeure incomplète car elle n'envisage pas les changements d'énergie : l'éolienne est une boîte noire à partir de laquelle « on puise » de l'électricité.

Par contre après l'apprentissage, la conception amplement partagée est du type « expérimental » : l'élève se raccroche à son vécu et sa conception y est pleinement ancrée. L'élève comprend et conçoit le fonctionnement de l'éolienne, mais n'en a pas encore une représentation davantage théorique.

⁴ Cette catégorie reprend les dessins présentant plusieurs conceptions comme, par exemple, « magique » et « axial ».

2. Electricité (fonctionnement d'un jeu d'électro)

Les élèves⁵ ont plutôt utilisé le dessin pour représenter le jeu d'électro, alors qu'un schéma leur était demandé. Comme pour l'éolienne, ces dessins peuvent être subdivisés en deux ensembles : les dessins figuratifs sur lesquels l'aspect extérieur du jeu est montré et les dessins explicatifs sur lesquels une tentative de représentation d'un circuit électrique est proposée. La détermination des catégories au sein de ces deux ensembles se base sur les mêmes principes que les catégories réalisées pour l'éolienne : exhaustivité, mais pas d'exclusivité.

2.1. Schémas du type figuratif

Cet ensemble reprend les dessins sur lesquels aucune tentative de représentation d'un circuit électrique n'est proposée. L'élève a dessiné les parties extérieures de l'électro.

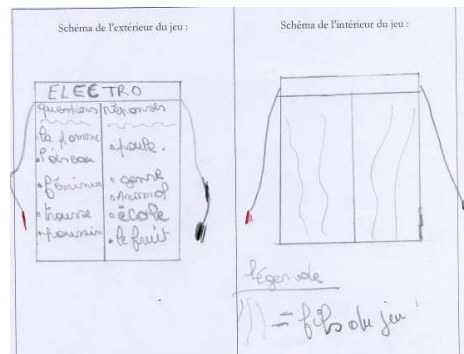


Figure 8 – Schéma d'un électro n'envisageant pas de représentation d'un circuit électrique

L'élève dessine l'avant et l'arrière du jeu. La conception du fonctionnement du jeu d'électro est superficielle dans le sens où il ne s'attache actuellement qu'à l'aspect extérieur de l'électro. Sa conception du circuit électrique est inexistante.

2.2. Schémas de type explicatif

a. « Arborescence »

Sur ce type de schémas, le circuit électrique a son origine dans un noyau (la pile) d'où partent plusieurs ramifications ou connexions. La pile, possédant de l'énergie, envoie alors le courant jusqu'aux extrémités des connexions.

⁵ Cent vingt-trois sujets ont participé à l'expérience.

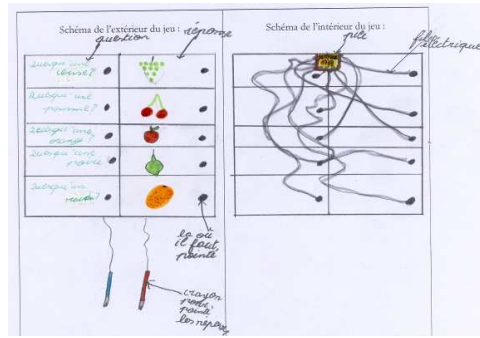


Figure 9 – Schéma en arborescence

b. « Nervures »

Dans ce type de schéma, le circuit électrique est envisagé comme un entrelacement de fils d'où partent quelques ramifications. Le courant circule également d'un noyau vers des extrémités comme pour la conception précédente (en arborescence). Toutefois, elles se distinguent les unes des autres par le fait que l'élève respecte dans ce type de schémas des sens de conduction : vertical ou horizontal et non dans tous les sens possibles.

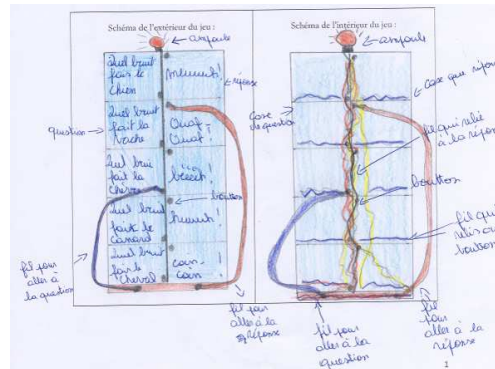


Figure 10 – Circuit électrique en nervures

c. « Carte routière »

Dans la représentation « carte routière », le circuit électrique est présenté comme « un ensemble de routes » qui se croisent et pour lesquelles aucune origine ou noyau central ne sont prévus.

