

# ENSEIGNER L'ÉLECTRICITÉ ÉLÉMENTAIRE

*Dimitris Psillos, School of Education, Aristotle University of Thessaloniki, Grèce*

L'enseignement et l'apprentissage de l'électricité, sujet souvent inclus dans les programmes du primaire et du secondaire, a été l'objet de nombreuses investigations, de livres et de conférences (Duit et al., 1985 ; Caillot, 1992). L'image mondiale émergente n'est pas prometteuse, étant donné qu'un savoir adéquat concernant, par exemple, les circuits électriques a rarement été acquis par les élèves à la fin de l'enseignement secondaire. Les résultats de recherche fournissent une vue assez claire de la variété des idées alternatives des élèves spécifiques du sujet (une revue est présentée dans le chapitre C2). Ils montrent aussi que les élèves rencontrent des difficultés profondes au niveau des concepts et du raisonnement lors de la compréhension de l'électricité élémentaire. Ces difficultés tendent à être plus souvent ignorées que prises en compte dans l'enseignement habituel ou innovant.

Brièvement, les élèves ont des difficultés d'apprentissage relatives :

*i) au développement de raisonnement systémique*

Le raisonnement causal linéaire est mis en œuvre par les élèves pour rendre compte du fonctionnement des circuits électriques. Dans les circuits simples, les modèles causaux sont du type source-consommateur, ressemblant, d'un point de vue scientifique, à une vue énergétique du fonctionnement d'un circuit simple. Souvent, à la suite de l'enseignement de la résistance, des modèles séquentiels se développent, selon lesquels toute perturbation des trajets dans une direction affecte les composants du circuit en aval. Le raisonnement causal linéaire est fondamentalement différent du raisonnement systémique qui est nécessaire pour comprendre le circuit électrique comme un système fermé dans lequel tous les composants interagissent entre eux et toute perturbation s'étend dans toutes les directions.

*ii) à la différenciation conceptuelle*

Les élèves confondent les caractéristiques du courant et de l'énergie, la tension étant considérée comme une propriété du "courant", indiquant sa "force". Tous ces concepts scientifiques se réduisent à la notion globale non différenciée de "courant / énergie".

*iii) à l'établissement de relations phénoménologiques*

Les élèves ne relient pas les différents domaines phénoménologiques de l'électrocinétique et de l'électrostatique (Frederiksen & White, 1992). Pour les élèves, il n'y a pas de caractéristiques communes évidentes entre l'attraction et la répulsion de corps électrisés et l'éclairage d'une ampoule.

*iv) à relier différents modèles*

L'établissement de relations entre plusieurs modèles - les modèles qualitatifs et quantitatifs, les modèles macroscopiques avec des mécanismes sous-jacents microscopiques - est une autre source de difficulté pour les élèves (Eylon & Gniel, 1990).

Il faut remarquer que les difficultés des élèves telles que celles décrites ci-dessus ne sont pas spécialement limitées à l'électricité, mais qu'elles apparaissent dans d'autres domaines impliquant des processus physiques (Driver et al., 1994 ; Viennot, 1993).

## **Cheminements pour enseigner l'électricité**

Il apparaît que le consensus peu à peu atteint au sein de la communauté des chercheurs concernant les difficultés d'apprentissage des élèves n'a pas conduit à un consensus sur la pédagogie appropriée. Ainsi, pour trouver une remédiation, tous les cheminements qui ont émergé de recherches suivent une perspective constructiviste de l'enseignement et de l'apprentissage, selon laquelle l'apprenant est un agent actif de la construction de ses propres connaissances et considèrent que les connaissances préalables, spécifiques du domaine, sont un facteur crucial pour acquérir de nouvelles connaissances.

Dans un cheminement, les propositions questionnent la faisabilité et la valeur éducative de la poursuite de la compréhension par les élèves du mécanisme du circuit électrique. Puisqu'une compréhension adéquate des circuits électriques est difficile, l'argument est qu'il faudrait que l'enseignement se concentre sur des applications importantes, par exemple l'électricité à la maison et/ou l'économie de l'énergie électrique (Berg & Grosheide, 1993). Dans un autre cheminement, toutefois, plusieurs propositions se concentrent sur les stratégies efficaces pour rendre apprenables les caractéristiques essentielles de sujets plus traditionnels, tels que la fonction des circuits électriques.

Dans le deuxième cheminement, les propositions s'appuient sur les analogies et le raisonnement analogique comme moyen pour induire le changement conceptuel chez les élèves. Par exemple, les analogies hydrauliques sont suggérées de manière à faciliter la compréhension des circuits électriques comme un système fermé (Shwedes, 1995). Cependant, d'autres approches utilisent des stratégies de confrontation (Scott et al., 1993) comme un moyen de faciliter le changement conceptuel chez les élèves (Shipstone et al., 1988 ; Licht, 1991).

La caractérisation ci-dessus n'entraîne pas la mutuelle exclusion des stratégies et moyens employés dans plusieurs cheminements. Par exemple, l'utilisation de certains types d'analogies semble inévitable pour rendre intelligible la conservation du courant. Les différences reposent dans l'insistance relative portée sur les stratégies ainsi que dans les objectifs qu'elles visent.

Dans ce contexte, cet article présente, dans les grandes lignes, les aspects clés d'une approche pour enseigner l'électricité de base dans l'enseignement secondaire général, utilisant des stratégies de confrontation. Il s'agit de l'une des séquences d'enseignement développée dans le cadre d'un programme de recherche et d'innovation. Ces séquences concernent les différents aspects de l'enseignement de l'électricité, cet enseignement ayant été réalisé plusieurs années de suite par le groupe de l'enseignement scientifique<sup>1</sup> de la "School of Education" de l'université de Thessalonique (Psillos et al., 1987 ; Koumaras, 1989).

## **Le Savoir scientifique**

Toute approche de l'enseignement et de l'apprentissage de la science est influencée par des considérations concernant la structure et l'objet du savoir scientifique à enseigner. Nous acceptons ici que la modélisation du monde réel est la principale fonction du savoir scientifique (Hestenes, 1992). Le noyau du savoir scientifique comprend les modèles d'objets réels et les processus qui sont élaborés et partagés par la communauté scientifique de manière à interpréter la nature. Les modèles sont intégrés dans les théories et on peut les tester dans un champ expérimental (Bunge, 1973). Le processus de création des théories et modèles ne consiste pas en une extraction des facteurs communs d'une série d'observations, comme les empiristes le proclameraient (et comme cela a été admis dans plusieurs programmes de physique et dans la pratique d'enseignement). Selon l'épistémologie constructiviste, il y a des liens forts entre les questions posées à la nature, les observations et le cadre théorique.

---

<sup>1</sup> Science Education Group, School of Education

Les questions qui sont pertinentes dans un contexte théorique, n'ont pas de sens dans un autre. En électricité, une investigation sur la nature du fluide électrique (Stoelmayer & Treagust, 1994) n'est pas pertinente dans le contexte du modèle de Drude. Toute approche théorique réfère à un champ expérimental et est instrumentale dans la structuration de ce champ. Par exemple, l'unification des phénomènes électrostatiques et électrocinétiques a seulement été possible après les travaux de Ohm et Kirchoff et l'utilisation de charges de surfaces dans les circuits électriques. Les explications sont intégrées dans un cadre théorique dont l'évolution implique un changement du type d'explication et de causalité acceptée par la communauté scientifique. Suivant Faraday et Maxwell, le champ électromagnétique fournit une base pour expliquer les phénomènes électromagnétiques unifiés dans l'électrodynamique classique.

