



Observation de chemins suivis par les élèves dans l'apprentissage des bases de l'électrocinétique

Student's learning paths observation in basic electricity

Marie-France MISSONNIER

LDSP, université Paris VII
Lycée d'Arsonval,
19100 Brive, France.

Jean-Louis CLOSSET

LDSP, université Paris VII
Faculté universitaire des sciences agronomiques
2, passage des Déportés,
5030 Gembloux, Belgique.

Résumé

Une démarche d'ingénierie didactique relative à l'enseignement de l'électricité en classe de seconde (grade 10) en France a permis d'observer des étapes de son apprentissage par les élèves. Des analyses préalables nous ont conduits à tester quatre hypothèses reposant sur la maîtrise des pré-requis, une approche énergétique préalable du circuit électrique, une démarche qualitative et une introduction indépendante des concepts. Leur

mise en œuvre, d'abord dans la classe du chercheur, puis dans d'autres classes, enfin dans d'autres académies ont permis de découvrir :

- *des aides à l'apprentissage, comme la maîtrise des prérequis ou l'approche qualitative, facilitées par des classes plutôt homogènes et des espaces de remédiation ;*
- *des chemins d'apprentissage du concept d'intensité électrique ;*
- *des difficultés non résolues comme le passage au formalisme ;*
- *l'élaboration par ces élèves d'un savoir d'une nature différente.*

Mots clés : *didactique, électricité, chemin d'apprentissage, ingénierie didactique, lycée.*

Abstract

A didactic engineering approach about the teaching of electricity for a grade 10 class in France has led to the observation of the progressive stages of students' learning paths. Previous analyses has led to test four hypotheses based upon the prerequisites' mastery, a previous energetic approach of the electric circuit, a qualitative approach and an independent presentation of the required concepts. The implementation of all these, in the researcher's class, first, in other classes in the same or in others academies, after, have led the discovery of :

- *learning effective assistances such as a prerequisites' mastery or a qualitative approach which is facilitated by relatively homogeneous classes and remedial work ;*
- *learning paths of the concept of intensity ;*
- *unresolved difficulties about the transition towards formalism ;*
- *the fact that these students have worked out a different knowledge.*

Key words : *sciences education, electricity, learning path, didactic ingenieering, upper secondary school.*

1. RAPPEL DE QUELQUES RÉSULTATS ISSUS DE LA RECHERCHE EN DIDACTIQUE

La physique serait une discipline difficile d'accès (Johsua, 1983) et l'électricité difficile à apprendre (Tiberghien *et al.*, 1995). Leur enseignement habituel est le plus souvent celui d'une science dépourvue de modélisation, réduite à des mesures (Canal, 1996), des formules (Lemeignan & Weil-Barais, 1993) ou des recettes (Johsua, 1985) ce qui n'intéresse pas l'élève et lui permet de conserver ses représentations qui se retrouvent au niveau universitaire (Closset, 1983). Nous pensons, tout au contraire, qu'il faut engager

les élèves dans une démarche d'apprentissage qui ait du sens, ce qui nous a conduits à nous intéresser aux représentations, plus spécialement en électricité, à la nature du savoir scientifique et aux processus d'apprentissage.

1.1. Les représentations

1.1.1. Généralités

Pour appréhender le réel par la pensée l'homme doit s'en faire une représentation. Ces représentations, élaborées à partir du vécu de phénomènes de la vie courante, lui permettent d'anticiper les événements et de réguler son action (Lemeignan & Weil-Barais, 1993).

Ainsi, les élèves arrivent en classe avec des représentations efficaces au quotidien, qui se révèlent tenaces et résistantes à l'enseignement. Souvent, elles ne cèdent pas d'un coup. Plusieurs cohabitent chez un même individu, « *leur activation dépend de la situation proposée* » (Johsua, 1985, p. 5).

1.1.2. Les principales représentations en électrocinétique

Nous nous intéressons à des élèves de seconde (grade 10) en France. Ces élèves, à l'entrée en seconde, répondent à des questions portant sur le circuit électrique essentiellement en termes de **courant**. Ce terme appartient au domaine de la physique, mais les propriétés que l'élève lui attribue ne sont pas celles du physicien (Lemeignan & Weil-Barais, 1993). Pour certains il peut exister un **courant statique** dans les fils en circuit ouvert (Closset, 1983), qui peut devenir un **fluide matériel** en circuit fermé « *métaphore du fluide en mouvement* » (Johsua, 1985, p. 2), ayant certaines propriétés de **l'énergie** (stockage, transfert, transformation), mais sans conservation (Von Rhöneck, 1982).

Lors de nos essais préliminaires, nous avons mis en évidence, chez la majorité de nos élèves, l'ignorance des concepts de circuit, de circulation et de différence de potentiel. Le plus souvent, l'élève ne sait pas si une résistance placée dans un circuit simple élève ou diminue l'intensité.

Pour répondre aux questions en termes d'intensité, l'élève considère toujours le **générateur** ayant un **débit constant** quelles que soient les modifications apportées au circuit. Il cherche à rendre compte des échanges énergétiques dans une relation agent-patient où, le plus souvent, c'est la pile qui impose un débit au circuit, lequel se trouve généralement modifié soit :

- uniquement à l'intérieur de la résistance, **raisonnement local**,
- soit à partir de celle-ci, **raisonnement séquentiel** (Closset, 1983), majoritaire à l'entrée en seconde. Il conduit l'élève à :

- prévoir un éclairage différent pour des ampoules identiques montées en série,
- attribuer une importance à la place du fusible ou
- imaginer du courant en amont d'un interrupteur ouvert (50 % des élèves).

En début de seconde, plus rares sont les élèves au raisonnement à **courant constant** où la résistance serait sans effet sur le courant, lequel resterait identique à lui-même en tout point du circuit, quoi qu'il lui arrive.

1.2. Analyse des contenus à enseigner

1.2.1. Nature de la connaissance scientifique

Le raisonnement usuel met volontiers en jeu des histoires d'objets avec leurs propriétés et leurs fonctions (Lemeignan & Weil-Barais, 1992). Les représentations, le plus souvent non conscientes et implicites, ont un statut d'évidence non ouverte à la réfutation.

Si le scientifique cherche aussi à se représenter le monde, c'est à l'aide d'un **modèle** au caractère hypothétique et révisable (Popper, 1988). Il reconstruit un monde idéal, à l'aide de grandeurs physiques, reproduisant certains phénomènes du monde réel. Les éléments de construction, nommés **concepts**, ne sont pas des propriétés intrinsèques de l'objet, n'existent pas réellement, ont été librement inventés. On les définit et on les mesure. Cette connaissance est explicite, questionnable, structurée, cohérente et partagée par une communauté.

Ainsi le physicien se livre-t-il à « *une activité en rupture avec le sens commun* » (Johsua, 1983, p. 69), car « *le réel n'est jamais "ce qu'on pourrait croire", mais il est toujours ce qu'on aurait dû penser* » (Bachelard, 1986, p. 13). Nous voulons partir des représentations initiales de l'élève, qui ne sont autres que des tentatives de réponses à ses interrogations centrées sur l'énergie, et le conduire au besoin de concepts. Or le modèle construit n'est qu'une représentation partielle du réel, qui peut être considérée comme un outil imparfait susceptible d'améliorations successives. Ainsi la modélisation peut être abordée à différents niveaux ce qui devrait permettre de la rendre accessible à l'élève par une transposition didactique (Chevallard, 1985).