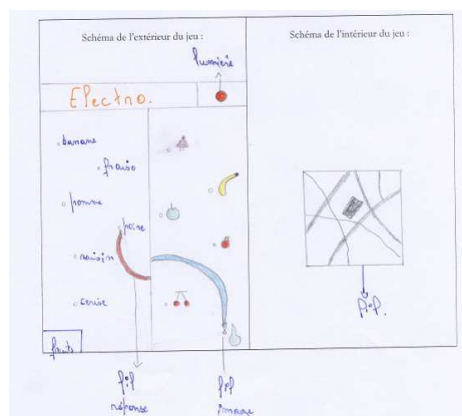


Figure 11 – Schéma à connexion « carte routière »

d. Schéma proche du modèle attendu

Ce type de schémas, bien qu'il puisse manquer de précisions ou contenir quelques erreurs, s'apparente au modèle attendu. La conception est plus proche de concept théorique. Cette catégorie ne permet pas de préciser si la conception est viable ou pas. Une conception peut être proche du modèle attendu en termes de référents mais ne pas être viable pour autant.

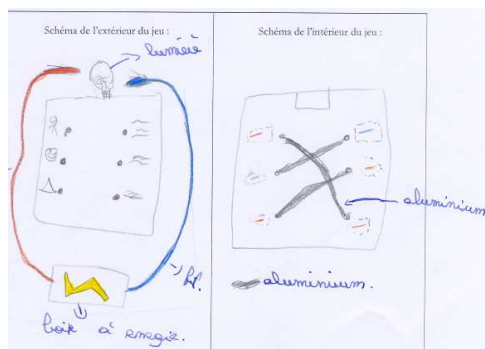


Figure 12 – Schéma proche du modèle attendu

2.3. Fréquences d'apparition de différents types de dessins

Le tableau 2 reprend les fréquences d'apparition des différents types de dessin avant et après apprentissage.

Tableau 2 – Fréquences des différentes catégories de dessins (N = 123)

| Catégories de dessins | Avant | Après |
|--------------------------|--------------------|--------------------|
| Figuratif | 46 (37,4%) | 8 (6,5%) |
| Arborescence | 28 (22,76%) | 0 |
| Nervures | 8 (6,5%) | 1 (0,8%) |
| Carte routière | 11 (8,94%) | 2 (1,63%) |
| Proche du modèle attendu | 11 (8,94%) | 99 (80,49%) |

Les conceptions relevées avant l'apprentissage sont variables et se partagent, pour la moitié des élèves, entre une conception figurative (aucun circuit n'est envisagé) et une conception du circuit électrique comme un noyau d'où partent plusieurs connexions (« arborescence »).

Par contre, en ce qui concerne les conceptions après l'activité d'apprentissage, celles-ci se sont transformées et pour quatre-vingts pour cent des élèves, la conception est proche du modèle théorique attendu.

Proche, heureusement, mais l'usage d'images dans la phase d'apprentissage peut néanmoins avoir des effets, positifs ou négatifs, sur l'appropriation de concepts plus élaborés. Qu'en est-il ?

Deuxième partie : Analogies et phénomènes électriques : que choisir ?

1. L'analogie, légitime ou pas ?

Les phénomènes électriques ne sont pas visibles à l'œil nu, les sensations qu'ils engendrent sont généralement surprenantes, et leur élucidation théorique a été longue à émerger, mettant en œuvre des concepts plus élaborés que leurs précurseurs mécaniques. C'est donc très naturellement que les premières explications proposées dans le cadre d'une initiation à l'électricité s'appuient sur l'une ou l'autre analogie, de manière à établir un lien avec une certaine spontanéité intuitive, mais, le cas échéant, au prix de distorsions théoriques qui risquent alors de se fixer durablement. Nous voudrions discuter ces médailles et leur revers à propos des analogies utilisées pour parler d'électricité.