Dans le développement du savoir scientifique, il y a une interaction continue entre le champ expérimental, les modèles et la théorie ce qui montre le besoin de valider et d'établir des liens entre ces différents niveaux (Hestenes, 1995 ; Tiberghien et al., 1995). Un tel processus créatif requiert un effort intellectuel considérable et est habituellement le résultat d'une activité de collaboration produisant des modèles objectifs en ce sens qu'ils ont été validés et acceptés publiquement. Ainsi, les modèles et théories scientifiques transcendent les idées personnelles idiosyncrasiques qu'ont les élèves et qui sont des produits de l'interaction quotidienne avec les phénomènes et les idées. Ils deviennent des parties d'une culture partagée impliquant une manière particulière de "voir" la nature.

## Hypothèses sur l'enseignement de la science

Nous présentons brièvement les hypothèses suivantes, qui ont été prises en compte pour le développement de séquences d'enseignement sur l'électricité décrites dans ce chapitre. Ces hypothèses ne permettent pas de construire un modèle complet de l'enseignement et de l'apprentissage de la science, mais elles traitent de sujets importants pour faire correspondre les difficultés d'apprentissage des élèves avec nos perspectives épistémologiques.

En premier lieu, nous considérons qu'enseigner la science devrait impliquer tous les niveaux du savoir scientifique, c'est-à-dire la théorie, les modèles, le champ expérimental (Tiberghien et al., 1995). Toutefois, les modèles scientifiques sont différents, du point de vue de leurs objectifs et de leur structure, des idées personnelles des élèves sur le monde. D'un côté, cela signifie que la compréhension des modèles scientifiques et l'implication dans les activités de modélisation peut entraîner un changement conceptuel chez les élèves. D'un autre côté, les modèles scientifiques ne doivent pas être trop éloignés du raisonnement des élèves de manière à être intelligibles. Ceci implique la nécessité, dans de nombreux cas, d'une transformation du savoir scientifique afin de l'adapter à la causalité des élèves.

En deuxième lieu, dans l'enseignement scientifique, il devrait y avoir une cohérence entre les modèles à enseigner et le champ expérimental correspondant qui fournit la base expérimentale pour la construction du sens. Un corollaire de cette thèse est que l'élargissement du champ expérimental à enseigner devrait impliquer la présentation successive de modèles conceptuels plus puissants.

En troisième lieu, dans l'enseignement scientifique, les modèles devraient être traités comme des constructions hypothétiques. Ceci nécessite ainsi un processus de validation comme ingrédient essentiel pour le développement du savoir scientifique.

## Le développement de modèles

Nous décrivons les aspects principaux d'une séquence d'enseignement en électricité élémentaire, démontrant l'élargissement progressif du champ expérimental, tout comme les développements successifs des modèles correspondant. Des versions différentes de cette séquence ont été mises en oeuvre avec plusieurs groupes d'élèves (servant d'échantillons) de la

fin de l'école secondaire obligatoire en Grèce (15 ans). A ce niveau, la physique est enseignée comme une matière obligatoire pour deux ans. L'électricité est également enseignée à l'école primaire, dans le contexte d'un cours de sciences de la nature qui dure deux ans.

Les objectifs conceptuels de cette séquence comportent la description et l'interprétation du comportement d'un circuit et des phénomènes électrostatiques en termes des grandeurs physiques  $V$ ,  $I$ ,  $R$ ,  $E$ ,  $Q$  et  $t$ . Les objectifs cognitifs comportent la différenciation des concepts  $V$ ,  $I$  et  $E$ , le développement et l'utilisation de modèles appropriés pour rendre compte des phénomènes électriques, le lien des phénomènes électrostatiques et électrocinétiques et le développement d'une idée systématique des circuits électriques.

La séquence a été structurée en quatre parties. Les parties forment une hiérarchie développementale, en termes des questions émergentes, des modèles qui sont enseignés et du champ expérimental correspondant. Les modèles consécutifs suivent une logique interne mais ils sont liés les uns aux autres et conduisent à des niveaux plus profonds de compréhension de l'électricité. Par exemple, le concept de résistance n'est pas introduit dans la partie phénoménologique qui est la première de la séquence. Il est introduit qualitativement dans la partie conceptuelle macroscopique, et est ensuite relié au mécanisme microscopique dans la troisième partie, microscopique, et il est finalement étudié quantitativement dans la quatrième partie, quantitative.

### La partie phénoménologique

La partie phénoménologique a été conçue comme une longue période de familiarisation qui est caractéristique des approches constructivistes en électricité ainsi que dans d'autres domaines. La partie phénoménologique traite de questions qui ont du sens pour les élèves. Celles-ci, formulées au niveau des phénomènes, réfèrent à des objets et événements familiers. Elles sont dans la lignée du modèle des élèves d'une source qui consomme que nous appellerons "source consommatrice", par exemple : "comment une ampoule brille-t-elle ?" ou "que payons-nous à l'entreprise qui fournit l'énergie" ?.

Les piles, les ampoules et les applications familières, telles qu'une lampe de poche ou les lumières de l'arbre de Noël, constituent le champ expérimental. Nos résultats de recherche (Koumaras et al., 1994) nous conduisent à une décision importante concernant le champ expérimental, à savoir inclure des événements non seulement liés à l'intensité de l'éclairage mais aussi à sa durée. Ce choix élargit le champ expérimental, qui comprend habituellement, dans les programmes traditionnels et constructivistes, seulement des situations correspondant à des états stationnaires. Il en résulte que des événements tels que la durée de l'éclairage ou la "vie" de la pile, qui sont familiers aux élèves, sont abondamment traités dans la séquence. Nous nommons ces situations des situations évolutives.

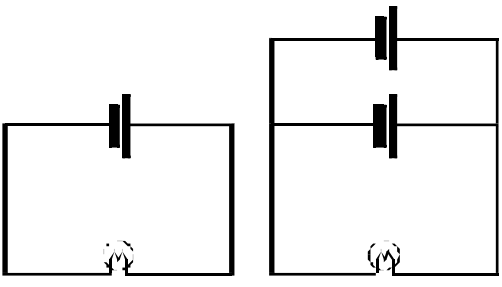
Dans notre cas, à ce stade de la séquence, les concepts scientifiques ne sont pas introduits. A la fin de la partie phénoménologique, il est prévu que les élèves soient familiarisés avec les phénomènes électriques et les expériences, qu'ils comprennent le circuit fermé, qu'ils construisent des relations de causalité relatives aux événements "instantanés" comme la brillance de l'ampoule et aux événements se prolongeant dans le temps comme la durée de l'éclairage, par exemple : "plus de piles en parallèle implique un éclairage sur une plus longue durée".

Depuis le début de la séquence, les élèves ont l'occasion de réaliser des expériences avec des piles, des ampoules et divers matériaux de manière à comprendre le circuit fermé et à classer les matériaux en conducteurs ou isolants. Le savoir acquis sur la continuité du circuit est ensuite validé pour les élèves lorsqu'ils tentent d'interpréter des situations familières mais non évidentes. Ainsi, par exemple, une véritable bicyclette est amenée dans la classe et on demande aux élèves de prédire et d'interpréter le circuit de sa dynamo.

