

# Étude, en inter-didactique des mathématiques et de la physique, de l'acquisition de la loi d'Ohm au collège : espace de réalité

## Study, in inter-didactics of mathematics and physics, about acquisition of Ohm's law in high school : space of reality

**Didier MALAFOSSE, Alain LEROUGE,  
Jean-Michel DUSSEAU**

Laboratoire ERES de l'Université Montpellier II  
Groupe IUFM  
2, place M. Godechot, BP 4152  
34092 Montpellier cedex, France.

### **Résumé**

*La question de déterminer sous quelles conditions des concepts élaborés dans le champ de la didactique d'une discipline donnée sont transposables à la didactique d'une autre discipline est régulièrement posée par de nombreux chercheurs. Pour notre part, nous nous sommes intéressés aux relations entre les mathématiques et la physique, en prenant l'exemple de la loi d'Ohm, première loi physique écrite et représentée sous forme mathématique au collège et au lycée en France. Pour rendre compte de nos observations, nous avons été amenés à définir un modèle théorique s'appuyant sur les notions de cadre et de registre développées de manière*

*spécifique en didactique des mathématiques, en leur adjoignant pour la didactique de la physique une notion nouvelle, celle d'espace de réalité.*

**Mots clés :** *inter-didactique mathématique / physique, cadre de rationalité, registre, espace de réalité.*

### **Abstract**

*Many researchers have asked the question whether and in what conditions the didactic concepts in a given discipline can be transposed to another. We have examined the relations between mathematics and physics, taking Ohm's law as an example, the first law of physics written and represented in mathematical form in French high school. Our observations led us to define a theoretical model based on two didactical notions developed specifically in mathematics frame and register by adding a new element taken from physics which we call space of reality.*

**Keys words :** *physics and mathematics relations, frame, register, space of reality.*

### **Resumen**

*La posibilidad de determinar bajo qué condiciones los conceptos elaborados en el campo de la didáctica de una disciplina pueden ser transpuestos a la didáctica de otra materia, es una pregunta que se hacen numerosos investigadores. Por nuestra parte, nos interesamos en las relaciones entre la matemática y la física, tomando en cuenta el ejemplo de la ley de Ohm, primera ley física escrita y representada bajo una forma matemática en los colegios y liceos franceses. Para presentar nuestras observaciones, nos vimos en la necesidad de definir un modelo teórico apoyándonos en las nociones de cuadro y registro desarrolladas de manera específica en didáctica de la matemáticas, agregándole para la didáctica de la física una nueva noción, la de espacio de realidad.*

**Palabras claves :** *inter-didáctica matemática / física, cuadro de realidad, registro, espacio de realidad.*

## **1. INTRODUCTION**

Depuis quelques années, les travaux inter-didactiques sont d'actualité. Ainsi, Caillot & Raisy (1996) se sont interrogés de manière générale sur la constitution d'un champ commun aux diverses didactiques : le didactique. De son côté, Arsac (1995) a posé plus particulièrement la question du transfert de la théorie des situations (Brousseau, 1986) au sujet

d'une étude sur la concentration molaire en classe de première scientifique (Tsoumpelis & Gréa, 1995).

De notre côté, nous avons centré nos recherches sur l'interface mathématiques / physique en nous proposant de montrer jusqu'à quel point certains concepts élaborés en didactique des mathématiques peuvent être féconds pour analyser en classe de physique les difficultés observées chez les élèves dans l'utilisation d'acquis du cours de mathématiques. Cette recherche s'inscrit dans l'évolution des programmes scolaires. En effet, les « outils mathématiques » sont de plus en plus nécessaires à l'enseignement de la physique, et les instructions des programmes de mathématiques privilégient la question du sens, en insistant sur la nécessaire référence aux situations concrètes, tout particulièrement celles de la physique. Par exemple, dans le programme de première scientifique (section S, pour élèves de 16-17 ans) il est indiqué : « *Comme en seconde (15-16 ans), on mettra en valeur l'utilité du concept de fonction pour l'étude des phénomènes continus ; on exploitera largement des situations issues de l'algèbre, de la géométrie, des sciences et des techniques et de la vie économique et sociale, en marquant les différentes phases : modélisation, traitement automatique, contrôle et exploitation des résultats* » (Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale, 1991, p. 39) ou bien : « *À travers quelques exemples issus de la mécanique et de la physique, on montrera que l'intérêt du calcul vectoriel ne se limite pas à la géométrie* » (Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale, 1991, p. 45). En terminale scientifique (section S, pour élèves de 17-18 ans), il est dit : « *Pour l'étude des fonctions, on s'appuiera conjointement sur les interprétations graphiques  $y = f(x)$ , électriques (signaux relatifs à l'évolution d'une intensité, d'une différence de potentiel...) et biologiques (évolution d'une population, d'un taux de concentration...)* » (Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale, 1994, p. 49).

La question du sens des savoirs scolaires apparaît aujourd'hui fondamentale au regard des problèmes que posent les nouvelles populations scolarisées. De ce point de vue, le sens de nombreux concepts mathématiques enseignés au collège et au lycée renvoie implicitement à des objets et situations de la physique à partir desquels ils ont été historiquement construits. Cette relation entre les mathématiques et la physique sur la question du sens pose, sur le fond, l'intérêt de recherches inter-didactiques sur la conceptualisation.

Pour notre part, nous avons choisi la loi d'Ohm comme support à ce travail de recherche, car c'est une des premières lois physiques écrites sous forme mathématique que les élèves français rencontrent dans leur cursus scolaire. Elle donne lieu à une étude expérimentale (au cours de laquelle les élèves construisent des circuits électriques, procèdent à des mesures d'intensités et de tensions) mais aussi à un travail de modélisation

de type inductif qui fait passer d'un ensemble de valeurs numériques (et/ou de points) à une relation de proportionnalité (et/ou à sa traduction graphique par une droite), pour aboutir à la formule  $U = R.I$  qui relie la tension  $U$  aux bornes de l'objet à l'intensité  $I$  du courant qui le traverse. La constante  $R$  est appelée résistance électrique de l'objet.

Dans le discours des enseignants que nous avons interviewés, cette opération de modélisation, conforme aux principes directeurs des programmes (1993), se justifie par le fait qu'elle permet une prise de distance conceptuelle de l'élève par rapport au phénomène physique observé. Or, pour les élèves, il semble que l'écart entre la réalité physique et sa présentation fonctionnelle en mathématique génère un certain nombre de difficultés. Pour pouvoir les analyser, nous proposons un modèle d'approche des processus de conceptualisation en inter-didactique des mathématiques et de la physique reposant sur les notions de cadre (Douady, 1984), de registre sémiotique (Duval, 1988) et de cadre de rationalité (Lerouge, 1992) déjà mises en œuvre en didactique des mathématiques. Notre objectif n'est donc pas d'étudier les difficultés dues à l'appropriation des concepts de courant et de tension électriques, ce qui a déjà fait l'objet de nombreuses publications (Closset, 1989 ; Johsua, 1985), mais plutôt d'analyser les procédures mises en jeu au cours du passage de la réalité expérimentale au modèle mathématique, en montrant pourquoi cette opération extrêmement complexe n'est pas réductible à un simple changement de cadre entre l'électrocinétique et l'algèbre linéaire.

Pour tester et affiner notre modèle, nous avons mené une expérimentation en classe de troisième (14-15 ans) qui a permis d'identifier, par analyse *a priori*, trois points particuliers nécessitant la mise en place d'observations didactiques :

- 1° l'influence de la perception de la nature des objets sur l'activité de production d'un schéma de circuit électrique ;
- 2° la recherche de régularités numériques et le passage à une « formule physique » traduisant la loi d'Ohm, à partir d'un ensemble de nombres correspondant aux mesures expérimentales des diverses tensions et de l'intensité d'un circuit série simple ;
- 3° la représentation graphique de la loi d'Ohm sous forme d'une droite passant par l'origine du repère ( $U, I$ ) et la détermination graphique de la résistance du résistor.

