

Approche des différences individuelles dans la résolution de problèmes concernant des circuits électriques simples

Paulette ROZENCWAJG

Service de Recherche de l'INETOP
41, rue Gay Lussac
75005 Paris, France.

Résumé

L'approche proposée dans cet article est de montrer l'intérêt de la complémentarité entre les approches didactique et différentielle dans la résolution de problèmes concernant des circuits électriques simples. Les processus analogique et propositionnel, classiquement identifiés dans des tâches cognitives non spécifiques, ont pu être mis en évidence dans le cadre de domaines de connaissances sémantiquement structurés, comme c'est le cas de l'électricité. L'expérience réalisée auprès de 42 élèves de cinquième permet de montrer que l'analyse des comportements cognitifs à l'école sous l'angle des conceptions des élèves et sous l'angle de processus de pensée plus généraux semble une approche heuristique pour identifier des différences individuelles dans la façon de résoudre des problèmes scientifiques.

Mots clés : *didactique de l'électricité, conceptions des élèves, résolution de problèmes, différences individuelles, processus analogique et propositionnel.*

Abstract

The present article attempts to demonstrate the value of using the didactic method and the differential method as complementary approaches to solving simple electric-circuit problems. The analogical and propositional processes, traditionally identified in non-specific cognitive tasks, have been shown to also play a part in semantically structured domains like electricity. The experiment conducted here on 42 seventh-grade students showed that analyzing cognitive behavior in school from the dual standpoint of students' conceptions and more general thought processes appears to be a heuristic method for identifying individual differences in the way science problems are solved.

Key words : *teaching physics, students' conceptions, electricity, problem solving, individual differences, analogical and propositional processes.*

Resumen

El objetivo de este artículo es de analizar de manera sistemática las diferencias individuales en la resolución de problemas de electricidad. Una experiencia es realizada proponiendo a alumnos de quinto grado (correspondiente al segundo nivel educativo de la enseñanza secundaria Francesa) cuatro problemas de electricidad. Dos resultados principales son observados : as formas de resolución de problemas pueden ser agrupadas en cinco categorías, calculo, algebraico, misconceptual, proposicional y analógico ; ninguna variabilidad interindividual fue encontrada : ningún alumno pone en relación lo que hace en una situación teórica y en una situación práctica. En conclusión, estos dos resultados son discutidos mostrando la complementaridad de los puntos de vista diferencial y didáctico.

Palabras claves : *didáctica de electricidad, concepciones de los alumnos, resolución de problemas, proposicional y analógico processus.*

1. INTRODUCTION

Cet article a pour objectif de montrer l'intérêt de la complémentarité entre les approches didactique et différentielle dans la résolution de problèmes concernant des circuits électriques simples. La didactique de l'électricité nous permet de construire des situations de problèmes pertinentes et une grille d'analyse de leur résolution compte tenu de ce que l'on sait des conceptions des élèves. La psychologie différentielle nous permet de traiter les différences individuelles de façon systématique sans chercher à mettre l'accent sur les réponses les plus fréquentes des élèves. Nous montrerons néanmoins également qu'un certain comportement est apparu chez **tous** les élèves de notre expérience.

Peu de recherches en psychologie différentielle s'intéressent aux différences quant à la maîtrise des concepts scientifiques¹. Les travaux portent le plus souvent sur des aspects généraux du fonctionnement de la pensée. L'électricité ayant un contenu très spécifique et sémantiquement très structuré, la résolution de problèmes dans ce domaine a plus souvent été envisagée sous l'angle des connaissances utilisées que sous l'angle de processus de pensée plus généraux. Il nous semble que les travaux réalisés dans le cadre du paradigme ATI (*Aptitude Treatment Interaction*), visant à identifier les traitements pédagogiques les plus efficaces compte tenu des caractéristiques des apprenants (aptitudes, traits de personnalité par exemple), n'utilisent pas suffisamment les résultats des travaux de didactique² (Snow, 1989). Inversement, il nous semble que la didactique, centrée par définition sur les contenus, se prive le plus souvent de ce que l'on sait des processus généraux de pensée qui peuvent éclairer d'un certain point de vue le comportement des élèves. En d'autres termes, autant la prise en compte des contenus semble aujourd'hui incontournable pour comprendre le fonctionnement cognitif (Rozencajg & Trosseille, 1996), autant le point de vue de la psychologie différentielle qui considère les différents cheminements de la pensée comme des préférences individuelles relativement stables dans le traitement de l'information (Huteau, 1995 ; Lautrey, 1990 ; Reuchlin, 1978) nous semble aussi indispensable.

La méthode d'étude de la variabilité inter- et intra-individuelle a consisté à présenter aux mêmes élèves quelques problèmes d'électricité et d'analyser la cohérence entre les divers types de solution, non seulement sous l'angle des connaissances utilisées mais aussi du point de vue des processus plus généraux.

2. EXPÉRIENCE

2.1. Les problèmes

Les problèmes ont été construits sur la base des travaux de didactique sur les conceptions des élèves en électricité (Closset, 1983, 1988 ; Johsua & Dupin, 1987, 1993 ; Koumaras et al., 1994).

Brièvement, certains élèves pensent que l'électricité est un fluide dont l'intensité diminue tout au long du circuit : le courant ressort de l'ampoule

1. Une thèse en cours d'un chercheur de l'INETOP (B. Trosseille sous la direction de J. Lautrey) se situe dans cette nouvelle perspective dans le domaine de la physique (chaleur et température) (Trosseille, 1995).

2. Une thèse en cours d'un chercheur de l'INETOP (I. Olry-Louis sous la direction de M. Huteau) se situe dans cette nouvelle perspective dans le domaine des Sciences Sociales (Olry-Louis, 1996).

pour retourner vers la pile avec une intensité moindre qu'à son entrée ; pour ceux-là, le fluide est à la fois le mouvement des électrons (l'intensité), la force qui met en œuvre ce mouvement (la tension) et ce qui est consommé (l'énergie). Cette conception, appelée *modèle d'usure*, vient en contradiction avec ce qu'ils apprennent, à savoir que l'intensité est constante sur tout le circuit en série. Pour rétablir une certaine cohérence, certains élèves procèdent alors à une généralisation excessive : ils pensent que, pour un générateur donné, l'intensité est constante dans tous les circuits, quelle que soit l'organisation, en série ou en dérivation, et quels que soient le nombre et la nature des éléments branchés dans le circuit. C'est ce qu'on appelle le *raisonnement séquentiel* ou conception de l'intensité dite à *débit constant*. Dans le raisonnement séquentiel, l'élève n'a pas une vision globale du circuit : il pense que l'électricité part de la pile et découvre peu à peu le circuit, ses résistances et leur organisation. Contrairement à cette conception, pour le physicien, le courant ne part pas d'une borne du générateur pour revenir à l'autre borne ; c'est l'ensemble des électrons des conducteurs qui est mis en mouvement instantanément dès la fermeture du circuit.