Bachelard (1980, p. 80) y voyait une trace des conceptions préscientifiques : « *Précisément, la science moderne se sert de l'analogie de la pompe pour illustrer certains caractères des générateurs électriques ; mais c'est pour tâcher d'éclaircir les idées abstraites de différence de potentiels, d'intensité de courant. On voit ici un vif contraste des deux mentalités : dans la mentalité scientifique, l'analogie hydraulique joue après la théorie. Elle joue avant dans la mentalité préscientifique* ». Cette affirmation est cependant démentie par la reconstitution du trajet intellectuel de savants incontestables, dont notamment J.C. Maxwell, fondateur de l'électromagnétisme moderne. Celui-ci a pensé son travail théorique en imaginant une construction mécanique combinant engrenages, poulies, et autres machines, engins tous

étrangers à son objet d'étude. Voici ce qu'écrivait ironiquement en 1893 le physicien français Pierre Duhem (1997), aussi historien des sciences, à propos d'un traité d'électromagnétisme, signé par Oliver Lodge et fidèle à la présentation de Maxwell lui-même : « *Voici un livre destiné à exposer les théories modernes de l'électricité, à esquisser une théorie nouvelle ; il n'y est question que de cordes qui se meuvent sur des poulies, qui s'enroulent autour de tambours, qui traversent des perles, qui portent des poids ; de tubes qui pompent de l'eau, d'autres qui s'enflent et se contractent ; de roues dentées qui engrènent les unes avec les autres, qui entraînent des crémaillères ; nous pensions entrer dans la demeure paisible et soigneusement ordonnée de la raison déductive ; nous nous trouvons dans une usine* ».

On accordera cependant à Bachelard que toutes les analogies ne jouent pas sur le même registre : alors qu'il en est qui ne sont en effet qu'illustration naïve, d'autres s'appuient au contraire sur une profonde similitude conceptuelle – dans le cas qui nous occupe, la similitude concerne l'énergie potentielle et la notion de débit. Tant qu'à étayer leurs constructions mentales par des images qui parlent à leurs destinataires, les didacticiens peuvent s'autoriser d'illustres prédécesseurs, montrant bien que le recours à l'analogie ne relève pas seulement de la pédagogie.

Notre conviction est que l'analogie hydrostatique s'avère féconde pour comprendre les lois des phénomènes électriques, à condition qu'elle soit posée avec précision ; ses limites, qui sont réelles et qu'il importe de dessiner, se situent bien au-delà des nécessités d'une compréhension initiale.

2. Quelques modèles

L'excellent mémoire « *Electricité et analogie hydraulique* » (Jean-François Pochon, 2003, p. 17) présente une liste de modèles « *glanés ça et là au cours de mes pérégrinations littéraires, au cours de ma formation et sur internet* », écrit l'auteur, qui, bien qu'il parle de « *catalogue quelque peu hétéroclite* », fait assez bien le tour de la question. Son catalogue recoupe d'ailleurs, en les complétant, les propositions de modèle reprises dans la littérature ; on peut en effet le qualifier d'hétéroclite au sens où la précision des analogies est fortement variable.

- Modèle « *bille et tube* » (Aunquebon, 2001) : une bille est placée dans un tube, et se déplace dès qu'on incline le tube.

- Modèle « *pompe et réservoir* » (Robardet & Guillaud, 1997) : le circuit électrique est assimilé à une circulation d'eau. La circulation relie 4 éléments : un réservoir A placé en hauteur, qui alimente une turbine placée plus bas. Au sortir de la turbine, l'eau est recueillie dans un autre réservoir B, et une pompe renvoie l'eau de B vers A, en maintenant constant le niveau dans les 2 réservoirs.

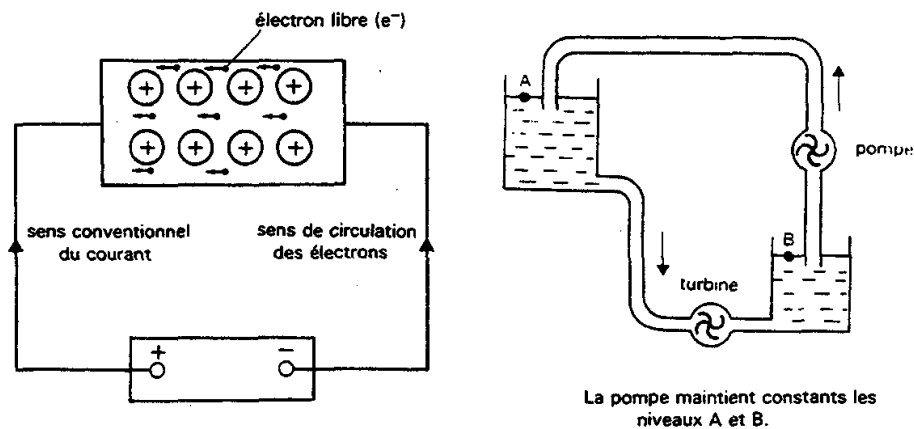


Figure 13 – Modèle « pompe et réservoir » (Robardet & Guillaud, 1997)

- Modèle « chaîne de vélo » (Courtilot & Ruffenach, 2004) : le circuit électrique est comparé à une chaîne de vélo, placé entre le plateau du pédalier et le pignon de la roue motrice. Les maillons de la chaîne sont censés représenter les porteurs de charge électrique.

