

**De l'intérêt de respecter  
la spécificité des disciplines  
scientifiques et technologiques  
dans l'enseignement.  
Le cas de la conduction électrique**

**Is-it necessary to respect the specificity  
of science and technology in teaching ?  
The case of electrical conduction**

**Jérôme VIARD**

Lirdhist, Bâtiment 401D  
Université Claude Bernard  
69222 Villeurbanne cedex, France.

**Résumé**

*La distinction entre science et technologie peut apparaître à beaucoup comme relevant d'un débat purement académique n'ayant aucune implication dans la pratique de ces disciplines et dans leur enseignement. Nous tenterons de montrer dans cet article, à partir d'un exemple emprunté à l'enseignement de l'électricité, qu'il n'en est rien. Une relation peut être établie entre des difficultés repérées chez des étudiants d'université dans la résolution d'un problème d'électricité considéré comme élémentaire et la confusion, entretenue pendant un certain nombre d'années par*

*l'enseignement dans l'esprit des élèves, entre deux présentations que nous qualifierons, l'une de technologique et l'autre de physique, de cette matière. Une volonté de clarification s'est manifestée chez les auteurs de certains programmes d'enseignement de l'électricité pour la classe de seconde en sciences physiques. Au vu de l'analyse de l'exemple précédent, il apparaît souhaitable, et dans l'intérêt des étudiants de ces disciplines, que ce projet de clarification soit mené à son terme, et qu'il apparaisse nettement à l'ensemble des acteurs du système éducatif concernés que les formulations scientifique et technologique d'une même question correspondent bien à deux problématiques distinctes.*

**Mots clés :** science, technologie, programmes d'enseignement, conduction électrique, didactique de la physique.

### **Abstract**

*The distinction between Science and Technology may seem to many people to be purely academic without any implication for the practice and teaching of these subjects. We try to show, starting from an example borrowed from electricity teaching, that it is not the case. Some difficulties pointed out at a so called elementary level can be proved to be in relationship with the confusion maintained in the student' mind during several years between two presentations of this subject : the first we call technological, the second we call physical. The authors of certain French physics curricula for 12th graders reveal a will of clarification between physical and technological teaching of this subject. Starting from the analysis of the previous example and in the interest of students learning this subject, it is desirable that this clarification project be brought to a conclusion and that all concerned actors of the educational system become aware that scientific and technological approaches of the same issue fit in with two distinct problematics.*

**Key words :** science, technology, curricula, electrical conduction, didactics of physics.

### **Resumen**

*A primera vista la distinción entre Ciencia y tecnología puede aparecer como una preocupación de tipo académico sin ninguna implicación en la práctica y en la enseñanza de esas disciplinas. En este artículo trataremos de mostrar lo contrario apoyándonos sobre un ejemplo proveniente de la enseñanza de la electricidad. A la luz de este estudio se pudo comprobar la relación entre las dificultades de algunos estudiantes en resolver ciertos problemas eléctricos considerados como básicos y la confusión mantenida durante muchos años entre un enfoque tecnológico y un enfoque físico de*

*la misma materia. Sin embargo, una voluntad de clarificación de parte de los autores de los últimos programas se manifestó en la clase de 1<sup>er</sup> en ciencias físicas. A la luz del análisis del último ejemplo y en el interés de los estudiantes de estas disciplinas convendría que este proyecto de clarificación se lleve hasta el fin y que aparezca claramente al conjunto de los miembros del sistema educativo que los enfoques científicos y tecnológicos corresponden a dos problemáticas distintas.*

**Palabras claves :** *ciencia, tecnología, currícula, conducción eléctrica, didáctica de la ciencia física.*

## INTRODUCTION

*« Scientificalité et technicité imposent-elles aux acteurs, aux savoirs et aux objets des régimes de fonctionnement différents ? Dans l'affirmative, comment l'enseignement reflète-t-il ces différences ? » (Durey & Vérillon, 1995, p. 3).*

La première de ces questions résume l'une des interrogations que devrait, semble-t-il, susciter l'introduction d'un enseignement spécifique de la technologie dans l'enseignement secondaire général : comment les disciplines voisines, notamment scientifiques, vont-elles se situer par rapport à cette « nouvelle » discipline ? Pour autant, l'intérêt qu'il peut y avoir pour des élèves à établir une distinction claire entre pratiques scientifique et technologique semble avoir échappé aux concepteurs de certains programmes de physique. Ils regroupent en effet sous la même dénomination de « *programme de physique* » des activités qui relèvent les unes de la physique, et les autres de la technologie (Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale, 1987a), sans signaler les différences qui existent entre ces pratiques. Dans ce cas du moins, les différences entre disciplines à caractère technique ou technologique d'une part et scientifique d'autre part ont été alors purement et simplement ignorées dans l'enseignement de la matière concernée (il s'agit de l'électricité). Ce point de vue correspond à une tradition ancienne depuis longtemps dénoncée par les défenseurs d'un enseignement spécifique de la technologie. Ainsi Joël Lebeaume signale-t-il que : « *le compte rendu de la réunion du 24 mai 1974 [de la commission Lagarrigue] mentionne un échange de lettres [...] critiquant la conception intégrée de la technologie à l'ensemble physique-chimie.* » (Lebeaume, 1996, p. 27). Cependant, quelques années après la réforme de 1987, d'autres physiciens, en charge de rédiger des programmes, adopteront une position diamétralement opposées à celles de leurs prédécesseurs : si des activités qui relèvent de la technologie sont prévues dans la pratique d'une classe de physique - et il y en aura -, on attirera

l'attention des enseignants sur le fait que ces activités ne sont pas à confondre avec celles qui relèvent de la physique : « [le] *souci de mieux ancrer la physique sur l'environnement technique ne doit conduire en aucun cas à confondre cette nouvelle démarche avec un enseignement de technologie. Il nous paraît important de préciser **quel est le domaine de cet enseignement de technologie et de le situer par rapport à celui d'un enseignement de physique.*** » (Groupe technique de physique, 1993, p. 7).

Il y a donc un débat au sein du système éducatif sur l'opportunité d'établir dans l'enseignement une distinction nette entre pratiques scientifique et technologique. Ce débat conserve toute son actualité comme en témoigne cette remarque d'un recteur d'académie qui attribue en partie la désaffection actuelle pour les études scientifiques dans les universités, « *au brouillage [de l'enseignement des sciences au collège et au lycée] avec celui de la technologie.* » (Bancel, cité par Gurrey, 1999, p. 12).

Nous avons, dans un travail antérieur (Viard, 1995), souligné l'intérêt de la distinction précédente pour la pratique professionnelle du chercheur, nous nous proposons dans cet article d'en établir l'intérêt pour l'enseignement en montrant sur un exemple, emprunté au domaine de l'électricité, que la confusion qui résulte, pour un lecteur non averti, du regroupement, sous un même vocable, d'activités relevant les unes de la physique, les autres de la technologie n'est pas neutre d'un point de vue didactique. Cette confusion peut être la source de réelles difficultés pour des étudiants dans la compréhension de certains phénomènes physiques. Nous examinerons d'abord la manifestation de ces difficultés chez des étudiants à l'université avant d'en proposer une interprétation. Nous tenterons ensuite, dans un premier temps, de fonder la distinction entre la formulation scientifique et technologique d'un problème sur une analyse des contenus, sans nous limiter à la seule dénomination dont nous avons déjà indiqué qu'elle peut être trompeuse. Nous tenterons ensuite de dégager des critères permettant d'identifier les deux problématiques évoquées ci-dessus. Ces critères seront ensuite utilisés pour analyser le contenu de deux réformes successives des programmes de l'enseignement de l'électricité en seconde dans l'enseignement général français, réalisées respectivement en 1987 et 1992. Un exemple sera fourni de l'état de l'enseignement de l'électricité avant la réforme de 1992. Enfin nous proposerons une vérification partielle de l'interprétation proposée de l'origine des difficultés des étudiants.

## 1. UNE DIFFICULTÉ INATTENDUE DANS LA RÉOLUTION D'UN PROBLÈME D'ÉLECTROKINÉTIQUE PAR DES ÉTUDIANTS DE LICENCE

La difficulté dont nous parlons sort du cadre, bien répertorié depuis de nombreuses années par les didacticiens de la physique, des difficultés classiques rencontrées dans l'enseignement de l'électrocinétique comme celles du « raisonnement local » ou du « raisonnement à courant constant » (Closset, 1983 ; Johsua & Dupin, 1993). Elle a trait à la résolution d'un problème considéré comme « trivial » par certains auteurs de manuels, celui de l'association de résistances en parallèle. Nous avons eu, en effet, la surprise de constater que la résolution de ce problème était la source d'une réelle difficulté pour une fraction non négligeable d'étudiants de licence, issus aussi bien des filières technologiques que de l'enseignement général (Khantine-Langlois & Viard, 1992 ; Khantine-Langlois & Viard, 1997 ; Viard & Khantine-Langlois, 2001).

Tous les ans, une même question accompagnant le schéma de la figure 1 ci-dessous, a été posée à des groupes d'au moins 40 étudiants de licence se destinant au professorat de l'enseignement secondaire et suivant un module d'initiation à la didactique de la physique : « *Comment varie la tension aux bornes de la résistance  $R_1$ , quand on enlève la résistance  $R_3$  ?* »

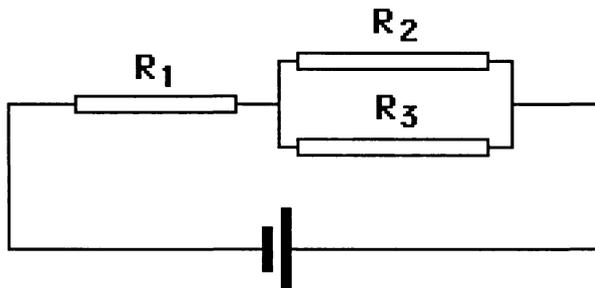


Figure 1 : Ce schéma servait de support à la question posée aux étudiants

La réponse attendue des étudiants était la suivante : « *La suppression d'une des résistances en parallèle a pour effet d'accroître la résistance totale du circuit, donc de diminuer l'intensité dans le circuit et la tension aux bornes de la résistance  $R_1$ .* »

L'expérimentation s'est déroulée pendant dix années consécutives à partir de 1991. Nous n'avons pas trouvé, au cours de ces années, d'évolution sensible ni dans la nature des réponses, ni dans leur fréquence d'apparition au sein de la population étudiante et nous donnons ci-après un exemple des résultats obtenus au cours de ces expérimentations.