1.2.2. Le modèle de fonctionnement du circuit que nous souhaitons voir construire

Le modèle repose sur l'existence d'une représentation du circuit et de la circulation au sein de celui-ci. Nos questionnaires préliminaires ayant révélé que la moitié de nos élèves les ignoraient, nous nous sommes trouvés

dans l'obligation de construire la notion de circuit, chaîne conductrice fermée, y compris à l'intérieur du générateur, condition nécessaire pour qu'un courant (mouvement ordonné de porteurs de charge) puisse circuler. Au contraire, s'il existe une ouverture, rien ne circule nulle part.

Les élèves empruntent le plus souvent un raisonnement causal linéaire : s'il existe un courant, il y a une cause à cette circulation, qui est la pile. Elle sera caractérisée par la d.d.p. entre ses bornes, « *prédisposition de la pile à établir un courant* » (Psillos *et al.*, 1988, p. 35). Ce concept représentera d'abord une propriété de la pile : « *l'existence d'une tension provoque un courant* » (Tiberghien *et al.*, 1994, p. 23). Puis, dans un deuxième temps, s'il circule un courant entre deux points, ces deux points ne sont pas à la même « altitude », ils ne sont pas au même potentiel (ce qui peut permettre d'établir un lien entre chute de tension et échange énergétique, lien précieux à connecter à la vision énergétique des élèves, mais aussi d'introduire les concepts de résistance et d'intensité). Une question naît : comment agir sur la quantité de charges en circulation, sur leur débit ? Ce qui conduit à la construction du concept de résistance :

- comparons le rôle d'une ampoule et d'un résistor, tous deux transformateurs d'énergie qui s'échauffent quand un courant les traverse, mais aussi régulateurs de courant ; la résistance sera la grandeur physique qui indique la difficulté de passage du courant, et nous souhaitons la nommer autrement que l'objet ;
- ce composant, comme tout élément d'un circuit électrique est un conducteur, plus ou moins bon, qui offre une résistance plus ou moins grande au passage du courant. Psillos (1994) suggère de l'appeler « *conducteur-résistant* », son effet conducteur étant illustré lorsqu'il est ajouté en dérivation (la résistance du circuit diminue), son effet résistant lorsqu'il est ajouté en série (la résistance du circuit s'élève) ;
- enfin, la d.d.p. pouvant être considérée comme la prédisposition de la pile à établir un courant, pour un générateur donné, selon la résistance du circuit l'intensité du courant sera plus ou moins grande ; nous arrivons ainsi à une approche qualitative des interactions au sein d'un circuit résumées par la loi d'Ohm.

Le circuit peut aussi comporter des dérivations, il y a toujours conservation de la charge, ni accumulation ni perte : ce qui arrive à un nœud en repart, de même pour la pile, ou tout autre composant.

1.3. Connaissances sur les processus d'apprentissage en physique

1.3.1. Le constructivisme

Nous acceptons l'hypothèse constructiviste selon laquelle un apprentissage serait une construction à partir des représentations et des structures

cognitives, en interaction avec l'environnement. Dans ce cadre, l'activité intellectuelle de l'élève est centrale et chaque élève réalise son apprentissage d'une manière personnelle. Apprendre consiste à transformer des structures cognitives pour passer d'une cohérence à une autre, ce qui demande d'intégrer des informations nouvelles et d'en éprouver la pertinence.

Comment aider l'élève à s'engager dans cette démarche difficile ? Une première étape consiste à le rendre actif, le mettre en quête de sens, faire en sorte qu'il se pose des questions ; une deuxième, lui donner la possibilité de s'approprier la connaissance nouvelle.

1.3.2. La dévolution du problème

« Avant tout il faut savoir poser des problèmes... Dans la vie scientifique les problèmes ne se posent pas d'eux-mêmes... Pour un esprit scientifique toute connaissance est une réponse à une question. S'il n'y a pas eu de question il ne peut y avoir connaissance scientifique. Rien ne va de soi. Rien n'est donné. Tout est construit. » (Bachelard, 1938, p. 14)

Le maître doit imaginer une situation faite pour la construction de connaissances qui puisse permettre à l'élève de s'emparer d'un problème, lui-même calibré en vue de provoquer la construction par l'élève d'un savoir nouveau. Ces « *situations d'apprentissage* » (Brousseau, 1986) seront l'occasion pour le maître, non de la transmission d'une connaissance, mais de la dévolution du bon problème. Aussi de nombreux chercheurs proposent-ils d'engager les élèves dans la résolution de **situations-problèmes** qui aient du sens pour l'élève. Dans ce contexte la question qui se pose tout naturellement est : comment faire en sorte que la question de l'enseignant devienne une question pour l'élève, qu'elle ait un sens pour l'élève ?

L'élève ne peut apprendre qu'en étant actif, en faisant fonctionner et en faisant évoluer ses connaissances, le maître aura la responsabilité du choix judicieux d'une « situation-problème » à laquelle tout élève peut fournir une réponse, reflet d'une certaine connaissance dans ce domaine. Ces situations-problèmes engendrent de la part des élèves un éventail de solutions plus ou moins contradictoires qui peuvent être à l'origine d'un débat dans la classe, et du besoin d'un enseignement adapté, qui fera appel à une nécessaire **transposition didactique** (Chevallard, 1985).

La « théorie des situations » (Brousseau, 1986) conduit à repenser la place des éléments en interaction au cours de l'apprentissage, une stratégie d'enseignement précisant le rôle :

- du maître en lien avec le savoir savant et le savoir de l'élève d'une part, mais aussi l'élève et la classe ;
- de l'élève en lien avec ses représentations, ses pairs, le maître et l'expérimental ;
- de l'expérience.

1.3.3. Rôle de l'expérience

Le maître propose à l'élève une situation familière à propos de laquelle il lui demande de fournir par écrit des prévisions ou une interprétation. Chacun répond à l'aide de ses représentations, puis expose son point de vue aux autres, l'argumente, écoute celui de l'autre, etc. Les diverses prévisions, expression des représentations des élèves, prennent le statut d'hypothèses que l'élève souhaite tester par l'expérience.

Le plus souvent l'expérience contredit les prévisions : « *le démenti leur est apporté par la situation sans que le professeur ou les autres élèves n'aient besoin d'intervenir* » (Charnay & Mante, 1990, p. 59). « *La distorsion avec les résultats expérimentaux provoque une insatisfaction, un étonnement, une curiosité, un questionnement et une demande d'explication qui feront apparaître la suite comme une réponse à des attentes, comme un besoin.* » (Canal, 1996, p. 36). Ainsi l'expérience, en jouant le rôle de **test d'hypothèses**, contribue à la **construction du problème** avec la classe.

L'élève se trouve conduit à raisonner sur le mode « hypothético-déductif », proche de la démarche réelle de construction du savoir en sciences : formulation correcte du problème, émission d'hypothèses, vérification de ces hypothèses et interprétation des résultats (Pinelli & Lefèvre, 1993).

Cette démarche peut être exploitée à **tous les stades de l'apprentissage d'un concept** : en faire naître le besoin, mais aussi construire et structurer le modèle ou en tester la validité. Elle s'appuie sur le couple étonnement-questionnement qui permet de transformer des situations d'enseignement en situations d'apprentissage.