- Modèle « transport de charbon » (Cosgrove, 1995) : des camions qui transportent du charbon se suivent ; chaque camion qui arrive à destination y déverse sa charge de charbon, puis repart à vide vers le lieu de production du charbon où il se recharge, et ainsi de suite.

- Modèle du « train » (Joshua & Dupin, 1989) : assez proche du modèle chaîne de vélo, au sens où on parle d'un train jouet, qui circule sur un circuit fermé, et dont la longueur est telle que le train occupe toute la longueur du circuit. Des ouvriers poussent les wagons qui doivent plus loin vaincre une force de frottement.

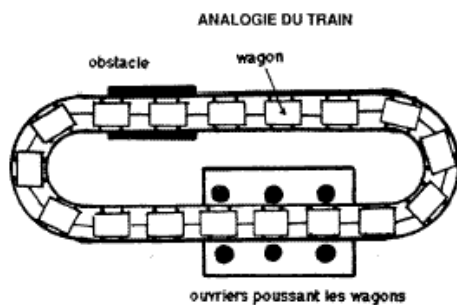


Figure 14 – Modèle « train » (Joshua & Dupin, 1989)

- Modèle « chaîne humaine » (Giordan, Guichard & Guichard, 2001) : toujours la même idée, comme pour le transport de charbon, mais les camions sont remplacés par une chaîne humaine. Une image très proche est obtenue en parlant d'une ronde d'enfants,

éventuellement organisée dans une cour de récréation, où un rétrécissement du passage symbolise une résistance.

- Modèle « *réservoir avec tuyau* » (Petit⁶) : un réservoir rempli d'eau est placé en hauteur, il est percé d'un trou auquel on raccorde un tuyau descendant qui se termine par une vanne régulant le débit à la sortie.

- Modèle « *surfeur* » (Lachapelle, 1998) : ingrédients, une piste enneigée parsemée d'obstacles divers, un remonte-pente, et des surfeurs. La piste est le conducteur, les surfeurs les électrons, et le remonte-pente le générateur.

Deux modèles plus ambitieux tentent une analogie quantitative, et pas seulement qualitative : le premier, de type hydraulique, est ancien et dû à Henri Poincaré (1899), et met en scène un piston placé dans le tube qui relie deux réservoirs d'eau. Lorsque le piston refoule de l'eau d'un réservoir vers l'autre, il peut surélever le niveau d'eau de l'un par rapport à l'autre en fournissant du travail, travail qui sera récupéré lorsque le piston se laisse aller sous l'effet du mouvement spontané de l'eau poussée par son poids, rétablissant l'équilibre entre les réservoirs. Toujours dans le registre hydraulique, le manuel « *Physique* » (Kane et Sternheim, 2004) propose une scénette bucolique : un parc est installé sur une colline, une fontaine placée au sommet de la colline. Au sortir de la fontaine, l'eau est canalisée et serpente vers le bas de la colline, dans un parcours où les frottements sont importants, elle est ensuite recueillie au bas de la colline dans un réservoir, et une pompe renvoie finalement l'eau du réservoir vers la fontaine. Il s'agit donc d'un circuit fermé.