Les deux derniers points de cette expérimentation sont développés par ailleurs (Malafosse et al., à paraître). Cet article s'intéresse uniquement au premier de ces trois thèmes. Nous y présentons d'abord quelques recommandations officielles concernant les relations mathématiques / physique d'une part, et l'introduction de la loi d'Ohm dans les manuels

scolaires français d'autre part. Puis, pour éclairer au niveau didactique les antagonismes et complémentarités épistémologiques entre les mathématiques et la physique, nous introduisons les concepts de cadre, de registre sémiotique et de cadre de rationalité, et nous définissons la notion complémentaire d'espace de réalité. Enfin, nous montrons la pertinence de ces notions en didactique de la physique en nous appuyant uniquement sur la première partie de l'expérimentation.

## 2. BREF HISTORIQUE

### 2.1. À propos des liens mathématiques / physique

Dès le début du siècle, la préoccupation d'un enseignement scientifique digne de ce nom transparait dans les programmes du secondaire français consécutifs à la réforme de 1902 visant à mettre en place une culture scientifique de référence opposable aux humanités classiques. Le positivisme ambiant fait que cet enseignement scientifique est conçu comme devant avoir un caractère expérimental très marqué même en ce qui concerne les mathématiques. La séparation entre l'analyse des phénomènes et l'établissement des lois empiriques par les physiciens expérimentateurs et la synthèse par les physiciens mathématiciens repose sur l'inductivisme considéré alors comme caractéristique aussi bien des processus de la recherche que des méthodes d'enseignement. Dans les conseils généraux du programme de Sciences Physiques de 1902, on peut lire que « *l'enseignement de la physique et de la chimie dans le premier cycle devra rester très élémentaire et d'un caractère pratique. Il sera toujours fondé sur des expériences* » (Arrêté du 31 mai 1902, p. 816). Pour la classe de seconde on trouve : « *... en évitant les développements mathématiques, il [l'enseignement de sciences physiques] doit toujours être fondé sur des expériences ... [le professeur] utilisera fréquemment les représentations graphiques, non seulement pour mieux montrer aux élèves l'allure des phénomènes, mais pour faire pénétrer dans leur esprit les idées si importantes de fonction et de continuité* » (Arrêté du 31 mai 1902, p. 822).

Dans les instructions de 1905 relatives à l'enseignement des mathématiques concernant l'algèbre, il est précisé : « *L'étude des variations d'une fonction sera accompagnée d'une représentation graphique aussi exacte que possible. La courbe une fois tracée, servira à déterminer une coordonnée en fonction de l'autre ; la comparaison des résultats graphiques aux nombres calculés directement permettra de faire apprécier l'importance de la précision dans le dessin et habituera ainsi l'élève à se rendre compte de la grandeur de l'approximation que peut donner le procédé graphique* » (Arrêté du 27 juillet 1905, p. 706). En géométrie : « *... on aura ainsi l'occasion*

*de montrer qu'il y a deux certitudes d'ordres différents ; l'une expérimentale, qui appartient aux sciences physiques ; l'autre logique, qui est celle des vérités mathématiques ; mais il y aurait un grave inconvénient à donner à cette dernière une importance qu'elle n'a pas dans la réalité et à jeter le discrédit sur la première qui, il faut bien l'avouer, est la seule que nous possédions puisque les principes mathématiques n'ont pas d'autres fondements, tout au moins pour les élèves. Ce qu'il importe de faire ressortir, c'est l'importance du raisonnement logique pour réduire au minimum les faits expérimentaux » (Arrêté du 27 juillet 1905, p. 707).*

Il est intéressant de noter que lorsqu'une modification (1905) du programme de mathématiques de terminale est susceptible d'avoir des répercussions sur le programme de physique, le Ministère précise dans une circulaire (23 mars 1906) :

*« 1° les professeurs de mathématiques devront être invités à commencer leurs cours par la cinématique, qui leur demandera tout au plus une dizaine de leçons ;*

*2° les professeurs de physique devront être invités à ne commencer la physique qu'une fois la cinématique terminée. En attendant, ils feront uniquement de la chimie » (Circulaire du 23 mars 1906, p. 216).*

Ceci montre le lien très fort qui existe entre les programmes de mathématiques et de physique, proposés alors simultanément, il est vrai, dans le cadre d'une restructuration globale de l'enseignement secondaire.

On constate que, dans les principes généraux, les mathématiques et la physique sont considérées depuis près d'un siècle comme des matières d'enseignement complémentaires et à coordonner. Ces intentions de principes sont-elles prises en compte dans les manuels sur le thème particulier de la loi d'Ohm ?

## **2.2. Évolution de la présentation de la loi d'Ohm dans les manuels scolaires**

En 1902, la loi d'Ohm est introduite à la fois en classe de troisième moderne (sans langues anciennes) (14-15 ans) et en première scientifique (sections C et D) dans un alinéa : « *Résistance ; loi d'Ohm ; courants dérivés* ». Il est à noter que les programmes de sciences physiques ne subiront pas de modifications majeures jusque dans les années 70. Au début du siècle un certain nombre d'ouvrages peut servir de référence pour la constitution de manuels d'enseignement. Par exemple, le « Précis de Physique » de l'Inspecteur Général Fernet, qui dans le chapitre « Électricité dynamique » consacre, dans une partie intitulée « Lois des courants », un

paragraphe à la loi d'Ohm : « *L'intensité du courant produit par une pile dépend à la fois de la force électromotrice  $E$  de la pile et de la résistance totale du circuit (pile et circuit extérieur). Ohm a établi par le raisonnement les deux lois suivantes, connues sous le nom de lois d'Ohm. Ces lois ont été d'ailleurs vérifiées par l'expérience : 1° L'intensité du courant est proportionnelle à la force électromotrice de la pile en circuit ouvert ; 2° Elle est inversement proportionnelle à la résistance totale du circuit (...)* » (Fernet, 1903, p. 323).

Cette façon de présenter la loi d'Ohm comme obtenue suite à un raisonnement avalisé par l'expérience est assez unique en son genre. Tous les manuels adopteront une présentation dans laquelle des expériences minutieusement décrites précèdent ou suivent les énoncés des lois. Par exemple, dans l'ouvrage de Lemoine & Vincent destiné aux classes de première, un chapitre intitulé « Loi d'Ohm – Résistance » comporte un premier paragraphe « Objet des lois d'Ohm » qui s'appuie sur l'analogie hydraulique : « *Une différence de potentiel  $V$  étant établie et maintenue par un procédé quelconque entre deux points, quelle est l'intensité du courant qu'on peut faire circuler dans une canalisation établie entre ces deux points ? Une question analogue en hydrodynamique est la suivante ; deux bassins présentent une différence de niveau égale à 20 mètres, par exemple ; en utilisant cette différence de niveau, quel débit peut-on obtenir dans un tuyau reliant les deux bassins ?* » (Lemoine & Vincent, 1905, p. 270).

Remarquons que cette analogie a persisté dans de nombreux ouvrages récents jusqu'à ce que soit pris en compte un certain nombre de travaux de didactique mettant en évidence « *que les élèves et les étudiants éprouvent pratiquement les mêmes difficultés lorsqu'ils doivent analyser le fonctionnement d'un circuit hydraulique que celles qu'ils rencontraient dans l'étude des circuits électriques* » (Closset, 1995, p. 54).