Dans l'étape suivante, les élèves sont impliqués dans des expériences dans lesquelles ils peuvent faire varier le nombre de piles et d'ampoules ainsi que le type de branchements entre ces éléments. L'enseignement à ce stade est limité à l'établissement de relations entre des grandeurs observables, à savoir le nombre de piles et d'ampoules, la configuration du circuit et

les variations de l'éclairage. L'intensité et la durée de l'éclairage sont toutes deux considérées comme étant des effets importants. Ceci facilite l'intelligibilité du nouveau savoir et la construction de modèles causaux pour le fonctionnement du circuit, comme le montre l'extrait suivant de l'une des classes.

La tâche 1 (Figure 1) était présentée aux élèves pendant l'enseignement de branchements en parallèle de piles et d'ampoules après que les circuits fermés et les branchements en série de piles et de lampes aient été traités.

<p><b>Q1</b></p>  <p>Ampoule 1                      Ampoule 2</p>	<p>Les ampoules, piles et fils sont similaires pour les deux figures.</p> <p>Est-ce que l'ampoule 2 brille plus, moins ou pareil que l'ampoule 1 ?</p> <p>Justifier.</p>
--	--

**Figure 1 : La tâche des piles en parallèle**

Au départ, on demande aux élèves de faire leurs prédictions. La plupart d'entre eux répondent que l'ampoule 2 brillera plus que l'ampoule 1 : "parce que dans le deuxième circuit il y a deux piles alors que dans le premier il n'y en a qu'une".

Après avoir réalisé l'expérience, les élèves d'une classe devaient interpréter le fait que l'éclairage était identique. Au fil de la discussion avec l'enseignant, plusieurs élèves ont introduit la durée de l'éclairage de la manière suivante :

" .. Avec ce type de branchement, nous n'avons pas plus d'éclairage mais cela (éclairage/pile) durera plus longtemps."

" .. Avec ce branchement des piles, on gagne du temps, c'est-à-dire que l'ampoule restera éclairée deux fois plus longtemps que si elle était branchée avec juste une seule pile".

Des réponses similaires ont été observées dans d'autres classes, suggérant que lorsque les observations expérimentales sont différentes de leurs prédictions, plusieurs élèves utilisent l'évolution dans le temps pour le fonctionnement du circuit quand ils interprètent les données. En raisonnant en termes de temps/durée, ces élèves parviennent à fournir des explications plausibles, pour eux, sur les tâches correspondant à des états stationnaires. Notre recherche suggère qu'il s'agit d'une stratégie ingénieuse de raisonnement que les élèves utilisent effectivement pour réduire le conflit entre leurs prédictions et les résultats expérimentaux (Koumaras et al.).

Finalement, notons que l'on anticipe que les élèves persisteront dans leur modèle "source consommatrice" à la fin de la partie phénoménologique. Par exemple, l'ampoule restera un consommateur dans l'esprit des élèves ; elle n'a pas acquis le statut de résistor.

### La partie conceptuelle

Une fois que les élèves ont acquis une compréhension des circuits électriques au niveau phénoménologique, nos résultats suggèrent qu'on peut s'attendre à ce qu'ils posent des

questions conceptuelles du type "qu'est-ce qui (quelle grandeur) change lorsque le branchement de deux ampoules change ?"

Des modèles plus puissants, correspondant à un élargissement du champ expérimental et capables de fournir des réponses à des questions conceptuelles, sont développés à ce stade. Notre choix est, d'une part, de mettre en oeuvre un ensemble de phénomènes déjà rencontrés dans la partie phénoménologique tels que les branchements en série et parallèle de piles et d'ampoules. D'autre part, il est d'élargir le champ expérimental de manière à inclure des mesures avec le voltmètre et l'ampèremètre et des résistors. De nouveaux appareils domestiques électriques tels que les sèche-cheveux font partie des applications que les élèves devront utiliser.

Dans notre cas, la partie conceptuelle est fondée sur la modélisation de phénomènes électriques au niveau macroscopique, en incluant les concepts de tension ( $V$ ), d'intensité ( $I$ ), d'énergie ( $E$ ), de résistance ( $R$ ), de temps ( $t$ ). L'utilisation simple d'entités microscopiques (particules chargées, électrons) a lieu uniquement en réponse aux questions des élèves concernant "ce qui circule". Par rapport aux structures conceptuelles, nous pouvons remarquer que, à ce niveau, le domaine de connaissances doit être adapté au raisonnement des élèves de manière à être intelligible. En prenant en compte la causalité des élèves, le domaine de connaissance est décomposé en deux modèles causaux partiels de manière à rendre compte de la brillance et de la durée de l'éclairage. Le premier est le modèle du flux, qui met en jeu les grandeurs physiques  $V$ ,  $I$  et  $R$  ainsi que leurs relations. Le deuxième est le modèle énergétique, qui met en jeu les grandeurs physiques  $E$  et  $t$ .

Le point de départ pour la modélisation conceptuelle des circuits électriques est un sujet sur lequel il n'y a pas un accord entre tous les chercheurs. Dans le cas présent, la tension et l'énergie sont les premiers du groupe de concepts  $V$ ,  $I$ ,  $E$  à être présentées et ceci pour deux raisons. Tout d'abord, nous considérons que la re-conceptualisation de "l'intensité" vers un concept scientifiquement acceptable implique une différenciation conceptuelle principalement entre les concepts  $I$  et  $E$  qui a un coût cognitif considérable pour les élèves. Un tel changement conceptuel exige une préparation substantielle pour se produire et peut être aidé par l'acquisition de connaissances préliminaires concernant la tension et l'énergie (voir également Episode 1). Ensuite, le premier développement du concept de tension peut aider à une explication causale des circuits électriques, rendre les élèves plus attentifs à la tension qu'au "courant" et faciliter l'établissement de liens entre les phénomènes électrocinétiques et électrostatiques à la fois au niveau macroscopique et au niveau microscopique (Psillos et al., 1988). Après la tension, l'étape suivante consiste à introduire d'abord l'intensité et ensuite la résistance. Nos données suggèrent que faciliter la construction du concept de résistance joue un rôle prépondérant dans le développement d'un modèle de flux macroscopique et fournit un pont vers le modèle microscopique. C'est pourquoi l'accent est mis sur l'enseignement de la résistance.