Une fois éliminés les étudiants utilisant un raisonnement local, qui, de ce fait, n'ont pas répondu à la question qui nous intéressait, nous avons été surpris de trouver encore 40 % d'étudiants, sur un effectif de 60, incapables de fournir une réponse correcte, que ce soit en licence d'ingénierie électrique ou en licence de sciences physiques. De 16 à 25 % des étudiants interrogés (16 % des étudiants de la licence d'ingénierie électrique, 25 % des étudiants de l'autre licence), ont répondu que la suppression d'une des résistances en parallèle avait pour effet de diminuer la résistance totale du circuit (pour plus de détails voir Khantine-Langlois & Viard, 1992 ; Viard & Khantine-Langlois, 2001).

Nous avons trouvé peu de littérature sur le thème des difficultés suscitées par le concept de résistance électrique à l'exception d'une étude de L. Mc Dermott & P. Schaffer qui atteste que cette difficulté n'est pas propre aux étudiants français. Pour une partie des étudiants rencontrés par ces auteurs, la résistance d'un circuit électrique est simplement fonction du nombre de composants résistifs de ce circuit indépendamment de la manière dont ils sont connectés. Cette concordance de résultats n'apporte cependant aucune information sur l'origine de la difficulté rencontrée. Mac Dermott & Schaffer se contentent d'indiquer que selon eux : « *De nombreux étudiants ne disposent pas de base observationnelle ou expérimentale sur laquelle ils pourraient fonder la construction des concepts formels de l'électricité élémentaire.* » (Mc Dermott & Schaffer, 1992, p. 996).

Plus précisément ils indiquent que : « [la] *difficulté à distinguer la résistance équivalente d'un réseau et la résistance d'un élément individuel est tout à fait commune.* [Certains étudiants] *ne semblent pas prendre garde au fait que la résistance équivalente est une abstraction qui est principalement utile pour trouver le courant total ou la différence de potentiel dans une branche, un réseau, un circuit. Souvent il apparaît que les étudiants considèrent la résistance équivalente dans le circuit comme si elle était une propriété d'une ampoule individuelle au sein du circuit.* » (Mc Dermott & Schaffer, 1992, p. 999).

En résumé, L. Mc Dermott & P. Schaffer considèrent que les difficultés éprouvées par les étudiants ont pour origine le fait que ces derniers en restent à une analyse du circuit électrique en termes d'objets matériels. Les étudiants ont du mal à dépasser ce niveau de description pour accéder aux phénomènes dont ces objets sont le siège. Pour illustrer ce constat Mac Dermott & Schaffer indiquent par exemple que : « *Le terme parallèle*

*conserve souvent une interprétation plutôt géométrique qu'électrique.* » (Mc Dermott & Schaffer, 1992, p. 999). Nous partirons de cette dernière remarque pour proposer une interprétation de la difficulté éprouvée par les étudiants.

## 2. UNE TENTATIVE D'INTERPRÉTATION DE LA DIFFICULTÉ PRÉCÉDENTE

L'interprétation de cette difficulté a nécessité un réexamen de la nature du problème. La référence à l'histoire s'est avérée utile : au début du 19<sup>ème</sup> siècle ce problème n'était pas considéré comme « trivial ». Il faisait l'objet au contraire, aux débuts de l'enseignement de l'électricité, dans les années 1830 d'un enseignement universitaire approfondi. Pouillet (1837) présente ce problème dans la troisième édition des « *Éléments de physique expérimentale et de Météorologie* » comme l'un des objets de ses recherches. Il semblerait donc que la difficulté de ce problème ait été fortement sous-estimée par les auteurs de manuels actuels. Nous présenterons, dans la deuxième partie de cette section, la formulation du problème proposée par Pouillet et sa solution mais auparavant la référence à l'histoire nous permet de faire un autre constat : le problème décrit dans la section précédente et soumis aux étudiants diffère sensiblement de celui posé par Pouillet et ses interlocuteurs du 19<sup>ème</sup> siècle. La même situation de départ : le branchement en parallèle de deux éléments de circuit, peut conduire, suivant le cadre théorique choisi et la question posée, à deux problèmes de nature différente et de difficulté très différente. Ces problèmes ont des noms distincts, cette différence de dénomination n'est pas anodine. Le problème proposé aux étudiants est celui de « *l'association de résistances en parallèle* », le problème tel qu'il est formulé par Ohm (1860, p. 64) ou par Pouillet (1837, p. 591) est celui des « *courants dérivés* ». Nous examinerons successivement les deux formulations du problème en commençant par l'actuelle.

### 2.1. Dans sa formulation actuelle, le problème est celui de l'association d'objets matériels et des lois qui régissent cette association

Depuis 1978, le problème est formulé dans les programmes de seconde en termes d'association d'objets. Si la formulation fluctue un peu au cours du temps : « *association de dipôles* » en 1978, « *association de conducteurs ohmiques* » en 1987 ou encore « *association de résistances* » en 1992, le contenu désigné reste le même.

Le terme « résistance » désigne, par métonymie, un objet fortement résistant et faiblement conducteur, de même que le terme « conducteur » désigne, lui, un objet fortement conducteur et faiblement résistant. L'opposition, ainsi instaurée entre les termes conducteur et résistance resterait, peut-être, sans conséquence si elle demeurerait confinée au niveau du langage courant. Mais cette opposition a, de plus, une traduction symbolique graphique : dans un schéma électrique, le conducteur est représenté par un trait sans épaisseur et la résistance par un rectangle allongé. Cette représentation graphique est relativement récente, jusqu'aux années 1970, dans des documents techniques, comme les catalogues de composants électroniques fournis par les fabricants, les résistances étaient représentées par une ligne brisée. La représentation antérieure n'instaurait pas la même discontinuité entre un « conducteur » et une « résistance » représentée alors comme un conducteur possédant une longueur plus importante pour un même espace occupé, ce qui était le cas des résistances bobinées.

Par ailleurs, la représentation symbolique de la résistance acquiert, dans le contexte de l'enseignement, une traduction fonctionnelle qui, nous le verrons, n'est pas sans conséquences. La résistance est présentée comme un limiteur de courant (par opposition au conducteur qui possède la faculté de conduire sans limitation). Certains manuels illustrent de façon particulièrement éloquente cette « fonction » de la résistance. Ainsi dans l'un d'entre eux, le chapitre intitulé : « *La résistance d'un conducteur* » débute par la représentation d'un tuyau d'arrosage connecté à un robinet assorti de la question : « *En électricité, une résistance joue-t-elle le même rôle qu'un robinet ?* » (Gendric et al., 1993, p. 40). L'établissement d'une analogie stricte entre le circuit hydraulique précédent et un circuit électrique, permet ensuite de répondre positivement à la question posée au moyen du constat suivant : l'introduction d'une résistance dans un circuit électrique comprenant une ampoule diminue l'éclat de la lampe.

En établissant cette analogie les auteurs cherchent, à l'évidence, à identifier une fonction commune à ces deux objets, qui cependant n'a aucun correspondant dans la technologie de référence sous-jacente. En électronique en effet, la fonction des résistances consiste essentiellement à répartir des potentiels, à fixer des « *points de fonctionnement* » pour d'autres composants en constituant des « *ponts diviseurs de tension* ». Cette « fonction » est ainsi propre au discours enseignant. D'où vient cette attribution, d'une fonction déterminée à cet objet ? Peut-être tout simplement des exigences des programmes officiels. C'est ce que laisse supposer ce discours d'un formateur de l'enseignement technique. L'auteur précise d'abord les compétences requises pour l'élève en citant le texte du référentiel : « *l'élève doit être capable, à partir de l'analyse du modèle et de*

la structure de donner la fonction ». Puis il développe en commentant : « [...] en partant du composant, en allant vers la fonction, il y a le modèle électrique du composant. Du point de vue électrique, il y a les composants passifs et les composants actifs. Les composants passifs au niveau de l'électronique, c'est relativement simple, ce sont les composants de type résistif, de type capacitif, ou les composants de type inductif. (Je dis bien les composants de ce type-là parce qu'on va essayer de distinguer, chez l'élève comme chez l'enseignant, le composant et son comportement, c'est-à-dire le composant résistif a une résistance et dans le langage courant, on appelle le composant du même terme que la grandeur, c'est à dire que l'on confond la résistance et le composant résistif.) » (Calmettes, communication privée).

Le « *comportement* » résistif est clairement identifié dans le commentaire précédent à une « *fonction* » spécifique de l'objet. Ailleurs, si le terme de fonction n'est pas utilisé, l'emploi du verbe « *résister* », suggère fortement que la résistance exerce une action sur le courant électrique :

« *La résistance est une grandeur qui caractérise l'aptitude du conducteur ohmique à **résister** au passage du courant électrique.* » (Ce sont les auteurs qui soulignent, Dirand et al., 1981, p. 155).

Ce point de vue a des échos dans d'autres domaines que celui de l'enseignement comme l'atteste ce commentaire extrait d'un ouvrage de vulgarisation de l'histoire des techniques : « *Dans un circuit, un composant résiste plus ou moins au courant, mais la résistance est un composant spécialement conçu pour réduire le flot des électrons. Elle protège ainsi les composants fragiles d'un excès de courant.* » (Drye, 1993, p. 104).