Après un paragraphe intitulé « Recherche expérimentale », les paragraphes suivants dans lesquels chaque fois sont présentées des expériences énoncent les lois d'Ohm ainsi :

- « *Première loi.* – *L'intensité du courant est proportionnelle à la différence de potentiel*
- Deuxième loi.* – *L'intensité du courant est inversement proportionnelle à la longueur du fil*
- Troisième loi.* – *L'intensité du courant est proportionnelle à la section du fil ...*
- Quatrième loi.* – *L'intensité du courant dépend de la nature du fil* » (Lemoine & Vincent, 1905, p. 226),

jusqu'au dernier paragraphe de ce chapitre, intitulé « Unité de résistance :

ohm. », et qui mentionne que « *la loi d'Ohm peut s'écrire ;  $I \text{ ampères} = \frac{V \text{ volts}}{R \text{ ohms}}$ , ou encore  $V \text{ volts} = I \text{ ampères} \cdot R \text{ ohms}$  » (Lemoine & Vincent, 1905, p. 226). Il faut noter que les relations de proportionnalité indiquées ne sont exemplifiées chaque fois que par trois mesures différentes et jamais par une courbe, ce qui finalement est en contradiction avec les recommandations sur les représentations graphiques, accompagnant le programme.*

Il faut attendre l'ouvrage de Faivre-Dupaigre & Carimey (1913) pour trouver quelques représentations graphiques, notamment celle représentant la variation du potentiel le long d'un fil métallique en fonction de la distance à un point pris comme origine, de divers points du fil.

En 1931, dans un ouvrage de Faivre-Dupaigre, Lamirand & Barrée, il est de plus indiqué, pour une courbe équivalente, que le coefficient angulaire négatif de la droite tracée correspond au courant traversant le fil. Cet ouvrage est intéressant car il propose également des exercices pratiques sur l'ensemble du programme de physique. Mais, concernant la loi d'Ohm, aucun de ces exercices ne prévoit de tracer une courbe de la tension en fonction du courant. Les seules courbes de ce type concernent les générateurs (Fraudet, 1931 ; Eurin & Guimiot, 1952) et/ou les récepteurs (Eurin & Guimiot, 1952).

Ce n'est qu'à la fin des années 70 que l'on trouve le terme de « caractéristique » pour la représentation graphique courant-tension dans, par exemple, l'ouvrage de Saison et al. (1978) qui en présente de nombreux tracés (dipôles passifs et actifs) et montre leur intérêt dans la recherche d'un point de fonctionnement. Mais, pendant la même période, la réforme dite des mathématiques modernes va introduire une coupure certaine entre les mathématiques abstraites enseignées et leur possible application à la physique, même si les promoteurs de cette réforme insistent sur la nécessité de s'appuyer sur « *une expérience concrète, riche et variée, voire nécessaire à l'abstraction* » (Trabal, cité par Belhoste et al., 1996, p. 103). La contre réforme des années 80 ramènera sur certains points une conception utilitariste des mathématiques enseignées au lycée, mais sans retrouver cependant la forte corrélation avec les programmes de physique imposée en 1902-1905.

### 2.3. Conclusion

Depuis près d'un siècle, les programmes officiels et les recommandations qui les accompagnent se soucient de coordonner l'enseignement de la physique et celui des mathématiques. La nécessité



de cette coordination semble reposer sur la complémentarité des deux disciplines dont l'enseignement simultané serait source de synergie au cours des apprentissages. Pourtant, les documents d'accompagnement des nouveaux programmes ne font jamais allusion à la différence de nature des objets conceptuels manipulés dans les deux disciplines, pas plus qu'à une divergence entre leurs rationalités. Néanmoins, ce début d'approche multidisciplinaire semble faire dépasser aux mathématiques et à la physique les rôles qui leur semblaient définitivement dévolus, à savoir celui de « discipline outil » pour les mathématiques vis à vis de la physique, cette dernière servant de « discipline d'application » aux premières. Mais cette évolution dialectique des consignes officielles ne se retrouve pas au niveau des manuels scolaires qui postulent la transparence des « outils mathématiques » lorsqu'ils sont utilisés par les élèves en physique.

La question se pose donc de savoir si les mathématiques telles qu'elles sont enseignées (autrement dit la construction de concepts dans l'enseignement des mathématiques) aident l'élève dans son activité de construction de concepts en physique, et comment ? Cette question est très générale. Aussi, dans un premier temps, nous avons cherché à déterminer dans quelle mesure les modèles permettant d'étudier les phénomènes de conceptualisation en mathématiques étaient pertinents en physique.

### 3. ÉLÉMENTS D'ANALYSE DES PHÉNOMÈNES DE CONCEPTUALISATION EN DIDACTIQUE DES MATHÉMATIQUES

Nous avons choisi les concepts de « cadre », de « registre sémiotique », et de « champs conceptuels », qui se sont révélés pertinents dans l'analyse des phénomènes de conceptualisation en mathématiques parce qu'ils nous semblaient transposables en didactique des sciences expérimentales.

#### 3.1. Les notions de « cadre » et de « registre sémiotique »

##### 3.1.1. La notion de « cadre »

Pour Douady, un **cadre** est « *constitué des objets d'une branche des mathématiques, des relations entre les objets, de leurs formulations éventuelles diverses et des images mentales associées à ces objets et ces relations* » (Douady, 1984, p. 135). Plus tard, cet auteur précise la référence faite aux « *images mentales* » : « *La référence naïve aux images mentales*

*est seulement l'indice que le chercheur fait partie de la définition du cadre, et qu'un transfert en didactique de cette notion demande d'y inclure l'acteur : maître, élève ou chercheur. Cela conduit à envisager la notion de cadre selon au moins trois dimensions : une dimension mathématique, une dimension socioculturelle, une dimension individuelle, chacune indexée par le temps* » (Douady, 1992, p. 136). Cependant, si les changements de cadre entre différentes branches des mathématiques savantes ou scolaires s'avèrent pertinents pour construire des concepts en mathématiques savantes ou scolaires dans le contexte d'une dialectique outil/objet, ils s'avèrent difficilement transposables tels quels en physique. En effet, dans cette discipline, le statut des objets n'est pas le même qu'en mathématiques, car la construction des concepts se fait en référence à l'environnement expérimental que nous montrerons non modélisable sous forme d'un cadre. Par contre, la prise en compte des images mentales telle qu'elle est envisagée par Douady peut expliquer pourquoi les apprenants ont beaucoup de mal à décontextualiser des savoirs et à utiliser, notamment en physique, des notions récemment acquises en mathématiques.

### **3.1.2. La notion de « registre sémiotique »**

« *Les objets mathématiques ne doivent jamais être confondus avec la représentation qui en est faite* » (Duval, 1993, p. 37). Cette citation de Duval présentant la distinction entre un objet et sa représentation sémiotique comme « *un point stratégique pour la compréhension des mathématiques* » (Ibid., p. 37) montre bien que l'activité cognitive demandée aux élèves en mathématiques est tout à fait paradoxale. En effet, l'objet mathématique sur lequel s'appuie le processus de conceptualisation n'a pas de réalité matérielle et doit être appréhendé par le biais de ses représentations sémiotiques culturelles.

L'approche sémiotique de l'étude de l'acquisition de connaissances scientifiques, qu'elles soient mathématiques, physiques ou autres, amène donc à se poser la question de la représentation des signifiés de façon systémique. C'est tout le sens du travail de Duval pour qui un **registre (sémiotique)** est un système sémiotique permettant les trois activités fondamentales de la pensée :

- la formation d'une représentation identifiable ;
- le traitement de cette représentation dans le registre même où elle a été formée ;
- et la conversion de cette représentation en une représentation d'un autre registre.

De ce point de vue, en mathématiques ou en physique, on peut repérer les registres suivants : la langue naturelle, un système d'écriture symbolique, le graphique cartésien, les figures géométriques, les tableaux de données, etc. Pour Duval, « *la compréhension (intégrative) d'un contenu conceptuel repose sur la coordination d'au moins deux registres de représentation, et cette coordination se manifeste par la rapidité et la spontanéité de l'activité cognitive de conversion* » (Duval, 1993, p. 51), d'où l'importance de la mise en congruence d'unités significatives entre divers registres pour permettre l'activité de conversion. Par exemple, dans le cadre de l'analyse en mathématiques, le fait de mettre en correspondance le signe du coefficient directeur d'une droite dans le registre de l'écriture formelle des fonctions et l'inclinaison de cette droite dans le registre graphique établit une congruence entre les deux registres qui facilitera, dans d'autres situations, le passage automatique de l'un à l'autre, mais surtout l'appropriation du concept de croissance. Sans ces congruences automatisées, le sujet opère selon une approche mono-registre qui l'empêche de détacher le signifié du signifiant qui le représente.

