CLERMONT UNIVERSITE – UNIVERSITE BLAISE PASCAL

UFR de Psychologie, Sciences Sociales et Sciences de l'éducation
École Doctorale des Lettres, Sciences Humaines et Sociales (ED 370)

THESE de DOCTORAT

Sciences de l'Éducation
Didactique des Sciences Physiques et Chimiques

Étude des conditions d'efficacité d'une analogie mécanique instrumentée pour l'enseignement de l'électrocinétique en terminale scientifique

Présentée publiquement à Clermont-Ferrand le 3 décembre 2015 par :

Clotilde MERCIER – DEQUIDT

Laboratoire ACTé (EA n°4281) – Clermont Université

Thèse soutenue devant le jury composé de :

Cécile de HOSSON	Université Paris 7 (Rapporteur)
Marisa MICHELINI	Université d'Udine, Italie
Ludovic MORGE	Université Blaise Pascal – Clermont (Directeur de thèse)
Valérie MUNIER	Université de Montpellier
Patrice VENTURINI	Université Jean Jaurès – Toulouse (Rapporteur)

La foi n'est qu'une superstition et une folie si elle n'a la raison pour base, et l'on ne peut supposer ce qu'on ignore que par analogie avec ce qu'on sait. Définir ce qu'on ne sait pas, c'est une ignorance présomptueuse ; affirmer positivement ce qu'on ignore, c'est mentir.

Éliphas Lévi

Remerciements

Je tiens, en premier lieu, à remercier Ludovic Morge, mon directeur de thèse, chercheur passionné et toujours curieux. Ses qualités humaines m'ont permis de réaliser ce travail dans d'excellentes conditions, toujours disponible et compréhensif, des qualités qui n'ont pas de prix pour avancer sereinement et agréablement.

Mes remerciements s'adressent également à Valérie Munier et Marisa Michelini qui m'ont fait l'honneur de participer à mon jury de thèse, et tout particulièrement à Patrice Venturini et Cécile de Hosson qui ont bien voulu en être les rapporteurs.

Je remercie les recteurs de l'académie de Clermont-Ferrand, Gérard Besson et Marie-Danièle Campion, qui ont accepté que nous réalisions des prises de données dans les établissements de l'académie.

Je remercie également les deux inspecteurs d'académie-inspecteurs pédagogiques régionaux de physique-chimie, Mario Taurisano et Josiane Lévy, qui, en plus de m'avoir accordé leur confiance en tant qu'enseignante de physique-chimie, ont contribué à la diffusion de cette recherche auprès des enseignants de l'académie.

Je remercie Julie Pironom, statisticienne du laboratoire ACTé, pour la communication de sa bonne humeur, son soutien, mais aussi pour son aide et ses précieux conseils pour les analyses statistiques de mes données.

Je voudrais aussi remercier Céline Caillot et Pierre Juillard qui m'ont aidée à réaliser les entretiens avec les élèves.

J'ai apprécié le concours d'Olivier Piotte pour la conception du guide d'utilisation et je l'en remercie.

Je remercie les enseignants qui ont accepté de participer à cette recherche en utilisant ou non l'analogie mécanique avec leurs élèves.

Enfin, je remercie infiniment ma famille qui m'a soutenue, a fait preuve de patience et a tout fait pour m'aider à mener à bien ce projet.

Table des matières

Introduction....7

Chapitre 1. Cadre théorique....9
1.1. Les conceptions....10
1.2. L'analogie....14
1.2.1. Les analogies en électrocinétique....16
1.3. Cognition incarnée et image mentale....17
1.4. Conception d'un instrument didactique – Point de vue ergonomique....18

Chapitre 2. Problématique et questions de recherches....22

Chapitre 3. Analyse épistémique et didactique d'une nouvelle analogie pour enseigner l'électrocinétique....25
3.1. Analyse épistémique de la nouvelle analogie....26
3.1.1. Description de l'artefact....26
3.1.2. Analogies entre grandeurs....27
3.1.3. Dipôles électriques et analogues mécaniques....28
3.1.4. Temps caractéristiques....34
3.2. Limites de l'analogie....35
3.3. Analyse a priori de l'intérêt didactique de l'analogie à dépasser les conceptions en électrocinétique : caractères perceptibles des concepts du domaine source....36
3.3.1. Le déplacement de la corde : moyen pour travailler les conceptions unifilaire, à courants antagonistes et usure du courant....36
3.3.2. Caractère perceptible d'un phénomène systémique pour lutter contre le raisonnement séquentiel....36
3.3.3. Caractère perceptible des propriétés du générateur de tension pour lutter contre la conception « la pile délivre toujours la même intensité »....37
3.3.4. Caractères perceptibles de la tension et de l'intensité pour mieux les différencier....37
3.3.5. Caractère perceptible de l'échauffement de la corde sur les doigts pour lutter contre la substantialisation de l'énergie....37
3.4. Conclusion....38

Chapitre 4. Méthodologie....39
4.1. Premier corpus : Questionnaires élèves....40
4.1.1. Conception des questionnaires....40
4.1.2. Validation des questionnaires....42
4.1.3. Échantillon avec artefact....48
4.1.4. Échantillon sans artefact....50
4.1.5. Conditions de passation des questionnaires....50
4.2. Deuxième corpus : Recueil auprès des enseignants....51
4.2.1. Présentation de l'artefact aux enseignants....51
4.2.2. Enregistrement de cours....51
4.2.3. Entretien après enseignement avec les enseignants....52
4.3. Troisième corpus : Entretiens élèves....52

Chapitre 5. Quelles sont les connaissances en électricité des élèves de terminale S ?....55

5.1. Difficultés en électricité des élèves en début de terminale S, à partir des questionnaires.....56
5.2. Difficultés des élèves, n'ayant pas eu de cours avec l'instrument, en électricité, en fin de terminale S, à partir des questionnaires.....58
5.3. Difficultés en électricité des élèves n'ayant pas eu cours avec l'instrument en fin de terminale S à partir des entretiens.....62
5.3.1. Données utilisées et méthode d'analyse.....62
5.3.2. Résultats.....62
5.3.3. Conclusion partielle sur les difficultés en électricité observées lors des entretiens avec les élèves de terminale S.....66
5.4. Conclusion sur les connaissances des élèves avant et après enseignement sans artefact de l'électricité en terminale S.....66

Chapitre 6. Quelle est l'appropriation du domaine source par les élèves ?.....67
6.1. Le domaine source est-il plus compréhensible que le domaine cible ?.....68
6.1.1. Hypothèses.....68
6.1.2. Prévisions et origines possibles des erreurs des élèves.....68
6.1.3. Comparaison des scores moyens obtenus aux questionnaires en électricité et en mécanique.....70
6.1.4. Étude détaillée question par question en mécanique et en électricité.....72
6.1.5. Conclusion partielle à partir de l'analyse des résultats obtenus à l'aide des questionnaires : le domaine source (mécanique) est-il plus facilement compréhensible par les élèves que le domaine cible (électricité) ?.....76
6.2. Les élèves s'approprient-ils facilement l'artefact lors des entretiens ?.....76
6.2.1. Données utilisées et méthode d'analyse.....76
6.2.2. Résultats.....77
6.2.3. Conclusion partielle sur l'appropriation du dispositif lors des entretiens.....81
6.3. Conclusion sur l'appropriation du domaine source.....81

Chapitre 7. Quelles difficultés les élèves rencontrent-ils pour faire le lien entre le domaine source et le domaine cible ?.....83
7.1. Données utilisées et méthode d'analyse.....84
7.2. Résultats.....84
7.3. Conclusion sur les difficultés à faire des liens entre le domaine source et le domaine cible 88

Chapitre 8. Quelle utilisation de l'artefact est faite en classe par les enseignants avec les élèves ?. .89
8.1. Données utilisées.....90
8.2. Résultats.....91
8.3. Conclusion.....95

Chapitre 9. Quels sont les effets de l'utilisation de l'artefact sur l'acquisition de connaissances en électricité des élèves ?.....97
9.1. Analyse quantitative des résultats des élèves en fonction du degré d'utilisation.....98
9.1.1. Hypothèses.....98
9.1.2. Moyennes aux différents questionnaires pour chaque classe.....98
9.1.3. Moyennes aux différents questionnaires pour chaque groupe d'utilisation.....99
9.1.4. Évolution des élèves selon le degré d'utilisation de l'artefact.....100
9.1.5. Évolution des élèves faibles et forts selon le degré d'utilisation de l'artefact.....101
9.1.6. Comparaison de l'évolution des conceptions en fonction des groupes d'utilisation.....102

9.2. Analyse qualitative, à partir des entretiens, de l'évolution des élèves avec l'utilisation de l'artefact....133

Chapitre 10. Facteurs (nature et fréquence) influençant l'utilisation de l'analogie mécanique : Étude qualitative....137
10.1. Recueil de données utilisées....138
10.2. Résultats....138
10.2.1. Inadéquation entre les difficultés perçues par l'enseignant chez les élèves et celles que permet de travailler l'artefact....138
10.2.2. L'utilisation d'autres analogies : facteurs facilitant ou limitant l'usage ?....141
10.2.3. Difficultés liées à l'artefact....142
10.2.4. Les difficultés techniques d'usage (réglages, perceptibilité des phénomènes mécaniques)....142
10.2.5. La durée d'appropriation de l'artefact....143
10.2.6. Manque d'idées de manipulation....143
10.2.7. Difficultés enseignantes....144
10.3. Conclusion....144

Chapitre 11. Conception d'un guide d'utilisation pour l'utilisation de l'artefact....145
11.1. Difficulté d'appropriation....147
11.2. Les conceptions des élèves....147
11.3. Proposition d'activités....147
11.4. Dimension sensorielle....149
11.5. Difficultés rencontrées par les élèves....150
11.6. Évaluation du guide d'utilisation....150

Conclusion - Discussion....151

Bibliographie....155

Introduction

Le développement mondial de l'électricité comme mode de transfert d'énergie en fait un objet d'enseignement incontournable dans le cadre d'un enseignement des Sciences Physiques. L'électrocinétique est une composante majeure de la physique. Sur tous les continents l'électrocinétique est enseignée (Royaume-Uni[1], Nouvelle-Galle du Sud en Australie[2], Massachusetts aux États-Unis[3], Canada[4], Singapour[5], Brésil[6], Liban[7], Sénégal[8],…). En France l'électrocinétique est une composante de la physique qui est enseignée dès l'école primaire, puis au collège, au lycée et dans le supérieur.

Malgré l'enseignement, les élèves possèdent des représentations des phénomènes en électrocinétique souvent en contradiction avec celles qui doivent leur être enseignées (Closset, 1983b). De très nombreux travaux didactiques ont été menés sur ce sujet (Reinders Duit, 2009).

Les enseignants peuvent avoir recours à différentes méthodes pour aider les élèves à dépasser les conceptions et raisonnements erronés. Une première méthode est de donner la possibilité aux élèves et aux étudiants de structurer leurs acquis en électricité, de les approfondir et de les consolider en les outillant pour travailler seuls. Ainsi, cette méthode s'apparente à de la remédiation et arrive donc après l'enseignement. Un outil hypermédia pour travailler dans ce sens a été développé par (Venturini, 1997). Une autre méthode consiste à agir pendant l'apprentissage. Une solution envisageable dans l'enseignement de l'électricité est le recours aux analogies. Il existe un certain nombre d'analogies : les analogies hydrauliques avec une chute d'eau ou mettant en jeu les pressions, l'analogie de la chaîne de vélo (Closset, 1983a), l'analogie du train (Johsua & Dupin, 1993a), l'analogie thermique (Dupin & Johsua, 1994), l'analogie des camionnettes (Bécu-Robinault, Buty, & Gaidioz, 2006) ou encore l'analogie des skieurs…

Dans le travail proposé ici, nous nous intéressons à une nouvelle analogie. Cette analogie, entre les domaines mécanique et électrique, a la particularité d'être instrumentée et a fait l'objet d'un brevet (Morge & Masson, 2010). Une fois cette analogie inventée, se pose la question de son impact sur l'apprentissage des élèves. Il s'agit de déterminer si cette analogie permet d'aider les enseignants à améliorer l'apprentissage des élèves. La réponse à cette question n'est pas binaire (oui / non) mais nécessite de considérer l'ensemble des conditions qui doivent être réunies pour que cette analogie soit une aide efficace aux enseignants.

L'objectif de cette thèse est de déterminer les conditions d'efficacité de cette analogie instrumentée sur l'apprentissage de l'électrocinétique. L'étude aurait pu porter sur le primaire, le collège, le lycée, la formation des enseignants du premier et/ou du second degré. Au début de cette thèse, se déroulait la dernière année d'enseignement de l'électrocinétique en terminale S. Le programme abordait le

1 Royaume-Uni en primaire : http://www.bbc.co.uk/schools/scienceclips/teachersresources/ages10_11/tr_changing_circuits_cr.shtml
au lycée : http://media.education.gov.uk/assets/files/pdf/q/science%202007%20programme%20of%20study%20for%20key%20stage%204.pdf
Angleterre : https://www.gov.uk/government/publications/national-curriculum-in-england-science-programmes-of-study/national-curriculum-in-england-science-programmes-of-study
2 Australie : http://www.boardofstudies.nsw.edu.au/syllabus_hsc/pdf_doc/physics-st6-syl.pdf
3 Massachussets aux USA : http://www.doe.mass.edu/frameworks/scitech/1006.pdf
4 Canada : http://www.edu.gov.on.ca/eng/curriculum/secondary/science.html
5 Singapour : http://www.moe.gov.sg/education/syllabuses/sciences/files/science-primary-2008.pdf
6 Sao Paulo - Brésil : http://www.educacao.sp.gov.br/a2sitebox/arquivos/documentos/780.pdf
7 Liban : http://www.crdp.org/fr/desc-evaluation/25298-Le%20curriculum%20des%20sciences
8 Sénégal : http://sen-exercice.com/doc/enseignants/programme/Programme_enseignement1370714251.pdf
Sites consultés le 30 septembre 2015

comportement des circuits électriques comprenant des bobines, résistances et condensateurs. L'analogie couvrant ce domaine de l'électrocinétique, l'opportunité se présentait donc de pouvoir étudier les conditions d'efficacité de cette analogie sur un spectre de connaissances plus large qu'il ne l'aurait été simplement au collège. Nous avons donc choisi de travailler avec des élèves de terminale scientifique.

Notre travail est organisé de la façon suivante. Dans une première partie, nous dresserons un cadrage théorique sur les conceptions et les analogies, sujets au cœur de notre problématique. L'analogie proposée étant instrumentée, nous accorderons également une partie du cadre théorique à la cognition incarnée et à l'ergonomie. À l'issue de cette première partie, nous préciserons, dans une deuxième partie, notre problématique et sa déclinaison en questions de recherche en nous appuyant sur le cadre théorique adopté. Le cadre théorique nous permet de déterminer les conditions d'efficacité d'une analogie. Ces conditions étant déterminées, nous commençons par une étude épistémique et didactique de l'analogie afin de déterminer précisément son domaine d'application (troisième partie). L'étude des autres conditions d'efficacité nécessitant des recueils de données, nous explicitons dans la quatrième partie l'ensemble des données recueillies et la manière dont elles seront utilisées pour répondre aux différentes questions de recherche. Les parties suivantes (cinquième à dixième parties) sont dédiées à l'analyse des données recueillies dans le but d'étudier les conditions d'efficacité de l'analogie. Dans une onzième partie, nous présentons le guide d'utilisation dont la construction s'appuie sur les résultats obtenus dans cette thèse. Le but de ce guide d'utilisation étant de rendre la plus efficace possible l'utilisation de l'analogie pour l'apprentissage de l'électrocinétique chez les élèves. Pour finir, nous conclurons en reprenant les principaux résultats obtenus et introduirons des perspectives engendrées par ceux-ci.

Chapitre 1.
Cadre théorique

1.1. Les conceptions

Dans ce travail, nous souhaitons déterminer l'impact de l'utilisation d'un dispositif analogique sur l'apprentissage des élèves, l'évolution de leurs conceptions et leur maîtrise de nouvelles notions. Un élève peut afficher une certaine maîtrise des connaissances en électricité (loi d'Ohm, formule de l'énergie emmagasinée dans une bobine, une capacité…) sans pour autant avoir des conceptions adéquates leur permettant de résoudre des problèmes dans des contextes différents et de construire des connaissances cohérentes. Ce manque de cohérence ne permet pas à l'élève d'atteindre une construction conceptuelle unique mais plutôt des îlots de connaissances qui ont un domaine d'application restreint. Ces conceptions étant un obstacle à l'apprentissage (Johsua & Dupin, 1993b ; Scott, Asoko, & Driver, 1991 ; Gauld, 1986 ; Mulhall, Mckittrick, & Gunstone, 2001), il est nécessaire de déterminer les caractéristiques de ces conceptions, dans le cadre d'un projet visant à faciliter l'apprentissage des élèves en électricité.
Dans la suite, nous allons expliciter ce concept de conception d'une manière générale pour ensuite préciser les conceptions connues en électricité.

Pour définir les conceptions, Michel Develay parle de « théories personnelles » (Develay, 1992), Andrée Tiberghien parle de « connaissances naïves » (Tiberghien, 2003) qu'elle définit comme des « *connaissances ou des savoirs communs partagés socialement et aussi des connaissances spontanées mises en œuvre par les individus dans des situations particulières* ». Nous pouvons définir une conception comme étant une idée permettant d'expliquer diverses situations que nous pouvons rencontrer dans le même domaine. Dans le domaine des sciences physiques, ces conceptions ne sont pas le fait du hasard (Robardet & Guillaud, 1997), elles se construisent au travers d'interactions sociales et peuvent parfois être renforcées par des observations. Par exemple, l'idée d'*impetus* est cohérente avec l'observation d'un objet qui ralentit sous l'effet de frottements et il s'agissait de la conception dominante sur l'inertie jusqu'à Galilée. Reuter et al. (2007) repris par Duplessis (2008) définissent les conceptions comme « *des systèmes de connaissances qu'un sujet mobilise spontanément face à une question ou à un problème, que ceux-ci aient ou non fait l'objet d'un apprentissage* ». La conception est donc liée à l'environnement de l'apprenant et sa mobilisation aux questions que l'apprenant cherche à résoudre. Descartes (1643), dans sa lettre à Élisabeth du 21 mai 1643, précise qu'il « *considère qu'il y a en nous certaines notions primitives, qui sont comme des originaux, sur le patron desquels nous formons toutes nos autres connaissances* ». Les conceptions peuvent être considérées comme faisant partie de ces 'notions primitives' qui structurent la construction de connaissances. Les représentations que nous nous faisons de la réalité se construisent par le biais de connaissances qui s'ancrent dans des conceptions que nous avons déjà. Ainsi, plusieurs conceptions se retrouvent en réseau les unes avec les autres, elles forment « *un système organisé et structuré qui constitue le cadre de référence* » de l'enfant ou l'adulte (Duplessis, 2008). Chaque nouvelle observation et interprétation de la réalité va venir renforcer ou enrichir une conception. Ainsi, une conception évolue en permanence grâce à l'intégration que peut faire un sujet de nouvelles interprétations (Duplessis, 2008 ; Halté, 1992). Contrairement aux connaissances, les conceptions ont un domaine d'application limité et fonctionnent localement. Elles ne présentent pas nécessairement de cohérence interne. Dans le cas contraire, les conceptions sont alors encore plus résistantes à l'enseignement. Gauld (1986) précise que les conceptions à court-terme, si elles sont nouvelles pour l'élève, ne sont pas stabilisées, ancrées dans un réseau cohérent de souvenirs et donc sont plus fragiles. L'élève leur fait moins confiance et il est susceptible de s'en défaire facilement (et de revenir à son ancienne conception).

Les contradictions que va susciter la mise en application de plusieurs de ces conceptions ou

l'observation de nouveaux phénomènes peuvent engendrer un conflit cognitif. Notons que le caractère local des conceptions est défavorable à l'émergence d'un conflit cognitif puisque son domaine d'application est limité. L'exigence de cohérence est donc une condition nécessaire au dépassement de conceptions. Un conflit cognitif peut également se produire lorsqu'une conception ne permet pas d'expliquer une observation ; en effet comme le dit Giordan (1996), repris par Duplessis (2008) les conceptions permettent aux élèves d'avoir « *une grille de lecture et de prévision du monde* » et c'est cette observation qui va mettre en défaut la conception en question. Dans le cas de conflit cognitif, celui-ci va inciter le sujet à remettre en cause l'idée initiale, 'la notion primitive' et la faire évoluer, vers une conception correcte ou une autre conception erronée, ces dernières se construisent alors petit à petit (Scott et al., 1991) si la possibilité de la questionner est rencontrée par l'apprenant. Dans ce cadre théorique, « l'*apprentissage est considéré plus comme un développement ou un changement conceptuel que comme une accumulation d'éléments nouveaux* » (Scott et al., 1991, p.1).

Mais, un grand nombre d'études ont montré la résistance des conceptions à l'enseignement (Gauld, 1986 ; Mulhall et al., 2001) remettant en cause l'idée selon laquelle une confrontation simple au réel suffirait. Plusieurs raisons permettent d'expliquer pourquoi une conception est imperméable à l'enseignement. En effet, celle-ci a été construite progressivement et le changement conceptuel nécessite un coût intellectuel important pour le dépasser. De plus, malgré l'enseignement, la conception permet parfois à l'élève, sans qu'il en soit conscient, de résoudre les problèmes et d'interpréter les expériences, qui lui sont soumis. Cette réussite de la tâche renforce la conception (Johsua & Dupin, 1993b ; Scott et al., 1991). Ainsi, une conception peut être une connaissance pertinente dans un contexte particulier ou provoquer des erreurs dans un autre contexte. La prise de conscience des limites du domaine de validité est une condition nécessaire à la construction d'une nouvelle conception et à l'utilisation de la conception adéquate en fonction du problème à résoudre et de son contexte (Michelet, Adam, & Luengo, 2007). De plus, il arrive qu'une conception évolue avec l'enseignement mais seulement temporairement. Très rapidement, la conception initiale erronée reprend le dessus (Gauld, 1986 ; Mulhall et al., 2001) et elle est mobilisée à la place de celle construite dans le cadre de l'enseignement. Par exemple, Gauld (1986) relate le cas d'un élève qui pensait avant enseignement qu'il y avait usure du courant ; pendant l'enseignement, les élèves sont amenés à faire l'expérience avec un ampèremètre avant et après une lampe. À long terme après enseignement, il pense toujours pareil qu'avant (usure du courant). Il a un faux souvenir de la lecture des ampèremètres et croit que l'ampèremètre après la lampe dans le sens de circulation du courant indiquait la moitié du premier. Il a inconsciemment modifié son souvenir de la lecture plutôt que de modifier sa conception qui est mieux établie dans son esprit et fait partie d'un cadre « cohérent » étayé par un réseau de souvenirs d'expérience. Le changement conceptuel nécessite donc un travail long et continu (Gauld, 1986).

Dans le cadre particulier de ce travail de recherche, nous nous intéressons à la compréhension de l'électrocinétique et donc aux conceptions dans ce domaine. L'enseignement de l'électrocinétique se heurte depuis toujours à des difficultés récurrentes d'apprentissage du collège à l'université. Depuis une trentaine d'années, des recherches ont permis d'identifier des familles d'erreurs et d'inférer les raisonnements spontanés expliquant leur origine (pour des synthèses voir Duit et Von Rhöneck, 1998 ; Mulhall et al., 2001 ; Robardet et Guillaud, 1997 ; Chang, Liu, & Chen, 1998). Ces recherches ont montré que la mise en œuvre de conceptions et de raisonnements non conformes à la physique, engendre des erreurs chez les élèves. Ces conceptions et raisonnements sont présents avant enseignement et constituent la base conceptuelle que l'élève va mobiliser pour expliquer et prévoir les phénomènes électrocinétiques.

Nous allons présenter les conceptions suivant la progression suivie par la majorité des élèves. Au début de l'enseignement de l'électricité, les élèves ne savent pas que la circulation du courant est associée à la condition d'un circuit fermé : c'est la conception unifilaire ou unipolaire (Closset, 1987 ; Chang et al., 1998). Elle suppose qu'un récepteur électrique puisse fonctionner en étant relié par un seul fil au générateur. Cette conception est rapidement mise en défaut par la nécessité de fermer le circuit pour faire fonctionner un composant électrique. En revanche, cette conception d'un déplacement du courant dans un seul fil peut par exemple apparaître de nouveau lorsque les élèves étudient la charge d'un condensateur (Clement & Steinberg, 2008).

« *Le modèle unipolaire s'enrichit de caractéristiques issues de nécessités opératoires de branchement pour devenir un modèle bipolaire pour la pile, ou un modèle de courants antagonistes* » (Delacote & Tiberghien, 1976, p.44). Autrement dit, « *Le modèle des courants antagonistes n'est jamais que le doublet du modèle unipolaire* » (Closset, 1987, p. 948) et n'est donc qu'une forme plus évoluée de la conception unifilaire. Cette conception des courants antagonistes suppose l'existence de deux courants, chacun partant d'un pôle du générateur, qui circulent en sens opposé, se rencontrent au niveau du récepteur où ils réagissent. La rencontre des deux courants amène Osborne (1983) à parler de « clashing current ».

Ce modèle de courants antagonistes peut évoluer avec l'enseignement et l'élève adopte sans trop de difficultés un modèle circulatoire. En revanche, en acceptant ce modèle circulatoire, les élèves introduisent l'usure du courant pour interpréter le fonctionnement d'un récepteur qui consomme le courant-énergie arrivant de la pile (Closset, 1987). L'élève adopte alors le modèle circulatoire mais renforce sa conception sur la nécessité de consommation. Il n'acquiert alors pas un raisonnement systémique. L'élève pense que le courant s'épuise en traversant un dipôle récepteur et donc de cette façon, dans un circuit fermé, l'intensité du courant électrique serait inférieure en aval d'un récepteur à celle en amont de ce même récepteur (Michelet et al., 2007) alors qu'elle est la même. Le courant circule bien, dans ce cas, dans une seule direction mais il devient plus faible au fur et à mesure de sa circulation. Les derniers éléments du circuit reçoivent moins de courant. L'usure du courant s'inscrit dans un raisonnement plus global du type « le courant réagit au fur et à mesure des obstacles qu'il rencontre ». Selon cette idée, le courant ne peut pas savoir ce qu'il va rencontrer dans la suite du circuit. Cette conception permet aussi d'expliquer pourquoi, par exemple, certains élèves pensent qu'une résistance de protection ne peut être placée qu'en amont d'une diode. Cette conception de l'usure du courant peut trouver son origine, à la fois dans une confusion entre intensité et énergie, et dans la substantialisation (Bachelard, 1938) de l'énergie. Cette conception pose problème aux élèves, puisqu'ils ne peuvent pas comprendre que l'intensité est la même en tout point d'un circuit en série.

Dans le cas des conceptions unipolaire, à courants antagonistes ou de l'usure du courant, les élèves mènent un raisonnement causal linéaire (Fauconnet, 1981 ; Viennot, 2002) : la pile est l'agent qui contient de l'électricité et le récepteur est le patient qui reçoit l'électricité par l'intermédiaire du fil électrique qui permet alors au récepteur de fonctionner (Delacote & Tiberghien, 1976 ; Closset, 1987). Cette association pile = agent /récepteur = patient renforce la confusion entre l'intensité et l'énergie, conception cohérente avec la conception de l'usure du courant. En effet, le récepteur consommant de l'énergie, mais pas de courant électrique qui n'est qu'un transmetteur d'énergie et non un transporteur d'énergie, l'énergie n'étant pas stockée puis transportée par le courant mais transférée (Morge & Buty, 2014).

Lorsque l'élève dépasse la conception de l'usure du courant et parvient à envisager un courant constant dans l'intégralité d'une boucle, ce n'est qu'en apparence (Closset, 1987). L'élève mène alors

un raisonnement local en suivant le circuit, raisonnement aussi appelé séquentiel (Closset, 1983b). Dans le cadre de ce type de raisonnement, un événement qui se déroule en aval n'a aucune influence sur l'amont (Robardet & Guillaud, 1997). L'élève raisonne non pas sur le système dans son intégralité mais analyse seulement chaque élément de celui-ci en terme d'avant et après et en terme de courants (Szczygielski, 2009). Cette forme de raisonnement s'appuie sur une représentation du temps linéaire excluant la simultanéité, les événements se déroulant successivement dans le temps dans différents lieux de l'espace (Coquidé & Morge, 2011), au lieu de les penser comme se déroulant au même moment dans différents lieux de l'espace. Le comportement d'un circuit électrique nécessite de le considérer comme un système composé de plusieurs éléments pouvant s'influencer mutuellement et instantanément, ce que ne font pas spontanément une majorité d'élèves.

Lorsque l'élève a dépassé la conception de l'usure du courant, une nouvelle conception peut apparaître. Certains élèves considèrent que le générateur est un générateur de courant qui délivre toujours la même intensité quel que soit le circuit. Cette conception erronée est renforcée si les élèves ont dépassé l'idée fausse que le courant s'use et s'ils ont assimilé que le courant est le même dans toute la boucle (Johsua & Dupin, 1993b). En effet, s'il est le même dans toute la boucle alors cela signifie pour certains élèves qu'il ne peut en être ainsi que si le générateur débite un courant constant. L'élève risque donc de considérer que la loi d'unicité du courant s'applique à un objet (la pile) plutôt qu'à un circuit défini par ses composants et la manière dont ils sont assemblés.

Cette conception peut être rapprochée de celle de la non-distinction entre la tension et l'intensité, l'élève leur attribuant des caractéristiques similaires (Duit & Von Rhöneck, 1998). Considérer qu'une pile est un générateur de courant et non de tension peut être considéré comme une des expressions de cette conception (Turgut, Gürbüz, & Turgut, 2011, p.1966). Les élèves ayant des difficultés à distinguer tension et intensité considèrent également qu'il existe une tension uniquement en circuit fermé, comme pour le courant. De la même façon cette difficulté à distinguer tension et intensité conduit l'élève à considérer la tension comme le courant dans un circuit en série :il suppose que toutes les tensions aux bornes des composants sont les mêmes, ou encore que, dans un circuit en dérivation, les tensions dans les branches dérivées sont différentes (Chang et al., 1998).

Comme l'ont montré Shipstone et al. (1988), ces conceptions résistent à l'enseignement. Cette résistance peut s'expliquer par le fait que 1) les conceptions permettent aux élèves de résoudre correctement certains problèmes de la vie courante ; 2) le courant n'est pas perceptible ; 3) les élèves doivent changer radicalement de raisonnement en passant d'un raisonnement séquentiel à un raisonnement systémique.

Suite à l'étude des conceptions des élèves, Duit et Von Rhöneck (1998, p.9) définissent 3 conditions pour qu'un enseignement de l'électricité puisse être efficace :
« (1) Le flux de courant et le flux d'énergie doivent être clairement différenciés depuis le tout début de manière à prendre en compte les idées des élèves sur la consommation du courant qui sont très résistantes à l'enseignement.
(2) L'intensité et la tension doivent être différenciées très tôt de façon à fournir aux élèves une notion du phénomène de flux de courant qui comporte l'idée d'un flux de quelque chose dans le circuit et celle d'une "force" directrice de ce flux, mais aussi qui permette de distinguer ces deux idées.
(3) De manière à traiter le raisonnement "local" et "séquentiel" précédemment discuté qui domine les idées des élèves sur le flux du courant, il est nécessaire de guider également très tôt les élèves

vers une "idée de système" du circuit électrique (Härtel, 1985). Lorsqu'il se produit un changement de n'importe quelle sorte dans un point du circuit, il y a également des changements simultanés dans les autres points. Un modèle approprié ne se fondera pas sur des charges (ou des particules) se déplaçant individuellement, mais sur une approche où toutes les particules sont intimement interconnectées. »

Pour aider les élèves à dépasser ces conceptions et raisonnements, les enseignants peuvent avoir recours à des analogies.

1.2. L'analogie

Souvent, nous utilisons de vieux souvenirs pour nous rappeler la façon dont nous avons résolu des problèmes dans le passé (Chiu & Lin, 2005, p . 429) et nous essayons de résoudre notre problème nouveau avec nos souvenirs. Nous résolvons un problème donné en nous référant à un autre problème que nous connaissons mieux (Dupin & Johsua, 1994 ; Hashweh, 1986). Procéder ainsi consiste à mener un raisonnement analogique car les souvenirs correspondent rarement au nouveau problème et nous devons faire des adaptations ou trouver des similitudes pour ainsi créer un pont entre nos souvenirs et ce que nous étudions (Chiu & Lin, 2005, p . 430). Gentner et Gentner (1983) appellent ce travail mental consistant à passer d'un domaine à l'autre : « la simulation mentale ». Utiliser une analogie est naturel, même si, comme le montre le modèle (figure 1) de Newton (2003, p. 354), le chemin d'un raisonnement analogique est plus long que le chemin d'un raisonnement s'appliquant directement au domaine cible. On parle de domaine cible pour le domaine dans lequel nos connaissances sont moindres et de domaine source ou domaine de référence, le domaine sur lequel nous nous appuyons pour comprendre, expliquer le domaine cible.

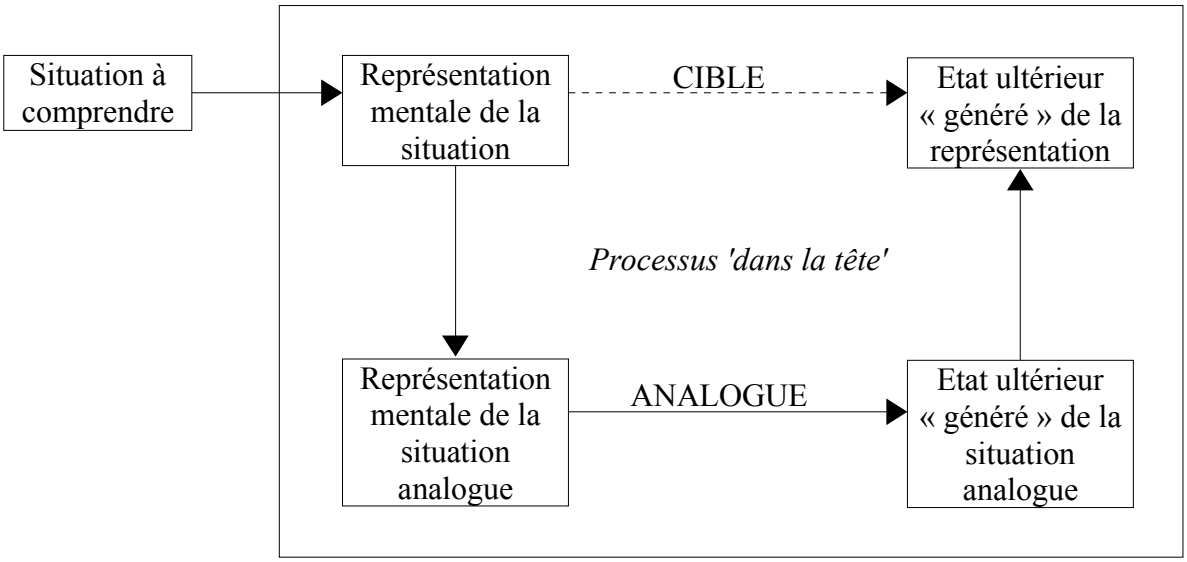


Figure 1 : Processus du raisonnement analogique (Newton, 2003, p.354)

Par conséquent, l'introduction d'une analogie nécessite un cheminement plus complexe qui risque de générer des erreurs. Il suppose la maîtrise de deux domaines (domaines source et cible) au lieu d'un seul (domaine cible), même si le domaine source n'est que partiellement maîtrisé. Autrement dit, même si le caractère heuristique de l'utilisation de l'analogie en science n'est plus à prouver, sa pertinence dans l'enseignement ne va pas de soi (Kipnis, 2005). Une analogie n'a pas que des avantages, « elle peut simplifier les phénomènes complexes, mais elle peut aussi présenter des

inconvénients - fournir de faux résultats lorsqu'elle est utilisée hors de son domaine de validité » (Bécu-Robinault et al., 2006, p.958). Toutefois, une analogie utilisée en sciences présente deux caractéristiques importantes :
- elle est créée pour résoudre un problème,
- et la même analogie peut servir à résoudre un certain nombre d'autres problèmes, peut-être même imprévus initialement (Kipnis, 2005, p. 227).

Le mode de pensée par analogie est utilisé lorsqu'un domaine d'étude est difficile à appréhender. Comme l'explique (Lecourt, 2006, p. 37), « Ce qu'on ne parvient pas à démontrer, on le donne analogiquement ». Un raisonnement analogique n'est pas un raisonnement rigoureux (Dupin & Johsua, 1994, p. 10) si son domaine d'application n'est pas précisé. Une analogie ne permet pas de résoudre tous les problèmes et peut engendrer des erreurs. Néanmoins, « simple métaphore, ou expression authentique d'un rapport, l'analogie est un mode de connaissance » (Lecourt, 2006, page 35). Notons que la différence entre l'analogie et la métaphore réside dans le fait que la métaphore est une figure de style qui crée une « image » d'une entité, alors que l'analogie en science a un pouvoir heuristique interrogeant l'existence de relations dans le domaine cible. En sciences physiques et chimiques, discipline dont l'échelle de mesures s'étend du microscopique au macroscopique, il est fréquent d'utiliser des analogies pour faciliter la compréhension des raisonnements et connaissances scientifiques. L'analogie permet alors d'imaginer plus facilement un phénomène non visible en se rapprochant d'un autre domaine, le domaine source, qui lui, à l'inverse, est visible ou, à défaut, compris. Ainsi, il est possible d'établir des comparaisons entre les deux domaines et d'inférer l'hypothèse de l'existence des mêmes relations dans le domaine cible, que celles existant dans le domaine source. Une analogie se réfère donc à un processus de comparaison des propriétés des objets et de leurs relations dans deux domaines différents, c'est avant tout un transfert de concepts et d'hypothèses qualitatives avant un formalisme mathématique. L'analogie sera pertinente dans un domaine scientifique si elle permet d'accéder à de nouvelles connaissances (Kipnis, 2005, p. 200), mais elle doit avoir d'autre propriétés pour être pertinente d'un point de vue didactique.

L'analogie doit posséder certaines caractéristiques pour compenser ou limiter les effets négatifs de l'introduction de ladite analogie.

Pour qu'une analogie soit pertinente du point de vue de l'enseignement, les élèves ne doivent pas avoir de difficultés à comprendre et maîtriser le domaine source. Pourtant, « it is often the case that students have conceptual difficulties with « base » domains selected for them » (Brna & Duncan, 1996, p. 332). L'analogie thermique (Dupin & Johsua, 1994), utilisée pour enseigner l'électricité, en est un bon exemple. En effet, si la différence de température, analogue de la tension électrique, est un concept relativement simple à comprendre, le courant de chaleur, analogue du courant électrique, ne l'est pas. Dans le cas de l'analogie thermique, les concepts du domaine source présentent des difficultés ; par ailleurs, il n'y a aucune possibilité de manipuler le domaine source. Les concepts du domaine source ne sont donc pas tous maîtrisés. Ainsi, si les élèves ont des difficultés à comprendre et maîtriser le domaine source, l'analogie perd de son intérêt didactique puisque les élèves doivent chercher à maîtriser deux domaines au lieu d'un. Donc « le domaine de référence doit être moins complexe (ou en tout cas plus familier) que le domaine cible » (Dupin & Johsua, 1994, p.12).

L'analogie peut également être source d'erreur si les élèves l'utilisent mal. Au lieu de considérer que la fonction de l'analogie est de produire dans le domaine source des hypothèses à tester dans le domaine cible, certains élèves peuvent considérer que toutes les relations du domaine source se vérifient dans le domaine cible. Comme le soulignent Treagust, Harrison, et Venville (1998, p. 85), « the use of analogies in science teaching does not always produce the intended effects, especially when students take the analogies too far, and are unable to separate it from the content being

learned. » Ainsi pour limiter ces risques de généralisation abusive chez les élèves, Johsua et Dupin (Johsua & Dupin, 1989, p. 108) préconisent de limiter les analogies négatives (les cas où l'analogie ne fonctionne pas). En effet, pour ces auteurs, « un solide isomorphisme entre la situation initiale analogique et la situation initiale est une condition nécessaire au bon fonctionnement didactique de l'analogie ». Cet isomorphisme comprend deux composantes (Hummel & Holyoak, 1997, p.428) : a) une cohérence de structure entre le domaine source et le domaine cible c'est-à-dire que des éléments du domaine source qui ont une correspondance dans le domaine cible dans une situation doivent avoir la même correspondance dans toutes les autres situations et b) une relation biunivoque entre les éléments du domaine cible et ceux du domaine source c'est-à-dire que chaque élément d'un domaine doit avoir un analogue et un seul dans l'autre domaine. Ainsi, « la qualité de l'isomorphisme entre les deux domaines est déterminante. Un isomorphisme complet permet un raisonnement analogique complètement fiable : le transfert des propriétés du domaine source vers le domaine cible donne des informations sûres » (Dupin & Johsua, 1994, p.10).

Ainsi, une analogie pourrait être utile pour l'apprentissage des élèves si :
- cette analogie permet de travailler des idées fausses,
- cette analogie a un fort isomorphisme entre le domaine source et le domaine cible,
- le domaine source est plus facile à comprendre que le domaine cible.

1.2.1. Les analogies en électrocinétique

Les analogies utilisées pour enseigner l'électrocinétique sont nombreuses : analogie hydraulique, énergétique (Dupin & Johsua, 1994), du train, de la chaîne de vélo (Closset, 1983b), des camionnettes (Bécu-Robinault et al., 2006), du télésiège et des skieurs, etc. La partie qui suit est consacrée à la présentation de quelques-unes de ces analogies et à l'explicitation de leurs principaux apports et de leurs limites.

1.2.1.1. Les analogies hydrauliques

Les analogies hydrauliques sont parfois utilisées pour l'enseignement de l'électricité. Il existe plusieurs analogies hydrauliques. L'analogie de l'îlot permet d'expliquer la séparation du courant à un nœud : la somme des débits dans les deux branches est égale au débit de l'eau avant et après l'îlot. L'analogie de la rivière qui descend de la montagne permet de mettre en relation la variation de l'altitude de l'eau et la variation du potentiel électrique. L'analogie hydraulique en circuit fermé permet de mettre en relation le rétrécissement du conduit avec la résistance électrique, la tension électrique étant quant à elle mise en relation avec la différence de pression.
Chacune de ces analogies permet d'apporter son lot d'éléments d'aide à la compréhension et chacune apporte également son lot de problèmes. L'analogie de la rivière par exemple risque de conforter les élèves dans leur raisonnement séquentiel. L'analogie du circuit hydraulique fermé est, quant à elle, un domaine source peu maîtrisé par les élèves et qui ne peut donc servir de point d'appui au domaine cible (l'électricité). À ce propos, l'étude de Closset montre « que les étudiants rencontrent les mêmes difficultés à propos du circuit hydraulique qu'à propos du circuit électrique. Il apparaît donc vain d'espérer utiliser une analogie hydraulique qui se fonderait sur une connaissance "naturelle" du circuit hydraulique. » (Closset, 1992, p.154).

1.2.1.2. L'analogie du train et des camionnettes de pain

L'analogie du train a été proposée par Johsua et Dupin (1989), puis reprise en France dans les

documents d'accompagnement de collèges de 1997 (MEN, 1997, p.100). Cette analogie est celle d'un train ayant les caractéristiques suivantes : des wagons forment une chaîne continue sur une voie ferroviaire fermée ; des « ouvriers » imposent une force de poussée constante aux wagons ; un obstacle le long de la voie impose un frottement.
Cette analogie permet de travailler les principales conceptions des élèves (la pile est un générateur de courant ; l'usure du courant ; le courant réagit au fur et à mesure des obstacles qu'il rencontre). Dans cette analogie, la dimension énergétique du courant électrique n'est pas explicitement prise en charge. Pour pallier cette limite, une autre analogie, similaire à celle-ci a été proposée.

L'analogie des camionnettes initialement proposée par Hind, Leach, Lewis et Scott (2002) puis reprise par Bécu-Robinault, Buty et Gaidioz (2006), remplace les wagons par des camionnettes remplies de pains. Ces pains représentent l'énergie transportée par le courant électrique. La principale critique qui peut être faite à cette analogie est la substantialisation de l'énergie puisque l'énergie est représentée par des pains, ce qui risque de renforcer cette substantialisation de l'énergie dans le domaine cible.

1.2.1.3. L'analogie mécanique

L'analogie mécanique est une nouvelle analogie pour l'apprentissage de l'électricité dont le domaine source est la mécanique. Cette analogie présente une particularité par rapport aux autres déjà existantes, elle est matérialisée. En effet, cette analogie est un cadre métallique de forme rectangulaire (figure 2) à chaque coin duquel sont fixées des poulies. Une corde est disposée sur ces quatre poulies et peut circuler par entraînement grâce à une cinquième poulie qui retient une masse qui chute tenue par une ficelle.

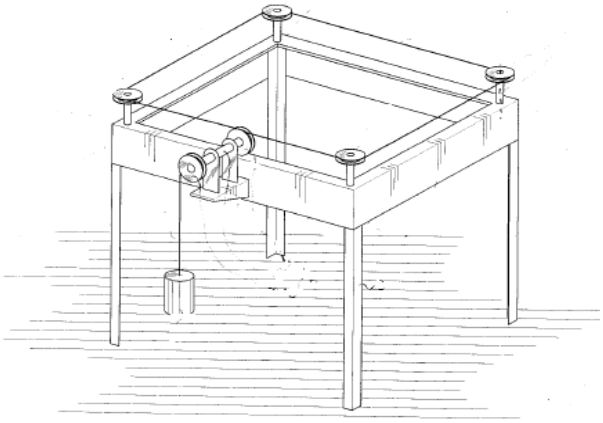


Figure 2 : Dessin de l'artefact

L'ensemble masse + poulie est l'analogue du générateur de tension en électricité. Il est possible de disposer d'autre éléments mécaniques analogues de la résistance, condensateur et bobine électrique.

1.3. Cognition incarnée et image mentale

Gentner et Gentner (1983) présentent l'analogie comme étant une « simulation mentale ». Par exemple, l'analogie du train propose une image mentale qui permet de simuler par la pensée le mouvement du train en fonction de différents paramètres tels que la poussée des cheminots.

L'analogie donne à voir le phénomène, ce qui sollicite le sens de la vue alors que le domaine cible, ici l'électricité, ne sollicite aucun de nos sens. Ainsi, un des intérêts de l'analogie serait de rendre perceptible quelque chose qui ne l'est pas. La cognition incarnée (Varela et Noë) constitue un cadre théorique qui est intéressant pour comprendre l'intérêt didactique des analogies. Selon ce cadre théorique, « les idées que nous avons sur ce qui nous entoure sont des formes, des couleurs des odeurs et des colorations émotionnelles : positives ou négatives, agréables ou non qui correspondent aux caractéristiques perçues ou ressenties » (Dortier, 2014). Ainsi, plus un concept est associé à des perceptions ou des émotions, plus il est identifiable et mobilisable et son appropriation est également plus intuitive.
Wilson (2002) présente la cognition incarnée comme un processus cognitif lié aux interactions entre la personne et le monde. Elle décline en six points les caractéristiques d'un processus et système cognitif dans le cadre de la cognition incarnée :
(1) les processus cognitifs sont situés, ils varient selon les contextes du monde réel dans lequel ils sont effectués ;
(2) les processus cognitifs doivent être compris par rapport à un instant spécifique qui est imposé à nos cerveaux par l'environnement lorsque des tâches cognitives sont réalisées ;
(3) le processus cognitif prélève la structure matérielle, symbolique et sociale de l'environnement en la réduisant aux besoins de ce qui doit être effectivement réalisé par notre esprit ;
(4) les systèmes cognitifs peuvent être considérés comme étendus, où il n'y a pas de division nette entre les contributions internes et externes à la cognition ;
(5) la fonction de la cognition n'est pas essentiellement de représenter le monde extérieur, mais de guider l'action en elle ;
(6) même la cognition qui a lieu dans 'l'esprit' repose sur des structures de connaissances qui émergent des expériences axées sur le corps. Les représentations et processus cognitifs sont liés à des phénomènes mentaux tels que l'imagerie mentale, la mémoire de travail, la mémoire épisodique, la mémoire implicite et le raisonnement et la résolution de problème.[9]

Ainsi, une analogie, au-delà du raisonnement qu'il peut être nécessaire de mettre en œuvre pour passer du domaine source au domaine cible, peut permettre la création d'une image mentale d'un concept abstrait en lui donnant ainsi une dimension corporelle liée à notre système perceptif, émotionnel, ou moteur. Le concepts enseignés en physique de par leur caractère abstrait, seraient donc par définitions pauvres en dimension corporelle. Ainsi certains élèves peuvent spontanément associer des perceptions ou émotions à certaines notions ou concepts (par exemple : force et effort physique ressenti). Ce type de caractérisation des concepts, s'il n'est pas contrôlé par l'enseignement, peut renforcer des conceptions. Par exemple, certains élèves pensent qu'une force ne peut pas être exercée par un être inanimé (Lemaignan & Weil-Barais, 1993). En ce sens, l'attribution de caractéristiques sensorielle motrice ou perceptive à des concepts est considérée comme intuitive c'est-à-dire, immédiate et spontanée. Dans ce cadre, on peut qualifier d'intuitif un concept du domaine source d'une analogie si ce concept est associé à des perceptions. Nous considérons que la cognition incarnée fournit donc un cadre intéressant pour comprendre le recours à l'analogie dans le cadre de l'enseignement.

1.4. Conception d'un instrument didactique – Point de vue ergonomique

L'analogie constitue en soi un outil pour enseigner. Or, depuis plusieurs années, les recherches en didactique ont montré la difficulté chez les enseignants à s'approprier des outils ou des dispositifs

9 Traduit par l'auteure

conçus par la recherche ou plus généralement par des institutions prescriptrices (Goigoux, 2001). Pour mieux comprendre ce phénomène, une des pistes qui semble particulièrement prometteuse est celle de l'ergonomie. En effet, une des principales critiques qui est faite à la didactique « classique » (Goigoux, 2005) est l'absence de prise en compte des utilisateurs dans le processus de conception. Les outils et dispositifs sont construits sur des critères didactiques ou pédagogiques relevant des conditions favorables à l'apprentissage des élèves. Pour mieux comprendre les conditions d'appropriation des dispositifs et des outils, le cadre théorique de l'ergonomie est indispensable.

Selon Ingold (1993), l'outil, est « un objet non nécessairement façonné par l'homme et a pour principale fonction d'accroître la capacité d'un agent à opérer dans un environnement donné » (Ingold, 1993). Ingold (1993) définit par ailleurs les artefacts comme des « objets façonnés par l'homme selon une certaine conception préexistante de forme » . L'artefact est donc un outil façonné par l'homme pour répondre plus spécifiquement à ses besoins. Rabardel (1995a) reprend cette notion d'artefact et la distingue de l'instrument pour définir la genèse instrumentale.