Il faut souligner que cette conception – le raisonnement séquentiel – a une pertinence indéniable pour traiter efficacement la grande majorité des problèmes didactiques présentés aux élèves, ce qui explique aussi qu'elle soit très résistante au changement et qu'elle constitue un véritable *obstacle épistémologique* (Johsua, 1990a). En particulier, cette représentation est valide dans une classe de problèmes, y compris pour des schémas électriques complexes, où l'intensité du courant principal est donnée dans l'énoncé et où par conséquent l'élève n'est pas interrogé sur la valeur de cette grandeur (Rozencwajg, 1992). Elle peut être mise en relation avec l'*analogie hydraulique* que les enseignants ont utilisée en classe dans cette expérience pour concrétiser la loi des courants dérivés.

Comme on vient de l'évoquer, les conceptions des élèves peuvent fort bien être valides dans une certaine classe de situations. Pour cette raison il est important, quand on cherche à identifier la base de connaissances des élèves, d'utiliser des situations variées qui permettent l'activation de connaissances différentes. Ainsi, en faisant varier les situations, notre objectif est de mieux rendre compte des différentes connaissances des élèves et de leur mise en œuvre.

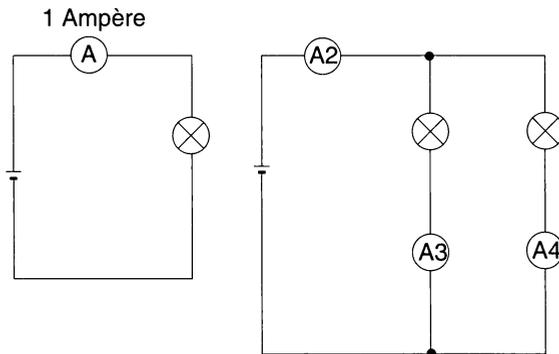
L'expérience a été réalisée auprès de 42 élèves de cinquième en début de curriculum (la physique était encore au programme), répartis dans deux collèges de la région parisienne. Les problèmes concernent la loi des nœuds. L'effet de différents contextes, censés tous activer cette loi, va nous servir à «*la récupération d'informations en mémoire à long terme*» (Richard, 1990, p. 40). Au moment de notre expérience, les élèves avaient appris les deux lois sur l'intensité dans les circuits en série et en dérivation (dans un

circuit série, l'intensité est conservée tout au long du circuit ; dans un circuit en dérivation, l'intensité du courant principal est égale à la somme des intensités des courants dérivés), mais pas encore les lois sur la tension. Les différents problèmes, ainsi que la mise en place d'un mode de questionnement, ont permis l'identification des différences individuelles.

2.1.1. Problème E1

Les conceptions spontanées du concept d'intensité sont évaluées par un problème (figure 1) où l'élève doit comparer deux circuits et prédire comment l'intensité va évoluer. C'est une situation très utilisée en didactique de l'électricité (voir par exemple, Johsua, 1990a), elle a été mise en œuvre plus récemment pour l'analyse des modifications des conceptions des élèves en situation de tutelle (Khanh Tran & Baril, 1995). Le raisonnement séquentiel aboutit dans cette situation à un résultat faux du fait que l'intensité totale du circuit n'est pas une information donnée dans l'énoncé. Le problème E1 était précédé de la comparaison du circuit comportant une ampoule avec un circuit comportant deux ampoules en série, pour des raisons que nous donnerons en présentant le problème E2.

On présente à l'élève un premier circuit simple avec une seule lampe. Puis on présente le deuxième circuit en lui disant qu'on a ajouté une deuxième lampe identique en dérivation. On lui demande d'indiquer les intensités des ampèremètres A2, A3 et A4. On lui demande ensuite de justifier sa réponse.



L'ampèremètre A2 indique 1A / 2A ? (Bonne réponse : 2A)

L'ampèremètre A3 indique 0,5A / 1A / moins que A2 (Bonne réponse : 1A)

L'ampèremètre A4 indique 0,5A / 1A / moins que A3 (Bonne réponse : 1A)
(loi des tensions et loi des nœuds).

Figure 1 : Problème de prédiction de l'intensité

2.1.2. Problème E2

Le problème E2 est un problème pratique (figure 2). Lors de la construction, l'élève aura «l'occasion» en situation réelle de constater que selon l'organisation des lampes – en série ou en dérivation –, l'intensité du courant principal varie. Le terme «occasion» a été volontairement mis entre guillemets car les travaux de Johsua (1990b) et ceux de Lemeignan et Weil-Barais (1993), en particulier, ont largement montré que la confrontation entre les prédictions réalisées et la simple «perception» des phénomènes physiques n'est pas suffisante pour modifier les conceptions spontanées des élèves.

Ce problème permet également de repérer le raisonnement séquentiel mais de façon «agile». Pour cela nous avons introduit des *nœuds* matérialisés par des fiches sur un socle en bois (sur lequel plusieurs fils peuvent être connectés), qui permettent éventuellement à l'élève de concrétiser une représentation séquentielle des points de division du circuit en dérivation. Soulignons que les élèves n'ont jamais utilisé de nœuds en classe pour réaliser un circuit.

Matériel :

Un générateur, deux lampes, un ampèremètre, un interrupteur, sept fils de connexion, deux nœuds.

Consignes :

«Mesure l'intensité totale du courant d'un circuit ayant ces deux lampes en dérivation. Dessine d'abord le circuit que tu as l'intention de réaliser. Comment pourrais-tu être sûr d'avoir bien répondu à la question ?»