### **3.2. La notion de « cadre de rationalité »**

Lerouge (1992), prenant en compte ces deux aspects de la conceptualisation et intégrant, de plus, la dualité processus de conceptualisation « *du quotidien* » / processus de conceptualisation « *scientifiques* » mise en évidence par Vygotski (1934), introduit la notion de **cadre de rationalité**.

Un cadre de rationalité est un ensemble cohérent du fonctionnement de la pensée caractérisé par quatre composantes : son monde d'objets, ses processus de conceptualisation, ses règles de raisonnement et de validation, et enfin ses registres de signifiants. Pour lui, c'est au sein de cette structure que prennent sens, de manière dialectique, les informations sémiotiques et situationnelles. Les processus de conceptualisation en classe de mathématiques sont ainsi gérés à un instant donné par deux cadres de rationalité inter-réagissant : le cadre familial de l'élève, et le cadre culturel des mathématiques au sens de Douady.

À titre d'exemple nous présentons dans le tableau 1 suivant comment se modélisent les différences essentielles entre le cadre mathématique et le cadre familial d'un élève de collège en ce qui concerne les processus de conceptualisation de la droite au début de la classe de quatrième (13-14 ans).

	Monde d'objets	Processus de conceptualisation	Règles de raisonnement et de validation	Registres de signifiants
<b>Cadre familial</b>	Matériel : un bord de règle	Ascendant : de l'objet matériel au signe qui le représente	Par constat : mesurage sur dessin, fréquence de répétition	Figures
<b>Cadre mathématique</b>	Idéal un trait sans épaisseur	Descendant : du signe abstrait à l'objet idéal	Par déduction logique : théorème ou contre exemple	géométriques

Tableau 1 : **Différences de conceptualisation dans deux cadres**

Ainsi, sur cet exemple, le cadre de rationalité familial se trouve fondamentalement en rupture avec le cadre de rationalité mathématique. En particulier, si le registre des figures géométriques intervient dans les deux cadres, il ne renvoie pas du tout aux mêmes signifiés. Dans le premier cadre, la droite est identifiée au trait droit dessiné avec la règle, alors que dans le second, il s'agit d'un objet idéal inconnu que le trait droit sert à conceptualiser. Par la suite, le cadre scientifique auquel nous ferons référence sera assimilé au cadre culturel des mathématiques ou de la physique c'est-à-dire un ensemble cohérent de concepts, des modes de rationalité et des registres de signifiants. Le cadre familial, quant à lui, devra être considéré comme le lieu de production de l'activité intellectuelle du sujet pensant avec son ensemble de représentations familières des objets perçus, ses conceptions structurées, ses modes de rationalité et ses registres de signifiants.

### 3.3. La notion « d'homomorphisme » et les phénomènes de contagion

Dans le contexte de l'analyse des processus de conceptualisation en mathématiques, Vergnaud propose une théorie des champs conceptuels et donne une « *définition pragmatique d'un concept [comme] un triplet de trois ensembles* :

*S* : l'ensemble des situations qui donnent un sens au concept (la référence) ;

*I* : l'ensemble des invariants sur lesquels repose l'opérationalité des schèmes (le signifié) ;

*L : l'ensemble des formes langagières et non langagières qui permettent de représenter symboliquement le concept : ses propriétés, les situations et les procédures de traitement (le signifiant) » (Vergnaud, 1990, p. 145).*

Il insiste sur le fait que « *étudier le développement et le fonctionnement d'un concept au cours de l'apprentissage ou lors de son utilisation, c'est nécessairement considérer ces trois plans à la fois. Il n'y a pas de bijection entre signifiants et signifiés, ni entre invariants et situations. On ne peut donc réduire le signifié ni aux signifiants, ni aux situations* » (Ibid., p. 145).

Il désigne par la notion d'**homomorphisme** entre signifié, signifiant et référence le transport de structures que le sujet peut établir entre ces différents niveaux dans la formation d'un concept. Il précise que cette notion n'est pas une simple métaphore, mais qu'elle permet d'analyser la complexité des processus de conceptualisation en termes de transport sur le signifié de structures propres aux divers systèmes de signifiants ou aux diverses situations ou objets de référence.

Travaillant dans ce contexte théorique, Lerouge (1993) définit les notions de « *contagion de signifiant* » et de « *contagion de référence* » qui désignent le transport par homomorphisme sur le signifié mathématique d'une structure symbolique ou situationnelle erronée :

– il y a **contagion de signifiant**, lorsque le signifié mathématique n'est pas dissocié de son signifiant et que le sujet développe par homomorphisme des propriétés mathématiques aberrantes. C'est par exemple le cas lorsque le nombre de points de l'intersection de deux droites reste assujéti à l'épaisseur des traits dessinés. De même en physique, le fait que deux résistances en série soient présentées géométriquement en parallèle sur un schéma entraîne une contagion de signifiants chez la plupart des élèves du secondaire (Caillot, 1984) ;

– il y a **contagion de référence** lorsque le signifié mathématique n'est pas dissocié de la situation matérielle qu'il modélise et que, par homomorphisme, la conceptualisation mathématique se trouve perturbée par la prégnance de la réalité. C'est, par exemple, le cas lorsque le nombre de points de l'intersection de deux droites sur un graphique de mouvements est considéré comme dépendant de la vitesse relative des mobiles, de leur longueur, ou de leur sens relatif de déplacement. En physique, on peut aussi interpréter de nombreuses conceptions erronées liées au sens commun (Viennot, 1996) comme dues à des contagions de référence.

## 4. EXTENSION À LA PHYSIQUE

### 4.1. Le problème de la nature des objets de la physique

L'analyse des processus de conceptualisation appréhendés au travers des notions décrites précédemment est-elle spécifique de l'abstraction du monde des objets mathématiques ou peut-elle être menée dans d'autres domaines d'apprentissage pour lesquels des objets peuvent posséder une réalité certaine, comme en physique ? Pour tenter de répondre à cette question, il est nécessaire de tenir compte de la multitude des différences entre les éléments de rationalité des cadres des mathématiques et de la physique. Ainsi, ces deux cadres diffèrent par :

- la possibilité ou non d'une nature matérielle de certains de leurs objets ;
- les modes d'obtention des informations à traiter (statut expérimental de certaines données de la physique) ;
- les règles syntaxiques et les méthodes de raisonnement comme, par exemple, l'analyse dimensionnelle qui est exclusive des sciences physiques (Malafosse, 1994) ;
- les règles de validation (l'obtention du tracé d'une caractéristique linéaire ne « prouve »-t-elle pas, pour un physicien, que le dipôle étudié est un résistor ?)

Chacun de ces éléments de rationalité est difficilement isolable. Ainsi, en ce qui concerne la nature matérielle ou non des objets, la distinction entre les objets de la réalité et les objets du cadre de la physique est délicate, et le physicien qui manipule physiquement un objet tel qu'un conducteur ohmique n'en est pas moins confronté, très rapidement, à raisonner sur des objets abstraits tels que sa résistance, sa caractéristique, etc. (Ne va-t-on pas jusqu'à confondre sous le mot « résistance » l'objet physique, sa quantité physique caractéristique, et la grandeur dimensionnelle associée ?)