Lors d'une première étape vers le développement de modèles conceptuels, les élèves réalisent des activités variées, présentées dans l'Episode 1. Lors de l'étape suivante, les élèves sont impliqués dans une expérimentation avec des ampoules et des ampèremètres et prennent des données qualitatives et semi-quantitatives. En plus des ampoules, les ampèremètres sont utilisés comme des indicateurs d'intensité, leurs indications suggérant que l'intensité reste la même tout le long du circuit. La conservation de l'intensité le long du circuit est discutée avec les élèves poursuivant ainsi la différenciation entre  $I$  et  $E$ . L'expérience bien connue, avec des ampoules et des ampèremètres en série, est utilisée pour montrer que les valeurs sont égales sur tout le circuit. Néanmoins, nos résultats nous conduisent à penser que certains des élèves considèrent l'ampèremètre comme un consommateur d'énergie au même titre que l'ampoule et qu'ainsi, ils peuvent intégrer les valeurs identiques données par l'ampèremètre dans leur modèle de "source consommatrice" (Psillos et al., 1987). Une analogie hydraulique, incluant une pompe, un circuit d'eau et un moulin, fournit une visualisation utile d'un système fermé dans lequel une grandeur (eau) circule et est conservée alors que l'énergie est transférée de la pompe et est utilisée dans le moulin. A ce point, le modèle du flux de courant commence progressivement à se développer. Les ampèremètres, même avec un point zéro<sup>ii</sup>, ne sont pas utilisés pour montrer que le courant circule dans une seule direction, ils ne sont pas convaincants pour les élèves. La

même chose s'applique aux aiguilles magnétiques. Nous avons discuté ailleurs que les effets magnétiques sont interprétables en termes du modèle "source consommatrice" et qu'ils devraient être utilisés seulement après le développement du concept d'intensité (Psillos et al., 1987). Les métaphores sont utilisées pour induire l'unidirectionnalité dans des cas tels que "dans les rivières, le courant circule seulement dans une direction". De plus, les élèves font également des expériences avec des piles indiquant des tensions différentes ce qui leur montre que pour un même circuit, l'intensité du courant dépend de la tension.

Lors de l'étape suivante, les élèves sont engagés dans des activités et des expériences concernant les résistors. Ils sont confrontés à une tâche difficile, à savoir relier les résistors aux ampoules et assigner deux fonctions au lieu d'une seule à ces deux objets qui sont celles d'utilisateur d'énergie et de régulateur de courant. Ceci est une étape cruciale où le modèle du flux de courant peut acquérir une signification pour les élèves, c'est-à-dire que le flux de "quelque chose" peut devenir le flux de particules "matérielles" invisibles. Les élèves développent souvent un modèle séquentiel et ceci indique leur progrès conceptuel. Dans l'Episode 2, les aspects d'une stratégie de confrontation concernant l'enseignement de la résistance sont présentés.

A la fin de la partie conceptuelle, les élèves développent une nouvelle relation entre E et I. Ils sont impliqués dans une série d'expériences qui suggèrent que le taux d'énergie transférée dépend non seulement de la quantité de courant dans un circuit, mais aussi de la tension. Par exemple, dans une expérience, une lampe de poche est connectée à une pile de 4,5 volts et une ampoule de la maison est branchée sur une prise de courant. Les ampèremètres dans les deux circuits ont les mêmes valeurs, mais les ampoules éclairent différemment.

### La partie microscopique

Les questions concernant les entités et mécanismes microscopiques émergent lorsque les élèves commencent à développer le concept de conservation de l'intensité du courant et en particulier la double fonction des résistors, à la fois utilisateurs d'énergie et régulateurs de courant. Par exemple, le dialogue suivant a été enregistré lors d'une discussion en classe :

*Es : Monsieur, si on mesure l'intensité juste avant une ampoule (dans un circuit pile-ampoule), l'ampèremètre devrait indiquer plus.*

*P : pourquoi ?*

*Es : Parce que les électrons s'accumulent lorsqu'ils passent à travers le résistor. Après le résistor, l'intensité est plus faible parce que moins d'électrons passent à travers.*

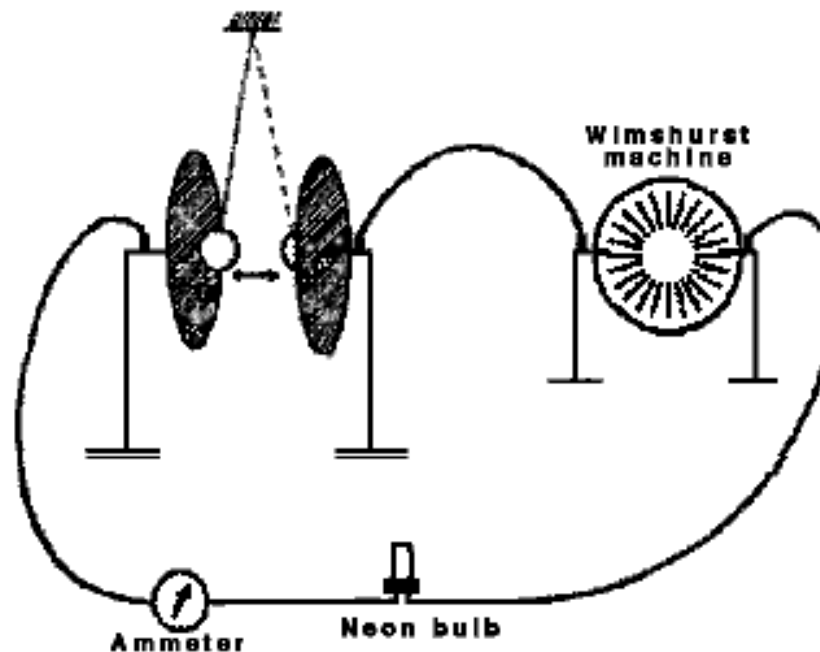
Ce modèle a été appelé le modèle "entassé" pour l'intensité et il est dans la lignée du traitement séquentiel des changements dans un circuit électrique. Ce qui importe dans notre discussion est que les élèves recherchent une explication au niveau du mécanisme microscopique de manière à rendre compte de la fonction d'un résistor et de la circulation du courant. Dans la partie microscopique, les modèles causaux qualitatifs sont développés et fournissent des réponses à de telles questions, ils renforcent les liens micro-macro et développent une compréhension du circuit électrique en tant que système.

Le champ expérimental est considérablement élargi, il inclut l'interaction entre les corps chargés électriquement, les machines électrostatiques et la conductivité dans les liquides. Des démonstrations expérimentales et des discussions conduites par l'enseignant sont menées pour la charge, l'attraction et la répulsion de corps chargés, les machines électrostatiques ainsi que pour la fonction d'une pile prototypique.

Une question cruciale à ce stade est : comment relier les champs électrostatiques et électrocinétiques, apparemment séparés pour les élèves ? Des expériences, analogies, métaphores, concepts et structures conceptuelles sont utilisées pour établir des liens à la fois aux niveaux des phénomènes et du modèle.

Par exemple, dans une expérience, la mesure de la tension entre les bras de la machine de Winhurst est reliée à la mesure de la tension entre les bornes de la pile. Une autre expérience

(Figure 2) est utilisée pour faciliter les liens entre la charge, le mouvement des corps chargés, l'éclairage et l'indication de l'ampèremètre. L'explication offerte est qu'une machine électrostatique peut accumuler des charges différentes à ses pôles et ainsi établir une valeur de tension entre eux. Dans les conditions appropriées, c'est-à-dire un circuit fermé composé d'une ampoule, la machine et un corps léger pouvant se déplacer entre les pôles, un courant électrique peut être créé.



**Figure 2 : Une tâche pour lier les phénomènes électrostatiques et électrocinétiques**

Les aspects cruciaux des mécanismes microscopiques du fonctionnement de la pile sont illustrés par des analogies ; par exemple, la séparation et l'accumulation de charges dans les bras de la machine de Whimshurst sont reliées à la séparation et à l'accumulation de charges dans les bornes de la pile. La tension et la charge sont présentées comme des concepts unifiant les phénomènes électrostatiques et électrocinétiques à la fois aux niveaux microscopique et macroscopique. La tension est reliée à l'accumulation différentielle de charges aussi bien aux deux bornes de la pile qu'à celles de la machine de Whimshurst. Des explications causales sont fournies aux élèves de manière à rendre les processus intelligibles. Par exemple, lorsque quelqu'un tourne la manivelle de la machine de Whimshurst, on peut observer la déviation de l'aiguille du voltmètre ; plus vous tournez vite, plus le nombre de volts indiqué est grand.