Pour conclure, si cette présentation de la résistance ne traduit pas le point de vue du technicien électronique, elle ne traduit pas davantage celui du physicien. C'est en effet en termes de conductance, de « *pouvoir conducteur* » et de « *conductibilité* », et non pas de résistance, qu'est analysée et théorisée depuis le début, par des physiciens comme Becquerel (1826) et Ohm (1860) la conduction électrique. L'élément primitif est la circulation de l'électricité et non ce qui s'oppose à cette circulation. La notion de résistance est associée par contre à l'une des premières applications de l'électricité voltaïque que constitue le télégraphe électrique à partir du constat de l'existence de « *pertes de transmission* » (Schagrin, 1963, p. 541). Cette conception de la résistance exprime ainsi un point de vue qui est beaucoup plus proche du sens commun que de contenus propres aux deux disciplines qui nous intéressent ici. Cependant, son association à une fonction technique nous a semblé intéressante, parce qu'elle est l'expression d'une confusion, chez certains auteurs, entre des points de vue, des questionnements qui gagneraient à être distingués. La résistance

est-elle l'un des constituants d'un dispositif technique qui assure l'une des fonctions particulières nécessaires au fonctionnement de l'ensemble ou bien est-elle, dans un circuit électrique, un conducteur un peu (ou beaucoup) moins conducteur que les autres éléments du circuit ? Suivant le point de vue que l'on adopte il est clair que les problèmes que l'on formulera à propos de ce même objet seront différents. Cette remarque nous conduit à examiner maintenant la deuxième formulation du problème, celle des « courants dérivés ».

## 2.2. Dans une formulation antérieure, le problème met en relation des phénomènes

La deuxième formulation est celle d'un problème, autrefois très classique, dit des « courants dérivés » obtenus lorsqu'on branche un fil en dérivation sur un autre. Elle est l'illustration du point de vue du physicien. La problématique retenue est celle de la description de la conduction électrique, dans des matériaux de géométrie bien définie : des « fils » généralement métalliques. La solution exacte du problème n'est pas simple ; elle suppose d'abord l'établissement des : « *Lois générales de l'intensité des courants électriques.* » (Pouillet, 1837, p. 582), c'est-à-dire de l'ensemble des dépendances de l'intensité du courant, repérée par ses effets magnétiques, envers les caractéristiques géométriques (longueur, section) et substantielle (conductivité) de ce circuit. Pour une source de tension donnée, à température donnée, l'intensité du courant est inversement proportionnelle à la longueur ( $l$ ) du conducteur mais proportionnelle à la section ( $s$ ) et à une propriété de la substance, la conductivité ( $c$ ). Pouillet en déduit une condition d'égalité des courants dans deux circuits ayant des caractéristiques différentes mais connectés chacun à des sources de tension identiques. Ainsi, le premier circuit ayant pour caractéristiques  $s, c, l$  et le second  $s', c', l'$  :

« pour que le deuxième courant soit égal au premier, il suffit que l'on ait :  $s'.c'.l = s.c.l'$ , condition qui peut être remplie d'une infinité de manières. » (Pouillet, 1837, p. 589).

Cette condition d'égalité sera reformulée par Lamé peu après (1840) de la manière suivante :

$$\frac{c.s}{l} = \frac{c'.s'}{l'}$$

En identifiant, dans le rapport  $\frac{c.s}{l}$ , un invariant caractéristique du

niveau de conduction d'un circuit pour une source donnée, Lamé introduit un nouveau concept : celui de conductance électrique, et lui donne un nom :

« Ainsi la fraction  $\frac{c.s}{l}$  tant qu'elle conserve la même valeur, donne à une portion de circuit la faculté de conduire un courant de même intensité ; nous appelons cette fraction la puissance conductrice de la portion considérée. » (Lamé, 1840, p. 328).

Avec l'élaboration du concept de faculté conductrice est introduit la structure ou le cadre théorique, constitué de l'ensemble des propriétés du circuit (électriques, géométriques et substantielles) et des relations existant entre ces propriétés, à l'intérieur duquel le problème des courants dérivés pourra être résolu. La résolution consiste à déterminer les caractéristiques ( $l, s$ ) d'un circuit simple équivalent à un circuit comportant une dérivation. Si elle est complexe, la solution envisagée apparaît cependant « naturelle » dans cette problématique définie en termes de conduction : « *Un courant [...] traverse d'abord le fil de cuivre racbr' qui forme avec [la source] un circuit simple ; ensuite, avec un autre fil de cuivre adb on vient établir des communications aux points a et b, [...] Il paraît naturel de supposer que le courant va se ramifier ou se décomposer au point a, qu'une partie continuera à passer directement de a en b par le premier fil c, tandis qu'une autre partie viendra prendre la nouvelle route qui lui est offerte par le fil additionnel adb.* ». (C'est nous qui soulignons, Pouillet 1837, p. 591). Voir figure 2.

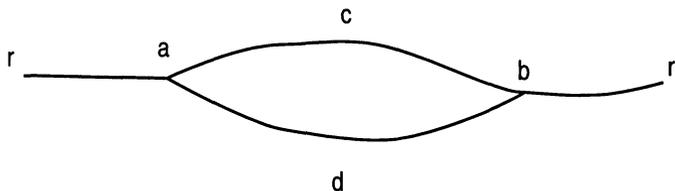


Figure 2 : À un conducteur initial,  $acb$ , est rajouté, en dérivation, le conducteur  $adb$

Le résultat obtenu est le prolongement direct du raisonnement précédent : deux routes valent mieux qu'une pour conduire l'électricité. De plus, ce résultat obtenu prend immédiatement sens parce qu'il est en accord avec les autres éléments théoriques dont on dispose : la dépendance directe de l'intensité du courant à l'égard de la section du conducteur. L'ajout d'un conducteur en dérivation équivaut à accroître la section du conducteur existant et se traduit nécessairement par un accroissement de l'intensité. Il ne restera qu'à calculer l'accroissement de la section du conducteur existant permettant d'obtenir un accroissement d'intensité équivalent à celui produit

par l'apport d'une dérivation. L'idée de conducteur équivalent sous-tend le calcul. L'argumentation qui consiste à raisonner à partir de l'influence de la section du conducteur sur l'intensité, pour interpréter l'effet de l'adjonction d'une dérivation, sera reprise régulièrement jusqu'au début du XX<sup>e</sup> siècle. Ainsi Branly justifie la règle classique selon laquelle l'inverse de la résistance équivalente à deux résistances en parallèle est égale à la somme des inverses des deux résistances précédentes par le fait que, si les autres paramètres (longueur et résistivité) sont pris égaux à l'unité, l'inverse des résistances  $r$  et  $r'$  de chaque conducteur sera égal à leurs sections respectives  $s$  et  $s'$ . Par suite : « *l'ensemble des deux conducteurs se comportera comme un conducteur unique de longueur 1, de section  $s+s'$*  »

dont la résistance serait  $r_1 = \frac{1}{s+s'}$  » (Branly, 1898, p. 449).

De même Graetz, après avoir anticipé une difficulté d'interprétation chez son lecteur : « *Ce serait une erreur de croire que deux dérivations du conducteur opposent, au courant, une résistance totale égale à la somme des résistances des deux conducteurs. Cette résistance est au contraire beaucoup plus petite, plus petite même que la résistance de chaque conducteur, prise séparément.* » (Graetz, 1911, p. 65), propose comme solution à cette difficulté un raisonnement très proche de celui de Branly : « *On peut s'en rendre immédiatement compte en supposant que les deux dérivations ont une même longueur et une même section. Le courant s'écoule alors, de a à travers les deux dérivations en même temps ; tout se passe donc comme s'il n'existait qu'un seul conducteur de a en b mais de section double de celle de chacune des dérivations. La résistance d'un tel conducteur est comme nous le savons, seulement la moitié de celle des dérivations.* » (Graetz, 1911, p. 65).

Cette analyse de Graetz contient une proposition d'interprétation de l'origine des difficultés rencontrées par les étudiants et nous permet de revenir à l'objet principal de cette section.

### **2.3. Formuler la question exclusivement en termes d'association de résistances écarte les étudiants de la seule solution vraiment satisfaisante au problème posé**

La difficulté rencontrée par les étudiants nous est apparue très tôt en relation directe avec la formulation du problème en termes d'association d'objets présentés comme des obstacles à la circulation du courant. À cet égard, le commentaire d'étudiants ayant apporté la « bonne réponse », est aussi significatif que la réponse erronée qui affirme que : « *Supprimer l'une*

*des résistances diminue la résistance totale du circuit.* » En affirmant que : « *La somme de deux résistances en parallèle est toujours inférieure à l'une des deux résistances* » l'un de ces étudiants met le doigt sur la difficulté à laquelle il est confronté : dire que la somme de deux obstacles est inférieure à l'un de ces obstacles envisagé séparément est absurde. Cet étudiant tient à signaler cette contradiction au moment même où il fournit à l'enseignant la réponse que ce dernier attend de lui.

Nous avons vu plus haut que la difficulté rencontrée par les étudiants est connue et mentionnée depuis longtemps par certains spécialistes du domaine, Graetz signale à son lecteur qu'elle peut être source d'erreur. On ne peut qu'être frappé également par le fait que cet auteur souligne, comme l'étudiant cité plus haut, le caractère paradoxal de l'effet de l'association de conducteurs en dérivation sur la résistance totale que ces conducteurs opposent au courant : « *Cette résistance est au contraire [de ce à quoi on aurait tendance à croire] beaucoup plus petite, plus petite même que la résistance de chaque conducteur, prise séparément.* » (Graetz, 1911, p. 65). Il y a cependant une différence importante : l'étudiant précédent est incapable de justifier l'énoncé ci-dessus, Graetz, lui, est en mesure de fournir une interprétation d'un résultat qu'il sait paradoxal pour ses lecteurs car il peut passer d'une problématique formulée en termes de comptabilisation des obstacles à une autre formulée en termes de recherche des conditions de la conduction optimale. Nous avons vu en effet, que, dans une problématique formulée en termes d'obstacle, l'interprétation du résultat obtenu n'est jamais disponible alors que dans une problématique formulée en termes de « chemin » de conduction, cette interprétation est disponible avant même que le calcul ne soit achevé. Si la dérivation constitue une « *nouvelle route* » offerte au courant pour reprendre les termes de Pouillet (1837), il est naturel de penser qu'elle facilite la conduction. Il en résulte, pour celui qui a la charge de résoudre le problème, un « coût intellectuel » beaucoup plus faible dans ce dernier cas, qui peut suggérer, en retour, une interprétation possible de la difficulté précédente des étudiants à résoudre le problème. Si 40 % d'étudiants sont incapables de résoudre ce problème élémentaire, c'est en grande partie parce qu'ils ne sont pas en mesure de reformuler ce problème en termes de conductance. Une remarque similaire a été faite par certains auteurs (Johnstone & Mughol, 1978) dans le cas d'élèves plus jeunes. La solution aux difficultés des étudiants reviendrait pour eux à changer de cadre théorique selon la terminologie de Régine Douady (1986). Régine Douady ne parle pas de cadre théorique mais simplement de « cadre » mais la définition qu'elle en donne, un ensemble d'objets de la théorie munis de leur relations, de leurs formulations, de leurs représentations, correspond bien à celle d'un cadre théorique. Ce changement de cadre théorique entraîne à son tour un changement de problématique si l'on définit une problématique comme une manière de

formuler un problème à l'intérieur d'un cadre théorique déterminé. C'est d'ailleurs l'objectif du changement de cadre pour R. Douady : « *Le changement de cadre est un moyen d'obtenir des formulations différentes d'un problème qui, sans être nécessairement équivalentes, permettent un nouvel accès aux difficultés rencontrées et la mise en oeuvre d'outils techniques qui ne s'imposaient pas dans la première formulation.* » (Douady, 1986, p. 11). Mais cette remarque débouche sur une question : pourquoi les étudiants n'ont-ils pas eu accès à la problématique la plus féconde ?