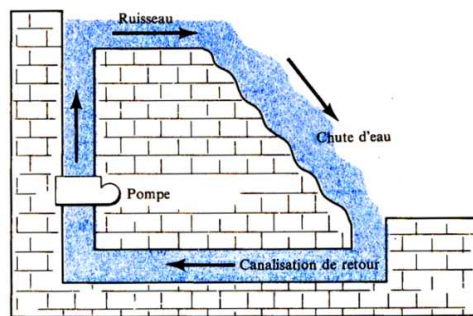


Figure 15 – modèle de Kane et Sternheim (2004)

3. Les lois de Kirchhoff

On constatera que tous ces modèles s'intéressent en fin de compte aux deux lois de Kirchhoff, l'une établissant que les variations successives du potentiel électrique, lorsqu'on parcourt un circuit fermé, se compensent de manière à retrouver, une fois la boucle bouclée, le niveau de potentiel d'où on est parti, et l'autre qui assure la conservation du courant électrique à chaque connexion ou bifurcation. Certains modèles illustrent la première loi (bille et tube, réservoir

⁶ <http://www.savoir-sans-frontières.com/download/fre/quelquesamperes.htm>

avec tuyau, surfeur, modèle de Poincaré), d'autres la seconde (chaîne de vélo, transport de charbon, train, chaîne humaine, surfeur), les plus ambitieux combinant les deux (pompe et réservoir, Kane et Sternheim).

Du point de vue qui nous occupe, la seconde loi est sans doute celle qui cristallise le plus grand intérêt : c'est elle qui sous-tend l'affirmation qu'un circuit doit être fermé pour conduire du courant. Cette idée est en effet centrale dans les modèles « *pompe et réservoir* », « *chaîne de vélo* », « *train* », et dans les modèles hydrauliques en circuit fermé. Elle est présente (mais moins précisément) dans les modèles transport de charbon et surfeur.

4. La métaphore hydraulique

Dans les modèles hydrauliques, le courant est légitimement comparé au débit d'un fluide incompressible. L'idée erronée que « *le courant s'use en passant dans une lampe* » (Lévy-Leblond & Butoli, 1983) est sans conteste en opposition flagrante avec la conservation du débit le long d'un écoulement, à condition de bien préciser que les tuyaux dans lesquels l'eau circule doivent être pleins d'eau (pas de bulles), de sorte que si l'on isole par la pensée un volume correspondant à une partie de l'écoulement, volume limité par une section d'entrée, une section de sortie, et le tuyau lui-même entre les deux sections, le liquide qui pénètre ce volume ne peut le faire que si le même volume d'eau en sort simultanément, de manière à faire la place au liquide entrant. Les débits entrant et sortant sont donc égaux, et comme les sections d'entrée et de sortie ont été tracées arbitrairement, le débit est le même tout le long de l'écoulement. Corollaire : si un bouchon empêche le passage de l'eau en un point, le débit est nul en ce point, et il est donc nul partout, il n'y a pas d'écoulement.

L'autre idée que le modèle hydraulique illustre parfaitement est celle que le fluide qui circule (l'eau) est présent dans le circuit avant même que le courant ne soit activé – les électrons mobiles sont présents dans le conducteur même si aucun courant ne le parcourt. On comprend donc bien ainsi qu'un générateur n'est pas une machine qui crée des charges électriques.

Cependant, un élément de la comparaison nécessite une légère prise de distance : contrairement à l'eau, qui peut, en cas de « fuite » dans un tuyau, s'écouler dans l'environnement du tuyau, et le laisser vide, les électrons sont incapables de quitter le câble conducteur. Il convient donc de préciser que l'image hydraulique fonctionne bien en régime stationnaire : une coupure du câble conducteur empêche immédiatement le passage du courant, alors qu'une coupure du tuyau d'écoulement interrompt immédiatement la circulation de l'eau dans l'ensemble du circuit, en particulier en aval de la coupure, mais, stricto sensu, ne l'annule au point de coupure et en amont qu'une fois le tuyau vidé.

La conservation du débit le long de l'écoulement, et celle du courant le long du circuit électrique débouche sur une autre difficulté, souvent relevée : si le courant est le même partout, comment se fait-il que deux lampes différentes insérées l'une derrière l'autre, en série dans le circuit, ne brillent pas également ? Réponse claire suggérée par l'analogie hydraulique : si la lampe est représentée par un moulin entraîné par le courant d'eau, et que la

luminosité de la lampe est assimilée à la vitesse de rotation de l'axe du moulin (pourquoi pas ?), on insistera sur l'idée que c'est le débit qui est conservé – et le même écoulement, avec son débit unique, est associé à une vitesse d'écoulement plus élevée lorsque le conduit se rétrécit, et à une vitesse plus faible lorsqu'il s'élargit. La même idée émerge d'ailleurs du modèle chaîne de vélo : si le plateau au pédalier et le pignon sur l'axe de la roue ne comptent pas le même nombre de dents, le plateau et le pignon ne tourneront pas à la même vitesse angulaire.