Une réflexion s'impose donc sur la différenciation entre les objets de la réalité, les concepts et quantités abstraits de la physique et les représentations sémiotiques qui en sont faites dans l'enseignement, et c'est essentiellement sur ce point précis que porte la première partie de l'expérimentation que nous analysons ici. Mais cette réflexion de nature didactique est à distinguer de celle menée depuis bien longtemps par les philosophes qui s'intéressent à la nature épistémologique du monde, aux mécanismes de sa perception et à la structure des théories scientifiques : par exemple la thèse de l'impossible distinction entre le monde réel et le monde imaginaire défendue par Berkeley (1710), l'approche dialectique en

termes de « *phénomènes* » et de « *noumènes* » de Kant (1781) ou encore « *le monde des sens, [...] le monde réel [et] le monde de la science* » de Planck (1933, p. 7).

Notre projet concernant l'analyse du fonctionnement des apprentissages en physique, nous souhaitons construire un modèle théorique, rendant compte des processus de conceptualisation en physique, situant à la fois les objets et événements postulés réels du monde matériel, les signifiés associés dans leurs cadres théoriques d'interprétation de la réalité, et leurs signifiants dans les registres concernés, en nous inspirant des notions de la didactique des mathématiques précédemment décrites. Nous prenons en compte à la fois les objets et les événements car, pour Vergnaud, « *une théorie pragmatique de la référence [...] fait nécessairement appel à deux visions complémentaires du réel ; comme ensemble de situations et comme ensemble d'objets* » (Vergnaud, 1995, p. 181). Ceci nous conduit à introduire un élément faisant référence épistémologiquement au monde dont l'individu, comme la collectivité scientifique, cherche à s'approprier une description raisonnée, et auquel ils cherchent tous deux à se référer pour valider leurs productions. Nous l'appelons **espace de réalité**.

Prenons un exemple en physique : le fil de cuivre. Le signifié « résistance » n'est couplé à l'objet « fil de cuivre » que dans des situations pour lesquelles l'effet Joule est perceptible et dans le cadre théorique de l'électrocinétique. Les physiciens le savent (implicitement) puisqu'ils ne s'intéressent à la résistance d'un objet que lorsqu'il est parcouru par un courant. La notion d'espace de réalité doit permettre de rendre compte des écarts observés entre les modes de fonctionnement des professeurs de sciences physiques et de mathématiques. En effet, le didacticien de la physique se trouve confronté à un problème délicat ; dans l'hypothèse épistémologique de la réalité du monde physique qui semble consensuellement partagée (tout au moins implicitement) par les communautés des physiciens et par des élèves du secondaire, comment modéliser les difficultés de conceptualisation en se limitant à des changements de registre ou de cadre. Chercher à inclure les objets de la réalité et les situations de référence dans le cadre familier du sujet, au sens de Lerouge, n'est pas possible car nous postulons que la réalité existe hors de la pensée humaine.

## 4.2. Définition de l'espace de réalité

L'espace de réalité est donc l'ensemble des objets réels et des événements hors de la pensée du sujet et sur lequel porte l'activité mentale de conceptualisation. Le sujet applique à l'espace de réalité les schémas de compréhension issus de son cadre familier de pensée, ou de cadres

culturels scientifiques particuliers. Ainsi on peut considérer que l'acquisition des concepts en physique se fait par prélèvement d'informations dans l'espace de réalité (objets et situations expérimentales créées ou non) et nécessite leur traitement dans divers cadres de rationalité. La notion d'espace de réalité se différencie donc fondamentalement de la notion de cadre en ce sens que l'espace de réalité est externe au sujet alors que le cadre est un espace de pensée interne.

Ainsi, tout élément du monde réel peut être défini comme un invariant trans-cadres, et une situation de référence est le résultat d'une projection d'un événement de l'espace de réalité dans un cadre de rationalité donné. Nous entendons par projection une opération orientée correspondant à l'ouverture d'une fenêtre de lisibilité du réel au cours de laquelle cet élément de l'espace de réalité perd une partie de ses attributs pour devenir un élément de l'espace psychique du sujet. (Le terme projection fait davantage référence au sens mathématique associant à un objet une dimension projetée plutôt qu'au sens psychologique qui traduit une opération allant du mental vers l'objet).

La modélisation est alors la création d'une relation entre les objets projetés de l'espace de réalité et les situations de référence. Par exemple, un objet tel qu'un tuyau de cuivre peut être appréhendé au travers de divers cadres de rationalité : une canalisation dans le cadre familial du plombier, une résistance électrique dans le cadre de l'électricité, une arme dans le cadre familial d'un hooligan, etc. Chaque cadre permet d'atteindre une vision parcellaire de l'objet qui, en tant que tel, dépasse l'ensemble de ses projections, et il est possible que de nouveaux cadres en permettent une vision jusque là ignorée.

La difficulté spécifique du physicien se situe alors dans l'opération de projection de l'espace de réalité sur le cadre culturel de la physique, les conceptions erronées des élèves apparaissant comme une projection de cet espace de réalité dans un cadre de rationalité inadéquat.

## 5. EXPÉRIMENTATION

C'est au cours d'entretiens semi-directifs auprès d'une douzaine de professeurs stagiaires de sciences physiques au sujet de la loi d'Ohm, entretiens qui avaient pour but de recueillir leurs représentations concernant les phénomènes de conceptualisation de la notion de résistance électrique, que nous sont apparues la pertinence des notions de « cadre » et « registre », mais aussi la nécessité de leur adjoindre l'élément « espace de réalité » tenant compte de la nécessaire référence expérimentale. Ces entretiens ont révélé :



– la conception des stagiaires d'une existence des lois de la physique dans l'espace de réalité et non dans le cadre théorique dans lequel elles ont été élaborées, représentation qui renvoie à une conception métaphysique des lois (Needham, 1973). Ceci relève d'une confusion entre la réalité phénoménologique et le modèle qui la représente dans le cadre de la physique, comme déjà signalé par Martinand (1987) ;

– une surdétermination du cadre mathématique conduisant à négliger l'étude phénoménologique aussi bien dans le choix du dispositif expérimental que dans celui de l'exploitation de la loi et entraînant, de fait, un traitement mathématique complètement décontextualisé ;

– l'ignorance de la spécificité des cadres de la physique et des mathématiques. Ceci se traduit par le fait que les professeurs stagiaires constatent mais ne peuvent interpréter les difficultés des élèves ;

– l'illusion de la transparence du passage du registre graphique au registre algébrique nécessaire lors de l'établissement de l'expression analytique de la loi d'Ohm à partir de la droite précédemment tracée.

Pour aller au-delà de ce constat et tester la pertinence de notre modèle associant la notion d'espace de réalité à celles de cadre et de registre, nous avons monté une séquence d'électricité en classe de troisième d'un collège classé en ZEP<sup>1</sup>. La méthodologie retenue a été celle de l'ingénierie didactique que Artigue définit comme « *un schéma expérimental basé sur des réalisations didactiques en classe, c'est-à-dire sur la conception, la réalisation et l'analyse de séquences d'enseignement.* » (Artigue, 1988, pp. 285-286).

## 5.1. Présentation générale du dispositif expérimental

### 5.1.1. La méthodologie de l'ingénierie didactique

La classe de vingt-quatre élèves a été scindée en deux demi-classes, elles-mêmes partagées en trois groupes de quatre individus. Trois séances de deux heures ont ainsi été menées avec chacune des deux demi-classes, chaque séance étant structurée en unités de deux étapes. La première, correspondant à une recherche individuelle sur fiche, visait à repérer l'émergence de conceptions ou de procédures, la seconde se déroulant sous forme d'un débat (enregistré) animé par un chercheur à l'intérieur de chaque groupe visait à repérer cette émergence au niveau langagier. L'ensemble de ces deux étapes constitue ce que Lerouge (1992) appelle un « *prélèvement d'émergence* ».

1. ZEP : Zone d'Éducation Prioritaire : zone géographique dont la population socialement défavorisée nécessite et bénéficie de moyens pédagogiques supplémentaires.