Une réponse consiste à situer l'origine des difficultés actuelles des étudiants dans la présentation qui leur a été faite de l'électricité avant la licence, privilégiant l'une des problématiques au détriment de l'autre. Pour examiner le bien-fondé de cette supposition, il est nécessaire d'étendre notre champ d'investigation relatif à l'enseignement de l'électricité au delà du problème très limité que nous avons examiné jusque là. Mais cela suppose de disposer de critères permettant d'identifier les problématiques précédentes dans d'autres contextes. La première, nous l'avons vu, est formulée en termes d'agencement d'objets techniques et de fonctionnement de l'ensemble. La seconde est formulée en termes de phénomènes (courant électrique, simple, dérivé), de propriétés physiques (géométrique, substantielle), de grandeurs physiques (intensité, longueur, section, conductivité) et de relations entre ces propriétés et/ou ces grandeurs qui permettent de définir le concept physique de conductance électrique. La première problématique traduit plutôt le point de vue du technologue et la seconde celle du physicien. Les éléments rassemblés sont toutefois insuffisants pour fonder sur des bases solides une telle distinction, cette question fait l'objet de la section suivante.

### **3. QUELS FONDEMENTS POUR UNE DISTINCTION ENTRE PROBLÉMATIQUES SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE ?**

Cette question renvoie elle-même à une autre préalable : cette distinction a-t-elle encore un sens aujourd'hui en raison de l'imbrication croissante des sciences et des techniques ? Pour notre part, nous ferons l'hypothèse que ces pratiques sont associées à des cadres théoriques distincts et que ces cadres théoriques peuvent conduire à leur tour à des problématiques distinctes également. Avant d'explicitier les hypothèses précédentes, il est nécessaire de préciser le sens donné ici au terme de technologie. La lecture de l'article « Technologie » dans l'*Encyclopædia Universalis* (1995) rédigé par J. Guillerme révèle que ce mot est fortement polysémique. On peut en dénombrer trois acceptions : la première et la

plus ancienne, empruntée au grec, est celle d'un discours général sur les techniques ; la plus récente n'est autre que la version anglicisée du mot technique et la troisième, datant du 19<sup>ème</sup> siècle, définit la technologie comme l'étude et la mise en oeuvre des procédés de fabrication. Sans exclure ce dernier aspect, nous proposons une acception plus large. Nous considérerons que la technologie a pour objet la conception, la réalisation et le maintien en état de fonctionnement des ensembles d'objets techniques. Ce faisant, nous reprenons, à peu de chose près, le contenu auquel se réfère implicitement la COPRET (Commission Permanente de Réflexion sur l'Enseignement de la Technologie) : « *La finalité proposée pour l'éducation technologique comme élément important de la culture générale est : 1) Compréhension, appropriation des démarches de conception, étude, fabrication, essais, utilisation de produits techniques (objets techniques matériels, organisation d'informations en vue d'un but déterminé).* » (Commission Permanente de Réflexion sur l'Enseignement de la Technologie, 1986, p. 7).

La définition précédente renvoie à celle d'objet technique. Certains, après avoir posé explicitement la question : « *QU'EST-CE QU'UN OBJET TECHNIQUE?* » (Séris, 1994, p. 22), la laissent sans réponse. Ils auraient pu cependant en trouver une chez un de leurs prédécesseurs, Gilbert Simondon, auquel un colloque du collège international de philosophie a été consacré en 1992. Mais curieusement, l'auteur de la question ci-dessus, tout en notant l'apport décisif que constitue « *Le mode d'existence des objets techniques* » indique que son auteur ne fournit pas de « *définition liminaire* » (Séris, 1994, p. 29). Pourtant Simondon fournit bel et bien une définition au début de son ouvrage : « *Il est possible de chercher à définir l'objet technique en lui-même par le processus de concrétisation et de surdétermination fonctionnelle qui lui donne sa consistance au terme d'une évolution, prouvant qu'il ne saurait être considéré comme un pur ustensile.* » (Simondon, 1969, p. 15).

Pour Simondon, l'idée de fonction est au coeur de celle d'objet technique. L'objet technique est la concrétisation d'une fonction et c'est cela même qui lui donne sa consistance. Les précautions prises dans la formulation soulignent l'importance que l'auteur attache à son énoncé. Simondon constitue l'une des références de la COPRET aussi n'est-il pas surprenant que le concept de fonction occupe une place centrale dans les propositions de cette commission : « *Un objet technique peut être lu suivant diverses perspectives et ce sont ces multiples lectures qui mettent en évidence les convergences qu'il assure. **Il se lit comme un agencement d'éléments matériels (ou d'informations dans le cas d'un logiciel) rationnellement conçus et réalisés en vue d'un usage déterminé. Il se lit comme un " système " de fonctions techniques en interrelations,***

*conçues en vue de l'efficacité et de la fiabilité d'une fonction globale caractérisant son emploi. Il se lit comme articulation de phénomènes scientifiquement ou empiriquement connus, délibérément choisis en vue de remplir des fonctions déterminées, et il est le siège de phénomènes annexes, parasites et perturbateurs qui naissent de la concrétisation de l'objet et de son fonctionnement, phénomènes qu'il faut maîtriser, soit en les exploitant utilement, soit par des mises au point en les éliminant ou tout au moins en les rendant fonctionnellement inexistantes. Ces trois lectures font apparaître l'objet technique comme concrétisation d'une pensée créatrice qui maîtrise sa création. » (Commission permanente de réflexion sur l'enseignement de la technologie, 1986, p. 3).*

Si nous adoptons le point de vue exposé ci-dessus, il résulte de la définition donnée auparavant que la technologie a pour objet principal la conception et l'étude des fonctions techniques et des systèmes de fonctions techniques d'une part, et leur réalisation sous forme d'objets techniques ou d'ensemble d'objets techniques d'autre part. C'est ce qu'énonce, de façon un peu plus restrictive, l'un des participants au colloque consacré à G. Simondon et évoqué plus haut : « *La technologie comme mécanologie étudie la dynamique machinique des objets techniques industriels c'est à dire des objets qui fonctionnent.* » (Stiegler, 1994, p. 240). Parmi les disciplines il en est peu qui font une place aussi importante au concept de fonction et à l'analyse fonctionnelle, à ce titre, remarque Lucien Géminard président de la COPRET : « *la technologie est plus proche des sciences naturelles que de la physique et de la chimie* » (Géminard, 1980, cité par Calmettes, 1996). Ce point de vue est ancien, il trouve cependant aujourd'hui une justification nouvelle du fait de l'importance prise dans certaines pratiques industrielles, par l'activité de conception désormais totalement dissociée de l'activité de réalisation des produits. Le point de vue fonctionnel acquiert, dans ce contexte, un caractère opératoire nouveau. L'analyse fonctionnelle descendante qui permet de décomposer une fonctionnalité globale en sous-fonctions de niveau de complexité inférieure jusqu'à atteindre une fonction élémentaire est ainsi à la base de toute l'activité de conception de circuit intégré en micro-électronique. Elle constitue d'ailleurs le noyau dur des enseignements des D.E.A. (Diplômes d'Études Approfondies) de micro-électronique pour la partie conception. Le développement de la SADT (Structured Analysis and Design Technic) dans l'industrie et son introduction dans l'enseignement (Calmettes, 1996) attestent, par ailleurs, de l'importance qu'a pris l'analyse fonctionnelle dans la conception des objets techniques au delà du domaine restreint de la micro-électronique. Ces outils nouveaux ne doivent pas faire oublier les anciens : le schéma constitue déjà un outil d'analyse fonctionnelle comme l'atteste le premier sens du mot (Robert, 1976).

L'analyse fonctionnelle a pour complément l'analyse structurelle qui vise à la décomposition de l'objet en ses différents éléments matériels qui le constituent : « [...] *la culture technoscientifique postule une maîtrise de la complexité fonctionnelle de l'univers technique concret, de sa surface tournée vers l'utilisateur et une maîtrise de sa complexité structurelle, de son "intérieurité", qui renvoie aux processus de production et de maintenance qui se dérobe généralement comme "boîte noire".* » (Hottois, 1993, p. 28). Mais cette seconde analyse a une visée plus architectonique qu'interprétative. Pour reprendre la formulation d'un auteur de contenus d'enseignements de S.T.I. (Sciences et Techniques Industrielles) cité par B. Calmettes, « *La structure supporte les fonctions* » (Calmettes, 1996, p. 77), mais le sens d'un objet technique est porté par sa fonction ou par l'ensemble de ses fonctions qui définissent son identité. Un objet technique, dont la fonction technique a été oubliée, a perdu son identité d'objet technique, même s'il conserve une fonction esthétique et l'analyse de la structure matérielle de l'objet ne permettra pas, à elle seule, d'attribuer une signification à l'existence de cet objet.

Si nous voulons établir un parallèle, nous pouvons dire qu'en physique, le sens est porté par les propriétés physiques et par les relations entre ces propriétés qui sont à l'origine des concepts fondamentaux. En effet, depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle, la physique est définie comme la science des propriétés des corps : « *La physique est la science des propriétés des corps naturels, de leurs phénomènes et de leurs effets* » (D'Alembert, 1765, p. 539a) et de leur rapports : « *Les propriétés sensibles des corps qui nous environnent, ont entre elles des rapports plus ou moins marqués dont la connaissance est presque toujours le terme prescrit à nos lumières, et doit être par conséquent notre principal objet dans l'étude de la Physique.* » (D'Alembert, 1744, p. iij).