Figure 2 : Énoncé du problème E2

2.1.3. Problème E3

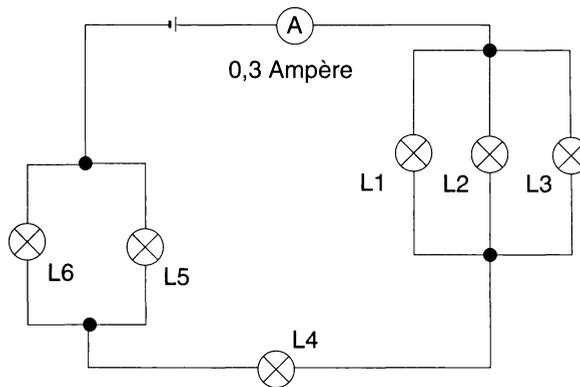
Le problème E3 (tableau 1) est proche du format standard, c'est-à-dire qu'il correspond aux problèmes habituellement donnés en classe et qui ne testent pas les conceptions erronées des élèves. En d'autres termes, le problème standard ou canonique permet l'application directe des connaissances apprises en cours (Rozencwajg, 1992). L'énoncé s'accompagne d'un schéma *prototypique* de deux lampes en dérivation (Caillot & Cauzinille, 1984). L'énoncé est le suivant : «*Soit ce montage, on branche successivement des piles différentes et on effectue les mesures inscrites dans le tableau. Complète ce tableau. Quand tu fais un calcul, tu poses l'opération sur la feuille.*»

I	I1	I2
0,5 A	330 mA	0,17 A
1 A	700 mA	300 mA
4,8 A	3,2 A	1,6 A

Tableau 1 : Énoncé du problème E3 (les réponses sont indiquées en italique)

2.1.4. Problème E4

Le problème E4 est complémentaire du problème E1 (figure 3) car il permet de vérifier les conditions de validité du raisonnement séquentiel quand l'intensité du courant principal est une information donnée dans l'énoncé. Contrairement au problème E1, le problème E4 comprend un schéma électrique complexe. Néanmoins, le raisonnement séquentiel dans ce problème devrait être efficace car l'information sur l'intensité totale est donnée dans l'énoncé (0,3 A) (Rozenchwajg, 1992).



L'élève doit compléter le tableau.

L1	L2	L3	L4	L5	L6
0,1 A	0,1 A	0,1 A	0,3 A	0,15 A	0,15 A

Figure 3 : Énoncé du problème E4 (les réponses sont indiquées en italique)

2.1.5. Questionnaire de connaissances

Un questionnaire faisant appel à la mémoire du cours permet d'évaluer les connaissances de l'élève en dehors de leur mise en œuvre en situation de résolution de problèmes. Ce questionnaire comporte onze questions (voir annexe). Les questions 1 à 3 ne sont pas prises en compte dans le score final (tous les élèves connaissaient les réponses). Le score maximum est de 8 points. Le score minimum observé est de 3 points. 16 élèves sur 42 n'ont fait aucune erreur, ce qui correspond au niveau d'expertise maximal qu'on attend d'un élève de cinquième qui a suivi normalement les cours.

2.2. Résultats

Les réponses des élèves ont été analysées ainsi que leurs justifications (problèmes E1 et E3). Concernant la construction du circuit électrique (problème E2), une procédure d'observation a permis d'identifier l'ordre des connexions et la mise en place spatiale des différents éléments du circuit. L'identification des types de solutions dans le problème E4 a été réalisée par la mise en relation entre les réponses et l'ordre des réponses. Pour chaque problème, ces observations ont été synthétisées sous le terme de *type de solution*, auquel nous avons donné un nom, choisi pour être le plus près possible des comportements observés pendant la résolution. Le nom choisi renvoie à ce qui nous paraît être le plus spécifique dans le comportement de l'élève relativement aux autres. Ces noms renvoient soit à l'utilisation de connaissances, de conceptions, justes ou non, soit à l'utilisation de procédures numériques ou pratiques. Quand l'élève ne conceptualise pas sa réponse, mais qu'elle est juste, nous avons qualifié ce type de solution d'«algébrique». Quand l'élève ne conceptualise pas sa réponse, et qu'elle est fautive, nous avons qualifié ce type de solution de «calculatoire». Le terme «algébrique» renvoie aux travaux de Simon et Simon (1978) où le novice résout le problème en formant une représentation basée sur la recherche immédiate de formules, contrairement à l'expert qui élabore une représentation physique du problème. Le terme «calculatoire» renvoie aux travaux de Bastien (1987) en mathématiques et à nos propres observations (Rozencwajg, 1992), où l'élève réalise des calculs qui ne permettent pas de les associer à une conceptualisation spécifique. Il s'agit davantage de routines de calcul que de conceptualisation y compris erronée.

Dans un second temps, nous chercherons par des méthodes statistiques qualitatives (Analyse Factorielle des Correspondances Multiples et Classification Ascendante Hiérarchique) à regrouper ces types de solutions.

2.2.1. Problème E1

– Type de solution «*séquentielle stricte*» (n = 12) : l'élève répond que la pile débite toujours 1 ampère (au lieu de 2 ampères) dans le deuxième circuit bien qu'il y ait une lampe de plus en dérivation. Il utilise donc le raisonnement séquentiel où la pile débite une intensité constante. Il répond ensuite qu'il y a 0.5 ampère dans chaque branche dérivée, c'est-à-dire qu'il applique la loi des courants dérivés. Il justifie ensuite par l'énonciation déclarative de la loi, un peu comme une «comptine». Par exemple, «*car les deux lampes sont identiques et la somme de deux courants dérivés est égale à l'intensité du courant principal*» (Gilles). Nous avons qualifié ce type de solution de séquentielle «stricte» car il correspond au raisonnement décrit dans la littérature (Closset, 1983, 1988).

– Type de solution «*séquentielle imagée*» (n = 11) : l'élève donne la bonne réponse (l'ampèremètre A2 indique 2 ampères et il y a 1 ampère dans chaque ampoule). Contrairement au type de solution précédent, l'élève conçoit que la pile ne débite pas toujours la même intensité. Il applique correctement la loi mais, paradoxalement, sans la donner ensuite comme justification. Il justifie d'une façon que nous qualifions «d'imagée» car il s'attache à décrire le courant comme un fluide qui se déplace dans le circuit, comme s'il inspectait une image du circuit. L'image décrite évoque l'analogie hydraulique enseignée en classe. Par exemple, «*car les deux ampoules sont en dérivation et quand le courant arrive il reçoit les deux*» (Stéphanie) ; «*car là il prend deux ampères, donc l'énergie se répartit de chaque côté et revient là*» (Christophe).

– Type de solution «*usure*» (n = 6) : l'analyse du circuit est très erronée. L'élève considère en effet que l'intensité baisse. Il n'a pas intégré la loi académique enseignée en classe, contrairement au type de solution «séquentielle stricte», également faux scientifiquement. Par exemple, l'ampèremètre A3 indique moins que l'ampèremètre A2 et l'ampèremètre A4 indique moins que l'ampèremètre A3. Les justifications explicitent le modèle d'usure. Elles dénotent une représentation du circuit électrique selon laquelle l'intensité s'use en allumant successivement les lampes. Dans ce type de modèle, plus la lampe est perceptivement éloignée du générateur (dans le sens conventionnel du courant), moins elle est traversée par un courant intense : «*pour A4, c'est en dérivation par rapport à A3 et par rapport à la pile*» (Sandrine) ; «*parce que la première ampoule prend plus d'intensité que la deuxième*» (Géraldine).