### 5.1.2. Les trois étapes

C'est par analyse *a priori* que nous avons identifié les diverses étapes conduisant à l'obtention de la formulation de la loi d'Ohm et nécessitant la mise en place d'observations didactiques, chacune de ces étapes permettant la mise en œuvre de notre modèle sur un point particulier (tableau 2).

Étape dans la progression de classe conduisant à la formulation de la loi d'Ohm	Étape correspondante dans notre modèle d'analyse des phénomènes de conceptualisation
Influence de la perception de la nature des objets sur les activités de conception d'un circuit électrique et de production du schéma correspondant.	Passage de l'espace de réalité aux cadres de rationalité familier et / ou scientifique.
Recherche de régularités numériques et passage à une « formule physique » traduisant la loi d'Ohm, à partir d'un ensemble de nombres correspondant aux mesures des diverses tensions et intensités d'un circuit série simple.	Passage du cadre physique au cadre mathématique.
Représentation graphique de la loi d'Ohm sous forme d'une droite passant par l'origine du plan (U, I) et détermination graphique de la résistance.	Changement de registres (numérique, analytique et graphique).

Tableau 2 : Les 3 étapes conduisant à la formulation de la loi d'Ohm

### 5.1.3. Les choix didactiques concernant l'introduction du concept de résistance

L'analyse des programmes scolaires d'électrocinétique depuis près d'un siècle a été réalisée par Johsua qui distingue quatre introductions différentes :

- « *l'introduction électrostatique* » (Johsua, 1994, p. 13) ;
- « *l'introduction énergétique* » (Johsua, 1994, p. 14) ;
- « *l'introduction par le travail des forces électriques* » (Johsua, 1994, p. 15) ;
- « *l'introduction sui generis ou  $V/I/R$*  » (Johsua, 1994, p. 16).

En ce qui concerne les programmes actuels, Fréchengues & Dusseau (1996) montrent que l'introduction des concepts de

l'électrocinétique en classe de collège (13-15 ans) est une variante de l'introduction électrostatique qui, à la fois, tient compte des résultats actuels de la recherche en didactique de la physique et qui, de plus, est la seule à coupler le concept de résistance à la loi d'Ohm. Deux stratégies expérimentales peuvent alors être mises en œuvre :

- soit on étudie l'influence du matériau et des caractéristiques géométriques (diamètre et longueur pour un objet cylindrique) d'un objet soumis à une tension constante (Khantine-Langlois & Viard, 1997) ;
- soit on étudie l'influence de l'intensité du courant traversant un objet conducteur sur la tension à ses bornes.

L'objectif de recherche de notre première séance étant d'étudier les stratégies mises en œuvre au cours du passage de l'objet de l'espace de réalité aux conceptions d'isolant / conducteur dans le cadre personnel de l'élève, c'est cette dernière option que nous avons retenue. En effet, la première option nécessite le passage par la propriété de résistivité, étape d'abstraction supplémentaire imposant dès le départ le positionnement de l'élève dans le cadre culturel des sciences physiques.

## **5.2. De l'espace de réalité aux cadres de rationalité familial et/ou scientifique**

Pour tester la pertinence de notre modèle, nous avons construit la première séance autour de deux prélèvements d'émergence centrés uniquement sur les rapports qu'entretiennent les élèves avec l'espace de réalité, à propos de la nature plus ou moins conductrice (ou isolante) de tout objet. Cette phase complètement qualitative ne nécessite ni l'appropriation du concept de tension ni quelque appareil de mesure que ce soit. Seules les notions de continuité du circuit et de lien entre l'éclairement d'une lampe et l'intensité circulant dans un circuit série sont nécessaires.

### **5.2.1. Objets des deux premiers prélèvements d'émergence**

Cette première séance s'est déroulée selon des dispositifs un peu différents d'une demi-classe à l'autre.

Pour la demi-classe n° 1, l'enseignant présente un circuit électrique constitué d'une pile électrique, d'un interrupteur, d'une lampe à incandescence adaptée à la tension de la pile, d'une mandarine, d'une pomme de terre, et d'une fourchette, tous ces dipôles étant reliés entre eux par des fils de connexion dans un montage de type série. La lampe ne s'allumant pas à la fermeture de l'interrupteur, les élèves sont invités à interpréter l'expérience et à classer les objets en familles de leur choix.

Ensuite, on leur demande de concevoir des circuits électriques à partir d'un choix mixte de composants électriques et d'objets habituellement identifiés au travers du cadre familier et à faire l'analyse critique de l'emploi ou non par eux de divers objets dans des circuits électriques dont ils proposent le schéma.

Pour la demi-classe n° 2, on demande à chaque élève d'imaginer et de dessiner sur une fiche un (ou des) circuit(s) électrique(s) qu'il pourrait réaliser avec une pile de 4,5 V et avec le matériel contenu dans une valisette. (Ce matériel hétéroclite se compose des mêmes objets que ceux présentés aux élèves du groupe n° 1 mais auxquels on a adjoint une règle métallique, une gomme et un crayon à mine de graphite taillé à ses deux extrémités). Ensuite, on demande à chaque élève de faire un inventaire attentif de tous les objets contenus dans la valisette et de les classer en familles de leur choix.

### **5.2.2. Productions d'élèves**

Aucun élève ne justifie que la lampe ne s'éclaire pas par le fait qu'au moins un des éléments constituant le circuit n'est pas (un bon) conducteur. Ceci nous permet de tirer une première conclusion : un objet non perçu comme appartenant au cadre culturel de la physique (une pomme de terre) ne paraît pas intégrable à une situation de référence de ce cadre (expérience du testeur de conductivité). Cela n'empêche pas la quasi totalité des élèves d'employer des termes « conducteur », « isolant », « laisse » ou « empêche le passage du courant », etc. Tous les élèves regroupent explicitement les objets du cadre familier par opposition aux objets de l'électricité, pour justifier le fait que la lampe ne soit pas allumée. Les commentaires des élèves confirment cela en révélant leur surprise, voire leur incompréhension devant les composants du circuit.

*« Cette expérience est bizarre parce qu'elle est faite avec des objets quotidiens alors qu'en général, elles sont assez compliquées. »*

*« Normalement, le courant ne peut pas passer dans la pomme de terre ou la mandarine. »*

*« C'est farfelu de faire un circuit avec des objets que l'on utilise couramment. »*

Pourtant, il faut insister sur le fait que les composants électriques extrêmement courants mis à la disposition des élèves peuvent aussi être considérés comme faisant partie de leur cadre familier. On voit donc que, pour interpréter cette expérience d'électricité, tous les élèves interrogés isolent *a priori* les objets non habituellement projetés dans le cadre culturel de la physique en leur associant un attribut de non conduction.

### **5.2.3. Mise à l'épreuve du modèle dans l'analyse des résultats du premier prélèvement d'émergence**

Les résultats obtenus après analyse des fiches individuelles de recherche et des six enregistrements vidéo nous invitent à formuler les conjectures suivantes :

– tout objet de l'espace de réalité non projeté habituellement dans le cadre de la physique est considéré comme un intrus dans une expérience de physique. Les cadres de rationalité sont donc les lieux d'identification des objets de l'espace de réalité. Par exemple la distinction des objets en « objets électriques » et « objets non électriques » s'effectue non pas en référence à une situation expérimentale du cadre de la physique, mais sur la base d'une projection de ces objets de l'espace de réalité dans des cadres de rationalité différents. « *La pomme de terre, la fourchette, et la mandarine ne contiennent pas de pôles + et -* ». De plus, les classifications proposées par les élèves indiquent qu'à l'intérieur d'un cadre de rationalité donné, ce sont les situations de référence qui servent de critère de sélection. Ainsi, dans le cadre familier, trois familles d'objets sont clairement identifiées : les objets de l'alimentation, les instruments d'écriture, les métaux ;

– il peut exister un chevauchement partiel du cadre familier et du cadre de la physique. C'est le cas de la fourchette (et dans une moindre mesure de la règle métallique) qui, bien que n'étant pas classée comme objet électrique, est considérée par les élèves à la fois comme un objet familier, mais aussi comme un objet conducteur. « *Ce qui m'interpelle, c'est la fourchette ... c'est que les fils de connexion ne sont pas pareils : d'habitude, ils sont rouges ou noirs* ». « *La fourchette, je comprends un peu parce que c'est du fer et que le fer conduit* ».