D'après Rabardel (1995b, p.63) « le processus d'appropriation d'un artefact s'accompagne, chez le sujet, de constructions représentatives relatives à l'instrument, à la réalité sur laquelle il permet d'agir ou qu'il permet d'analyser... Il s'accompagne aussi de l'élaboration de structures permettant l'organisation de l'action du sujet : les schèmes d'utilisation. » Les schèmes d'utilisation sont définis selon Rabardel (1995b, p.63) « comme l'ensemble structuré des activités d'utilisation de l'artefact. Ils permettent au sujet d'engendrer les activités nécessaires à la réalisation des fonctions qu'il attend de l'usage de l'artefact. Ils forment ainsi une base stable pour son activité. Les schèmes d'utilisation peuvent être considérés comme des invariants représentatifs et opératifs correspondant à des classes de situations d'activité avec l'artefact ». En d'autres termes, comme l'indiquent Cèbe et Goigoux (2007), les schèmes d'utilisation correspondent à la manière dont les enseignants utilisent l'artefact, à l'ensemble des situations mises en place dans la classe ou encore aux « opérations motrices et intellectuelles développées par le sujet pour utiliser l'artefact » (Marquet & Leroy, 2004).
L'ensemble artefact et schèmes d'utilisation nous permet alors de définir un instrument. Un instrument est donc une entité mixte (Rabardel, 1995a). Partageant la définition de Ingold (1993) considérant qu'un outil est « un objet non nécessairement façonné par l'homme et a pour principale fonction d'accroître la capacité d'un agent à opérer dans un environnement donné », nous utiliserons le nom d'instrument pour désigner un artefact construit par l'homme associé aux schèmes d'utilisation (figure 3).

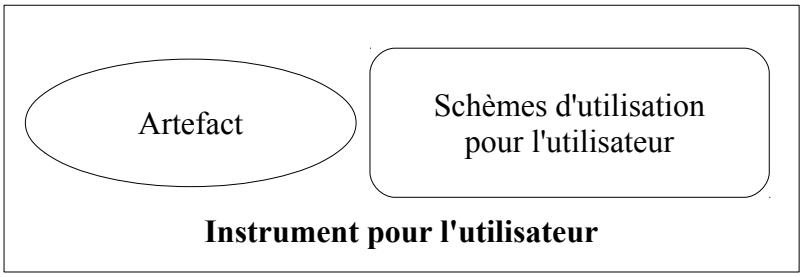


Figure 3: Instrument unité mixte, composé d'artefact et de schème

Dans le cas de l'analogie mécanique, deux artefacts sont mobilisés dans le cadre de cette thèse : l'artefact mécanique utilisé pour l'enseignement de l'électricité par analogie « Cordélec » et le guide d'utilisation de l'artefact qui a été conçu à l'issue de ce travail de recherche. Il s'agit effectivement d'artefacts car dans ces deux cas, il s'agit « d'objets façonnés par l'homme selon une certaine

conception préexistante de forme » (Ingold, 1993) mais l'analogie mécanique a été construit sans participation directe des usagers. Dans le cas de l'artefact ce sont les savoirs savants didactiques concernant les conceptions des élèves et scientifiques concernant la mécanique et l'électricité qui ont guidé sa conception. Ainsi, l'utilisateur n'est pas pris en compte dans cette phase de conception. Pour être plus précis, il n'est pas pris en compte dans la phase de conception de son contenu, mais il sera pris en compte dans sa phase de conception de la forme (poids, taille, facilité de rangement…). En revanche, la conception du guide d'utilisation prendra en compte le point de vue des utilisateurs de l'artefact dès le début de sa conception.

Les deux artefacts étudiés dans le cadre de cette thèse n'ont alors pas la même finalité. Dans le cas de l'analogie mécanique, il s'agit d'un artefact d'enseignement-apprentissage alors que dans le cas du guide d'utilisation, il s'agit d'un artefact de préparation d'enseignement. Dans le cas de l'artefact mécanique « Cordélec », les schèmes d'utilisation peuvent donc être des situations didactiques pour utiliser l'artefact. Les situations didactiques étant destinées aux enseignants et aux élèves, donc dans ce cas, les schèmes d'utilisation prescrits, s'adressent aux deux utilisateurs puisque les deux sont amenés à utiliser l'artefact. Alors que le schéma classique attribue un utilisateur à un outil (enseignant utilise un artefact (voir figure 3), l'instrument est utilisé par deux types d'utilisateurs différents : l'enseignant et les élèves. Dans le cas du guide d'utilisation de l'artefact, les schèmes correspondent aux opérations (recherche d'information, déplacement dans le guide, récupération des ressources…) effectuées par les enseignants pour utiliser le guide d'utilisation. A priori, seuls les enseignants sont amenés à utiliser le guide d'utilisation, raison pour laquelle les schèmes ne s'adressent qu'à eux (voir figure 4).

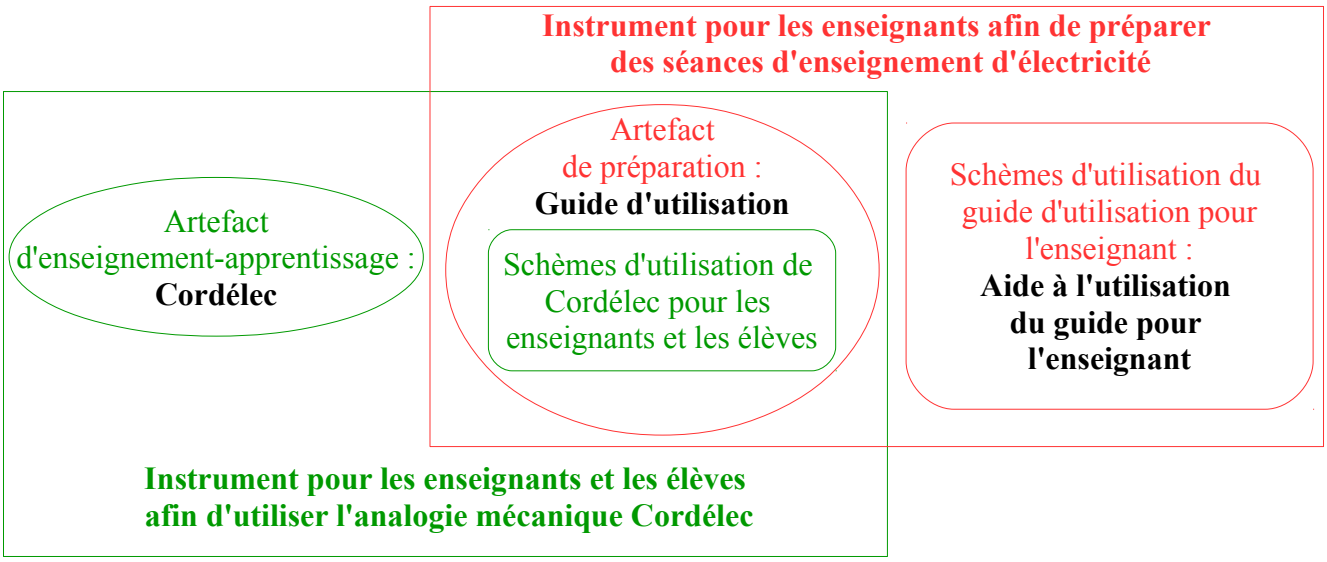


Figure 4 : Instruments étudiés

« La genèse des schèmes d'utilisation relève de deux processus : un processus d'instrumentalisation qui rend compte de l'attribution de fonctions à l'artefact par le sujet en prolongement de ses fonctions initialement prévues ; un processus d'instrumentation qui rend compte de la construction d'habiletés par le sujet par adaptation, recomposition à partir d'anciennes et création de nouvelles » (Marquet & Leroy, 2004). Cette distinction permet de mieux comprendre le processus de genèse instrumentale (Rabardel, 1995a).

Pour qu'un instrument ait un intérêt, il est nécessaire qu'il satisfasse l'utilisateur qu'est l'enseignant (Goigoux, 2005). Cèbe et Goigoux (2007, p.186) utilisent le terme 'technocentrique' pour décrire « les approches qui se focalisent sur les savoirs que les artefacts convoquent ou les apprentissages qu'ils permettent et négligent l'analyse de l'activité des professionnels ». Les enseignants, lorsqu'ils utilisent un instrument, l'évaluent à deux niveaux : d'une part, par le biais du travail et des modifications dans leur travail que l'utilisation de l'instrument engendre et d'autre part par l'impact que l'instrument produit sur l'apprentissage des élèves (Cèbe & Goigoux, 2007). Comme Cèbe et Goigoux (2007) nous adoptons « la perspective 'anthropocentrique' qui alloue la première place à l'utilisateur sans toutefois négliger son objet – c'est-à-dire les élèves (leurs caractéristiques et leurs apprentissages) – ni minorer l'importance des connaissances à enseigner » (Figure 5).

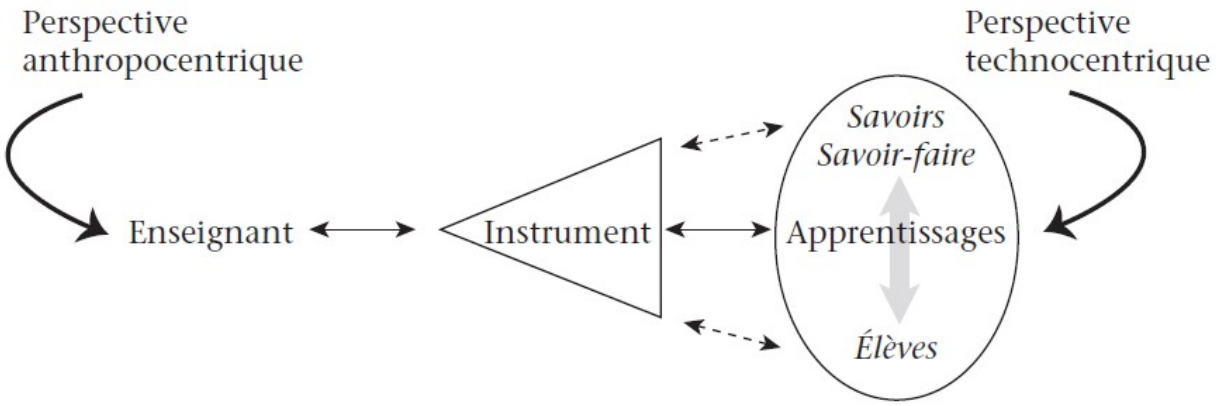


Figure 5 : Enseigner : une activité médiatisée par l'instrument (Cèbe & Goigoux, 2007)

Se pose alors la question des critères qui définissent ce que nous avons appelé l'intérêt de l'instrument. En ergonomie, il est question de facilité d'usage ou encore 'd'utilisabilité'. « L'utilisabilité, dérivé du terme anglais 'usability' aborde précisément la question de l'adaptation des technologies aux caractéristiques physiques, psychologiques et sociales de l'utilisateur » (Brangier & Barcenilla, 2003, p.1). Brangier & Barcenilla (2003) ont défini des critères qui permettent d'évaluer l'utilisabilité d'un instrument, critères sur lesquels nous pouvons nous appuyer pour évaluer les instruments conçus (annexe 1). On dira qu' « un système est utilisable lorsque l'utilisateur peut accomplir sa tâche (efficacité), avec un minimum de ressources pour le faire (efficience) et que le système est estimé agréable à utiliser (satisfaction). À ces critères s'ajoutent la facilité d'apprentissage et la tolérance du système aux erreurs de l'utilisateur » (Brangier & Barcenilla, 2003, p.183).

Chapitre 2.
Problématique et questions de recherches

Le but de cette thèse est de mesurer l'effet de l'utilisation de l'analogie mécanique sur l'apprentissage des élèves de terminale S. Cet effet est conditionné par un ensemble de facteurs. Une simple évaluation finale de l'évolution des performances des élèves ne permettrait pas de comprendre la ou les causes de cet impact. Plusieurs éléments du cadre théorique qui vient d'être présenté permettent de mieux saisir l'ensemble de ces facteurs qui peuvent avoir un effet sur l'apprentissage des élèves s'appuyant sur l'analogie mécanique dans le cadre d'un enseignement scolaire. Plusieurs conditions doivent donc être remplies pour qu'une analogie soit efficace : savoir si ces conditions sont remplies permettra de comprendre la ou les raisons qui permettent d'expliquer l'effet de cette analogie.

La première condition à remplir pour qu'une analogie soit efficace (Johsua & Dupin, 1989) réside dans l'isomorphisme entre le domaine source et le domaine cible. Plus l'isomorphisme est important, plus l'analogie est efficace, puisque la richesse des relations entre domaine source et cible permettra à l'élève d'établir une grand nombre de liens entre domaine source et domaine cible. Il est également indispensable de préciser les limites de cette analogie pour connaître son domaine d'application et les relations qui sont incorrectes entre les domaines source et cible. **L'étude de l'isomorphisme de structure et de relation est la première question de recherche qui sera traitée dans cette thèse et sera repérée sous le sigle QdR1**[10].

Les recherches menées en didactique des sciences (Closset, 1983b ; Michelet et al., 2007) montrent que l'apprentissage de l'électrocinétique se heurte à un ensemble de conceptions que les élèves doivent dépasser pour construire une ensemble cohérent de concepts afin d'expliquer et prévoir un ensemble de phénomènes électrocinétiques. Il est donc indispensable de savoir si cette analogie permet aux élèves de travailler les conceptions sans les renforcer comme c'est le cas de certaines autres analogies (rivière, camionnettes...). De plus, nous chercherons à savoir si l'analogie remplit les conditions didactiques énoncées par (Reinders Duit & Von Rhöneck, 1998) que doit remplir un enseignement visant le dépassement de ces conceptions. La seconde question de recherche **(QdR2) porte sur la capacité de l'analogie à travailler les conceptions des élèves**.

Après avoir déterminé les conceptions que permet de travailler cette analogie, il est nécessaire de vérifier que le public, pour lequel est destinée l'analogie, rencontre bien les difficultés d'apprentissage que l'analogie permet de travailler. Autrement dit, il s'agit de **déterminer si les élèves de terminale S rencontrent des difficultés d'apprentissage des concepts que l'analogie permet de travailler (QdR3)**. Si cette condition n'est pas remplie, l'analogie n'a pas d'intérêt. Pour répondre à cette question il est nécessaire de déterminer si les élèves ont des difficultés avant enseignement et si l'enseignement ordinaire (sans l'analogie) permet ou non d'enseigner efficacement l'électrocinétique. C'est à cette double condition que l'analogie peut présenter un gain pour les élèves.

Newton (2003) indique que l'utilisation d'une analogie complexifie la construction de la connaissance. Les élèves doivent d'abord acquérir le domaine source. Ainsi l'analogie peut présenter un gain pour les élèves si et seulement si le domaine source est plus facilement compréhensible que son domaine cible (Dupin & Johsua, 1994). Ainsi, la question de recherche 4 **(QdR4) vise donc à vérifier que le domaine source est plus facilement appropriable que le domaine cible**.

La cinquième condition à remplir pour qu'une analogie présente un gain pour les élèves , repose sur la capacité des élèves à établir sans difficulté des liens entre le domaine source et le domaine cible

10 QdR signifie Question de Recherche, ce sigle est suivi d'un chiffre qui indique le numéro de la question de recherche à laquelle nous ferons référence dans la suite.

(Newton, 2003). Ainsi, nous devons vérifier **si les élèves qui participent à notre étude font facilement les liens entre le domaine source mécanique et le domaine cible (QdR5)**.

Si l'analogie mécanique possède un isomorphisme important, permet de travailler les conceptions et les connaissances en électricité, si les élèves participant à notre étude ont des difficultés en électricité, comprennent plus facilement le domaine source que le domaine cible et établissent sans difficulté les liens entre les deux domaines, alors toutes les conditions didactiques technocentrées sont requises pour que l'analogie soit efficace. Nous pourrons alors vérifier **si cette analogie a un effet sur l'apprentissage, l'acquisition des connaissances et le dépassement des conceptions chez les élèves de terminale S à court-terme et moyen-terme après enseignement (QdR6)**.

Certaines conditions didactiques anthropocentrées (Cèbe & Goigoux, 2007) doivent également être remplies pour que l'analogie soit efficace. En effet, l'obtention d'un effet sur l'apprentissage des élèves dépend également de l'utilisation que fait l'enseignant de cette analogie. **Connaître l'utilisation de l'analogie par les enseignants (QdR7)** constitue donc la septième question de recherche .

Enfin, le degré d'utilisation dépend à son tour d'un ensemble de facteurs que nous chercherons à identifier. **Il s'agira de déterminer les facteurs qui facilitent ou pas l'appropriation et la mise en œuvre de l'analogie du point de vue de l'enseignant**.**(QdR8)**

À l'issue de ce travail, en nous appuyant sur une vue globale des conditions d'efficacité de l'analogie mécanique, nous pourrons établir **la façon dont il est possible de favoriser l'utilisation et l'appropriation de l'analogie par les enseignants en vue d'un effet optimal sur l'apprentissage des élèves (QdR9)**.

Chapitre 3.
Analyse épistémique et didactique d'une nouvelle analogie pour enseigner l'électrocinétique

Après une revue de questions sur le choix des analogies dans l'enseignement de l'électricité, Mulhall *et al.* (2001) finit par conclure qu'il n'y a même pas le début d'un consensus chez les chercheurs sur le type de modèle/analogie/métaphore à utiliser pour l'enseignement de l'électricité. C'est dans ce contexte qu'une nouvelle analogie a été développée, qui selon nous, apporte des réponses aux principaux problèmes posés par l'enseignement de l'électrocinétique.

Avant d'étudier les conditions d'appropriation de cette analogie et son impact sur les pratiques enseignantes et l'apprentissage des élèves, il est nécessaire d'une part d'effectuer une analyse précise de la cohérence de structure et des relations entre les domaines source et cible et d'autre part de vérifier *a priori* les capacités de cette analogie à favoriser le dépassement des conceptions des élèves.
Dans ce chapitre, nous tenterons donc de répondre aux questions suivantes :
1. Y a-t-il isomorphisme important entre le domaine source et le domaine cible au niveau des structures et des relations entre les concepts des deux domaines ?
2. Cette analogie présente-t-elle *a priori* les conditions pour dépasser les conceptions des élèves ?

3.1. Analyse épistémique de la nouvelle analogie

Dans ce paragraphe (Mercier-Dequidt & Morge, 2014), après une présentation globale de l'artefact, nous détaillerons les correspondances isomorphiques des grandeurs, relations entre grandeurs et des objets.

Nous commencerons par présenter les concepts de tension, intensité, travail, puissance et énergie dans les deux domaines. Ensuite, chaque dipôle sera étudié séparément. Pour chacun d'eux, nous présenterons :
- les objets électriques avec leurs équivalents mécaniques
- la ou les grandeurs qui sont des attributs de ces objets électriques avec leur équivalent mécanique,
- les structures conceptuelles avec leurs équivalents mécaniques, et nous montrerons les limites de cette analogie.

3.1.1. Description de l'artefact

L'artefact est composé d'une corde, formant une boucle fermée, tendue autour de 4 poulies fixées sur un socle carré ou rectangulaire. Les poulies sont fixées aux angles du support comme l'indiquent les figures 2 et 6. Cette corde est entraînée par une masse qui tombe. Le long de la corde il est possible d'ajouter des éléments analogues aux composants électriques et qui seront présentés au paragraphe suivant (3.1.3).

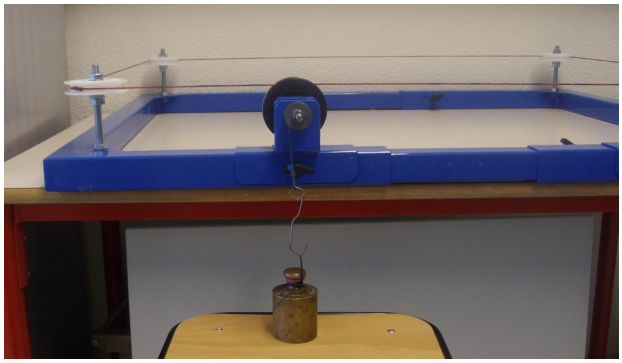


Figure 6 : Photo de l'artefact (cadre et générateur mécanique)

3.1.2. Analogies entre grandeurs

3.1.2.1. Courant, intensité et charge électriques

Le courant électrique est matérialisé par le déplacement de la corde. Ainsi, l'intensité électrique i correspond à la vitesse v d'une portion de corde. Contrairement au domaine électrique dans lequel le courant électrique n'est pas perceptible, le déplacement de la corde peut être observé par les élèves. La masse qui chute et qui entraîne la corde autour des poulies n'est pas en chute libre. En effet, la corde qui circule est soumise à des forces de frottement qui se répercutent sur la ficelle qui retient la masse. D'un point de vue mécanique, la vitesse de la corde est nulle puis augmente rapidement pour atteindre une vitesse limite. Cette durée correspond à la durée du régime transitoire en électricité. En revanche, l'ordre de grandeur de la durée pour atteindre la vitesse limite de la corde en mécanique ou l'intensité maximale en électrocinétique est différente.
La vitesse de la corde peut être mesurée quantitativement à l'aide d'un tachymètre qui est donc l'analogue de l'ampèremètre.

$$v \Leftrightarrow i$$

L'analogue mécanique de la charge électrique q est une portion de la corde, repérée par sa position x.

$$x \Leftrightarrow q \quad \text{et} \quad v = \frac{dx}{dt} \Leftrightarrow i = \frac{dq}{dt}$$

Le tachymètre peut être réalisé en mesurant la vitesse de chute de la masse (mais cette façon peut poser problème d'un point de vue didactique dans la mesure où il n'y a pas d'équivalent électrique). On peut également disposer régulièrement des réflecteurs sur la corde qui circule autour des poulies et déterminer la vitesse de circulation de la corde avec un stroboscope en faisant varier la fréquence de ses flashes. L'utilisation du tachymètre et la mesure de la vitesse de la corde sont donc possibles[11]. Mais la conservation de la vitesse avant et après le récepteur peut être déterminée par simple raisonnement puisqu'elle résulte du principe de conservation de la matière, principe acquis chez les élèves.

11 Le choix d'utiliser ou non un tachymètre reste de la responsabilité de l'enseignant et dépend du programme à enseigner (cela peut être l'occasion de mesurer une vitesse)

3.1.2.2. Potentiel et tension électriques

Le potentiel électrique V est représenté par la tension de la corde T. La tension électrique U, différence de potentiel entre deux points du circuit, correspond à une différence de tension de la corde entre deux points de celle-ci. La tension électrique a donc pour analogue mécanique une force F correspondant à la différence de tension de la corde.
Cette tension mécanique peut être perçue qualitativement au toucher contrairement à son analogue électrique. Elle peut également être mesurée quantitativement à l'aide d'un dynamomètre ou tensiomètre. Le voltmètre n'a pas d'analogue mécanique direct car la mesure de la force mécanique nécessite deux dynamomètres ou tensiomètres, donc deux mesures et un calcul.

$$T \Leftrightarrow V$$

$$F = \Delta T \Leftrightarrow U = \Delta V$$

Le potentiel électrique n'est pas habituellement ce qui est mesuré dans un circuit (bien que sa mesure pourrait s'envisager en regardant la tension par rapport à la Terre), alors que la tension de la corde (analogue du potentiel) est justement ce que nous pouvons mesurer. À l'opposé, la tension électrique est mesurable (sans pour autant être perceptible) en électricité alors que la différence de tension de la corde ne l'est pas. Ceci pourrait être considéré comme une limite de l'isomorphisme, même si sur le plan didactique il est intéressant de mesurer dans le domaine source ce qui ne l'est pas dans le domaine cible. Ainsi nous considérons que dans quelques cas, un mauvais isomorphisme n'est pas forcément un inconvénient didactique.

3.1.2.3. Travail, puissance électrique et énergie électrique

Le travail correspondant au déplacement x de la corde sous une tension T est : $W = T \,.\, x$. De même, pour placer une charge q sous un potentiel électrique V, il faut fournir un travail : $W = V \,.\, q$.

La puissance dissipée par un composant électrique est $P_{électrique} = U.i$. De même, la puissance dissipée dans un élément mécanique est $P_{mécanique} = F.v$. Donc dans le cadre de cette analogie, la puissance électrique a un analogue mécanique cohérent.

$$P_{mécanique} = F \,.\, v \Leftrightarrow P_{électrique} = U \,.\, i$$

L'analogue mécanique de l'énergie électrique consommée par un composant sera étudié pour chaque composant dans le paragraphe suivant.

3.1.3. Dipôles électriques et analogues mécaniques

3.1.3.1. Les générateurs

Le générateur de tension (figures 7 et 8) est matérialisé par une masse dont le poids entraîne une poulie 1 (de rayon r_1). Cette poulie 1 est solidaire d'une poulie 2 (r_2) qui entraîne la corde.

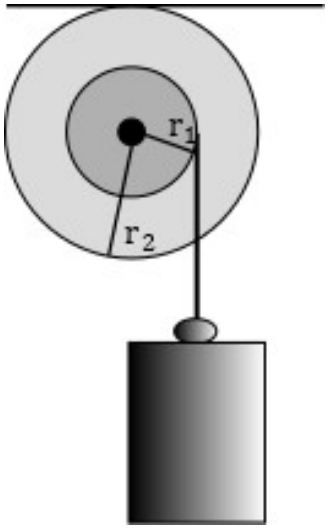


Figure 7 : Schéma du générateur mécanique de tension

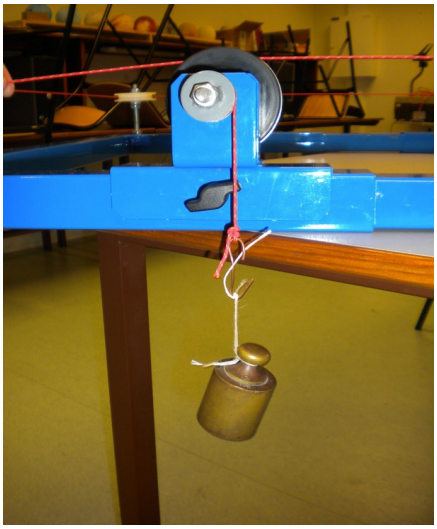


Figure 8 : Photo du générateur

La force F exercée sur la corde par le générateur mécanique vaut : $F = m.g.\frac{r_1}{r_2}$. Ce générateur mécanique de tension est donc l'analogue d'un générateur de tension électrique car il impose une force et non une vitesse comme le ferait un générateur d'intensité. Selon le sens d'enroulement de la ficelle auquel est suspendue la masse, le générateur peut faire tourner la corde dans un sens ou dans l'autre comme le fait, en électricité, le générateur de tension continue selon son sens de branchement. Quand la masse touche le sol, le générateur n'exerce plus de force sur la ficelle , de la même façon qu'un accumulateur déchargé ne délivre plus de tension.

$$F = m.g.\frac{r_1}{r_2} \Leftrightarrow f.é.m.$$

Il est également possible de fabriquer un générateur de tension alternative (figure 9) avec une came : la rotation de la came exerce une force alternativement sur les deux fils reliés au bâti par un ressort.

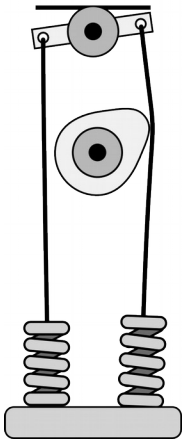


Figure 9 : Schéma du générateur alternatif mécanique

En électricité, les générateurs, comme la pile, ne sont pas toujours parfaits et peuvent posséder une résistance interne $r_{interne}$. On retrouve cette équivalence de structure en mécanique, la résistance interne de la pile correspondant au coefficient de frottement du générateur mécanique.

$$F = m.g.\frac{r_1}{r_2} - \xi.v \Leftrightarrow U = f.é.m. - r_{interne}.i$$

Sur le plan énergétique, le travail du poids des masses du générateur $W = F.\Delta x$ correspond au travail électrique du générateur $W = U.\Delta q$.

3.1.3.2. Interrupteur

L'interrupteur est matérialisé par une pince qui serre la corde et lui impose une vitesse nulle. L'équivalent de la pince fermée est l'interrupteur ouvert. En effet, lorsque l'interrupteur est ouvert, le courant cesse de circuler. De la même façon, lorsque la pince serre la corde, celle-ci cesse de circuler. En électricité, un interrupteur *ouvert* empêche la circulation du courant. En mécanique, il faut que la pince soit *fermée* pour arrêter la circulation de la corde. Les domaines source et cible ne sont donc pas en parfaite cohérence sur le plan du vocabulaire. Mais il ne s'agit pas d'une limite conceptuelle de l'artefact dans la mesure où nous pouvons considérer le fait d'ouvrir l'interrupteur comme l'introduction d'un isolant, l'air, dans le circuit. Ouvrir le circuit électrique est équivalent à pincer la corde. Dans les deux cas, une résistance infinie ou quasi-infinie est introduite dans le circuit.

3.1.3.3. Composants électriques ohmiques

La résistance R est analogue à un coefficient ξ de frottement qui s'exerce sur la corde proportionnellement à sa vitesse. Dans l'artefact, le conducteur ohmique est matérialisé par un frein (figures 10 et 11). Ce frein est constitué de deux plaques qui enserrent la corde et il est possible de contrôler la résistance mécanique due au frein grâce à une masse plus ou moins lourde posée sur la plaque supérieure.

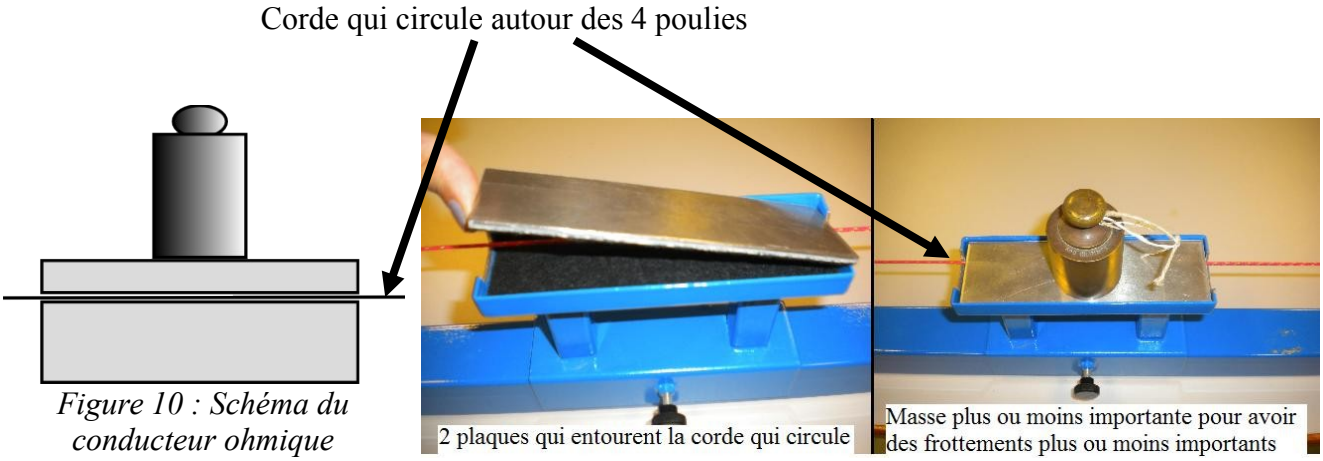


Figure 10 : Schéma du conducteur ohmique mécanique ou frein

Figure 11 : Photos du conducteur ohmique mécanique

L'analogue mécanique de la loi d'Ohm est une loi de frottement visqueux, proportionnel à la vitesse ($F = \xi.v$). Dans la version de l'artefact présentée sur les photos ci-dessus (figures 10 et 11), le frottement imposé par le frein ou la brosse est un frottement solide. Il est donc nécessaire d'exercer

une force minimale pour dépasser la force d'adhérence et ainsi mettre la corde en mouvement. De plus, la force de frottement solide sur la corde n'est pas proportionnelle à la vitesse. Il s'agit ici d'une limite de l'analogie. Notons qu'il serait tout à fait envisageable de fabriquer un analogue mécanique du résistor avec des frottements fluides, mais le coût de réalisation serait sensiblement accru.

$$\xi \Leftrightarrow R$$

La loi d'Ohm qui relie la tension à l'intensité dans un composant électrique ohmique $U = R.i$ s'écrit de façon analogue pour le système mécanique $F = \xi.v$.

$$F = \xi.v \Leftrightarrow U = R.i$$

Dans une première approximation, il est possible de considérer, dans un circuit électrique, que la lampe et le conducteur ohmique ont pour analogue le frein.

Dans l'artefact, il y a toujours des frottements résiduels au niveau des poulies. Ces frottements agissent même en l'absence de frein ou de brosse. Ils ont un équivalent électrique : la résistance des fils électriques et les résistances internes des composants électriques (générateur, bobine...).

3.1.3.4. Diode

La diode est un composant électrique qui ne laisse passer le courant que dans un sens. Son analogue mécanique est un taquet coinceur (figure 12). La force d'adhérence en sens passant peut, dans une première approximation, avoir comme équivalent la tension de seuil.

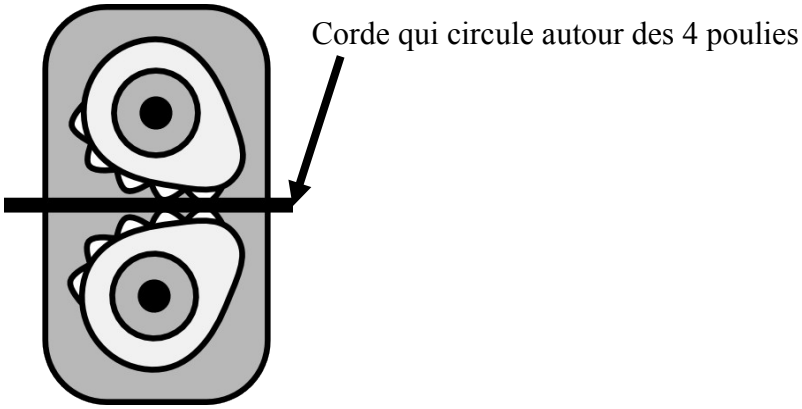


Figure 12 : Schéma d'une diode mécanique

3.1.3.5. Condensateur

Le condensateur est un composant électrique qui se charge et se décharge ; une fois chargé, il bloque le passage du courant électrique. Son analogue est composé de deux ressorts séparés par une bague fixée sur la corde (figures 13, 14). La mise en charge du condensateur correspond à la compression d'un ressort. Lorsqu'un ressort est comprimé, et lorsque la force exercée par le générateur sur la corde est égale à la force exercée par le système « bague + ressort » sur la corde, celle-ci ne circule plus. La décharge électrique du condensateur correspond à la détente du ressort comprimé qui retrouve alors sa longueur au repos. La corde étant toujours serrée par la bague, elle circule de nouveau lors de la décompression du ressort. Les ressorts ne sont pas fixés à la cavité ni même à la bague ; ainsi lorsqu'un ressort est comprimé, le second ressort n'est ni comprimé ni

détendu, il reste au repos. Pour éviter le flambage des ressorts, l'artefact a été perfectionné : une gouttière est glissée dans les ressorts et dans la fente de la gouttière peut circuler la bague de serrage de la corde Louvel & Moissenet, 2012.

Corde qui circule autour des 4 poulies

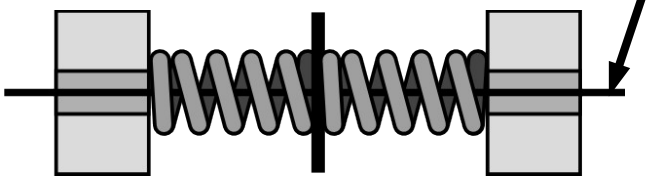


Figure 13 : Schéma du condensateur mécanique

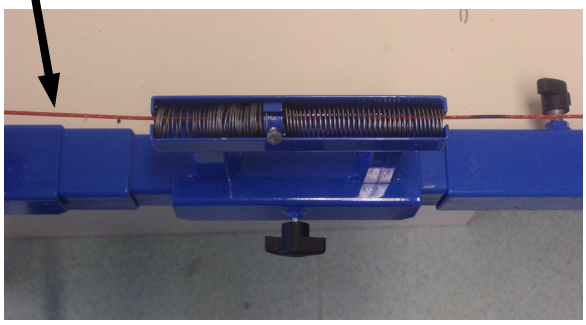


Figure 14 : Photo du condensateur mécanique (ressort gauche comprimé)

Dans le cas d'un condensateur de capacité C, la charge q portée par ses plaques est : $q = C.U$. Du point de vue mécanique, le déplacement x, correspondant à la compression du ressort, engendre une force élastique : $F = k.x$ où k représente la constante de raideur du ressort. Ainsi, $k \Leftrightarrow \frac{1}{C}$.

En électricité, lors de la décharge du condensateur, le courant circule dans le sens inverse de celui dans lequel il circulait lors de la charge du condensateur. Dans le cas de l'analogie, lors de la décompression du ressort, la corde va circuler en sens inverse de celui dans lequel elle circulait lors de la compression du ressort. Les phénomènes mécaniques liés au condensateur sont cohérents avec les phénomènes électriques.

Enfin, l'énergie emmagasinée dans un condensateur est $E = \frac{1}{2} C.U^2 = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}$. En mécanique, l'énergie emmagasinée dans un ressort est $E = \frac{1}{2} \frac{F^2}{k} = \frac{1}{2} k.x^2$. Il y a donc aussi correspondance entre les deux domaines pour l'énergie.

3.1.3.6. Bobine

En électricité, la bobine est un composant qui s'oppose aux variations d'intensité. Elle est matérialisée dans l'analogie mécanique par un volant d'inertie solidaire d'une poulie (figures 15 et 16).

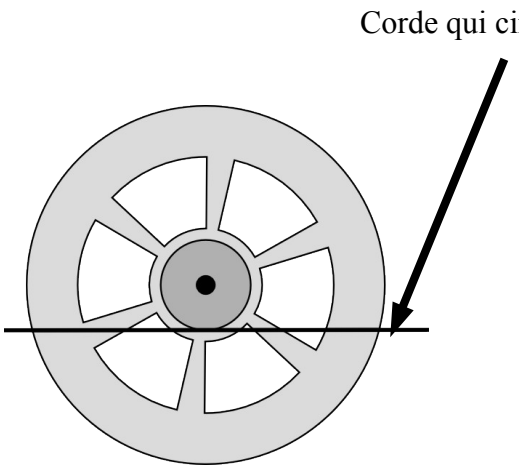


Figure 15 : Schéma de la bobine mécanique ou volant d'inertie

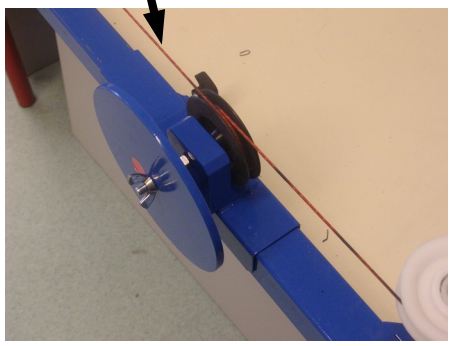


Figure 16 : Photo de la bobine mécanique

Pour mettre en mouvement la corde ou pour l'arrêter, il faut vaincre l'inertie du volant. L'inductance L de la bobine a ainsi pour analogue $\frac{J}{r^2} \Leftrightarrow L$ où J est le moment d'inertie du volant et r le rayon de la poulie.

L'équation caractéristique d'une bobine est $U = -L.\frac{di}{dt}$. L'équivalent mécanique est le principe fondamental de la dynamique : $F = \frac{J}{r^2}.\frac{dv}{dt}$.

En électricité, lorsque la bobine continue de délivrer du courant alors qu'il n'y a plus de source d'énergie, le courant circule dans le même sens qu'il circulait lors de l'établissement du courant dans le circuit. Dans le cas de l'analogue mécanique, le volant poursuit sa rotation dans le même sens qu'avant l'arrivée en bout de course de la masse qui entraîne la corde. Ainsi, l'analogue mécanique de la bobine est cohérent avec les phénomènes mesurables électriques.

Enfin, l'énergie emmagasinée dans une bobine est $E = \frac{1}{2} L.i^2$. En mécanique l'énergie emmagasinée dans le volant d'inertie est $E = \frac{1}{2} m.v^2 = \frac{1}{2} J.\omega^2$ où ω est la vitesse de rotation du volant.

Même en l'absence de volant d'inertie, le circuit mécanique présente une certaine inertie due aux mouvement de différents éléments mécaniques (les quatre poulies et la masse de la corde). Cette inertie peut être considérée comme l'analogue de l'auto-induction du circuit électrique.

3.1.3.7. Le transformateur

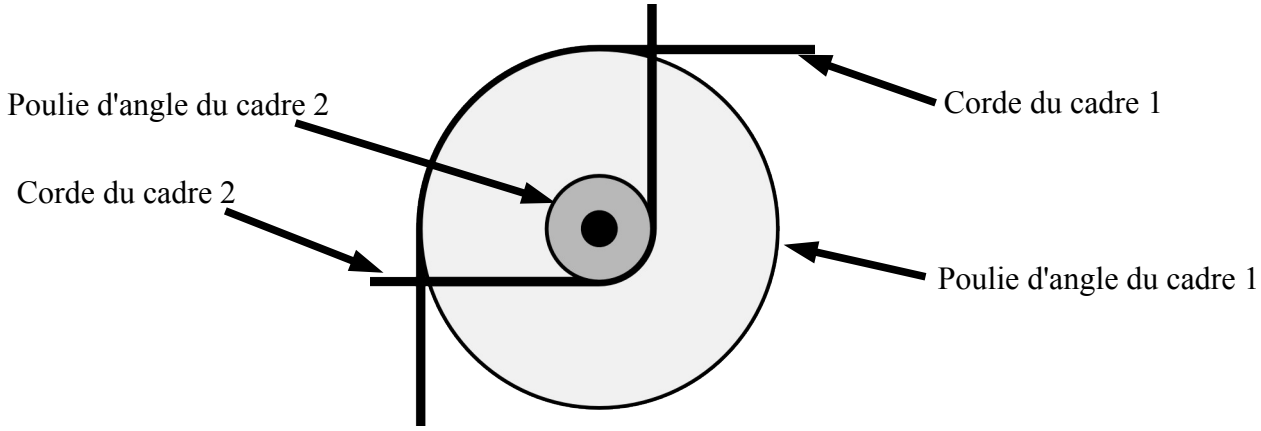


Figure 17 : Schéma du transformateur mécanique

L'analogue du transformateur est formé de deux poulies coaxiales (figure 17), de rayons r_{primaire} et $r_{\text{secondaire}}$, qui relient deux cordes en boucle fermée. Le rapport de transformation mécanique est le rapport des rayons des poulies coaxiales.
Contrairement au transformateur électrique, le transformateur ainsi conçu en mécanique peut fonctionner en mouvement continu. Il s'agit d'une limite de l'analogie. Le champ magnétique créé par le déplacement du courant électrique n'a pas d'équivalent en mécanique. Le domaine de l'électromagnétisme constitue un domaine dans lequel l'analogie ne fonctionne pas.

$$\frac{F_{secondaire}}{F_{primaire}} = \frac{r_{primaire}}{r_{secondaire}} \Leftrightarrow \frac{U_{secondaire}}{U_{primaire}} = \frac{N_{secondaire}}{N_{primaire}}$$

$$\frac{v_{secondaire}}{v_{primaire}} = \frac{r_{secondaire}}{r_{primaire}} \Leftrightarrow \frac{i_{secondaire}}{i_{primaire}} = \frac{N_{primaire}}{N_{secondaire}}$$

N, représentant le nombre de spires, a donc pour analogue mécanique $\frac{1}{r}$.

3.1.4. Temps caractéristiques

Nous avons montré dans les deux paragraphes précédents que les grandeurs fondamentales du domaine cible (électricité) ont une correspondance unique dans le domaine source (mécanique). De même, les attributs des composants électriques à deux bornes (*R*, *C*, *L*,...) ont une correspondance unique en mécanique (ξ , *1/k*, *m*,...). Cela veut donc dire que cette analogie est isomorphe pour les circuits en série. De plus, les relations entre les grandeurs sont directement transposables, y compris celles concernant l'évolution temporelle et l'énergie (loi d'Ohm, principe fondamental de la dynamique, l'équation donnant la puissance...). Une évolution constatée dans le domaine source se produit de façon similaire dans le domaine cible. Par exemple, lors de l'établissement du courant dans un circuit comportant une bobine, l'intensité augmente jusqu'à atteindre une valeur limite. Dans le cas de l'artefact mécanique, la vitesse de la corde augmente progressivement jusqu'à atteindre une vitesse limite constante. De même, en électricité, plus la résistance d'un composant électrique ohmique est élevée, plus l'intensité du courant est faible ; en mécanique, plus le frein serrera fort la corde, plus celle-ci sera ralentie. Ainsi, les équations donnant les temps

caractéristiques (tableau 1) dans le domaine cible sont directement obtenues à partir de celles du domaine source.

Type de circuit	Temps caractéristique électrique	Temps caractéristique mécanique
Circuit RC Circuit comportant résistance et condensateur	$\tau_C = R.C$	$\tau_C = \frac{\xi}{k}$
Circuit RL Circuit comportant résistance et bobine	$\tau_L = \frac{L}{R}$	$\tau_L = \frac{m}{\xi}$
Circuit LC Circuit comportant bobine et condensateur	$\tau_{LC} = \sqrt{L.C}$	$\tau_{LC} = \sqrt{\frac{m}{k}}$

Tableau 1 : Correspondance entre temps caractéristiques électrique et mécanique pour différents types de circuits

3.2. Limites de l'analogie

Cette analogie mécanique présente des limites dont certaines sont similaires à celles présentées par Johsua et Dupin (1989) dans l'analogie du train.

Le champ électrique ou magnétique lié à la présence et/ou au déplacement de charges électriques n'a pas d'équivalent dans cette analogie, ni dans les autres analogies d'ailleurs.

En français, le mot tension est utilisé à la fois pour désigner la tension électrique et la tension de la corde mais ne renvoie pas exactement au même concept du point de vue de l'isomorphisme structurel : la tension mécanique correspond à la notion de potentiel électrique qui définit l'état électrique d'un point du circuit. L'ambiguïté du terme « tension » peut être source de confusion.

Le courant électrique se déplace du potentiel le plus élevé au potentiel le plus bas. A l'inverse, la corde se déplace de la portion la moins tendue vers la portion la plus tendue. En réalité, la tension électrique a plutôt pour analogue mécanique l'opposé de la force. Une étude des covariations et contravariations entre les valeurs absolues des grandeurs permet d'éviter cette difficulté (l'intensité est en sens inverse du déplacement des charges négatives). La charge électrique peut être positive ou négative. Dans le cadre de cette analogie, le signe de la charge électrique n'a pas d'équivalent.

A l'instar des analogies de la chaîne de vélo et du train, cet artefact permet d'étudier les circuits en série mais il est insuffisant pour les circuits en dérivation. Les raisonnements appliqués dans le domaine mécanique restent néanmoins valables sur n'importe quelle branche d'un circuit soumis à une tension U. Ainsi, un enseignement des circuits avec l'analogie mécanique considérerait un circuit en dérivation, comme un circuit composé d'un ensemble de branches comme c'est le cas lorsque l'on applique la loi des mailles, ou loi de Kirchoff).

Dans l'analogie de la corde en boucle fermée, l'intensité est représentée par la vitesse de déroulement de la corde. Ainsi, le passage de la notion de vitesse à celle de débit doit être pris en

charge dans la progression (comme c'est d'ailleurs le cas pour l'analogie du train, de la chaîne de vélo, des camionnettes…).

3.3. Analyse a priori de l'intérêt didactique de l'analogie à dépasser les conceptions en électrocinétique : caractères perceptibles des concepts du domaine source

Dans ce paragraphe nous présentons les arguments qui nous laissent supposer que l'utilisation de l'artefact analogique aura un effet positif sur l'évolution des conceptions des élèves. Nous discutons également des avantages et des inconvénients de cette analogie par rapport aux autres analogies.

3.3.1. Le déplacement de la corde : moyen pour travailler les conceptions unifilaire, à courants antagonistes et usure du courant

Le déplacement de la corde autour des quatre poulies permet de raisonner sur un circuit fermé et, par conséquent, de travailler la conception unifilaire.

La loi suivante « l'intensité est la même en tout point d'un circuit en série » a pour analogue « la vitesse de la corde est la même en tout point du circuit suivi par la corde ». Bien que cette loi soit enseignée dès le collège, elle n'est pas systématiquement appliquée par les élèves pour lesquels on voit apparaître la conception de l'usure du courant (Duit et Von Rhöneck, 1998). En utilisant l'artefact, les élèves peuvent percevoir que la vitesse de la corde est la même partout. Elle ne va pas moins vite après un élément mécanique qu'avant et elle n'a pas deux sens de circulation différents. Cette caractéristique est présente dans d'autres analogies comme celles des camionnettes, du train et l'analogie hydraulique en circuit fermé. Elle ne l'est pas dans l'analogie hydraulique en circuit ouvert (la rivière).

La conception du courant unifilaire réapparaît lorsque les élèves abordent le condensateur (Duit et Von Rhöneck, 1998). L'analogie de la corde en boucle fermée permet de travailler à nouveau cette conception. Ce n'est pas le cas des analogies du train et des camionnettes.

3.3.2. Caractère perceptible d'un phénomène systémique pour lutter contre le raisonnement séquentiel

L'artefact incite à la mise en place d'un raisonnement systémique et non plus séquentiel. En effet, une modification en aval a un effet sur l'ensemble du système et donc en amont de celui-ci et ce de manière simultanée et instantanée. L'analogie de la corde en boucle fermée rend visible la modification de l'ensemble du système ce qui n'est pas le cas des analogies du train et des camionnettes qui sont des analogies de pensée. Ce n'est pas non plus le cas de l'analogie hydraulique en circuit fermé car le caractère systémique du débit d'eau dans une branche n'est pas visible.

3.3.3. Caractère perceptible des propriétés du générateur de tension pour lutter contre la conception « la pile délivre toujours la même intensité »

Dans un simple circuit mécanique comportant un générateur de tension mécanique et un frein, les élèves pourront constater directement que la vitesse de la corde diminue quand le frottement dû au frein est plus important. Une analogie en électricité devrait amener les élèves à se défaire de leur conception d'une pile qui débiterait toujours la même intensité quelle que soit la résistance des dipôles électriques insérés dans le circuit. Les autres analogies devraient donc permettre d'éviter cette conception mais le comportement du générateur (les pousseurs du train, la pompe dans le circuit hydraulique fermé) n'est ni visible ni connu.