– Type de solution «*algébrique*» (n = 4) : l'élève donne la bonne réponse ($2A = 1A + 1A$) mais la justifie de façon très sommaire (ni par la loi, ni de façon imagée). Par exemple, «*l'ampèremètre A3 + l'ampèremètre A4, cela fait l'ampèremètre A2*» (Nora).

– Type de solution «*calculatoire*» (n = 9) : la réponse de l'élève est incorrecte (le plus souvent 1 ampère partout) accompagnée d'une justification très sommaire. Par exemple, le «*circuit est en dérivation*» (Morgane).

Les types de solutions observés dans ce problème sont compatibles avec ce que nous savons des conceptions des élèves : le raisonnement séquentiel, le modèle d'usure, des routines de calcul. Ce qui est nouveau ici est le type de solution que nous avons appelé «*séquentielle imagée*», où l'élève donne la bonne réponse en la justifiant par l'évocation d'une image du circuit. Cette image renvoie à la «mise en scène» de l'analogie hydraulique. Il faut souligner qu'à ce niveau d'expertise, les concepts de tension et de résistance ne sont pas reliés au concept d'intensité. L'augmentation du débit de la pile (qui est une bonne réponse) est ici complètement *intuitive*, non formalisée et n'apparaît d'ailleurs pas explicitement dans les verbalisations.

2.2.2. Problème E2

– Type de solution «*séquentielle*» (n = 9) : l'élève réussit le circuit en le réalisant de façon séquentielle, c'est-à-dire que les nœuds représentent les points de division du circuit (figure 4). Il place les deux lampes parallèlement l'une en dessous de l'autre, ce qui correspond à la représentation prototypique (Caillot & Cauzinille, 1984). Il a peu regardé son schéma. Il utilise une procédure de vérification par décomposition qui consiste à mesurer les intensités de chaque branche dérivée et à les additionner pour retrouver l'intensité totale mesurée. C'est une procédure élaborée qui consiste à vérifier le circuit en retrouvant la loi : «*Il faut placer l'ampèremètre sur chaque branche dérivée pour mesurer une ampoule et on voit si le circuit est bon.*» (Frédéric)

– Type de solution «*fonctionnelle*» (n = 12) : l'élève réussit mais sans utiliser les nœuds (figure 4). Soulignons que l'utilisation des nœuds est une procédure qui représente mieux le schéma canonique mais qui n'a aucune pertinence sur un plan fonctionnel. De même, la mise en place des deux lampes l'une en dessous de l'autre n'est plus systématique. Deux procédures de vérification ont été utilisées : «décomposition» et «terme à terme». Exemple de procédure «terme à terme» : «*En suivant le schéma, j'ai branché la pile sur l'ampoule, l'ampoule sur l'ampèremètre et de ce côté-là aussi, la pile sur l'ampoule, et le reste sur l'ampoule ; j'ai suivi le schéma.*» (Mohamed) Ce type de solution, beaucoup moins sophistiqué, est plus fonctionnel et plus indépendant de la représentation prototypique, canonique du schéma électrique.

– Type de solution «*non fonctionnelle sans prototype*» (n = 9) : l'élève échoue dans la réalisation du circuit et utilise les nœuds mais de façon non fonctionnelle (figure 4). Aucun élève n'a placé les deux lampes l'une en

dessous de l'autre. La procédure de vérification s'appuie le plus souvent sur une conception erronée : «*il faut mettre l'ampèremètre à la sortie du circuit car ça pourrait diminuer à la fin du circuit*» (Sophie); «*il faut mettre l'ampèremètre à la sortie des ampoules car sinon, avant, on mesure le générateur*» (Fabienne) ; «*si on mettait l'ampèremètre devant les deux lampes, on trouverait zéro*» (Laurence).

– Type de solution «*non fonctionnelle avec prototype*» (n = 6) : la réussite est plus fréquente que précédemment ; les élèves utilisent les nœuds de façon non fonctionnelle mais, contrairement au type de solution «*non fonctionnelle sans prototype*», ils placent les deux lampes l'une en dessous de l'autre. Ils ont moins regardé le schéma. La procédure de vérification se base le plus souvent sur une procédure terme à terme.

– Type de solution «*échec*» (n = 6) : les élèves échouent dès la reproduction du schéma en dérivation ; il est donc difficile de traiter leurs réponses (dans les quatre autres types de solution, les schémas dessinés par les élèves étaient justes). Néanmoins, ils n'utilisent pas les nœuds. La procédure de vérification n'est que le constat de l'échec. Ils ont pour la plupart très peu regardé le schéma (qui était faux).

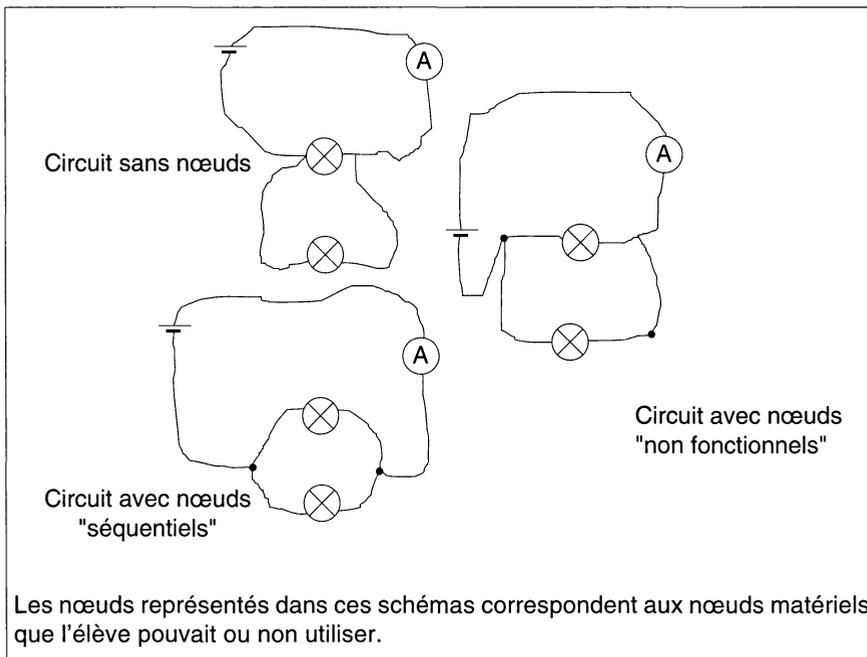


Figure 4 : Trois types d'utilisation des nœuds lors de la réalisation du problème E2

Conformément à notre attente, aucun élève n'a comparé spontanément ses réponses au problème E1 et au problème E2. L'hypothèse selon laquelle il n'y a pas de «*miracle empiriste*» (Johsua, 1990b ; Lemeignan & Weil-Barais, 1993) est une nouvelle fois vérifiée.

