

Les obstacles à l'apprentissage de l'électrocinétique

par J.L. CLOSSET

Faculté des Sciences Agronomiques - U.E.R. de Physique
Gembloux, Belgique

Membre également du
L.D.P.E.S., Université Paris 7

1. INTRODUCTION

Bien qu'il s'agisse d'une vérité largement admise par tous ceux qui font de l'enseignement une préoccupation de recherche, il n'est peut-être pas inutile de redire que lorsqu'on enseigne, particulièrement les sciences, et plus particulièrement encore la physique, à des élèves de l'enseignement secondaire, on n'écrit pas sur une page blanche.

D'abord parce que l'enseignant n'écrit pas, mais que seul l'élève peut écrire ou si l'on préfère peut apprendre et ensuite et surtout parce que la page n'est pas blanche. C'est précisément avec et en fonction de ce qui s'y trouve déjà que l'élève pourra construire, en interaction avec l'enseignement, de nouvelles connaissances. Ce point de vue constructiviste rejoint donc ce que L. VIENNOT appelle le «consensus de départ» dans l'article introductif à ce fascicule.

C'est cette affirmation, à caractère jusqu'ici théorique, que nous allons tenter de développer et d'établir clairement dans le cas de l'apprentissage de l'électrocinétique. Elle a bien sûr une portée tout à fait générale, mais l'électrocinétique offre un cadre particulièrement intéressant pour l'illustrer car il s'agit sans doute du domaine où le plus grand nombre de recherches convergentes ont été menées depuis bientôt dix ans. Par ailleurs, elle constitue assurément, par le nombre de concepts (charge, débit ou intensité de courant, potentiel, champ, énergie) qu'elle met en jeu et par leur importance, un exemple significatif quant à l'enseignement de la physique dans le secondaire.

2. BIEN AVANT L'ENSEIGNEMENT

Nous vivons dans une civilisation de l'électricité, or dès les premières années de sa vie l'enfant est amené à s'interroger sur le monde qui

l'entoure et donc aussi sur les phénomènes électriques quotidiens. Les réponses qu'il va construire doivent au moins être suffisantes pour guider ses actions et rendre compte de ses observations. L'un des premiers phénomènes électriques auquel est confronté l'enfant est la production de lumière ; très tôt, il connaît aussi l'existence des piles qu'il utilise dans ses jouets.

Nous avons présenté à des élèves de l'école maternelle âgés de quatre à cinq ans une pile et une ampoule et nous leur avons demandé de les dessiner «avec ce qu'il fallait pour que l'ampoule brille». Tous ont relié l'ampoule à la pile par des fils, incorporant parfois au schéma un interrupteur comme dans la figure 1. Ce dessin montre bien dans quel sens il faut envisager la causalité dans ce problème : c'est l'interrupteur qui commande la manœuvre, la pile intervient ensuite et enfin l'ampoule s'allume. A la figure 2, l'enfant ne s'est pas soucié des bornes de la pile mais il a dessiné un gros fil avec au milieu un petit grain et a fait le commentaire suivant : «c'est un grain de lumière qui part de la pile et qui va à l'ampoule».

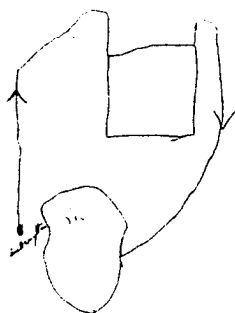


Figure 1
L'interrupteur participe
aussi à la causalité

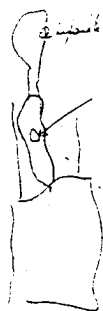


Figure 2
"C'est un grain de lumière
qui part de la pile et qui
va à l'ampoule".

Dès leur plus jeune âge les enfants ont donc une représentation très claire des phénomènes électriques. Elle ne peut à cet âge être que très substantialiste : l'électricité est perçue comme quelque chose de matériel, une sorte de fluide, voire de liquide ou même «des grains de lumière» qui s'écoulent de la pile vers le lieu d'utilisation où l'électricité est «consommée».

Au cours de l'enseignement fondamental, cette représentation première ne va guère évoluer fondamentalement bien que les premières manipula-

tions de piles et d'ampoules amènent les enfants à adapter leurs raisonnements aux réalités opératoires comme l'ont montré A. TIBERGHEN et G. DELACOTE (1).