2. PROBLÉMATIQUE

2.1. Nos choix concernant l'apprentissage, sur lesquels se fonde la séquence, et les conséquences sur son déroulement

Nous voulons **rendre l'élève actif** dans la construction de ses connaissances, **l'initier à une démarche scientifique**, lui montrer que le **monde** qui l'entoure peut être **intelligible**. Notre but est de l'amener progressivement au besoin et à la construction des concepts et des lois du physicien, qu'ils aient du **sens** pour lui. Pour rendre l'élève actif dans la construction de ses connaissances il paraît nécessaire :

- de **partir de l'état réel de ses connaissances**, que nous avons cherché à préciser lors des essais préliminaires (hétérogénéité des représentations, absence de modèle de circuit et de circulation, un courant parfois statique, souvent « énergétique ») ;

- **d'éveiller sa curiosité** par des situations-problèmes, mais aussi en ne fournissant des éléments de connaissance qu'en réponse à une question, ce qui conduit l'élève à une modélisation progressive par une initiation à une **démarche de test d'hypothèses**.

Les analyses qui précèdent et le but poursuivi par notre enseignement sont à l'origine des choix qui ont piloté la conception de la séquence :

H1 – La maîtrise des prérequis

Comme le suggère la pédagogie de la maîtrise (Bloom, 1979), nous pensons qu'il est judicieux de vérifier l'existence des prérequis utiles au nouvel apprentissage envisagé. Ainsi, avant d'aborder le concept d'intensité, il nous est apparu nécessaire que les élèves possèdent une représentation du circuit et de la circulation. Cette base commune n'existant pas, elle a fait l'objet du premier apprentissage.

Tout au long de l'apprentissage d'un concept nous fournissons de nombreuses occasions de comprendre (réinvestissements, entretiens dans la mesure du possible, tests sont autant d'opportunités de remédiation) avant de passer à l'étape suivante afin d'assurer une nouvelle base commune pour un maximum d'élèves.

De la maîtrise des prérequis nous attendons :

- la construction d'un modèle de circuit et de circulation, et donc une diminution du taux de réponses prévoyant l'existence d'une circulation en circuit ouvert ;
- une meilleure implication des élèves dans la tâche d'apprentissage et donc moins d'élèves dépourvus de réponses (de représentations).

H2 – Approche énergétique du circuit

Les élèves abordant souvent l'électricité avec la notion d'un courant stockable et consommable, leur analyse se ferait en termes d'énergie. Nous pensons qu'il pourrait être intéressant pour l'élève que l'enseignement fournisse une réponse à sa question implicite. Aussi la séquence aborde-t-elle le circuit comme un système où s'effectuent des échanges énergétiques. Ce choix est étroitement lié à celui du système analogique au circuit électrique : la chaîne de vélo (Closset, 1983), système mécanique assurant également un transfert d'énergie.

L'approche énergétique préalable devrait entraîner une diminution du taux d'interprétations énergétiques et donc du raisonnement séquentiel.

H3 – Approche qualitative du fonctionnement du circuit

Pour aider à donner du sens, à construire pas à pas, par approches successives les concepts, et peu à peu un modèle de fonctionnement du

circuit nous avons fait le choix d'un travail qualitatif qui permette à l'élève de comprendre « comment ça marche ». Ce choix se traduit par :

- des questions, des observations, des interprétations qualitatives ;
- le choix des aides, analogies ou images, supports concrets pour la pensée ;
- le nom de conducteur-résistant attribué au composant R, frein à la circulation en série, chemin supplémentaire en dérivation ;
- le choix de travailler avec des circuits qui se transforment, où l'on demande de comparer le fonctionnement du nouveau circuit à celui de l'ancien, sans formules et sans calculs.

L'approche qualitative devrait conduire à une meilleure représentation des concepts qui pourrait s'observer à la nature des explications fournies.

H4 – Une approche progressive et indépendante des concepts

Cette hypothèse répond au souci d'avancer à petits pas (Vygotsky, 1978), en réponse à une question de l'élève, pour mieux donner sens à chacun des concepts. Elle pilote le plan de la séquence : en premier la différence de potentiel, puis l'intensité et le conducteur résistant. Enfin le circuit, système en interaction, concept dont la loi d'Ohm fournit une excellente synthèse.

L'introduction indépendante et progressive des concepts devrait aider à la disparition de la notion floue de courant au profit de concepts distincts aux propriétés spécifiques.

Nous remarquons que tous ces choix devraient concourir à un progrès cognitif qui, s'il est observé, sera à considérer comme étant le fruit de notre « bouquet d'hypothèses ».

2.2. Hypothèse concernant un chemin d'apprentissage

À partir de réponses d'élèves à des stades d'apprentissage différents, Closset (1992) a émis l'hypothèse que la hiérarchie cognitive observée pourrait correspondre à un chemin d'apprentissage.

Nous avons profité de l'expérimentation de la séquence pour tester cette hypothèse en observant les raisonnements, mis en œuvre par un même élève en réponse aux questions posées, en fonction de l'avancement de la séquence et de la complexification du circuit.

3. MÉTHODOLOGIE

3.1. Les acteurs de l'expérimentation

Deux années d'expérimentation par le chercheur ont permis la rédaction du texte définitif de la séquence, d'étendre son expérimentation

avec des **enseignants du lycée** de Brive, puis d'autres académies. Ils n'ont reçu aucune formation particulière, le seul critère de « sélection » était le volontariat.

Les élèves de seconde qui ont participé à l'expérimentation constituaient des populations différentes : ceux de Brive étant regroupés selon que leur projet professionnel nécessitait un baccalauréat scientifique ou un baccalauréat sciences économiques, alors que ceux des autres académies constituaient des classes indifférenciées.

3.2. Recueil et analyse de données

Les données recueillies sont essentiellement des traces écrites sous forme de **réponses à des questionnaires « papier-crayon »** :

- avant enseignement elles donnent accès aux représentations initiales des élèves ;
- lors du réinvestissement puis de l'évaluation, elles permettent de suivre l'apprentissage de chaque élève.

Nous disposons également **d'entretiens** effectués :

- lors des essais préliminaires pour préciser les représentations de certains élèves et comprendre des réponses inattendues comme le viol de la loi des nœuds ;
- lors de la prise de repères externes (Rouffiac-Missonnier, 2002) pour expliquer l'origine de l'absence de réponse de certains élèves.

Dans tous les cas ils ont offert à l'élève l'opportunité d'une remédiation.

3.3. La séquence

3.3.1. Démarche de construction d'un concept

Notre démarche de construction d'un concept se situe dans un cadre constructiviste où l'enseignant tente de faire construire un maximum de connaissances par l'élève. Mais l'élève ne peut pas tout construire seul : une partie de la connaissance doit lui être transmise. Il reste à la charge de l'élève de se l'approprier à l'occasion de réinvestissements sur des situations voisines. La démarche suivie pour la construction de chacun des concepts est toujours la même :

- **étape 1**, un questionnaire préliminaire qualitatif auquel l'élève répond à l'aide de ses représentations ;
- **étape 2**, mise en commun des réponses (les élèves les expriment et les discutent) ;
- **étape 3**, formulation des hypothèses retenues, à tester par l'expérience ;
- **étape 4**, expérimentale, de tests d'hypothèses (l'observation de l'expérience, qui contredit les prévisions rend la situation encore plus énigmatique, met l'élève en quête d'explications) ;

- **étape 5**, apports du maître en réponse aux questions (ce peut être l'introduction d'un concept, complétée par une image ou une analogie) ;
- **étape 6**, selon les élèves réinvestissements ou remédiations, à partir d'un nouveau questionnaire qui demande de nouvelles prévisions qualitatives, qui seront suivies de nouvelles expériences tests d'hypothèses dont les observations nécessiteront la mise en œuvre du modèle proposé pour devenir intelligibles ;
- **étape finale**, l'évaluation, sous forme de questions, dont la correction sera sous forme expérimentale de tests d'hypothèses, ultime tentative pour inciter tous les élèves à se servir du modèle.