3.3.4. Caractères perceptibles de la tension et de l'intensité pour mieux les différencier

Les notions de tension et d'intensité sont abstraites. Au contraire, leurs analogues mécaniques sont perceptibles. D'une part, la tension de la corde peut être perçue grâce au toucher direct de la corde ou à l'aide d'appareils de mesures. D'autre part, la vitesse de la corde peut être perçue par la vue ou par l'ouïe ou peut être inférée à partir du temps de chute de la masse du générateur. Ainsi, l'analogie mécanique peut être un moyen de différencier ces deux concepts et de définir, par analogie, la tension électrique comme une différence d'états électriques (versus différents états de la corde). De plus, il est possible de montrer, par une expérience simple (avec deux dynamomètres qui mesurent la tension de la corde), que la corde peut être soumise à une tension sans être en mouvement et ainsi différencier tension et intensité.
Voici un exemple qui illustre une analogie de relation entre ces deux grandeurs électriques abstraites. Si la résistance électrique n'est pas infinie, l'intensité du courant électrique dans le circuit n'est pas nulle ; d'un point de vue mécanique, si le frein mécanique ne bloque pas complètement la corde (équivalent d'une résistance de quelques Ohm), alors celle-ci circule. Si la résistance électrique est infinie alors l'intensité du courant électrique est nulle ; d'un point de vue mécanique, si le frein bloque complètement la corde, celle-ci ne circule pas.

La tension n'est pas prise en charge par les analogies du train sauf peut-être par la pensée en imaginant les interactions entre les wagons du train. En revanche, elle ne l'est pas pour celle des camionnettes qui ne se touchent pas contrairement aux wagons. Elle est prise en charge par l'analogie hydraulique en boucle fermée puisque son analogue est la pression mais rappelons que la pression est un concept peu maîtrisé par les élèves Closset, 1992.

3.3.5. Caractère perceptible de l'échauffement de la corde sur les doigts pour lutter contre la substantialisation de l'énergie

Cette analogie ne favorise pas la substantialisation de l'énergie car aucun élément ne matérialise l'énergie. En effet, lorsque la corde est pincée, il est possible de ressentir un échauffement sur les doigts ou de déterminer quantitativement l'élévation de température avec un thermomètre. La mesure est possible avec une interface autonome qui permet l'affichage des mesures d'un ou plusieurs capteurs. Pour illustrer ce point, une expérience a été faite pour un même frein mais une masse de chute différente (figure 18). La courbe de température la plus basse correspond au relevé de températures avec une masse faible qui chute et la courbe de température la plus élevée correspond au relevé avec une masse importante qui chute.

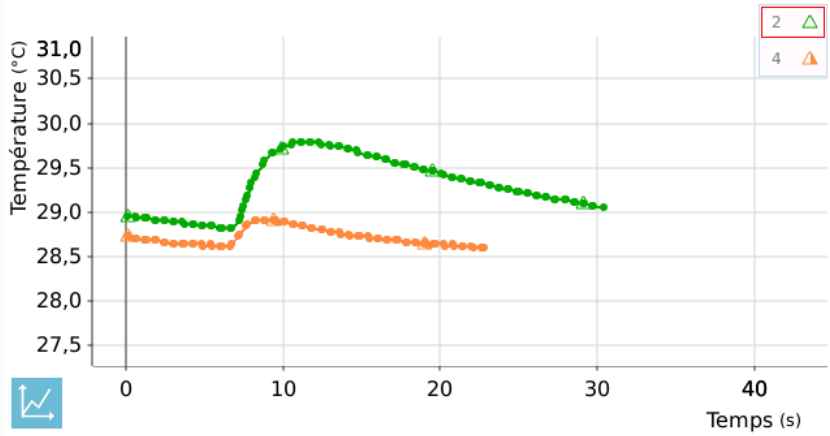


Figure 18 : Mesure de température pour deux freins mécaniques identiques (courbe supérieure : température relevée sur un frein réalisé avec une masse importante qui chute importante – courbe inférieure : température relevée sur un frein réalisé avec une masse faible qui chute)

Cette observation permet de penser simultanément et de manière non contradictoire le transfert d'énergie du générateur au récepteur et la conservation du courant. Cette analogie est la seule pour laquelle le transfert énergétique est perceptible sans être substantialisé.

3.4. Conclusion

L'analyse précédente de l'isomorphisme structurel entre le domaine source (mécanique) et le domaine cible (électrique) montre un grand nombre de liens et d'analogies positives. En effet, pour chaque composant électrique, il existe un analogue mécanique, il en est de même pour les grandeurs et leurs relations. Or, la robustesse de l'isomorphisme structurel et le faible nombre d'analogies négatives sont considérés comme des critères positifs d'une analogie utilisée à des fins d'enseignement (Kipnis, 2005).

Par ailleurs, l'artefact analogique de la corde en boucle fermée remplit les trois conditions énoncées par Duit et Von Rhöneck (1998) pour qu'un enseignement de l'électrocinétique favorise l'apprentissage. En effet, le flux de courant et le flux d'énergie sont clairement différenciés dans cette analogie ; l'intensité et la tension sont elles aussi clairement différenciées avec l'artefact dans la mesure où elles sont perceptibles ; un raisonnement séquentiel n'est plus possible puisque l'ensemble du système est mis en mouvement simultanément.

Enfin, cette nouvelle analogie possède des avantages que les analogies déjà existantes ne possèdent pas car :

- elle permet de traiter toutes les conceptions rencontrées en électrocinétique,
- elle permet des expérimentations dans le domaine source
- et plusieurs grandeurs ont un caractère perceptible (température, vitesse de la corde, tension de la corde, comportement systémique, condensateur, bobine, générateur de tension, diode...).

En revanche, la limite principale de cette analogie réside dans le fait qu'elle ne s'applique pas de manière directe à l'étude globale des circuits en dérivation contrairement à l'analogie hydraulique. En ce sens, ces deux analogies sont complémentaires.

Chapitre 4.
Méthodologie

Pour poursuivre l'étude des conditions d'efficacité de l'analogie mécanique pour l'apprentissage des élèves, nous allons nous appuyer sur un ensemble de données expliquées dans la partie suivante.

4.1. Premier corpus : Questionnaires élèves

Dans un premier temps, nous souhaitons connaître le niveau en électricité des élèves en début de terminale S. Par ailleurs nous souhaitons savoir si les élèves réussissent mieux en électricité qu'en mécanique. Autrement dit, nous cherchons à savoir si le domaine source est plus compréhensible que le domaine cible. De plus, nous souhaitons déterminer si l'utilisation de l'instrument favorise la compréhension des notions en électricité. Pour réaliser ces analyses, nous nous proposons de faire passer des questionnaires aux élèves.

4.1.1. Conception des questionnaires

Au total sept questionnaires (annexes 2) ont été conçus, avec, pour chacun, plusieurs questions à choix multiples afin de permettre un traitement quantitatif des données. Chaque question a seulement une seule bonne réponse (questionnaires multichotomiques). Chaque question possède alors entre trois et huit possibilités de réponse. Toutes les questions sont en lien avec le schéma d'un circuit électrique ou mécanique, comme c'est le cas habituellement dans l'enseignement.

Pour suivre l'évolution des connaissances des élèves en électricité, un questionnaire avant et des questionnaires après enseignement ont été réalisés. Pour savoir si l'utilisation de l'instrument avait un impact sur le niveau de connaissances acquises après enseignement, nous avons réalisé un questionnaire après enseignement à court-terme (T_1) et un questionnaire après enseignement à moyen-terme (T_2).

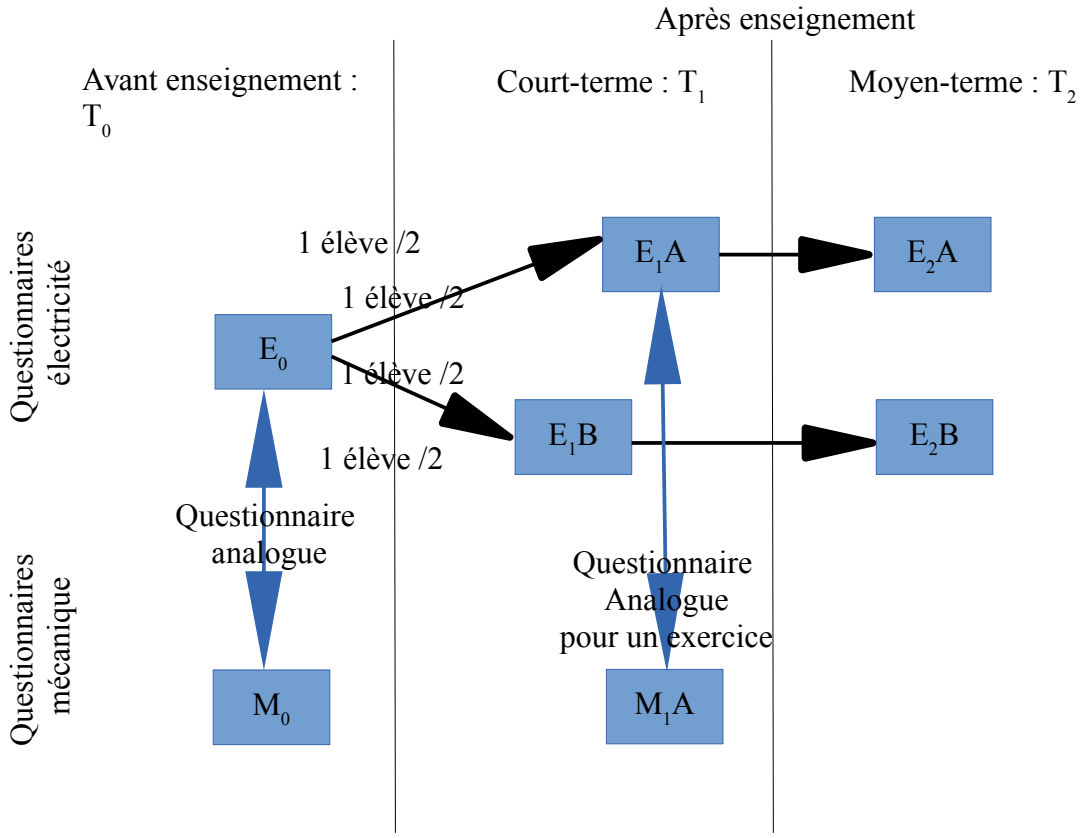


Figure 19 : Questionnaires distribués

Dans cette étude, les questionnaires avant enseignement et après enseignement ne sont pas identiques. Ils ne pouvaient pas l'être sauf si nous avions décidé de réaliser des questionnaires post enseignement qui ne portent que sur le niveau collège. Pour cette raison, le questionnaire avant enseignement portait sur des connaissances de la classe de quatrième et celui après enseignement portait sur des connaissances de terminale S.
De plus, comme les connaissances de fin de terminale S sont nombreuses, il était difficile de ne faire qu'un seul questionnaire de longueur raisonnable et qui permettait de balayer la totalité des connaissances traitées. Pour cette raison, nous avons réalisé deux questionnaires d'électricité à court-terme et deux questionnaires d'électricité à moyen-terme portant sur des questions différentes.
Enfin, nous avons choisi de questionner les élèves sur trois conceptions : l'usure du courant, la pile délivre toujours la même intensité et la confusion entre la tension et l'intensité car il nous a semblé qu'il s'agissait des conceptions qui pouvaient encore être présentes chez les élèves de terminale S. En effet, la conception des courants antagonistes devraient être dépassée à partir du moment où les élèves ont assimilé le sens de circulation du courant introduit en classe de cinquième et consolidé en classe de quatrième avec l'introduction des lois de la tension et de l'intensité dans les circuits en série et en dérivation.

Les différents questionnaires sont codés de la manière suivante :

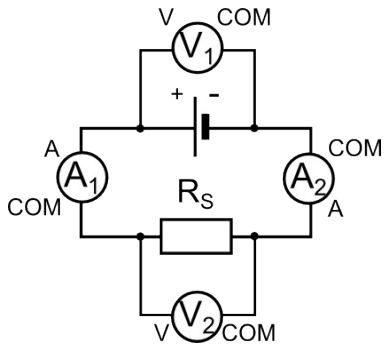
- les questionnaires E_0 (électricité, 10 questions) et M_0 (mécanique, 8 questions) sont remplis avant enseignement et le questionnaire d'électricité E_0 porte sur des connaissances d'électricité de niveau collège[12],
- les questionnaires E_1A (électricité sujet A, 18 questions), E_1B (électricité sujet B, 20 questions) et M_1A (mécanique, 6 questions) sont remplis immédiatement après l'enseignement, et les questionnaires d'électricité portent sur des connaissances d'électricité de terminale S,
- les questionnaires E_2A (électricité sujet A, 12 questions) et E_2B (électricité sujet B, 12 questions) sont remplis au moins deux mois après la séquence d'électricité. Et comme les questionnaires d'électricité E_1, les questionnaires E_2 portent sur les connaissances d'électricité de terminale S.

Comme les élèves participant à notre étude étaient dans une classe à examen, nous ne souhaitions pas réaliser des questionnaires trop longs mais nous voulions également couvrir l'empan des connaissances susceptibles d'être travaillées avec l'artefact. Conscients que le temps est compté dans ces classes, deux sujets A et B ont été conçus pour les questionnaires après enseignement à court terme et long terme. Pour limiter les temps de passation, nous avons fait le choix de limiter le questionnaire M_1A à un seul exercice et de ne pas faire de questionnaire de mécanique à moyen-terme.

Pour être en mesure de déterminer si le domaine source est plus compréhensible que le domaine cible, les questionnaires E_0 et M_0 sont constitués exactement des mêmes questions, seul le domaine diffère (Figures 20 et 21). Il en est de même pour un exercice du questionnaire E_1A et du questionnaire M_1A. Une comparaison des réponses à ces questions en électricité ayant un équivalent en mécanique permettra de déterminer si les élèves parviennent à s'approprier plus facilement le domaine mécanique que le domaine électrique (QdR4).

12 Le questionnaire est noté E lorsqu'il s'agit d'un questionnaire d'électricité et M lorsqu'il s'agit d'un questionnaire de mécanique. La lettre du questionnaire est suivi d'un chiffre, celui-ci indique l'instant auquel le questionnaire a été rempli par les élèves : 0 pour avant enseignement, 1 pour après enseignement court-terme et 2 pour après enseignement moyen-terme.

À titre d'exemple, voici une question similaire présentée dans deux questionnaires portant chacun sur un domaine différent (mécanique et électrique).



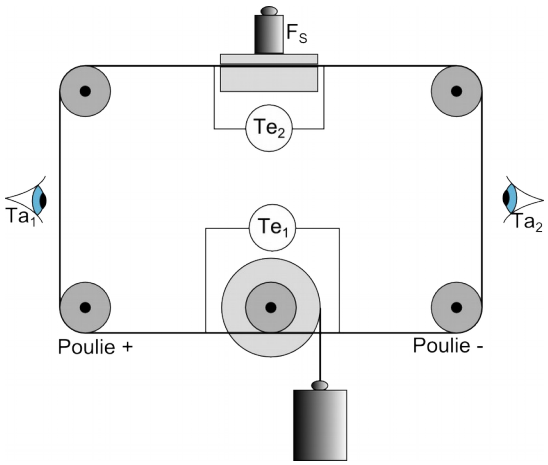
Le montage 1 comporte une pile et une seule résistance R_S. L'ampèremètre A_1 mesure l'intensité I_1 et l'ampèremètre A_2 mesure l'intensité I_2. On mesure la tension aux bornes de la pile avec le voltmètre V_1 et la tension aux bornes de la résistance R_S avec le voltmètre V_2. Les valeurs mesurées sont positives.

1.1 – Dans le montage 1, l'intensité I_1 mesurée par A_1 est :

inférieure	**égale**	**supérieure**

à l'intensité I_2 mesurée par A_2.

Figure 20 : Exemple de question dans le domaine électrique



Le montage 1 comporte une masse suspendue qui fait circuler le fil en boucle fermée et un frein F_S.
Le tachymètre Ta_1 mesure la vitesse v_1 du fil et le tachymètre Ta_2 mesure la vitesse v_2 du fil. On mesure la différence de tension du fil entre les deux côtés de la masse suspendue avec le tensiomètre Te_1 et la différence de tension du fil entre les deux côtés du frein F_S avec le tensiomètre Te_2.

1.1 – Dans le montage 1, la vitesse v_1 mesurée par Ta_1 est :

inférieure	**égale**	**supérieure**

à la vitesse v_2 mesurée par Ta_2.

Figure 21 : Exemple de question dans le domaine mécanique (question similaire à la question précédente)

4.1.2. Validation des questionnaires

Plusieurs questions dans chaque questionnaire mettent en jeu des conceptions en électricité. Pour évaluer la validité de ce questionnaire, nous voulions nous assurer 1) que les choix des réponses pour chaque question étaient sans ambiguïté (accord entre spécialistes) 2) que ces questions visaient bien les conceptions que nous souhaitions tester, 3) que les termes utilisés correspondaient aux termes employés par les enseignants de physique-chimie en terminale S. Ainsi, pour vérifier que les termes employés étaient identiques à ceux utilisés en classe, nous avons demandé à un enseignant de sciences physiques de lycée de relire les questionnaires ; pour vérifier la clarté de la formulation des questions d'un point de vue scientifique, nous avons demandé à un maître de conférences en

physique de relire les questionnaires et enfin pour vérifier que les conceptions visées par les questions étaient bien celles que nous leur attribuions, nous avons sollicité un maître de conférences en didactique des sciences, un enseignant formateur de physique à mi-temps à l'ESPE et ayant des élèves de terminale S et un maître de conférences en physique s'intéressant à la didactique des sciences. Pour les conceptions, les experts sollicités devaient dire laquelle des trois conceptions usure du courant, la pile délivre toujours la même intensité, confusion entre tension et intensité était principalement impliquée dans chacune des questions (tableaux 2 à 5). Si l'élève doit mener principalement un raisonnement impliquant l'utilisation d'éléments de cours, sans mettre en jeu de conception, la question est considérée comme mettant en jeu principalement des connaissances et non des conceptions.

Dans la suite, chaque question d'un questionnaire particulier sera codée de la façon suivante : le code du questionnaire sera indiqué (E_x, M_x) suivi du numéro d'exercice, enfin, suivi du numéro de question. Ainsi, par exemple, la question 2, de l'exercice 1, du questionnaire d'électricité avant enseignement noté E_0 sera notée : E_0 1.2. Les tableaux ci-dessous donnent la fréquence d'attribution par les quatre experts des conceptions ou connaissances mises en jeu dans les questions du questionnaire E_0. Chaque expert pouvait attribuer une ou plusieurs conceptions à une seule et même question.

Questions	**Erreur à la question due à la conception**				**Principale origine d'une réponse fausse**
	C_1[13] Conception « Usure du courant »	**C_2**[14] Conception « La pile délivre toujours la même intensité »	**C_3**[15] Conception « confusion entre tension et intensité »	**MC**[16] Manque de connaissance	
	Exercice 1				
E_0 1.1	4	0	0	0	C_1
E_0 1.2	0	0	4	0	C_3
E_0 1.3	0	3	0	2	C_2
E_0 1.4	0	4	0	0	C_2
E_0 1.5	0	4	0	0	C_2
E_0 1.6	4	0	0	0	C_1
Exercice 2					
E_0 2.1	4	0	0	0	C_1
E_0 2.2	0	0	4	0	C_3
E_0 2.3	3	0	2	2	C_1
E_0 2.4	3	0	2	2	C_1

Tableau 2 : Fréquence d'attribution par les experts des conceptions ou connaissances mises en jeu dans les questions du questionnaire E_0

13 C_1 : Usure du courant
14 C_2 : La pile délivre toujours la même intensité
15 C_3 : Confusion entre tension et intensité
16 MC : Manque de connaissance

Questions	Erreur à la question due à la conception				Principale origine d'une réponse fausse
	C_1	C_2	C_3	MC	
Exercice 1					
E_1A 1.1	1	0	0	3	MC
E_1A 1.2	0	0	0	3	MC
E_1A 1.3	0	0	0	2	Indéterminé
E_1A 1.4	0	0	0	2	Indéterminé
Exercice 2					
E_1A 2.1	4	0	0	0	C_1
E_1A 2.2	1	3	2	3	C_2
E_1A 2.3	0	0	4	3	C_3
E_1A 2.4	4	0	0	1	C_1
E_1A 2.5	1	1	2	3	MC
E_1A 2.6	0	0	4	3	C_3
Exercice 3					
E_1A 3.1	0	0	3	0	C_3
E_1A 3.2	0	1	0	3	MC
E_1A 3.3	1	2	0	0	C_2
E_1A 3.4	3	0	0	0	C_1

Tableau 3 : Fréquence d'attribution par les experts des conceptions ou connaissances mises en jeu dans les questions du questionnaire E_1A

Questions	Erreur à la question due à la conception				Principale origine d'une réponse fausse
	C_1	C_2	C_3	MC	
Exercice 1					
E_1B 1.1	3	0	0	1	C_1
E_1B 1.2	2	0	0	2	C_1
E_1B 1.3	0	0	3	1	C_3
E_1B 1.4	0	0	3	1	C_3
Exercice 2					
E_1B 2.1	0	2	0	1	Indéterminé
E_1B 2.2	0	3	0	1	C_2
E_1B 2.3	0	0	0	4	MC
E_1B 2.4	0	0	0	4	MC
E_1B 2.5	0	0	1	3	MC
E_1B 2.6	0	0	1	3	MC
E_1B 2.7	0	0	3	2	C_3
E_1B 2.8	0	0	2	2	Indéterminé
Exercice 3					
E_1B 3.1	0	0	3	0	C_3
E_1B 3.2	0	1	0	3	MC
E_1B 3.3	1	2	0	0	C_2
E_1B 3.4	3	0	0	0	C_1

Tableau 4 : Fréquence d'attribution par les experts des conceptions ou connaissances mises en jeu dans les questions du questionnaire E_1B

Questions	Erreur à la question due à la conception				Principale origine d'une réponse fausse
	C_1	C_2	C_3	MC	
Exercice 1					
E_2A/B 1.1	1	1	0	1	Indéterminé
E_2A/B 1.2	0	1	0	2	MC
E_2A/B 1.3	0	0	0	3	MC
E_2A/B 1.4	0	0	0	3	MC
E_2A/B 1.5	0	0	0	3	MC
E_2A/B 1.6	0	0	0	3	MC
E_2A/B 1.7	0	0	0	3	MC
Exercice 2					
E_2A/B 2.1	0	0	0	0	Indéterminé
E_2A/B 2.2	0	0	2	1	C_3
E_2A/B 2.3	0	0	0	3	MC
E_2A/B 2.4	3	0	0	0	C_1
E_2A/B 2.5	2	0	0	1	C_1

Tableau 5 : Fréquence d'attribution par les experts des conceptions ou connaissances mises en jeu dans les questions des questionnaires E_2A et E_2B

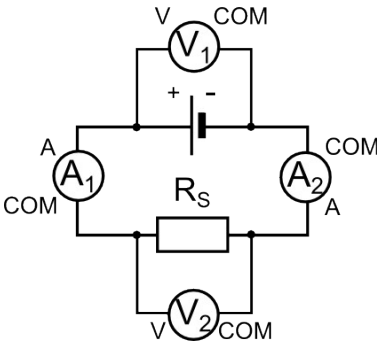
Ainsi, une même conception peut apparaître à plusieurs reprises dans chaque questionnaire. Dans le tableau 6 est présenté un bilan du nombre de conceptions mises en jeu pour chaque questionnaire.

Conceptions	E_0	E_1A	E_1B	E_2A	E_2B
Usure du courant	5	3	3	2	2
Confusion Tension/Intensité	2	4	4	1	1
La pile débite toujours même intensité	3	2	2	0	0

Tableau 6 :Nombre de chaque type de conceptions pour chaque questionnaires d'électricité

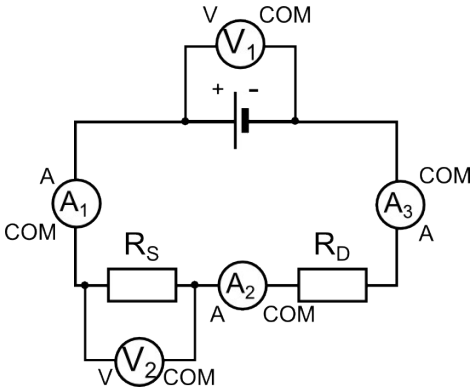
Toutes les questions possèdent au moins trois choix possibles de réponses et une seule réponse correcte. Dans le cas où il y a trois choix possibles, seule une réponse fausse sur les deux réponses fausses ne met pas en jeu une conception erronée. Pour préciser notre propos, prenons l'exemple de l'usure du courant ci-dessous (Illustration 1) :

Montage 1



Le montage 1 comporte une pile et une seule résistance R_S.
L'ampèremètre A_1 mesure l'intensité I_1 et l'ampèremètre A_2 mesure l'intensité I_2. On mesure la tension aux bornes de la pile avec le voltmètre V_1 et la tension aux bornes de la résistance R_S avec le voltmètre V_2. Les valeurs mesurées sont positives.

Montage 2



Le montage 2 comporte la même pile et la même résistance R_S que dans le montage 1. On ajoute la résistance R_D en série, identique à R_S.
Les ampèremètres A_1, A_2 et A_3 mesurent les intensités I_1, I_2 et I_3. On mesure la tension aux bornes de la pile avec le voltmètre V_1 et la tension aux bornes de la résistance R_S avec le voltmètre V_2.

1.1 – Dans le montage 1, l'intensité I_1 mesurée par A_1 est :

inférieure	**égale**	**supérieure**

à l'intensité I_2 mesurée par A_2.

Illustration 1 : Exemple de question issu du questionnaire d'électricité avant enseignement E_0

La réponse correcte à cette question est "égale". Si l'élève a répondu "supérieure" alors on suppose qu'il pense que le courant s'use en traversant un dipôle, il a donc sélectionné la réponse fausse due à la conception. En revanche, s'il a répondu "inférieure", une telle réponse ne signifie pas que le courant s'use. Une telle erreur peut également signifier que l'élève n'a pas correctement pris en compte le sens du générateur. Ainsi nous ne considérons pas cette réponse fausse comme la manifestation de la conception de l'usure du courant. Nous avons donc repéré pour chaque question, la réponse fausse qui est, *a priori*, la manifestation d'une conception et considéré ces réponses fausses séparément des autres. Seuls les élèves qui répondent faux en cochant la réponse mettant uniquement en jeu la conception déterminée, seront considérés comme exprimant cette conception. Ainsi pour chaque question, nous avons pu déterminer la réponse fausse due à la conception, la réponse juste et la réponse fausse non due à la conception. Ces réponses pour chaque questionnaire sont recensées dans les tableaux 7 et 8 pour l'usure du courant, dans les tableaux 9 et 10 pour la confusion entre la tension et l'intensité et dans les tableaux 11 et 12.

Dans le tableau 7, les réponses mentionnées à la suite du numéro de la question et identifiées par une lettre, correspondent à la réponse qui est la manifestation de la conception. La lettre A signifie qu'il s'agit de la réponse proposée dans la première case, la B dans la seconde, la C dans la troisième et ainsi de suite. Le tableau 8 présente les réponses justes aux questions qui visent la conception « usure du courant ».

Usure du courant – Conception	
E_0	1.1-C, 1.6-A, 2.1-C, 2.3-C, 2.4-C
E_1A	2.1-C, 2.4-C, 3.4-A
E_1B	1.1-B et C, 1.2-B et D, 3.4-A
E_2A	2.4-C, 2.5-C
E_2B	2.4-C, 2.5-C

Tableau 7 : Réponses considérées comme la manifestation de « l'usure du courant »

Usure du courant – Juste	
E_0	1.1-B, 1.6-D, 2.1-B, 2.3-A, 2.4-A
E_1A	2.1-B, 2.4-B, 3.4-D
E_1B	1.1-A, 1.2-E, 3.4-D
E_2A	2.4-B, 2.5-B
E_2B	2.4-B, 2.5-B

Tableau 8 : Réponses justes sur les questions visant la conception « usure du courant »

Dans le tableau 9, les réponses mentionnées à la suite du numéro de la question et identifiées par une lettre correspondent à la réponse qui est la manifestation de la conception. Le tableau 10 présente les réponses justes aux questions qui visent la conception « confusion entre tension et intensité ».

Confusion Tension/Intensité – Conception	
E_0	1.2-A et B, 2.2-B
E_1A	2.3-B, 2.5-B, 2.6-A, 3.1-A et B
E_1B	1.3-A, 1.4-A, 2.7-B, 3.1-A et B
E_2A	2.2-E
E_2B	2.2-F

Tableau 9 : Réponses considérées comme la manifestation de la « confusion entre la tension et l'intensité »

Confusion Tension/Intensité – Juste	
E_0	1.2-C, 2.2-A
E_1A	2.3-A, 2.5-A, 2.6-B, 3.1-C
E_1B	1.3-C, 1.4-C, 2.7-G, 3.1-C
E_2A	2.2-A
E_2B	2.2-C

Tableau 10 : Réponses justes sur les questions visant la conception « confusion entre tension et intensité »

Dans le tableau 11, les réponses mentionnées à la suite du numéro de la question et identifiées par une lettre correspondent à la réponse qui est la manifestation de la conception. Le tableau 12 présente les réponses justes aux questions qui visent la conception « confusion entre tension et intensité ».

La pile débite toujours la même intensité – Conception	
E_0	1.3-B, 1.4-B, 1.5-B
E_1A	2.2-D, 3.3-B
E_1B	2.2-B, 3.3-B

Tableau 11 : Réponses considérées comme la manifestation de la conception « la pile délivre toujours la même intensité »

La pile débite toujours la même intensité – Juste	
E_0	1.3-A, 1.4-A, 1.5-A
E_1A	2.2-B, 3.3-A
E_1B	2.2-C, 3.3-A

Tableau 12 : Réponses justes sur les questions visant la conception confusion « la pile délivre toujours la même intensité »

4.1.3. Échantillon avec artefact

En France, l'électricité est enseignée dans le primaire, secondaire et dans le supérieur. Cette étude a été menée avec des élèves de terminale scientifique lors de la dernière année d'enseignement de l'électricité en 2011 – 2012.

Six enseignants ont accepté de faire passer les questionnaires d'électricité et/ou de mécanique et d'utiliser l'artefact analogique. Ainsi, 189 élèves ont bénéficié d'un enseignement avec l'instrument. Tous les enseignants qui ont utilisé l'artefact étaient volontaires. Ils sont expérimentés – ils enseignent depuis au moins une vingtaine d'années. Ils sont enseignants de sciences physiques certifiés ou agrégés. Sur les sept enseignants qui ont participé à l'étude, deux sont des femmes.

Le tableau 13 présente pour chaque enseignant le nombre d'élèves ayant rempli chaque questionnaire.

	Nombre d'élèves ayant rempli les questionnaires avant enseignement		Nombre d'élèves ayant rempli les questionnaires après enseignement – Court terme			Nombre d'élèves ayant rempli les questionnaires après enseignement – Long terme	
	E_0	M_0	E_1B	E_1A	M_1	E_2A	E_2B
Prof 1 (Homme ; agrégé)	27	28	12	13	25	14	14
Prof 2 (Homme ; certifié)	23	22	10	10	23	12	11
Prof 3 (Femme ; certifiée)	21	21	11	9	20	10	10
Prof 4 (Homme ; agrégé)	23	21	11	12	23	11	10
Prof 5 (Homme ; certifié)	34	34	15	18	33	18	17
Prof 6 (Femme ; certifiée)	23	0	11	12	0	0	0
Total	151	126	70	74	124	65	62
Nombre d'élèves méca/élec appariés	Appariement E_0-M_0 123		0	Appariement E_1A-M_1 58		0	0

Tableau 13 : Répartition du nombre d'élèves par questionnaire rempli et par professeur

Puisque *a priori* chaque élève remplit l'ensemble des questionnaires, nous devrions obtenir une égalité entre le nombre d'élèves ayant rempli les questionnaires d'électricité avant enseignement E_0 et le nombre d'élèves ayant rempli les questionnaires de mécanique avant enseignement M_0. La différence constatée est liée à l'absence de certains élèves pour certaines classes dans un des deux

cours pendant lequel le questionnaire a été distribué et au fait que l'un des enseignants (Prof 6) n'a pas fait passer le questionnaire de mécanique M_0. Pour les questionnaires après enseignement court-terme, le questionnaire mécanique M_1 est l'équivalent du questionnaire électricité E_1A, et nous nous intéressons uniquement aux élèves qui ont rempli ces deux questionnaires (E_1A et M_1) pour comparer leur performance. Pour cette raison nous ne considérons que 58 élèves qui ont rempli les deux questionnaires, alors que 124 ont rempli le questionnaire de mécanique M_1. Pour les questionnaires après enseignement à moyen-terme (E_2A et E_2B), des élèves de deux classes n'ont pas rempli les questionnaires, ainsi nous n'avons que 127 élèves (65 élèves pour le questionnaire E_2A et 62 élèves pour le questionnaire E_2B) ayant remplis ces deux questionnaires alors que 151 élèves ont rempli le questionnaire E_0.

4.1.4. Échantillon sans artefact

Pour connaître les difficultés des élèves de terminale S en électricité avant enseignement et après enseignement, nous avons fait passer des questionnaires à 375 élèves de 13 enseignants de terminale S sur toute la France.
Les élèves ont donc rempli un questionnaire avant enseignement, distribué environ une semaine avant le début de la séquence d'électricité. Ce questionnaire avant enseignement est légèrement différent du questionnaire d'électricité avant enseignement distribué aux élèves de l'échantillon avec artefact. Nous noterons ce questionnaire E_0'. De plus, nous avons fait passer un questionnaire (sujet A et sujet B) après enseignement à court-terme, distribué à la fin de la séquence d'électricité et identique au questionnaire après enseignement court-terme aux élèves de l'échantillon avec artefact, nous noterons donc ces questionnaires après enseignement E_1A et E_1B.
Les réponses aux questions de ces questionnaires vont donc nous permettre de déterminer le niveau en électricité des élèves arrivant en terminale S et après l'enseignement de l'électricité sans qu'ils aient utilisé d'artefact (QdR3). Ces réponses ne seront pas utilisées pour constituer un groupe témoin de comparaison avec les élèves qui auront suivi un enseignement avec l'artefact. En effet, pour répondre à la question QdR4 les questionnaires de mécanique devaient être similaires aux questionnaires d'électricité. Avec cette contrainte, les questionnaires pré et post test sont légèrement différents pour les groupes avec et sans artefact. Il n'est donc pas envisageable de comparer le groupe d'élèves avec artefact à celui qui a suivi les cours d'électricité sans artefact.

4.1.5. Conditions de passation des questionnaires

Le mode de passation est toujours identique. Nous avons demandé aux enseignants de faire passer, dans un premier temps, les questionnaires d'électricité avant enseignement (E_0), environ une semaine avant le début de la séquence et de faire passer le questionnaire de mécanique avant enseignement M_0 le jour où ils commençaient le cours d'électricité avec l'artefact. Par le biais de ce questionnaire de mécanique avant enseignement, nous souhaitons évaluer la compréhension du domaine source QdR4. Pour cela, nous invitons les enseignants à présenter succinctement l'artefact en le faisant fonctionner (la masse suspendue entraîne la corde retenue par un pincement du doigt) sans préciser les différentes analogies avec l'électricité. Les liens entre les domaines source et cible doivent être faits seulement après que les élèves aient rempli les questionnaires.
Dans tous les cas, nous demandons aux enseignants de ne pas prendre connaissance des questionnaires (électricité ou mécanique) pour que le contenu des questions n'influencent pas leur enseignement. Pour cela, tous les questionnaires étaient sous pli. De plus, la distribution et le ramassage étaient assurés par un élève qui mettaient les questionnaires dans l'enveloppe après les avoir ramassés. En revanche, nous leur précisons qu'ils auront une vue sur ces questionnaires

lorsqu'ils leur seront renvoyés après correction et après la fin de leur séquence d'électricité. Sur l'enveloppe, les conditions de passation déjà explicitées oralement leur sont rappelées par écrit (annexes 3).

L'enseignant 6 n'ayant pas fait passer les questionnaires de mécanique ne peut rentrer dans l'étude de comparaison des résultats en électricité par rapport à ceux de mécanique.

4.2. Deuxième corpus : Recueil auprès des enseignants

4.2.1. Présentation de l'artefact aux enseignants

Nous avons présenté l'artefact à tous les enseignants qui ont accepté de l'utiliser dans leur cours. La présentation a duré environ une heure. Nous ne souhaitions pas orienter l'enseignement dispensé par les professeurs, mais étudier l'utilisation du artefact en situation naturelle. Pour cette raison, nous n'avons rien dit aux enseignants concernant les conceptions des élèves en électricité. Nous nous sommes contentés d'établir les principaux liens analogiques entre les domaines et de donner quelques conseils techniques permettant une bonne utilisation de l'artefact (notamment à propos du réglage du cadre). Dans certains cas, lors de la présentation de l'artefact avec chaque enseignant ou binôme d'enseignants (pour ceux qui étaient dans le même établissement) nous avons fait un enregistrement audio et vidéo, que nous avons transcrit par la suite (annexes 4) pour garder en mémoire leurs réactions, leurs questions et ne pas avoir à prendre des notes afin de rester disponibles pour répondre à leurs interrogations. Les réactions des enseignants, les questions qu'ils posent sont autant d'indices concernant la facilité ou la difficulté d'appropriation par les enseignants de l'instrument en vue d'une exploitation en classe (QdR7).

4.2.2. Enregistrement de cours

L'utilisation de l'instrument pourrait avoir un impact sur l'apprentissage et la compréhension de l'électricité si l'artefact était effectivement utilisé et de façon régulière. Pour avoir un regard sur ce point, nous avons demandé aux enseignants leur accord pour enregistrer leurs cours. Nous leur avons donc fourni un dictaphone et à chaque début de cours avec leur classe de terminale S, il leur suffisait de mettre l'enregistrement en fonction. Ainsi, nous avons pu recueillir pour chaque enseignant l'enregistrement de leur séquence d'électricité, plus ou moins complète. En effet, certains enseignants n'ont pas pensé systématiquement à prendre le dictaphone et un n'a pas souhaité s'enregistrer.

Le tableau 14 présente le nombre d'heures d'enregistrement de cours pour chaque enseignant ayant participé à l'étude.

Enseignant	Nombre d'heures d'enregistrement
Prof 1	8h 57 min
Prof 2	7h 32 min
Prof 3	13h 04 min
Prof 4	7h 55 min
Prof 5	0
Prof 6	1h 45 min

Tableau 14 :Nombre d'heures d'enregistrement de cours pour chaque enseignant

4.2.3. Entretien après enseignement avec les enseignants

Pour recueillir des informations complémentaires sur l'utilisation de l'instrument, l'avis des enseignants sur cette analogie ou sur les réactions des élèves, nous avons réalisé un entretien avec chaque enseignant pour savoir de quelle façon ils avaient utilisé l'artefact, avec quelle fréquence, dans quel but (cf. Guide d'entretien enseignants annexe 6). L'entretien avec les enseignants se décompose en deux parties. Dans un premier temps, une situation du type « instruction au sosie » est présentée à l'enseignant : il doit donner des conseils d'utilisation de l'instrument à un collègue novice concernant l'utilisation de l'artefact. Ensuite, dans un second temps, des questions plus précises sur l'instrument, son utilisation et les raisons des choix opérés sont posées. Ainsi, l'entretien est dans un premier temps, ouvert pour devenir ensuite beaucoup plus fermé. En procédant de cette façon, il était plus aisé d'avoir le plus d'informations possibles, notamment celles auxquelles nous n'avons pas pensé. Pour garder en mémoire les propos exacts des enseignants, nous avons enregistré puis transcrit ces entretiens.

4.3. Troisième corpus : Entretiens élèves

Une des conditions pour qu'une analogie soit efficace est que les élèves fassent facilement des liens entre le domaine source et le domaine cible. Pour répondre à cette question (QdR5), il n'était pas possible de réaliser cet entretien avant l'enseignement de l'électricité puisque les élèves ne disposaient que d'une faible partie des connaissances en électricité pouvant être mises en jeu avec l'analogie. Notre objectif n'étant pas d'évaluer le potentiel didactique de l'artefact mais uniquement la capacité des élèves à faire des liens entre les deux domaines (QdR5) nous avons mené des entretiens avec des élèves de terminale S ayant déjà suivi le cours d'électricité de terminale scientifique, mais n'ayant pas bénéficié d'un enseignement avec l'artefact.
Du point de vue des élèves, cet entretien pouvait être perçu comme une révision ou un renforcement des connaissances acquises en cours avec leur enseignant ou le cas échéant, l'occasion d'acquérir des connaissances pas encore stabilisées au moment de l'entretien. Il s'agissait, pour des raisons déontologiques, de ne pas faire perdre de temps aux élèves dans une période de leur année scolaire au cours de laquelle il n'est pas possible de les mobiliser en dehors de l'objectif du baccalauréat. Ces entretiens, d'une durée d'une heure, étaient réalisés avec deux élèves d'une même classe et en l'absence de leur enseignant de sciences physiques. La présence de deux élèves au cours de l'entretien avait pour but de favoriser les interactions, afin de mettre à jour plus facilement les éventuelles difficultés à lier les deux domaines. Nous avons fait le choix de ne pas demander la

présence de l'enseignant de sciences physiques de la classe de façon à ce que les élèves se sentent libres de répondre et ne ressentent un regard évaluatif. Les deux élèves entretenus sont d'une même classe pour simplifier l'organisation des entretiens qui se déroule sur leurs temps libres.

La participation des élèves était basée sur le volontariat. L'enseignant de physique-chimie de la classe a ensuite composé les binômes en fonction de différents critères comme la disponibilité des élèves et leurs souhaits. Ainsi, nous avons pu réaliser douze entretiens avec douze binômes d'élèves différents : quatre binômes d'une classe d'un lycée et huit autres d'une autre classe d'un autre lycée. La répartition des élèves par binôme était aléatoire du point de vue de leur niveau en électricité (deux élèves en difficultés, un élève en difficulté et l'autre non, deux élèves qui semblent avoir acquis les bases de l'électricité).
Avant de commencer l'entretien, chaque élève devait répondre à un rapide questionnaire préliminaire (cf. annexe 7.1). Ce questionnaire comporte trois exercices : un portant sur la résistance électrique, un sur le condensateur et un dernier sur la bobine ; dans les trois cas, une question porte sur l'intensité du courant électrique et une autre sur la tension électrique. Ce questionnaire est une entrée en matière et permettra aux élèves de prendre conscience durant l'entretien des conceptions qu'ils ont mobilisées avant l'entretien.

L'entretien est réalisé avec un guide préalablement construit (cf. annexe 7.2). Celui-ci précise qu'à l'introduction de chaque nouvel élément, le domaine mécanique est d'abord présenté. En effet, les élèves connaissent *a priori* le domaine électrique, mais ne connaissent pas le domaine mécanique. Pour étudier leur capacité à lier les deux, le domaine mécanique leur est présenté afin qu'ils puissent établir des liens avec le domaine électrique. Trois éléments sont introduits : le pince-corde analogue de la résistance, les deux ressorts séparés par une bague analogue du condensateur et le volant d'inertie analogue de la bobine. Pour chaque cas, les élèves précisent ce qu'ils observent dans le domaine source afin d'étudier l'appropriation du domaine source par les élèves (QdR4), ensuite ils sont invités à faire eux-mêmes le lien avec le domaine de l'électricité pour étudier leur capacité à établir des liens entre les deux domaines (QdR5). Pour chaque élément, des questions sont posées sur l'analogue de la valeur ou les variations de l'intensité du courant électrique, de la tension électrique et de l'énergie, et systématiquement une comparaison avec le domaine électrique est faite pour savoir si d'après eux l'analogie fonctionne. Procéder ainsi permet de voir si les élèves s'approprient le domaine source sur tous les points analogues à ceux qui sont abordés en électricité en terminale scientifique (QdR4). Si tel n'est pas le cas, les personnes qui font passer l'entretien donnent la réponse car, rappelons-le, nous souhaitons faire de cet entretien un moment d'apprentissage pour les élèves.
S'ils n'arrivent pas à faire les liens entre les deux domaines, plusieurs interprétations sont envisageables :

- ils n'ont pas acquis les bonnes connaissances dans le domaine électrique et auquel cas il est difficile pour eux de faire les liens,
- le domaine source n'est pas facilement appropriable.
- les liens ne sont pas suffisamment intuitifs et donc ils ne les font pas.

Pour permettre de déterminer l'interprétation, des questions complémentaires sont posées aux élèves.
Les questions posées lors de l'entretien sont succinctes pour permettre aux élèves de s'exprimer librement et de laisser entrevoir leurs conceptions, erronées ou non. De plus, à chaque fois que cela s'avère nécessaire, des précisions ou des explications à leurs réponses sont demandées de façon à ce que même les conceptions les plus profondes soient explicitées pour ensuite essayer de les dépasser via l'analogie. Deux binômes ont effectué les entretiens avec les élèves : un premier binôme

constitué d'une doctorante en didactique des sciences et un enseignant chercheur en didactique ; un second binôme d'étudiants en Master « enseignement des sciences physiques » encadré par l'enseignant-chercheur dans le carde de leur mémoire.

Afin d'analyser ces entretiens, nous avons fait le choix de les enregistrer avec un dictaphone et avec une caméra. En effet, la prise de notes en cours d'entretien semblait difficilement compatible avec la nécessité de maintenir nos interactions devant les élèves. Par ailleurs, la seule utilisation du dictaphone nous paraissait insuffisante et nous avons estimé que l'étude des actions des élèves sur l'artefact pouvait être pertinente pour mieux comprendre le sens de leurs interventions ou de leurs questions. Par la suite nous avons transcrit ces entretiens (annexe 7.3 à 7.9).

Chapitre 5.
Quelles sont les connaissances en électricité des élèves de terminale S ?

5.1. Difficultés en électricité des élèves en début de terminale S, à partir des questionnaires

Dans ce paragraphe, nous souhaitons étudier le niveau des élèves de terminale S en début d'année scolaire avant l'enseignement de l'électricité du programme de terminale S 2011-2012 (QdR3)

Pour répondre à cette question nous avons utilisé les questionnaires avant enseignement E_0' (annexe 2.2) qui ont été remplis par les élèves de terminale qui n'ont pas eu d'artefact.

Les questions portant sur des notions du niveau collège, nous nous attendons à ce que les scores soient élevés : même si les élèves n'ont pas fait d'électricité depuis le collège, les élèves sont en terminale scientifique et donc a priori parmi les meilleurs élèves de cette discipline.

Les résultats obtenus sont les suivants (tableau 15 et illustration 2).

Score	E_0
0	8
1	27
2	22
3	27
4	52
5	52
6	53
7	37
8	21
9	15
10	0
11	0

Tableau 15 : Distribution des scores des élèves au questionnaire avant enseignement E_0'

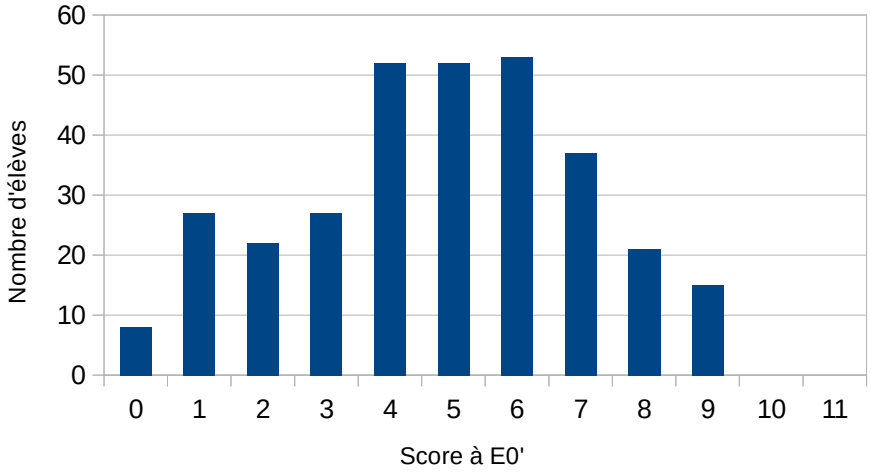


Illustration 2 : Distribution des scores des élèves au questionnaire avant enseignement E_0'

Questionnaire	Moyenne	Ecart-type	Min	Max
E_0'	4,77	2,26	0	9

Tableau 16 : Moyenne obtenue au questionnaire avant enseignement E_0' par les élèves sans artefact

Nous constatons que plus de la moitié des élèves (188) ont une note inférieure à la moyenne (comprise entre 0 et 5) et le restant des élèves (126) ont une note comprise entre 6 et 9. Aucun élève a obtenu la note maximale. La moyenne est de 4,77/11.

Pour compléter ces observations, nous analysons les réponses des élèves question par question pour ce même questionnaire E_0', puis conceptions par conceptions.
L'artefact permettant notamment de travailler les conceptions suivantes : « usure du courant », « la

pile délivre toujours la même intensité » et « la confusion entre la tension et l'intensité », nous cherchons donc à savoir quel est le niveau des élèves sur les conceptions avant enseignement (QdR3).
Le tableau 17 présente donc la fréquence de chaque type de réponse à chaque question du questionnaire avant enseignement E_0' pour les élèves qui n'auront pas, par la suite, un cours d'électricité avec l'artefact.

Question	Réponse fausse due à la conception	Réponse juste	Réponse fausse non due à la conception	Pas de Réponse	Pourcentage de réponse fausse due à la conception	Conception visée
E_0'1.1	56	243	12	0	17,83	Usure du courant
E_0'1.2	130	184	-	0	41,40	Confusion U/I
E_0'1.3	197	116	-	1	62,74	Confusion U/I
E_0'1.4	132	152	27	3	42,04	La pile
E_0'1.5	92	163	53	6	29,30	La pile
E_0'1.6	221	71	20	2	70,38	La pile
E_0'1.7	79	214	19	2	25,16	Usure du courant
E_0'2.1	108	171	31	4	34,39	Usure du courant
E_0'2.2	69	115	126	4	21,97	Confusion U/I
E_0'2.3	149	76	83	6	47,45	Usure du courant
E_0'2.4	96	149	62	7	30,57	Usure du courant

Tableau 17 : Fréquence des réponses fausses dues à la conception, justes et fausses pour chaque question du questionnaire avant enseignement E_0'

Pour trois questions, E_0'1.3, E_0'1.6, E_0'2.3, nous constatons que la fréquence de réponses fausses dues à la conception est plus importante que la fréquence de réponses justes. Ces trois questions visent les trois conceptions. Pour les huit autres questions, il y a plus de réponses justes que de réponses fausses mais les pourcentages de réponses fausses dues à la conception restent malgré tout élevés (jamais inférieurs à 17%). Nous constatons donc que la plupart des élèves en début de terminale scientifique n'ont pas dépassé les conceptions. Pour préciser notre propos, nous nous proposons de calculer la moyenne des pourcentages pour chaque conception (tableau 18).

Questionnaire	Usure du courant	Confusion U/I	La pile
E_0'	31,08	42,04	47,24

Tableau 18 : Moyenne des pourcentages de fréquence de réponses fausses dues à une conception pour le questionnaire avant enseignement E_0'

Nous constatons que pour chacune des trois conceptions visées dans les questions du questionnaire E_0', plus d'un tiers des élèves est en difficulté.

Conclusion partielle :

Les élèves de terminale S en électricité avant enseignement font des erreurs de niveau collège : plus d'un tiers des élèves expriment la manifestation d'une conception dans sept réponses sur onze. Plus d'un tiers des élèves n'a pas dépassé les conceptions de « l'usure du courant », et presque la moitié d'entre eux expriment la « confusion entre tension et intensité » et pensent que « la pile délivre toujours la même intensité ».