Nous pouvons en déduire que, pour un objet donné de l'espace de réalité connu de l'apprenant au travers de son cadre familier, sa mise en situation dans le cadre de la physique ne s'effectue pas spontanément par un simple changement de cadre, mais que le rapprochement des cadres semble néanmoins pouvoir être favorisé par des activités mettant en œuvre quelques objets au statut privilégié qui sont connus des élèves comme ayant une projection dans les deux cadres de rationalité.

### **5.2.4. Résultats du deuxième prélèvement d'émergence**

Les élèves des deux demi-classes révèlent une uniformité remarquable de conceptions du circuit électrique et de ses composants, ce qui permet de dresser une liste des caractéristiques des représentations qu'un élève de classe de troisième se fait de notions électriques :

- le circuit électrique : c'est une chaîne linéaire (de type série) de conducteurs, incluant une pile et parcourue par un courant ;

- le composant électrique : il a deux bornes, il est polarisé et il est toujours conducteur ;

- l'objet du cadre familier : à quelques exceptions près, il n'a pas les attributs de composant électrique ; c'est donc un intrus dans un montage auquel il retire le statut de circuit ;

- le courant électrique : s'il circule dans le circuit, la lampe incluse s'éclairera.

Confrontés à la nécessité de produire un circuit électrique à l'aide de matériel choisi parmi un ensemble d'objets, les élèves s'engagent ou approuvent presque unanimement la stratégie suivante :

- si, parmi les objets dont je dispose pour réaliser un circuit électrique, je trouve une pile et une lampe, alors mon projet implicite sera d'éclairer la lampe ;

- je dois éliminer les objets qui n'ont pas les caractéristiques dipolaires car ils ne sont pas « faits » pour être intégrés dans des circuits électriques (seulement pour ceux qui n'ont pas été témoins de l'expérience magistrale) ;

- je dois sélectionner parmi les objets dotés des caractéristiques dipolaires ceux qui sont connus pour être des composants électriques ou des objets de matériau connu pour sa propriété de conductivité, par exemple les métaux) ;

- le type de montage retenu est le montage série.

En résumé, l'élève de troisième propose comme circuit une chaîne continue, le plus souvent fermée, de conducteurs intégrant les composés électriques et les objets familiers réputés pour être conducteurs. La stratégie type mise en œuvre dans l'activité de proposition d'un circuit électrique nous permet ainsi de mener une comparaison entre les résultats des opérations de projection des objets de l'espace de réalité dans le cadre familier de l'élève de troisième et dans le cadre culturel de la physique. Il semble indéniable que tous les élèves ont une représentation familière des composants électriques présents dans la valisette, tels que la pile électrique et la lampe à incandescence que l'on peut répertorier dans la famille des objets familiers de l'électricité. Ainsi, l'élève de troisième projette certains objets de l'espace de réalité à la fois dans son cadre familier et dans le cadre de la physique. C'est le cas pour la fourchette et pour la règle qui sont reconnues comme métalliques et donc conductrices, mais c'est aussi le cas pour les objets tels que la pile électrique et la lampe à incandescence qui sont considérés comme des objets familiers de l'électricité.

Néanmoins, on ne peut pas parler de superposition de cadres, car le sujet affecte au signifié construit, par projection d'un objet de l'espace de réalité dans un cadre de rationalité donné, des attributs liés à la rationalité spécifique du cadre. Par exemple, la règle métallique est avant tout une règle dans le cadre familial car elle est associée à la mesure de longueur, fonction que peut aussi bien assurer une règle en matière plastique. Par contre, dans le cadre de l'électrocinétique, cette règle métallique est avant tout métallique car elle est identifiée non plus au travers de sa fonction mais au travers du matériau constitutif (conducteur ou isolant). Sa fonction n'est plus un attribut dans le cadre de la physique, alors que son matériau n'est pas un attribut dans le cadre familial.

Nous devons donc admettre que les cadres familial et scientifique sont disjoints tant du point de vue des signifiés (même s'ils sont les projections de mêmes objets) que du point de vue des situations de référence mises en œuvre et que du point de vue des rationalités. Il s'ensuit que l'élève de troisième, en situation de devoir analyser, concevoir ou réaliser un circuit électrique, se trouve confronté aux problèmes suivants :

– soit les objets placés (ou à placer) dans le circuit sont projetés dans le cadre de l'électrocinétique auquel cas l'élève doit pouvoir mettre en œuvre les rudiments conceptuels relatifs au circuit électrique. (« *Je voulais à tout prix que le courant passe, c'est pourquoi j'ai utilisé un objet métallique ... Je n'avais pas envie d'utiliser les autres objets car sinon, ce ne serait pas un montage.* ») ;

– soit l'élève rencontre dans le circuit certains objets qu'il projette uniquement dans le cadre familial. Dans ce cas la juxtaposition de signifiés appartenant à deux cadres de rationalité différentes produit un conflit pouvant conduire à un blocage. (« *C'est farfelu de faire un circuit électrique avec des objets que l'on utilise souvent* » car « *on ne peut pas faire allumer une mandarine, une gomme, un crayon ou une pomme de terre.* ») ;

– soit enfin l'élève rencontre dans le circuit des objets de l'espace de réalité qu'il projette à la fois dans le cadre familial et dans le cadre de rationalité scientifique comme la fourchette ou la règle métallique. Cette double signification permet alors à l'élève de prendre conscience de la possibilité d'extension du champ d'application du concept scientifique. (« *Je voulais que la lampe s'éclaire* » ou « *je voulais utiliser les fruits et légumes pour voir si le courant les traverse beaucoup* »).

## 6. CONCLUSIONS

Ces résultats montrent que l'espace de réalité, tel que nous l'avons défini, est bien le support sur lequel l'observateur ou l'expérimentateur

s'appuie pour construire sa représentation mentale de la réalité en faisant appel à divers systèmes sémiotiques du cadre choisi. Cette étape fondamentale constitue la mise en forme du problème en physique, étape à laquelle il faut attacher plus un caractère modélisant que chronologique puisque des allers/retours sont effectués entre l'espace de réalité et le cadre d'interprétation à tous les moments de la démarche expérimentale. De plus, il apparaît à travers l'expérimentation réalisée que, lorsqu'un objet donné de l'espace de réalité est repéré par une conception du cadre familier, sa mise en situation dans le cadre de la physique ne s'effectue pas par simple changement de cadre. Elle nécessite un retour vers l'espace de réalité, puis une projection de l'espace de réalité dans le cadre culturel de la physique. C'est le cas des élèves qui, ayant observé que la mine de crayon insérée dans le circuit diminue fortement la luminosité de l'ampoule, se demandent si, finalement, tous les objets ne sont pas plus ou moins conducteurs et testent la mandarine, la gomme, etc.

L'espace de réalité, qui n'a pas de rationalité propre et ne peut être en aucune manière associé à un cadre ou à un registre, peut paraître superflu pour les didacticiens des mathématiques, mais s'avère être un élément indispensable pour modéliser la démarche de construction de concepts en physique.

## BIBLIOGRAPHIE

ARTIGUE M. (1988). Ingénierie didactique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol. 9, n° 3, pp. 281-308.

ARSAC G. (1995). La didactique des mathématiques est-elle spécifique de la discipline ? *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol. 15, n° 2, pp. 7-8.

BELHOSTE B., GISPERT H. & HULIN N. (1996). *Les sciences au lycée*. Paris, INRP.

BERKELEY G. (1710). *Les principes de la connaissance humaine*. Paris, Flammarion.

BROUSSEAU G. (1986). Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol. 7, n° 2, pp. 33-112.