3.3.2. Activités de l'élève qui apprend avec la séquence

L'élève met en œuvre ses représentations pour fournir une réponse écrite aux questions, puis il doit exposer et justifier ses prévisions devant la classe.

Certains élèves sont déstabilisés face à la diversité des prévisions, alors que d'autres sont vraiment certains de ce qu'ils affirment. Ces prévisions deviennent des hypothèses à tester.

Le montage est très vite réalisé : l'élève en attend la confirmation de ses prévisions. Sinon, il refait le circuit, observe celui des autres tables, manifeste alors son étonnement, son incompréhension, la situation est vraiment énigmatique. Un voisin ou le maître lui demande de considérer d'autres hypothèses : laquelle se trouve-t-elle confirmée par l'expérience ?

Il se peut aussi que le maître ait à introduire un concept, ou à proposer un modèle qu'il demande à l'élève de considérer pour interpréter les faits observés.

Cette connaissance nouvelle, l'élève doit se l'approprier : c'est le rôle de réinvestissements avec les mêmes tâches pour l'élève à partir de situations nouvelles proposées par un nouveau questionnaire.

3.3.3. Plan de la séquence

Le plan est donné par l'ordre d'introduction des concepts : circuit, circulation, d.d.p., intensité, conducteur résistant et enfin le circuit électrique.

Durée : 10 heures de cours et 10 séances de T.P. (15 heures).

3.4. Évaluations

En lien avec nos hypothèses nous avons procédé à une évaluation interne ainsi qu'à une prise de repères externes.

3.4.1. Évaluation interne

L'évaluation interne poursuit deux objectifs :

- d'une part nous avons cherché à savoir si les chemins d'apprentissage des élèves étaient en lien avec la hiérarchie cognitive attendue : dans ce but nous avons suivi les réponses, élève par élève, à la recherche des étapes par lesquelles passe l'apprentissage de chacun ;
- d'autre part nous avons recherché quelques effets spécifiques de chacune des hypothèses, ainsi qu'un effet global sur l'apprentissage des concepts en observant l'évolution des représentations. Nous avons aussi cherché à mesurer l'impact dans le temps de l'apprentissage à l'aide de la séquence, par un questionnaire six mois plus tard.

3.4.2. Prise de repères externes

Nous avons effectué deux prises de repères externes. La première avant tout enseignement en seconde, afin de s'assurer que l'état initial soit le même quel que soit ensuite le mode d'apprentissage suivi par les élèves participant aux prises de repères. Etant parti d'un état initial comparable, nous cherchons à savoir si l'état final l'est aussi, sinon quelles différences observe-t-on ? Peut-on émettre une hypothèse sur leur origine ? Peut-on établir un lien avec les hypothèses de la séquence ?

4. RÉSULTATS EN TERMES DE SUIVIS

Cette séquence, après 2 ans d'essais préliminaires et de mise au point avec les élèves de 4 classes, a été expérimentée avec 9 classes d'une trentaine d'élèves chacune. Aussi, dans le cadre de cet article nous ne pourrions pas faire partager l'ensemble de nos observations (Rouffiac-Missonnier, 2002) concernant l'apprentissage des trois concepts réunis dans la loi d'Ohm. Nous ne parlerons que de ce qui concerne le concept d'intensité et nous illustrerons nos résultats par le cas de deux classes représentatives de l'ensemble.

4.1. Documents disponibles

Les documents proviennent de 56 élèves appartenant à 2 classes différentes : l'une avec des élèves ayant un projet scientifique (Brive) et l'autre indifférenciée (Grenoble). Nous examinons d'abord les réponses aux questionnaires successifs d'approche du concept d'intensité : avant enseignement de la circulation, préliminaire à l'intensité, réinvestissement sur les circuits mixtes, test, questionnaire final six mois après enseignement.

Nous ne nous intéressons qu'à l'influence de la résistance sur le débit, en circuit fermé. Nous avons cherché à classer les raisonnements en « local », « séquentiel », « à courant constant » ou « systémique ».

4.2. Évolution du raisonnement de l'élève du circuit simple à la branche principale d'un circuit avec dérivation

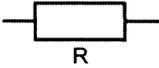


Figure 1 • Circuit simple

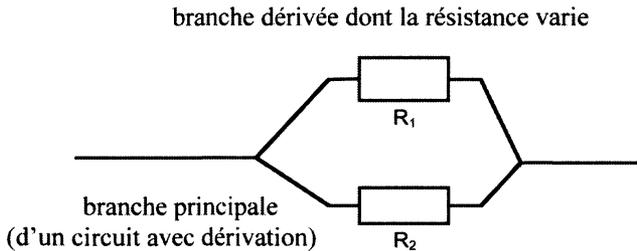


Figure 2 • Circuit avec dérivation

4.2.1. Élèves partant d'un raisonnement local (en partie ou en totalité)

Sur 13 élèves au raisonnement initial à caractère local, 10 ont adopté un raisonnement identifiable à chaque étape : sur ces dix élèves au raisonnement initial à caractère local, 8 adoptent finalement le raisonnement systémique. Avant ce raisonnement :

- 5/8 sont passés par le raisonnement à courant constant ;
- 2/8 sont passés directement du raisonnement local au raisonnement systémique ;
- 1/8 est passé par le raisonnement séquentiel.

Le **raisonnement à courant constant** paraît, à partir de ce premier petit échantillon, l'**étape la plus fréquente avant le raisonnement systémique**. C'est également l'**étape la plus fréquente après le raisonnement local**.

4.2.2. Élèves partant d'un raisonnement séquentiel

Le raisonnement séquentiel est emprunté en début d'année par 31 élèves, soit la moitié de la population observée, et par 8 autres qui l'ont utilisé mêlé à d'autres raisonnements.

Sur 31 + 8 élèves au raisonnement qui peut être séquentiel selon la question en début d'année, 28 adoptent un raisonnement systémique en fin d'apprentissage, en passant par les étapes suivantes :

- 9/31 élèves passent directement du raisonnement séquentiel au raisonnement systémique ;

- 12/31 passent par le raisonnement à courant constant.

Les trois élèves qui, au départ, avaient un raisonnement séquentiel mêlé de « correct » passent tous par l'étape à courant constant.

Le **raisonnement local** n'apparaît pas parmi ceux employés après le raisonnement séquentiel : cela tendrait à confirmer qu'il **précèderait le raisonnement séquentiel**. Une fois abandonné l'élève n'y revient plus.

Cet échantillon d'élèves, plus important que le précédent, confirme que le **raisonnement à courant constant** paraît être **l'étape la plus fréquente avant le raisonnement systémique**. C'est également **l'étape la plus fréquente après le raisonnement séquentiel**.