« *Qualité propre ou propriété* » (Mariotte, 1992, p. 25) est synonyme de caractère. Le caractère d'une personne se manifeste par son comportement, aussi, un équivalent moderne du terme de propriété est celui de comportement (Robert, 1976). La quête des propriétés suppose une attitude active du physicien et l'on accède aux propriétés physiques par l'observation mais surtout par l'expérience : « *Les premiers objets réels de la physique expérimentale sont les propriétés générales des corps, que l'observation nous fait connaître, pour ainsi dire, en gros, mais dont l'expérience seule peut mesurer et déterminer les effets* » (D'Alembert, 1756, p. 300b), et l'expérience, « *ne se borne pas à écouter la Nature, mais elle l'interroge et la presse.* » (D'Alembert, 1756, p. 298b). Les propriétés traduisent ainsi le comportement d'un objet physique en réaction à des sollicitations externes, ainsi les propriétés électriques traduisent le comportement d'un corps soumis à une « tension » électrique.

L'établissement des relations de dépendance réciproque entre propriétés physiques permet ensuite de décrire ou de comprendre les phénomènes physiques. Cette définition de l'objet de la pratique scientifique est encore partagée par certains de nos contemporains : « *J'ai commencé par définir la science comme un effort pour comprendre le comportement de la nature.* » (Feynman, 1985, p. 244).

En résumé, un même objet issu de la technique peut être l'objet de deux interprétations :

– « *il peut être lu* », prioritairement comme un objet technique. S'il est le siège de phénomènes physiques, l'intérêt porté à ces phénomènes sera conditionné à la réalisation de la fonctionnalité associée à l'objet. À ce titre, certains phénomènes qui contribuent à la réalisation de cette fonction seront valorisés, d'autres, au contraire, seront considérés comme « *parasites* » s'ils perturbent la réalisation de la fonction visée,

– il peut être considéré, au contraire, prioritairement comme le siège de phénomènes physiques, et accessoirement comme un produit de la technique dont le seul intérêt est, dans le cas considéré, de permettre l'émergence des phénomènes que l'on veut étudier. Les phénomènes qualifiés de « *parasites* » pour la réalisation d'une fonction technique présentent alors le même intérêt que les phénomènes « *favorables* », et la distinction précédente entre ces deux types de phénomènes n'a plus lieu d'être pour le physicien.

Pour conclure, nous dirons qu'il existe une activité théorique dans les deux disciplines, mais que l'objet de cette activité diffère selon la discipline. Dans un cas, cette activité a pour objet la conception et l'étude de la réalisation de fonctions complexes à partir de fonctions élémentaires, dans un autre, cette activité a pour objet, à la fois la caractérisation des phénomènes au moyen d'un ensemble de propriétés, et leur interprétation par l'établissement de relations entre ces propriétés.

De même l'activité de modélisation occupe une place déterminante dans les deux disciplines. Mais sous une même dénomination, sont désignées des pratiques totalement distinctes. Ainsi pour certains auteurs, (Hostein & Lebrun, 1992), la modélisation technique doit s'appuyer sur la manipulation des pièces et sur la schématisation, et « [*l'*] *on peut distinguer quatre niveaux opérationnels des modèles, qui correspondent par exemple dans le cas d'une machine, aux questionnements suivants : il s'agit de comprendre comment la construire, comment s'en servir, comment la réparer et comment elle fonctionne.* » (Peltier, 1992, p. 147). Cette remarque est corroborée par l'association faite dans des programmes de l'enseignement technique entre « *approche fonctionnelle [...] conduite selon la méthode d'analyse descendante* » et « *modélisation des activités des systèmes.* »

(Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale, 1988, p. 143). Si l'on se réfère maintenant, pour la modélisation physique, au travail de S. Johsua et J.-J. Dupin, on se convaincra aisément que sous le nom de modélisation, ces auteurs désignent, par les questions qu'elle pose et auxquelles elle tente de répondre, une activité d'une toute autre nature que celle évoquée ci-dessus. L'activité de modélisation, dans l'exemple considéré, a pour objet d'établir une « *analogie formelle* » entre un phénomène inconnu du sujet, (la conduction électrique), et un phénomène connu (le déplacement d'un mobile sur un trajectoire) (Johsua & Dupin, 1988, p. 195).

Pour conclure, quand une même situation de départ est considérée sous des angles différents par le technologue et le physicien, son examen peut conduire à des problématiques distinctes. Nous ferons maintenant l'hypothèse que l'établissement, dans l'enseignement, d'une distinction explicite entre les problématiques correspondant aux deux points de vue précédents, est bénéfique pour l'apprentissage. Avant de discuter cette hypothèse nous examinons une tentative d'introduction de cette distinction, en analysant l'évolution des programmes de la classe de seconde de 1987 et 1992, dans la section suivante.

#### **4. L'ÉVOLUTION DES PROGRAMMES DE PHYSIQUE DE LA CLASSE DE SECONDE, RELATIFS À L'ENSEIGNEMENT DE L'ÉLECTRICITÉ, DE 1987 À 1992**

Les critères retenus pour identifier les problématiques dans lesquelles s'inscrivent les contenus des programmes, découlent directement de l'analyse précédente. Un premier critère est relatif à la terminologie utilisée pour définir les objectifs d'apprentissage. Si ces objectifs sont définis en termes d'analyse fonctionnelle d'un objet technique, la problématique mobilisée sera qualifiée de technologique même s'il s'agit officiellement d'un programme de « *physique* ». Inversement, si ces objectifs sont définis en termes d'identification de phénomènes, nous serons en présence d'une problématique scientifique, quel que soit le nom attribué au contenu d'enseignement. En dehors de ces critères directs, d'autres sont relatifs aux référents et aux outils de description et d'analyse utilisés par les différents acteurs dans la présentation des contenus. Si, par exemple, dans la présentation d'un dispositif, l'accent est mis sur les éléments qui le composent, rattachés explicitement ou non à la réalisation d'une fonction technique, nous considérerons que le cadre théorique mobilisé est celui de la technologie, même si cette présentation est faite à l'intérieur d'un programme de physique. Si, au contraire, l'accent est mis sur la recherche

des propriétés d'un ou plusieurs objets appartenant à ce dispositif et sur l'établissement des relations au sein de cet ensemble de propriétés, la problématique mise en oeuvre sera évidemment différente.

Nous analysons maintenant une première réforme qui, en 1987, consacre des dispositions anciennes et traduit la continuité puis une autre qui, en 1992, marque, au contraire, une rupture qui nous a semblé significative.

#### 4.1. Le programme de 1987

Dans l'examen de ce document (Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale, 1987a), nous retiendrons trois points : 1°) la dénomination de la matière enseignée, 2°) le domaine de référence (nous avons évité à dessein le terme de pratique de référence en raison de l'ambiguïté qui demeure sur la nature de l'enseignement dispensé) choisi pour l'enseignement de la matière électricité, 3°) le contenu proprement dit de l'activité proposée aux élèves. Pour ce qui est de la dénomination de la matière enseignée, il s'agit d'un enseignement de « *Physique* ». Le domaine de référence choisi pour l'enseignement de l'électricité est celui de l'électronique, même si cela n'est pas dit explicitement. Le dernier point du programme a d'ailleurs pour objet la « *réalisation d'un montage électronique* ». Le contenu proprement dit de l'activité proposée aux élèves est bien relatif, pour le premier point du programme, à des concepts physiques, intensité et tension, mais l'introduction de ces concepts est essentiellement empirique. Le deuxième point du programme est orienté explicitement vers l'étude de composants d'un circuit électronique désignés sous le terme générique de dipôle. La troisième partie, de loin la plus importante et déclarée « *essentielle* » par les auteurs, relève explicitement d'une initiation à l'électronique : « *III.1 Analyse de la structure d'un dispositif électronique et indications sur la fonction de ses différents sous-ensembles : capteurs, dispositifs électroniques et alimentation, sortie. III.2 Réalisation d'un montage simple utilisant un amplificateur opérationnel* ».

Le texte du commentaire développe ensuite les intentions des auteurs : « *La meilleure façon de la traiter [cette partie du programme] consiste à partir d'un montage complet, [...] réalisant une fonction globale [...] On analysera expérimentalement la fonction globale, puis les fonctions partielles des différents sous ensembles. En dehors des cours, les élèves seront invités à regarder comment les mêmes fonctions sont actuellement réalisées dans le monde technique qui les entoure : comment éventuellement elles ont été réalisées autrefois [...] Il faut que les élèves aient le sentiment que l'enseignement qui leur est proposé leur dévoilera un pan de la réalité*

*technologique. [...] après l'étude fonctionnelle, le montage permettra d'introduire l'étude théorique d'une ou plusieurs fonctions particulières [...] L'attitude modeste qui consiste à ne connaître certaines parties d'un montage que par leur aspect fonctionnel n'est pas un renoncement. C'est au contraire, la démarche qui permet de réaliser un système à la fonction globale plus riche. »*

Ainsi, sous le titre de « *Programme de physique* », les enseignants sont en fait incités à dévoiler aux élèves « *un pan de la réalité technologique* ». Il n'y a évidemment rien de répréhensible à vouloir initier les élèves de l'enseignement général à la technologie, mais pourquoi vouloir le faire sous couvert d'un enseignement de physique vidée de sa substance ? Cette attitude est d'autant plus surprenante qu'il existe ailleurs, au même moment, des enseignements explicites de technologie dans des classes de seconde (Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale, 1987b) qui comportent une initiation théorique « *aux concepts structurels et fonctionnels qui régissent le fonctionnement des systèmes automatisés* » en totale conformité au titre du programme, « *Option technologie des systèmes automatisés* ». En outre (Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale, 1987c), d'autres auteurs de programmes de physique, prennent la peine de désigner des « *capacités à développer par l'enseignement des sciences physiques* », très spécifiques de la discipline comme, par exemple, la capacité à « *observer, analyser un phénomène* », qui se traduit par ces productions des élèves : « *le nommer et le délimiter, décrire l'évolution éventuelle du phénomène, recenser les paramètres, choisir les paramètres pertinents, poser des hypothèses.* » La présentation de l'électricité en seconde en 1987 semble être ainsi un phénomène didactique très localisé comme le suggère l'examen des programmes de 1992.