BULLETIN ADMINISTRATIF DU MINISTÈRE DE L'INSTRUCTION PUBLIQUE (1902). Programme de 1902, décret relatif au plan d'études secondaires, arrêté du 31 mai 1902. *Bulletin administratif du Ministère de l'Instruction publique*, tome LXXI, n° 1522. Paris, Ministère de l'Instruction publique, pp. 739-856.

BULLETIN ADMINISTRATIF DU MINISTÈRE DE L'INSTRUCTION PUBLIQUE (1905). Arrêté portant rectification aux arrêtés du 17 juillet 1905 : Instructions relatives à l'enseignement des mathématiques dans les lycées et collèges de garçons. *Bulletin administratif du Ministère de l'Instruction publique*, tome LXXVIII, n° 1689. Paris, Ministère de l'Instruction publique, pp. 703-710.

BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1991). Programme de mathématiques de Première L et de Première S. *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale, n° spécial 2 du 2 mai 1991*. Paris, Ministère de l'Éducation Nationale de la Recherche et de la Technologie.

BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1994). Programme de mathématiques



- des classes de Terminales. *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale, n° spécial 7 du 7 juillet 1994*. Paris, Ministère de l'Éducation Nationale de la Recherche et de la Technologie.
- CAILLOT M. (1984). La résolution de problème de physique : représentations et stratégies. *Psychologie française*, vol. 3/4, n° 29, pp. 257-262.
- CAILLOT M. & RAISKY C. (1996). *Au-delà des didactiques : le didactique*. Bruxelles, De Boek.
- CLOSSET J.-L. (1989). Les obstacles à l'apprentissage de l'électrocinétique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 716, pp. 931-950.
- CLOSSET J.-L. (1995). Raisonnements électriques à propos de circuits hydrauliques. In G. Mary & W. Kaminski, (Éds), *Actes du cinquième séminaire national de recherche en didactique des sciences physiques*. Reims, Université de Reims – Champagne – Ardennes & IUFM de Reims, pp. 39-55.
- DOUADY R. (1984). *Jeux de cadres et dialectique outil-objet*. Thèse d'État, Paris VII.
- DOUADY R. (1992). Des apports de la didactique des mathématiques à l'enseignement. *Repères IREM*, n° 6, pp. 132-158.
- DUVAL R. (1988). Écarts sémantiques et cohérence mathématique ; introduction aux problèmes de congruences. *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives de l'IREM de Strasbourg*, n° 1, pp. 7-25.
- DUVAL R. (1993). Registres de représentation sémiotique et fonctionnement cognitif de la pensée. *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives de l'IREM de Strasbourg*, n° 5, pp. 37-65.
- EURIN M. & GUIMIOT H. (1952). *Physique 1<sup>re</sup> A et B*. Paris, Hachette.
- FAIVRE-DUPAIGRE J. & CARIMEY E. (1913). *Nouveau cours de physique élémentaire 1<sup>ère</sup> C et D*. Paris, Masson.
- FAIVRE-DUPAIGRE J., LAMIRAND J. & BARRÉE M. (1931). *Nouveau cours de physique. 1<sup>re</sup> A, A' et B*. Paris, Masson.
- FERNET E. (1903). *Précis de physique*. Paris, Masson.
- FRAUDET H. (1931). *Physique, Aide mémoire Baccalauréat 1<sup>ère</sup> partie*. Paris, Hachette.
- FRÉCHENGUES P. & DUSSEAU J.-M. (1996). Les programmes actuels d'électricité en classe de quatrième, troisième et seconde analysés dans une perspective historique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 788, pp. 1615-26.
- HUME D. (1739). *Traité de la nature humaine*. Paris, Aubier.
- JOHSUA S. (1985). *Contribution à la délimitation du contraint et du possible dans l'enseignement de la physique (essai de didactique expérimentale)*. Thèse d'État, Aix-Marseille 2.
- JOHSUA S. (1994). Quelques conditions d'évolution d'un objet d'enseignement en physique : l'exemple des circuits électriques (1902 – 1980). In G. Arsac, Y. Chevillard, J.-L. Martinand & A. Tiberghien. *La transposition didactique à l'épreuve*. Grenoble, La Pensée sauvage, pp. 9-33.
- KANT E. (1781). *Critique de la raison pure*. Paris, PUF.
- KHANTINE-LANGLOIS F. & VIARD J. (1997). La présentation actuelle de la résistance électrique dans l'enseignement secondaire peut-elle expliquer les difficultés de certains étudiants face à ce concept ? In J. Gréa (Éd.), *Actes du sixième séminaire national de recherche en didactique de la physique*. Lyon, LIRDHiST.
- LEMOINE J. & VINCENT G. (1905). *Cours élémentaire de physique, 1<sup>re</sup>*. Paris, Belin.
- LEROUGE A. (1992). *Représentation cartésienne, rationalité mathématique et rationalité du quotidien chez des élèves de collège*. Thèse de doctorat, Université Montpellier II.
- LEROUGE A. (1993). Contagion de signifiant et contagion de référence sur la conceptualisation mathématique de l'intersection de deux droites. *Revue des sciences de l'éducation pour l'ère nouvelle*, n° 1-3, pp. 119-135.

MALAFOSSE D. (1994). *Intérêt et limites de l'analyse dimensionnelle dans l'enseignement de la physique en premier cycle universitaire*. Mémoire de DEA, Université Montpellier II.

MALAFOSSE D., LEROUGE A. & DUSSEAU J.-M. (à paraître). Étude en inter-didactique des mathématiques et de la physique de l'acquisition de la loi d'Ohm au collège : changements de cadre de rationalité. *Didaskalia*.

MALAFOSSE D., LEROUGE A. & DUSSEAU J.-M. (à paraître). Étude en inter-didactique des mathématiques et de la physique de l'acquisition de la loi d'Ohm au collège : changement de registres sémiotiques. *Didaskalia*.

MARTINAND J.-L. (1987). Modèle et simulation ; en guise d'introduction. In A. Giordan & J.-L. Martinand (Éd.), *Modèles et simulation : Actes des neuvièmes journées internationales sur l'éducation scientifique*. Paris, Université Paris VII, pp. 34-43.

MINISTÈRE DE L'INSTRUCTION PUBLIQUE ET DES BEAUX-ARTS (1906). Circulaire du 23 mars 1906. *Plan d'études et programmes de l'enseignement secondaire de garçons, douzième édition*. Paris, Vuibert, pp. 215-216.

NEEDHAM J. (1973). *La science chinoise et l'Occident*. Paris, Seuil.

PLANCK M. (1933). *L'image du monde dans la physique contemporaine*. Paris, Gonthier.

SAISON A., ALLAIN G., BLUMEAU M., HERCHEN C., MÉRAT R. & NIARD J. (1978). *Physique 2<sup>e</sup> C et T*. Paris, Nathan.

TSOUMPELIS L. & GRÉA J. (1995). Essai d'application de la théorie des situations en sciences physiques. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol. 15, n° 2, pp. 63-108.

VERGNAUD G. (1981). *L'enfant, la mathématique et la réalité*. Berne, Peter Lang.

VERGNAUD G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol. 10, n° 2-3, pp. 133-170.

VERGNAUD G. (1994). Homomorphisme réel-représentation et signifié-signifiant. *Didaskalia*, n° 5, pp. 25-34.

VERGNAUD G. (1995). Au fond de l'apprentissage, la conceptualisation. In R. Noirfalise & M.-J. Perrin -Glorian (Éds), *Actes de la VI<sup>ème</sup> École d'été de didactique des mathématiques*. Clermont-Ferrand, ARDM, pp. 174-185.

VIENNOT L. (1996). *Raisonnement en physique*. Bruxelles, De Boeck.

VYGOTSKI L. S. (1934). *Thought and Language*. Cambridge, MIT Press.

Cet article a été reçu le 23/09/97 et accepté le 26/02/98.