Remarque : il arrive qu'après être passé par le raisonnement à courant constant l'élève retourne au raisonnement séquentiel. Ce retour en arrière n'est qu'apparent : d'un questionnaire au suivant, le circuit possède plus de composants et se complique. L'élève se trouve face à une situation moins familière où le raisonnement séquentiel se transpose de préférence au raisonnement correct (Closset, 1983).

4.2.3. Élèves partant d'un raisonnement à courant constant

Nous n'en avons pas trouvé dans la population suivie. Nous ne pouvons analyser ce raisonnement que comme étape d'apprentissage.

4.2.4. Élèves partant d'un raisonnement correct

Dix élèves utilisaient au départ un raisonnement qui paraissait correct : quatre l'ont conservé tout au long de l'apprentissage. Les six autres, pour répondre à une question un peu plus difficile, ou moins familière, ont emprunté le raisonnement à courant constant avant d'adopter un raisonnement systémique.

4.2.5. Analyse des observations

Nous disposons pour chacun des 52 élèves de leurs réponses à au moins deux, sinon trois ou quatre questionnaires successifs entre lesquels un enseignement a été dispensé. Pour chaque élève nous avons observé les raisonnements empruntés à chacune des étapes de son apprentissage. Nous avons rassemblé dans le tableau 1 les successions de raisonnements rencontrées. Par exemple, pour 7 élèves ayant utilisé uniquement un raison-

nement local pour répondre à un questionnaire, à l'étape suivante, 5 élèves ont emprunté le raisonnement à courant constant, les deux autres ayant choisi le raisonnement séquentiel et le raisonnement systémique.

Raisonnement à un stade initial ou intermédiaire :	Raisonnement au stade suivant de l'apprentissage (X = pas encore d'apprentissage en seconde)			
	Local	Séquentiel	À courant constant	Systémique
Local (7 élèves)	X	1	5	1
Séquentiel (31 élèves)	0	X	17	12
À courant constant (30 élèves)	0	6	X	22
Correct (17 élèves)	0	1	7	X

Tableau 1 • Récapitulation de l'évolution des raisonnements de 56 élèves

Ce tableau 1 semblerait confirmer une hiérarchie des raisonnements utilisés par les élèves pour l'analyse d'un circuit électrique, partant du plus primitif :

- **1 - Le raisonnement local**, une fois délaissé, il apparaît rarement que l'élève y revienne. Partant de ce raisonnement l'élève passe le plus souvent au raisonnement à courant constant (sous réserve d'une part de notre petit effectif (7 élèves), d'autre part peut-être de nos outils d'apprentissage qui se voulaient agressifs pour le raisonnement séquentiel) ;
- **2 - Le raisonnement** suivant semblerait être le raisonnement **séquentiel** dans la mesure où l'élève ne l'abandonne, lors de l'apprentissage, qu'au profit du raisonnement à courant constant ou du raisonnement systémique, qui seraient donc plus évolués ;
- **3 - Le raisonnement séquentiel** évolue majoritairement en passant par l'étape du **raisonnement à courant constant**. Ce raisonnement n'est pas « naturel » à l'élève qui entre en seconde, mais l'étape intermédiaire d'apprentissage la plus empruntée ;
- **4 - Le raisonnement systémique** est le plus évolué. En fin d'apprentissage il apparaît souvent mêlé au raisonnement à courant constant que l'élève utilise plus volontiers sur les montages avec dérivations, donc plus complexes. On observe également que des élèves au raisonnement initial correct passent par un raisonnement à courant constant avant de revenir à un raisonnement systémique. Ce point confirme que le raisonnement à courant constant est le plus proche du raisonnement systémique, même si le fossé entre les deux est important.

Cette première analyse a une portée limitée par le nombre d'élèves suivis (56) mais surtout en raison de l'apprentissage qu'ils ont vécu. Il aurait

été intéressant de pouvoir comparer avec d'autres élèves ayant suivi un autre enseignement. Cela s'est révélé impossible, l'enseignement habituel ne consacrant pas assez de temps à l'apprentissage d'un concept pour que l'on ait accès aux étapes par lesquelles passe le raisonnement de l'élève.

4.3. Évolution du raisonnement de l'élève sur la branche dérivée dont la résistance varie

Sur 8 élèves ayant employé d'abord le raisonnement local sur la branche dérivée, tous arrivent au raisonnement systémique sur la branche, 6 directement et 2 en passant par le raisonnement séquentiel.

Sur 21 élèves ayant d'abord fait une analyse séquentielle sur la branche dérivée, 15/21 passent directement au raisonnement correct, un au raisonnement local, un au raisonnement à courant constant et quatre après un détour par le raisonnement correct reviennent au raisonnement séquentiel.

Le raisonnement à courant constant est utilisé par 4 élèves avant le raisonnement systémique, mais l'un d'eux termine avec un raisonnement séquentiel.

Ces hésitations révèlent un raisonnement correct non stabilisé et un raisonnement séquentiel auquel l'esprit revient dès que la situation est moins familière, ou que le circuit se complexifie.

Sur 25 élèves ayant abordé l'analyse de la branche dérivée avec un raisonnement correct, 20 l'ont conservé, quatre sont passés par le raisonnement séquentiel, dont deux pour retrouver un raisonnement systémique. Le dernier a préféré le raisonnement à courant constant

Nous allons observer le nouveau raisonnement installé au détriment de celui préexistant, au niveau de la branche dérivée, lors de l'apprentissage de l'intensité (tableau 2).

Raisonnement à un stade initial ou intermédiaire :	Raisonnement au stade suivant de l'apprentissage (X = absence d'évolution)			
	Local	Séquentiel	À courant constant	Systémique
Local (8 élèves)	X	1	0	6
Séquentiel (25 élèves)	1	X	1	23
À courant constant (6 élèves)	0	0	X	4
Correct (74 élèves)	0	9	1	X

Tableau 2 • Récapitulation du raisonnement emprunté par les élèves sur la branche dérivée où R varie

4.4. Récapitulation des observations lors du passage du circuit série au circuit mixte

Lors d'essais antérieurs sur deux classes (72 élèves) nous avons suivi l'évolution du raisonnement de l'élève lors du passage du circuit série au circuit mixte.

Le raisonnement local, conservé sur la branche par 7 élèves, leur permet de respecter le débit de part et d'autre d'un dipôle ainsi que la loi des nœuds, mais avec partage égal de l'intensité dans les branches dérivées.

Les raisonnements « local », « séquentiel », « à courant constant » font majoritairement place au **raisonnement correct sur la branche**, mais sans interaction avec le circuit principal, le **générateur** conservant un **débit constant**. Cette propriété peut admettre une interaction avec l'autre branche. Le raisonnement reste localisé : il limite l'effet du dipôle soit à sa branche, soit à l'ensemble des dérivations, dans les deux cas sans interaction avec le générateur : **peu à peu l'élève semble étendre le domaine d'action d'un dipôle**.