Outre ce résultat qui ne fait apparaître aucune différence individuelle, la représentation du circuit comprenant une matérialisation des nœuds n'a pas été suivie par tous les élèves. Certains se sont montrés plus indépendants de la représentation canonique des circuits électriques, à la fois par l'absence de l'utilisation des nœuds et par l'absence de la mise en place du prototype des lampes en parallèle.

2.2.3. Problème E3

– Type de solution «*fonctionnelle + loi*» (n = 10) : les élèves réussissent le problème et énoncent la loi des courants dérivés. Ils remarquent également que l'intensité parcourant les deux lampes est différente. Pour ces élèves, il semble qu'il ne s'agit pas seulement de chiffres abstraits reliés par une loi mais de chiffres qui *représentent* une intensité de courant plus ou moins forte. On peut inférer de ces verbalisations que les élèves ont formé mentalement une image dynamique du circuit : «*Selon le générateur, les intensités de courant changent et l'intensité du courant principal est égale à la somme des intensités des courants dérivés*» (Gilles) ; «*La somme des intensités des courants dérivés est égale à l'intensité du courant principal. Il n'y a pas le même nombre d'ampères qui passent dans chaque lampe. Les lampes ne brilleront pas pareil*» (Frédéric). Cette remarque est d'autant plus judicieuse que, dans la plupart des problèmes didactiques qu'ils ont habituellement à résoudre, les lampes sont identiques. Cela semble signifier aussi qu'ils ont procédé à une analyse approfondie du problème sans le rattacher immédiatement à un *problème prototypique*, ou un *schéma de problème* (Richard, 1990).

– Type de solution «*loi seulement*» (n = 14) : les élèves réussissent et énoncent la formule de la loi des courants dérivés sans commentaire sur les différences de courant : « *$I = I_1 + I_2$; les courants dérivés sont égaux à l'intensité du générateur*» (Sophie) ; «*Si on additionne $I_1 + I_2$ on trouve I . Si on fait $I - I_2$, on trouve I_1 et si on fait $I - I_1$, on trouve I_2* » (Christophe).

– Type de solution «*fonctionnelle seulement*» (n = 3) : les élèves remarquent la différence d'intensité de départ dans les trois lignes du tableau mais n'évoquent pas la loi des courants dérivés (deux élèves sur trois réussissent). La justification est de type phénoménologique : « *I_1 et I_2 n'ont pas toujours la même intensité. Il y a des circuits qui prennent plus d'intensité que les autres.*» (Boris)

– Type de solution «*non réponse*» (n = 6) : les élèves échouent et ne déduisent aucune information du tableau. Ils disent qu'ils ne savent pas.

– Type de solution «*calculatoire*» (n = 9) : les élèves échouent après avoir effectué divers calculs. On ne trouve pas de trace d'une analyse physique du problème. Ils verbalisent simplement les opérations effectuées : «*c'est pour calculer des intensités*» (Nordine) ; «*j'ai avancé la virgule ; je les ai mis en ampères*» (Halima).

On constate, dans ce problème proche du schéma de problème standard, que les élèves manifestent les uns par rapport aux autres une «sensibilité» différente aux chiffres du tableau. Certains appliquent correctement la loi mais les chiffres ne renvoient pas explicitement à un courant électrique (type de solution «*loi*») et d'autres élèves manifestent cette «sensibilité» à une représentation physique de ces chiffres (types de solutions «*fonctionnelle + loi*» et «*fonctionnelle*»). Le type de solution «calculatoire» se manifeste dans ce problème d'application numérique avec évidence : ces élèves ajoutent les chiffres sans se référer à une conception de l'électricité. On remarque également que ce problème, qui a été classé dans une étude antérieure comme «prototypique» (Rozencwajg, 1992), n'active pas, conformément à nos attentes, de conceptions erronées comme dans le cas du problème E1.

2.2.4. Problème E4

- Type de solution «*séquentielle*» (n = 11) : les élèves donnent les bonnes réponses en répondant d'abord pour le dipôle (L1 L2 L3), puis pour (L4), et enfin pour le dipôle (L5 L6). Ce type de solution correspond à l'analogie hydraulique, qui va «dans le sens du courant».

– Type de solution «*séquentielle avec départ à L4*» (n = 11) : les élèves donnent également les bonnes réponses mais commencent par le dipôle L4 (la lampe en série) puis le dipôle (L1 L2 L3) et enfin le dipôle (L5 L6). Ils analysent correctement les trois dipôles mais l'ordre ne correspond plus à l'analogie hydraulique et ne va pas «dans le sens du courant». On peut penser que les élèves donnent d'abord l'intensité de L4 car il n'y a rien à calculer du fait que cette lampe est en série.

– Type de solution «*globale / schéma*» (n = 5) : les élèves répondent 0,05 pour toutes les lampes car ils perçoivent globalement un circuit en dérivation et non les trois dipôles. Ils divisent donc 0,3 par le nombre total de lampes. Ils ont ramené ce problème complexe à un énoncé de problème prototypique (Rozencwajg, 1992).

– Type de solution «*globale / énoncé*» (n = 5) : les élèves répondent 0,3 car ils ne repèrent dans l'énoncé que l'information sur l'identité des lampes.

– Type de solution «*erronée*» (n = 5) : les élèves analysent le circuit de façon erronée, par exemple en considérant que les lampes L4 et L2 sont toutes les deux en série. L'intensité indiquée est alors de 0,3 A pour ces deux lampes.

– Type de solution «*calculatoire*» (n = 5) : les élèves effectuent des calculs qui n'ont rien à voir avec les lois ni avec des conceptions connues. Par exemple ils ajoutent successivement 0,3 ampère à chaque lampe. Les calculs effectués ne peuvent pas être interprétés comme pour le type de solution «*erronée*». En fait, nous n'avons pas réussi à comprendre la logique qui préside aux calculs réalisés par ces élèves.