## 4.2. La réforme des programmes de 1992

Nous passons en revue les mêmes rubriques que précédemment, en rappelant les éléments les plus significatifs du programme de 1987. Il s'agit toujours d'un enseignement de « **physique** ».

Domaine de référence	Le contenu de l'activité proposée aux élèves
1987 L'électronique	Concept d'intensité, de tension, notion de dipôle. Analyse structurelle et fonctionnelle d'un montage. Étude de la réalisation des fonctions.
1992 Toujours l'électronique, l'amplificateur opérationnel constitue, la 3 <sup>e</sup> partie du programme	Les premiers points, sont inchangés, à part la suppression du dipôle. Mais le long commentaire relatif à l'analyse structurelle et fonctionnelle d'un montage électronique a disparu. En contrepartie des objectifs d'apprentissage nouveaux sont clairement désignés :

L'élève doit savoir  
« *Que deux points d'un circuit reliés par un fil de cuivre sont pratiquement au même potentiel.* » (Bulletin officiel de l'Éducation nationale, 1992, p. 84).

« *le professeur doit amener progressivement l'élève à l'acquisition, des capacités d'analyse, des concepts, des lois physiques et de l'utilisation des ordres de grandeurs* » et en caractères gras l'auteur indique que :  
« **la physique conserve sa spécificité et reste différenciée de la technologie.** [...] À la fin de l'année, les élèves devraient avoir compris à la fois le fonctionnement d'objets techniques mais surtout **les lois physiques** [...] et leur caractère universel dégagé de l'objet. »  
(Bulletin officiel de l'Éducation nationale, 1992, p. 76).

La remarque qui indique que deux fils de cuivre sont pratiquement au même potentiel semble s'appliquer très spécifiquement à l'électronique de faible puissance. On peut regretter que son domaine de validité ne soit pas précisé. Ce genre d'énoncé formulé sans restriction tend à accréditer l'idée d'une opposition absolue entre conducteur et résistance que nous avons évoquée plus haut. Il peut être mis en rapport avec la tendance de certains étudiants à considérer que la résistance d'un conducteur est nulle et que la section du conducteur n'a aucune influence sur le phénomène de conduction (voir la fin de la section 6 de cet article). En dehors de ce point précis, les modifications apportées en 1992 correspondent à un changement d'orientation et sont l'expression d'une volonté de clarification des objectifs respectifs de la physique et de la technologie. Ce sentiment est renforcé par l'examen du document d'accompagnement du programme.

Ce document est produit par le groupe technique de physique (1993). Les auteurs se situent en continuité avec l'orientation de 1987 : il faut montrer l'utilité de la physique : « *La référence à des objets ou à des dispositifs techniques dont on analyse le fonctionnement est destinée à montrer à quoi sert la physique.* », mais, en même temps, la volonté de distinguer cette activité d'un enseignement de physique est affirmée nettement : « *Il nous paraît important de préciser quel est le domaine de cet enseignement de technologie et de le situer par rapport à celui d'un enseignement de physique.* » (Groupe technique de physique, 1993, p. 7). Les auteurs précisent que l'analyse structurelle et l'analyse fonctionnelle des objets ne sont pas les objectifs du physicien ; pour le professeur de physique : « **la maîtrise des concepts et des lois est toujours l'objectif à atteindre.** » (Groupe technique de physique, 1993, p. 7). Ce texte contredit ainsi totalement le commentaire du programme de 1987 qui ne faisait aucune distinction entre enseignement de physique et de technologie. Les compétences propres à la physique reprennent une place prépondérante dans les objectifs d'un enseignement qui est officiellement consacré à cette discipline. Une ouverture sur la technologie n'est pas exclue, mais on précise que l'objectif visé dans ce cas est de : « *montrer à quoi sert la physique* », et que les compétences spécifiques à cet autre domaine ne sont pas celles de la physique. La distinction entre une point de vue focalisé sur l'objet d'un

côté, et un autre sur : « **les lois physiques [...] et leur caractère universel dégagé de l'objet.** » (Bulletin officiel de l'Éducation nationale, 1992, p. 76) est claire, et en accord avec les observations faites plus haut à propos du problème des courants dérivés.

En conclusion il nous semble que la volonté de clarification des auteurs de la réforme de 1992 n'a pas connu la diffusion qu'elle méritait. Nous souhaitons maintenant montrer sur un exemple comment s'est traduite la confusion qui a précédé la clarification voulue par les auteurs de la réforme de 1992, au niveau du savoir enseigné effectivement aux élèves.

## 5. UN EXEMPLE DE CONFUSION ENTRE PHYSIQUE ET TECHNOLOGIE AU NIVEAU DU SAVOIR ENSEIGNÉ

Nous nous référons à un ouvrage de deux enseignants qui définissent le contenu de l'enseignement des circuits électriques par ce qu'ils appellent le « *modèle de l'électrocinétique* ». (Robardet & Guillaud, 1993). Ce « *modèle de l'électrocinétique* » comprend trois parties :

– 1 – un schéma technique du circuit électrique de référence comprenant trois composants (générateur, résistors, fils de liaison) ;

– 2 – sous l'intitulé de « *relations sémantiques* », des définitions terminologiques, celles de noeud et de branche d'un circuit, de courant électrique, puis de trois grandeurs : « *On désigne par intensité I [...] une grandeur qui représente le débit des charges électriques.* » ; « *On appelle force électromotrice E [...] une grandeur qui représente le pouvoir du générateur à mettre en circulation les charges électriques.* » ; « *On appelle résistance R [...] une grandeur qui représente la difficulté de passage des charges mobiles à travers un résistor [...]* » ;

– 3 – sous l'intitulé de « *relations syntaxiques* », quatre règles, les deux premières concernent le calcul de « *La résistance équivalente R, à deux résistors* » montés soit en série, soit en parallèle, une troisième stipule que l'intensité est la même en tous les points d'une branche, la dernière énonce la relation quantitative reliant la f.e.m. l'intensité et la résistance :  $E = R I$ .

Il n'est pas surprenant de retrouver dans cet exemple, la contradiction signalée plus haut dans le programme de 1987, entre la dénomination de modélisation physique donnée à cette activité, et son contenu effectif qui, comme nous allons essayer de le montrer, relève plutôt de la technologie.

La terminologie choisie par les auteurs, qui fait mention d'un certain nombre de « *grandeurs* », renvoie également à la modélisation physique. Cependant, ce terme de « *grandeur* », qui ne porte pas ici explicitement l'épithète physique est ambigu, par l'usage qui en est fait. Pour lever l'ambiguïté nous pouvons appliquer ici l'un des critères que nous avons proposés plus haut, relatif à la construction du sens en physique. En effet, la définition des grandeurs qui interviennent dans le « *modèle* », relève précisément, pour les auteurs, de la sémantique. En physique, les concepts fondamentaux, qui traduisent à eux seuls un « pan de théorie », c'est le cas entre autres de l'entropie en thermodynamique, ne sont pas définis immédiatement par référence à une entité empirique, à un objet matériel, ou même à une propriété unique de l'un de ces objets. Ils sont insérés dans une structure théorique, dans un réseau de relations avec d'autres concepts qui caractérisent un ensemble de propriétés et c'est l'ensemble lui-même, à supposer qu'il soit complet, et non chacun de ses éléments pris isolément, qui est référé à un phénomène physique déterminé et permet d'identifier ce phénomène. Pour reprendre la terminologie de Cassirer (1970), ces concepts sont des concepts de « *nature relationnelle* ». La grandeur physique, conductance électrique, nous l'avons montré plus haut et également dans un travail antérieur (Viard & Khantine-Langlois, 2001), est le prototype même du concept relationnel. Elle traduit l'ensemble complet des relations entre l'intensité du courant électrique et les autres grandeurs qui caractérisent le phénomène de conduction (section, longueur, conductivité du conducteur) dans des conditions données. Ici, dans le modèle du circuit électrique qui nous est proposé, les définitions des « *grandeurs* » introduites ne renvoient pas à d'autres grandeurs, sauf pour l'intensité. Ces définitions font référence directement aux composants du circuit (générateur, résistor). Chaque composant, à son tour, joue un rôle dans le fonctionnement du circuit, qui est spécifié dans les définitions accompagnant le schéma, citées plus haut en référence : le générateur met les charges en mouvement, le résistor résiste au mouvement des charges et le fil de liaison transmet le potentiel sans aucun affaiblissement. Le terme de « *grandeur* », dans ce cas, ne désigne pas un concept physique, mais la contribution de chaque composant à la réalisation d'une fonctionnalité globale. Cette contribution désigne en fait implicitement la « fonction technique » du composant au sein d'un ensemble fonctionnel plus complexe. En particulier, la « *résistance [...] qui représente la difficulté de passage des charges à travers le résistor* » (Robardet & Guillaud, 1993, p. 86), s'identifie avec la fonction de résister du résistor. En définitive, la volonté de distinguer le composant et la fonction par deux termes distincts (résistance, résistor) n'a plus de raison d'être. Ce point est corroboré par le fait que les significations des deux termes sont parfois confondues comme en atteste leur emploi dans certaines phrases : la « *résistance R* » est ainsi

déclarée « *équivalente à deux résistors* » , (Robardet & Guillaud, 1993, p. 86) et non pas à la résistance du circuit constitué par les deux résistors.

On remarquera également que la propriété de résistance est présentée indépendamment des autres propriétés de l'objet et, notamment, de sa géométrie. Celle-ci n'est définie qu'implicitement par référence à l'objet. Chez certains auteurs, l'élimination de la géométrie est explicite : « *Un modèle circulatoire acceptable à cette étape pourrait être formulé comme suit " La résistance est la propriété des matériaux qui indique le degré de difficulté qu'ils présentent à la circulation du courant. La valeur du courant dans un circuit est déterminée par la tension et la résistance [...]"* » (Koumaras et al., 1994, p. 116).