Raisonnement sur : le circuit série	Local	Séquentiel	A courant constant (C.Ct)	Correct	Total
les éléments du circuit mixte	26	15 + 1	7	23	72
Branche où R varie	4 local 3 séquentiel 2 C.Ct 17 C.Ct	3 séquentiel 2 C.Ct 10 C.Ct	2 C.Ct 5 C.Ct	3 local 5 C.Ct 15 C.Ct	7 local 6 séquentiel 11 C.Ct 47 C.Ct
Branche principale	1 séquentiel 19 C.Ct 6 correct	1 séquentiel 11 C.Ct 4 correct	6 C.Ct 1 correct	13 C.Ct 10 correct	2 séquentiel 49 C.Ct 21 correct

Tableau 3 • Résumé de l'évolution des raisonnements lors du passage du circuit série au circuit mixte

4.5. Conclusion

On peut remarquer que les élèves qui, sur le circuit série, employaient un raisonnement :

- local, choisissent parmi toutes les formes de raisonnement pour analyser un circuit mixte ;
- séquentiel, n'utilisent plus jamais le raisonnement local, par contre, ils peuvent utiliser l'un des autres ;
- à courant constant, n'utilisent jamais le raisonnement local ou séquentiel,

par contre ils se servent soit de celui à courant constant, soit du raisonnement correct ;

- correct, utilisent le raisonnement correct ou celui à courant constant (à 3 élèves près qui ont utilisé le raisonnement local sur la branche où R varie).

Cette étude contribue à valider l'**hypothèse de la hiérarchie** des raisonnements, émise par Closset :

- le raisonnement local, avec deux discontinuités du débit serait le plus primitif ;
- le raisonnement séquentiel, n'ayant plus qu'une discontinuité, représenterait un réel progrès, mais il semblerait que cette étape ne soit pas toujours utilisée ;
- le courant constant, qui ne présente plus de discontinuité, serait le plus proche du raisonnement correct, tout en restant à un niveau plus simple ;
- le passage du raisonnement séquentiel au raisonnement à courant constant présenterait un fossé moins important que le saut au raisonnement systémique. Les raisonnements pris dans l'ordre

local ———> séquentiel ———> courant constant ———> correct

peuvent constituer des **étapes d'apprentissage** (sachant qu'un élève est susceptible de sauter des étapes, ou d'effectuer des retours en arrière sur une situation plus complexe), où le fossé entre le raisonnement séquentiel et celui à courant constant apparaît moins important que le saut pour passer au raisonnement systémique.

5. RÉSULTATS EN TERMES D'APPRENTISSAGE

5.1. Évolution du raisonnement concernant le débit dans une branche dérivée

Nous avons observé l'évolution du raisonnement emprunté par les élèves de 6 classes, appartenant à 4 académies, soit 146 élèves ayant suivi la séquence, à différentes étapes de leur apprentissage, pour analyser :

- avant enseignement, un circuit simple à un seul récepteur, puis,
- après apprentissage avec la séquence, un circuit série (comprenant plusieurs récepteurs en série),
- différents circuits, lors du test final en fin d'année.

Nous donnons également, à titre indicatif, nos observations aux mêmes étapes d'apprentissage, d'élèves ayant suivi un enseignement habituel. Nous sommes conscients que de nombreuses variables secondaires interviennent, qui, pour un aussi petit nombre de classes, interdisent une comparaison statistique stricte puisqu'il est impossible de randomiser ces variables secondaires. Lorsqu'il nous arrivera de donner les résultats

obtenus dans l'enseignement habituel, ce ne sera qu'à titre indicatif, comme repère externe (tableau 4).

Raisonnement Population	Local	Séquentiel	Courant constant	Systemique
Avant enseignement (190 élèves)	28 %	54 %	3 %	15 %
Après la Séquence (146 élèves)	9 %	15 %	15 %	51 %
Bilan	- 19 %	- 39 %	+ 12 %	+ 36 %
Après l'enseignement habituel (68 élèves)	19 %	40 %	9 %	19 %
	- 9 %	- 14 %	+ 6 %	+ 4 %

Tableau 4 • **Évolution des raisonnements concernant l'intensité le long d'un circuit série, en fonction de l'enseignement reçu (6 mois après enseignement, élèves de 4 académies)**

Notre prise de repère externe laisse penser que la hiérarchisation ne serait pas trop dépendante du type d'apprentissage : **les raisonnements semblent évoluer dans le même sens, à savoir une diminution des raisonnements locaux et séquentiels et un progrès des raisonnements à courant constant et systémique.**

L'enseignement de la séquence conduirait à une plus forte diminution des raisonnements locaux et séquentiels, accompagnée d'une plus forte utilisation des raisonnements à courant constant et systémique, ce qui revient à dire qu'elle aurait, en fin d'année, une efficacité supérieure.

5.2. Évolution du raisonnement cohérent employé sur l'ensemble du questionnaire

Une autre façon de mesurer l'état de la connaissance peut être d'observer, tout au long d'un questionnaire qualitatif, quel est le **raisonnement cohérent le plus représenté** chez les élèves (élèves ayant conservé le même raisonnement pour répondre à l'ensemble du questionnaire). Voici les résultats recueillis à Brive, six mois après enseignement, dans les deux classes du chercheur et deux autres classes (tableau 5).

Raisonnement Enseignement	Local	Séquentiel	Courant constant	Correct	Total
Séquence (64 élèves)	6 %	6 %	20 %	37 %	70 %
Habituel (56 élèves)	7 %	36 %	21 %	2 %	66%

Tableau 5 • **Nature du raisonnement cohérent employé sur l'ensemble du questionnaire (six mois après enseignement, Brive)**

Le raisonnement cohérent le plus représenté dans la séquence est le raisonnement correct, alors que dans l'autre population, c'est toujours le raisonnement séquentiel.

Il y a 4 élèves de la séquence (8 %) qui n'ont pas fourni de réponse à la dernière question et 15 de l'enseignement habituel (27 %).

Ces observations tendraient à indiquer, au niveau des élèves de la séquence, une amélioration :

- de l'engagement dans la recherche de réponses à une question ;
- du niveau du raisonnement cohérent.

6. ANALYSE A POSTERIORI

Ces observations sont sans doute en lien avec l'ensemble des hypothèses mises en œuvre. Nous allons maintenant rechercher quelques effets plus spécifiques.

6.1. Quelques observations en lien avec nos choix

6.1.1. Recherche d'effets en lien avec la maîtrise des prérequis

6.1.1.1. Existence d'une représentation, ou engagement de l'élève dans la tâche d'apprentissage

Quels que soient le questionnaire, la question, le concept testé, que la question soit qualitative ou numérique, le nombre d'élèves ne fournissant pas de réponse est toujours plus élevé chez les élèves de l'enseignement habituel. Vus en entretien, ces élèves sont dépourvus de réponse, en fait dépourvus de représentation du concept.

6.1.1.2. Nécessité d'enseigner les concepts de circuit et de circulation, ou de l'utilité d'enseigner des implicites

Le questionnaire passé chaque année aux élèves entrant en seconde avait révélé qu'environ la moitié des élèves imaginait du courant quelque part en circuit ouvert. Un professeur stagiaire (Jourdes, 1999) a voulu tester l'intérêt d'enseigner les concepts de circuit et de circulation. Il a fait passer un questionnaire en fin d'année aux élèves de 3 classes ayant appris avec notre séquence (« séquence »), et à des élèves de 3 classes ne l'ayant pas vécue (« habituel »). Voici par exemple l'une de ses questions avec les réponses recueillies.