Un modèle causal simplifié est utilisé pour fournir un mécanisme explicatif du fonctionnement d'un circuit électrique. Ce modèle est centré sur la pile et la tension correspond au surplus et au manque d'électrons, créés par les réactions chimiques, sur les bornes de la pile. En conséquence, les forces d'attraction et de répulsion sont exercées sur les électrons libres, les mettant en mouvement et le courant est ainsi établi. L'espace limité de ce chapitre ne nous permet pas de donner une description détaillée de ce modèle. Il est néanmoins important de remarquer qu'un tel modèle est attractif pour les élèves car il fournit un mécanisme explicatif causal de ce qui se passe dans le circuit. Les variables macroscopiques  $I$ ,  $V$ ,  $R$  acquièrent une représentation microscopique qui facilite les relations micro-macro.

### La partie quantitative

Avec l'enseignement des parties précédentes, les élèves ont acquis une forte base qualitative, ils ont obtenu des mesures semi-quantitatives et ont exploré les covariations des grandeurs



physiques  $V$ ,  $I$  et  $R$ . Dans la partie quantitative, les relations quantitatives entre  $V$ ,  $I$ ,  $R$  sont enseignés de manière à répondre à des questions telles que : "si on double la valeur de la résistance, de combien le courant va-t-il diminuer dans un circuit comprenant un ampèremètre, des résistors en série et une pile de 4,5V ?".

Le champ expérimental est élargi dans sa partie quantitative de manière à inclure des branchements en série et parallèle de résistors, des mesures avec l'ohmmètre et une résistance spécifique. Un modèle macroscopique quantitatif est introduit, comprenant la loi d'Ohm et la relation  $R=\rho l/s$ . La variation de la résistance avec les changements de température sont également présentés.

Les élèves sont engagés dans des activités où ils utilisent des mesures pour étudier de manière quantitative les différents aspects de la relation fonctionnelle  $V=IR$ . Par exemple, ayant acquis le concept qualitatif de résistance et une représentation microscopique de ce concept, les élèves sont impliqués dans des mesures directes de la résistance avec un ohmmètre. Ils comparent ensuite ces données avec les valeurs de la même résistance calculées à partir des mesures données par le voltmètre et l'ampèremètre dans un circuit comportant une pile et deux résistors en série. Des mesures sont également relevées de manière à construire une représentation graphique de la relation  $I=V/R$ .

Une caractéristique spécifique de cette partie est que les élèves sont impliqués dans des expériences conçues pour faciliter la prise en compte de ce qu'un changement local, tel qu'une augmentation de la valeur de la résistance, implique un changement global dans le circuit, par exemple la valeur du courant ; ceci renforce la vue systémique du circuit. Par exemple, on demande aux élèves de réaliser des expériences pour prédire et interpréter la variation des indications d'un ampèremètre lorsqu'on ajoute un résistor en parallèle dans un circuit comprenant une pile reliée à un résistor :

*Lorsqu'on ajoute la résistance, l'ampèremètre indique plus parce qu'il y a un branchement parallèle... On a deux circuits, la pile doit fournir plus (de courant).*

## Stratégies d'enseignement

Plusieurs stratégies et techniques d'enseignement ont été appliquées pour faciliter les activités constructives des élèves ayant pour objectif la compréhension des modèles décrits ci-dessus. Habituellement, les élèves étaient impliqués dans une expérimentation et des discussions collaboratives guidées de manière à expliciter leurs idées, à prédire et interpréter les phénomènes. Certains aspects de deux stratégies de confrontation qui ont été mises en oeuvre sont décrits dans la section suivante.

### Episode 1 : faciliter la différenciation conceptuelle

Dans l'électricité élémentaire, le développement de concepts scientifiques implique que les élèves différencient les aspects dus au courant, à la tension et à l'énergie, à partir de la notion globale de "courant-énergie". Les étapes essentielles pour faciliter cette différenciation conceptuelle peuvent viser à renforcer les caractéristiques conceptuelles qui sont peu développées dans les connaissances initiales des élèves : la discrimination entre les caractéristiques des différents concepts, l'établissement de relations nouvelles entre les concepts (Kariotoglou et al. 1995). Cette stratégie a été appliquée dans le cas de la tension qui est, pour les élèves, un concept peu développé et subordonné à l'intensité. Une unité d'enseignement sur la tension et l'énergie a été incluse dans la partie conceptuelle, visant à renforcer le concept de tension en commençant à discriminer l'intensité de la tension et l'intensité de l'énergie. Les aspects de cette unité d'enseignement sont présentés ci-dessous.

### ***Changer le niveau de questionnement***

A la fin de la partie phénoménologique, les élèves posent des questions potentiellement conceptuelles telles que : "quel changement se produit dans un circuit lorsque l'on branche deux piles en série ou en parallèle ?" Le niveau d'une telle question est différent des questions phénoménologiques telles que : "Est-ce que la brillance de l'ampoule change lorsqu'elle est branchée à deux batteries en séries à la place d'une seule ?". L'introduction des concepts de tension et d'énergie vise à faciliter l'utilisation par les élèves des caractéristiques de la tension et de l'énergie pour fournir des réponses à de telles questions.

### ***Elargir le champ expérimental***

Le champ expérimental comprend des piles et des ampoules, comme nous l'avons mentionné précédemment. En plus de cela, le champ est élargi de manière à comprendre des voltmètres et leurs lectures.

### ***Valider les nouvelles connaissances***

Dans cette unité, les élèves prennent et utilisent des données qualitatives et semi-quantitatives pour valider les modèles conceptuels. Ils ont ainsi l'opportunité d'utiliser et de mettre en relation les indications du voltmètre jusqu'alors inconnues avec des objets ou événements familiers. Par exemple, les élèves lisent 4,5V sur une pile et ils vérifient qu'un voltmètre indique 4,5V, ou ils remarquent que deux piles branchées en série devraient donner 9V et le vérifient avec un voltmètre. Les mesures ne sont pas reliées à une définition formelle des grandeurs physiques tension et énergie, mais sont utilisées comme un moyen pour décrire les attributs de ces concepts.

### ***Introduire des modèles significatifs***

Comme nous l'avons déjà mentionné dans la section 4.2, les deux modèles partiels de l'énergie et du flux sont petit à petit mis en oeuvre au niveau conceptuel. Le niveau des relations causales change ; les élèves travaillaient jusqu'à lors en terme d'objets et d'événements, on leur demande à cette étape là de décrire et d'interpréter des phénomènes similaires en termes de grandeurs physiques. Dans le modèle du flux, la tension est introduite comme un concept primaire avec une référence directe à la pile, ce qui signifie que c'est son potentiel qui établit le "courant" dans un circuit. La tension est reliée de manière causale à la génération de courant. Dans le modèle énergétique, l'énergie est reliée au volume de la pile (pour des piles du même type), en ce sens qu'une pile est un réservoir d'énergie. En termes de modèle énergétique, l'énergie stockée dans la pile est reliée de manière causale à la durée de l'éclairage. Cette approche est radicalement différente de nombreuses autres approches traditionnelles dans lesquelles la tension et l'énergie sont introduites par des relations fonctionnelles. Elle est dans la lignée de recherches suggérant que les élèves comprennent mieux les propriétés des objets que les relations entre concepts.