5.2. Difficultés des élèves, n'ayant pas eu de cours avec l'instrument, en électricité, en fin de terminale S, à partir des questionnaires

Dans cette partie, nous cherchons à connaître les difficultés des élèves après enseignement. Pour cela nous utilisons les questionnaires après enseignement court-terme E_1A et E_1B remplis par les élèves qui n'ont pas travaillé l'électricité avec l'instrument. Ces questionnaires après enseignement court-terme abordent les notions enseignées en classe de terminale S. Il s'agit de déterminer dans quelle mesure l'enseignement « ordinaire » est efficace pour faire comprendre aux élèves les notions d'électrocinétiques enseignées. L'analogie sera d'autant plus pertinente qu'elle répond à un problème professionnel : l'enseignement de l'électrocinétique. Si l'enseignement ordinaire permet d'enseigner efficacement les notions que l'analogie permet de travailler cette analogie n'a alors pas d'intérêt pour les enseignants et ne sera pas efficace.

Analysons alors les scores obtenus par les élèves au questionnaire après enseignement court-terme sujet A (E_1A).

Score	E_1A
0	0
1	2
2	4
3	11
4	17
5	19
6	36
7	23
8	19
9	19
10	7
11	5
12	3
13	0
14	0

Tableau 19 : Distribution des scores des élèves au questionnaire après enseignement court-terme E_1A

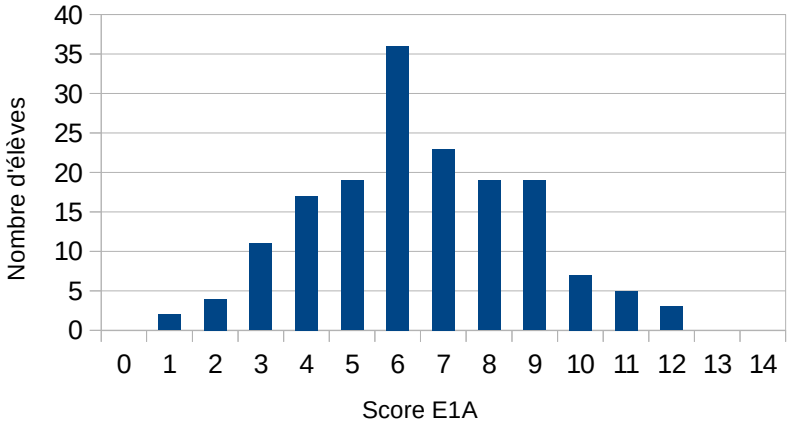


Illustration 3 : Distribution des scores des élèves au questionnaire après enseignement court-terme E1A

Pour le questionnaire après enseignement court-terme sujet A (E_1A), nous constatons que quasiment deux tiers des élèves (125/201) ont une note inférieure à la moyenne (comprise entre 0 et 6) et seulement un tiers (76/201) a une note comprise entre 7 et 12 (tableau 19). Aucun élève n'a obtenu la note maximale 14. Nous obtenons une distribution de scores qui est une gaussienne centrée autour de 6 (illustration 3).
Nous pouvons procéder de même pour le questionnaire après enseignement court-terme sujet B (E_1B).

Score	E_1B
0	0
1	0
2	0
3	4
4	7
5	22
6	32
7	23
8	18
9	23
10	9
11	8
12	0
13	1
14	1
15	1
16	0

Tableau 20 : Distribution des scores des élèves au questionnaire après enseignement court-terme E_1B

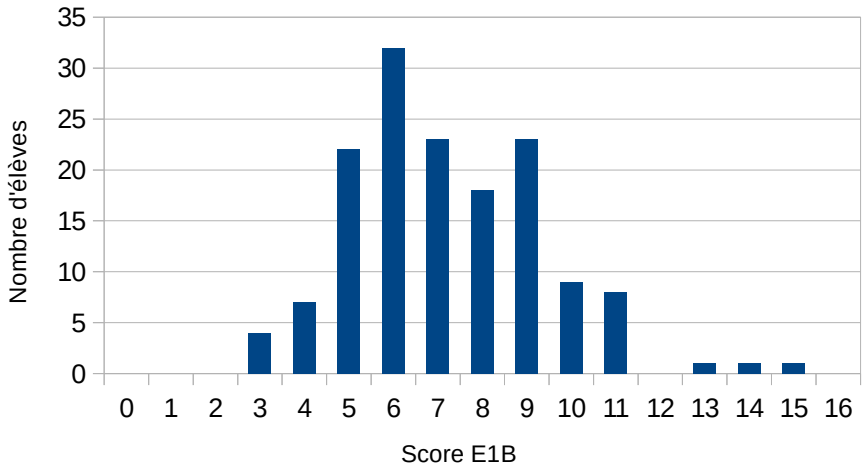


Illustration 4 : Distribution des scores des élèves au questionnaire après enseignement court-terme E_1B

Pour le questionnaire après enseignement court-terme sujet B (E_1B), nous constatons que plus de la moitié des élèves (88/149) a une note inférieure à la moyenne (comprise entre 0 et 7) et seulement un peu plus d'un tiers (61/149) a une note comprise entre 8 et 16 (tableau 20). Aucun élève n'a obtenu les notes minimales 0, 1 et 2, aucun élève n'a obtenu la note maximale 16 et seulement trois élèves ont une note supérieure à 11. Grâce au diagramme bâtons réalisé (illustration 4), nous observons clairement que la majeure partie des élèves a obtenu une note entre 5/16 et 9/16.

Le tableau 21 présente les moyennes des élèves à ces deux questionnaires après enseignement court-terme.

Questionnaire	Moyenne	Ecart-type	Min	Max
E_1A	6,47	2,32	1	12
E_1B	7,21	2,19	3	15

Tableau 21 : Moyenne obtenue aux questionnaires après enseignement court-terme E_1A et E_1B par les élèves sans artefact

Nous constatons que pour ces deux questionnaires la moyenne est inférieure à 7/14 pour E_1A et inférieure à 8/16 pour E_1B.
Pour compléter cette analyse, nous regardons, dans la suite, les réponses des élèves question par question aux questionnaires E_1A et conception par conception (tableau 22) et E_1B (tableau 23).

Question	Fausse due à la conception	Juste	Fausse non due à la conception	Pourcentage de réponse fausse due à la conception	Pourcentage de réponse fausse due à une connaissance	Conception ou connaissance visée
E_1A 1.1	-	72	93	-	56,37	Bobine
E_1A 1.2	-	74	91	-	55,15	Condensateur
E_1A 1.3	-	121	44	-	26,67	Bobine
E_1A 1.4	-	143	22	-	13,33	Résistance
E_1A 2.1	72	81	12	43,64	-	Usure du courant
E_1A 2.2	79	60	26	47,88	-	La pile
E_1A 2.3	82	26	57	49,69	-	Confusion U/I
E_1A 2.4	21	79	65	12,73	-	Usure du courant
E_1A 2.5	21	107	37	12,73		Confusion U/I
E_1A 2.6	99	24	15	60	-	Confusion U/I
E_1A 3.1	99	66	-	60	-	Confusion U/I
E_1A 3.2	-	66	99	-	60	Résistance
E_1A 3.3	109	48	8	66,06	-	La pile
E_1A 3.4	53	100	12	32,12	-	Usure du courant

Tableau 22 : Fréquence des réponses fausses dues à une connaissance ou une conception, justes et fausses pour chaque question du questionnaire après enseignement E_1A

Pour sept questions du questionnaire E_1A en annexe 2.4 (E_1A2.1 – usure du courant, E_1A2.2 – la pile délivre toujours la même intensité, E_1A2.3 – Confusion tension/intensité, E_1A2.6 – Confusion tension/intensité, E_1A3.1 – Confusion tension/intensité, E_1A3.3 – la pile délivre toujours la même intensité, E_1A3.4 – usure du courant) sur neuf visant une conception, plus d'un tiers des élèves répondent en mobilisant une conception erronée (tableau 22). Par ailleurs, sur les cinq questions ne visant pas une conception mais une connaissance en électricité (E_1A1.1 – comparaison du fonctionnement d'une bobine, d'un condensateur et d'une résistance, E_1A1.2 – fonctionnement du condensateur, E_1A1.3 – fonctionnement de la bobine, E_1A1.4 – fonctionnement de la résistance, E_1A3.2 – l'énergie dans le cas de la résistance), pour trois d'entre elles (E_1A1.1, E_1A1.2, E_1A3.2) plus de la moitié des élèves répondent faux.

Pour six questions du questionnaire E_1B en annexe 2.5 (E_1B1.1 – usure du courant, E_1B2.2 – la pile délivre toujours la même intensité, E_1B2.7 – confusion tension/intensité, E_1B3.1 – confusion tension/intensité, E_1B3.3 – La pile délivre toujours la même intensité, E_1B3.4 – usure du courant) sur neuf visant une conception, plus d'un tiers des élèves répondent faux en mobilisant une conception erronée (tableau 23). Pour cinq questions (E_1B2.3 – connaissance sur l'établissement du courant dans la bobine et de la constante de temps, E_1B2.4 – connaissance sur l'établissement du courant dans la bobine et de la constante de temps, E_1B2.5 – connaissance sur l'énergie et la bobine, E_1B2.8 – loi d'additivité de la tension dans un circuit en série comportant une bobine, E_1B3.2 – l'énergie dans le cas de la résistance) sur les sept visant des connaissances, plus d'un tiers des élèves répondent faux.

Question	Fausse due à la conception	Juste	Fausse non due à la conception	Pourcentage de réponse fausse due à la conception	Pourcentage de réponse fausse due à une connaissance	Conception ou connaissance visée
E_1B 1.1	102	33	14	68,45	-	Usure du courant
E_1B 1.2	35	32	82	23,49	-	Usure du courant
E_1B 1.3	11	112	26	7,38	-	Confusion U/I
E_1B 1.4	28	38	83	18,79	-	Confusion U/I
E_1B 2.1	-	108	41	-	27,52	Bobine
E_1B 2.2	65	61	23	43,62	-	La pile
E_1B 2.3	-	94	55	-	36,92	Bobine
E_1B 2.4	-	85	64	-	42,95	Bobine
E_1B 2.5	-	68	81	-	54,36	Bobine
E_1B 2.6	-	111	38	-	25,5	Bobine
E_1B 2.7	68	7	74	45,64	-	Confusion U/I
E_1B 2.8	-	87	62	-	41,61	Bobine
E_1B 3.1	72	77	-	48,32	-	Confusion U/I
E_1B 3.2	-	55	94	-	63,06	Résistance
E_1B 3.3	98	34	17	65,77	-	La pile
E_1B 3.4	57	72	20	38,26	-	Usure du courant

Tableau 23 : Fréquence des réponses fausses dues à une connaissance ou à la conception, justes et fausses pour chaque question du questionnaire avant enseignement E_1B

Le tableau 24 présente la moyenne des pourcentages de réponses fausses dues à une conception ou à un manque de connaissance (tableau 18) pour les questionnaires E_1A et E_1B.

Questionnaire	Usure du courant	Confusion U/I	La pile	Résistance	Condensateur	Bobine
E_1A et E_1B	36,45	37,82	55,83	45,46	55,15	40,63

Tableau 24 : Moyenne des pourcentages de réponses fausses dues à une conception ou à un manque de connaissance pour les questionnaires après enseignement court-terme E_1A et E_1B

À propos des réponses portant sur le condensateur, le pourcentage obtenu ne concerne qu'une seule question des deux questionnaires. La moyenne est donc peu représentative. En revanche pour toutes les autres moyennes de pourcentage, la moyenne concerne au minimum trois questions (six questions pour l'usure du courant, huit questions pour la confusion entre la tension et l'intensité, quatre questions pour la pile délivre toujours la même intensité, trois questions pour la résistance et huit questions pour la bobine). Pour les trois conceptions, les résultats sont quasiment équivalents à ce qu'ils étaient avant enseignement (tableau 18) et même plus élevés dans le cas de l'usure du courant et de la pile. Plus d'un tiers des élèves possède encore la conception de l'usure du courant ou confond la tension et l'intensité et plus de la moitié des élèves fait des erreurs sur des questions relatives à la conception « la pile délivre toujours la même intensité ». Pour les questions visant davantage les connaissances, quasiment la moitié des élèves font des erreurs à propos de la résistance et plus d'un tiers pour la bobine.

Conclusion partielle :

Les résultats des élèves après enseignement de l'électricité montrent que l'enseignement ordinaire ne fait pas évoluer les conceptions des élèves. À propos des connaissances abordées en terminale S, les élèves font des erreurs à la moitié des questions posées à propos du condensateur, de la bobine et de la résistance. L'analogie mécanique peut être efficace pour aider les élèves à comprendre électrocinétique puisque, d'une part, l'enseignement ordinaire

ne fait pas évoluer leurs conceptions et, d'autre part, les élèves font environs 50 % d'erreurs suite à l'enseignement sur les connaissances nouvellement introduites et pouvant faire l'objet d'un enseignement par l'analogie.

5.3. Difficultés en électricité des élèves n'ayant pas eu cours avec l'instrument en fin de terminale S à partir des entretiens

5.3.1. Données utilisées et méthode d'analyse

Dans cette partie, nous complétons l'état des lieux des connaissances des élèves en électricité après enseignement (QdR3). Pour cela nous utilisons les entretiens menés avec les élèves ayant suivi un enseignement ordinaire de terminale S en électricité. Ces entretiens, que nous avons transcrits intégralement, vont nous permettre de confirmer et d'approfondir les résultats obtenus avec les questionnaires.

5.3.2. Résultats

Le tableau 25 présente les numéros renvoyant aux interventions des entretiens 1 à 7 (voir annexes 7.3 à 7.9). Les interventions ont été analysées afin de repérer les connaissances mises en jeu. Ainsi, les numéros d'interventions ont été reporté dans un tableau (25) afin de repérer les connaissances en électricité évaluées pendant l'entretien.
Nous avons barré le numéro de l'intervention montrant une connaissance erronée en électricité. A l'inverse, si le numéro d'intervention n'est pas barré, la connaissance acquise est correcte.

Connaissances en électricité testées au cours de l'entretien	**Entr. 1 Interv. n°**	**Entr. 2 Interv. n°**	**Entr. 3 Interv. n°**	**Entr. 4 Interv. n°**	**Entr. 5 Interv. n°**	**Entr. 6 Interv. n°**	**Entr. 7 Interv. n°**
<u>Résistance (équivalent du pince-corde)</u>							
Différence générateur/récepteur							~~11, 13~~
Différence tension/intensité	~~26~~	~~165~~	~~166 à 169~~				~~119~~
Intensité est un débit de courant		33	~~38~~	~~72 à 75~~ 83			
Une résistance infinie est équivalent à interrupteur ouvert				90 à 93 et 121			
Dans un circuit ouvert, il n'y pas de courant mais une tension				~~102 à 117~~	164	120	
Une résistance résiste au passage du courant					~~56~~ 60	19	~~65~~ 67
Une résistance entraîne blocage du flux des électrons			42 à 46				
Une résistance agit sur tout le circuit (rétroactivité)			71				
La tension aux bornes de l'interrupteur ouvert est égale à celle du générateur	~~71~~	~~152~~	~~133~~ 137	~~100~~ 101 et 136 à 141	145	113, 126	

La tension aux bornes d'un fil électrique est nulle		97					
Même résistance et tension augmente ou résistance augmente et tension reste la même alors l'intensité augmente ou intensité diminue		183		~~157 à 161~~ 159 à 165			~~103, 105 235~~
La tension est une ddp		68 ~~70~~	98	123	~~118 à 120 296~~	56	
La tension se mesure avec voltmètre		75					
L'intensité est la même partout dans le circuit	~~32~~	59			~~X~~	30	~~73, 75, 77, 81, 99~~
Si la résistance est plus grande alors l'intensité diminue		55					
Condensateur (équivalent des ressorts dans la cavité avec la bague)							
Le condensateur est composé de 2 plaques et d'un isolant		237, 241					
L'énergie est accumulée sur les plaques du condensateur			224 à 230	208 à 212 318, 320	256	243	
Courbes Intensité/Tension de charge du condensateur correctes (forme exponentielle)			~~206~~ 211 à 220	240, 246, 253 419 à 424	299, 302, 305	~~240~~ 293, 295, 298	
Lors de la charge et décharge du condensateur le sens du courant change	~~208~~	307	~~260 à 268~~ 260 à 268	277 et 432 à 441	~~236 à 238~~ 331 à 333	~~304~~	
L'intensité avant et après un condensateur est la même dans un circuit en série		~~327~~		~~271, 273~~ 282			
L'énergie électrique provient du générateur et est transférée par électrons	143	262	232 à 240	328	262 à 266	247 à 253	
Si la tension augmente, alors il y a accumulation d'électrons sur une plaque et la tension aux bornes du condensateur est plus élevée	157		243				
Si on augmente la tension avec le même condensateur alors l'intensité augmente	~~171~~				280	285	
Si on augmente la tension alors l'énergie stockée augmente		280		333 à 341	276	267	

Différence Bobine/Condensateur			~~345, 350~~		~~207 et 210 à 212 243, 381, 385~~	~~186~~	
Bobine (équivalent du volant d'inertie)							
Le sens de circulation du courant reste le même lors de la « charge » et la « décharge » de la bobine	342	411	395 à 400	547, 549	510		
La bobine entraîne un retard à l'établissement du courant, retard à l'allumage d'une lampe	244		330 à 337	479 à 490		347	
La bobine s'oppose au changement	244 (pas dit en ces termes)		312 à 314			331	
Courbe tension/intensité pour la bobine de forme exponentielle			~~345, 350~~	~~494, 497, 504, 531~~		335, ~~369~~	
Si on garde la même tension et qu'on diminue l'inductance alors l'intensité augmente			~~422~~	611	481, 484		
Si on garde la même bobine et que la tension augmente alors l'intensité augmente		275			413	~~360~~	
Durant le régime transitoire, la tension diminue et l'intensité augmente		385	386 à 388				
L'énergie électrique provient du générateur et est transférée par électrons			436 à 446	625 à 635			
Une perte d'énergie signifie qu'il y a une décharge			307, 308, 317 à 319				
L'énergie est stockée dans la bobine sous forme magnétique			431 à 433	620à 626			
Différenciation Intensité/Tension facilitée par l'analogie				166, 169		134, 142, 165	
Connaissances faibles sur le condensateur						~~186~~	
Connaissances faibles sur la bobine					~~243, 381, 385~~		

Tableau 25 : Maîtrise des connaissances dans le domaine cible à partir de l'analyse des entretiens

L'extrait suivant permet d'illustrer que les élèves participant à cet entretien ont des difficultés à distinguer la tension électrique de l'intensité du courant électrique.

N°	Personne	Intervention
159	Interlocuteur 3	*Quand tu dis la tension traverse…*
160	Élèves	*Justement, je ne me rends pas compte.*
161	Interlocuteur 3	*Justement, il faudrait se rendre compte, le but c'est de se rendre compte de ça. La tension, c'est un état du fil, tu vois, là tu as bien compris, il est tendu ou pas tendu ? du coup, on ne peut pas dire traverse ; on ne peut pas dire qu'un état traverse.*
162	Élèves	*Oui mais…*
163	Interlocuteur 3	*Qu'est-ce que tu voulais dire ?*
164	Interlocuteur 4	*C'est plutôt l'intensité tu veux dire qui traverse.*
165	Élèves	*Oui, l'intensité c'est dedans mais je ne me rends pas compte de la tension ; pour moi c'est quelque chose qui est dans un circuit, qui circule et qui tourne.*

Tableau 26 : Extrait de l'entretien 2 des difficultés à différencier tension et intensité

Dans cet entretien (tableau 26), l'élève exprime clairement sa difficulté à se représenter la tension électrique dans un circuit.

N°	Personne	Intervention
118	Interlocuteur 3	*Donc il y a une différence de tension d'accord donc le fil n'est donc pas tendu de la même façon avant et après le pince fil*
119	Élève 13	*Ah oui c'est que je confondais l'intensité avec la tension*

Tableau 27 : Extrait de l'entretien 7 d'un élève qui dit explicitement avoir des difficultés à différencier tension et intensité

Dans cet entretien (tableau 27), l'élève 13 dit explicitement qu'il confond la tension et l'intensité.

Par ailleurs, nous constatons que certains confondent les propriétés du condensateur et de la bobine : ils ne confondent pas nécessairement l'élément en lui-même mais confondent les variations de la tension électrique et de l'intensité du courant électrique pour ces deux dipôles. En effet, lors de la charge du condensateur, la tension augmente alors que l'intensité diminue, ce qui est l'inverse pour la bobine. Sans représentation mentale du comportement de ces dipôles, les élèves peuvent confondre les variations des grandeurs physiques électriques de tension et d'intensité et donc leur rôle dans un circuit électrique.

De plus, certains élèves pensent que le « courant s'use en traversant un récepteur tel qu'une résistance » et que l'intensité du courant est plus faible après le dipôle qu'avant le dipôle (tableau 28).

N°	Personne	Intervention
26	Élèves	*C'est la même. Je ne sais pas si entre la résistance et le générateur il y a plus de tension que dans le reste du circuit.*
27	Interlocuteur 3	*De tension ou d'intensité ?*
28	Élèves	*D'intensité.*
29	Interlocuteur 3	*L'intensité, c'est la vitesse de déplacement ; donc la question que je vous pose c'est ; enfin ici on voit que ça va tout à la même vitesse, la question c'est est-ce que d'après vous dans un circuit électrique pareil avec une résistance, ça va partout à la même vitesse ?*
30	Élèves	*Non.*
31	Interlocuteur 3	*ça ira moins vite où ?*
32	Élèves	*Ça ira moins vite entre la résistance et la borne moins.*

Tableau 28 : Extrait de l'entretien 1 qui montre que les élèves mobilisent les conceptions « la confusion entre la tension et l'intensité » et « l'usure du courant »

Enfin, nous pouvons noter que les connaissances des élèves dans le domaine de l'électricité ont évolué au fur et à mesure de l'entretien. Par exemple, un élève pensait que la tension aux bornes d'un interrupteur ouvert était nulle dans un circuit où le générateur est sous tension. Grâce à l'instrument, il parvient à comprendre qu'en réalité, la tension n'est pas nulle mais égale à celle aux bornes du générateur.

5.3.3. Conclusion partielle sur les difficultés en électricité observées lors des entretiens avec les élèves de terminale S

Lors des entretiens, certains élèves de terminale S confondent encore après enseignement ordinaire la tension et l'intensité et ils rencontrent des difficultés sur l'usure du courant. Concernant les deux dipôles abordés en classe de terminale S (condensateur et bobine), ils confondent leur courbes caractéristiques (U= f(I)).

5.4. Conclusion sur les connaissances des élèves avant et après enseignement sans artefact de l'électricité en terminale S

La plupart des élèves de terminale S ont certes dépassé la conception unifilaire et à courants antagonistes mais les conceptions de l'usure du courant, la confusion entre la tension et de l'intensité et la pile délivre toujours la même intensité sont encore très prégnantes. Par ailleurs, ils rencontrent des difficultés de raisonnements sur les dipôles abordés en terminale. Ils confondent les variations de tension et d'intensité concernant la bobine et le condensateur.

À la vue des ces résultats, il est pertinent d'envisager un enseignement différent qui permettrait de faciliter la compréhension des phénomènes électriques et ainsi mieux raisonner en électricité, et ce même pour des élèves de Terminale S.
L'utilisation de l'instrument peut s'avérer être une aide à la compréhension. Dans la suite, nous souhaitons d'abord savoir si le domaine source de l'analogie est facilement compréhensible (QdR4).

Chapitre 6.
Quelle est l'appropriation du domaine source par les élèves ?

6.1. Le domaine source est-il plus compréhensible que le domaine cible ?

Précédemment, il a été montré que cette analogie possède un isomorphisme important pour les concepts, les objets et les relations entre concepts (réponse à la QdR1). De plus, cette analogie permet de travailler un nombre important de conceptions (réponse à la QdR2). Le but dans cette partie est donc de vérifier la condition selon laquelle une analogie est d'autant plus pertinente que son domaine source est plus facile à comprendre que son domaine cible (QdR4).
Ainsi, nous cherchons à savoir si, pour les élèves, le domaine source est plus accessible que le domaine cible. Pour répondre à cette question nous allons comparer les résultats des élèves aux questionnaires dans le domaines électrique et à leurs résultats dans le domaine mécanique avant enseignement (E_0 et M_0).

Les connaissances des élèves a propos de la bobine du condensateur et de la résistance n'étant évaluées que dans le questionnaire après enseignement en électricité E_1A, un questionnaire après enseignement mécanique M_1A (similaire au questionnaire en électricité après enseignement court-terme) est utilisé pour comparer le taux d'erreurs entre la mécanique et électricité à propos des propriétés de ces composants. Il s'agit de déterminer si, pour ces nouvelles connaissances acquises en terminale S, le domaine source est plus facilement appropriable que le domaine cible pour les élèves.

6.1.1. Hypothèses

Beaucoup de phénomènes dans le domaine mécanique résultent du mouvement de la corde. Il est possible de voir, de toucher, de ressentir et d'anticiper par le raisonnement le comportement de la corde dans une diversité de situations (par exemple, l'unicité de la vitesse de la corde). Nous supposons donc que le phénomène qui se produit dans le domaine mécanique est plus intuitif, que celui qui se produit dans le domaine électrique. La circulation d'une corde semble plus facile à concevoir que celle des électrons. Nous supposons alors que le domaine mécanique est plus compréhensible que le domaine électrique. Pour tester cette hypothèse, nous avons construit des questionnaires portant sur l'électricité et des questionnaires similaires en mécanique. Donc, par la suite, nous prévoyons que les élèves feront moins d'erreurs aux questions du domaine mécanique qu'à celles similaires du domaine électrique.

6.1.2. Prévisions et origines possibles des erreurs des élèves

Plusieurs sources d'erreurs ont été prises en compte pour interpréter la réussite ou l'échec des élèves aux questions proposées dans les questionnaires (figure 22). Les erreurs des élèves peuvent être liées à leurs connaissances et conceptions, aux symboles utilisés dans les questionnaires qui ne seraient pas nécessairement maîtrisés par les élèves et l'enseignement de l'électricité avec un degré d'utilisation de l'instrument plus ou moins important. En effet, les élèves étudient l'électricité depuis plusieurs années alors qu'ils n'ont jamais étudié cet analogue mécanique et les symboles qui lui sont associés. Cet écart peut expliquer en partie certains résultats.

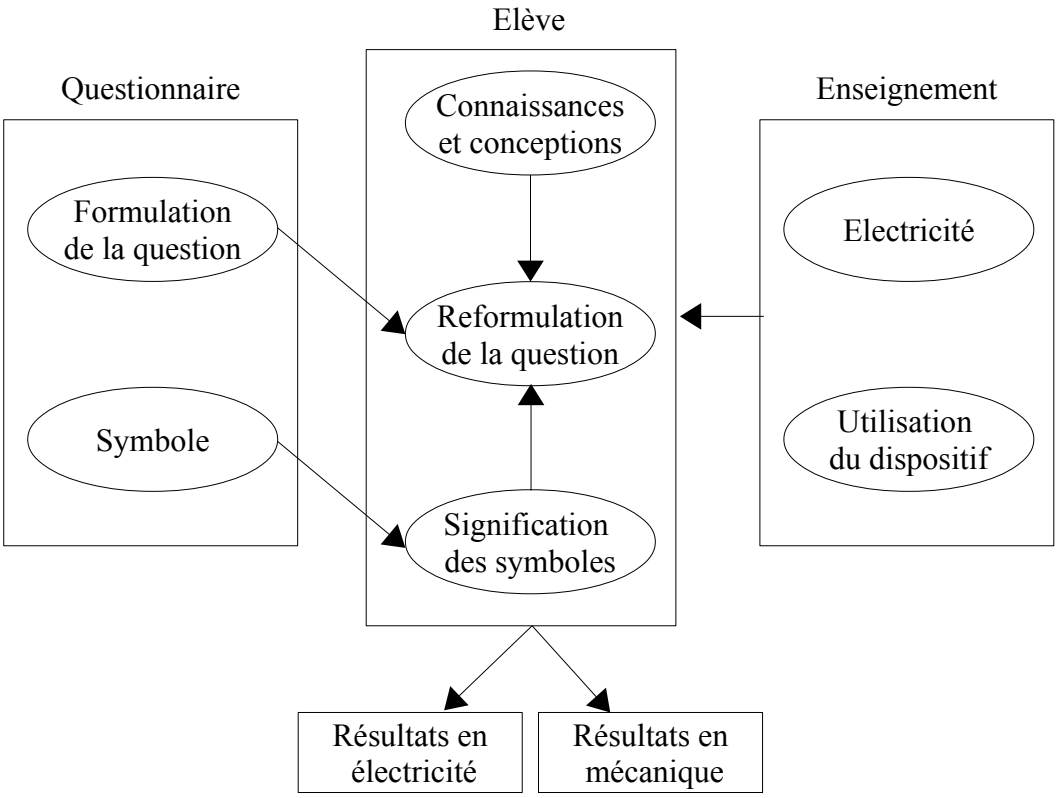


Figure 22 : Sources d'erreurs possibles et facteurs influençant les réponses des élèves

Les élèves ont l'habitude de travailler avec les symboles normalisés électriques mais pas avec ceux de mécanique. Ainsi les résultats pourront être meilleurs en électricité à cause d'un manque de maîtrise des symboles mécaniques qu'ils découvrent.

Il est possible de prévoir trois types de résultats aux questionnaires.

1. Les résultats en mécanique sont meilleurs que les résultats en électricité. Cela signifierait que le domaine mécanique est plus compréhensible que le domaine cible malgré les problèmes de manque de maîtrise des symboles mécaniques par les élèves.

2. Les résultats en mécanique sont identiques aux résultats en électricité. Dans ce cas, deux interprétations sont possibles : soit il n'y a pas plus de difficultés à comprendre un domaine plutôt qu'un autre soit le domaine mécanique est plus compréhensible mais l'introduction des symboles mécaniques est un obstacle à l'interprétation des situations.

3. Les résultats en mécanique sont moins bons que les résultats en électricité. Dans ce cas, deux interprétations sont possibles : soit cela signifierait que le domaine mécanique est moins compréhensible que le domaine électrique soit il n'est pas possible de conclure à cause des nouveaux symboles introduits en mécanique. Pour les questionnaires après enseignement plus particulièrement, ces résultats pourraient aussi signifier que l'électricité a été enseignée sans l'utilisation de l'instrument.

6.1.3. Comparaison des scores moyens obtenus aux questionnaires en électricité et en mécanique

Pour avoir une vue globale des résultats des élèves, nous considérons dans un premier temps les scores finaux qu'ils ont obtenus aux questionnaires avant enseignement d'une part et après enseignement court terme d'autre part. Le score final pour le questionnaire électrique et le questionnaire mécanique est obtenu en prenant en compte seulement les questions qui ont une équivalence dans les deux domaines.

Un point est attribué pour une réponse correcte à une question, et dans les autres cas – pas de réponse ou réponse fausse – aucun point n'est attribué. Pour les questionnaires avant enseignement E_0 et M_0 il y a huit questions équivalentes en mécanique et en électricité (annexe 2.1 - questions $E_0$1.1, $E_0$1.2, $E_0$1.4, $E_0$1.5, $E_0$1.6, $E_0$2.1, $E_0$2.2 et $E_0$2.4 et annexe 2.3 - toutes les questions du questionnaire M_0). Ainsi les élèves peuvent obtenir un score final compris entre 0 et 8. Les questionnaires après enseignement court-terme E_1A et M_1 sont composés de six questions équivalentes en mécanique et en électricité (annexe 2.4 - questions E_1A2.1, E_1A2.2, E_1A2.3, E_1A2.4, E_1A2.5 et E_1A2.6 et annexe 2.6 - toutes les questions du questionnaire M_1). Ainsi les élèves peuvent obtenir un score final compris entre 0 et 6. Il ne s'agit pas de comparer les résultats aux tests avant enseignement à ceux après enseignement, comme habituellement, mais de comparer d'une part les résultats du questionnaire avant enseignement en mécanique à ceux en électricité avant enseignement et d'autre part de comparer les résultats du questionnaire après enseignement en mécanique à ceux obtenus à court-terme en électricité.

6.1.3.1. Comparaison des scores obtenus dans le domaine de la mécanique et dans celui de l'électricité par des élèves de terminale S avant enseignement

Dans cette analyse des résultats, nous avons dans un premier temps étudié la distribution des notes finales des élèves pour chaque questionnaire, questionnaire en électricité et questionnaire en mécanique avant enseignement.

Score	Electricité	Mecanique
0	16	2
1	27	13
2	22	17
3	17	18
4	12	15
5	10	19
6	9	19
7	8	12
8	2	8

Tableau 29 : Distribution des scores des élèves aux questionnaires avant enseignement

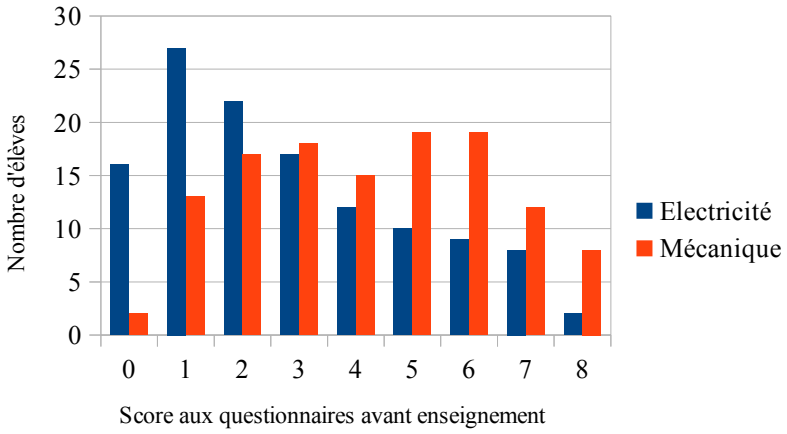


Figure 23 : Comparaison des distributions des scores des élèves aux questionnaires en mécanique et en électricité avant enseignement

Les distributions des scores finaux aux questionnaires d'électricité et de mécanique sont différentes. La figure 2 montre en effet que la fréquence du nombre d'élèves qui a obtenu un score élevé (4, 5, 6, 7, 8) est plus élevée en mécanique qu'en électricité. Inversement, la fréquence du nombre d'élèves qui a obtenu un score faible (0, 1, 2, 3, 4) est plus élevée en électricité qu'en mécanique. De plus, seulement 32 élèves ont obtenu un score entre 0 et 2 en mécanique pour 65 élèves en électricité.

Pour savoir si la différence des scores est significative, nous utilisons un test de Wilcoxon (signed-rank) car les deux séries sont appariées et les distributions des scores ne suivent pas une distribution normale dans les deux cas.

Electricité avant enseignement		Mécanique avant enseignement		Wilcoxon test	P-value
Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Signed rank |S|	
2.81	2.18	4.21	2.14	1539.5	<0.0001

Table 30 : Moyenne et écart-type pour les questionnaires en électricité et mécanique avant enseignement

Le test de Wilcoxon permet de conclure que les élèves réussissent mieux en mécanique qu'en électricité et ce de façon significative (p<0,0001). En effet, 1,4 point sur 8 sépare la moyenne des scores obtenus dans le domaine électrique des scores obtenus dans le domaine de la mécanique.

6.1.3.2. Comparaison des scores obtenus aux questionnaires après enseignement court-terme de mécanique (M_1) et d'électricité (E_1)

Nous avons procédé de même pour les questionnaires après enseignement court-terme pour comparer la fréquence des scores obtenus par les élèves en mécanique et en électricité.

Score	Electricité	Mécanique
0	7	2
1	22	4
2	24	19
3	14	30
4	11	25
5	2	0
6	0	0

Tableau 31 : Distribution des scores des élèves aux questionnaires après enseignement court terme

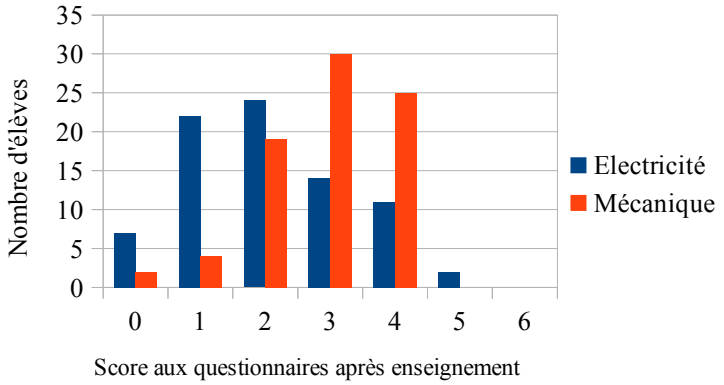


Figure 24 : Comparaison des distributions des scores des élèves aux questionnaires en mécanique et en électricité après enseignement court terme

L'étude de la figure 24 montre comme précédemment que les élèves ont des scores plus élevés en mécanique (2, 3, 4 sur 6 sont les scores majoritaires) qu'en électricité (1, 2, 3 sur 6 sont les scores

majoritaires) .

Electricité après enseignement		Mécanique après enseignement		Wilcoxon test	P-value
Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Signed rank |S|	
2.08	1.26	2.90	0.99	525	<0.0001

Tableau 32 : Moyenne et écart type aux questionnaires en électricité et mécanique après enseignement court-terme

Après enseignement, les élèves réussissent mieux en mécanique qu'en électricité de façon significative (p<0,0001). En effet, il y a 0,8 point de différence dans la moyenne des scores entre le questionnaire d'électricité et celui de mécanique.

6.1.3.3. Discussion sur la comparaison des scores moyens obtenus aux questionnaires d'électricité et de mécanique

La comparaison des scores obtenus par les élèves en mécanique et en électricité montre que les élèves réussissent mieux en mécanique. La différence des scores avant enseignement est nette puisque la différence des moyennes est de 1,4 point sur 8 soit 17,5% et ce, bien que le domaine mécanique n'ait fait l'objet que d'une présentation descriptive d'environ un quart d'heure, alors que le domaine de l'électricité a été enseigné depuis l'école primaire. Pour les questionnaires après enseignement, la différence est moins marquée que pour les questionnaires avant enseignement. La différence entre les moyennes est de 0,8 points, ce qui n'est pas très important même si les résultats sont toujours meilleurs en mécanique qu'en électricité. Ces résultats indiquent que le domaine mécanique est plus facilement compréhensible que le domaine électrique, pour les élèves de notre échantillon. De plus, nous verrons également dans le chapitre 8 que les enseignants n'ont pas utilisé tous les éléments de l'artefact analogique (équivalent bobine, condensateur...). Rappelons que les élèves sont en terminale scientifique (et donc a priori de bons scientifiques), on peut s'attendre à des différences encore plus marquées pour des élèves d'un autre niveau ou d'une autre filière.

Pour être plus précis, nous allons, dans la suite, chercher à savoir si cette différence du score existe pour chaque question.

6.1.4. Étude détaillée question par question en mécanique et en électricité

Pour faire cette analyse, nous pourrions calculer la fréquence d'élèves qui répondent juste et la fréquence d'élèves qui répondent faux à chaque question du questionnaire d'électricité question par question et faire de même en mécanique. Ensuite, un chi² permettrait de savoir si les écarts de fréquences en électricité et en mécanique pour chaque question sont significativement différentes. Sachant que toutes les réponses aux questionnaires ne sont pas appariés, il est préférable de se centrer sur une comparaison non pas globale des résultats mais individuelle. Nous cherchons à savoir combien d'élèves réussissent mieux dans un domaine que dans l'autre. Ainsi, nous pouvons calculer (tableaux 33 et 34) pour chaque question la fréquence d'élèves qui :

- Réussissent en électricité et réussissent en mécanique (EVraiMVrai),
- Réussissent en électricité et échouent en mécanique (EVraiMFaux),
- Échouent en électricité et réussissent en mécanique (EFauxMVrai),
- Échouent en électricité et échouent en mécanique (EFauxMFaux).

Le premier résultat mentionné est pour l'électricité et le second pour la mécanique pour la même question. Par exemple, « EVraiMFaux »signifie : « Vrai » pour l'Électricité et « Faux » pour la Mécanique.

6.1.4.1. Comparaison des réponses aux questionnaires de mécanique et d'électricité avant enseignement

Pour les questionnaires avant enseignement, nous obtenons les résultats suivants :

Question	EVraiMVrai	EVraiMFaux	EFauxMVrai	EFauxMFaux	Chi²	P-value
E_0 1.1	38	16	37	30	8.32	0.0039
E_0 1.2	5	20	32	66	2.77	0.0961
E_0 1.3	25	22	40	35	5.23	0.0223
E_0 1.4	18	16	48	40	16.00	<0.0001
E_0 1.5	33	19	36	35	5.25	0.0219
E_0 2.1	31	15	37	40	9.31	0.0023
E_0 2.2	21	12	41	49	15.87	<0.0001
E_0 2.3	37	18	39	27	7.74	0.0054

Tableau 33 : Fréquence des élèves qui réussissent et/ou échouent en mécanique ou en électricité en fonction des questions posées avant enseignement

Pour calculer le chi² et p (tableau 33), nous utilisons le test de chi² de Mac Nemar car les groupes sont appariés.

Les deux exercices du questionnaire avant enseignement E_0 portent sur la résistance. Les questions $E_0$1.1, $E_0$1.6, $E_0$2.1 et $E_0$2.4 sont sur la conception usure du courant. Les questions $E_0$1.2 et $E_0$2.2 sont sur la confusion entre la tension et l'intensité et les questions $E_0$1.3, $E_0$1.4 et $E_0$1.5 sont sur la conception « la pile délivre toujours la même intensité ».

Pour déterminer si les élèves réussissent mieux en électricité ou en mécanique, nous nous intéressons au nombre d'élèves qui réussissent en électricité et échouent en mécanique et inversement. La différence entre le nombre d'élèves qui ont « EVraiMFaux » et ceux qui ont « EFauxMVrai » nous permettra de déterminer si les élèves de terminale S font plus d'erreurs dans un domaine que dans un autre en testant la significativité de ce résultat.
Tout d'abord, nous pouvons remarquer que quelle que soit la question, il y a un plus grand nombre d'élèves qui ont une mauvaise réponse en électricité et une bonne réponse en mécanique (« EFauxMVrai ») comparé au nombre d'élèves qui ont une bonne réponse en électricité et une mauvaise en mécanique (« EVraiMFaux »). Pour sept de ces huit questions (toutes les questions sauf E_0 1.2), la valeur de p est inférieure à 0,05 donc la différence entre « EFauxMVrai » et « EVraiMFaux » est significative pour ces sept questions.

6.1.4.2. Comparaison des réponses aux questionnaires de mécanique et d'électricité après enseignement court-terme

Pour faire cette analyse, nous procédons de la même façon que pour les questionnaires avant enseignement. Nous comparons (tableau 34) le nombre d'élèves qui ont répondu correctement en électricité et faux en mécanique (« EVraiMFaux ») et inversement (« EFauxMVrai »). Nous avons

aussi utilisé un test de chi² de Mac Nemar pour tester la significativité des scores obtenus.

Question	EVraiMVrai	EVraiMFaux	EFauxMVrai	EFauxMFaux	Chi²	P-value
E_1A 2.1	27	7	27	11	11.76	0.0006
E_1A 2.2	16	6	40	17	25.13	<0.0001
E_1A 2.3	2	11	9	58	0.20	0.6547
E_1A 2.4	33	11	25	11	5.44	0.0196
E_1A 2.5	25	18	17	20	0.03	0.1797
E_1A 2.6	2	8	9	61	0.06	0.8084

Table 34 : Nombre d'élèves qui réussissent et/ou échouent pour chaque question des questionnaires après enseignement court terme

L'exercice 2 du questionnaire E_1A traite des questions sur la bobine.

Pour quatre (E_1A 2.1 sur l'usure du courant, E_1A 2.2 sur la pile débite toujours la même quantité de courant, E_1A 2.4 sur l'usure du courant et E_1A 2.6 sur la confusion entre la tension et l'intensité) des six questions, le nombre d'élèves ayant obtenu faux en électricité et vrai en mécanique est supérieur au nombre d'élèves ayant obtenu vrai en électricité et faux en mécanique. Pour trois de ces quatre questions (E_1A 2.1, E_1A 2.2 et E_1A 2.4), on relève une nette différence dans les résultats : la valeur de p obtenue par un test de chi² de Mac Nemar, montre que la différence dans les résultats pour ces trois questions est significative puisque cette valeur est toujours inférieure à 0,05.

Pour les trois autres questions (E_1A 2.3 sur la confusion entre la tension et l'intensité, E_1A 2.5 des connaissances sur l'intensité dans le cas de la bobine et E_1A 2.6 sur la confusion entre la tension et l'intensité), la différence entre les élèves ayant obtenu « EFauxMVrai » et ceux ayant obtenu « EVraiMFaux » n'est pas significative. Pour les questions E_1A 2.3 et E_1A 2.5, les résultats sont légèrement meilleurs en électricité et pour la question E_1A 2.6, les résultats sont légèrement meilleurs en mécanique.

6.1.4.3. Discussion sur la comparaison des réponses des élèves aux questionnaires d'électricité et de mécanique question par question

La vue détaillée apporte plus d'informations et permet de repérer les questions et conceptions qui sont difficiles en électricité et en mécanique pour les élèves et celles qui sont plus faciles en mécanique qu'en électricité.

Un des buts de cette analogie est de dépasser les conceptions en électricité. Pour savoir si le domaine source est plus facilement appropriable par les élèves que le domaine cible concernant les conceptions mises en œuvre, il faut regrouper les résultats en électricité et en mécanique pour chaque question qui traite la même conception.

L'analyse des résultats aux questions E_0 1.1, E_0 1.5, E_0 2.1, E_1A 2.1 et E_1A 2.4 (questions visant la conception de l'usure du courant) montre que les élèves réussissent mieux en mécanique qu'en électricité : le nombre de « EVraiMFaux » est inférieur au nombre de « EFauxMVrai ». Les élèves imaginent plus facilement que le déplacement de la corde se fait à la même vitesse en tout point du circuit mécanique que l'intensité est égale en tout point du circuit électrique. Donc, la conception de

« l'usure du courant » est plus présente dans le domaine électrique que son analogue dans le domaine mécanique.

L'analyse des résultats aux questions E_0 1.3, E_0 1.4 et E_1A 2.2 (questions visant la conception « la pile délivre toujours la même intensité ») montre que cette conception existe moins en mécanique qu'en électricité. Les résultats sont nettement meilleurs en mécanique qu'en électricité. Les élèves pensent réellement que lorsqu'on ajoute un dipôle dans la boucle, la vitesse de la corde est modifiée mais ils ne pensent pas de cette façon en électricité pour l'intensité.

Les analyses des résultats sur les conceptions de « l'usure du courant » et de « la pile délivre toujours la même intensité » indiquent que les élèves mènent plus facilement un raisonnement systémique en mécanique qu'en électricité (voir chapitre 1.1).

Les questions E_0 1.2, E_0 2.2, E_1A 2.3 et E_1A 2.6 concernent la confusion entre la tension et l'intensité. Hormis pour la question E_0 2.2, la valeur de p est supérieure à 0,05. Ces questions approchent le même concept : la tension. Les élèves ont des difficultés à comprendre la question mécanique dans laquelle il est question de la tension de la corde en deux points de celle-ci. Ce point de l'analogie mécanique peut s'avérer difficile sans manipulation de l'artefact et seulement avec le texte. L'idée de la tension de la corde (sans expérience sensorielle) n'est pas aussi intuitive que le reste de l'analogie. De plus, quand les élèves ont rempli le questionnaire après enseignement, ils devaient avoir travaillé avec l'instrument mais les enseignants n'ont peut-être pas parlé de tensiomètre (alors que ce terme est utilisé dans le questionnaire) même s'ils ont parlé de la tension de la corde. Les élèves pouvaient donc se retrouver en difficultés avec l'utilisation de ce nouveau terme. Cependant, même si la valeur de p est supérieure à 0,05 pour les trois questions, les élèves réussissent malgré tout mieux en mécanique qu'en électricité (nous le voyons par simple comparaison du nombre d'élèves pour « EVraiMFaux » et « EFauxMVrai »). Avec ces résultats, il apparaît important de développer un moyen de mesurer la tension de la corde si l'on veut aider les élèves à se représenter la tension de la corde. On peut aussi noter l'importance de faire toucher la corde par les élèves pour en ressentir les états de tension différents. En effet, rappelons qu'au moment de remplir les questionnaires les élèves ont simplement vu l'enseignant manipuler l'artefact, mais ne l'ont pas manipulé eux-mêmes.

Sur les quatorze questions – huit questions pour les questionnaires avant enseignement et 6 questions pour les questionnaires après enseignement court terme, il y a seulement deux questions (E_1A 2.3 et E_1A 2.5) pour lesquelles les élèves ont mieux répondu en électricité qu'en mécanique. En revanche, pour ces deux questions, la valeur de p montre que la différence n'est pas significative puisque $p > 0,05$.
Pour la question E_1A 2.5, nous pouvons formuler plusieurs hypothèses pour expliquer le résultat obtenu : soit l'électricité se comprend mieux que la mécanique, soit la formulation de la question pose problème. La première hypothèse n'est pas convaincante et est contradictoire avec les résultats obtenus aux questions portant sur la même conception. Dans le cadre de la seconde hypothèse, nous pouvons supposer que les élèves ont pu confondre la ficelle qui retient la masse et la corde qui circule autour des poulies. En effet, l'énoncé proposé interroge l'élève sur la variation de la vitesse de la corde, mesurée par le tachymètre Ta_1 une fois la masse arrivée au sol. Cette hypothèse explicative nous amène à considérer qu'il s'agit d'un risque de confusion possible non seulement pour les questionnaires passés dans le cadre de cette recherche mais aussi dans l'enseignement. Pour cette raison, ce risque doit être porté à la connaissances des enseignants via le guide d'utilisation. La distinction entre corde (qui représente le courant) et ficelle (ficelle de cerf-volant utilisée pour maintenir la masse à la poulie et former le générateur) devra être explicitée.

6.1.5. Conclusion partielle à partir de l'analyse des résultats obtenus à l'aide des questionnaires : le domaine source (mécanique) est-il plus facilement compréhensible par les élèves que le domaine cible (électricité) ?