Les réponses au problème E4 doivent être comparées à celles du problème E1. En effet, dans le problème E1, l'intensité du courant principal n'étant pas donnée dans l'énoncé, elle renforce la conception séquentielle où l'intensité de la pile est constante. Au contraire, dans le problème E4, l'information étant donnée, elle permet à l'élève utilisant un raisonnement séquentiel de ne pas échouer. C'est en effet le cas. Sur les 22 élèves qui réussissent le problème E4, 21 élèves sont «*séquentiels*» en ce qui concerne le problème E1. C'est donc bien ici le contexte qui influence la représentation élaborée par l'élève : dans le problème E4, l'élève «*séquentiel*» réussit ; dans le problème E1, l'élève «*séquentiel*» élabore soit une représentation «*séquentielle imagée*» soit une représentation «*séquentielle stricte*» : il active alors une conception où la pile est à intensité constante. Selon le contexte (intensité principale donnée ou non dans l'énoncé), le type de solution est différent. Le raisonnement séquentiel, qu'il soit sous-tendu par un format verbal déclaratif (énonciation de la loi) ou par un format imagé (analogie hydraulique) est efficace dans le problème E4.

Concernant les deux types de solutions «*globales par rapport à l'énoncé*» et «*par rapport au schéma*», l'élève a sélectionné dans le schéma ou dans l'énoncé, «*une interprétation d'un terme qui permet de ramener le problème à un problème connu*» (Richard, 1990, p. 24). Ainsi la réponse 0,05 montre que l'élève a interprété l'ensemble du schéma comme un circuit en dérivation à partir d'un indice partiel de branches parallèles. De même, la réponse 0,3 suggère que l'élève s'est appuyé sur l'indice d'identité des lampes.

Enfin, comme pour le problème E3, le type de solution «*calculatoire*» se manifeste clairement : ces élèves ajoutent les chiffres sans qu'aucune conception semble sous-jacente à ce calcul.

3. DISCUSSION

Pour chaque problème, chaque élève vient d'être caractérisé par un type de solution. L'objectif est de rechercher maintenant s'il existe une cohérence intra-individuelle des types de solutions sur l'ensemble des problèmes. Pour cela, nous avons procédé à une Analyse Factorielle des Correspondances Multiples (AFCM) et à une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH). Cette classification a permis de dégager une typologie des élèves en cinq classes selon leurs types de solutions aux problèmes d'électricité (tableau 2). L'interprétation s'appuie sur l'analyse des tris croisés entre les classes issues de la classification et les types de solutions de chaque problème. Les χ^2 de chaque tri croisé sont tous significatifs à $<.01$.

Classes (N = 42)	Problème E1	Problème E2	Problème E3	Problème E4
Classe 1 (n = 13)	Séquentielle stricte (n = 11)	Séquentielle (n = 6)	- Fonctionnelle + Loi (n = 6) - Loi (n = 7)	Séquentielle (L4) (n = 8)
Classe 2 (n = 10)	Séquentielle imagée (n = 10)	Fonctionnelle (n = 6)	- Fonctionnelle + Loi (n = 4)	Séquentielle (L1, ..., L6) (n = 7)
Classe 3 (n = 8)	Modèle d'usure (n = 5)	Variable	Non réponse (n = 5)	Analyse erronée (n = 4)
Classe 4 (n = 5)	Calculatoire (n = 3)	Non fonctionnelle avec prototype (n = 2)	Loi (n = 4)	Globale / schéma (n = 3)
Classe 5 (n = 6)	Calculatoire (n = 4)	Echec (n = 5)	Calculatoire (n = 5)	Calculatoire (n = 4)

Tableau 2 : **Classification des élèves (5 classes) en fonction des types de solutions dans les différents problèmes.** L'analyse s'appuie sur les contributions signées au χ^2 .

Deux processus de pensée plus généraux nous paraissent pertinents pour analyser ces cinq regroupements de types de solutions (tableau 2) : les processus propositionnel et analogique définis en particulier par Lautrey (1987). Le traitement propositionnel possède les caractéristiques suivantes : les éléments de la représentation sur lesquels le sujet opère un traitement séquentiel sont codés séparément et arbitrairement ; une proposition extrinsèque à la représentation relie ces différents éléments. Au contraire, dans le traitement analogique, la représentation se présente sous forme d'une image dans laquelle les propriétés sont intrinsèques à la représentation.

Les types de solutions regroupés dans la classe 1 relèvent du processus propositionnel. En effet, comme dans le traitement propositionnel, les éléments du circuit sont codés séparément et arbitrairement ; l'élève opère un traitement séquentiel de ces éléments ; la loi reliant ces éléments est une proposition extrinsèque à la représentation. Ces caractéristiques du traitement propositionnel apparaissent dans les types de solutions mis en œuvre pour chacun des problèmes. Dans le problème E1, la pile est un élément codé de façon isolée et arbitraire comme débitant une intensité constante indépendamment du circuit, c'est-à-dire qu'il soit en série ou en dérivation ; le traitement est séquentiel ; la loi est donnée par le sujet comme une proposition de façon extrinsèque. Dans le problème E2, le sujet construit un circuit canonique avec nœuds qui a de nouveau un caractère arbitraire ; la loi est de nouveau donnée de façon extrinsèque (procédure de décomposition). Dans le problème E3, le sujet réussit en évoquant de nouveau la loi. Dans le problème E4, il réussit mais l'ordre de réponse pour les différentes intensités montre une représentation arbitraire, car il commence par l'intensité de la lampe L4, au lieu de commencer par la lampe L1.

Les types de solutions regroupés dans la classe 2 relèvent du processus analogique. En effet, comme dans le traitement analogique, le sujet évoque une image dynamique du circuit électrique basée sur l'analogie hydraulique et qui n'a plus le caractère arbitraire comme dans le traitement propositionnel. La loi n'est plus donnée explicitement car elle est intrinsèque à la représentation. Ces caractéristiques du traitement analogique apparaissent dans chacun des problèmes. Dans le problème E1, l'intensité du courant principal n'est plus arbitrairement constante mais varie selon le circuit ; l'élève justifie sa réponse en évoquant une image du circuit et applique correctement la loi sans la verbaliser. Dans le problème E2, l'élève construit un circuit fonctionnel qui n'a plus le caractère arbitraire observé dans le traitement propositionnel. Dans le problème E3, il évoque une intensité variable du circuit de façon dynamique. Dans le problème E4, le circuit est analysé «dans le sens du courant» et non de façon arbitraire («départ» à la lampe L1).

Il est difficile de qualifier les types de solutions regroupés dans la classe 3, car les élèves ont particulièrement mal intégré les connaissances du cours (problèmes E1, E3 et E4). Ils ne semblent pas avoir réalisé de compromis entre les conceptions spontanées et le cours comme c'est le cas du groupe 1. Pour le problème prototypique (E3), les élèves de ce groupe ne répondent pas «n'importe quoi» comme cela semble le cas dans le type de solution «calculatoire», mais ne donnent aucune réponse.