5. Macro/microscopique

De manière plus générale, et en pensant à l'introduction future d'une représentation microscopique du courant électrique, appuyée sur l'identification des électrons comme porteurs de charge électrique, on peut se demander si la représentation hydraulique, le fluide transporté étant donc un milieu continu, ne constitue pas un obstacle dès lors qu'on considère le rôle des électrons. A priori, on pourrait être tenté de craindre l'obstacle, dans la mesure où les électrons sont caractérisés comme très légers et de volume propre théoriquement nul : l'ensemble des électrons mobiles est donc très loin de pouvoir être assimilé à un fluide incompressible, on rencontre d'ailleurs couramment l'expression « gaz d'électrons libres » à leur sujet dans les traités de physique du solide. Mais l'obstacle peut lui-même être retourné en outil enrichissant la compréhension : la difficulté à accumuler des électrons dans un conducteur est une indication très parlante de l'amplitude colossale des interactions coulombiennes – dès qu'un déséquilibre de charge apparaît localement, notamment dès que plusieurs électrons mobiles se retrouvent au voisinage d'un noyau positif, avec pour conséquence une violation de la neutralité électrique locale, les forces mises en jeu par ce déséquilibre sont tellement importantes que le déséquilibre est presque instantanément résorbé. C'est la contrainte de neutralité électrique globale du conducteur (même localement, les charges positives et négatives doivent s'équilibrer) qui explique le comportement « fluide incompressible » de l'ensemble des électrons mobiles. La même prise en compte de l'énormité des interactions électrostatiques fournit du même coup une réponse au « pourquoi » qu'appelle l'affirmation posée plus haut selon laquelle les électrons peuvent facilement se mouvoir dans un conducteur, mais pas le quitter.

6. Une analogie rien moins que superficielle

Le mémoire cité plus haut était solidement l'analogie hydraulique. Comme l'écrit Jean-François Pochon (2003, p. 47), « *sous les affirmations de la similitude des deux domaines se cache une réelle identité physique de comportement, dans les conditions de réalisation des objets cités plus haut* ». Le plaidoyer est d'autant plus convaincant que l'auteur propose une version expérimentale, qui va bien au-delà de la justification de représentations analogiques. Le circuit est matériellement modélisé par une circulation d'eau canalisée dans des tuyaux, où la résistance électrique est représentée par une chicane, en pratique un galet percé de trous, le générateur par une pompe, et, trouvaille originale, un condensateur par un tube transparent

obturé par un piston étanche coulissant dans le tuyau, appuyé de part et d'autre sur deux ressorts. Le courant électrique (i) correspond au débit d'eau qui caractérise l'écoulement (Q), et la différence de potentiel entre deux points du circuit (ΔU) correspond à la différence de pression entre deux points de l'écoulement (ΔP). La loi d'Ohm établit une relation linéaire entre courant et différence de potentiel ($i = \Delta U/R$), où la résistance R est déterminée par la loi de Pouillet ($R = \rho_e l/S$, ρ_e étant la résistivité électrique du conducteur de longueur l et de section S) ; la même relation linéaire est typique de la loi de Poiseuille ($Q = \Delta P/R_f$, où, en écoulement laminaire, $R_f = 8\eta l/(\pi r^4)$ dans un tuyau de rayon r et de longueur l , η étant la viscosité du fluide en mouvement). L'analogie s'approfondit si on s'intéresse à la puissance \mathcal{P} nécessaire pour alimenter le courant ou pour entretenir l'écoulement dans l'élément considéré : $\mathcal{P} = \Delta U.i$, pour le circuit électrique, et $\mathcal{P} = \Delta P.Q$ pour l'écoulement du fluide. C'est exactement la même correspondance qui est exploitée dans la version théorique développée dans le manuel de Kane et Sternheim (2004).

L'élévation du potentiel électrique assurée par le générateur est comparée, dans la version théorique, à une élévation au sens littéral du terme (on monte le fluide). On admettra facilement qu'augmenter l'altitude du fluide équivaut à augmenter son énergie potentielle dans le champ de la pesanteur, mais on notera que la mise en parallèle des deux phénomènes va au-delà de la simple analogie. La différence de potentiel est en effet définie comme la variation d'énergie potentielle électrique par unité de charge électrique transportée ; la définition élémentaire de l'altitude à laquelle se trouve un élément de fluide est a priori plus immédiate, mobilisant simplement notre perception de l'espace. Mais on peut noter que l'altitude est aussi l'énergie potentielle de pesanteur par unité de masse, moyennant l'adoption d'un système d'unités adéquat. La correspondance est alors forte : dans les deux cas, on parle de l'énergie potentielle par unité de matière en interaction, cette matière en interaction étant la charge électrique d'un côté, et la masse de l'autre.