Le taux de réussite dans le domaine de la mécanique est en moyenne plus élevé que le taux de réussite en électricité sur des questions comparables, alors même que la durée de l'enseignement du domaine mécanique est beaucoup plus courte que celle de l'électricité. Ces résultats obtenus avec des élèves de terminale S nous amènent à conclure que le domaine source est plus facilement compréhensible par les élèves. Ces résultats nous permettent également de conclure que le domaine de la mécanique est beaucoup plus intuitif que le domaine de l'électricité car une meilleure maîtrise de ce domaine est acquise par un temps d'enseignement très inférieur et les symboles utilisés pour les questionnaires de mécanique ne sont pas un obstacle à la compréhension.
Concernant les quelques questions pour lesquelles les élèves ont mieux réussi en électricité qu'en mécanique, dans les questionnaires avant enseignement, nous supposons qu'il s'agirait davantage d'un problème de compréhension d'énoncé de question (confusion corde/ficelle). Pour les questionnaires après enseignement, deux possibilités peuvent expliquer un meilleur résultat en électricité qu'en mécanique : soit l'artefact a été peu utilisé pour évoquer ces notions en particulier, soit ces notions ont été évoquées mais avec d'autres termes soit le domaine électrique est plus compréhensible pour ces notions mais cette dernière possibilité semble peu probable car la notion de tension électrique est difficile pour les élèves. Enfin, la notion de tension de la corde est moins intuitive que les autres et nécessite probablement une manipulation avec le toucher d'un doigt ou une observation via un appareil de mesure (dynamomètre ou tensiomètre) pour faciliter sa maîtrise par les élèves.

Au vu des résultats présentés, il apparaît que cet artefact analogique, en plus de posséder un isomorphisme important entre le domaine source et le domaine cible et de permettre de travailler bon nombre de conceptions en électricité, possède un domaine source plus compréhensible que le domaine cible.

Les résultats ainsi obtenus permettent de conclure que cet artefact analogique remplit les conditions nous permettant de faire l'hypothèse que son utilisation en classe peut favoriser l'apprentissage des élèves en électricité. Avant de tester cette hypothèse, les entretiens menés avec les élèves vont être analysés pour mieux comprendre les difficultés d'appropriation de l'artefact analogique.

6.2. Les élèves s'approprient-ils facilement l'artefact lors des entretiens ?

6.2.1. Données utilisées et méthode d'analyse

Pour étudier le degré d'appropriation de l'instrument par les élèves, nous avons mené des entretiens avec des élèves. L'analyse de ces entretiens va nous permettre de savoir plus précisément quels sont les points pour lesquels l'artefact présente des difficultés de compréhension pour les élèves et ceux pour lesquels il n'en présente pas.
À partir des transcriptions de sept entretiens, nous avons regroupé les informations qui concernent l'appropriation de l'artefact dans le tableau 35. Ici encore, lorsque nous avons barré le numéro de l'intervention, il s'agit d'une défaillance dans l'appropriation de l'artefact. Lorsque le numéro de

l'intervention n'est pas barré, alors l'appropriation de l'artefact est considérée correcte c'est-à-dire en accord avec le fonctionnement de l'artefact tel que décrit dans le chapitre 3.1.

6.2.2. Résultats

Appropriation du domaine source	**Entr. 1 Interv. n°**	**Entr. 2 Interv. n°**	**Entr. 3 Interv. n°**	**Entr. 4 Interv. n°**	**Entr. 5 Interv. n°**	**Entr. 6 Interv. n°**	**Entr. 7 Interv. n°**
Observations avec le pince-corde (équivalent de la résistance)							
La masse a fait tourner la corde autour des poulies		9	9		~~21, 23~~	10	6, 9
Plus de tension d'un côté du pince-corde que de l'autre	45	85		23			
Lorsqu'un pincement infini est réalisé, la vitesse de la corde est nulle						116	57
Si l'intensité du pincement augmente alors la vitesse de la corde est plus faible et il y a plus de frottement		42 et 45	14,15, 17, 19		155, 68	25	59, 61
La vitesse de la corde est la même avant et après le pincement	57		67		79	27	70
Si la masse augmente alors la vitesse de circulation de la corde augmente	79, 85	179	144, 146	~~159, 164~~ 151		130 à 132	233
L'état de tension de la corde est le même en différents points de la corde si on se positionne du même côté d'un dipôle mécanique ou si aucun obstacle		99			130, 139, 141	66, 85	
On mesure une différence d'états de tension de la corde de part et d'autre du « pince-corde infini »		130				45 à 49	182
La différence d'états de tension de la corde du « pince-corde infini » est la même que la différence d'états de tension de corde de l'ensemble « masse + poulie »		~~135~~			168, 170		115, 117
Observations avec les ressorts (équivalent du condensateur)							
La bague se déplace avec la ficelle et comprime un ressort	151	201	181 à 185	203,204	204	160	242
Lorsque le ressort est comprimé la masse est accrochée mais plus de circulation de la corde		207					
L'énergie est stockée par compression, énergie stockée dans	114	245	224 à 230	196	258	257	Pas fait

le ressort							
L'énergie provient de la masse et est transférée par la corde	119, 121	253 et 258	232 à 240	326	268, 270	260, 262, 264	
Le sens de circulation de la corde change entre la compression et la décompression	116, 195	304		432, 439			
Si la masse augmente alors l'énergie augmente	155	276	243	~~333 à 341~~			
Si la masse augmente alors la vitesse augmente			246			285	
Pour « décharger » le ressort il faut enlever le poids	188						
Pas de différence de tension de la corde avant la charge puis différence de tension de la corde une fois le ressort comprimé		294					
La corde va à la même vitesse avant et après condensateur		331		~~219~~ 229,233			
Observations avec le volant d'inertie (équivalent de la bobine)							
La vitesse de rotation de la corde avec volant est moins élevée que sans le volant	238						Pas fait
La corde va à la même vitesse avant et après le volant	~~274~~						
La vitesse de rotation du volant d'inertie augmente au cours de la chute de la masse jusqu'à une vitesse limite	308	341	286 à 292, 310		362	318	
Le volant continue de tourner une fois la masse au sol, perte d'inertie acquise, restitution énergie emmagasinée	242, 254, 277	362, 366, 379	307, 317, 319	479 à 490	373, 383	322, 324, 327	
Si le volant d'inertie est plus léger alors il y a moins de retard au départ	Pas fait		409 à 411	583			
Différence de tension de la corde avant de laisser tomber masse	301	382					
Si le volant est plus léger alors la vitesse est plus élevée	Pas fait				498		
Pour le même volant d'inertie et une masse plus grande, la vitesse de circulation de la corde augmente	Pas fait	373	246		413		
Pour un même volant d'inertie et une masse plus grande, l'énergie augmente			243				
Le sens de circulation de la corde ne change pas lors de tout le fonctionnement du volant d'inertie	340	409	395 à 400				

L'énergie est amenée par la corde et créée par la masse	Pas fait		436 à 446	625 à 631			
Difficultés liées à l'artefact lui-même							
Problème de sensation au toucher de la tension de la corde (cf. tableaux 37, 38 et 39)		160	75, 76	27	105	66	
Confusion entre fil (corde) mécanique et fil électrique			71				
Interrogation des élèves : est-ce que le volant d'inertie continuera encore plus longtemps de tourner après que la masse soit tombée par terre ?		378 et 379					

Tableau 35 : Synthèse de l'appropriation du domaine source à partir des entretiens élèves après enseignement de l'électricité.

Il apparaît que les élèves s'approprient correctement l'artefact dans l'ensemble (tableau 35). En effet, nous pouvons relever 29 observations correctes recensées contre seulement six observations incorrectes.

Lors de deux entretiens sur sept, les élèves ne parvenaient pas au début à expliquer simplement ce qu'ils observaient.

N°	Personne	Intervention
19	Élèves	*Le poids il est tombé, enfin la masse.*
20	Interlocuteur 1	*Ok, la masse est tombée.*
21	Élèves	*Enfin, c'est le fil qui génère si le poids tombe ou pas.*
22	Interlocuteur 1	*C'est-à-dire, est-ce que tu peux juste expliquer un tout petit peu plus ?*
23	Élèves	*C'est la force qu'on applique sur le fil qui fait que le poids descend ou non.*

Tableau 36 : Extrait de l'entretien 5 sur une difficulté à comprendre la chute de la masse

Les élèves analysaient l'artefact en terme de forces et donc expliquaient que la masse ne chutait pas car un fil la retenait : selon nous, les élèves faisaient référence au pincement que l'on peut exercer ou non sur la corde en boucle fermée, un pincement important empêchant la masse de tomber. Une fois le contexte reposé, les élèves n'ont pas eu de difficultés pour s'approprier l'artefact. Cet extrait confirme la nécessité de différencier corde et ficelle.

Par ailleurs, un problème apparaît dans la sensation de tension de la corde (corde positionnée autour des quatre poulies et qui peut circuler) en différents points du circuit mécanique. En effet, dans cinq des sept entretiens, nous pouvons relever des propos qui montrent une certaine hésitation sur ce point (tableaux 37 à 39).

N°	Personne	Intervention
73	Interlocuteur 2	*Donc maintenant, si l'on refait le pincement, on va tester les différentes tensions du corde. Donc allez-y, essayez de tester. Vous me dites si la tension de la corde ici est la même que là, est plus ou moins ?*
74	Interlocuteur 1	*D'après vous déjà ?*
75	Élève 6	*C'est la même.*
76	Élève 5	*Oui, c'est la même.*
77	Interlocuteur 2	*C'est la même pour vous ?*
78	Interlocuteur 3	*Essayez de soulever.*
79	Interlocuteur 1	*Utilise tes deux mains, c'est peut-être plus simple pour voir.*
80	Élève 6	*Il y a plus de tension ici que là.*
81	Interlocuteur 2	*Oui, et toi tu le sens ?*
82	Élève 5	*Oui, un petit peu ; c'est à cause de la poulie, non ? Je ne sais pas...*

Tableau 37 : Extrait de l'entretien 3 sur les difficultés à percevoir la tension du corde

N°	Personne	Intervention
25	Interlocuteur 1	*[…] Là je pince le plus fort possible jusqu'à bloquer. Donc d'après vous est-ce que la tension donc si vous regardez de chaque coté la tension. Tu peux toucher le corde de toute façon.*
26	Interlocuteur 2	*Touchez touchez … il n'y a que comme ça*
27	Élève 8	*C'est la même. Non ce n'est pas la même.*
28	Élève 7	*Là ça tire…*
29	Élève 8	*Là ça tire de ce côté, parce que ça tourne dans ce sens ; tu es sûr que ce n'est pas la même chose.*

Tableau 38 : Extrait de l'entretien 4 sur les difficultés à percevoir la tension de la corde

N°	Personne	Intervention
104	Interlocuteur 1	*Là, on va faire un pince-corde ; donc moi je vais donc mettre la masse, je vais vous laisser vous rapprocher de Interlocuteur 2 et regarder la tension. Au simple toucher, avant et après le pince-corde.*
105	Élève 9	*C'est pareil là.*
106	Interlocuteur 2	*C'est pareil ? Essayez de regarder.*
107	Élève 10	*Pour moi non ; je trouve que là c'est plus tendu que là moi. Oui, là c'est plus tendu.*

Tableau 39 : Extrait de l'entretien 5 des difficultés à percevoir la tension de la corde

Nous pouvons noter que lors de ces trois entretiens, les élèves ont dû s'y prendre à deux fois pour observer la différence de tension de la corde. Bien que perceptible au toucher, cette différence de tension de la corde n'est pas facilement perceptible. Suite à ces entretiens, des modifications techniques ont été apportées sur l'artefact pour faciliter la différenciation de la tension de la corde. En effet, pour mesurer la tension de la corde lorsqu'elle est à l'arrêt, il est possible de disposer des dynamomètres et ainsi obtenir une valeur de tension en Newton[17] (illustration 5). Dans le premier

17 La mesure telle qu'elle est présentée dans l'illustration 5 nécessite de positionner les dynamomètres à la même hauteur et à égale distance des poulies et du pince-corde. De plus, cette façon de mesurer la différence de tension de

prototype, la poulie du générateur glissait autour de la corde en boucle fermée, sauf si cette dernière était suffisamment tendue, ce qui en retour, empêchait de repérer par le toucher la différence de tension produite par le générateur. La poulie du générateur a été modifiée en couvrant la gorge d'une matière avec un fort coefficient de frottement (caoutchouc), ce qui permet d'éviter le glissement de la gorge de la poulie sur la corde, sans pour autant la tendre de manière trop importante. Avec ce nouveau générateur, la partie de la corde en boucle fermée non tendue peut être totalement souple (tension nulle). Cette solution technique devrait faciliter la perception des élèves de la tension de la corde et donc l'apprentissage de son équivalent en électricité.

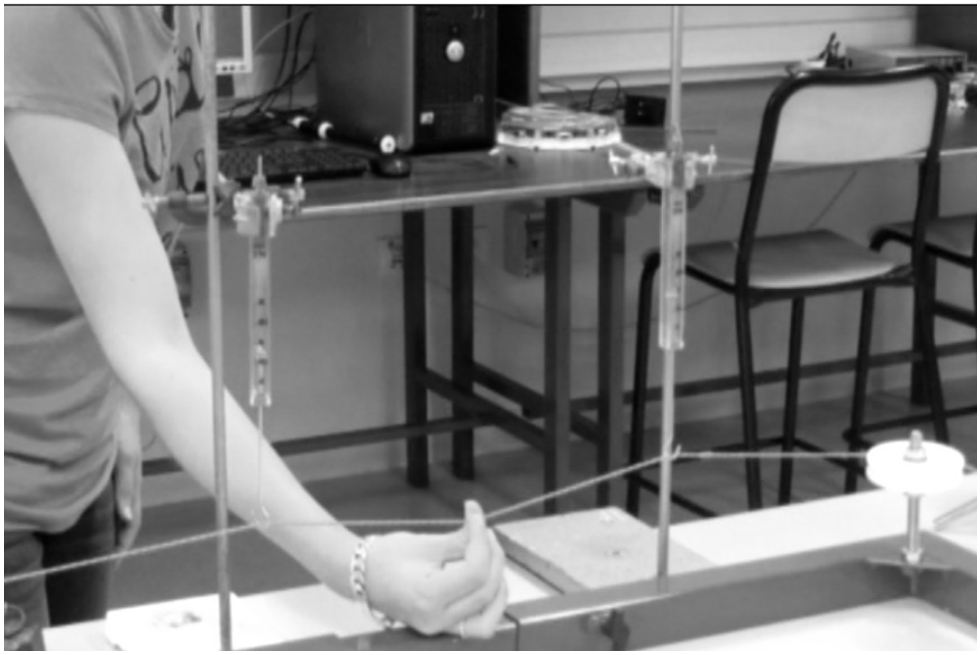


Illustration 5 : Mesure de la tension de la corde avec deux dynamomètres placés avant et après un pincement infini (interrupteur ouvert)

6.2.3. Conclusion partielle sur l'appropriation du dispositif lors des entretiens

Hormis les problèmes de perception de la différence de tension de la corde, le domaine source semble assez intuitif et les élèves ne rencontrent pas de problème pour en saisir le fonctionnement. En effet, les élèves parviennent sans difficultés à établir des relations correctes dans le domaine source. Par exemple, ils établissent facilement le fait que la corde est ralentie si le pince-corde serre davantage la corde. De même, ils parviennent facilement à identifier les transferts d'énergie et à établir des relations de variations de différentes grandeurs (par exemple, si la masse augmente, la vitesse de la corde augmente) au sein du système mécanique.

6.3. Conclusion sur l'appropriation du domaine source

Malgré un court temps d'enseignement avec l'artefact, que ce soit l'enseignement dispensé par les enseignants avec leur classe ou lors des entretiens, au regard du temps d'enseignement de l'électricité, nous considérons que les élèves s'approprient facilement le domaine mécanique. En effet, via les questionnaires par écrit, la très grande majorité des résultats sont meilleurs en

la corde n'est pas quantitatif mais nous donne une information sur la covariation entre la masse accrochée et la différence de tension de part et d'autre d'un pince-corde.

mécanique qu'en électricité ; et via les entretiens, les élèves comprennent quasiment sans erreur le domaine source.

Ainsi, l'analogie présente plusieurs caractéristiques pour être une analogie efficace. En effet, elle possède un bon isomorphisme, permet de travailler les conceptions et les connaissances pour lesquelles les élèves sont en difficultés et les élèves comprennent facilement le domaine source. Pour finir de vérifier la pertinence de cette analogie, il est nécessaire de vérifier que les élèves établissent facilement les liens entre les deux domaines Newton, 2003.

Chapitre 7.
Quelles difficultés les élèves rencontrent-ils pour faire le lien entre le domaine source et le domaine cible ?

7.1. Données utilisées et méthode d'analyse

Pour déterminer les difficultés que rencontrent les élèves pour faire des liens entre le domaine source et le domaine cible, nous nous appuyons sur les entretiens réalisés avec les élèves. L'analyse des transcriptions de ces entretiens va nous permettre de déterminer quels sont les liens qui sont difficiles à faire par les élèves

Le tableau 40 présente les liens établis par les élèves lors de chaque entretien. Pour cette analyse également, nous avons barré le numéro d'intervention lorsque le lien est incorrect et laissé écrit normalement si le lien est correct. Nous considérons que les élèves n'ont pas de difficulté à faire des liens entre le domaine source et le domaine cible à partir du moment où les seules questions qui leur sont posées par les personnes qui mènent les entretiens (les interlocuteurs 1 à 4) sont uniquement des questions pour les aider à expliciter ou développer ce qu'ils disent (tableaux 41 à 44). Nous considérons que les élèves rencontrent une difficulté lorsque le lien qu'ils font est incorrect (voir paragraphe 3.1).

7.2. Résultats

Liens entre domaines source et cible	**Entr. 1 Interv. n°**	**Entr. 2 Interv. n°**	**Entr. 3 Interv. n°**	**Entr. 4 Interv. n°**	**Entr. 5 Interv. n°**	**Entr. 6 Interv. n°**	**Entr. 7 Interv. n°**
<u>Pince-corde équivalent de la résistance</u>							
Masse + poulie = Générateur	13 et 16	14	21	11, 56	48	13	~~11, 13~~ 16, 18
Masse = tension	83		150	51, 344			32
Augmentation masse = Augmentation tension	83	181, 278			182	134 à 142	
Pince-corde = Résistance	19	47	21 ~~100~~	58, 60	51	17	63
Corde plus pincée = résistance plus forte					66	19	
Pince-corde infini = interrupteur ouvert	~~61~~ (65), 68	~~107~~ 119, 125	120, 125	90 à 93	160 à 162	52, 120 à 122	~~205~~ 211
Pince-corde infini ➔ Absence de courant	57				155		
Circulation de la corde = déplacement des électrons = Courant	21	28	24, 29	70, 83	~~46, 86~~ 88	31	~~34~~ 46, 214
Même vitesse avant et après le pincement = même intensité avant et après la résistance					84		
Vitesse de circulation de la corde = Intensité	~~13~~	33 et 52	~~34~~ 144 à 146	79	94, ~~232,~~ 234	~~35~~ 37	Donné puis 48
État de tension de corde donné = un potentiel		101		63, 65			
≠ d'états de tension de la corde des 2 côtés du pince-corde infini = ≠ d'états de tension de la corde des 2 côtés de la poulie+masse = tension résistance = tension générateur	49			123	~~130~~		~~121, 139~~
<u>Ressorts équivalent du condensateur</u>							
Cavité + 2 ressorts = Condensateur				191	222 à 226		248 (aide)
Compression du ressort = charge du condensateur	96	209	181 à 185, 195	208 à 212		204	250
Compression = accumulation d'électrons sur une plaque	184		187				Pas fait
Décompression du ressort=décharge	188			432 à 441		206	
Ressort = plaque	137, 139	243	191		260		
Masse enlevée ➔ décharge du condensateur		234	255				
Sens de circulation de la corde change = sens du courant change entre charge et décharge du	214				228 à 230 et 331 à		

condensateur					333		
Vitesse de la corde avant et après cavité ressorts est la même = même intensité avant et après condensateur		331				217	
Volant d'inertie équivalent de la bobine							
Volant d'inertie= Bobine		369	312 à 314	479 à 490	375	329	Pas fait

Tableau 40 : Établissement de liens corrects et incorrectes entre domaines source et cible à partir de l'analyse des entretiens

Nous constatons que les élèves ont peu de difficultés à faire les liens entre les deux domaines. En effet, vingt-et-un liens recensés sont corrects contre seulement six incorrects.

Quel que soit l'élément ('masse+poulie', pince-corde, ressorts ou volant d'inertie) introduit sur le cadre, les élèves parviennent à transférer leurs observations dans le domaine source (mécanique) à ce qu'ils savent dans le domaine cible (électricité).

Dans le premier extrait (tableau 41), sans aucune hésitation, l'élève fait le lien entre l'ensemble 'masse+poulie' et le générateur en électricité.

N°	Personne	Intervention
13	Interlocuteur 4	*L'ensemble masse + poulie ça correspond à quoi au niveau électrique ?*
14	Élèves	*Au générateur.*

Tableau 41 : Extrait de l'entretien 2 sur le lien entre l'ensemble 'Masse+poulie' et le générateur

Dans ce deuxième extrait (tableau 42), les élèves font le lien entre le pince-corde et la résistance puis par questionnement et à l'aide de leurs observations, ils arrivent à faire le lien avec son analogue strict, l'interrupteur. Notons d'ailleurs à ce propos que les élèves font spontanément le lien entre une résistance très élevée et un interrupteur.

N°	Personne	Intervention
87	Interlocuteur 1	*Je suis donc là dans un pincement infini depuis tout à l'heure, comment est la vitesse de déplacement du fil ?*
88	Élève 8	*Elle est de 0.*
89	Interlocuteur 1	*Si on doit faire une analogie en électricité, cela vous fait penser à quoi ?*
90	Élève 8	*Résistance assez grande.*
91	Élève 7	*C'est absolu*
92	Interlocuteur 1	*On va parler de résistance infinie mais est-ce qu'on ne peut pas le modéliser autrement en électricité ?*
93	Élève 8	*Un interrupteur ouvert.*

Tableau 42 : Extrait de l'entretien 4 sur le lien entre le pince-corde infini et l'interrupteur

Dans ce troisième extrait (tableau 43), les élèves font le lien entre les ressorts et le condensateur. Leur réponse n'est pas faite au hasard car ils parviennent même à justifier le lien qu'ils font par le

biais de leur observation.

N°	Personne	Intervention
221	Interlocuteur 1	*... Quand elle a allumé son générateur, qu'est-ce que vous avez vu ?*
222	Élèves	*Moi je pense que c'est un condensateur qui s'est chargé en fait.*
223	Interlocuteur 11	*Et est-ce que tu peux juste essayer de dire un petit peu pourquoi, parce qu'il y a bien un petit indice qui te fait dire ça.*
224	Élèves	*Parce qu'après la masse est restée bloquée là, elle n'est pas descendue jusqu'en bas et le circuit n'a pas continué de, enfin le courant, le fil n'a pas continué de tourner.*
225	Interlocuteur1	*Donc, ça serait quoi d'après vous ce dipôle que l'on aurait ?*
226	Élèves	*Un condensateur qui se charge.*

Tableau 43 : Extrait de l'entretien 5 sur le lien entre les ressorts et le condensateur

Dans ce quatrième extrait (tableau 44), après avoir observé le domaine source, les élèves font le lien sans difficulté entre le volant d'inertie et la bobine.

N°	Personne	Intervention
317	Interlocuteur 1	*Donc là on va passer au volant d'inertie donc vous allez bien regarder ce qui va se passer un peu partout et surtout aux alentours du volant. Vous allez comprendre pourquoi on appelle cela un volant d'inertie. Donc je vais vous le montrer une fois*
318	Élève 11	*Déjà il accélère.*
319	Interlocuteur 1	*Donc voilà qu'est-ce que vous avez vu donc tu nous as dit le volant accélère donc il rentre en rotation progressivement donc sa vitesse de rotation va accélérer pour se stabiliser. La stabilisation on l'a pas tellement vue mais on a vu qu'il accélérait.*
320	Interlocuteur 2	*Jusqu'à ce que la masse arrive en bout de course.*
321	Interlocuteur 1	*Et quand la masse arrive en bout de course qu'est-ce qui se passe ?*
322	Élève 11	*Et bien l'inverse enfin ça ralentit puis ça s'arrête.*
323	Interlocuteur 1	*Et donc est-ce qu'il a continué après que la masse soit tombée ou est-ce qu'il s'est arrêté ?*
324	Élève 11	*Il a continué à tourner un petit peu.*
325	Interlocuteur 2	*On peut le voir le faire de nouveau.*
326	Élève 11	*Oui ça continue.*
327	Interlocuteur 1 Interlocuteur 2	*Donc il continue de tourner et donc au niveau électrique ça vous fait penser à quoi ?*
328	Élève 11	*Une bobine.*

Tableau 44 : Extrait de l'entretien 6 sur le lien entre le volant d'inertie et la bobine

Par ailleurs, les liens incorrects formulés concernent uniquement les grandeurs tension et intensité et le pince-corde (interrupteur) qui nous a permis d'introduire ces grandeurs (tableau 40). Les seules interventions rayées se situent dans les lignes qui concernent le pince-corde. Cette difficulté à établir des liens est liée à la confusion que font certains élèves entre la tension et l'intensité en électricité. En effet, ils confondent ces deux grandeurs en électricité et donc ils ne peuvent pas associer l'observation dans le domaine source à la bonne grandeur. À partir du moment où des élèves n'arrivent pas à établir le lien entre l'intensité du courant électrique et la vitesse de circulation

de la corde et entre la différence de tension de la corde et la tension électrique, ils rencontrent des difficultés à chaque question faisant intervenir l'équivalent de la tension ou l'intensité quel que soit le dipôle (cf. annexe 7.9 de la transcription de l'entretien 7).

La mise en relation, par un binômes d'élèves, du fil électrique avec la corde qui circule autour des poulies est une autre difficulté rencontrée avec l'artefact. Il s'agit d'une mauvaise mise en relation entre le domaine source et cible. En effet, la corde représente les électrons et non pas le fil électrique. Le dépassement de cette difficulté est indispensable pour une bonne compréhension de l'analogie, notamment pour interpréter l'équivalent du déplacement de la corde. Les élèves semblent pouvoir dépasser cette erreur facilement car une fois qu'elle a été repérée et discutée, elle ne réapparaît ensuite pas dans les entretiens. Pour éviter la confusion entre le fil électrique et le fil/la corde en boucle fermée, le terme « corde » est utilisé pour désigner la corde qui circule.

7.3. Conclusion sur les difficultés à faire des liens entre le domaine source et le domaine cible

Hormis ce problème de terminologie (corde associé à fil électrique), les autres mises en relation pour la résistance, l'interrupteur, le condensateur et la bobine entre le domaine source et le domaine cible ne semblent pas poser de problèmes aux élèves. Les difficultés peuvent apparaître si les élèves ne parviennent pas à assimiler, dans le temps de l'entretien, l'équivalent de la tension et de l'intensité électriques (ce qui a été le cas d'un entretien sur douze).

Nous savons que l'analogie ne présente pas d'obstacle et qu'elle est pertinente au sens de Newton (2003) (les élèves parviennent à établir facilement des liens), Dupin et Johsua (1989) (domaine source plus facilement compréhensible que le domaine cible) et Duit et Von Rhöneck (1998) (l'analogie permet de dépasser les conceptions). Cette première phase d'étude technocentrée montre que l'analogie devrait être efficace pour aider les élèves à apprendre l'électrocinétique. Nous allons maintenant étudier son utilisation par les enseignants et son effet sur l'apprentissage des élèves, ce qui constitue la phase d'étude anthropocentrée, plaçant l'activité de l'enseignant au centre de l'étude.

Chapitre 8.
Quelle utilisation de l'artefact est faite en classe par les enseignants avec les élèves ?

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'utilisation de l'artefact en cours par les enseignants. Dans les parties précédentes, nous avons vu que cette analogie était potentiellement une analogie efficace car elle présente un isomorphisme important, le domaine source est plus compréhensible que le domaine cible et les élèves établissent sans difficulté majeure les liens entre les objets, les grandeurs et les relations entre grandeurs de l'analogie. En ce sens l'artefact remplit *a priori* les conditions nécessaires pour avoir un effet favorable sur l'apprentissage. Malgré tout, si l'enseignant utilise peu l'analogie, celle-ci aura probablement peu d'effets sur les raisonnements que pourra mener l'élève. Pour cette raison, il est nécessaire, dans un premier temps et avant d'aller plus loin dans notre analyse, de saisir l'utilisation qui est effectivement faite de l'artefact par les enseignants (QdR7).

8.1. Données utilisées

L'utilisation de l'artefact en classe par les enseignants va déterminer l'efficacité de l'enseignement avec l'analogie. Mais l'utilisation dépend aussi de l'appropriation de l'artefact par les enseignants eux-même. Toute difficulté d'appropriation peut avoir des conséquence sur l'utilisation en classe de l'instrument. Pour répondre à ces deux questions (appropriation et utilisation), nous allons nous appuyer, d'une part, sur les enregistrements d'entretiens de présentation et après enseignement réalisés auprès des enseignants et, d'autre part, sur les enregistrements de cours.

Nous avons réalisé les transcriptions intégrales des entretiens lors de la présentation de l'artefact (annexes 4) pour avoir la totalité des remarques des enseignants et l'enchaînement de celles-ci. Ces enregistrements vont nous permettre de relever les points d'achoppement avec l'artefact, les difficultés en électricité et les éventuelles réticences à utiliser l'artefact.

En revanche, nous n'avons pas transcrit la totalité des enregistrements de cours car il nous a semblé que le rapport entre le gain en terme de compréhension et le temps de transcription n'était pas rentable. Malgré tout, nous avons écouté la totalité des enregistrements et noté les moments où l'instrument est utilisé et à quelles fins il est utilisé précisément. Ainsi, nous avons un fichier texte par enseignant avec la liste des fichiers audio d'enregistrement de séance de cours. Pour chacun de ces fichiers audio, il est précisé soit que rien a été fait avec l'artefact soit ce qui a été traité avec celui-ci avec la précision du début et de la fin de l'utilisation. Lorsque l'artefact est utilisé, nous relevons la partie du programme d'électricité qui est abordée et les quelques éventuelles remarques des élèves (annexes 5). De cette façon, nous pouvons connaître la durée d'utilisation de l'artefact et les schèmes d'utilisation, dans la mesure, bien sûr, où l'enseignant a pensé à faire les enregistrements.

Enfin, les entretiens après enseignement ont été transcrits intégralement. Dans ce cas, comme lors de l'entretien de présentation de l'artefact, il est question en permanence de son utilisation donc toute la discussion présente un intérêt au regard de nos questions de recherche (annexes 6). Ces entretiens vont nous permettre d'avoir des informations sur l'utilisation qu'ils ont faite et sur les raisons qui les auraient poussés à utiliser plus ou moins l'artefact.

8.2. Résultats

Enseignant	Entretien de présentation du l'artefact	Enregistrement de cours	Entretien de fin d'enseignement avec artefact
Prof 1	Commun aux deux enseignants	8h 57 min	Oui
Prof 2		7h 32 min	Non Prof 1 déclare identique pour Prof 2
Prof 3	Commun aux deux enseignants	13h 04 min	Oui
Prof 4		7h 55 min	Oui
Prof 5	x	0	Oui
Prof 6	x	1h 45 min	Oui

Tableau 45 : Tableau récapitulatif des données utilisées pour déterminer l'utilisation de l'analogie en classe

À partir de l'ensemble des données du tableau 45, la comparaison des différentes utilisations de l'instrument par les différents enseignants, a permis de faire apparaître plusieurs caractéristiques d'utilisation. Nous distinguons cinq caractéristiques principales permettant de différencier les types d'utilisation :
- usage des éléments de l'artefact en vue d'établir des analogies : résistance R, condensateur C, bobine L, combinaison RLC,
- usage de l'artefact pour la compréhension des grandeurs électriques tension et intensité (couplé avec les éléments mécaniques),
- organisation temporelle : quel temps d'utilisation déclaré ou enregistré,
- organisation spatiale : présence systématique ou non de l'artefact dans la salle, position des élèves par rapport à l'artefact au moment de son utilisation,
- modifications du temps de préparation de cours engendrées par l'utilisation de l'artefact.

Le tableau 46 présente les résultats selon les cinq caractéristiques.

Caractérisation de l'utilisation		Prof 1	Prof 2	Prof 3	Prof 4	Prof 5	Prof 6
Éléments de l'artefact	Résistance R	Oui	Oui	Oui	Oui (intro d'élec pour tension et intensité)	Oui (pour revenir sur tension et intensité)	Oui
	Condensateur C	Oui (chap. RC + énergie)	Oui (chap. RC + énergie)	Oui (mesure de différence de tension du corde+lien entre méca et élec + énergie)	Oui en intro d'élec + intro RC + en cours de RC	Non	Oui
	Bobine L	Oui (Chap. RL)	Oui (Chap. RL)	Oui (effet dans un circuit élec lien avec observations méca)	Oui en intro d'élec + intro RL	Non	Très peu montré car trop peu visible
	RLC	Oui	Oui	Oui (+question si disque plus lourd)	Oui en intro d'élec + fin RLC	Non	Oui
Grandeurs électriques	Tension	Peu montré car impossibilité pour élèves de toucher le corde	Peu montré car impossibilité pour élèves de toucher le corde	Oui (au niveau du générateur et de la corde+pour C)	Oui + avec analogie hydrauliq	Oui avec R seulement	Peu car élèves à distance donc ne peuvent toucher le corde
	Intensité	Oui	Oui	Oui	Oui mais pas un problème pour élève	Oui avec R seulement	Oui
	Énergie	Pas mentionné	Pas mentionné	Oui sur la masse, condensateur et RLC	Oui sur RLC	Non	Non

Organisation temporelle	Temps d'utilisation déclaré	Pas utilisé souvent mais pour tous les éléments	Pas utilisé souvent mais pour tous les éléments	Pas mentionné	30 à 40 min lors de l'intro	Peu de temps passé avec artefact	Pas sorti souvent : 4 fois
	Temps d'utilisation enregistré	0 min mais des oublis	0 min mais des oublis	41min 58s	18min 52s + oublis	Pas d'enregistr de cours	16min 55s
Organisation spatiale	Artefact dans la salle	Fixé dans une salle donc pas présent à chaque séance	Fixé dans une salle donc pas présent à chaque séance	Présent à chaque fois dans la salle	Présent à chaque fois dans la salle	Présent seulement en début de séquence d'élec	Présent seulement quand prévu de l'utiliser
	Position élève	Élève reste à sa place	Élève reste à sa place	Élève se déplace autour de l'artefact et peut toucher	Élève se déplace autour de l'artefact et peut toucher	Non renseigné	Élève reste à sa place
Modifications et temps de préparation engendrés par l'utilisation de l'artefact		Cours identiques	Cours identiques	Cours identiques	Cours identiques, seulement réflexion préalable sur le moment où est introduit l'artefact	Cours identiques	Cours identiques

Tableau 46 : Analyses de l'utilisation de l'artefact par les enseignants participant à l'étude

Ce tableau 46 montre nettement que l'artefact n'a pas été utilisé de la même façon par tous les enseignants.

La première caractéristique qui va déterminer le degré d'utilisation de l'artefact est le nombre d'éléments (R, L, C) et de grandeurs (tension, intensité, énergie) mobilisés dans le cadre de l'analogie. Plus un enseignant va utiliser des éléments de l'artefact et relier des grandeurs avec le comportement de ces éléments, plus le degré d'utilisation sera important.
La seconde caractéristique permettant de déterminer le degré d'utilisation est la possibilité qu'avaient les enseignants d' utiliser l'artefact en classe : un enseignant qui avait toujours l'artefact dans sa salle a plus facilement pu y faire allusion et le manipuler ou l'utiliser pour répondre à des questions d'élèves.
Enfin, le troisième et dernier point concerne la possibilité qu'ont les élèves d'utiliser eux-mêmes l'artefact en se déplaçant autour : si les élèves se déplacent autour, ils perçoivent mieux les phénomènes que depuis leur place (et peuvent toucher la corde pour évaluer son état) donc

l'utilisation a vraisemblablement plus d'impact.
Nous pouvons alors déterminer le degré d'utilisation de l'artefact par les enseignants en fonction de ces trois paramètres (tableau 47)

	Utilisation de l'artefact pour les éléments et les grandeurs	Artefact présent à chaque cours	Possibilité aux élèves de se déplacer
Prof 1	Tous les éléments Intensité et énergie	**Non** Artefact fixé dans une salle	**Non**
Prof 2	Tous les éléments Intensité et énergie	**Non** Artefact fixé dans une salle	**Non**
Prof 3	Tous les éléments Tension, Intensité, Énergie	**Oui**	**Oui** Les élèves se déplacent autour à chaque utilisation
Prof 4	Tous les éléments Tension, Intensité, Énergie	**Oui**	**Oui** Les élèves se déplacent autour à chaque utilisation
Prof 5	Résistance Tension, Intensité	**Non** Seulement à la première séance	?
Prof 6	Tous les éléments mais peu la bobine Peu la tension, Intensité	**Non**	**Non**

Tableau 47 : Analyse de l'utilisation de l'artefact par les enseignants

Que ce soit pendant l'entretien après enseignement avec utilisation de l'artefact ou bien pendant la séance, on voit très nettement que le Prof 3 a largement utilisé l'artefact : pour tous les éléments de l'artefact et toutes les grandeurs électriques. Le Prof 4 semble l'avoir également souvent utilisé d'après ses déclarations lors de l'entretien et en partie à partir les enregistrements de cours (en partie seulement car il manque certains passages). Par ailleurs, ces deux enseignants avaient l'artefact dans la salle de cours à chaque fois qu'ils faisaient un cours d'électricité. Ainsi, même s'ils ne l'avaient pas envisagé, ils pouvaient y avoir recours. Enfin, pour ces deux enseignants, les élèves étaient invités à se déplacer autour de l'artefact, ce qui leur a permis de le manipuler.

Pour les quatre autres enseignants, l'artefact n'était présent que ponctuellement. Pour les enseignants Prof 1 et Prof 2, l'artefact était fixé à une table dans une salle donc ils y avaient accès uniquement s'ils faisaient cours dans la salle en question.
Le Prof 6 n'a pas souhaité faire suivre l'artefact dans toutes les salles où il enseignait du fait de l'encombrement de l'artefact lui-même. Par ailleurs, pour les trois enseignants Prof 1, Prof 2 et Prof 6, les élèves n'étaient pas invités à venir autour de l'artefact mais regardaient ce qui se passait de loin.

Le Prof 5 n'a utilisé l'artefact qu'une seule fois, au début de la séquence d'électricité. Il avait fait le choix au préalable de n'utiliser l'artefact que pour la tension et l'intensité. Nous n'avons pas de précisions sur la possibilité que les élèves avaient à se déplacer (troisième paramètre d'analyse).
Donc de façon très nette, ces quatre enseignants ont moins utilisé l'outil que les enseignants Prof 3 et Prof 4.

Ainsi, Prof 3 et Prof 4 sont les deux enseignants qui ont utilisé le plus souvent l'artefact. À l'inverse, Prof 5 est celui qui l'a le moins utilisé, seulement une fois pour stabiliser des connaissances antérieures sur la tension électrique et l'intensité du courant électrique. Ainsi il n'a pas du tout fait les liens entre la mécanique et l'électricité pour les analogues du condensateur et de la bobine ni même aidé les élèves à raisonner sur ces deux éléments.

Les enseignants Prof 1 et Prof 2 ont utilisé l'artefact pour tous les éléments et ont présenté au moins les analogues de la tension électrique et de l'intensité du courant électrique. En revanche, ils n'ont pas pu amener les élèves à toucher l'état de la corde à propos de l'analogue de la tension électrique avec tous les élèves dans la mesure où ces derniers étaient à leur place et ne se sont pas levés. Ils indiquent malgré tout qu'ils faisaient venir un élève à côté de l'artefact qui faisait part de ses observations à l'ensemble de la classe.

De la même façon Prof 6 a présenté tous les éléments de l'artefact mais n'a pas approfondi la présentation du volant d'inertie, équivalent de la bobine, car, explique-t-il, le phénomène était peu visible en étant éloigné de l'artefact. De plus, pour les grandeurs électriques, il précise qu'il a peu mentionné la tension mécanique (vs électrique) puisque cette grandeur est palpable au toucher et que ses élèves ne pouvaient pas approcher de l'artefact. Donc le Prof 6 a moins utilisé l'artefact que les enseignants Prof 1 et Prof 2.

8.3. Conclusion

Ces résultats permettent de distinguer trois groupes d'utilisation (tableau 48) :
- un groupe d'utilisation faible, que nous noterons G1, qui comporte les élèves des enseignants Prof 5 et Prof 6 (l'artefact était présent ponctuellement et utilisé pour seulement tension et intensité et pas pour tous les dipôles mécaniques, les élèves ne déplaçaient pas autour de l'artefact),
- un groupe d'utilisation moyenne, que nous noterons G2, qui comporte les élèves des enseignants Prof 1 et Prof 2 (l'artefact était présent ponctuellement, utilisé pour toutes les grandeurs et tous les dipôles mécaniques et les élèves ne se déplaçaient pas autour de l'artefact),
- un groupe d'utilisation importante, que nous noterons G3, qui comporte les élèves des enseignants Prof 3 et Prof 4 (l'artefact était présent lors de toutes les séances d'électricité et utilisé pour toutes les grandeurs et tous les dipôles mécaniques et les élèves se déplaçaient autour de l'artefact).

Degré d'utilisation	**Enseignants**	
Groupe G1 : Utilisation faible	Prof 5	Prof 6
Groupe G2 : Utilisation moyenne	Prof 1	Prof 2
Groupe G3 : Utilisation importante	Prof 3	Prof 4

Tableau 48 : Répartition des enseignants selon le degré d'utilisation de l'artefact

On peut noter une très grande diversité d'utilisation qui va probablement impacter les résultats des

élèves. Alors que l'artefact permet, *a priori*, aux élèves de mieux comprendre l'électricité (voir l'ensemble des résultats précédents) certains enseignants l'ont très peu utilisé. On peut s'attendre à un impact sur l'apprentissage des élèves dépendant du degré d'utilisation (chapitre suivant). Comprendre les raisons qui ont empêché les enseignants d'utiliser cet artefact est donc particulièrement intéressant Leplat, 1992 si l'on veut dans un deuxième temps agir de manière efficace en vue d'un accroissement de son utilisation. Ce résultat souligne l'importance d'une approche ergonomique anthropocentrée dans le processus de conception-évaluation des instruments didactiques, puisque l'enseignant est ici le principal déterminant de l'impact de l'instrument sur les élèves.

Chapitre 9.
Quels sont les effets de l'utilisation de l'artefact sur l'acquisition de connaissances en électricité des élèves ?

9.1. Analyse quantitative des résultats des élèves en fonction du degré d'utilisation

Lors des études précédentes, nous avons vu que :

1. L'artefact est a priori une analogie efficace, car il existe un bon isomorphisme entre les domaines source et cible, il permet de traiter un bon nombre de conceptions et le domaine source est plus compréhensible que le domaine cible pour les élèves.
2. Les élèves parviennent à faire des liens entre les deux domaines .
3. Les enseignants ont utilisé l'artefact à des degrés différents.

Ainsi, dans cette partie, nous cherchons si le degré d'utilisation de l'artefact a ou non une influence sur la compréhension des phénomènes électriques dans un circuit (QdR6).
Pour faire cette analyse, nous nous proposons de décliner cette étude en plusieurs questions :

1. Est-ce que les élèves progressent mieux lorsqu'ils ont reçu un enseignement utilisant davantage l'artefact
2. Est-ce que les élèves faibles en électricité progressent mieux lorsqu'ils ont reçu un enseignement utilisant davantage l'artefact ?
3. Est-ce que les élèves forts en électricité progressent mieux lorsqu'ils ont reçu un enseignement utilisant davantage l'artefact ?
4. Est-ce que les élèves font moins d'erreur aux questions interrogeant les conceptions lorsqu'ils ont reçu un enseignement utilisant davantage l'artefact ?

9.1.1. Hypothèses

Sachant que le domaine source de cette analogie est plus compréhensible que le domaine cible et que les élèves parviennent à faire des liens entre les deux domaines lors des entretiens, nous prévoyons que les résultats des élèves ayant reçu un enseignement utilisant davantage l'artefact seront meilleurs, quel que soit leur niveau de départ. Par ailleurs, nous pouvons également nous attendre à un effet positif sur les conceptions des élèves pour ceux qui ont reçu un enseignement avec une utilisation importante de l'artefact, puisque cette analogie permet de les travailler.

Le questionnaire E_0 sert de référence et donc d'indicateur de niveau de départ de chaque élève et chaque groupe d'élèves. De plus, toutes les notes finales aux différents questionnaires ont été ramenées sur 10 pour faciliter la comparaison des scores des élèves.

Par ailleurs, pour les questionnaires après enseignement court-terme E_1A et E_1B, nous nous sommes intéressés uniquement aux trois premiers exercices car ces exercices mettent en jeu des connaissances qui peuvent être abordées avec l'artefact. En effet, le quatrième exercice est extrait d'un manuel de terminal et est purement calculatoire.

9.1.2. Moyennes aux différents questionnaires pour chaque classe

Dans un premier temps, nous cherchons s'il existe des différences de niveau importantes entre les différentes classes testées (tableau 49). Le tableau 49 présente les moyennes obtenues pour chaque classe pour chaque questionnaire. Nous obtenons les résultats ci-dessous.

Moyenne	Prof 1	Prof 2	Prof 3	Prof 4	Prof 5	Prof 6	p Kruskal-Wallis
Moyenne(E_0)	2,89	3,26	2,10	3,70	3,79	3,96	0,0463
Moyenne(E_1A)	4,40	4,55	3,41	4,40	4,71	4,60	0,5170*
Moyenne(E_1B)	5,36	3,38	4,26	4,66	4,96	4,44	0,0489
Moyenne(E_2A)	4,79	4,08	5,83	4,55	5,32		0,1840*
Moyenne(E_2B)	6,67	4,17	6,07	4,85	5,33		0,0112

Tableau 49 : Moyennes des scores pour chaque classe à chaque questionnaire

**: non significatif*

Dans le cas présent, nous avons utilisé un test de Kruskal-Wallis car la distribution de notes ne respecte pas une loi normale, donc une ANOVA n'est pas envisageable.
Nous constatons que nous avons des différences significatives pour le questionnaire E_0 ($p<0,05$). Ainsi une comparaison des moyennes pour les questionnaires après enseignement sans tenir compte des résultats au questionnaire avant enseignement ne peut être envisagée.

9.1.3. Moyennes aux différents questionnaires pour chaque groupe d'utilisation

Les résultats obtenus par classe dans le tableau 49 montrent déjà que les résultats sont significativement différents d'une classe à une autre. Nous allons maintenant chercher à savoir si les résultats aux différents questionnaires sont ou non significativement différents d'un groupe d'utilisation à l'autre. Le tableau 50 présente les moyennes des scores de chaque groupe d'utilisation de l'artefact pour chaque questionnaire.

Moyenne	G1 Prof 5+Prof6	G2 Prof 1+Prof2	G3 Prof 3+Prof4	p (Kruskal-Wallis)
Moyenne(E_0)	3,86	3,06	2,93	0,1214*
Moyenne(E_1A)	4,67	4,46	3,98	0,3868*
Moyenne(E_1B)	4,76	4,46	4,46	0,9043*
Moyenne(E_2A)	5,32	4,48	5,16	0,3519*
Moyenne(E_2B)	5,33	5,76	5,32	0,2333*

Tableau 50 : Moyennes des scores pour chaque groupe d'utilisation à chaque questionnaire

**: Non significatif*

Nous constatons que les différences de moyennes ont été atténuées, les valeurs de p ne donnent pas une différence significative. Quand on considère l'ensemble des connaissances mises en jeu dans le questionnaire E_0, le groupe G1 d'utilisation faible a une moyenne de 3,86 alors que le groupe G3 a une moyenne de 2,93, ce qui confirme le fait qu'il existe des différences entre les groupes d'utilisation avant enseignement. D'après ces résultats, nous considérons qu'il est nécessaire de tenir compte du niveau de départ pour mener la suite de notre étude, et donc d'étudier systématiquement la progression des élèves plutôt que le niveau final.

9.1.4. Évolution des élèves selon le degré d'utilisation de l'artefact

L'utilisation de l'artefact dans la classe devrait favoriser chez les élèves l'apprentissage des notions d'électricité mises en jeu dans le programme de terminale S (Annexe 8). Pour vérifier cette hypothèse, nous regardons dans un premier temps, si les progressions des élèves sont significativement différents d'un groupe d'utilisation de l'artefact à l'autre pour le questionnaire d'électricité après enseignement à court-terme E_1 puis pour le questionnaire après enseignement à moyen-terme E_2.
Pour calculer la progression, nous soustrayons pour chaque élève la note obtenue à E_0 à la note obtenue à E_1. Il est ensuite possible de déterminer la moyenne des progressions pour chaque groupe d'élèves. Nous notons cette moyenne « Moyenne(E_1 - E_0) », pour chaque groupe d'utilisation. Nous procédons de même pour le questionnaire E_2 afin d'obtenir la « Moyenne(E_2 - E_0) ».
Nous obtenons les résultats suivants (tableau 51) :

Moyenne	G1	G2	G3	p
Moyenne (E_1 – E_0)	0,68	1,25	1,25	0,4487
Moyenne (E_2 – E_0)	1,35	2,16	2,34	0,3205

Tableau 51 : Moyenne de l'évolution des élèves entre avant et après enseignement court-terme ou avant et après enseignement moyen-terme selon le groupe d'utilisation

Les valeurs positives des moyennes indiquent que, globalement, les élèves ont une meilleure note aux questionnaires après enseignement (E_1 et E_2) qu'au questionnaire avant enseignement (E_0).
Ici, pour déterminer p, nous utilisons une ANOVA. Dans les deux cas, les différences ne sont pas significatives en revanche, nous obtenons quand même une tendance qui montre que les élèves progressent davantage dans le cas du groupe G3 d'utilisation importante, que pour les élèves des deux autres groupes d'utilisation. En effet, la moyenne de G3 à court-terme est égale à celle de G2. À moyen-terme, la moyenne de G3 est supérieure aux deux autres ce qui signifie que l'évolution des résultats est plus importante pour G3 que pour les deux autres groupes G1 et G2.

Conclusion partielle :
Ce regard général montre une tendance : plus l'artefact est utilisé par les enseignants, plus les élèves progressent quand on s'intéresse aux résultats des élèves sur la diversité des connaissances abordées en terminale S.

Nous allons ensuite regarder si l'artefact profite de manière identique à tous les élèves. Nous distinguons deux profils : les élèves les plus faibles et les plus forts.

9.1.5. Évolution des élèves faibles et forts selon le degré d'utilisation de l'artefact

9.1.5.1. Comparaison de l'évolution des élèves les plus faibles en fonction du degré d'utilisation

L'utilisation de l'artefact dans la classe devrait aider les élèves les plus faibles à progresser sur les notions d'électricité mises en jeu dans le programme de terminale S.
Pour déterminer les élèves les plus faibles, nous nous appuyons sur le questionnaire avant enseignement (E_0) et nous définissons comme élève faible un élève qui se situe en-dessous de la médiane.
Nous procédons comme précédemment pour calculer les moyennes de $E_1 – E_0$ et $E_2 – E_0$ dans le cas

de ces élèves seulement.
Nous notons Gx/- le groupe d'utilisation x avec le profil d'élèves les plus faibles.
Nous obtenons les résultats suivants (Tableau 52) :

Moyenne	G1/-	G2/-	G3/-	p
Moyenne ($E_1 - E_0$)	2,28	3,19	2,56	0,1845*
Moyenne ($E_2 - E_0$)	3,65	4,05	3,94	0,7990*

Tableau 52 : Moyenne de l'évolution des élèves faibles entre avant et après enseignement court-terme ou avant et après enseignement moyen-terme selon le groupe d'utilisation

** : Non significatif*

Ici encore, les différences ne sont pas significatives (ce que nous indique la valeur de p obtenue en faisant une ANOVA) entre les différents groupes mais ces résultats donnent une tendance. Par ailleurs, des moyennes de différences positives nous donnent l'indication que les élèves les plus faibles ont, pour tous les groupes, amélioré leurs résultats.