Les types de solutions regroupés dans la classe 4 relèvent du processus analogique. Les sujets fonctionnent en effet sur la base de

connaissances constituées en prototypes. Ces images sont efficaces pour des problèmes simples (réussite au problème E3). Quand le problème est complexe, le sujet le ramène à un schéma de problème qu'il connaît (problème E4). La conceptualisation (problème E1) est sommaire mais l'élève a acquis quelques connaissances prototypiques. Dans la construction du circuit (problème E2), il reproduit le prototype des lampes en parallèle.

Les types de solutions regroupés dans la classe 5 relèvent de routines de calcul avec peu de conceptualisation. Il est difficile de dire de quel processus ces solutions relèvent du fait que l'élève semble surtout ne pas vraiment traiter les problèmes. Ce mode de traitement «calculatoire» avait déjà été observé antérieurement (Rozencwajg, 1992).

Les résultats au questionnaire de connaissances confirment ces analyses. Le score au questionnaire a été catégorisé en trois modalités : faible, moyen et élevé, où le score élevé correspond à «zéro faute». L'analyse des contributions signées au χ^2 du tri croisé entre la classification (cinq classes) et ces trois modalités montre que les classes 1 et 4 contribuent au score élevé. La classe 2 contribue au score moyen. Les classes 3 et 5 contribuent au score faible.

Outre la classification de ces différences, il reste néanmoins qu'aucune différence individuelle ne s'est manifestée dans la comparaison entre la situation de prédiction de l'intensité (E1) et la construction des circuits (E2) : aucun élève n'a comparé spontanément les deux situations. Tiberghien (1990) nous permet d'analyser ce résultat, à savoir que l'élève ne met pas en relation une situation pratique et une situation théorique. Pour l'auteur, un obstacle épistémologique peut résulter de la différence entre les champs de pratique de la vie quotidienne et du savoir scientifique qui n'obéissent pas aux mêmes lois de cohérence. Les structures de connaissances des élèves, acquises à travers les expériences de la vie quotidienne, ont une cohérence liée aux résultats d'actions pratiques. Leurs interprétations peuvent paraître incohérentes du point de vue scientifique, alors que les conceptualisations utilisées dans les différentes situations n'ont pas besoin d'être compatibles pour les élèves. En revanche, les règles de cohérence de la pratique scientifique relèvent de la théorie et ont pour fonction l'interprétation la plus large possible du champ d'application. L'obstacle épistémologique relèverait donc de l'incommensurabilité entre les deux champs de pratique. De même, Weil-Barais (1995), reprenant précisément le résultat de cette recherche, l'analyse par le fait que *«l'observation d'un dispositif physique n'est pas la même chose que sa formalisation. Le type de formalisation peut induire certains modes de traitement que ne suggère pas le dispositif lui-même.»* (p. 432)

4. CONCLUSION

Les processus analogique et propositionnel, classiquement identifiés dans des tâches cognitives non spécifiques, ont pu être mis en évidence dans le cadre de domaines de connaissances sémantiquement structurés, comme c'est le cas de l'électricité. Ils offrent, nous semble-t-il, un cadre conceptuel heuristique pour l'identification des différences individuelles dans la façon de résoudre des problèmes scientifiques.

Cette complémentarité entre la didactique et la psychologie différentielle a été poussée plus loin car nous avons mis en relation les types de solution observés chez les élèves avec des dimensions cognitives générales évaluées par des tests d'intelligence (Rozencwajg, 1997). Les corrélations élevées entre des comportements très spécifiques observés dans la résolution de problèmes d'électricité, et des scores à des épreuves cognitives générales (aptitudes, styles cognitifs, métaconnaissances) montrent cette complémentarité. Pour ne donner que quelques résultats, un score faible dans le facteur général (*facteur G*) d'intelligence (tâche de raisonnement inductif) est lié de façon très claire avec une conceptualisation calculatoire ou prototypique des circuits électriques. À l'opposé, les conceptualisations plus élaborées construites par les élèves, qu'elles soient justes ou non, sont liées à un score en facteur G élevé. Un autre résultat est le fait que les élèves qui forment des images dynamiques et performantes du circuit (groupe 2) ont les meilleurs scores en aptitude spatiale (*rotation mentale*). Ces élèves s'opposent en particulier à ceux du groupe 3 chez qui l'on a constaté une absence de compromis entre les conceptions et le cours. Les élèves du groupe 3 sont des élèves ayant les scores les plus bas en aptitude spatiale. Leur niveau en facteur G est par contre dans la moyenne, contrairement aux élèves manifestant une conception calculatoire ou prototypique. Leur difficulté ne semble donc pas se situer au niveau de la capacité à conceptualiser. Il semblerait que leur faiblesse en aptitude spatiale les ait empêché de progresser dans le domaine de l'électricité. Les élèves du groupe 1, qui montrent une bonne conceptualisation et un bon niveau de connaissances, sont les seuls à obtenir un bon niveau de métaconnaissances et ils sont classés dans le style cognitif «réfléchi».

En conclusion, l'analyse des comportements cognitifs à l'école sous l'angle des conceptions des élèves *et* sous l'angle de processus de pensée plus généraux nous semble une approche heuristique pour mieux comprendre les échecs mais aussi les réussites.