En remplaçant, dans la première phrase de cette citation, le mot de résistance par celui de résistivité nous obtiendrions une définition tout à fait satisfaisante de ce terme. Mais la substitution, dans la deuxième phrase, du terme de résistivité à celui de résistance serait inacceptable, car la résistance d'un élément de circuit, à la différence de la résistivité, dépend, elle, de la géométrie du matériau. La conduction n'est pas un phénomène purement linéaire, ce phénomène a une extension spatiale. Confondre résistance et résistivité, comme le font les derniers auteurs cités, revient donc à exclure explicitement la géométrie des propriétés qui définissent la conduction électrique. Cette exclusion, assumée par les auteurs, est justifiée, selon eux, par le fait que la dépendance inverse de la résistance envers la section du conducteur est contre-intuitive pour les élèves. Ces mêmes auteurs affirment, en se référant, entre autres, à une étude antérieure à la leur, que : « *Même après enseignement, les élèves considèrent que la résistance d'un conducteur est proportionnelle à sa section transversale (Johnstone & Mughol, 1978).* » (Koumaras et al., 1994, p. 112). En fait, une lecture attentive de l'article de Johnstone & Mughol, cité par Koumaras et al., révèle, tout au contraire, une efficacité manifeste de l'enseignement sur ce point précis de l'apprentissage de la décroissance de la résistance avec la section du conducteur. Après trois années d'enseignement le pourcentage d'élèves qui répondent que la résistance est inversement proportionnelle à la section du conducteur passe de 25 à 69.

Le choix didactique des auteurs précédents, qui consiste à éliminer la géométrie de l'étude de la conduction électrique proposée aux élèves, se révèle très discutable, et, comme nous l'avons déjà signalé (Viard & Khantine-Langlois, 2001), certaines des conséquences de ce choix semblent avoir échappé à leurs auteurs. En effet, la description de conduction électrique est caractérisée non par une propriété unique mais par un ensemble de propriétés qui comprend, outre la résistivité, la longueur et l'épaisseur qui décrivent l'extension spatiale de la conduction. La complétude dans l'inventaire des propriétés physiques joue un rôle décisif dans

l'identification des phénomènes qui est l'un des premiers objets de la physique. La réduction d'une étude phénoménologique à une propriété unique conduit souvent à des erreurs d'identification ainsi la supra conductivité n'a été vraiment identifiée que lorsque, à la reconnaissance de la propriété de résistivité nulle, a été adjointe, beaucoup plus tard, celle des propriétés magnétique et thermodynamique (Matricon & Waysand, 1994). De même la prise en compte des propriétés spatiales est déterminante dans la description de la conduction électrique. Éliminer la géométrie revient ainsi à créer, pour le futur étudiant, de sérieux obstacles à l'apprentissage de la conduction électrique, sans que le gain temporaire réalisé ne soit substantiel. Si l'on veut éliminer l'obstacle constitué par le terme de résistance pour certains élèves, il est préférable, tant qu'à faire, de supprimer son emploi de la première phase de l'enseignement de l'électricité, comme le suggèrent Johnstone et Mughol (1978), en raisonnant dès le début en termes de conductance.

Pour résumer l'évolution de la présentation des circuits électriques depuis les débuts de leur enseignement jusqu'à nos jours, nous pouvons dire que l'analyse physique de la conduction électrique a fait place à une analyse fonctionnelle calquée sur une analyse structurelle. Cette modification des points de vue a pour corollaire celle de la représentation graphique. La figure 1 est un schéma, la figure 2 inspirée d'un ancien traité est un dessin représentant des fils – il en sera ainsi jusqu'à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle (Branly, 1898) et bien au delà, tant qu'on en restera à une analyse phénoménologique en termes de courants. Le dessin est neutre, il ne prend pas parti pour une interprétation ou une autre ; il évoque l'objet qui peut être également considéré aussi bien comme le siège du phénomène physique analysé ou comme un dispositif technique. Le schéma élimine les propriétés physiques (les fils n'ont plus d'épaisseur, de longueur déterminée) pour symboliser une fonction. Les difficultés de certains étudiants, évoquées dans la section 1, peuvent désormais être interprétées en partie par l'élimination de l'analyse physique de la situation proposée.

## **6. RETOUR SUR LES DIFFICULTÉS DES ÉTUDIANTS, QUELQUES ÉLÉMENTS DE VÉRIFICATION DE L'INTERPRÉTATION PROPOSÉE**

Une première difficulté est d'ordre sémantique, elle réside dans l'impossibilité, pour des étudiants, d'attribuer un sens à la diminution de résistance occasionnée par la mise en parallèle de deux conducteurs. Cette difficulté est liée, de notre point de vue, au fait que l'enseignement dispensé ne fournit plus le cadre théorique nécessaire à l'interprétation physique du phénomène précédent. Une portion de circuit électrique devient ainsi une

boite noire interdisant tout accès, pour les élèves, au phénomène de conduction électrique dont il est le siège et par suite à sa théorisation en termes de propriétés et de relations entre ces propriétés. Nous avons vu que c'est précisément la référence à ce phénomène qui permettait de résoudre le problème de la signification à donner à l'association des composants. C'est la dépendance inversement proportionnelle de la résistance à l'égard de la section qui permet d'interpréter le fait que la résistance équivalente à celle du circuit constitué par deux « résistances » en parallèle est plus faible que la résistance de l'une d'entre elles. Mais le rôle joué par cette propriété géométrique dans la conduction de l'électricité est non seulement masqué mais contredit par la description et la symbolisation technique. Les fils de liaison sont dépourvus de toute épaisseur et leur conductivité est infinie, la résistance au contraire est un rectangle épais et a la fonction de limiter le courant. Les propriétés suggérées par la symbolisation fonctionnelle sont en contradiction avec les propriétés physiques pertinentes pour décrire la conduction électrique.

La deuxième difficulté est d'ordre logique et structurel. Elle a trait aux règles qui régissent l'emploi des éléments symboliques. Si l'analyse en termes de concepts physiques est graduelle (il y a des degrés dans la conduction et l'on peut passer continûment d'un corps isolant à un corps conducteur), l'analyse fonctionnelle procède par saut. Les fonctions sont mutuellement exclusives les unes des autres, en particulier les fonctions de « résistance » et de « conductance ». Ainsi, dans le « modèle fonctionnel », on passe brusquement de fils de liaison purement conducteurs à des résistors purement résistifs. L'une des difficultés rencontrées par les étudiants réside dans cette exclusion fonctionnelle. La solution du problème exigeait de considérer que l'adjonction d'une résistance en parallèle conduit à un accroissement de la conductance de l'ensemble formé. En termes de fonctions exclusives cet énoncé est une contradiction logique, un non sens. L'ajout de deux résistances ne peut produire de la conductance. En termes de concepts physiques graduels, au contraire, si la « résistance » ou le « résistor » est aussi un conducteur, il n'y a plus aucune contradiction à affirmer que l'ajout de deux « résistances/conductances » donne, dans certains cas, une plus grande conductance. La métonymie qui consiste à désigner un objet résistant par le substantif résistance ne constitue plus un obstacle parce que l'on sait qu'il s'agit là précisément d'un raccourci utilisé pour désigner un conducteur plus résistant qu'un autre.

Lorsque nous avons énoncé cette interprétation de l'origine des difficultés rencontrées par des étudiants dans le problème de l'association de résistances en parallèle en termes de substitution de fonctions techniques à des concepts physiques, il ne s'agissait que d'une analyse *a priori* fondée sur les arguments qui viennent d'être exposés. Nous ne disposions pas d'éléments expérimentaux nous confirmant que les étudiants percevaient

le circuit électrique essentiellement comme un dispositif technique plutôt que comme le siège d'un phénomène physique. Nous avons cependant prévu que, si c'était bien le cas, cette situation devrait avoir d'autres conséquences que la seule difficulté rencontrée dans l'interprétation de l'association de deux résistances en parallèle. En prolongeant l'analyse précédente, les fils de liaison devaient logiquement être considérés par les étudiants comme des éléments de résistance rigoureusement nulle ou de conductivité infinie. Le fait qu'un fil soit déclaré conducteur implique, en effet, que sa faculté de conduire soit sans limites et, par conséquent, si la conductivité est infinie, la conduction sera indépendante des autres propriétés de ce fil, en particulier de sa section. Cette dernière prédiction a été vérifiée involontairement lors de l'évaluation de l'appropriation du concept de résistance électrique par des étudiants. Nous avons posé la question suivante : « *Une tension déterminée est appliquée aux extrémités d'un conducteur cylindrique. On double ensuite la section du conducteur en maintenant la tension identique. Cette modification a-t-elle un effet ou non sur la conduction ? Si oui lequel ? Justifiez votre réponse en indiquant comment vous pourriez vérifier ce que vous affirmez.* »

Nous avons eu la surprise d'obtenir de deux étudiants les réponses suivantes :

– 1 – « *Conducteur : si on double la section, il n'y a aucun effet sur la conduction. La résistance est nulle, si on double la section, la résistance sera toujours nulle. La conduction est infinie dans les deux cas.* » ;

– 2 – « *Non car la résistance du fil est en général négligeable. Donc aucun effet.* »

Ces deux réponses, sans apporter une entière confirmation de l'interprétation proposée des difficultés rencontrées par les étudiants, la rendent du moins très plausible pour certains d'entre eux.

## CONCLUSION

Au terme de cette analyse, la volonté affirmée par des auteurs de programme de préserver la spécificité de la physique et de la technologie dans l'enseignement apparaît éminemment souhaitable et dans l'intérêt de chacune de ces disciplines. Pour prolonger certaines des justifications de l'enseignement de la physique proposées par les auteurs précédents, il apparaît possible de « *montrer à quoi sert la physique* » non seulement en s'appuyant sur le fait qu'elle est à l'origine de dispositifs techniques reposant sur ses principes, mais aussi en indiquant que la description de ces dispositifs en termes seulement structurels et fonctionnels ne permet pas de

comprendre leur fonctionnement. Dans ce cas, la référence à la théorie physique trouve sa justification, non plus dans la seule volonté proclamée d'enseigner la physique pour elle-même, mais dans sa capacité à résoudre des problèmes qui se posent en dehors d'elle. Ce point de vue illustre une manière complémentaire de concevoir les rapports entre science et technologie qui conserve toute son actualité : « *La science correspond à une problématique formulée au niveau des techniques et qui ne trouve pas de solution au niveau technique* » (Simondon, 1969, p. 246).