9.1.5.2. Conclusion partielle sur l'évolution des élèves les plus faibles :

Lorsqu'on considère l'ensemble des connaissances travaillées par les élèves en terminale S (Tension, intensité, condensateur, bobine, résistance…), les élèves faibles en électricité qui progressent le plus sont ceux du groupe d'utilisation moyenne (G2) à court terme ; à moyen-terme, ce sont les élèves des groupes d'utilisation moyenne ou forte qui progressent le plus. Ainsi, l'utilisation de l'artefact semble aider les élèves faibles à progresser de façon plus durable. Ces résultats ne sont pas significatifs au seuil de 5 %.

9.1.5.3. Comparaison de l'évolution des élèves les plus forts en fonction du degré d'utilisation

L'utilisation de l'artefact dans la classe devrait aider les élèves les plus forts à progresser sur les notions d'électricité mises en jeu dans le programme de terminale S.

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons aux élèves les plus forts. Ceux-ci sont également déterminés par rapport à la médiane des scores au questionnaire avant enseignement E_0 pour chaque groupe d'utilisation. Les élèves les plus forts sont ceux dont les résultats au questionnaire d'électricité avant enseignement E_0 se trouvent au-dessus de la médiane.
Nous notons Gx/+ le groupe x avec le profil d'élèves les plus forts. Nous obtenons les résultats suivants (tableau 53).

Moyenne	G1/+	G2/+	G3/+	p
Moyenne ($E_1 - E_0$)	-1,13	-0,51	-0,0024	0,1854*
Moyenne ($E_2 - E_0$)	-1,26	0,17	0,65	0,0476

Tableau 53 : Moyenne de l'évolution des élèves forts entre avant et après enseignement court-terme ou avant et après enseignement moyen-terme selon le groupe d'utilisation

** : Non significatif*

Les résultats montrent que les élèves les plus forts ont tendance à avoir une note moins élevée après

enseignement qu'avant enseignement (valeur négative de la moyenne). En effet, les notions abordées dans les questionnaires après enseignement étant du niveau de terminale S, alors que celles du questionnaire avant enseignement sont du niveau collège, nous pouvons concevoir que le taux de réussite au questionnaire après enseignement soit inférieur à celui avant enseignement.
Par ailleurs, nous constatons que la valeur de p, obtenue grâce à une ANOVA, est supérieure à 0,05 pour le questionnaire court-terme, donc la différence entre groupe n'est pas significative. Pour le questionnaire moyen-terme, les groupes d'utilisation moyenne et importante ont progressé , ce qui n'est pas le cas pour le groupe de faible utilisation. De plus la différence entre les moyennes est significative, $p<0,05$.

9.1.5.4. Conclusion partielle sur l'évolution des élèves les plus forts :

Cette étude sur les élèves forts montre une tendance selon laquelle plus l'artefact est utilisé, plus les élèves forts progressent lorsque l'on considère l'ensemble des connaissances travaillées par les élèves en terminale S (tension, intensité, condensateur, bobine, résistance...). Ces résultats ne sont pas significatifs au seuil de 5 %.

9.1.6. Comparaison de l'évolution des conceptions en fonction des groupes d'utilisation

Dans ce paragraphe, nous cherchons à savoir s'il y a une corrélation entre le degré d'utilisation de l'artefact et le dépassement par les élèves de chacune des conceptions testées dans le questionnaire.

9.1.6.1. « Usure du courant »

Dans l'artefact, la vitesse de la ficelle avant et après un récepteur reste identique, ce qui permet de visualiser que l'intensité est la même avant et après un récepteur (conservation de la quantité de courant). Concernant l'usure du courant, bien que cela ne soit pas un objectif d'enseignement inscrit dans les programmes, nous pouvons supposer que plus les enseignants utiliseront l'analogie mécanique, plus les élèves dépasseront la conception de l'usure du courant.
Nous reprenons les tableaux 7 et 8 pour la suite de notre travail.

<u>Pourcentage d'évolution de chaque groupe d'utilisation pour la conception « usure du courant »</u>
Dans ce paragraphe, nous souhaitons connaître, selon le groupe d'utilisation de l'artefact, la façon dont les élèves progressent à propos de la conception de l'usure du courant en comparant leur score avant et après enseignement à court-terme puis avant et après enseignement à moyen-terme. Pour étudier cette progression, nous pouvons déterminer le pourcentage d'évolution de mauvaises réponses dues à la conception, le pourcentage d'évolution des autres mauvaises réponses et le pourcentage de bonnes réponses. Un regard croisé sur ces trois pourcentages nous donnera une information précise sur l'évolution des élèves au sein d'un même groupe.
Le niveau de départ étant très différents des élèves, nous comparons les résultats des élèves par rapport à leur niveau de départ sur les questions visant la conception usure du courant. Le niveau de départ est déterminé par le nombre de réponses justes aux questions mobilisant la conception mise en jeu.
Les tableaux 54 à 66 présentent l'évolution des réponses des élèves sur la conception « usure du courant » selon le groupe d'utilisation. Trois types de réponses sont considérées : les réponses fausses avec la manifestation de la conception de l'usure du courant, les réponses fausses autres que

celles avec la manifestation de la conception et les réponses justes. Pour chaque groupe d'utilisation, le nombre de réponses et le pourcentage associé sont indiqués pour les trois types de réponses. Ce pourcentage dépend du nombre d'élèves et du nombre de questions mettant en jeu la conception. Pour cette raison, nous avons pris soin de préciser ces éléments dans les trois tableaux. La dernière ligne des trois tableaux présente le pourcentage d'évolution. Celui-ci a été obtenu à partir des pourcentage de réponses avec la formule :

$$Pourcentage\ d'\ évolution = \frac{Pourcentage\ de\ réponse\ pour\ E_1 - Pourcentage\ de\ réponse\ pour\ E_0}{Pourcentage\ de\ réponse\ pour\ E_0} * 100$$

Ainsi, pour une réponse fausse exprimant la conception, si le pourcentage d'évolution est négatif, cela veut dire que les élèves font moins d'erreurs sur cette conception.
Dans le cas d'une réponse juste, le groupe sera considéré meilleur si le pourcentage est le plus élevé positivement.
L'évolution du taux de réponses fausses exprimant une conception est considérée comme un indicateur de la déstabilisation d'une conception, sans forcément qu'une conception alternative soit mise en place. L'évolution du taux de réponses justes est quant à lui un indicateur de l'évolution de la construction de nouveaux raisonnements permettant d'aboutir à la bonne réponse.

Questions d'électricité sur l'usure du courant	G1 – 47 élèves (2 classes)					
	Fausse avec conception		Fausse		Juste	
	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse
E_0 avec 5 questions	77	33%	40	17%	118	50%
E_1 avec 3 questions	59	42%	25	18%	57	40%
% évolution E_0 à E_1	28%		4%		-19%	

Tableau 54 : Evolution des réponses sur l'usure du courant entre E_0 et E_1 pour le groupe G1

Nous constatons que, après enseignement, pour le groupe d'utilisation faible (G1) les élèves font plus d'erreurs avec la manifestation de la conception à court-terme qu'avant enseignement (entre les questionnaires E_0 et E_1, tableau 54), Par ailleurs, le pourcentage d'évolution pour les réponses justes est négatif, donc moins d'élèves répondent correctement aux questions mettant en œuvre cette conception.

Questions d'électricité sur l'usure du courant	G1 – 32 élèves (1 classe)					
	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse
	Fausse et due à la conception		Fausse et non due à la conception		Juste	
E_0 avec 5 questions	58	36%	21	13%	81	51%
E_2 avec 2 questions	15	23%	16	25%	33	52%
% évolution E_0 à E_2	-35%		90%		2%	

Tableau 55 : Evolution des réponses sur l'usure du courant entre E_0 et E_2 pour le groupe G1

Entre les moments de passation des questionnaires E_0 et E_2 (tableau 55), nous constatons que les élèves ont progressé. En effet, le pourcentage d'évolution pour les réponses fausses dues à la conception est négatif donc moins d'élèves font d'erreur et le pourcentage d'évolution des réponses justes montre que quelques élèves ont progressé.

Questions d'électricité sur l'usure du courant	G2 – 43 élèves					
	Fausse avec conception		Fausse		Juste	
	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse
E_0 avec 5 questions	122	57%	24	11%	69	32%
E_1 avec 3 questions	52	40%	31	24%	46	36%
% évolution E_0 à E_1	-29%		115%		11%	

Tableau 56 : Evolution des réponses sur l'usure du courant entre E_0 et E_1 pour le groupe G2

Entre les questionnaires E_0 et E_1 (tableau 56), les élèves dont les enseignants ont effectué une utilisation moyenne de l'artefact (G2), progressent entre le questionnaire avant enseignement et le questionnaire après enseignement court-terme : le pourcentage d'évolution des réponses fausses dues à la conception montre que les élèves font moins d'erreurs de conception et le pourcentage d'évolution des réponses justes positif montre que plus d'élèves répondent correctement à ces questions visant l'usure du courant. En revanche, le pourcentage d'évolution de réponses fausses et non dues à la conception est également positif donc plus d'élèves répondent faux mais sans manifester la conception.

Questions d'électricité sur l'usure du courant	G2 – 43 élèves					
	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse
	Fausse et due à la conception		Fausse et non due à la conception		Juste	
E_0 avec 5 questions	122	57%	24	11%	69	32%
E_2 avec 2 questions	21	24%	20	23%	45	52%
% évolution E_0 à E_2	-57%		108%		63%	

Tableau 57 : Evolution des réponses sur l'usure du courant entre E_0 et E_2 pour le groupe G2

Le constat est le même à moyen-terme que celui à court-terme. En effet, entre les questionnaires E_0 et E_2 (tableau 57) : les élèves du groupe G2 obtiennent un pourcentage d'évolution des réponses fausses dues à la conception qui est négatif ici aussi qui montrent donc qu'ils font moins d'erreurs de conception, et un pourcentage de réponses justes positif qui montre qu'ils répondent correctement à ces questions qui visent la conception de l'usure du courant.

Questions d'électricité sur l'usure du courant	G3 – 41 élèves					
	Fausse avec conception		Fausse		Juste	
	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse
E_0 avec 5 questions	111	54%	22	11%	72	35%
E_1 avec 3 questions	55	45%	20	16%	48	39%
% évolution E_0 à E_1	-17%		52%		11%	

Tableau 58 : Evolution des réponses sur l'usure du courant entre E_0 et E_1 pour le groupe G3

Entre les questionnaires E_0 et E_1 (tableau 58), il apparaît que les élèves dont les enseignants ont effectué une utilisation importante de l'artefact (G3) ont également progressé : le pourcentage

d'évolution des réponses fausses dues à la conception est négatif donc les élèves font moins d'erreur de conception. Le pourcentage d'évolution des réponses justes est positif donc ils progressent et répondent correctement plus souvent.

Questions d'électricité sur l'usure du courant	G3 – 41 élèves					
	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse
	Fausse et due à la conception		Fausse et non due à la conception		Juste	
E_0 avec 5 questions	111	54%	22	11%	72	35%
E_2 avec 2 questions	23	28%	17	21%	42	51%
% évolution E_0 à E_2	-48%		93%		46%	

Tableau 59 : Evolution des réponses sur l'usure du courant entre E0 et E2 pour le groupe G3

Entre les questionnaires E_0 et E_2 (tableau 59), le constat est le même qu'après enseignement à court-terme (pour le questionnaire E_1) : le pourcentage est négatif pour les réponses fausses dues à la conception et positif pour les réponses justes.

Donc les élèves ont progressé dans les questionnaires après enseignement E_1 et E_2 que dans le questionnaire avant enseignement.

L'analyse des tableaux 54 à 59 pris séparément, montre que les groupes G2 et G3 (tableaux 56 et 59) évoluent de manière quasi similaire, mais différente de celle du groupe G1. Nous allons dans la suite comparer l'évolution des élèves en fonction du groupe d'utilisation (tableau 60).

Type de réponses	Fausses dues à la conception			Fausses			Justes		
Groupe d'utilisation	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
Pourcentage d'évolution entre E_0 et E_1	28%	-29%	17%	4%	115%	52%	-19%	11%	11%
Pourcentage d'évolution entre E_0 et E_2	-35%	-57%	-48%	90%	108%	96%	2%	63%	46%

Tableau 60 : Pourcentages d'évolution pour chaque type de réponse pour chaque groupe pour l'usure du courant

À partir des pourcentages d'évolution des réponses fausses avec la manifestation de la conception usure du courant, nous voyons que le groupe G2 (utilisation moyenne) est celui qui a les meilleurs résultats, le groupe G3 (utilisation importante) est légèrement moins performant et le groupe G1 (utilisation faible) a les résultats les moins bons (c'est le seul groupe qui présente un pourcentage positif, l'évolution se fait donc à l'inverse d'une amélioration).
Pour les réponses justes, c'est la même tendance, c'est-à-dire que le groupe G2 puis le groupe G3 sont plus performants que le groupe G1 et là encore seuls les groupes G2 et G3 ont une évolution positive (pourcentage positif) alors que le groupe G1 a régressé (pourcentage négatif).
Si les groupes G2 et G3 présentent des évolutions quasi équivalentes pour les réponses fausses dues à la conception et les réponses justes, pour les réponses fausses n'étant pas dues à la conception, il s'avère que le groupe G3 progresse plus que le groupe G2. En effet, le pourcentage d'évolution de réponses fausses étant plus élevé pour le groupe G2 que pour le groupe G3, on peut conclure que le

groupe G2 évolue moins que le groupe G3 sur ce point. Plus d'élèves ont vu leur conception déstabilisée dans le groupe G3 par rapport au groupe G2.

Conclusion partielle :

Une utilisation moyenne ou importante de l'artefact permet aux élèves de progresser sur la conception de l'usure du courant : ceux-ci sélectionnent moins souvent la réponse fausse due à la conception et sélectionnent plus souvent la réponse juste. De plus, plus l'utilisation de l'artefact est importante, plus la conception de l'usure du courant est déstabilisée. Malgré l'utilisation de l'artefact, les élèves dont les enseignants ont une utilisation moyenne ou forte de l'artefact, ont un pourcentage de bonne réponse d'environ seulement 50 % après enseignement concernant les questions relatives à l'usure du courant. Ce pourcentage peut donc être amélioré, et une des pistes de recherche consiste à accroître l'efficacité de l'utilisation de l'artefact analogique par les enseignants notamment avec l'aide d'un guide d'utilisation.

Significativité des différences d'évolution selon le groupe d'utilisation

L'étude menée précédemment avec les pourcentages d'évolution ne permet pas d'avoir des informations sur la significativité des résultats. De ce fait, dans le paragraphe ci-dessous, nous souhaitons déterminer si les évolutions des élèves selon leur groupe d'utilisation de l'artefact sont significativement différentes.

Pour réaliser cette analyse, pour chaque élève, nous déterminons :

- le nombre de réponses fausses n'exprimant pas la manifestation de la conception « usure du courant » dans E_0 et notée E_{0c} ; E_0 correspond au numéro du questionnaire, c la conception[18].
- le nombre de réponses justes aux questions visant la conception « usure du courant » dans le questionnaire E_0 et nous le notons E_{0j} ; E_0 correspond au numéro du questionnaire, j la réponse juste.
- le nombre de réponses fausses exprimant la manifestation de la conception « usure du courant » pour les questions visant cette conception dans le questionnaire E_1, nous notons cette valeur $E_{1c,u}$ alors que nous utilisons le code $E_{1j,u}$ .pour les réponses justes.
- nous calculons la moyenne de la différence de ces deux valeurs que nous notons : Moyenne($E_{1c,u} - E_{0c,u}$).

Nous procédons de même pour calculer la moyenne des différences des réponses entre les questionnaires E_0 et E_2 et nous notons cette moyenne : Moyenne($E_{2c,u} - E_{0c,u}$).

Les résultats sont consignés dans le tableau 61.

Ainsi, $E_{1j,u} - E_{0j,u}$ représente l'évolution du nombre de réponses justes concernant l'usure du courant entre le questionnaire après enseignement à court-terme et le questionnaire avant enseignement. Plus cette valeur est élevée, plus la progression de l'élève est importante. Moyenne($E_{1j,u} - E_{0j,u}$) représente la moyenne de cette évolution pour l'ensemble des élèves d'un même groupe d'utilisation.

$E_{1c,u} - E_{0c,u}$ représente l'évolution du nombre de réponses fausses liées à la conception concernant l'usure du courant entre le questionnaire après enseignement court-terme et le questionnaire avant enseignement. Moyenne($E_{1c,u} - E_{0c,u}$) représente la moyenne de cette évolution pour l'ensemble des élèves d'un même groupe d'utilisation.

$E_{2j,u} - E_{0j,u}$ représente l'évolution du nombre de réponse juste concernant l'usure du courant entre le questionnaire après enseignement à moyen-terme et le questionnaire avant enseignement. Plus cette valeur est élevée, plus la progression de l'élève est importante. Moyenne($E_{2j,u} - E_{0j,u}$) représente la moyenne de cette évolution pour l'ensemble des élèves d'un même groupe d'utilisation.

18 Nous préciserons le type de conception visée à la question à la suite du c et séparé par une virgule en indice par : u pour usure du courant, p pour la pile délivre toujours la même intensité et ui pour la confusion entre la tension et l'intensité.

$E_{2c,u} - E_{0c,u}$ représente l'évolution du nombre de réponses fausses liées à la conception concernant l'usure du courant entre le questionnaire après enseignement moyen-terme et le questionnaire avant enseignement. Moyenne($E_{2c,u} - E_{0c,u}$) représente la moyenne de cette évolution pour l'ensemble des élèves d'un même groupe d'utilisation.

		Usure du courant				
Ligne	Type de réponses	Moyenne	G1	G2	G3	p ANOVA
1	Juste	Moyenne ($E_{1j,u} - E_{0j,u}$)	-1,3 (B)	-0,52 (A)	-0,67 (AB)	0,0389
2		Moyenne ($E_{2j,u} - E_{0j,u}$)	-1,5 (B)	-0,49 (A)	-0,71 (A)	0,0165
3	Fausse due conception	Moyenne ($E_{1c,u} - E_{0c,u}$)	-0,38 (A)	-1,61 (B)	-1,3 (B)	0,0002
4		Moyenne ($E_{2c,u} - E_{0c,u}$)	-1,34 (A)	-2,33 (B)	-2,12 (B)	0,0150

Tableau 61 : Moyenne de l'évolution du nombre de réponses des élèves aux questions portant sur l'usure du courant en fonction des groupes d'utilisation de l'artefact

Dans le questionnaire E_0, cinq questions visaient la conception « usure du courant » alors que dans E_1 il y en a seulement trois et deux dans E_2 ce qui explique le signe négatif des moyennes. Nous pouvons constater que pour les réponses justes (lignes 1 et 2), le groupe G2 a la moyenne la moins négative donc il s'agit du groupe qui a le plus progressé entre E_0 et E_1 et entre E_0 et E_2, ensuite il s'agit du groupe G3 puis du groupe G1. Pour les réponses fausses dues à la conception (lignes 3 et 4), le groupe qui a le plus progressé sera le groupe qui aura la moyenne la plus négative. Dans notre cas, il s'agit ici encore du groupe G2, suivi du groupe G3 puis du groupe G1 pour l'évolution entre les questionnaires E_0 et E_1 ou entre E_0 et E_2.
Nous constatons, à partir du tableau 61, que tous les résultats par ligne sont significativement différents ($p<0,05$). À la suite de chaque moyenne obtenue, entre parenthèses, les lettres (A et B) précisent les groupes d'utilisation qui sont significativement différents : deux groupes ayant des lettres différentes ont des résultats significativement différents et deux groupes ayant des lettres identiques ont des résultats qui ne sont pas significativement différents.
Les groupes G2 et G3 ont des résultats proches et différents de G1 (moyenne des réponses justes à court terme E_1 et E_0). Entre E_0 et E_2 (ligne 2), lorsque l'on compare l'évolution de la moyenne des réponses justes, les groupes G2 et G3 ont des résultats proches mais significativement différents du groupe G1. De même, le groupe G1 a des résultats significativement différents des groupes G2 et G3 et les groupes G2 et G3 ont des résultats proches concernant l'évolution de la moyenne des réponses fausses dues à la conception entre E_0 et E_1 ou entre E_0 et E_2,.

Conclusion partielle :
Une utilisation moyenne ou importante de l'artefact permet aux élèves de dépasser la conception de l'usure du courant de manière significativement plus importante qu'avec une faible utilisation. L'évolution de la conception de l'usure du courant avec l'artefact ne nécessite malgré tout pas une utilisation très importante de l'artefact.

À quels élèves profite le plus le dispositif
Maintenant, nous souhaitons savoir, pour chaque groupe, si le degré d'utilisation de l'artefact profite à tous les élèves à court-terme et à moyen-terme, selon qu'ils soient en difficultés ou non sur une conception avant enseignement. Pour cela, nous réalisons une régression linéaire[19] sur tous les

19 Une étude telle que celle qui a été faite avec les groupes d'élèves faibles et forts définis par rapport à la médiane

couples de scores aux réponse fausses dues à la conception avant et après enseignement manifestant la même conception des élèves pour les questionnaires E_0 et E_1 dans un premier temps puis pour les couples de scores obtenus aux questionnaires E_0 et E_2 dans un second temps. À partir de la pente, nous pourrons déterminer le groupe qui progresse le plus et plus précisément de quelle façon les élèves, en difficulté ou en réussite sur une conception, évoluent. Nous pourrons observer plusieurs cas de figure :

- si la pente est positive et importante (illustration 6, alors les élèves progressent peu : les élèves qui manifestent beaucoup la conception avant enseignement, la manifestent encore beaucoup après enseignement ;

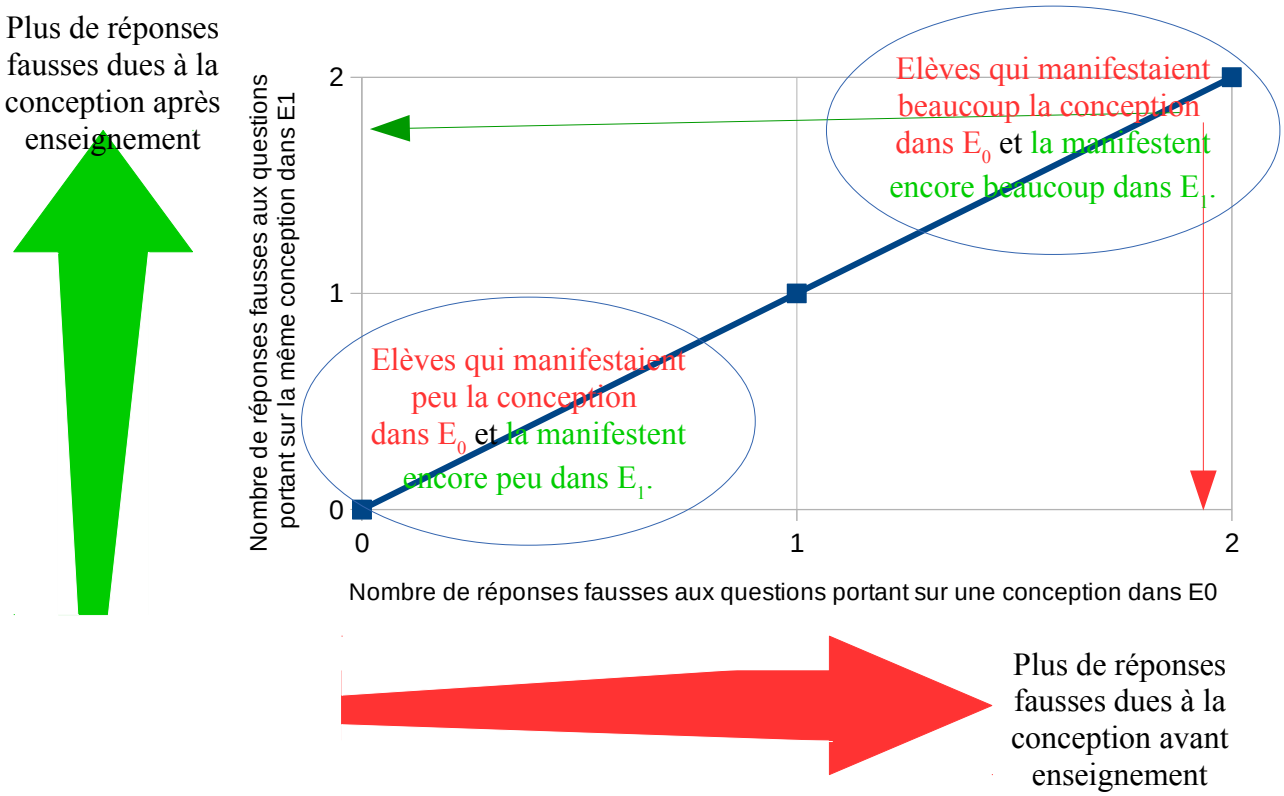


Illustration 6: Interprétation d'une pente positive obtenue lors une régression linéaire

- si la pente est négative (illustration 7), alors les élèves qui manifestaient peu la conception avant enseignement, la manifestent beaucoup après enseignement. Ainsi, dans ce cas de figure où la pente est négative, l'enseignement ne profite qu'aux élèves en difficulté sur la conception avant enseignement et défavoriserait les élèves en réussite sur cette conception avant enseignement.

n'est pas envisageable dans le cas présent sur les réponses fausses dues à la conception car les effectifs sont trop faibles, par ailleurs nous travaillons sur les réponses des élèves et non sur les moyennes donc un même élève pourrait être pris en compte deux fois.

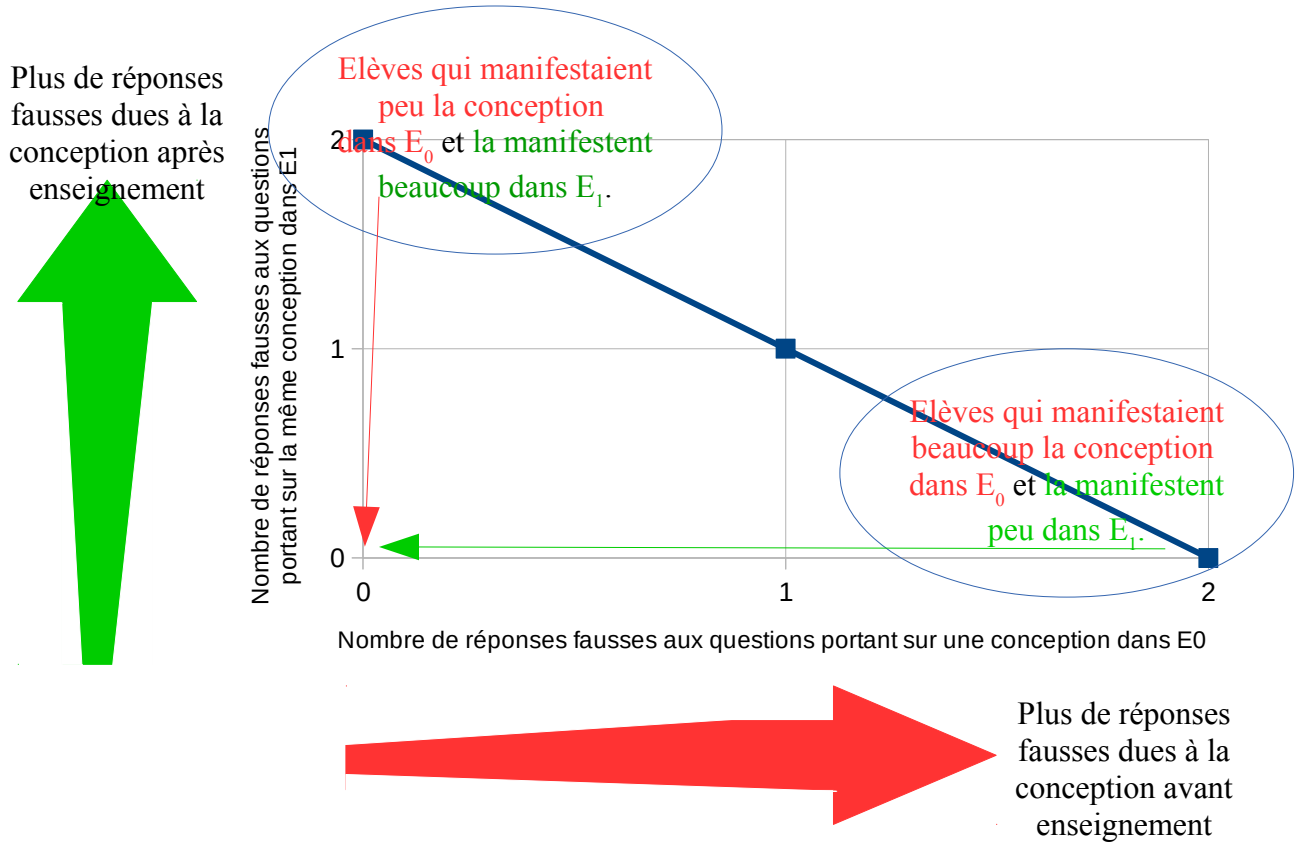


Illustration 7: Interprétation d'une pente négative obtenue lors une régression linéaire

- si la pente est horizontale, alors les élèves ayant des difficultés avant enseignement comme ceux n'en ayant pas ont tous le même niveau après enseignement. De plus, si la droite a une pente horizontale et est proche de l'axe des abscisses (illustration 8) alors les élèves qui manifestaient peu la conception avant enseignement la manifestent encore peu après et les élèves qui la manifestaient beaucoup avant enseignement, la manifestent peu après enseignement. Dans ce cas de figure d'une pente horizontale, l'artefact a un effet positif sur les élèves faibles, les élèves qui réussissaient sur la conception avant enseignement continuent de réussir et ceux qui ne réussissaient pas avant enseignement réussissent après enseignement.

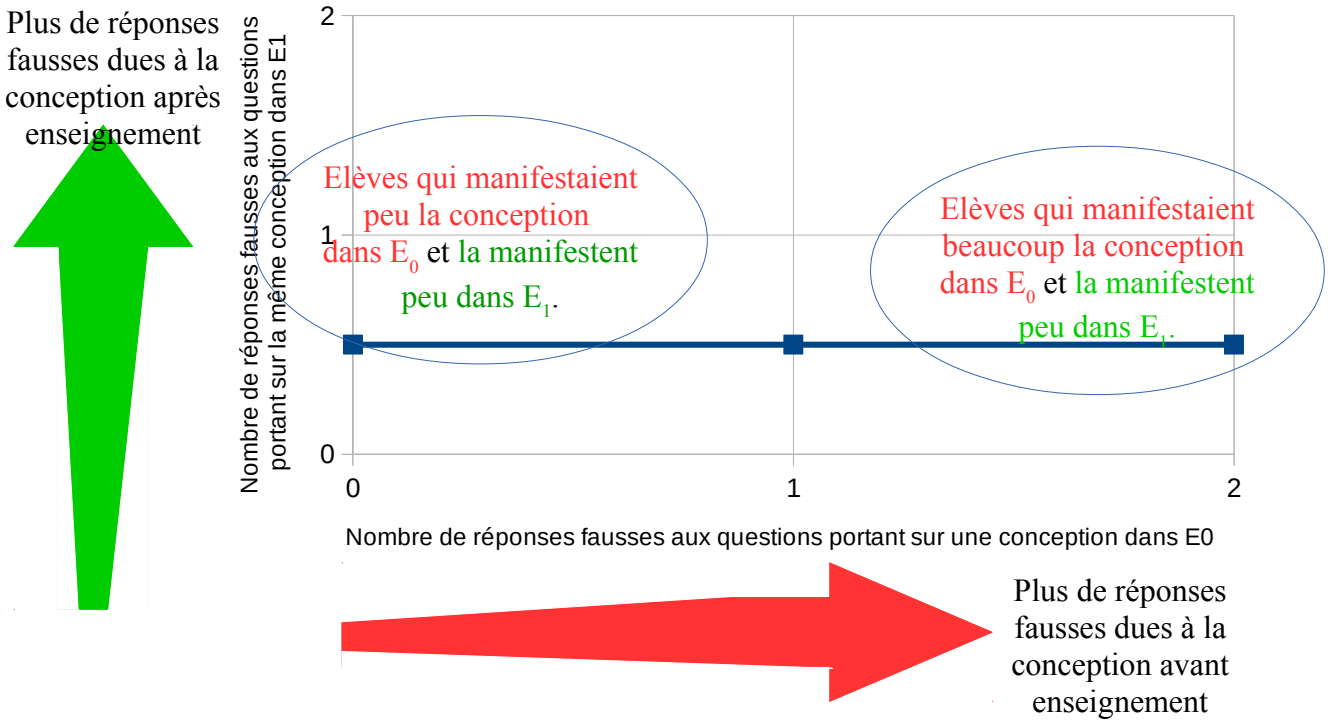
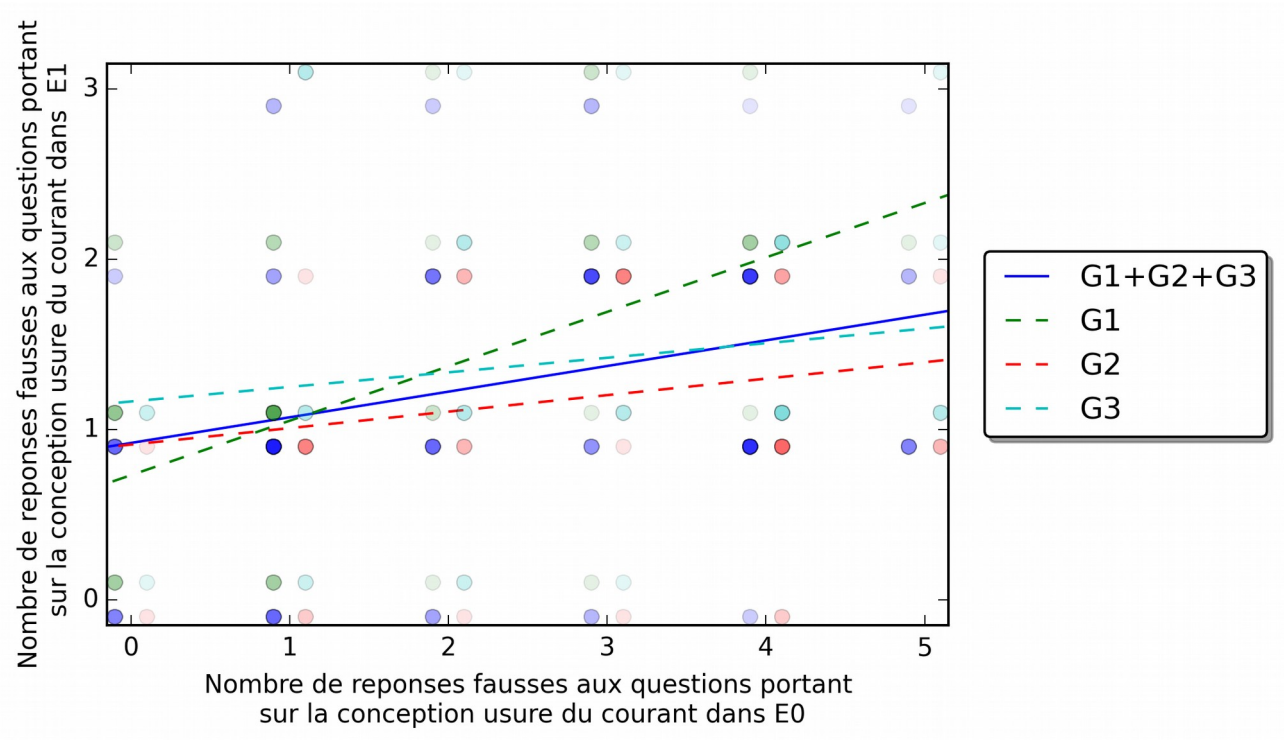


Illustration 8: Interprétation d'une pente nulle proche de l'axe des abscisses obtenue lors une régression linéaire

Donc, le groupe d'utilisation qui progresse le plus est celui pour lequel la pente est au plus proche de l'horizontale (et positive) et pour lequel les points fortement colorés se situent en bas à droite et en bas à gauche. Dans ce cas précis, cela signifie que les élèves en difficulté sur la conception le sont moins après enseignement avec l'artefact et ceux qui ne l'étaient pas ou peu ne le sont pas davantage.

Chaque couleur correspond à un groupe d'utilisation (G1, G2, G3, G1+G2+G3). Le code couleur utilisé pour les points positionnés à chaque couple d'abscisse et d'ordonnée est le même que celui utilisé pour la droite obtenue par régression.
Les points représentent un élève ou un groupe d'élèves ayant par exemple x réponses fausses à E_0 et y réponses justes à E_1. Nous avons choisi décaler les points représentant les élèves de G1, G2, G3, G1+G2+G3 et de les présenter sous la forme de quatre cercles positionnés en forme de carré. Enfin, plus la couleur du point est intense, plus le nombre d'élèves appartenant à ce couple de points est important.



Graphique 1 : Évolution des réponses fausses dues à la conception pour l'usure du courant entre avant enseignement E_0 et après enseignement court-terme E_1 en fonction du degré d'utilisation de l'artefact

- Régression linéaire sur la totalité des réponses, tous les groupes confondus
- Régression linéaire sur la totalité des réponses du groupe G1
- Régression linéaire sur la totalité des réponses du groupe G2
- Régression linéaire sur la totalité des réponses du groupe G3

Les droites des groupes G2 et G3 ont des pentes sensiblement équivalentes donc leur progression est quasiment équivalente. Le groupe d'utilisation faible (G1) est le groupe pour lequel les élèves en difficulté progressent le moins, la pente est fortement positive. Les élèves de ce groupe G1 qui faisaient peu d'erreur avant enseignement en font peu après enseignement, en revanche, ceux qui faisaient beaucoup d'erreurs avant enseignement en font encore beaucoup après enseignement à court-terme.

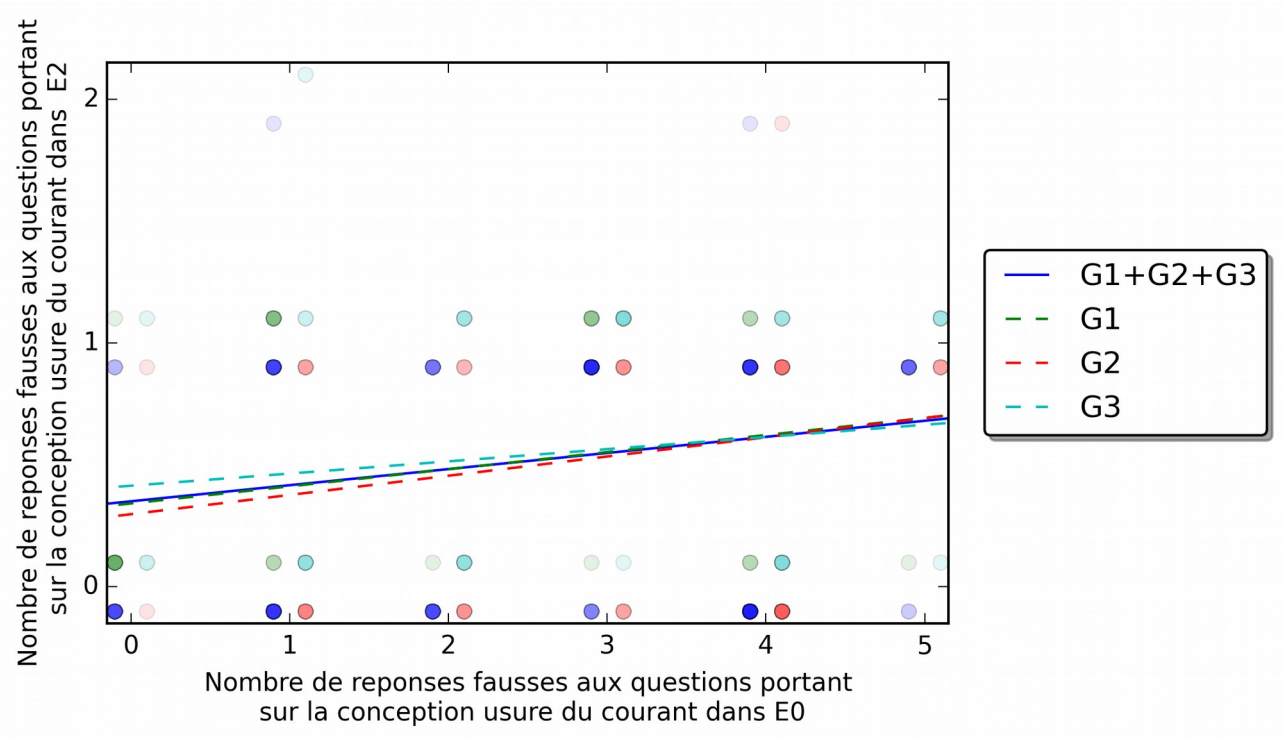
Les valeurs de p obtenues après la régression linéaire (tableau 62), nous permettent de dire que pour l'ensemble des élèves (G1 + G2 + G3) et pour le groupe G1, les droites sont significativement différentes d'une droite horizontale. Cela signifie alors que pour le groupe G1, l'évolution des élèves après enseignement est faible, leurs erreurs faites dans le questionnaire E_0 sur les questions visant l'usure du courant perdurent après enseignement. A l'inverse pour les groupes G2 et G3, les valeurs de p obtenues montrent que la droite obtenue par régression linéaire est proche d'une droite horizontale et donc que les élèves les plus en difficulté progressent[20].

20 Nous pouvons dire que les élèves ont progressé plutôt que mieux réussi car les questionnaires après enseignement sont de difficulté plus élevée que celui avant enseignement.

Usure du courant E0 E1	
Groupe	p
G1 + G2 + G3	0.0011
G1	0.0002
G2	0.1890
G3	0.3617

Tableau 62 : Valeur du p de corrélation pour chaque groupe d'utilisation pour l'évolution de E_0 à E_1

Nous pouvons mener la même analyse entre les scores aux questionnaires E_0 et E_2 (à moyen-terme) pour la conception de l'usure du courant.



Graphique 2 : Évolution des réponses fausses dues à la conception pour l'usure du courant entre avant enseignement E_0 et après enseignement moyen-terme E_2 en fonction du degré d'utilisation de l'artefact

Nous constatons avec ce graphique que les trois groupes ont des profils relativement proches. En revanche, le groupe G3 (en pointillé cyan) est celui pour lequel les élèves qui faisaient beaucoup de d'erreurs sur la conception usure du courant au questionnaire avant enseignement en font le moins après enseignement. Ainsi, à moyen-terme il apparaît que le groupe G3 est celui qui réussit le mieux. Nous constatons également que peu d'élèves font beaucoup d'erreurs sur cette conception après enseignement à moyen-terme, les points sont faiblement colorés sur la partie haute du graphique.

Les valeurs de p sont supérieures à 0,05 (tableau 63) donc les résultats des élèves des trois groupes d'utilisation de l'artefact sur le questionnaire E_0 et ceux sur le questionnaire E_2 ne sont pas corrélés, c'est-à-dire qu'un élève qui réussit avant enseignement ne réussit pas nécessairement après enseignement et inversement.

Usure du courant E0 E2	
Groupe	p
G1 + G2 + G3	0.0328
G1	0.2132
G2	0.1542
G3	0.3864

Tableau 63 : Valeur du p de corrélation pour chaque groupe d'utilisation pour l'évolution de E_0 à E_2

Conclusion partielle :

L'artefact profite à tous les élèves en difficulté sur la conception de l'usure du courant dans le cas des groupes d'utilisation moyenne et forte à court-terme et moyen-terme. Dans le cas du groupe d'utilisation faible, il n'y a pas d'évolution notable pour les élèves en difficulté sur cette conception à court-terme et une évolution positive à moyen-terme (pour une des deux classes seulement du groupe qui a fait le questionnaire moyen-terme).

9.1.6.2. Conclusion sur la conception « usure du courant » :

Les groupes d'utilisation moyenne (G2) et forte (G3) sont les deux groupes qui progressent le plus dans leur ensemble mais aussi plus particulièrement les élèves en difficulté sur la conception. Le groupe d'utilisation faible (G1) ne progresse pas à court-terme malgré l'enseignement et les résultats sont légèrement meilleurs à moyen-terme. Pour les élèves faibles sur cette conception de ce groupe d'utilisation faible, il y a une amélioration à moyen-terme mais pas d'amélioration notable à court-terme.

9.1.6.3. Confusion tension/intensité

Comme nous l'avons fait pour l'usure du courant, dans ce paragraphe, nous nous intéressons à la confusion entre la tension et l'intensité. Si l'utilisation de l'artefact permet de mieux différencier les concepts de tension et d'intensité indépendamment des tâches proposées par les enseignants, alors nous devrions observer une corrélation entre le niveau d'utilisation de l'artefact et la réussite des élèves aux questions portant sur la confusion entre la tension et l'intensité.

Dans la suite, nous réalisons les mêmes analyses que celles menées pour la conception de l'usure du courant, mais en étudiant les fréquences de réponses aux questions qui visent la confusion entre la tension et l'intensité.
Les tableaux 9 et 10 page 48 récapitulent les questions des cinq questionnaires qui interrogent les élèves sur la notion de tension électrique ou sur la notion d'intensité du courant électrique dont la réponse met en jeu la confusion entre la tension et l'intensité.

Pourcentage d'évolution de chaque groupe d'utilisation pour la conception « confusion tension/l'intensité »

Dans ce paragraphe, nous souhaitons savoir, selon le groupe d'utilisation de l'artefact, la façon dont les élèves progressent (comparaison avant enseignement et après enseignement court-terme et avant enseignement et après enseignement moyen-terme) sur la confusion entre la tension et l'intensité.

Pour cela, comme nous l'avons fait pour l'usure du courant, nous déterminons le pourcentage d'évolution de mauvaises réponses dues à la conception, le pourcentage d'évolution des autres mauvaises réponses (autres que celles dues à la manifestation de la conception) et le pourcentage de bonnes réponses. Un regard croisé sur ces trois pourcentages nous donnera une information sur l'évolution des élèves au sein d'un même groupe.

Les tableaux 64 à 68 présentent l'évolution des réponses des élèves aux questions portant sur la confusion entre la tension et l'intensité selon le groupe d'utilisation.
Pour établir les pourcentages de la dernière ligne, nous avons procédé de la même façon que pour la conception précédente :

$$Pourcentage\ d'\ évolution = \frac{Pourcentage\ de\ réponse\ pour\ E_1 - Pourcentage\ de\ réponse\ pour\ E_0}{Pourcentage\ de\ réponse\ pour\ E_0} * 100$$

Ainsi l'interprétation est similaire.

Questions d'électricité sur confusion Tension/ Intensité	G1 – 49 élèves					
	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse
	Fausse et due à la conception		Fausse et non due à la conception		Juste	
E_0 avec 2 questions	45	46%	20	20%	33	34%
E_1 avec 4 questions	74	38%	43	22%	79	40%
% évolution E_0 à E_1	-18%		7%		20%	

Tableau 64 : Evolution des réponses sur la confusion entre la tension et l'intensité entre E_0 et E_1 pour le groupe G1

Questions d'électricité sur confusion Tension/ Intensité	G1 – 33 élèves					
	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse
	Fausse et due à la conception		Fausse et non due à la conception		Juste	
E_0 avec 2 questions	33	50%	14	21%	19	29%
E_2 avec 1 question	2	6%	18	55%	13	39%
% évolution E_0 à E_2	-88%		157%		37%	

Tableau 65 : Evolution des réponses sur la confusion entre la tension et l'intensité entre E_0 et E_2 pour le groupe G1

Pour le groupe d'utilisation faible (G1), nous constatons (tableaux 64 et 65) que les élèves réussissent mieux après enseignement court-terme qu'avant enseignement et encore mieux à moyen-terme. En effet, le pourcentage d'évolution pour les réponses fausses dues à la conception est négatif donc les élèves sélectionnent moins ce type de réponse. De plus pour les réponses justes, le pourcentage d'évolution est positif donc les élèves sélectionnent plus la bonne réponse après enseignement qu'avant enseignement. En revanche, pour les réponses fausses (non dues à la conception), le pourcentage d'évolution est positif, ce qui ne montre pas une évolution positive et il est plus élevé à moyen-terme qu'à court-terme ; les élèves ne font plus d'erreurs sur la conception en elle-même mais ils ne répondent pas juste pour autant. Nous considérons dans ce cas que la conception est en cours de construction pour ces élèves.

Questions d'électricité sur confusion Tension/ Intensité	G2 – 42 élèves					
	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse
	Fausse et due à la conception		Fausse et non due à la conception		Juste	
E_0 avec 2 questions	51	61%	11	13%	22	26%
E_1 avec 4 questions	61	36%	40	24%	67	40%
% évolution E_0 à E_1	-40%		82%		52%	

Tableau 66 : Evolution des réponses sur la confusion entre la tension et l'intensité entre E_0 et E_1 pour le groupe G2

Pour le groupe d'utilisation moyenne de l'artefact (G2), nous constatons que les élèves réussissent mieux après enseignement court-terme (tableau 66) qu'avant enseignement. En effet, le pourcentage est négatif pour les réponses fausses dues à la conception et le pourcentage est positif pour les réponses justes. Par ailleurs, le pourcentage d'évolution des réponses fausses non dues à la conception est positif à court-terme, les élèves font donc encore des erreurs. La conception est déstabilisée, mais la connaissance relative à la différenciation entre tension et intensité n'est pas véritablement construite.

Questions d'électricité sur confusion Tension/ Intensité	G2 – 42 élèves					
	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse
	Fausse et due à la conception		Fausse et non due à la conception		Juste	
E_0 avec 2 questions	51	61%	11	13%	22	26%
E_2 avec 1 question	1	2%	24	57%	17	40%
% évolution E_0 à E_2	-96%		336%		55%	

Tableau 67 : Evolution des réponses sur la confusion entre la tension et l'intensité entre E_0 et E_2 pour le groupe G2

Le constat que nous avons fait après enseignement à court-terme est le même après enseignement à moyen-terme. En effet, le pourcentage d'évolution entre E_0 et E_2 (tableau 67) est également négatif pour les réponses fausses dues à la conception, positif pour les réponses justes et positif pour les réponses fausses non dues à la conception. Donc les élèves ont progressé mais la différenciation entre la tension et l'intensité n'est pas construite.