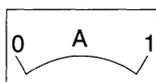
BIBLIOGRAPHIE

- BASTIEN C. (1987). *Schémas et stratégies dans l'activité cognitive de l'enfant*. Paris, PUF.
- CAILLOT M. & CAUZINILLE-MARMÈCHE E. (1984). Rôle des schémas prototypiques dans la résolution de problèmes. In A. Giordan & J.-L. Martinand (Éds), *Signes et discours dans l'éducation et la vulgarisation scientifiques*, Actes des VI^{es} Journées internationales sur l'éducation scientifique. Paris, Université Paris VII, UER de Didactique, pp. 405-413.
- CLOSSET J.-L. (1983). *Le raisonnement séquentiel en électrocinétique*. Thèse de doctorat, Université Paris 7.
- CLOSSET J.-L. (1988). Une possible méthodologie pour la recherche sur le raisonnement naturel en physique. Problématique et résultats dans le cas de l'électrocinétique. *Technologies Idéologies Pratiques*, vol. VII, n° 2, pp. 43-58.
- DUPIN J.-J. & JOHSUA S. (1988). Conceptions en électrocinétique. Permanences géographiques et évolution dans le temps. *Technologies Idéologies Pratiques*, vol. VII, n° 2, pp. 23-41.
- DUPIN J.-J. & JOHSUA S. (1994). Analogies et enseignement des sciences : une analogie thermique pour l'électricité. *Didaskalia*, n° 3, pp. 9-26.
- HUTEAU M. (1995). Les tests d'intelligence et la psychologie cognitive. In J. Lautrey (Éd.), *L'universel et le différentiel en psychologie*. Paris, PUF, pp. 385-412.
- JOHSUA S. (1982). *L'utilisation du schéma en électrocinétique : aspects perceptifs et aspects conceptuels. Propositions pour l'introduction de la notion de potentiel en électrocinétique*. Thèse de troisième cycle, Université de Provence.
- JOHSUA S. (1990a). La perdurance des obstacles épistémologiques : un révélateur de leur nature. In N. Bednarz & C. Garnier (Eds), *Construction des savoirs : Obstacles et conflits*. Ottawa, Cirade, Éditions d'Agence d'Arc, pp. 110-116.
- JOHSUA S. (1990b). Les conditions d'évolution des conceptions des élèves. In N. Bednarz & C. Garnier (Eds), *Construction des savoirs : Obstacles et conflits*. Ottawa, Cirade, Éditions d'Agence d'Arc, pp. 306-314.
- JOHSUA S. & DUPIN J.-J. (1987). La gestion des contradictions dans des processus de modélisation en physique, en situation de classe. In G. Vergnaud (Éd.), *Didactique et Acquisition des connaissances scientifique*, Actes du Colloque de Sèvres. Grenoble, La Pensée Sauvage, pp. 185-199.
- JOHSUA S. & DUPIN J.-J. (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris, PUF.
- KHANH TRAN T. & BARIL M. (1995). La différence courant-tension dans les circuits électriques. In *Colloque franco-québécois : la Tutelle en sciences expérimentales*. GDSE P7 - CIRADE, 2-3 mars 1995, Paris 7, Document de travail.
- 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. 107-121.
- LAUTREY J. (1987). *Structures et fonctionnements dans le développement cognitif*. Thèse de doctorat d'état es-lettres et sciences humaines, Université Paris V.
- LAUTREY J. (1990). Esquisse d'un modèle pluraliste du développement cognitif. In M. Reuchlin et al. (Éds), *Cognition : L'universel et l'individuel*. Paris, PUF, pp. 185-216.
- LEMEIGNAN G. & WEIL-BARAIS A. (1993). *Construire des concepts en physique – L'enseignement de la mécanique*. Paris, Hachette.
- OLRY-LOUIS I. (1996). Les déterminants de la compréhension de textes historiques : différences individuelles et traitements pédagogiques. Communication orale au *XXVI International Congress of Psychology*, Montréal, 16-21 Août 1996.

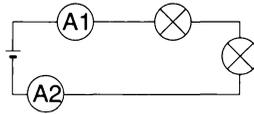
- REUCHLIN M. (1978). Processus vicariants et différences individuelles. *Journal de Psychologie*, n° 2, pp. 133-145.
- RICHARD J.-F. (1990). *Les activités mentales. Comprendre, raisonner, trouver des solutions*. Paris, Armand Colin.
- ROZENCWAJG P. (1992). Analysis of problem solving strategies on electricity problems in 12 to 13 year olds. *European Journal of Psychology of Education*, n° 1, pp. 5-22.
- ROZENCWAJG P. (1994). *Stratégies de résolution de problèmes scolaires et différences individuelles*. Thèse de doctorat, Université Paris V.
- ROZENCWAJG P. & TROSSEILLE B. (1996). Approches cognitive, didactique et différentielle de la représentation des concepts scientifiques. *L'Orientation Scolaire et Professionnelle*, vol. 25, n° 2, pp. 285-306.
- ROZENCWAJG P. (1997). Entre les stratégies de résolution et les styles cognitifs : le concept de style de résolution. In Actes des XI^{es} Journées de psychologie différentielle, Montpellier 8 et 9 septembre 1994. Service des publications de l'université Paul Valéry de Montpellier, pp. 149-164.
- SIMON D.P. & SIMON H.A. (1978). Individual differences in solving physics problems. In R.S. Siegler (Éd.), *Children's thinking : What develops ?* Hillsdale, Laurence Erlbaum Associates, pp. 325-348.
- SNOW R.E. (1989). Aptitude-Treatment Interaction as a framework for research on individual differences in learning. In P.L. Ackerman, R.J. Sternberg & R. Glaser (Éds), *Learning and individual differences*. New York, Freeman, pp. 13-59.
- TIBERGHEN A. (1990). Phénomènes et situations matérielles : quelles interprétations pour l'élève et pour le physicien? In N. Bednarz, & C. Garnier (Éds), *Construction des savoirs : Obstacles et conflits*. Ottawa, Cirade, Éditions d'Agence d'Arc, pp. 93-102.
- TROSSEILLE B. (1995). The development of 8- to 14-year olds concept of temperature : théoretical and methodological issues. Communication affichée au IV^e European congress of Psychology, Athènes, 2-7 juillet 1995.
- WEIL-BARAIS A. (1993). *L'homme cognitif*. Paris, PUF.
- WEIL-BARAIS A. (1995). La formation des connaissances en Sciences Expérimentales. In D. Gaonac'h & C. Golder (Éds), *Manuel de Psychologie pour l'enseignement*. Paris, Hachette.

ANNEXE : Questionnaire d'électricité

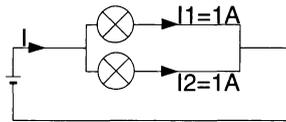
1. L'intensité, notée I d'un courant électrique se mesure avec :
2. L'unité de mesure de l'intensité du courant électrique est :
Son symbole est :
3. L'ampèremètre ci-dessous peut mesurer au maximum une intensité de :



4. Dans le schéma ci-dessous, les deux ampoules sont en série. L'ampèremètre A1 indique 1 ampère. Quelle est l'intensité indiquée par l'ampèremètre A2 ?

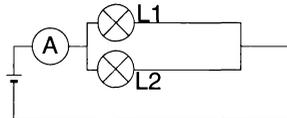


5. Dans le schéma ci-dessous, les deux ampoules sont en dérivation. Quelle est l'intensité de I ?

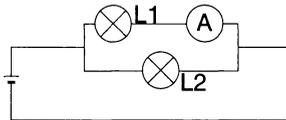


6. Dans le schéma ci-dessous, l'ampèremètre est branché correctement car il est branché en :

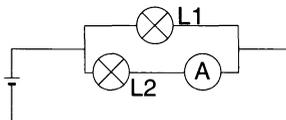
Il mesure l'intensité de :



7. L'ampèremètre mesure l'intensité de :



8. L'ampèremètre mesure l'intensité de :



9. Dans le schéma ci-dessous, l'ampèremètre est-il branché correctement ?

Il mesure l'intensité de :