Ils proposent à des enfants de 7 à 12 ans d'allumer une ampoule au moyen d'une pile cylindrique et d'un fil. «L'agencement général des éléments (réalisé par les enfants) consiste essentiellement à relier la pile et l'ampoule par le fil». Ces enfants confirment donc bien les observations que nous avons faites chez leurs cadets. Les auteurs proposent ensuite aux mêmes enfants d'allumer l'ampoule au moyen d'une pile plate. Ils y réussissent en quelques minutes en reliant «les deux bornes métalliques par une sorte de pont à l'aide de la lampe». Nous avons entrepris la même démarche en Belgique avec des enfants de 7 à 8 ans auxquels nous avons fourni cette fois 3 ou 4 morceaux de fils conducteur. Le même résultat a été observé si ce n'est que les enfants mettaient en œuvre un ou deux des fils à leur disposition.

Dans un cas comme dans l'autre, au delà du constat ou non de la réussite opératoire, l'intérêt de l'expérience est d'observer les explications fournies par les enfants et d'en déduire le modèle de fonctionnement auquel l'enfant se réfère. A titre d'exemple citons quelques phrases relevées à cette occasion.

- *«L'électricité monte dans l'ampoule et cela la fait marcher»*
- *Le fil électrique sert «à faire passer le courant»*
- *Le fil électrique sert «à donner de l'électricité»*
- *«La pile, il y a de l'électricité dedans et elle sert à allumer l'ampoule»*
- *La pile «sert à donner de l'électricité, l'électricité fait marcher l'ampoule»*

On retrouve ici le schéma causal linéaire déjà observé chez les plus petits qui cette fois s'accompagne d'explications sans ambiguïté. La pile (cause) est un contenant, elle possède donc un contenu, de l'électricité, du courant qui passe par le fil et rejoint l'ampoule où elle devient «un feu, mais tout petit» et permet à celle-ci de s'allumer (effet).

Ce modèle de fonctionnement va s'adapter remarquablement à la nécessité opératoire de deux fils qui pourtant eut été susceptible de le perturber. Les enfants expliquent qu'un courant (+) sort d'une des bornes de la pile et va vers la lampe et qu'un autre courant (-) sort de l'autre borne de la pile pour rejoindre le premier dans la lampe. De leur rencontre naît la lumière comme résultat d'une sorte de conflit. Ce modèle de fonctionnement, baptisé modèle des courants antagonistes, constitue l'adaptation la plus limitée du raisonnement précédent et reste fondamentalement causale linéaire.

Il est intéressant de constater, comme le montre A. BENSEGHIR [2], que ce type d'explication a eu longtemps cours historiquement. AMPÈRE [3] l'explicite ainsi : «On est généralement d'accord qu'elle (action électromotrice) continue à porter les deux électricités dans les deux sens où elle les portait auparavant, en sorte qu'il en résulte un double courant, l'un d'électricité positive, l'autre d'électricité négative, partant en sens inverses des points où l'action électromotrice a lieu et allant se réunir dans la partie du circuit opposée à ces points».

3. LES PREMIÈRES ÉTUDES DU CIRCUIT ÉLECTRIQUE

C'est munis des structures cognitives relatives à l'électricité que nous venons de décrire que les élèves abordent l'enseignement secondaire et les premières études du circuit électrique. L'une des premières difficultés consiste donc à introduire la notion de circulation fermée et surtout à faire accepter la conservation spatiale de l'intensité de courant qui est totalement incompatible avec les conceptions premières des élèves. En effet, pour eux, l'électricité ou le courant possède tout à la fois les caractéristiques d'un fluide matériel et celle d'une énergie. Ils ne peuvent donc concevoir que de l'énergie soit transmise à l'ampoule sans que simultanément ne disparaisse à tout le moins une partie du «fluide électrique».