Questions d'électricité sur confusion Tension/ Intensité	G3 – 41 élèves					
	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse
	Fausse et due à la conception		Fausse et non due à la conception		Juste	
E_0 avec 2 questions	48	59%	20	24%	15	18%
E_1 avec 4 questions	67	41%	53	32%	52	32%
% évolution E_0 à E_1	-30%		33%		73%	

Tableau 68 : Evolution des réponses sur la confusion entre la tension et l'intensité entre E_0 et E_1 pour le groupe G3

Pour le groupe d'utilisation importante de l'artefact (G3), nous constatons (tableau 68) que les élèves ont progressé, le pourcentage d'évolution des réponses fausses dues à la conception est négatif et

celui des réponses justes est positif.

Questions d'électricité sur confusion Tension/ Intensité	G3 – 41 élèves					
	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse
	Fausse et due à la conception		Fausse et non due à la conception		Juste	
E_0 avec 2 questions	48	59%	20	24%	15	18%
E_2 avec 1 question	1	2%	23	56%	17	41%
% évolution E_0 à E_2	-96%		130%		127%	

Tableau 69 : Evolution des réponses sur la confusion entre la tension et l'intensité entre E_0 et E_2 pour le groupe G3

Les résultats sont les mêmes après enseignement à court-terme et après enseignement à moyen-terme : le pourcentage d'évolution entre E_0 et E_2 (tableau 69) est négatif pour les réponses fausses dues à la conception, positif pour les réponses justes et positif pour les réponses fausses non dues à la conception. On peut noter cependant que le pourcentage d'évolution des réponses fausses non dues à la conception est positif et plus élevé à moyen-terme qu'à court-terme, donc les élèves n'ont pas stabilisé leurs connaissances sur ces deux grandeurs tension et intensité.

Nous cherchons maintenant le groupe qui progresse le plus à propos de la différenciation entre tension et intensité en comparant les pourcentages pour chaque type de réponses d'un groupe à un autre (tableau 70).

Type de réponses	Fausses dues à la conception			Fausses			Justes		
Groupe d'utilisation	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
Pourcentage d'évolution entre E_0 et E_1	-18%	-40%	-30%	7%	82%	33%	20%	52%	73%
Pourcentage d'évolution entre E_0 et E_2	-88%	-96%	-96%	157%	336%	130%	37%	55%	127%

Tableau 70 : Pourcentages d'évolution pour chaque type de réponse pour chaque groupe pour la confusion entre la tension et l'intensité

Nous constatons que les groupes G2 et G3 ont des résultats sensiblement identiques pour l'évolution des réponses fausses dues à la conception (-40 % et -96 % pour G2 et -30 % et -96 % pour G3) et légèrement meilleurs que le groupe G1 à court-terme comme à moyen-terme (-18 % et -88 % pour G1). Concernant les réponses justes, le groupe G3 est celui qui a la meilleure évolution (73 % et 127 %) devant le groupe G2 (52 % et 55 %), lui-même devant le groupe G1 (20 % et 37 %) à court-terme comme à moyen-terme. Pour les réponses fausses non dues à la conception, les trois groupes évoluent dans le même sens mais le groupe G3 est ici encore meilleur (33 % et 130 %) que le groupe G2 (82 % et 336 %) à court-terme et moyen-terme car le pourcentage positif est inférieur pour le groupe G3. Enfin le groupe G3 est certes inférieur au groupe G1 à court-terme (33 % pour G3 et 7 % pour G1) mais meilleur que le groupe G1 à moyen-terme (130 % pour G3 et 157 % pour G1).

9.1.6.4. Interprétation en lien avec l'utilisation de l'artefact

La seule classe du groupe G1 qui a rempli les questionnaires moyen-terme sont les élèves du Prof 5 qui n'a utilisé l'artefact que pour la tension et l'intensité et uniquement avec l'équivalent du

conducteur ohmique. Cela signifierait alors que la seule mention de la tension et de l'intensité avec le conducteur ohmique ne suffit pas aux élèves de terminale pour s'approprier ces deux notions dans des situations plus complexes, comme celle mobilisant la bobine et le condensateur.

Conclusion partielle :

Les résultats montrent la tendance suivante : Plus l'artefact est utilisé, moins les élèves confondent la tension et l'intensité que ce soit à court-terme ou à moyen-terme. Les résultats nous amènent également à considérer que la différenciation entre tension et intensité uniquement appliquée en cours à l'interrupteur et la résistance, ne permet pas aux élèves de transférer facilement cette connaissance sur d'autres dipôles (condensateur, bobine).

Significativité des différences d'évolution selon le groupe d'utilisation

Les résultats précédents nous donnent des tendances mais ne nous donnent pas d'information sur la significativité des résultats d'un groupe à l'autre.

Les résultats obtenus par une ANOVA sont présentés dans le tableau 71.

		Confusion Tension/Intensité				
Ligne	Type de réponses	Moyenne	G1	G2	G3	p ANOVA
1	Juste	Moyenne ($E_{1j,ui} - E_{0j,ui}$)	0,94 (A)	1,05 (A)	0,91 (A)	0,8106
2		Moyenne ($E_{2j,ui} - E_{0j,ui}$)	-0,18 (A)	-0,09 (A)	0,05 (A)	0,4515
3	Fausse due conception	Moyenne ($E_{1c,ui} - E_{0c,ui}$)	0,59 (A)	0,27 (A)	0,46 (A)	0,3495
4		Moyenne ($E_{2c,ui} - E_{0c,ui}$)	-0,93 (A)	-1,21 (A)	-1,14 (A)	0,2461

Tableau 71 :Moyenne de l'évolution du nombre de réponses des élèves aux questions portant sur la confusion entre la tension et l'intensité en fonction du groupe d'utilisation de l'artefact

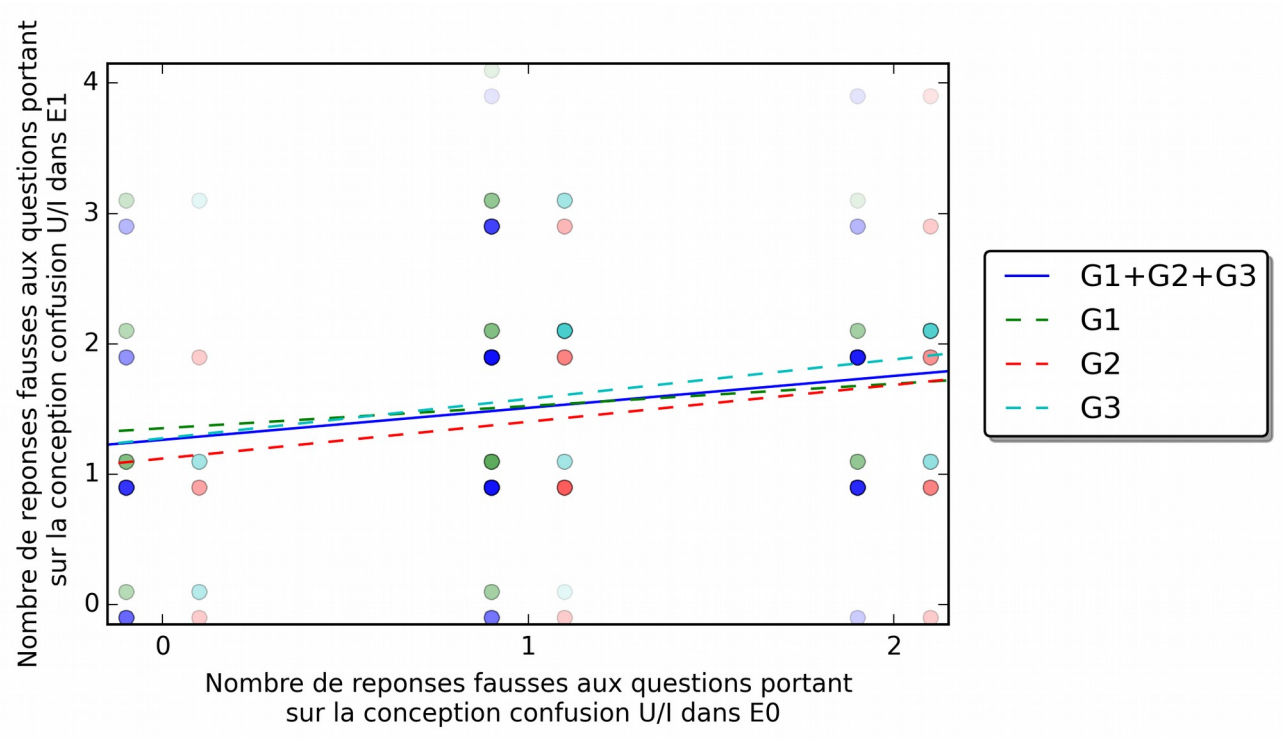
Dans le questionnaire E_0, deux questions visaient la conception « confusion entre la tension et l'intensité » alors qu'il y en a quatre dans E_1 et une dans E_2. Nous constatons, d'après les moyennes d'évolution des réponses justes (lignes 1 et 2) et des valeurs de p (toujours supérieures à 0,05), que, quel que soit le groupe d'utilisation, et à court-terme (questionnaire E_1 – ligne 1) ou à moyen-terme (questionnaire E_2 – ligne 2) les élèves ont progressé de façon similaire. Pour les réponses fausses dues à la conception, quel que soit le groupe d'utilisation, les moyennes d'évolution (lignes 3 et 4) sont sensiblement les mêmes à court-terme (ligne 3) comme à moyen-terme (ligne 4).

Conclusion partielle :

Le degré d'utilisation de l'artefact n'a pas d'impact significatif sur la différenciation de la tension et de l'intensité. Notons également que tous les enseignants ont travaillé avec leurs élèves cette différenciation entre tension et intensité, ce qui peut expliquer ce résultat, ce qui distingue l'utilisation des enseignants du groupe de faible utilisation des autres est qu'ils n'ont pas utilisé l'artefact pour tous les dipôles mécaniques.

À quels élèves profite le plus le dispositif ?

Comme pour la conception de l'usure du courant, nous nous intéressons maintenant aux élèves selon leurs difficultés sur la confusion entre la tension et l'intensité et nous regardons leur évolution à court-terme et à moyen-terme.



Graphique 3 : Évolution des réponses fausses dues à la conception « confusion entre tension et intensité » entre avant enseignement E_0 et après enseignement court-terme E_1 en fonction du degré d'utilisation de l'artefact

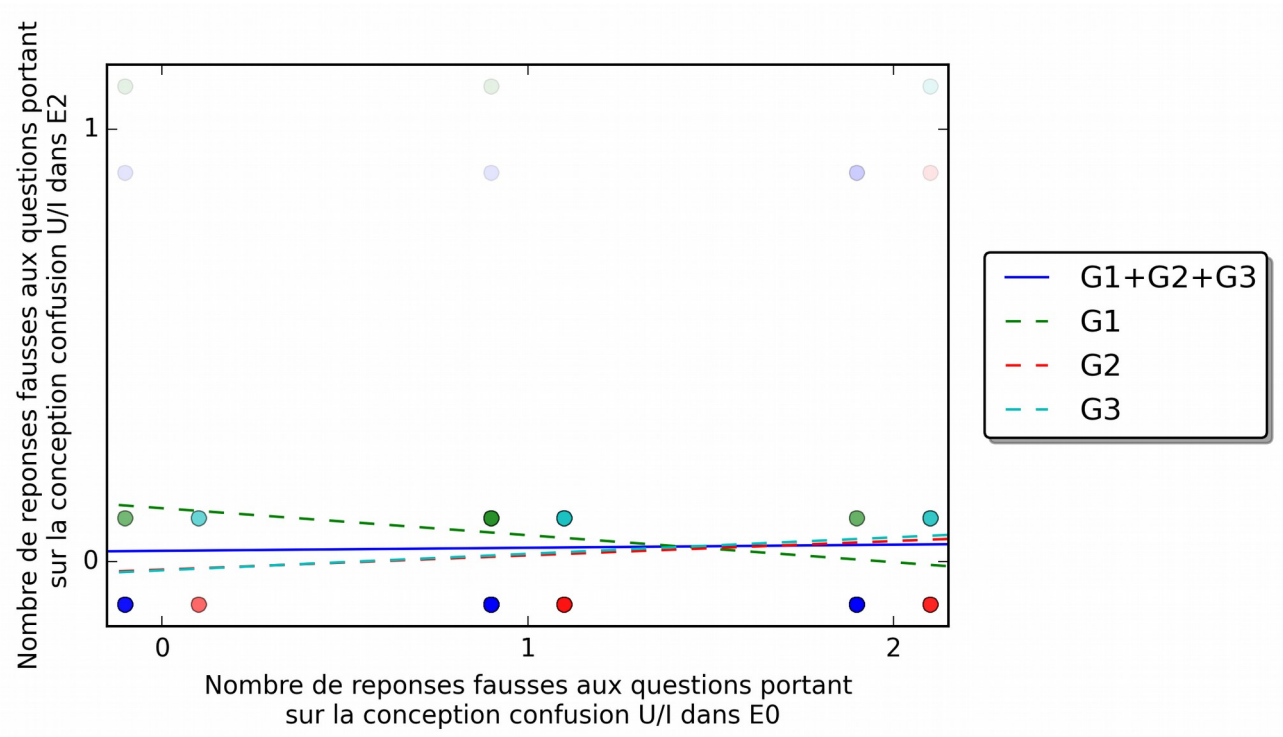
Quel que soit le degré d'utilisation de l'artefact, nous constatons que les résultats sont quasiment équivalents. En effet, les points sont plus colorés pour les paires (0;1) (1;1), (1;2), (1;3), (2;1) et (2;2) et ce quel que soit le groupe d'utilisation.
Nous constatons que les élèves du groupe G1 qui manifestaient peu la conception confusion entre tension et intensité avant enseignement, la manifestent plus après enseignement à court-terme que pour les autres groupes d'utilisation (points verts plus colorés sur la partie haute à gauche du graphique que pour les autres couleurs).
les élèves du groupe G2 qui réussissent avant enseignement réussissent encore à court-terme après enseignement (il n'y a pas de point coloré rouge sur la partie gauche haute du graphique), en revanche parmi ceux qui ne réussissaient pas avant enseignement certains ont progressé et réussissent à court-terme mais avec la présence des points colorés rouges sur la partie droite haute du graphique nous savons que certains sont encore en difficultés.
Les élèves du groupe G3 qui faisaient peu d'erreurs avant enseignement en font encore peu après enseignement (pas de point coloré cyan sur la partie gauche haute du graphique) et les élèves qui faisaient beaucoup d'erreurs sur cette conception en font peu après enseignement court-terme (peu de points colorés sur la partie droite haute du graphique).

Les valeurs de p dans le tableau 72 nous permettent de dire que les pentes correspondant aux trois groupes G1, G2 et G3 ne sont pas significativement différentes de l'horizontale. Autrement dit, les élèves en difficulté avant enseignement ne se distinguent pas significativement après enseignement des élèves ayant peu de difficulté.

Confusion U/I E0 E1	
Groupe	p
G1 + G2 + G3	0.0263
G1	0.4132
G2	0.1613
G3	0.0838

Tableau 72 :Valeur du p de corrélation pour chaque groupe d'utilisation pour l'évolution de E_0 à E_1

Nous pouvons mener la même analyse graphique pour la confusion entre tension et intensité pour les questionnaires E_0 (avant enseignement) et E_2 (après enseignement à long terme).



Graphique 4 : Évolution des réponses fausses dues à la conception « confusion entre tension et intensité » entre avant enseignement E_0 et après enseignement moyen-terme E_2 en fonction du degré d'utilisation de l'artefact

Le groupe G1 présente une pente négative donc les élèves qui faisaient peu d'erreurs avant enseignement auraient tendance à en faire après enseignement et ceux qui faisaient plus des erreurs avant enseignement en font peu après enseignement à moyen-terme.
Les groupes G2 et G3 ont des résultats similaires à moyen-terme. Pour ces deux groupes G2 et G3, il n'y a pas de point coloré rouge (G2) ou cyan (G3) pour les points (0;1) et (1:1), donc les élèves qui font peu d'erreurs avant enseignement en font encore peu après enseignement moyen-terme pour ces deux groupes. Et nous observons un point très légèrement coloré, donc peu d'élèves sont concernés, pour le point (2;1). La différence observable par rapport à l'analyse à court-terme pour cette conception, le groupe G3 est au même niveau que le groupe G2 qui était le meilleur. Les

élèves du groupe d'utilisation importante (G3) seraient donc au même niveau que ceux du groupe d'utilisation moyenne (G2).

Confusion U/I E0 E2	
Groupe	p
G1 + G2 + G3	0,7525
G1	0,3097
G2	0,2666
G3	0,2527

Tableau 73 :Valeur du p de corrélation pour chaque groupe d'utilisation pour l'évolution de E_0 à E_2

Conclusion partielle :
Les résultats permettent de dégager des tendances : pour le groupe d'utilisation faible, les élèves en difficultés sur la conception « confusion entre la tension et l'intensité » progressent. Lorsque l'utilisation est moyenne ou importante, les élèves progressent et ces effets sont également notables à moyen-terme pour les élèves qui faisaient beaucoup d'erreurs avant enseignement.

9.1.6.5. Conclusion sur la confusion entre tension et intensité électrique :

Plus l'artefact est utilisé, meilleure est l'évolution des élèves pour cette conception. Ainsi le groupe G3 évolue positivement et est meilleur que le groupe G2 lui-même meilleur que le groupe G1 mais cette différence d'évolution n'est pas significative entre les groupes. Ainsi les groupes d'utilisation moyenne (G2) et forte (G3) sont les deux groupes qui progressent le plus dans leur ensemble mais aussi plus particulièrement les élèves en difficultés sur la conception. Dans G2 et G3, les élèves qui réussissent avant enseignement ne régressent pas alors que ceux du groupe à faible utilisation régressent (G1). Sachant que tous les enseignants ont abordé la distinction entre tension et intensité avec l'analogie, nous pouvons interpréter l'absence de différence significative et avancer l'hypothèse que les élèves ne transfèrent pas cette distinction à l'ensemble des dipôles (condensateur et bobine).

9.1.6.6. « La pile délivre toujours la même intensité »

Dans ce paragraphe nous cherchons à savoir si, selon le groupe d'utilisation auquel ils appartiennent, les élèves évoluent différemment à propos de la conception selon laquelle « la pile délivre toujours la même intensité ». Comme l'artefact permet clairement de voir la variation de la vitesse de la corde selon les éléments disposés sur le cadre les élèves devraient, *a priori*, dépasser cette conception avec l'utilisation de l'artefact.

Dans la suite, nous réalisons les mêmes analyses que pour les conceptions « usure du courant » et « confusion entre tension et intensité », mais en étudiant les fréquences de réponses aux questions qui visent la conception « la pile délivre toujours la même intensité ».
Les tableaux 11 et 12 page 48 récapitulent les questions des cinq questionnaires qui interrogent les élèves sur cette conception. Aucune question du questionnaire E_2 ne vise cette conception. Ainsi les études suivantes ne porteront que sur l'évolution des résultats entre le questionnaire E_0 et le

questionnaire E_1.

Pourcentage d'évolution de chaque groupe d'utilisation pour la conception « confusion tension/l'intensité »

Dans un premier temps, l'analyse des pourcentages d'évolution nous donnera une indication sur le groupe qui réalise la meilleure évolution sur cette conception.

Les tableaux 74 à 76 présentent l'évolution pour chaque groupe d'utilisation sur la conception « la pile délivre toujours la même intensité ».

Questions d'électricité sur la pile délivre toujours la même intensité	G1 – 47 élèves (2 classes)					
	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse
	Fausse et due à la conception		Fausse et non due à la conception		Juste	
E_0 avec 3 questions	61	43%	21	15%	59	42%
E_1 avec 4 questions	34	18%	124	66%	30	16%
% évolution E_0 à E_1	-58%		343%		-62%	

Tableau 74 : Evolution des réponses sur « la pile délivre toujours la même intensité » entre E_0 et E_1 pour le groupe G1

Pour le groupe d'utilisation faible (G1), nous constatons (tableau 74) que les élèves ont progressé car le pourcentage d'évolution des réponses fausses dues à la conception est négatif donc ils sélectionnent moins ce type de réponses fausses après enseignement court-terme. En revanche, ils ne répondent pas juste pour autant, le pourcentage d'évolution des réponses justes est négatif aussi.

Questions d'électricité sur la pile délivre toujours la même intensité	G2 – 43 élèves					
	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse
	Fausse et due à la conception		Fausse et non due à la conception		Juste	
E_0 avec 3 questions	70	54%	13	10%	46	36%
E_1 avec 4 questions	48	28%	104	60%	20	12%
% évolution E_0 à E_1	-49%		500%		-67%	

Tableau 75 : Evolution des réponses sur « la pile délivre toujours la même intensité » entre E_0 et E_1 pour le groupe G2

Pour le groupe d'utilisation moyenne (G2), nous faisons le même constat (tableau 75) que pour le groupe d'utilisation faible : les élèves font moins d'erreurs de conception mais ne répondent pas juste pour autant à ces questions.

Questions d'électricité sur la pile délivre toujours la même intensité	G3 – 43 élèves					
	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse	Nombre de réponse	Pourcentage de réponse
	Fausse et due à la conception		Fausse et non due à la conception		Juste	
E_0 avec 3 questions	82	64%	12	9%	35	27%
E_1 avec 4 questions	59	34%	96	56%	17	10%
% évolution E_0 à E_1	-46%		500%		-64%	

Tableau 76: Evolution des réponses sur « la pile délivre toujours la même intensité » entre E_0 et E_1 pour le groupe G3

Pour le groupe d'utilisation importante (G3), ici encore (tableau 76), les pourcentages d'évolution pour les réponses fausses dues à la conception et pour les réponses justes sont négatifs. Les élèves font donc comme pour les deux autres groupes d'utilisation moins d'erreur de conception mais ne formulent pas la bonne réponse.

Après cette étude préalable des trois groupes pris individuellement , nous pouvons nous intéresser aux trois groupes et essayer de déterminer le groupe qui progresse le plus en comparant les résultats des tableaux 74 à 76 et regroupés dans le tableau 77.

Type de réponses	Fausses dues à la conception			Fausses			Justes		
Groupe d'utilisation	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
Pourcentage d'évolution entre E_0 et E_1	-58%	-49%	-46%	343%	500%	500%	-62%	-67%	-64%

Tableau 77 : Pourcentages d'évolution pour chaque type de réponse pour chaque groupe pour « la pile délivre toujours la même intensité »

Nous constatons que les résultats sont sensiblement les mêmes pour les trois groupes d'utilisation. En effet, pour les réponses fausses avec la manifestation de la conception, le pourcentage d'évolution est approximativement semblable pour tous les groupes d'utilisation puisqu'il se situe entre -58 % et -46 %.
Par ailleurs aucun des trois groupes n'a progressé sur les réponses justes puisque aucun ne présente une évolution positive (tous les pourcentages sont négatifs, -62 %, 67 % et -64 %).
Au vu des pourcentages d'évolution des réponses fausses autres que les réponses fausses dues à la conception, nous pouvons supposer que les élèves ont connaissance de cette conception mais ils n'ont pas assimilé la notion et donc la réponse correcte. Autrement dit, ces résultats semblent indiquer que s'ils ont appris que la pile ne débite pas toujours la même quantité de courant, ils ne savent pas comment elle se comporte.

Conclusion partielle :
Quel que soit le degré d'utilisation de l'artefact, on n'observe pas une évolution des bonnes réponses. Les élèves font moins d'erreurs fausses dues à la conception mais ne répondent pas correctement malgré tout à la question. Tout se passe comme si les conceptions des élèves étaient déstabilisée sans être correctement reconstruites.

Significativité des différences d'évolution selon le groupe d'utilisation

Les résultats obtenus grâce aux pourcentages d'évolution ne nous donnent pas d'information sur la significativité des résultats. Ainsi dans l'analyse suivante, nous nous proposons de regarder l'évolution des résultats des élèves pour les questions visant la conception « la pile délivre toujours la même intensité ». Pour cela nous faisons comme pour les deux conceptions précédentes, nous calculons les moyennes d'évolution des réponses des élèves aux questions visant cette conception entre E_0 et E_1.

Les résultats obtenus par une ANOVA sont présentés dans le tableau 78.

La pile délivre toujours la même intensité						
Ligne	Type de réponse	Moyenne	G1	G2	G3	p ANOVA
1	Juste	Moyenne ($E_{1j,p} – E_{0j,p}$)	-0,62 (A)	-0,6 (A)	-0,42 (A)	0,6103
2	Fausse due conception	Moyenne ($E_{1c,p} – E_{0c,p}$)	-0,57 (A)	-0,51 (A)	-0,53 (A)	0,9651

Tableau 78 : Moyenne de l'évolution du nombre de réponses des élèves aux questions portant sur « la pile délivre toujours la même intensité » en fonction des groupes d'utilisation de l'artefact

Les résultats obtenus montrent que les moyennes entre les groupes ne sont pas significativement différentes ($p > 0,05$). Ce résultat confirme nos observations établies à partir des pourcentages d'évolution obtenus dans les tableaux 74 à 76.

Pour le questionnaire E_0, trois questions visent cette conception alors que deux seulement la visent dans le questionnaire E_1.

Une moyenne d'évolution négative entre E_0 et E_1 pour les réponses justes (ligne 1) signifie que les élèves ont eu plus de réponses justes dans E_0 que dans E_1. Ainsi, plus la moyenne est élevée, plus les élèves ont progressé. Le groupe G3 fait la meilleure progression de réponse juste (-0,42), suivi des groupes G2 (-0,6) puis G1 (-0,62).

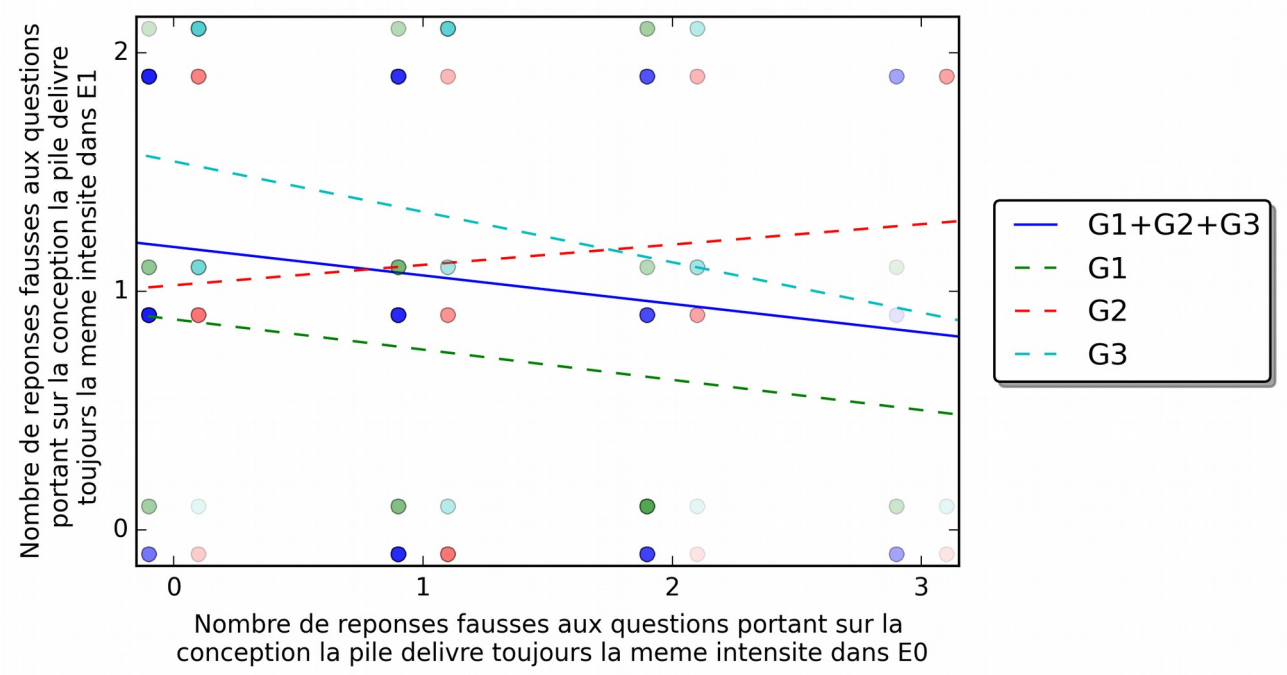
Pour les réponses fausses qui expriment la mise en œuvre de la conception (ligne 2), une moyenne faible signifie que les élèves ont peu manifesté la conception à E_1 et l'avaient beaucoup manifestée à E_0 donc ces élèves ont mieux réussi à se débarrasser de la conception. Au vu de la valeur de p (0,9651), les trois groupes d'utilisation ont des résultats équivalents pour l'évolution des réponses fausses dues à la conception.

Conclusion partielle :

Une utilisation importante de l'artefact aide davantage les élèves à répondre juste aux questions visant la conception « la pile délivre toujours la même intensité » sans que cette différence soit significative. En dehors de ce cas, quel que soit le groupe d'utilisation, les résultats sont sensiblement les mêmes.

À quels élèves profite le plus le dispositif ?

Enfin, nous nous intéressons à l'impact de l'utilisation de l'artefact sur les élèves selon leur niveau de difficulté face à la conception « la pile délivre toujours la même intensité ». Pour cela, comme nous l'avons fait précédemment, nous faisons une étude graphique des doublets de réponses liées à la conception formulées par les élèves aux questionnaires E_0 et E_1.



Graphique 5 : Évolution des réponses fausses dues à la conception « la pile délivre toujours la même intensité » entre avant enseignement E_0 et après enseignement court-terme E_1 en fonction du degré d'utilisation de l'artefact

Nous constatons que les groupes G1 et G3 ont des résultats similaires après enseignement à court-terme, avec des pentes de droite négatives. Les élèves qui faisaient peu d'erreur sur cette conception avant enseignement en font plus ou autant après enseignement (points vert et cyan fortement colorés pour les points (0;1), (0;2), (1;1) et (1;2) et les élèves qui faisaient beaucoup d'erreur avant enseignement en font moins que les bons élèves (qui ont fait peu d'erreur). Les valeurs de p obtenues dans le tableau 79 permettent de dire que les droites ne sont pas significativement différentes de l'horizontale et donc que les bons élèves n'augmentent pas leur performance et les élèves en difficulté progressent, dans les deux cas à court-terme.
Le groupe G2 a une pente de droite positive et la valeur de p obtenue dans le tableau 79 montre que la droite n'est pas significativement différente de l'horizontale. Ainsi, pour ce groupe d'utilisation, les élèves qui faisaient peu d'erreur sur cette conception avant enseignement en font toujours peu après enseignement et les élèves qui faisaient beaucoup d'erreurs en font moins.

La pile débite I cst	
Groupe	p
G1 + G2 + G3	0,1165
G1	0,3237
G2	0,4882
G3	0,1207

Tableau 79 : Valeur du p de corrélation pour chaque groupe d'utilisation pour l'évolution de E_0 à E_1

Conclusion partielle :
L'artefact permettrait aux élèves en difficulté sur la conception « la pile délivre toujours la même intensité » de progresser lorsque l'artefact est faiblement, moyennement ou fortement utilisé. Donc quelque soit le degré d'utilisation du dispositif les résultats sont identiques.

9.1.6.7. Conclusion sur l'impact du degré d'utilisation de l'artefact et les résultats des élèves sur la conception « la pile délivre toujours la même intensité » :

La réussite des élèves aux questions relatives à la conception « la pile délivre toujours la même intensité » ne dépend pas du degré d'utilisation de l'artefact.

9.1.6.8. Interprétation liée à l'utilisation de l'artefact

D'après les données recueillies concernant l'utilisation de l'artefact, rien ne nous permet de dire que les enseignants aient montré le fonctionnement de l'artefact avec un premier frein dans le circuit puis refait l'expérience en ajoutant un second frein ou un frein plus important pour pouvoir constater que la vitesse de la corde était plus faible et donc ainsi insister sur le fait que le générateur est un générateur de tension et non d'intensité. Un enseignement explicite avec l'artefact semble donc nécessaire à une modification de la conception de « la pile délivre toujours la même quantité de courant ». Dans ce cas, et contrairement à celui de l'usure du courant, une seule observation ne suffit pas puisqu'il est nécessaire de comparer deux observations. Pour cette raison un enseignement explicite est nécessaire puisque les seuls sens ne suffisent pas à travailler cette conception.

9.2. Analyse qualitative, à partir des entretiens, de l'évolution des élèves avec l'utilisation de l'artefact

Lors de plusieurs entretiens, les élèves ont spontanément indiqué ce que leur apportait l'analogie pour la compréhension des phénomènes ou des notions vues en électricité (tableaux 80 à 86), alors même qu'ils avaient déjà reçu un enseignement en électricité. Ces quelques extraits permettent de repérer de manière qualitative, le point de vue des élèves sur les compléments que peut apporter cet artefact à l'apprentissage de l'électricité.

Par exemple, un élève précise qu'avec l'analogie il comprend mieux ce qui se passe en électricité (tableau 80).

N°	Personne	Intervention
222	Interlocuteur 3	*Et vous, vous avez des questions ? Enfin, vous n'hésitez pas.*
223	Élève	*Non, mais du coup avec ça, on comprend mieux.*
224	Interlocuteur 3	*Tu comprends mieux ce qui se passe en électricité ?*
225	Élève	*Oui.*

Tableau 80 : Extrait de l'entretien 1 qui montre que l'artefact permet une meilleure compréhension de l'électricité en général.

D'autres élèves précisent que l'artefact étant plus visible, ils perçoivent mieux les phénomènes (tableaux 81 à 83). D'après les élèves, rendre visible ce qu'on ne peut pas voir dans le domaine cible

de manière à rendre plus compréhensible et concret les phénomènes est un des intérêts de cette analogie.

N°	Personne	Intervention
425	Élève	*Oui maintenant on visualise bien parce que quand le prof nous met ça mais en version électrique, on ne voit pas les mouvements ni ce qui se passe au niveau des fils ; maintenant on voit ce qui se passe.*
426	Interlocuteur 3	*Merci d'être venu, d'avoir pris une heure, j'espère que l'on vous aura aidé à mieux vous représenter euh…*
427	Élève	*Pour le coup, oui.*
428	Interlocuteur 3	*En fait, pour vous, vous pouvez aussi raisonner là-dessus si vous avez un exo ; alors ça ne vous fera pas les équations, mais à la fin, pour contrôler, enfin pour voir si le résultat est bon, vous pouvez vous appuyer là-dessus.*
429	Élève	*C'est plus facile à se mettre en tête ça que tout le reste en fait.*

Tableau 81 : Extrait de l'entretien 2 qui montre que l'analogie permet de rendre plus compréhensibles les phénomènes électriques de part l'aspect visible de l'artefact

Les sciences physiques étant une discipline expérimentale, elle présente l'avantage d'avoir des temps de classe en groupes avec un nombre d'élèves plus restreint. Ainsi, aux dires de cet élève, il semblerait plus intéressant de pouvoir manipuler l'artefact en étant peu nombreux, par exemple en groupe, ce qui permettrait ainsi des explications plus individualisées (tableau 82). Par ailleurs, en étant moins nombreux, les élèves auraient plus facilement la possibilité de manipuler l'artefact comme ces élèves ont pu le faire lors de l'entretien. De plus, l'élève explique qu'il se crée une représentation mentale de l'artefact, une image qui l'aide à raisonner et à prévoir.

N°	Personne	Intervention
345	Interlocuteur 3	*Est-ce que vous avez des questions ?*
346	Élève	*Je comprends mieux. Si j'avais une question comme ça au contrôle, je ferme les yeux et je vois…*
347	Interlocuteur 4	*Après, même au niveau des équations différentielles en fait, tu peux réfléchir, vérifier tes résultats d'équations différentielles en te posant la question au niveau de ce dispositif, est-ce que c'est cohérent entre le dispositif et ce que tu as écrit au niveau mathématique.*
348	Élève	*C'est pas mal de nous faire ça en petit bout, pas avec 34 élèves.*

Tableau 82 : Extrait de l'entretien 1 montrant que l'analogie permet de rendre plus compréhensibles les phénomènes électriques de part l'aspect visible de l'artefact

Un autre binôme d'élèves mentionne également l'aspect visible de l'artefact et précise son propos. En effet, il indique que l'analogie rend concrète la tension électrique (tableau 83). Jusque là, il semble que la tension était une notion abstraite et qu'il comprend mieux ce que représente la différence de potentiel qu'on lui expliquait avec l'analogie hydraulique. À ses propos, nous pouvons comprendre que cette notion n'était pas encore claire même avec l'analogie hydraulique.

N°	Personne	Intervention
415	Interlocuteur 3	*Est-ce que vous avez des questions ?*
416	Élève	*Non ; c'est vous qui avez eu l'idée de mettre ça en place ou pas ?*
417	Interlocuteur 3	*Oui.*
418	Élève	*C'est pas mal, moi j'aime bien.*
419	Interlocuteur 3	*Ça vous aide ?*
420	Élève	*Oui, surtout au niveau de la tension puisque c'est un peu une notion un peu abstraite que l'on nous apprend. On voit ce qui se passe là. On a toujours essayé de nous apprendre ce qu'était la différence de potentiel en faisant des cascades, des trucs comme ça. Là, maintenant c'est clair, c'est sûr.*

Tableau 83 : Extrait de l'entretien 2 montrant les facilités de compréhension de la notion de tension avec l'analogie mécanique

D'autres élèves s'accordent à dire qu'ils avaient des difficultés, avant l'entretien, à différencier la tension et l'intensité (tableau 84). Ils maîtrisaient les relations mathématiques mais ne s'étaient pas posés la question du sens physique. L'artefact leur a alors permis de lier mathématique et physique.

N°	Personne	Intervention
165	Interlocuteur 3	*Est-ce que pour l'instant, ça vous a éclairci sur des choses*
166	Élève 6	*Oui, surtout au niveau de la différenciation intensité/tension.*
167	Interlocuteur 3	*C'est plus clair ?*
168	Élève 6	*Oui.*
169	Élève 5	*Avec l'analogie c'est plus facile.*
170	Interlocuteur 3	*Vous aviez tendance à les confondre avant ?*
171	Élève 6	*On ne s'est jamais vraiment posé la question en fait.*
172	Élève 5	*Il y avait les formules mais après le côté concret on ne voyait pas trop.*

Tableau 84 : Extrait de l'entretien 3 montrant que les élèves maîtrisent les relations mathématiques mais pas nécessairement le sens physique

Une élève ne parvenait pas à expliquer les phénomènes physiques alors qu'elle avait répondu correctement dans le questionnaire avant l'entretien. Elle est incapable de répondre à une question posée lors de l'entretien (tableau 85) même avec des aides et explications.

N°	Personne	Intervention
178	Interlocuteur 1	*Élève 13 a toutes les bonnes réponses mais elle ne sait pas l'expliquer.*
179	Élève 13	*Oui mais là c'est un truc d'écrit donc ça va.*

Tableau 85 : Extrait de l'entretien 7 montrant qu'une élève ne maîtrise pas nécessairement le sens physique même si elle connaît des réponses

De la même façon, dans l'extrait suivant (tableau 86), l'élève indique qu'il se rappelle peut-être des courbes caractéristiques de la charge et décharge du condensateur mais qu'il ne les a pas forcément comprises et l'analogie mécanique lui permet de mieux se les approprier.

N°	Personne	Intervention
310	Interlocuteur 1	*Est-ce que ça va sur le condensateur ?*
311	Élève 11	*Oui condensateur il y avait beaucoup de choses à voir du coup là ça aide bien oui.*
312	Interlocuteur 1	*Oui donc on se rappelle quelques caractéristiques*
313	Élève 11	*Oui on s'en rappelle mais on ne les avait pas forcément comprises.*

Tableau 86 : Extrait de l'entretien 6

Enfin, l'artefact permet aux élèves de se corriger les uns les autres. Dans l'extrait de l'entretien présenté dans le tableau 87, l'élève 7 pense que l'intensité du courant n'est pas la même avant et après une résistance. C'est l'élève 8, en se référant à l'analogie, qui lui explique que si c'était effectivement ce qu'il pense alors la corde ne circulerait pas à la même vitesse avant et après le pince-corde. Ici, nous pouvons donc clairement noter que l'analogie, même si elle a été présentée brièvement (1 heure), permet aux élèves d'interroger la conception de l'usure du courant.

N°	Personne	Intervention
271	Élève 7	*Oui mais quand on a mis une résistance.*
272	Interlocuteur 1	*Là tu n'en as pas. Mais vas-y dis-moi.*
273	Élève 7	*La corde ça peut être considéré comme une résistance. Parce que sur la résistance c'est bien U=RI et sur le condensateur ce n'est pas la même formule. Si on met une résistance, juste avant le premier ampèremètre ; l'intensité ne sera pas la même que le deuxième.*
274	Interlocuteur 1	*Et si on met la résistance juste après l'ampèremètre ça va changer ?*
275	Élève 8	*non ça ne change pas*
276	Interlocuteur 1	*Et si on la met la résistance, est-ce que ça va changer ?*
277	Élève 7	*Là oui car c'est après le condensateur.*
278	Élève 8	*Si l'intensité n'était pas toujours la même dans le circuit, ça voudrait dire la corde tournerait d'un côté et pas de l'autre.*

Tableau 87 : Exemple d'un entretien mettant en avant la conception de l'usure du courant

Conclusion partielle:

Une étude qualitative de l'entretien montre que l'artefact a permis aux élèves, de dépasser des conceptions erronées en électricité (usure du courant, confusion entre tension et intensité), d'associer des phénomènes physiques aux relations mathématiques qui avaient été apprises dans le cadre du cours de physique.

Cet artefact a été introduit dans cette expérimentation dans des conditions d'enseignement privilégiées. En effet, les personnes qui menaient les entretiens maîtrisaient parfaitement l'analogie et les élèves étaient interrogés quasiment individuellement. Ils étaient donc dans des conditions optimales d'écoute et d'attention.

Chapitre 10.
Facteurs (nature et fréquence) influençant l'utilisation de l'analogie mécanique : Étude qualitative

Comme nous l'avons montré dans le paragraphe sur l'utilisation de l'artefact faite par les enseignants (cf. Chapitre 8.), ceux-ci ne l'ont pas utilisé à la même fréquence et tous auraient pu l'utiliser davantage. Par exemple, ils auraient pu l'utiliser avec tous les dipôles et aborder toutes les grandeurs (tension, intensité, énergie). En effet, lors des entretiens après enseignement avec les enseignants et grâce aux enregistrements de cours, nous avons noté que les enseignants n'ont pas utilisé l'artefact pour toutes ces notions.
Nous cherchons alors à déterminer les raisons pour lesquelles les enseignants ont peu utilisé l'analogie mécanique (QdR8).

10.1. Recueil de données utilisées

Pour répondre à cette question, nous nous appuyons sur plusieurs données.
Le questionnaire distribué aux enseignants avant l'entretien de présentation de l'artefact va nous permettre de connaître les pratiques normales/habituelles déclarées des enseignants les années précédant l'enseignement de l'électricité avec l'artefact.
Les enregistrements de séances permettront de savoir comment l'artefact est utilisé.
L'enregistrement de l'entretien de présentation de l'artefact nous permettra de noter les remarques soulevées par les enseignants. Celles-ci peuvent être le signe d'un obstacle qui peut rendre plus compliquée l'appropriation de l'artefact par l'enseignant.
L'enregistrement de l'entretien après enseignement avec l'artefact nous permettra d'avoir un retour argumenté sur l'utilisation qu'ils ont faite de l'artefact, et les raisons de ces choix.
Enfin, nous avons recueilli les pourcentages de réussite des élèves estimés par deux enseignants au questionnaire après enseignement court terme E_1A et E_1B. Un comparatif entre ce pourcentage de réussite estimé par les enseignants et la réalité nous permettra de savoir si les enseignants mesurent correctement ou non les difficultés de leurs élèves en électricité, ce qui les inciterait ou pas ensuite à développer l'utilisation de l'artefact (Cèbe & Goigoux, 2007 ; Brangier & Barcenilla, 2003).

10.2. Résultats

10.2.1. Inadéquation entre les difficultés perçues par l'enseignant chez les élèves et celles que permet de travailler l'artefact

Afin de connaître l'avis des enseignants sur le niveau de leurs élèves, nous leur avons demandé d'estimer le pourcentage de réussite pour chacune des questions proposées (cf. tableau 88).

Questions	Pourcentage de réussite estimé par Prof 1	Pourcentage de réussite estimé par Prof 3	Pourcentage de réussite moyen estimé par les enseignants	Pourcentage de réussite réel	Conceptions visées
E_1A 1.1	Non renseigné	80	80	46	Connaissances
E_1A 1.2	50	80	65	42	Connaissances
E_1A 1.3	50	80	65	58	Indéterminé
E_1A 1.4	Non renseigné	80	80	84	Indéterminé
E_1A 2.1	20	70	45	46	Usure de I
E_1A 2.2	80	70	75	31	Pile I cst
E_1A 2.3	Non renseigné	50	50	17	Confusion U/I
E_1A 2.4	20	70	45	56	Usure de I
E_1A 2.5	80	50	65	55	Connaissances
E_1A 2.6	Non renseigné	50	50	13	Confusion U/I
E_1B 1.1	20	Non renseigné	20	13	Usure de I
E_1B 1.2	80	Non renseigné	80	13	Usure de I
E_1B 1.3	80	Non renseigné	80	85	Confusion U/I
E_1B 1.4	80	Non renseigné	80	18	Confusion U/I
E_1B 2.1	Non renseigné	Non renseigné	Non renseigné	63	Indéterminé
E_1B 2.2	Non renseigné	Non renseigné	Non renseigné	39	Pile I cst
E_1B 2.3	80	Non renseigné	80	59	Connaissances
E_1B 2.4	50	Non renseigné	50	56	Connaissances
E_1B 2.5	30	Non renseigné	30	38	Connaissances
E_1B 2.6	Non renseigné	Non renseigné	Non renseigné	59	Connaissances
E_1B 2.7	Non renseigné	Non renseigné	Non renseigné	7	Confusion U/I
E_1B 2.8	Non renseigné	Non renseigné	Non renseigné	55	Indéterminé
E_1A 3.1/E_1B 3.1	Non renseigné	70	70	46	Confusion U/I
E_1A 3.2/E_1B 3.2	Non renseigné	70	70	43	Connaissance
E_1A 3.3/E_1B 3.3	80	70	75	28	Pile I cst
E_1A 3.4/E_1B 3.4	80	70	75	39	Usure de I
E_1A 4.1/E_1B 4.1	Non renseigné	70	70	25	
E_1A 4.2/E_1B 4.2	Non renseigné	70	70	28	
E_1A 4.3/E_1B 4.3	Non renseigné	80	80	64	
E_1A 4.4/E_1B 4.4	Non renseigné	50	50	15	

Tableau 88: Pourcentages de réussite estimés et réel pour chaque question

Nous constatons que pour six questions (E_1A 1.4, E_1A 2.1, E_1A 2.4, E_1B 1.3, E_1B 2.4, E_1B 2.5) sur trente seulement, les enseignants ont sous-estimé les capacités de raisonnement et les connaissances des phénomènes physiques de leurs élèves. Malgré tout, les sous-estimations sont légères comparées aux surestimations faites pour d'autres questions. En effet, nous constatons qu'ils ont sur-estimé leurs élèves pour toutes les conceptions visées par le biais de ces questionnaires. Ainsi, la lutte contre ces conceptions n'était pas l'objectif premier des enseignants. S'ils avaient eu davantage conscience des conceptions de leurs élèves, ils auraient probablement souhaité les dépasser et donc auraient été davantage enclins à utiliser l'artefact.

Les enseignants ne semblent donc pas percevoir suffisamment les difficultés des élèves relatives aux conceptions . Mais on peut aussi imaginer que ces difficultés ne sont pas le seules qui sont perçues par les enseignants. Il peut alors être intéressant de savoir quelles sont les difficultés des élèves perçues par les enseignants (tableau 89). Cette question avait été posée à l'enseignant avant la présentation de l'artefact par le biais d'un questionnaire (annexe 4.1).

Difficultés observées en électricité les années précédentes	**Enseignants**
Confusion tension-intensité	Prof 3
Notion de tension difficile	Prof 4
Choix d'orientation des circuits électriques	Prof 1, Prof 2, Prof 5
Formalisme mathématique	Prof 1, Prof 2, Prof 3, Prof 5, Prof 6
Montage, Branchements appareils de mesures, passage du schéma au montage, Utilisation d'appareils de mesures (oscilloscope)	Prof 1, Prof 2, Prof 3, Prof 4, Prof 6
Mauvaise analogie des élèves (hydraulique)	Prof 3
La physique du condensateur et de la bobine	Prof 5
Lois de bases de l'électricité oubliées	Prof 4

Tableau 89 : Difficultés des élèves relevées par les enseignants

Nous constatons que seulement deux enseignants[21] mentionnent les difficultés rencontrées avec la tension et l'intensité ce qui est lié aux conceptions « confusion entre la tension et l'intensité » et « usure du courant ». Les enseignants font surtout ressortir les difficultés suivantes :
- le choix d'orientation des circuits électriques : la traduction d'un schéma électrique en une équation mathématique suppose une convention d'orientation ou de signe (récepteur ou générateur) qui n'est pas toujours assimilée par les élèves,
- le formalisme mathématique : les équations différentielles et les exponentielles sont des notions mathématiques difficiles pour les élèves de terminale S,
- l'expérimentation : le choix et le branchement des éléments électriques posent problème.

Les enseignants semblent donc ne pas voir l'intérêt de l'analogie mécanique pour dépasser ces difficultés (sinon ils l'auraient utilisé davantage). Comme le mentionne un enseignant, l'analogie mécanique « *ne leur écrit pas les équations différentielles ni ne les résout* » et en terminale c'est « *objectif bac* ». Il serait alors intéressant de présenter aux utilisateurs l'intérêt de l'analogie

21 Ce sont ces enseignants qui ont le plus utilisé l'artefact : groupe d'utilisation importante G3

mécanique au-delà de celui de lutter contre les conceptions. Puisque le domaine source est mieux compris que le domaine cible de l'analogie, les élèves ont une meilleure intuition du résultat attendu en mécanique. Ainsi, par analogie, ils peuvent prévoir les phénomènes électriques de manière semi quantitatives (covariations et contra-variations) qu'ils vont observer et vérifier leurs solutions aux problèmes électriques qui leur sont posés.

L'identification des liens entre les difficultés perçues et l'apport potentiel de l'instrument est un facteur agissant sur l'appropriation de l'artefact. Cela passe du côté de l'enseignant par une bonne connaissance des difficultés et pour le concepteur du guide d'utilisation, par une connaissance de ces difficultés et une explicitation claire des situations permettant de les travailler.

10.2.2. L'utilisation d'autres analogies : facteurs facilitant ou limitant l'usage ?

Les données recueillies montrent que la plupart des enseignants avaient déjà recours à une ou des analogies pour aider les élèves à dépasser leur difficultés mais tous n'en utilisaient pas (cf. tableau 90).