L'existence d'enseignements spécifiques de technologie dans l'enseignement général pourrait être l'occasion de la prise de conscience de la spécificité des disciplines technologiques par les enseignants des disciplines scientifiques dans la mesure où ces « nouveaux » enseignements fournissent une référence pour cette distinction. Cela suppose que le processus de clarification, entrepris au niveau des contenus et évoqué plus haut, soit mené à son terme.

Un prolongement « naturel » de la recherche précédente consistait à mettre en place des situations d'enseignement fondées sur une modélisation physique de la conduction électrique en termes de conductance afin de tester la faisabilité d'une autre présentation de l'électricité que celle qui a cours actuellement à un niveau élémentaire. Une première tentative en ce sens a eu lieu dans le cadre d'un enseignement de lycée professionnel et a donné des résultats encourageants. Un prolongement de cette tentative pourrait être, à l'occasion de la mise en place de ces enseignements, d'évaluer l'aptitude des élèves à intégrer des savoirs de types différents tout en les distinguant.

## BIBLIOGRAPHIE

- BECQUERELA. (1826). Du Pouvoir conducteur de l'Électricité dans les métaux, et de l'Intensité de la force électrodynamique en un point quelconque d'un fil métallique qui joint les deux extrémités d'une pile. *Annales de Chimie et de Physique*, n° 32, pp. 420-430.
- BRANLY E. (1898). *Cours élémentaire de Physique*. Paris, Librairie Ch. Poussielgue.
- BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1987a). Sciences Physiques et Chimiques. *Bulletin Officiel Spécial*, 3-9 juillet. Paris, Ministère de l'Éducation Nationale.
- BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1987b). Les options technologiques de la classe de seconde. *Bulletin Officiel Spécial n° 1*, 5 février. Paris, Ministère de l'Éducation Nationale.
- BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1987c). Sciences Physiques. *Bulletin Officiel Spécial*, n° 6, 10 septembre. Paris, Ministère de l'Éducation Nationale.
- BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1988). Électronique. Électrotechnique. *Supplément au n° 18*, 12 mai. Paris, Ministère de l'Éducation Nationale.
- BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1992). Physique – Chimie. *Bulletin Officiel*, numéro hors série du 24 septembre. Paris, Ministère de l'Éducation Nationale.

- CALMETTES B. (1996). *Contribution à l'étude des curriculums. Le cas de l'enseignement de l'électrotechnique dans les classes du second degré des Lycées d'Enseignement Général et Technologique*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- CASSIRER E. (1970). *Substance et fonction. Éléments pour une théorie du Concept*. Paris, Les Éditions de Minuit.
- CLOSSET J.-L. (1983). *Le raisonnement séquentiel en électrocinétique*. Thèse de doctorat, Université Paris 7.
- COMMISSION PERMANENTE DE RÉFLEXION SUR L'ENSEIGNEMENT DE LA TECHNOLOGIE (1986). Propositions de la commission permanente de réflexion sur l'enseignement de la technologie. In *Technologie. Textes de Référence*. Sèvres, Centre international d'études pédagogiques, pp. 2- 48.
- D'ALEMBERT J. (1744). *Traité sur l'Équilibre et le Mouvement des Fluides*. Paris, David.
- D'ALEMBERT J. (1756). Expérimental. In D. Diderot & J. D'Alembert (Éds), *Encyclopédie ou dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, vol. VI*. Paris, Briasson, David, Le Breton, Durand, pp. 298-301.
- D'ALEMBERT J. (1765). Physique. In D. Diderot & J. D'Alembert (Éds), *Encyclopédie ou dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, vol. XII*. Paris, Briasson, David, Le Breton, Durand, pp. 539-540.
- DIRAND B., LEGOIX J. & PAUL J.-C. (1981). *Physique 2<sup>de</sup>*. Paris, Bordas.
- DOUADY R. (1986). Dialectique outil objet. *Recherches en didactique des mathématiques*, vol. 7, n° 2, pp. 5-31.
- DRYE E. (1993). *Histoire des techniques de l'an mil à nos jours*. Paris, Hatier.
- DUREY A. & VÉRILLON P. (1996). Appel à contribution, l'enseignement de la technologie. *Aster*, n° 23.
- FEYNMANN R. (1985). *Vous voulez rire monsieur Feynman ! Entretiens avec Ralph Leighton*. Paris, InterÉditions.
- GENTRIC R., DAHRINGER F., ÉTIENNE M., LE HÉTET-GUIHEUX G., MARIGNY F. & POUILLAIN L. (1993). *Physique seconde*. Paris, Hatier.
- GRAETZ L. (1911). *L'électricité et ses applications*. Paris, Masson.
- GROUPE TECHNIQUE DE PHYSIQUE (1993). *Document d'accompagnement du programme de physique de la classe de seconde*. Paris, Ministère de l'Éducation Nationale et de la Culture.
- GUILLERME J. (1995). Technologie. In *Encyclopædia Universalis*. Paris, pp. 132-135.
- GURREY B. (1999). L'université ne parvient pas à attirer les étudiants en sciences. *Le Monde*, 15 octobre.
- HOSTEIN B. & LEBRUN M. (1992). Apprendre à modéliser en sciences et techniques. In A. Giordan, J.-L. Martinand & D. Raichvarg (Éds), *Actes des XIV<sup>es</sup> Journées internationales sur l'éducation scientifique, Chamonix*. Paris, Université de Paris Sud, pp. 143-146.
- HOTTOIS G. (1993). *Simondon et la philosophie de la culture technique*. Bruxelles, De Boeck-Wesmael.
- JOHNSTONE A.H. & MUGHOL A.R. (1978). The concept of electrical resistance. *Physics education*, vol. 13, n° 1, pp. 46-49.
- JOHSUA S. & DUPIN J.-J. (1988). La gestion des contradictions dans des processus de modélisation en physique, en situation de classe. In G. Vergnaud, G. Brousseau & M. Hulin (Éds), *Didactique et acquisition des connaissances scientifiques. Actes du colloque de Sèvres, mai 1987. Greco didactique CNRS*. Grenoble, La Pensée sauvage, pp. 185-199.

- JOHSUA S. & DUPIN J.-J. (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris, PUF.
- KHANTINE-LANGLOIS F. & VIARD J. (1992). Raisonement qualitatif et raisonnement algébrique dans la résolution de deux problèmes d'électrocinétique. In J.-M. Dusseau (Éd.), *Actes du II<sup>e</sup> séminaire de recherche en didactique des Sciences physiques, Sète, 18-20 octobre*. Montpellier, IUFM de l'académie de Montpellier, pp. 11-22.
- 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 F. Khantine-Langlois & V. Mafféo (Éds), *Actes du V<sup>e</sup> séminaire national de recherche en didactique des Sciences Physiques*. Lyon, Université Claude Bernard-Lyon 1, pp. 214-221.
- KOUMARAS P., KARIOTOGLOU P. & PSILLOS D. (1994). Devons-nous utiliser des phénomènes évolutifs en introduction à l'étude de l'électricité ? Le cas de la résistance. *Didaskalia*, n° 4, pp. 107-120.
- LAMÉ G. (1840). *Cours de Physique de l'École polytechnique, tome 3*. Paris, Bachelier.
- LEBEAUME J. (1996). Une discipline à la recherche d'elle-même : 30 ans de technologie au collège. *Aster*, n° 23, pp. 9-41.
- MARIOTTE E. (1992). *Essay de Logique contenant les principes des sciences, et la manière de s'en servir pour faire de bons raisonnements*. Paris, Fayard.
- MATRICON J. & WAYSAND G. (1994). *La guerre du froid. Une histoire de la supra conductivité*. Paris, Seuil.
- Mc DERMOTT L. & SCHAFFER P. (1992). Research as a guide for curriculum development : An example from introductory electricity. Part I : Investigation of students understanding. *American Journal of Physics*, vol. 60, n° 11, pp. 994-1003.
- OHM G.S. (1860). *Théorie Mathématique des Courants Électriques*. Paris, Hachette.
- PELTIER E. (1992). Compte rendu de l'atelier : Apprendre à modéliser en sciences et techniques. In A. Giordan, J.-L. Martinand & D. Raichvarg (Éds), *Actes des XIV<sup>es</sup> Journées internationales sur l'éducation scientifique, Chamonix*. Paris, Université de Paris Sud, pp. 147-148.
- POUILLET C.S.M. (1837). *Éléments de Physique expérimentale et de Météorologie*. Paris, Béchet Jeune.
- ROBARDET G. & GUILLAUD J.-C. (1993). *Éléments d'épistémologie et de didactique des sciences physiques*. Grenoble, IUFM de Grenoble.
- ROBERT P. (1976). *Dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française*. Paris, Société du nouveau Littre.
- SCHAGRIN M.L. (1963). Resistance to Ohm's Law. *American Journal of Physics*, vol. 31, pp. 536-547.
- SÉRIS J.-P. (1994). *La technique*. Paris, PUF.
- SIMONDON G. (1969). *Du mode d'existence des objets techniques*. Paris, Aubier.
- STIEGLER B. (1994). La maïeutique de l'objet comme organisation de l'inorganique. In Bibliothèque du collège international de philosophie, *Gilbert Simondon. Une pensée de l'individuation et de la technique*. Paris, Albin Michel, pp. 239-264.
- VIARD J. (1995). Éléments pour l'établissement d'une distinction entre physique et technologie à travers leur mise en oeuvre dans une résolution de problèmes. In G. Arsac, J. Gréa, D. Grenier & A. Tiberghien (Éds), *Différents types de savoir et leur articulation*. Grenoble, La Pensée sauvage, pp. 59-79.
- VIARD J. & KHANTINE-LANGLOIS F. (2001). The Concept of Electrical Resistance : from Students' Difficulties to the Early Developments of Electric Circuits Theory and Today's Physics education. *Science & Education*, vol. 10, pp. 267-286.

## **REMERCIEMENTS**

Nous tenons à remercier ceux des relecteurs de ce texte, et particulièrement, l'un d'entre eux, qui ont permis, par leurs suggestions, d'améliorer sensiblement la version initiale de l'article. Bernard Calmettes nous a fourni plusieurs références, qu'il en soit également remercié.

Cet article a été reçu le 02/02/1999 et accepté le 23/10/2001.