Cette difficulté a été bien mise en évidence par JOHSUA et DUPIN [4] lors d'un essai d'enseignement prenant en compte les conceptions d'élèves de 12 à 14 ans. Ils leur proposent un circuit série comprenant deux ampèremètres disposés de part et d'autre d'une ampoule et alimenté par une pile et font la démonstration que les deux appareils mesurent bien la même intensité de courant. Ils constatent alors que les élèves rejettent l'évidence expérimentale avec des commentaires du type suivant :

- «*C'est impossible*» - «*Ce n'est pas logique*».
- «*Mais, alors, l'ampoule ne consomme-t-elle rien ?*»

D'autres contestent même l'observation immédiate :

- «*Ce n'est pas exactement la même chose*»
- «*Il y en a un peu moins là*»
- «*Il y en a une très petite différence*»

D'autres enfin mettent en cause les appareils.

- «*L'ampoule est mauvaise ou alors la pile ; changeons-les*»
- «*L'appareil est détraqué*».

A la fin de l'enseignement secondaire nous avons observé [5] la même

difficulté à rendre compatible la «consommation» d'énergie par l'ampoule, l'usure de la pile et la conservation de l'intensité de courant. Ainsi au cours d'interviews d'élèves de fin d'enseignement secondaire à propos du fonctionnement du circuit série comprenant une pile et une ampoule nous avons recueilli les explications suivantes :

«Je suppose que les électrons possèdent en eux une force qui est capable de faire de la lumière. Si ici (une borne de la pile) il y a un débit de 10.000 électrons par seconde, là (l'autre borne) il n'en revient peut-être que 9.000».

Question : Et les autres où sont-ils passés ?

«Ils sont devenus de l'énergie... ils ne sont plus des électrons».

Question : Donc la lampe a eu besoin de 1000 électrons ?

«Oui».

Question : Pourquoi n'envoie-t-on pas tout de suite 1000 électrons et ne pas en faire revenir ?

«Ça ne peut pas aller... dans la pratique ça ne va pas».

On voit bien que cet élève a conservé fondamentalement le même raisonnement que son cadet de l'école maternelle qui parlait de grains de lumière avec cette fois la prise en compte des conditions opératoires mais avec la poésie en moins.

D'autres élèves proposent ce que nous avons appelé le «modèle du livreur» ; en voici un exemple.

«Les électrons partent de la pile et sont en rotation sur eux-mêmes ; arrivés à l'ampoule ils sont freinés dans leur rotation, ce qui chauffe le filament et permet à l'ampoule de briller. Après l'ampoule, les électrons ne tournent plus et, par le second fil, regagnent la pile où ils sont à nouveau mis en rotation... etc...»

Dans tous les cas il s'agit, d'une manière où de l'autre, de rendre compte de l'alimentation de l'ampoule en énergie, une énergie substantiée, contenue dans la pile, qui a pour nom électricité ou courant et qui doit donc «passer» par quelque part, c'est-à-dire par les fils.

Une autre conclusion qu'il est d'ores et déjà possible de tirer est relative à l'utilisation d'un seul concept (nous dirons plutôt notion) pour décrire le circuit électrique. Il joue tout à la fois le rôle d'intensité de courant et d'énergie, il a certaines propriétés d'un fluide et notamment

celle de s'écouler dans le circuit comme dans des tuyaux, ou même des canaux. Dans un tel contexte le concept de différence de potentiel devient non-pertinent et les élèves, non seulement ne s'y réfèrent jamais, mais ne lui substituent aucune autre notion. JOHSUA [6] parle à ce propos de la métaphore du fluide en mouvement et en montre quelques-unes des conséquences quant à l'analyse par les élèves et les étudiants de diagrammes électriques simples. Il établit notamment que des représentations schématiques qui d'un point de vue physique sont équivalentes, sont interprétées comme différentes par les élèves et vice et versa.

4. LE RAISONNEMENT SÉQUENTIEL

Lorsqu'il s'agit de résoudre un problème ou même de répondre à une question simple relative à un circuit électrique les représentations que les élèves en ont et les notions qu'ils mettent en œuvre pour décrire son fonctionnement s'articulent au travers de raisonnements que nous avons décrits à l'occasion de notre thèse [5] et dont la méthodologie est explicitée ailleurs [8]. Pour la partie quantitative de cette étude nous avons utilisé des questionnaires papier-crayon que nous avons proposés à des populations de trois niveaux de formation en électricité différents.