### ***Elaborer les modèles***

Les nouvelles connaissances sur la tension sont introduites en utilisant ce qui est familier pour les élèves, à savoir l'indication des volts sur une pile. Au début de l'unité, les élèves comparent la brillance d'ampoules similaires, branchées sur des piles sur lesquelles le nombre de volts indiqué est différent. A ce stade, les élèves sont informés que les volts mesurent une nouvelle grandeur, la tension. Ils comparent ensuite les variations de brillance en utilisant des piles branchées en série et en parallèle et recommencent les mêmes expériences en utilisant le voltmètre. Les étapes essentielles des évolutions de leur raisonnement sont présentées ci-dessous.

Les résultats en classe montrent qu'initialement, pour plusieurs élèves, le nombre de volts indique la quantité de "courant" stocké dans la pile, qu'elle fonctionne ou non dans un circuit.

*T : Après tout ce que vous avez vu dans cette leçon jusqu'à maintenant, qu'est-ce que vous pensez que les volts indiquent ?*

*S3 : C'est la quantité que la pile a*

*T : Quelle quantité ?*

*S3 : Courant*

*T : Est-ce que les autres sont d'accord ?*

*Ss : oui*

Il semble que les élèves conceptualisent seulement "la quantité stockée" dans la pile, dont le montant détermine combien de "courant" est "donné" à la pile. Un schéma qu'il est possible d'appliquer aux élèves est "plus j'en ai, plus j'en donne". Ainsi, deux piles en série ont plus de "courant" et ainsi donc peuvent "donner" plus de "courant" au circuit, et de là, la brillance augmente. De cette manière, les résultats expérimentaux sont interprétés en termes du modèle des élèves de source consommatrice.

Lors d'une deuxième étape, deux démonstrations conduites par l'enseignant sont utilisées pour faciliter la discrimination entre tension et énergie d'une part et tension et intensité d'autre part. La première implique deux piles de même tension mais de tailles différentes. Celles-ci sont branchées sur des ampoules similaires. Dans cette expérience, on demande aux élèves de prédire et d'interpréter la brillance de chaque ampoule et la durée de leurs éclairages. Les données en classe montrent que dans la deuxième étape, quelques élèves (voir S3) relient le volume de la pile à la "quantité stockée", qu'ils distinguent de la tension.

*T : Si on branche ces deux piles (même V, tailles différentes) à deux ampoules similaires, est-ce qu'elles brilleront pareil ?*

*S3 : Oui*

*T : Est-ce que tu es sûr, celle-ci est très grosse ?*

*S3 : Ce n'est pas important puisque les volts sont les mêmes, les piles ont la même force. Celle-ci (la petite) finira vite, la grosse mettra plus de temps.*

*S2 : les deux (piles) finiront en même temps.*

*S3 : la grosse a plus d'énergie, elle est plus grosse.*

*S2 : Si elle a plus d'énergie, l'ampoule brillera plus.*

*S3 : la quantité, pas la force.*

Ici, les élèves conceptualisent la tension comme déterminant la "puissance/force" du "courant donné" par la pile à l'ampoule. Ces conceptions sont plus élaborées que le premier schéma et sont partiellement correctes. Toutefois, les élèves ne distinguent pas vraiment l'utilisation de ces conceptions comme une seconde variable qui conditionne l'interaction entre la pile et l'ampoule, lorsqu'elles fonctionnent dans un circuit. Les élèves relient toujours la tension au "courant" et, probablement, le volt est une unité pour mesurer le "courant".

Dans la deuxième expérience, un voltmètre est branché en série à une pile et une ampoule. Les données en classe montrent que les élèves attribuent la tension à la pile lorsqu'ils essaient d'interpréter l'indication d'un voltmètre branché en série à une pile et une ampoule qui, dans ce cas, ne brille pas.

*T : Est-ce qu'on a du courant dans le circuit*

*S3 : Non*

*T : Comment est-ce que tu sais ça ?*

*S3 : L'ampoule ne brille pas.*

*T : Est-ce que les volts mesurent le courant ?*

*S2 : Non*

*T : Pourquoi ?*

*S2 : Si les volts mesuraient le courant, l'ampoule brillerait.*

La tension indique maintenant la "puissance/force" de la pile. Il apparaît que, dans une troisième étape, la tension est conceptualisée comme une caractéristique permanente de la pile qui est valable, qu'elle fonctionne ou non dans un circuit. Avec l'aide des métaphores (en utilisant le terme Grec pour la tension "tassi" qui signifie également tendance, disposition à faire), les élèves relient la tension à la disposition de la batterie à "donner du courant" à l'ampoule et non le courant qu'elle "a" ou qu'elle "donne", selon les objectifs de l'unité :

*T : D'accord, est-ce que l'un d'entre vous nous dit ce que vous avez appris aujourd'hui.*

*S1 : Nous avons appris que la tension est en premier et après le courant, le voltmètre ne mesure pas la force du courant, il ne mesure pas la quantité, il mesure les volts.*

*S3 : La tension*

*S2 : Euh... tension*

*T : Qu'est-ce que signifie cette tension? De quoi est-ce la caractéristique ?*

*S3 : la pile, qui donne de l'énergie à l'ampoule.*

*S4 : La disposition de la pile à donner du courant à l'ampoule.*

Cette étape est difficile et elle prend du temps pour devenir significative. Ainsi on a noté des interversions entre les étapes dans les conceptions des élèves pendant et après l'unité d'enseignement. Dans les unités suivantes, la discrimination conceptuelle est renforcée alors que de nouvelles relations entre la tension, l'énergie et l'intensité sont construites, de manière à aider les élèves à différencier ces concepts et à acquérir peu à peu leurs significations scientifiques.

## **Episode 2 : induire un conflit cognitif significatif**

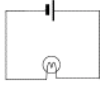

Nous présentons ici les aspects d'une stratégie de conflit cognitif visant à faciliter la construction par les élèves d'un modèle pour les résistors et le concept de résistance. Comme nous l'avons discuté ailleurs (Koumaras et al., 1995), cette stratégie est fondée sur l'acquisition de connaissances préliminaires par les élèves : la confrontation avec des contre évidences<sup>iii</sup> reconnaissables, la présentation concomitante d'une explication alternative meilleure ; l'application de nouvelles connaissances. Un aspect crucial pour l'efficacité d'une telle stratégie concerne ce qui est reconnu comme contre évidence par les élèves.