La correspondance bénéficie donc d'une profondeur théorique considérable. Toutefois, nous croyons important d'insister précisément sur le poids d'abstraction qui la fonde : il faut affirmer fortement qu'un générateur électrique, lorsqu'il élève le potentiel électrique d'un électron, ne l'élève pas au sens spatial de l'expression – il ne le porte pas à une altitude plus élevée, gare à la confusion !

Il faut aussi rester conscient que le bénéfice de l'appel à l'analogie hydraulique – familière, les problèmes de robinet appartenant pour toujours à la mythologie de la pédagogie de l'enseignement primaire – se perd au fur et à mesure que les considérations relevant de l'approche hydrodynamique se font plus sophistiquées. Au-delà d'une présentation élémentaire, les théories des écoulements fluides deviennent vite elles-mêmes compliquées !

Alors, peut-on faire appel sans aucune réserve mentale à l'analogie hydraulique, dont on aura compris qu'elle bénéficie de notre part d'un appui résolu ?

Nous avons déjà signalé une première difficulté, qui tient à l'opposition entre milieu continu et approche microscopique des conducteurs électriques. On peut aussi ajouter que l'analogie

hydraulique est d'un intérêt nettement plus limité si l'on vise une initiation à l'électromagnétisme moderne (moderne depuis Maxwell, tout est relatif), à la notion de champ qui y joue un rôle central, et au couplage électricité-magnétisme. Mais cette approche n'est censée être effectuée que dans un second temps, et tant qu'on s'intéresse aux phénomènes électriques, le couplage électricité-magnétisme ne change la donne décrite ici qu'en cas de phénomènes électromagnétiques alternatifs, et pour des fréquences d'oscillation bien plus élevées que les 50 Hertz de notre réseau de distribution d'électricité.

Conclusion

Si l'étude des conceptions mentales des élèves, par le biais d'une analyse de schémas ou dessins, n'est pas suffisamment complète, l'outil permet cependant de récolter une information exploitable : première approche des différentes conceptions des élèves quant aux notions d'énergie et d'électricité. Cet article, issu d'une recherche, avait pour objectif d'exposer les conceptions des élèves par rapports à ces deux thèmes afin d'informer les enseignants pour qu'ils puissent adapter davantage leurs séquences d'enseignement aux élèves.

On pourrait dire que la conception de la majorité des élèves en matière d'énergie [éolienne] passe d'une conception fonctionnelle (l'éolienne a une fonction, mais dont on ne sait expliquer les mécanismes sous-jacents) à une conception expérimentale ancrée dans le quotidien de l'élève.

Pour l'électricité [jeu « électro »], les conceptions pour plus de la moitié des sujets varient d'un stade exclusivement figuratif (je dessine ce que je vois) ou d'un stade de circuit électrique en « arborescence » à un stade proche du modèle attendu, mais qui n'est pas encore viable.

Le bilan que nous tirons de l'examen des avantages et des inconvénients de l'usage de l'analogie hydraulique est sans ambiguïté, les avantages l'emportent nettement sur les inconvénients. L'analogie éclaire puissamment la nécessité de fermer un circuit pour qu'il puisse être parcouru par un courant, elle met bien en évidence que le mouvement investigué concerne en une fois l'ensemble du circuit, elle ouvre une voie vers la compréhension de la notion de potentiel électrique. Quant à ses limites, qui sont réelles, elles se situent suffisamment loin au-delà d'une approche élémentaire de l'électricité pour qu'on puisse être rassuré : on ne dresse pas d'obstacle épistémologique en travers du chemin qui mènera, si le parcours scolaire se poursuit dans cette direction, vers une confrontation avec l'électromagnétisme.