Analyse : « les élèves de l'enseignement habituel utilisent à plus de 40 % un raisonnement séquentiel sur le circuit ouvert, alors que cette représentation a pratiquement disparu chez les élèves de la séquence ». J.-L. Closset (1983)

et S. Johsua (1985) ont retrouvé de telles représentations au niveau universitaire. Les réponses aux diverses questions de L. Jourdes (1999) illustrent l'absence d'évolution de la représentation du circuit ouvert chez les élèves qui ont reçu un enseignement qui n'aborde pas les situations de circuit ouvert. Son travail incite à penser qu'il serait nécessaire d'étudier le circuit (fermé et ouvert) en introduction à l'enseignement de l'électricité. Voici par exemple l'une de ses questions (figure 3) avec les réponses recueillies.

Dans le circuit suivant indiquez les lampes qui s'allument en les entourant.

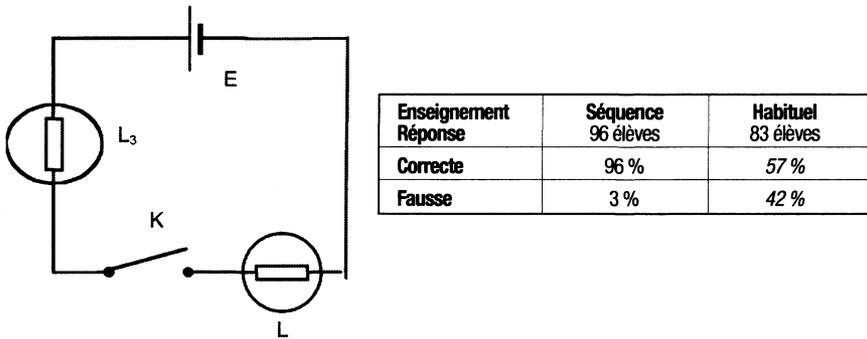


Figure 3 • Exemple de question posée par L. Jourdes

6.1.2. Recherche d'effets en lien avec l'approche qualitative

6.1.2.1. Nature des justifications

Exemple concernant le rôle du **conducteur-résistant** :

- ajouté **en série**, 20/24 (80 %) des prévisions correctes sont en termes de **frein** à la circulation. Cette justification est employée par 22/35 élèves (63 %) ;
 - ajouté en **dérivation**, 15/22 prévisions correctes sont en termes de **chemin** supplémentaire. Cette justification ne conduit à aucune prévision fausse (100 % de réponses correctes) ; elle est employée par 15/35 élèves (43 %).
- Ces représentations sont assez fortes pour se retrouver en fin de 1^{re} S.

6.1.2.2. Évolution du débit du générateur

Cette idée a été introduite en lien avec celle d'interaction, illustrée par l'analogie avec la chaîne de vélo. Voici les pourcentages de réponses à un questionnaire qualitatif, passé six mois après enseignement, portant sur des circuits à une ou deux ampoules : il était demandé à l'élève si le débit du générateur varie lorsqu'on enlève ou ajoute une ampoule (tableau 6).

Question portant sur un Circuit Enseignement	Simple	Série	Avec dérivation
<i>Effectif</i>	123 élèves	59 élèves	64 élèves
Séquence	74 %	46 %	42 %
<i>Effectif</i>	113 élèves	57 élèves	56 élèves
Habituel	21 %	3 %	21 %

Tableau 6 • **Réponses où le débit du générateur varie lors d'une modification du circuit (6 mois après enseignement)**

Lors de cet essai, pour 74 % des élèves de la séquence et 21 % des autres, le courant traversant le générateur varie lorsque la valeur de la résistance d'un circuit simple évolue.

Observons ce que deviennent ces représentations en fin de 1^{re} S (tableau 7).

Question portant sur un Circuit Enseignement	Simple	Série	Avec dérivation
Séquence 39 élèves	85 %	75 %	58 %
Habituel 72 élèves	38 %	35 %	23 %

Tableau 7 • **Élèves ayant adapté le débit du générateur au circuit (réponses qualitatives - fin 1^{re} S)**

Globalement on retrouve les mêmes réponses un an plus tard, avec toutefois un progrès chez les deux populations entre la classe de seconde et celle de première (Rouffiac-Missonnier, 2002). Mais ces résultats révèlent deux difficultés. On constate que le raisonnement à **débit constant du générateur** constitue un **réel obstacle** empêchant l'élève d'accéder au raisonnement systémique du physicien. Le raisonnement à débit constant va de pair avec l'impossibilité d'envisager une interaction entre les différents éléments constitutifs d'un circuit. Nous avons constaté une lente remise en cause de cette représentation tout au long du travail qualitatif, mais aussi la fragilité des acquis.

Nous ne nous sommes pas penchés sur la **difficulté** que pouvait représenter le **passage au formalisme**, nos élèves raisonnaient beaucoup mieux qu'ils ne calculaient. Sur les exemples numériques ils ont tendance à introduire inconsciemment l'hypothèse de la conservation du débit du générateur, ce qui simplifie la démarche de réponse.

Question portant sur le Enseignement	Circuit	Série	Dérivation
Séquence	6 / 19 élèves	32 %	8 / 20 40 %
Habituel	1 / 35 élèves	3 %	6 / 37 16 %

Tableau 8 • **Fréquence des réponses numériques où il existe une interaction entre le générateur et le circuit (fin 1^{re} S)**

En fin de 1^{re} S, les élèves ayant suivi la séquence **fournissent de meilleures réponses aux questions qualitatives**. Pour les réponses chiffrées, les outils à employer ne leur sont pas assez familiers, telle la résistance équivalente, ce qui les conduit à émettre (plus ou moins explicitement) des hypothèses fausses, comme la constance du débit de la branche principale. Plus des trois quarts de ces élèves fournissent une réponse correcte sur le circuit simple ou en série, ils sont moins familiers du montage en dérivation ou mixte.

Dans tous les **cas ils sont au moins deux fois plus nombreux à imaginer une interaction** entre le générateur et son circuit que ceux ayant suivi un enseignement habituel : on peut noter là un **effet conjugué des hypothèses**.

6.2. Dans quelle mesure les hypothèses ont-elles été mises en œuvre ?

En l'absence de formation particulière des enseignants avant l'expérimentation de la séquence nous pouvons seulement être certains de la mise en œuvre des hypothèses qui participaient au déroulement de la séquence :

- l'approche énergétique ;
- l'approche indépendante des concepts ;
- la maîtrise des premiers prérequis (concepts de circuit et de circulation).

Nos observations tendraient à montrer qu'une formation des enseignants les aiderait à mieux exploiter les hypothèses dont l'approche qualitative. De plus, du temps est nécessaire pour maîtriser l'usage d'un autre contrat didactique.

En résumé, les effets attendus se sont effectivement produits, pas toujours avec l'ampleur espérée. Nous y voyons au moins deux raisons :

- l'absence de formation des enseignants,
- l'absence de réflexion sur le fossé que représente pour l'élève le passage au formalisme.

7. CONCLUSIONS

Cette séquence, avec ses hypothèses, semble avoir permis des progrès cognitifs : avoir aidé les élèves à construire un début de représentation du concept d'intensité ; nous avons relevé une construction par les élèves d'un début de représentation qualitative du conducteur-résistant et d'interaction entre le générateur et son circuit mais ce n'est qu'une base qui serait à compléter.