Une part essentielle de cette stratégie porte sur l'acquisition progressive de connaissances initiales relatives à la résistance. Par exemple, les élèves sont impliqués dans des expériences sur la covariation de la longueur d'un résistor avec les indications de l'ampèremètre et la brillance de l'ampoule branchée en série sur une pile. En outre, ils touchent et sentent que la température d'un résistor, tel qu'un fil de nichrome, augmente lorsque le courant passe à travers, mais que cela n'est pas le cas pour un conducteur comme le fil de cuivre. Cette approche est différente de l'enseignement habituel, qui traite souvent les effets thermiques du courant séparément des résistors. Les élèves prennent conscience qu'une ampoule est un résistor en expérimentant, en résolvant des problèmes, en discutant et en échangeant leurs points de vue en travail de groupe. Nos résultats suggèrent cependant que de telles connaissances sont toujours interprétables en termes du modèle source consommatrice. Par exemple, dans l'expérience ci-dessus, pour les élèves, le résistor ne chauffe pas parce qu'elle constitue un obstacle, mais parce qu'elle consomme plus d'énergie. De là, à la fois la brillance de l'ampoule et la lecture de l'ampèremètres décroissent :

*"Dans l'expérience avec le fil de nichrome, le courant devient plus petit parce qu'il est consommé de manière à rendre le fil chaud, alors il y a moins de courant qui arrive dans l'ampoule, qui devient plus pâle. Pour l'expérience avec le fil de cuivre, la brillance de l'ampoule et la lecture de l'ampèremètre restent les mêmes, parce que le fil de cuivre ne devient pas plus chaud. Le fil (de cuivre) ne consomme pas de courant du tout et tout le courant va dans l'ampoule qui brille beaucoup" (réponse typique de plusieurs élèves pendant l'enseignement).*

Ayant acquis les connaissances pré requises, les élèves sont alors engagés dans une situation de conflit, pendant laquelle on leur demande de prédire la durée de l'éclairage dans deux circuits. L'un comporte une pile et une ampoule et l'autre une pile branchée en série avec deux ampoules. Cette expérience va à l'encontre de l'intuition des élèves du fait que les résultats ne peuvent être ni prédits ni interprétés à partir de leur type de causalité. Si l'on demandait aux élèves de comparer la brillance des ampoules, ils pourraient facilement prédire les résultats. En ce qui concerne la durée, une ampoule a une capacité constante à recevoir du courant, deux ampoules sont supposées avoir une double capacité et donc, elles s'éteindront avant. En prenant en compte la brillance moins importante, les prédictions des élèves peuvent aller jusqu'à la durée égale d'éclairage dans les deux circuits, comme l'ont montré les données de classe.

*S : (ce résultat) ne peut pas être expliqué. Normalement, l'autre pile devrait finir plus tôt (celle branchée sur deux ampoules), ou au moins, elles devraient finir en même temps."*

<p><b>Q3</b></p> <p>Pile 1      Pile 2</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Q3</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Battery 1</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Battery 2</p>  </div> </div> <p style="font-size: small;">All bulbs, batteries and wires in both figures are similar.</p> <p style="font-size: small;">Battery 2 will wear out together, earlier or later than Battery 1?</p> <p style="font-size: small;">Justify.</p> </div>	<p>Toutes les ampoules, piles et fils des deux figures sont semblables.</p> <p>La pile s'épuisera-t-elle en même temps, plus tôt ou plus tard que la pile 1 ?</p> <p>Justifier.</p>
--	---

**Figure 3 : Exemple d'une expérience à l'encontre de l'intuition**

L'expérience ci-dessus satisfait les critères suivants. En premier lieu, elle a du sens pour les élèves car elle est fondée sur des questions émergeant du modèle source consommatrice. En deuxième lieu, les résultats expérimentaux sont reconnus comme stimulants, car ils ne sont pas en accord avec le raisonnement causal des élèves, selon lequel deux ampoules devraient consommer plus, et donc l'éclairage devrait continuer moins longtemps. Nous considérons que l'extension du champ expérimental à la durée de l'éclairage, ce qui correspond à l'introduction de tâches évolutionnistes, permet de changer une expérience conventionnelle en une expérience qui est reconnue par les élèves comme allant à l'encontre de l'intuition (Koumaras et al.).

Une partie intégrante de la stratégie est la présentation, simultanée à l'insatisfaction créée chez les élèves, d'une solution fournissant une meilleure explication alternative des deux fonctions du résistor : être un chemin pour le courant et être un utilisateur d'énergie, en termes du mécanisme microscopique unificateur. (Le mécanisme à ce niveau est simple ; les électrons sont présentés comme des particules qui remuent et qui chauffent les fils par friction) (Posner et al., 1982). La construction de la connaissance désirée concernant la résistance est ensuite facilitée par l'interprétation des résultats précédents et par un grand nombre de nouvelles applications en termes de nouvelles connaissances.

## Quelques résultats

Un éventail de techniques, telles que les entretiens semi-directifs, les enregistrements en classe et des questionnaires écrits ont été utilisés afin de contrôler l'évolution conceptuelle des élèves pendant et après enseignement. Dans cette section, nous présentons brièvement des commentaires fondés sur les résultats obtenus à partir de l'administration de post tests à 156 élèves à qui l'on a enseigné la séquence durant plusieurs années. Certaines comparaisons sont également faites avec des résultats obtenus avec un échantillon de référence important comprenant 313 élèves qui ont suivi le programme officiel (Koumaras et al., 1991).

La grande majorité des élèves ont répondu correctement pour les tâches sur le circuit fermé. Les tâches centrées sur la valeur de l'intensité dans des circuits comprenant des piles et des ampoules ont été données aux élèves. Près de la moitié des élèves ont utilisé le modèle scientifique du courant, en distinguant le courant de l'énergie et en reconnaissant la conservation du courant. Néanmoins, près d'un cinquième des sujets ont continué à raisonner en terme de modèle de source consommatrice dans de nombreuses tâches, et n'ont pas différencié l'énergie du courant. La majorité des élèves ont répondu correctement aux questions concernant ce qu'est le volt, ce que la grandeur tension indique et comment elle est mesurée. Concernant la relation tension-intensité, entre la moitié et les deux tiers des élèves ont donné des réponses correctes.

En ce qui concerne les raisonnements, on peut remarquer que près de la moitié des élèves ont reconnu qu'un changement dans un circuit implique des modifications de tous les paramètres du circuit dans le cas où les changements portent sur les valeurs de la résistance. Il est utile de remarquer que plusieurs de nos élèves ont développé une vue locale du circuit électrique lorsqu'on leur a enseigné la résistance. Plus tard durant l'enseignement, ils ont abandonné cette vue locale en faveur d'une vue systémique, mais près d'un tiers ont conservé la vue locale générée par l'enseignement. Des réussites similaires ont été obtenues lors de tâches concernant les branchement en série et en parallèle de piles et d'ampoules pour lesquels les sujets expérimentaux ont utilisé le savoir enseigné à la place des règles causales basées sur le modèle source consommatrice, qui était utilisé avant enseignement. Tous ces résultats étaient significativement meilleurs que ceux obtenus dans l'échantillon de référence d'élèves de l'école secondaire Grecque inférieure et supérieure. Par exemple, la majorité des élèves de l'école secondaire supérieure ont montré l'utilisation des modèles séquentiels après enseignement, mais n'ont pas montré de raisonnement systémique.

Les résultats expérimentaux permettent deux points de vue. Le point de vue pessimiste regarde les conceptions alternatives qui se manifestent chez un certain nombre d'élèves en dépit de leur implication dans une importante séquence d'enseignement constructiviste spécialement conçue. En outre, certaines des conceptions alternatives ont probablement été créées par l'interaction entre l'enseignement et les connaissances des élèves. Le point de vue optimiste prudent considère deux résultats. Premièrement, les progrès considérables qui ont été réalisés pendant et après enseignement. Deuxièmement, les résultats qui sont significativement meilleurs en comparaison des pratiques existantes au moins en Grèce et même avec les élèves de l'école secondaire supérieure<sup>iv</sup>.