Bibliographie

- Astolfi, J.-P. & Develay, M. (1989). *La didactique des sciences*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Astolfi, J.-P., Darot, E., Ginsburger-Vogel, Y. & Toussaint, J. (1997). *Pratiques de formation en didactique des sciences*. Bruxelles : De Boeck Université.
- Auquebon, D. (2001). *Traité d'électricité pour radio amateur*. Sur le site : <http://perso.wanadoo.fr/f6crp/elec/cc/ui.htm>.
- Bachelard, G. (1980). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris : Vrin.
- Bachelard, G. (1999). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris : Vrin.
- Bertrand, Y. (1998). *Théories contemporaines de l'éducation*. Montréal : Editions Nouvelles.
- Coche, F., Genot, P., Kahn, S., Rey, B. & Robin, F. (2005). *Pratique pédagogique à l'école primaire et réussite scolaire des élèves venant de milieux défavorisés (recherche fiancée par la Communauté française)*. Université libre de Bruxelles, Service des Sciences de l'Education.
- Courtillot, D., Ruffenach, M. (2004). *Enseigner les sciences physiques*. Lassay-les-Châteaux : Bordas.
- Cosgrove, M. (1995). *A study of science-in-the-making as students generate an analogy for electricity*. Sur le site: <http://www.education.uts.edu.au/lsrcd/research/cos951.htm>.
- Deldime, R. & Vermeulen, S. (1980). *Le développement psychologique de l'enfant*. Bruxelles : De Boeck.
- Demeuse, M., Gillis, P., Dehon, A., Demierbe, C., Derobertmeasure, A., Lo Bue, F. & Mélin, S. (2008). *Développement d'outils de diagnostic et de remédiation immédiate au travers d'activités scientifiques au premier degré de l'enseignement secondaire* (Rapport final 1^e année – mars 2008). Université de Mons Hainaut, Institut d'Administration scolaire, service de Méthodologie et Formation, Service de Physique expérimentale et biologique, Carré des Sciences, non publié.
- Duhem, P. (1997). *La théorie physique, son objet, sa structure*. Paris : Vrin.
- Fourez, G. (2001). *La construction des sciences*. Bruxelles : De Boeck Université.
- Giordan, A. (sous la dir. de), Martinand, J.-L., Astolfi, J.-P., Rumelhard, G., Coulibaly, A., Develay, M., Toussaint, J. & Host, V. (1987). *L'élève et/ou les connaissances scientifiques*. Berne : Peter Lang.
- Giordan, A. & de Vecchi, G. (1990). *Les origines du savoir. Des conceptions des apprenants aux concepts scientifiques*. Lausanne : Delachaux et Niestlé.

- Giordan, A., Guichard, F. & Guichard, J. (2001). *Des idées pour apprendre*. Paris : Delagrave.
- Jarrosson, B. (1992). *Invitation à la philosophie des sciences*. Paris : Seuil.
- Joshua, S. & Dupin, J.-J. (1989). *Représentations et modélisations*. Berne : Peter Lang.
- Joshua, S. & Dupin, J.-J. (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Kane, J. & Sternheim, M. (2004). *Physique*. Paris : Dunod.
- Lachapelle, Ch. (1998). Sur le site : <http://mendeleviev.cyberscol.qc.ca/carrefour/theorie/planche.html>.
- Larochelle, M. & Désautels, J. (1992). *Autour de l'idée de science*. Bruxelles : De Boeck Université.
- Lévy-Leblond, J.-M. & Butoli, A. (1983). *La physique en questions. Electricité et magnétisme*. Paris : Vuibert.
- Mathy, Ph. (2006). *Donner du sens aux cours de sciences*. Bruxelles : De Boeck.
- Montangero, J. & Maurice-Naville, J. (1994). *Piaget ou l'intelligence en marche*. Liège : Mardaga.
- Petit, J.-P. *Pour quelques ampères de plus*. Sur le site : <http://www.savoir-sansfrontieres.com/download/fre/quelquesamperes.htm>.
- Pochon, J.-F. (2003). *Electricité et analogie hydraulique*. Institut Suisse de Pédagogie pour la formation professionnelle. Mémoire disponible sur le site : <http://cpnv.educanet2.ch/electrojfp/Memoire%20professionnel.PDF>.
- Poincaré, H. (1899). Paris. Sur le site : <http://ebookslib.com/index.html?a=s&book=2295>. *La théorie de Maxwell et des oscillations hertziennes*.
- Robardet, G & Ruffenach, M. (2004). *Enseigner les sciences physiques*. Paris : Bordas.
- Verhaeghe, J.-C., Wolfs, J.L., Simon, X. & Compère, D. (2004). *Pratiquer l'épistémologie. Un manuel d'initiation pour les maîtres et formateurs*. Bruxelles : De Boeck.