Les suivis d'élèves ont permis d'observer par quelles étapes les élèves passent lors de la construction du concept d'intensité : ces observations se trouvent en accord avec l'hypothèse de hiérarchie des raisonnements. La représentation du générateur à débit constant serait un réel obstacle en lien avec la marche élevée que représente le passage du raisonnement à courant constant au raisonnement systémique.

Il est apparu que ce travail demanderait une réelle formation des maîtres et des espaces de liberté pour assurer une bonne maîtrise des prérequis.

La prise de repères externes semble montrer pour chacun des concepts un plus grand nombre de réponses, une meilleure qualité des réponses et des justifications chez les élèves de la séquence : la population non scientifique ayant suivi la séquence fournit des prévisions équivalentes à celles des élèves scientifiques de l'enseignement habituel. Ces observations sembleraient indiquer un impact réel des méthodes d'apprentissage de la séquence.

Cette impression est confortée par la **nature différente de la connaissance** à laquelle chacun de ces enseignements donne accès. **La séquence**, en multipliant les réinvestissements, aiderait l'élève à **décontextualiser** la connaissance et à se l'approprier : il a été entraîné à réfléchir et à **mieux se représenter** le fonctionnement d'un circuit. À l'opposé, de nombreux auteurs soulignent que **l'enseignement habituel** conduirait l'élève à un **savoir de mémoire**, à des **raisonnements mécaniques**, ce qui expliquerait qu'il soit déstabilisé dès que la question n'est plus habituelle, que le circuit évolue, etc.

Il en coûte aux élèves et aux enseignants de changer de contrat didactique. Mais de l'expérimentation du nôtre, il ressort :

- que **l'élève** a bénéficié d'un enseignement plus personnalisé permettant à chacun de progresser à partir de son état de connaissance. Nous avons cherché à éveiller sa curiosité, puis les analogies et les modèles qualitatifs l'ont aidé à se représenter les phénomènes ; il a eu l'impression et le plaisir de comprendre ;
- que **l'enseignant** a eu l'opportunité de découvrir (parfois avec surprise) les raisonnements de ses élèves et a pu tester si nos hypothèses d'apprentissage les aidaient à se rapprocher des modèles du physicien ;
- que **le passage au formalisme** représente un saut cognitif tel qu'il reste un domaine de recherche.

Les réactions des partenaires de la séquence ont été essentiellement positives :

- les élèves actifs, curieux, intéressés en classe, se rendaient volontiers aux entretiens dont ils repartaient heureux de commencer à comprendre ;
- les enseignants avaient eux l'impression que « le courant passait mieux » et ont trouvé judicieuse pour la compréhension l'analogie avec la chaîne de vélo.

Toutefois il est apparu que cette séquence gagnerait à être étalée dans le temps : ne nécessitant aucun savoir initial, elle pourrait se dérouler dans le cadre des nouveaux programmes de collège, débiter en classe de 4^e et se poursuivre en 3^e.

Nos conclusions s'appuient sur des résultats obtenus dans le contexte de la recherche ici décrite. Il serait intéressant de renouveler la démarche dans des contextes différents et variés ce qui permettrait soit de confirmer, soit de nuancer nos résultats. Une suite nécessaire à ce travail serait d'envisager une ingénierie de formation permettant d'étudier dans quelles mesures et sous quelles conditions la démarche pourrait être généralisée à l'enseignement en France.

Le lecteur intéressé par la mise en œuvre de la séquence peut écrire au premier auteur pour des informations complémentaires et/ou se référer à la thèse disponible au LDSP.

NOTE

1. Randomiser : disposer d'un nombre suffisant de groupes expérimentaux pour que les valeurs prises par les variables secondaires puissent être considérées comme distribuées aléatoirement).

BIBLIOGRAPHIE

- BACHELARD G. (1938 / 1986). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris, Vrin.
- BLOOM B.S. (1979). *Caractéristiques individuelles et apprentissages scolaires*. Bruxelles, Labor.
- BROUSSEAU G. (1986). Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques. *Recherches en didactique des mathématiques*, vol. 7, n° 2, pp. 33-115.
- CANAL J.-L. (1996). *Courant, tension, résistance et énergie. Essai de conceptualisation des grandeurs fondamentales en électricité*. Thèse de doctorat, université de Toulouse.
- CHARNAY R. & MANTE M. (1990-1991). De l'analyse d'erreurs en mathématiques aux dispositifs de remédiation : quelques pistes... *Grand N*, n° 48, pp. 37-64.
- CHEVALLARD Y. (1985). *La transposition didactique*. Grenoble, la Pensée sauvage.
- CLOSSET J.-L. (1983). *Le raisonnement séquentiel en électrocinétique*. Thèse de doctorat, université Paris VII.

- CLOSSET J.-L. (1992). Raisonnements en électricité et en hydrodynamique. *Aster*, n° 14, pp. 143-155.
- JOHSUA S. (1983). La « métaphore du fluide » et le « raisonnement en courant ». *Recherches en didactique de la physique*, pp. 321-330.
- JOHSUA S. (1985). *Contribution à la délimitation du contraint et du possible dans l'enseignement de la physique*. Thèse de doctorat, université d'Aix-Marseille II.
- JOURDES L. (1999). *Quel enseignement en électricité pour une classe de seconde ? Mémoire professionnel*, IUFM de Limoges.
- KOUMARAS P., KARIOTOGLOU P. & PSILLOS D. (1994). Devons-nous utiliser des phénomènes évolutifs en introduction à l'étude de l'électricité ? *Didaskalia*, n° 4, pp. 107-120.
- LEMEIGNAN G. & WEIL-BARAIS A. (1992). L'apprentissage de la modélisation dans l'enseignement de l'énergie. *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*, pp. 171-231.
- LEMEIGNAN G. & WEIL-BARAIS A. (1993). *Construire des concepts en physique*. Paris, Hachette.
- PINELLI P. & LEFÈVRE R. (1993). « Étudiants - chercheurs » une proposition en électrocinétique. *Aster*, n° 17, pp. 65-87.
- POPPER K. (1988). *La logique de la découverte scientifique*. Paris, Payot.
- PSILLOS D., KOUMARAS P. & TIBERGHIE A. (1988). Voltage presented as a primary concept in an introductory teaching on D.C. circuits. *International Journal of Science Education*, vol. 10, n° 1, pp. 29-43.
- ROUFFIAC - MISSONNIER M.-F. (2002). *Mise en évidence de chemins d'apprentissage des élèves lors d'une ingénierie didactique d'électrocinétique*. Thèse de doctorat, université Paris VII.
- TIBERGHIE A., ARSAC G. & MÉHEUT M. (1994). Analyse de projets d'enseignement issus de recherches en didactique. In *La transposition didactique à l'épreuve*. Grenoble, La Pensée sauvage.
- TIBERGHIE A., PSILLOS D. & KOUMARAS P. (1995). Physics instruction from epistemological and didactical bases. *Instructional Science*, n° 22, pp. 423-444.
- Von RHÖNECK C. (1982). *Students' conceptions of the electrical circuit before physics instruction. Proceedings of an international Workshop on Problems Concerning Students' representation of Physics and Chemistry Knowledge*. Pädagogische Hochschule, Ludwigsburg, pp. 194-212.
- VYGOTSKY L.S. (1978). *Pensée et langage*. Paris, Éditions sociales.

Cet article a été reçu le 8/04/04 et accepté le 13/07/04.