## Remarques et conclusion

Les enseignants et les chercheurs sont concernés par l'enseignement de l'électricité, du fait que ce thème apparaît dans les programmes du monde entier, du primaire et du secondaire. La recherche de type diagnostic a été fructueuse pour identifier les difficultés d'apprentissage des élèves. La recherche sur l'enseignement est fondée sur des approches constructivistes et s'est centrée sur des cheminements alternatifs qui peuvent faciliter la construction de connaissances scientifiques par les élèves. Un changement notable est que cet enseignement de l'électricité tient compte des difficultés des élèves et ne vise pas seulement à présenter des contenus de manières appropriées.

Dans notre cas, nous avons décidé d'élargir le champ expérimental de façon à inclure non seulement les états stationnaires, mais également les situations évolutives, de lier les phénomènes électrocinétiques et électrostatiques, de développer des modèles adaptés au raisonnement causal des élèves, de débiter la modélisation conceptuelle par la tension et l'énergie en introduisant ces concepts comme primaires et non comme des concepts relationnels, de présenter une hiérarchie de modèles permettant de répondre progressivement à des questions sophistiquées et conduisant à des niveaux croissants de compréhension. Les résultats de recherche permettent d'avoir un point de vue raisonnablement optimiste par rapport à l'efficacité de cette séquence.

Nous suggérons que, pour l'enseignement de électricité élémentaire, on modifie la représentation traditionnelle des connaissances qui est basée sur le contenu en une représentation des connaissances qui soit valide pédagogiquement. Pour que cette modification se réalise, un changement conceptuel doit se produire dans l'esprit des concepteurs de programmes, des formateurs de maîtres et des enseignants.

## Références

Bunge, M.(1973).*Method and Matter*. Dodrech, Holland: D.Reidel.

Van de Berg, Ed & Grosheid, W. (1993). Electricity at home: Remediating alternative conceptions through redefining goals and concept sequences and using auxiliary concepts and analogies in 9th grade electricity education. In Novak, J. (ed.): *Proceedings of the Third Intern. Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Maths*, Ithaca, N.Y.: Cornell Univ.

Chinn, C. & Brewer W.(1993). The role of anomalous data in knowledge acquisition: A theoretical framework and implications for science instruction. *Review in Educational Research*. Vol **61**(1), pp.1-49.

Driver, R., Rushworth, P., Wood-Robinson,V., Squires, A. (Eds.) (1994). Making sense of secondary science (Research into children's ideas).

Duit R., Jung W. & Rhoneck C. (Eds) (1985). Aspects of Understanding Electricity: The proceedings of an International Workshop (I.P.N., Kiel)

Eylon,B.S., Ganiel,U., (1990). Macro-micro relationships: the missing link between electrostatics and electrodynamics in students' reasoning. *International Journal of Science Education*, Vol.12(1), pp.79-94

Frederiksen, J. & White, B. (1992). Mental models and understanding: A problem for science education. In E. Scanlon and T.O'Shea (Eds.), *New directions in educational technology*. NATO ASI series F, vol 96, 211-225. (Berlin: Springer-Verlag)

Hestenes,D., (1992).Modelling games in the Newtonian World. *American Journal of Physics*. Vol 60(8), pp.732-748.

Koumaras, P. (1989). *A study on a constructivist approach to the experimental teaching of electricity*. Unpublished Ph.D. thesis Physics Dept., Univ. of Thessaloniki (in Greek).

Koumaras, P. Psillos, D., Valassiades, O. Evagelinos D. (1991). A survey of secondary education students' ideas in the area of electricity. *Pedagogical Review* 13, 125-154. (In Greek)

Koumaras, P., Kariotoglou, P.& Psillos, D. (1994). Devons-nous utiliser des activités évolutives en introduction à l'étude de l' électricité? Le cas de la résistance. *Didaskalia*. Vol.1 (4), pp. 107-20.

Koumaras,P., Psillos, D., Kariotoglou,P., (to be published) Causal structures and counter - intuitive experiments in electricity *International Journal of Science Education*.

Licht, P. (1991). Teaching electrical energy, voltage and current: an alternative approach. *Physics Education*. Vol.26 (5), pp. 272-77.

Posner, GJ, Strike KA, Hewson PW & Gertzog, WA (1982) 'Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change', *Science Education*, 66, 211-27.

Psillos, D., Koumaras, P. & Valassiades, O. (1987). Students' representations of electric current before, during and after instruction on DC circuits. *Journal of Research in Science and Technological Education*. Vol. 5 (2), pp. 185-189.

Psillos, D., Koumaras, P. & Tiberghien, A. (1988). Voltage presented as a primary concept in an introductory teaching on D.C. circuits. *International Journal of Science Education*. Vol.10 (1), pp. 29-43.

Psillos, D. & Koumaras, P. (1993). Multiple causal modelling of electrical circuits for enhancing knowledge intelligibility in Caillot, M. (Ed.) *Learning Electricity and Electronics with Advanced Educational Technology*, ASI series Vol. F115, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, pp. 57-75.

Lijnse, P., (1995) Trends in European Research? In Psillos D. (Ed) *Proceedings of the second PhD Summerschool on European Research in Science Education*, ( 15-25)Thessaloniki, Art and Text.

Scott, P.,H., Asoko H. M.& Driver, R. H. (1993). Teaching for conceptual change: A review of strategies. In Duit, R, F. Goldberg and H. Niedderer (eds) *Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies*, *Proceedings of an International Workshop* (pp. 310-329). Kiel, IPN.

Schwedes, H.(1995). Teaching with Analogies. In Psillos D. (Ed.) *Proceedings of the second PhD Summerschool on European Research in Science Education* (p. 37-56), Thessaloniki : Art of Text

Shipstone, D.M. (1988). Students' understanding of simple electrical circuits. *Physics Education*. Vol.23 (2), pp.92-96.

Shipstone, D. M, Von Rh neck, C., Jung, W., K rrvqvist, C., Dupin, J. J., Joshua, S. and Licht, P. (1988). A study of students' understanding of electricity in five European countries, *International Journal of Science Education*. Vol 10(3), pp.303-316.

Stocklmayer S., Treagust D., (1994). A Historical Analysis of Electric Currents in Textbooks: A Century of Influence on Physics Education. *Science & Education* 3, 131-154.

Tiberghien, A., Psillos,D., Koumaras,P. (1995). Physics Instruction from Epistemological and Didactical Bases. *Instructional Science* pp.1-22.

Viennot, L. (1993). Fundamental patterns in common reasoning: Examples in Physics. In P. L. Lijnse (ed.), *European Research in Science Education: Proceedings of the First PhD Summerschool*. (pp. 33-47). Utrecht, C dß Press, Centrum voor ß-Didactiek.

---

<sup>i</sup> en France cette entreprise est l'EdF (Electricité de France)

<sup>ii</sup> il s'agit d'ampèremètres permettant une lecture algébrique

<sup>iii</sup> nous avons ici traduit counter-evidence par contre-évidence alors que dans d'autres contextes "evidence" a été traduit par preuve. "Evidience" en anglais est lié à la notion de preuve dans un procès ou de témoignage. Ce n'est pas la preuve au sens mathématique (proof en anglais).

<sup>iv</sup> Pour la France l'école secondaire supérieure correspond au lycée