Fréquence d'utilisation d'une analogie en terminale	Enseignants
Jamais	Prof 1, Prof 2
Parfois	Prof 3, Prof 5
Souvent	Prof 4, Prof 6

Tableau 90 : Utilisation d'une analogie par les enseignants avant l'utilisation de l'analogie mécanique

Une possible autre interprétation de la faible utilisation de l'analogie mécanique serait l'utilisation d'une autre analogie. En effet, peut-être qu'étant plus à l'aise avec une autre analogie, quand des difficultés d'élèves étaient repérées, ils préféraient utiliser une analogie qu'ils maîtrisaient mieux. Les enseignants (Prof 3, Prof 4, Prof 6) présentent l'analogie hydraulique comme l'analogie utilisée dans le cadre de leur cours avec leurs élèves. En outre, Prof 3 mentionne que les élèves n'utilisent pas toujours l'analogie hydraulique correctement (cf. tableau 89).

Les raisons invoquées pour la non utilisation ou la faible utilisation d'une analogie sont au nombre de deux (cf. tableau 91).

Raison de la non ou faible utilisation d'une analogie	Enseignants
Temps imparti en TS insuffisant	Prof 1, Prof 2, Prof 5
Méconnaissance d'une analogie qui réponde parfaitement au besoin	Prof 3, Prof 5

Tableau 91: Raison de la non ou faible utilisation d'une analogie

Ici, nous retrouvons l'idée que, d'après les enseignants, le programme de sciences physiques et chimiques de terminale S dans son ensemble, de par sa densité ne laisse pas de place à des écarts par rapport à ce qui est mentionné. De ce fait, l'utilisation d'une analogie pour comprendre les phénomènes physiques n'étant pas explicite, il n'est pas envisageable de « perdre » du temps. Par ailleurs, deux enseignants mentionnent le fait qu'ils n'ont pas d'analogie suffisamment aboutie et

performante pour aider les élèves. De ce fait, l'analogie mécanique pourrait être perçue comme une bonne analogie pour eux mais peut-être que l'idée prégnante du programme prend le dessus dans ce cas là.
D'un autre côté, le fait d'utiliser déjà d'autres analogies pourrait faciliter l'utilisation de l'analogie mécanique. Nous supposons que l'habitude d'utiliser des analogies amènent les enseignants à considérer qu'elles ne constituent pas une perte de temps mais un gain au niveau de la compréhension. L'utilisation préalable d'analogies peut être un facteur facilitant l'utilisation de l'analogie mécanique en cours.
Prof 1 signale qu'il pourrait être intéressant d'avoir un guide d'utilisation « *pour faire comprendre la raison d'être de ce modèle là plus que la chute (d'eau), comparer les analogies pour montrer l'intérêt* ».

10.2.3. *Difficultés liées à l'artefact*

Lors des entretiens après enseignement, nous avons pu déceler d'autres difficultés ou obstacles qu'ont rencontrés les enseignants en utilisant l'analogie mécanique (cf. tableau 92).

Difficultés	Prof 1	Prof 2	Prof 3	Prof 4	Prof 5	Prof 6
Artefact pas disponible à chaque séance	x	x				x
Artefact pas transportable facilement	x	x				x
Difficultés de réglages, temps nécessaires assez longs avant ou pendant le cours	x	x	x			
Phénomènes trop courts pour les observer pleinement	x	x	x		x	
Pas suffisamment visible à distance	x	x				x
Classe à examen	x	x				x
Préoccupation pour les mathématiques plus importante pour les élèves			x			
Manque un guide d'utilisation	x	x		x		x
Manque de temps pour l'appropriation				x	x	
Enseignant ne perçoit pas tous les liens qui pouvaient être faits notamment pour l'énergie						x

Tableau 92: Difficultés rencontrées avec l'analogie mécanique par les enseignants

Dans la suite de la discussion, cet ensemble de difficultés est regroupé en trois groupes distincts : difficultés techniques ; manque d'idée de manipulations ; manque de maîtrise de l'analogie.

10.2.4. Les difficultés techniques d'usage (réglages, perceptibilité des phénomènes mécaniques)

Le principal reproche qui est fait est lié à l'observation de phénomènes trop courts ou pas suffisamment visibles à distance. En effet, le prototype tel que proposé aux enseignants participant à

l'étude avait l'inconvénient de présenter des frottements relativement importants d'une part et, d'autre part, comme il s'agissait d'un prototype, il était donc perfectible, notamment sur les éléments qu'il était possible de rajouter : frein, ressorts et volant d'inertie. Les phénomènes d'opposition à la mise en circulation ou de retard à l'arrêt de la circulation de la corde avec le volant d'inertie étaient peu visibles et encore moins à distance ; il en est de même pour le blocage du fil avec les ressorts.
Le prototype est imposant et lourd, le rendant alors difficilement transportable. En effet, une enseignante sur les six ne pouvait pas le transporter ou cela nécessitait de le démonter et d'effectuer les réglages à chaque fois, notamment les réglages de taille de cadre. Deux autres enseignants ont fait le choix de le fixer à une table donc dans une salle, de façon à ce que celui-ci ne bouge pas et ainsi éviter les réglages. Des améliorations techniques ont déjà permis de lever plusieurs de ces difficultés.

Les principales difficultés rencontrées par les enseignants sont des difficultés de réglages. En effet, sur les premiers prototypes, à chaque nouvel élément disposé sur le cadre, il était nécessaire d'agrandir ou réduire le cadre et à cela s'ajoutaient des ajustements de tension de corde. Ces différents ajustements prenaient alors du temps et devenaient un obstacle pour l'enseignant qui ne souhaitait pas perdre du temps en utilisant l'analogie. L'utilisation de caoutchouc dans la gorge de la poulie du générateur permettent de faciliter grandement le réglage de la tension de la corde en permettant une marge de réglage beaucoup plus importante.

10.2.5. La durée d'appropriation de l'artefact

Au-delà de ces aspects pratiques liés à l'artefact lui-même, des enseignants ont mentionné le fait qu'ils n'avaient pas eu suffisamment de temps pour s'approprier pleinement l'artefact avant de l'utiliser devant les élèves. En effet, celui-ci leur a été présenté peu de temps avant le début de leur séquence d'électricité. De ce fait, ils n'ont pas pu peaufiner le questionnement autour de l'artefact, Prof 4 dit : « *j'ai bien compris comment il fallait régler les différents dispositifs et après dans ma tête je pensais que c'était clair et je me rends compte que quand je l'ai utilisé avec eux je n'avais peut-être pas assez préparé les questionnements dessus* ». Prof 5 indique qu'il n'avait pas eu le temps de s'approprier parfaitement les liens entre les deux domaines de l'analogie : « *sur la partie condensateur aussi sur la partie inertie les analogies telles qu'on les conçoit entre constante de raideur et tout ça là aussi je pense que c'est quelque chose qu'il faut beaucoup plus approfondir si on veut vraiment s'en servir parce que lorsque je parlais moi de faire la différence entre tension et intensité moi je l'ai expliquée a minima c'est-à-dire le déplacement de la corde et la tension telle qu'on la touche si on veut aller plus loin parler des différences de potentiels et autres on entre rapidement dans des choses où il faut avoir du recul par rapport au modèle et ça ça demande plus de préparation tant du point de vue de l'utilisation que ne serait-ce que de savoir où est-ce que se situe l'analogie et alors là pour le coup tester si ça fonctionne parce que les différences de tension si on ne veut pas trop rentrer dans le détail c'est vrai que visuellement c'est convaincant mais après si on rentre un peu plus loin il vaut mieux bien maîtriser l'utilisation* ». Cet enseignant aurait alors eu besoin de vérifier que l'analogie présentait effectivement un bon isomorphisme entre les deux domaines malgré les questions qu'il nous avait posées en entretien de présentation de l'artefact. Toujours en lien avec le peu de temps d'appropriation de l'analogie, les enseignants n'ont pas eu le temps de percevoir tous les liens qu'il était possible de faire entre les deux domaines.

10.2.6. Manque d'idées de manipulation

Certains enseignants, bien qu'ayant compris le fonctionnement de l'artefact et les réglages

nécessaires à faire, ne savaient pas à quel moment l'introduire et comment l'introduire. Un guide d'utilisation avec des idées d'activités pourrait alors être une aide à l'utilisation de l'artefact.

10.2.7. Difficultés enseignantes

10.2.7.1. Un investissement limité

L'utilisation complète et optimale de l'artefact nécessitait un certain travail de préparation pour les enseignants et même la nécessité de revoir leur enseignement d'électricité. Comme l'électricité était enseignée pour la dernière année en terminale S lors de cette année d'étude, les enseignants n'ont pas nécessairement investi beaucoup de leur temps pour refondre la totalité de leur séquence.

10.2.7.2. Réorganisation du réseau conceptuel des enseignants

Lors de la présentation de l'artefact, nous avons pu remarquer que cette analogie posait aux enseignants de nouvelles questions qu'ils ne se posaient pas avant et qui étaient susceptibles de faire évoluer leur point de vue sur certains aspects de l'électrocinétique. Nous avons repéré deux exemples.

Prof 3 pense que l'analogie ne fonctionne pas pour la bobine. Il pense que, en électricité, le courant change de sens de circulation une fois le générateur éteint et dans le cas de la mécanique, une fois la masse qui chute arrivée au sol, la corde continue de circuler dans le même sens autour des quatre poulies.

Un autre enseignant, Prof 5, évoque la non linéarité de la vitesse de la masse qui chute : « *tu as dit que ça faisait un générateur de tension parce que là c'est pareil la vitesse de chute elle n'est pas il n'y a aucune raison qu'elle soit linéaire* ?». Il semble déstabilisé par le comportement du générateur de tension alors qu'il s'attendait à une comportement du type « générateur d'intensité ».

10.3. Conclusion

Cette analyse nous permet alors de conclure sur les différents obstacles à l'utilisation de l'artefact. Ces obstacles sont variés et ils sont liés :
- aux demandes explicites du programme de physique chimie de terminale scientifique,
- aux difficultés rencontrés avec l'artefact lui-même : réglage, appropriation, phénomènes peu visibles principalement,
- aux difficultés des élèves non perçues,
- à la durée d'appropriation de l'artefact,
- à la nécessité d'une réorganisation du réseau conceptuel des enseignants,
- au coût d'une réorganisation de leur enseignement, la dernière année d'enseignement de l'électricité en Terminale S.

À l'issue de ces différentes analyses, il semble alors nécessaire de faire un guide d'utilisation pour faciliter l'appropriation par les enseignants d'un artefact de formation.

Chapitre 11.
Conception d'un guide d'utilisation pour l'utilisation de l'artefact

Les résultats montrent que certains enseignants ont peu utilisé l'artefact (groupes G1 et G2). Or, l'analogie remplit les conditions technocentrées d'une analogie efficace. Pour que l'impact de l'artefact soit optimal, il semble nécessaire que le guide d'utilisation réponde au mieux aux attentes des enseignants ou lève les difficultés que les enseignants ont rencontrées lors de l'utilisation de l'instrument.

Nous avons choisi de concevoir le guide sous forme numérique pour que les enseignants puissent modifier les fichiers et se les approprier. Nous avons supposé que la présentation sous forme de carte mentale (illustration 9) allait réduire le temps d'appropriation du guide, l'enseignant cherchant des activités pour un niveau donné, il n'est pas nécessaire qu'il parcours l'ensemble des séances. Ainsi, en présentant le guide sous forme de carte mentale, l'utilisateur de l'artefact peut s'orienter assez facilement dans le guide d'utilisation et obtenir une réponse à une éventuelle difficulté en quelques clics. En cliquant sur un lien, soit une fenêtre s'ouvre soit la carte mentale se développe et l'utilisateur doit de nouveau faire un choix.

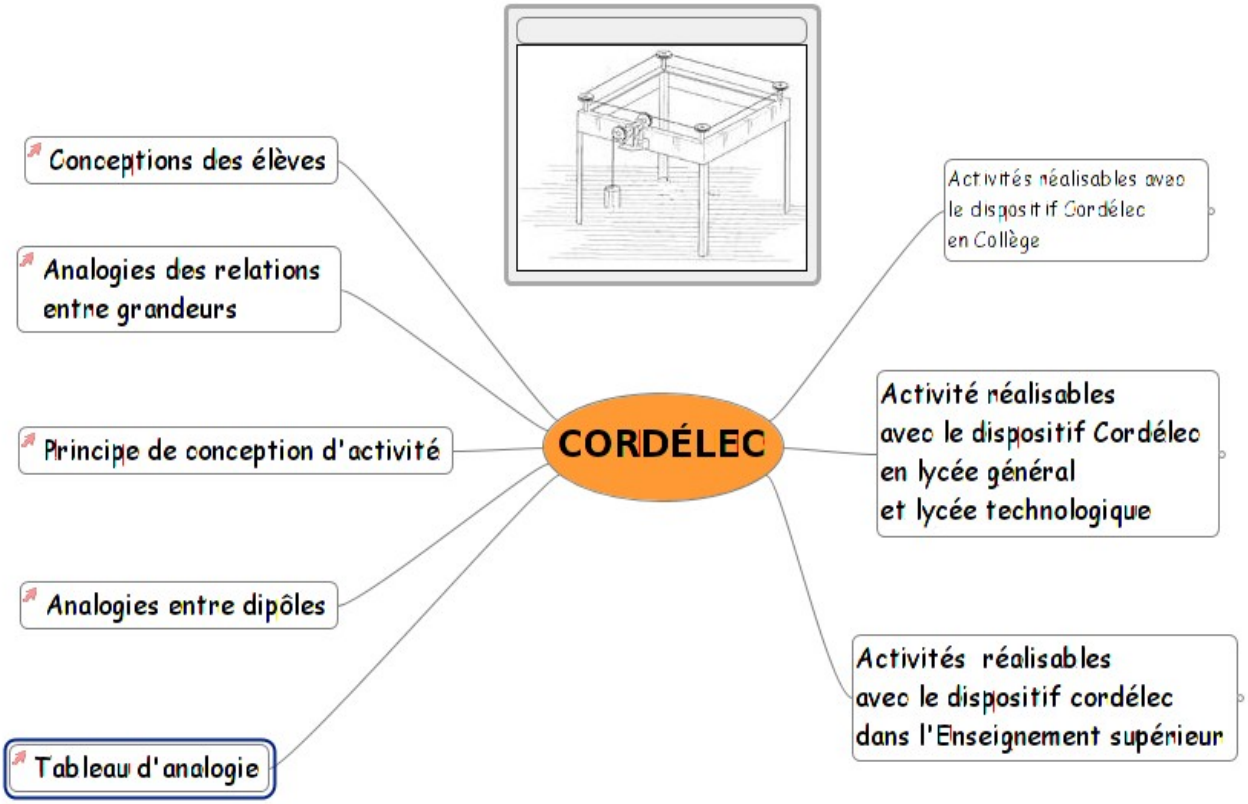


Illustration 9 : Guide d'utilisation

Dans cette partie, nous présentons les apports de notre étude pour la conception du guide d'utilisation.

11.1. Difficulté d'appropriation

Les enseignants ont manifesté des difficultés à s'approprier l'instrument pour deux points en particulier.
Tout d'abord, ils ont expliqué qu'ils avaient eu peu de temps pour s'approprier l'artefact et l'analogie au niveau scientifique. En effet, nous avons expliqué en une heure, lors de la présentation de l'artefact, les différents analogues mais le temps qui leur était imparti était trop court pour eux pouvoir vérifier qu'effectivement il s'agissait bien d'analogue. Pour répondre à cette question, et pour leur faciliter le travail de contrôle de la validité de l'analogie, nous avons ainsi prévu qu'une partie du guide d'utilisation reprendrait l'analyse épistémique et didactique présentée dans cette thèse (parties du guide intitulées « Analogies des relations entre grandeurs », « Analogies entre dipôles » et « Tableau d'analogie » présente de façon synthétique les différentes analogies). Comme mentionné par Kipnis (2005), l'utilisation d'une analogie est limitée à cause de la méconnaissance de l'enseignant des possibilités de créer des liens entre domaine source et cible ; ainsi, en précisant tous les aspects scientifiques, toutes les zones d'ombres sur l'analogie seront levées.

11.2. Les conceptions des élèves

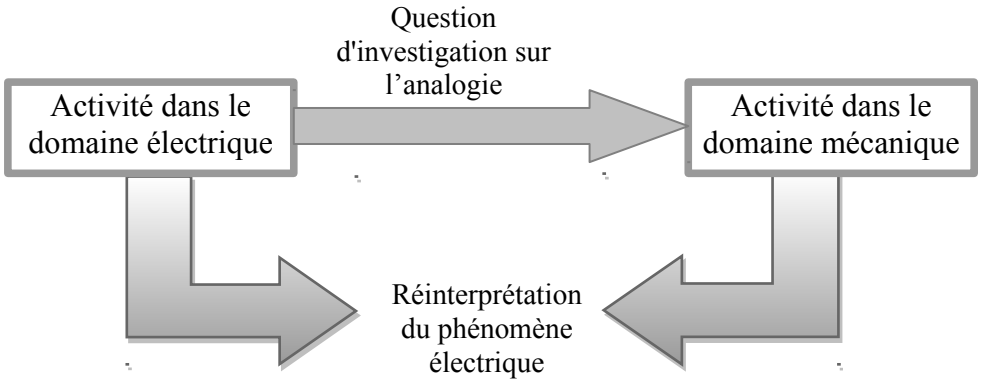
Nous avons constaté, dans cette étude, que les enseignants ne cernaient pas les conceptions des élèves en électricité ou n'en mesuraient pas la prégnance. Pour cette raison, une partie du guide d'utilisation est dédiée à cette question ; cette partie est intitulée « Conceptions des élèves ». Il faudra aussi montrer les scores des élèves aux pré-tests afin de montrer les difficultés qu'ils rencontrent encore en Terminale S.

11.3. Proposition d'activités

Un enseignant a indiqué qu'après l'entretien de présentation de l'artefact il maîtrisait les différents réglages et l'intérêt de l'analogie. En préparant son cours d'électricité, il avait réfléchi aux moments auxquels il envisageait d'introduire l'analogie mais il n'avait pas imaginé que le questionnement auprès des élèves serait si difficile. Pour palier cette difficulté que pourraient rencontrer les enseignants, le guide propose un ensemble d'activités à chaque niveau de classe de collège, lycée général, lycée technologique et dans l'enseignement supérieur – CPGE et formation des enseignants – et en lien avec les programmes en place en 2015 (partie droite de la carte mentale). Les activités proposées pour le collège s'appuient sur celles conçues par le groupe SESAMES Collège et disponibles sur le site « http://pegase.ens-lyon.fr/ ». Elles sont adaptées pour utiliser l'analogie mécanique en classe.

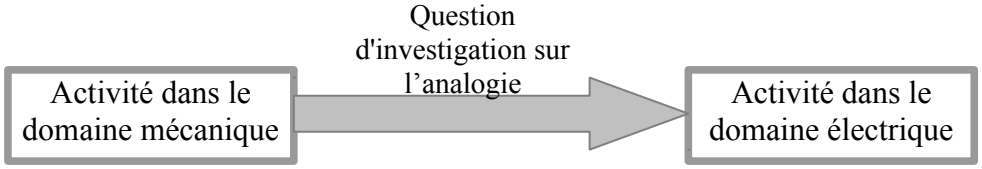
Ces activités se présentent sous quatre formes différentes d'approche qui sont présentées dans la partie intitulée « Principe de conception d'activité ».

Première approche



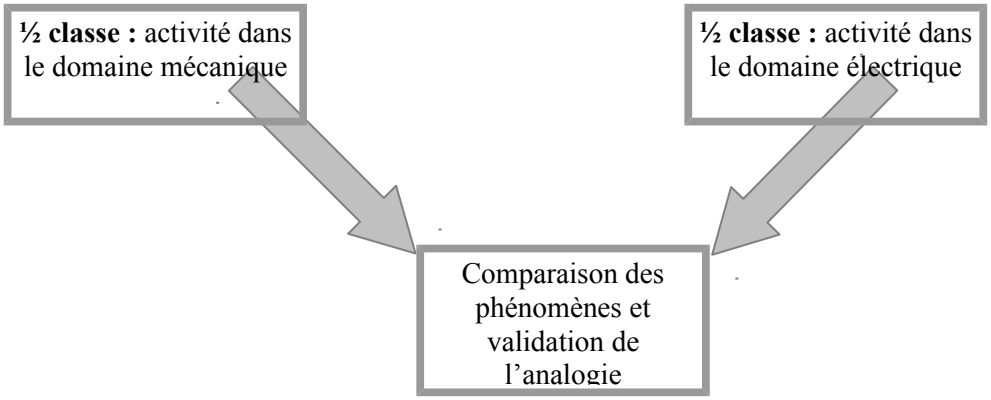
Dans cette première approche, les élèves pratiquent d'abord une activité dans le domaine électrique puis répondent à une question d'investigation pour établir des liens entre les deux domaines. Cette question d'investigation doit amener les élèves à formuler une hypothèse, un protocole, expérimenter, valider ou non leur hypothèse et conclure. Après l'activité mécanique, les élèves doivent réinterpréter le phénomène électrique pour se l'approprier.
Cette approche sera privilégiée en début de progression et/ou si les élèves ne connaissent pas l'artefact car il faut construire le germe d'analogie et le sens de ce qu'est une analogie.

Deuxième approche



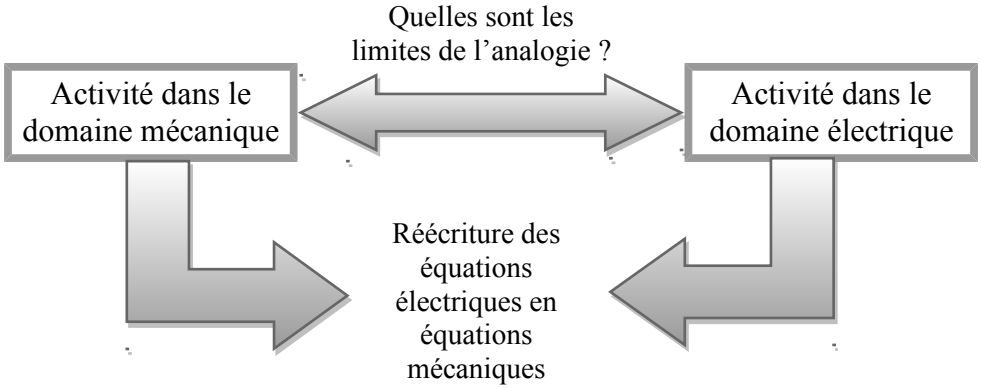
Dans cette deuxième approche, les élèves pratiquent d'abord une activité dans le domaine mécanique puis répondent à une question d'investigation pour établir des liens entre les deux domaines. Cette question d'investigation doit amener les élèves à formuler une hypothèse, un protocole, expérimenter, valider ou non leur hypothèse et conclure.
Cette approche sera privilégiée quand elle permet d'utiliser les sens pour mettre en évidence un phénomène non perceptible en électricité.

Troisième approche



Dans cette troisième approche, une moitié de classe travaille sur une activité dans le domaine mécanique et une autre moitié sur une activité dans le domaine électrique. Au cours de leur activité, il leur est demandé de répondre à une question d'investigation. Ils doivent à la fin imaginer ce qui se produit dans le domaine autre que celui dans lequel ils ont travaillé pour qu'ensuite ils confrontent leur hypothèse aux observations de l'autre groupe.
Cette approche sera privilégiée pour un gain de temps avec les élèves et rendre nécessaire la phase de communication entre élèves (compétence communiquer).

Quatrième approche



Dans cette quatrième et dernière approche, il n'y a plus de domaine source et de domaine cible : on demande aux élèves de créer des expériences dans les deux domaines et de déterminer les limites de l'analogie. Ils doivent formuler une hypothèse, un protocole, expérimenter, valider ou non leur hypothèse et conclure. Après les activités expérimentales, les élèves doivent compléter la partie mécanique ou électrique du tableau d'analogie : ce qui suppose que les élèves aient déjà abordé et établi les diverses équations en cours.
Cette approche sera privilégiée dans les classes d'enseignement supérieur où les phénomènes plus complexes et quantitatifs prennent une place plus importante dans l'enseignement que les phénomènes qualitatifs.

Ainsi l'utilisateur de l'artefact pourra plus facilement comprendre la formulation des activités en se rapportant à cette partie du guide et s'il souhaite en concevoir, il pourra également s'appuyer sur l'une de ces quatre formes. Pour chaque activité proposée, au préalable, nous avons précisé quelle partie du programme est traitée, quelles conceptions sont visées, et quels sont les apports de l'analogie en lien avec les objectifs du programme. Certains liens sont évidents mais d'autres moins, par exemple l'évolution de la tension et de l'intensité au fil du temps pour la bobine et le condensateur.

11.4. Dimension sensorielle

Contrairement aux autres analogies déjà existantes pour la compréhension de l'électricité, l'analogie mécanique présente une dimension sensorielle qui est un atout non négligeable. Ainsi, il est nécessaire d'ajouter un lien sur ce point dans ce guide d'utilisation. L'analogie permet de comprendre ce qu'est la tension électrique en distinguant par simple toucher la différence de tension du fil en différents points de la boucle fermée. De plus, la vitesse de rotation de la corde qui est l'analogue de l'intensité du courant électrique met en jeu la vue, ou l'ouïe également dans le cas de la bobine par exemple.

11.5. Difficultés rencontrées par les élèves

Enfin, nous avons pu relever plusieurs difficultés rencontrées par les élèves lors des entretiens menés avec eux. Ces entretiens en binôme nous ont permis d'avoir des informations précises, informations que des enseignants ne peuvent pas forcément avoir facilement dans des classes avec 30 élèves ou plus. Il semble alors important de mentionner ces difficultés rencontrées par les élèves. Certains élèves ont des difficultés à faire la distinction entre la corde (qui représente le courant) et la ficelle (ficelle de cerf-volant utilisée pour maintenir la masse à la poulie et former le générateur), cette difficulté devra donc être explicitée. De plus, des élèves mettent en relation la corde qui circule autour des quatre poulies au fil électrique. Cette mise en relation faite spontanément par les élèves peut constituer une difficulté dans la construction de l'analogie. La construction de ce guide a donné lieu à un mémoire de Master (Piotte, 2015) sous la coresponsabilité de l'auteure de la thèse et de son directeur.

11.6. Évaluation du guide d'utilisation

Ce guide a été évalué selon les critères de Brangier et Barcenilla (2003) et a été soumis à un enseignant qui avait déjà utilisé l'instrument. Peu de modification ont été apportées suite à cette évaluation (Piotte, 2015).

En prenant en considération ces différents apports de notre étude dans le guide d'utilisation, nous pouvons imaginer une plus grande utilisation de l'artefact et par conséquent une efficacité plus importante de celui-ci sur l'apprentissage de l'électrocinétique chez les élèves.

Conclusion - Discussion

Les apports de cette thèse se situent au niveau théorique (mobilisation de la cognition incarnée pour interpréter les apports d'une analogie mécanique), au niveau méthodologique (repérage des conditions d'efficacité d'une analogie) et au niveau empirique (difficultés d'apprentissage des élèves de terminale S en électrocinétique, effet de l'utilisation de cette analogie et facteurs principaux déterminant l'utilisation du dispositif).

Sur le plan théorique cette thèse introduit le cadre de la cognition incarnée pour interpréter l'intérêt de cette analogie en particulier mais aussi des analogies en général. En effet, les concepts du domaine de l'électricité sont par essence imperceptibles (courant, tension, intensité…). Les seules perceptions qui peuvent leur être attribuées en dehors de toute forme d'enseignement sont liées aux notions de peur, de danger. L'introduction de l'analogie mécanique permet aux élèves de lier des perceptions visuelles, auditives, tactiles aux concepts mécaniques pour ensuite les transférer aux concepts électriques. Ainsi, les concepts électriques peuvent se construire plus facilement car ils sont ainsi liés à des perceptions. Si la physique a dû se détacher des perceptions premières qui sont souvent trompeuses, la construction des concepts par les élèves est, selon ce cadre théorique, favorisée par l'association de perceptions aux concepts. Nous considérons que, si ces perceptions sont pertinentes sur le plan épistémique (isomorphisme important dans le cas d'une analogie), elle peuvent avoir un effet favorable sur l'apprentissage des élèves du domaine cible. Ce cadre théorique, encore peu mobilisé en didactique, ouvre de nouvelles voies de recherches visant à valider cette théorie dans le monde de l'apprentissage des sciences, et à étudier les conditions favorables à l'exploitation de ces résultats en situation réelle d'enseignement.

Cette thèse a également été l'occasion d'utiliser le cadre théorique de l'ergonomie. Il est assez rare en didactique de la physique de s'appuyer sur des éléments théoriques de l'ergonomie et pourtant, cela semble être une nécessité pour comprendre les raisons pour lesquelles les enseignants n'utilisent pas (ou peu) les résultats de la recherche en didactique. Un des résultats importants de cette thèse porte donc sur le fait que l'activité enseignante est le principal déterminant de l'efficacité de l'analogie. En effet, alors que tous les résultats semblaient montrer que cette analogie pouvait avoir potentiellement une grande efficacité, les résultats des élèves obtenus en situation réelle ne correspondent pas aux prévisions. Il devient alors fondamental de comprendre les facteurs qui influent sur l'usage de cette analogie. Dans le cadre de cette recherche, si nous n'avions pas questionné les enseignants sur les pratiques du terrain, nous n'aurions pas été en mesure de déterminer les obstacles à l'utilisation de l'analogie mécanique. Nous avons pu déterminer les facteurs suivants : inadéquation entre les difficultés des élèves perçues par l'enseignant et les difficultés réelles des élèves, l'utilisation d'autres analogies, les difficultés liées à l'artefact, les difficultés techniques d'usage, le manque d'idées de manipulation, les difficultés enseignantes, la difficulté à établir des liens entre le potentiel didactique de l'analogie et des éléments du programme. Ce résultat montre l'importance pour la didactique de s'intéresser aux approches ergonomiques afin de comprendre les facteurs qui influencent l'usage d'une analogie, d'un dispositif d'enseignement ou de tout autre produit issu de la recherche et d'intégrer les enseignants au processus de conception.

Alors que le cadre théorique de l'ergonomie nous amène à considérer que toute conception d'instrument doit s'effectuer avec les utilisateurs, l'artefact a été développé uniquement sur des considérations scientifiques et didactiques mais pas ergonomiques. Cette contradiction apparente nous amène à nous interroger sur le fait que, dans le cas de l'analogie mécanique étudiée dans cette thèse, l'artefact a été conçu de manière indépendante de l'utilisateur. Les schèmes d'utilisation de l'artefact ont, quant à eux, été construits en collaboration avec des enseignants. Sur un plan

théorique, il serait intéressant d'étudier, dans le cas d'autres conceptions d'instruments à visée didactique, si les utilisateurs sont intervenus dans la définitions des schèmes d'utilisation et/ou dans la construction de l'artefact. La réponse à cette question permettrait de faire avancer la compréhension des processus de conceptions d'instruments didactiques.

Cette thèse a permis aussi de compléter l'ensemble de conditions auxquelles doit répondre une analogie pour être efficace. Cet ensemble de conditions a été déterminé à partir du triple ancrage théorique dans les domaines de la didactique et de l'ergonomie et de la cognition incarnée :
- l'analogie doit permettre de résoudre un problème d'apprentissage comme pas exemple les conceptions des élèves,
- il doit exister des liens entre les problèmes d'apprentissage que l'analogie permet de travailler (domaine cible de l'analogie) et les programmes, et ces liens doivent être connus des enseignants,
- le domaine source de cette analogie doit être plus facilement compréhensible que le domaine cible,
- la mise en relation du domaine source et du domaine cible doit présenter pour les élèves le minimum de difficultés,
- l'analogie doit présenter des dimensions perceptibles,
- l'analogie doit présenter le minimum d'analogies négatives c'est-à-dire de cas où l'analogie ne fonctionne pas,
- l'analogie doit présenter le minium d'analogies négatives de vocabulaire (exemple d'analogies mécaniques de vocabulaire : fil en boucle fermée = fil électrique ; tension mécanique = tension électrique).
- l'analogie doit présenter un bon isomorphisme : une cohérence de structure et une relation biunivoque entre les deux domaines,
- l'analogie doit prendre en compte les problématiques et les contraintes professionnelles des enseignants,
- l'analogie doit être utilisée dans toute sa potentialité par l'enseignant.
Nous considérons qu'il s'agit là d'un résultat méthodologique important pour la didactique puisque cette liste de conditions peut être réutilisée pour évaluer l'efficacité d'une analogie dans un autre domaine.

Dans le cadre de la recherche menée, au cœur de l'enseignement, une des difficultés est la conception des questionnaires. Il n'est pas envisageable de proposer les mêmes questionnaires avant et après enseignement puisque de nouvelles notions ont été introduites en terminale S. De ce fait, l'analyse des réponses des élèves s'en trouve plus complexe. L'application du schéma classique expérimental, comparaison entre questionnaire avant enseignement et questionnaire après enseignement identiques, n'est pas envisageable, sauf si les nouveaux contenus d'apprentissage visés pendant l'enseignement ne sont pas pris en considération.
Une autre façon de procéder afin d'évaluer l'impact de l'analogie aurait été de comparer un groupe témoin d'élèves ayant reçu un enseignement sans l'analogie mécanique et un groupe test ayant reçu un enseignement avec l'analogie mécanique. Cependant, étant donné la disparité des usages observés dans cette thèse, cela n'aurait pas permis d'interpréter les résultats car le groupe « utilisateur » aurait été constitué d'une très grande variété d'utilisation allant de la simple utilisation visant à distinguer tension intensité à une utilisation pour l'ensemble des dipôles à chacune des séances. De plus, nous avons montré que ce paramètre de l'utilisation était le principal facteur ayant un impact sur les résultats des élèves.

Cette thèse a permis d'établir un ensemble de résultats empiriques portant sur l'apprentissage de l'électrocinétique en Terminale S, la perception des enseignants sur les difficultés en électricité chez leurs élèves de terminale S. Ce sont ces résultats que nous synthétisons dans la suite de cette partie.

En début de terminale S, plus d'un tiers des élèves n'ont pas dépassé les conceptions « usure du courant », « confusion entre tension et intensité » et « la pile délivre toujours la même intensité », sur des notions de niveau collège. De plus, après un enseignement ordinaire de l'électricité en terminale S, peu d'élèves ont dépassé ces conceptions et la moitié fait des erreurs sur des notions abordées en terminale S (chapitre 5). Les élèves qui nous ont permis d'obtenir ces résultats ont reçu un cours « classique » sans instrument. Les notions et conceptions en électricité que l'analogie mécanique permet d'aborder posent d'importantes difficultés aux élèves de terminale S.

Nous avons montré (chapitre 3) que l'analogie mécanique possède un isomorphisme de structure important entre le domaine source (mécanique) et le domaine cible (électrique), en effet, chaque dipôle électrique a un équivalent mécanique et il en est de même pour les grandeurs et les relations entre grandeurs. Par ailleurs, nous avons montré que cette analogie possède également un isomorphisme de vocabulaire, ce qui évite des confusions et l'introduction de nouvelles conceptions.
Grâce aux scores obtenus par les élèves aux différents questionnaires de mécanique et d'électricité, nous avons pu constater que le domaine source est plus compréhensible que le domaine cible (chapitre 6). Par ailleurs, nous avons également pu constater que les élèves n'avaient aucune difficulté à décrire ce qu'ils observaient dans le domaine source par simple observation de l'artefact en fonctionnement et ce, que ce soit pour les dipôles mécaniques ou pour les grandeurs.
Enfin, nous avons pu constater (chapitre 7) que les élèves n'ont pas de difficultés à faire des liens entre les deux domaines. Le seul lien incorrect concerne l'analogie faite par les élèves entre la corde qui circule autour des quatre poulies et le fil électrique.
Par ailleurs, cette analogie étant instrumentée, cette caractéristique facilite également une représentation mentale des phénomènes. En se remémorant l'artefact, les élèves peuvent faire appel à leurs souvenirs et raisonner plus facilement en électricité en faisant les liens analogiques entre les deux domaines.
L'analogie mécanique présente donc toutes les conditions technocentrées nécessaires pour être une analogie efficace.

L'implantation de l'artefact dans six classes différentes et les entretiens menés avec des binômes d'élèves nous ont permis de tirer quelques conclusions et d'envisager des perspectives.
Nous avons noté que plus l'artefact est utilisé, plus les élèves progressent. Par ailleurs, les élèves faibles progressent de façon plus durable lorsque l'artefact a été utilisé de manière moyenne ou importante de et les élèves faibles progressent de façon plus durable lorsque l'analogie a été utilisée de manière importante. Ces résultats pris dans leur ensemble ne sont pas significatifs mais montrent une tendance .
Une étude menée sur les conceptions selon le degré d'utilisation de l'artefact nous a permis de tirer un certain nombre de conclusions.
Concernant la conception de l'usure du courant, l'artefact profite aux élèves qui ont reçu un enseignement avec une moyenne ou importante utilisation de l'analogie mécanique et plus particulièrement, l'artefact profite aux élèves faibles de ces groupes. Ces progressions ne sont pas notables pour le groupe d'utilisation faible hormis à moyen-terme où on remarque une légère progression. Ainsi, il apparaît que l'utilisation du dispositif pour la conception « usure du courant » ne nécessite pas une utilisation très importante. La notion de vitesse étant acquise chez les élèves de Terminale S, la circulation de la corde et sa vitesse sont des notions très rapidement comprises par les élèves. De plus, l'artefact permet aux élèves de se faire une représentation visuelle supportée par une simple observation. Les groupes d'utilisation moyenne et importante ont utilisé l'artefact pour tous les dipôles mécaniques. L'artefact était présent à chaque séance pour le groupe d'utilisation importante. Ces résultats nous amènent à penser que l'analogie mécanique aura un impact plus complet sur le dépassement de la conception de l'usure du courant, si son fonctionnement est

présenté pour chaque dipôle au moins une fois. On retrouve ici le résultat de Duit et Von Rhöneck (1998) qui a montré que les élèves remobilisaient l'usure du courant par exemple lors de la charge du condensateur. Le dépassement de cette conception ne s'effectue pas par transfert mais doit être appliquée sur l'ensemble des dipôles pour être effective.

Concernant la différenciation tension/intensité, nous ne relevons pas de différence significative entre les trois groupes d'utilisation sur les résultats. En revanche, nous pouvons noter une tendance : plus le dispositif est utilisé meilleure est la progression et en particulier pour les élèves en difficulté sur cette conception avant enseignement. Alors que la conception relative à l'usure du courant est significativement meilleure avec une utilisation moyenne ou importante, ce n'est pas le cas pour la distinction entre tension et intensité. Il n'y a pas de palier entre une utilisation moyenne et forte comme si cette distinction était moins facile à construire pour les élèves que de remettre en cause leur conception de l'usure du courant. Une autre interprétation complémentaire à celle-ci consiste à considérer que cette distinction tension/intensité a été réalisée par tous les enseignants, que leur utilisation soit moyenne, importante ou faible. Ainsi il n'y a pas de différence significative entre ces groupes.

Pour la conception « la pile délivre toujours la même intensité », il n'y pas de différence selon le degré d'utilisation. Sachant qu'aucun enseignant n'a explicitement déclaré travailler cette propriété du générateur de tension avec ses élèves, nous pouvons faire l'hypothèse que la construction de la nouvelle conception du générateur de tension, nécessite une reconstruction explicite de la part de l'enseignant en cours et que, contrairement à la conception de l'usure du courant, le seul fait d'observer l'artefact ne permet pas de construire un nouveau modèle du générateur qui soit fonctionnel pour les élèves. En effet, remettre en cause cette conception nécessite non pas simplement de faire une observation comme c'est le cas de l'usure du courant mais bien de comparer deux observations (comparaison du débit du générateur dans 2 montages différents). Cette comparaison ne peut avoir lieu que si et seulement si l'enseignement décide de comparer ces deux observations, autrement dit que si et seulement si l'enseignant est conscient de cette conception et de la manière de la travailler avec les élèves.

Pour résumer, nous constatons que toutes les conceptions ne présentent pas les mêmes difficultés et peuvent ne pas être dépassées de la même façon. La conception « usure du courant » peut être dépassée par simple observation de la circulation de la corde et l'analogie mécanique aura davantage d'impact si l'artefact est utilisé pour tous les dipôles mécaniques. Pour la conception « confusion tension/intensité », l'observation à distance de l'artefact ne semble pas suffisante pour permettre aux élèves de dépasser cette conception et il est nécessaire de s'appuyer sur les perceptions pour travailler cette distinction. Quant à la conception « la pile délivre toujours la même intensité », l'analogie mécanique n'a jamais été utilisée avec cet objectif ; il est donc nécessaire de pointer cette conception auprès des enseignants pour qu'à leur tour ils aident les élèves.

La conception du guide d'utilisation permet d'envisager de nouvelles recherches concernant l'appropriation de ce guide par les enseignants, ce guide pouvant être considéré comme un instrument. L'utilisation de ce guide devrait permettre d'homogénéiser l'utilisation de l'analogie et d'éviter l'écueil d'une utilisation très variée de l'analogie, ce qui empêche toute étude quantitative entre un groupe témoin et un groupe expérimental hétéroclite dans l'utilisation de l'analogie.

Bibliographie

Bachelard, G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris: Vrin.

Bécu-Robinault, K., Buty, C., & Gaidioz, P. (2006). Démarche d'investigation et introduction d'un modèle électrocinétique en classe de cinquième. *Bulletin de l'Union Des Physiciens*, *886*, 955–964.

Brangier, E., & Barcenilla, J. (2003). *Concevoir un produit facile à utiliser* (Editions d.).

Brna, P., & Duncan, D. (1996). The Analogical Model-based Physics System : A Workbench to Investigate Issues in How to Support Learning by Analogy in Physics. In *Lecture Notes in Computer Science - Computer Aided Learning and Instruction in Science and Engineering* (pp. 331–339).

Cèbe, S., & Goigoux, R. (2007). Concevoir un instrument didactique pour améliorer l'enseignement de la compréhension de textes. *Repères*, *35*, 185–208.

Chang, K.-E., Liu, S.-H., & Chen, S.-W. (1998). A testing system for diagnosing misconceptions in DC electric circuits. *Computers & Education*, *31*(2), 195–210.

Chiu, M.-H., & Lin, J.-W. (2005). Promoting fourth graders' conceptual change of their understanding of electric current via multiple analogies. *Journal of Research in Science Teaching*, *42*(4), 429–464.

Clement, J., & Steinberg, M. S. (2008). Case study of model evolution in electricity : learning from both observation and analogies. In J. Clement & M. A. Rea-Ramirez (Eds.), *Model based learning and instruction in science* (Springer., pp. 103–116).

Closset, J.-L. (1983a). D'où proviennent certaines erreurs rencontrées chez les élèves et les étudiants en électrocinétiques ? Peut-on y remédier ? *Bulletin de l'Union Des Physiciens*, *657*, 81–102.

Closset, J.-L. (1983b). *Le raisonnement séquentiel en électrocinétique.* Thèse 3ème cycle - Paris 7.

Closset, J.-L. (1987). Les obstacles à l'apprentissage de l'électrocinétique. *Bulletin de l'Union Des Physiciens*, *716*, 931–949.

Closset, J.-L. (1992). Raisonnements en électricité et en hydrodynamique. *Aster*, *14*(4), 143–155.

Coquidé, M., & Morge, L. (2011). Espace et temps dans l'enseignement des sciences et de la technologie. *Recherches En Didactique Des Sciences et Des Technologies*, *4*, 9–27.

Delacote, G., & Tiberghien, A. (1976). Manipulations et représentations de circuits électriques simples par des enfants de 7 à 12 ans. *Revue Française de Pédagogie*, *34*, 32–44.

Develay, M. (1992). *De l'apprentissage à l'enseignement : pour une épistémologie scolaire.* ESF Editeurs.

Dortier, J.-F. (2014). *Le Cerveau et la pensée* (Sciences h.).

Duit, R. (2009). *Students' and Teachers' conceptions and science Education*. Allemagne.

Duit, R., & Von Rhöneck, C. (1998). Learning and understanding key concepts in electricity. Connecting research in physics education. In A. Tiberghien, E. Jossem, & J. Barojas (Eds.), *Connecting research in physics education with teacher education*. International Commission of Physics Education.

Dupin, J.-J., & Johsua, S. (1994). Analogies et enseignement des sciences : une analogie thermique pour l'électricité. *Didaskalia*, *3*, 9–26.

Duplessis, P. (2008). Conceptions des élèves au centre de la didactique de l'information (p. 17). Séminaire du GRCDI.

Fauconnet, S. (1981). *Le raisonnement linéaire causal*. Thèse 3ème cycle - Paris 7.

Gauld, C. (1986). Models, meters and memory. *Research in Science Education*, *16*, 49–54.

Gentner, D., & Gentner, D. R. (1983). Flowing waters of teeming crowds: Mental models of electricity. In D. Gentner & A. L. Stevens (Eds.), *Mental Models* (pp. 99–129). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Giordan, A. (1996). Les conceptions de l'apprenant : un tremplin pour l'apprentissage. *Sciences Humaines*, *12*(Hors série), 48–50.

Goigoux, R. (2001). Recherche en didactique du Français : contribution aux débats d'orientation. In M. Marquillo Larruy (Ed.), *Questions d'épistémologie en didactique du Français.* Poitiers : Les Cahiers Forell.

Goigoux, R. (2005). Contribution de la psychologie ergonomique au développement de la didactique du français. In A. Mercier & C. Margolinas (Eds.), *Balises en didactique des mathématiques* (pp. 17–39). La pensée sauvage.

Halté, J.-F. (1992). *La didactique du français*. Presses Universitaires de France (PUF).

Härtel, H. (1985). The electric circuit as a system. In R. Duit, W. Jung, & C. Von Rhöneck (Eds.), *Aspects of understanding electricity* (pp. 343–352). Keil, Germany : Schmidt&Klaunig.

Hashweh, M. . (1986). Toward an explanation of conceptual change. *European Journal of Science Education*, *8*(3), 229–249.

Hind, A., Leach, J., Lewis, J., & Scott, P. (2002). A teaching scheme delopped from research evidence on student's learning about electric circuits.

Hummel, J. E., & Holyoak, K. J. (1997). Distributed Representations of Structure: A Theory of Analogical Access and Mapping. *Psychologial Review*, *104*(3), 427–466.

Ingold, T. (1993). Technology, language, intelligence: a reconsideration of basic concepts. In K. . Gibson & T. Ingold (Eds.), *Tools, Language and Cognition in Human Evolution* (p. 449). Cambridge University Press.

Johsua, S., & Dupin, J. (1993a). Using modelling analogy to teach basic electricity : a critical analysis. In M. Caillot (Ed.), *Learning electricity and electronics with advanced educationnal technology* (Berlin : S., pp. 39–55).

Johsua, S., & Dupin, J.-J. (1989). *Représentations et modélisations : le "débat scientifique" dans la classe de l'apprentissage de la physique*. Berne: Peter Lang.

Johsua, S., & Dupin, J.-J. (1993b). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques* (PUF.).

Kipnis, N. (2005). Scientific Analogies and Their Use in Teaching Science. *Science & Education*, *14*(3-5), 199–233.

Lecourt, D. (2006). *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences* (Presses Un.). Presses Universitaires de France (PUF).

Lemaignan, G., & Weil-Barais, A. (1993). *Construire des concepts en physique. L'enseignement de la mécanique* (Hachette.). Revue Française de Pédagogie.

Leplat, J. (1992). *L'analyse du travail en psychologie ergonomique*.

Louvel, J., & Moissenet, N. (2012). *Plateforme didactique. Rapport*. Clermont-Ferrand, France.

Marquet, P., & Leroy, F. (2004). Comment conceptualiser les usages pédagogiques des environnements numériques de travail et d'apprentissage partagés ? In *Septième biennale de l'éducation et de la formation, Lyon, INRP* (pp. 1–4).

MEN. (1997). *Accompagnement des programmes de 5° et de 4°. Collection collège*. Paris: CNDP.

Mercier-Dequidt, C., & Morge, L. (2014). Analyse épistémique et didactique d'une nouvelle analogie pour enseigner l'électrocinétique. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, *14*(2), 187–206.

Michelet, S., Adam, J. M., & Luengo, V. (2007). Adaptive learning scenarios for detection of misconceptions about electricity and remediation. *International Journal of Emerging Technologies in Learning*, *2*(1), 1–5.

Morge, L., & Buty, C. (2014). L'énergie : vers des recherches plurididactiques. *Recherches En Didactique Des Sciences et Des Technologies*, 9–34.

Morge, L., & Masson, S. (2010). Dispositif d'expérimentation à caractère pédagogique pour l'enseignement de l'électrocinétique.

Mulhall, P., Mckittrick, B., & Gunstone, R. (2001). A Perspective on the Resolution of Confusions in the Teaching of Electricity. *Research in Science Education*, *31*(4), 575–587.

Newton, L. D. (2003). The occurrence of analogies in elementary school science books. *Instructional Science*, *31*, 353–375.

Osborne, R. (1983). Towards modifying children's ideas about electric current. *Research in Science Education and Technology Education*, *1*, 73–82.

Piotte, O. (2015). *Conception continuée dans l'usage d'un guide d'utilisation d'un dispositif analogique pour enseigner l'électricité du collège à l'enseignement supérieur*. France.

Rabardel, P. (1995a). *Les hommes et les technologies : approche cognitive des instruments contemporains*. Armand Colin.

Rabardel, P. (1995b). *Qu'est-ce qu'un instrument ?* Outil pour le calcul et le traçage des courbes – CNDP – DIE

Reuter, Y. (Ed.). (2007). *Dictionnaire des concepts fondamentaux des didactiques*. Bruxelles : De Boeck.

Robardet, G., & Guillaud, J.-C. (1997). *Eléments de didactique des sciences physiques*. Paris: Presses Universitaires de France (PUF).

Scott, P., Asoko, H., & Driver, R. (1991). Children's Learning in Science Research Group. In R. Duit, F. Goldberg, & H. Niedderer (Eds.), .

Shipstone, D., Von Rhöneck, C., Jung, W., Karlqvist, C., Dupin, J., Johsua, S., & Licht, P. (1988). A study of secondary students' understanding of electricity in five European countries. *International Journal of Science Education*, *10*(3), 303–316.

Szczygielski, C. (2009). Lecture et compréhension dans différents systèmes sémiotiques en électricité. *Aster*, *48*, 161–185.

Tiberghien, A. (2003). Des connaissances naïves au savoir scientifique. In M. Kail & M. Fayol (Eds.), *Les sciences cognitives et l'école. La question des apprentissages.* (pp. 353–413). Paris: Presses Universitaires de France (PUF).

Treagust, D. F., Harrison, A. G., & Venville, G. J. (1998). Teaching science effectively with analogies: An approach for preservice and inservice teacher education. *Journal of Science*

Teacher Education, *9*(2), 85–101.

Turgut, Ü., Gürbüz, F., & Turgut, G. (2011). An investigation 10th grade students' misconceptions about electric current. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *15*, 1965–1971.

Venturini, P. (1997). *Conception et évaluation d'une base de données hypermédia en électricité - Révision du programme de la classe de seconde*. Université Paul Sabatier, Toulouse III.

Viennot, L. (2002). *Enseigner la physique*. Bruxelles: De Boeck.

Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, *9*(4), 625–636.