Sous l'étiquette E1 nous rassemblons des populations de fin d'enseignement secondaire et de début d'enseignement universitaire qui présentent la caractéristique commune de n'avoir reçu aucun autre enseignement d'électrocinétique que celui du secondaire en Belgique.

Sous la notation E2 nous regroupons des populations de premier cycle universitaire dans des sections scientifiques, tant en Belgique qu'en France, qui ont reçu un enseignement d'électrocinétique à ce niveau en plus de la formation du secondaire.

Par l'abréviation E3 nous désignons des populations qui, pour différentes raisons, ont un niveau de formation supérieure au niveau E2. Il peut s'agir par exemple d'étudiants de seconde année de DEUG SSM ayant choisi un cours à option d'électronique ou d'étudiants en fin de maîtrise de physique dont la plus grande maturité constitue un avantage par rapport aux étudiants de la population E2.

Nous avons d'abord proposé à des populations des trois niveaux évoqués ci-dessus la question (A1 figure 3) suivante que nous présentons ici, pour des raisons de place, sous une forme simplifiée. Lors de l'enquête, toutes les précautions quant à la description du circuit avaient été prises et les étudiants devaient formuler leur réponse en choisissant une des propositions d'un questionnaire à choix multiple recouvrant toutes les possibilités : plus grand, plus petit ou égal et «je ne sais pas». Il leur était ensuite demandé de justifier leur réponse.

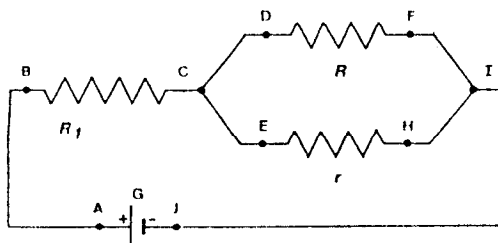


Figure 3 : Question A1

a) l'intensité de courant dans la portion CD est-elle plus grande, plus petite ou égale à l'intensité de courant dans la portion CE ?

b) l'intensité de courant dans la portion FI est-elle plus grande, plus petite ou égale à l'intensité de courant dans la portion HI ?

Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau 1 qui indique également le nombre d'étudiants concernés sous la forme «N=». Les autres chiffres du tableau sont exprimés en % de la population totale et la différence par rapport à 100% de la somme des pourcentages d'une colonne déterminée constitue le pourcentage de réponses «je ne sais pas», de «sans réponse» et de «divers».

Tableau 1

Populations	E1 N = 47	E2 N = 52	E3 N = 59
CD < CE et FI < HI Réponse correcte	36	57	76
CD = CE et FI < HI	51	37	15
CD = CE et FI = HI	6	4	9

La première ligne du tableau 1 concerne la réponse correcte : elle se passe de commentaire. On constate tout de même que le nombre de réponses correctes augmente sensiblement avec le niveau de la population. La troisième ligne du tableau concerne un type de réponse que nous signalons pour mémoire et qui correspond à un raisonnement très minotaire mais rencontré dans de nombreuses situations. Comme il ne fait pas l'objet de notre réflexion présente nous ne nous y attarderons pas. La seconde ligne du tableau correspond à la réponse qui nous intéresse. Elle s'accompagne de justifications du type suivant :

E1 « Dans CD et dans CE, on ne voit pas encore se marquer la différence qu'il y a entre R et r ».

E3 « Il n'y a aucune raison pour que l'intensité soit plus grande dans une portion (CD ou CE), car il n'y a aucune résistance qui intervient ».

Ainsi tout se passe donc comme si le courant issu de la pile partait à l'aventure dans le circuit ne se modifiant que là où il perçoit directement l'obstacle et évidemment sans aucune répercussion de l'aval sur l'amont.

La question suivante (A2 figure 4), va permettre de préciser et d'assurer cette dernière conclusion.

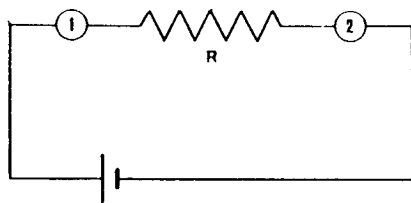


Figure 4 : question A2

- a) l'ampoule 1 va-t-elle briller aussi fort, plus fort ou moins fort que l'ampoule 2 ?
On augmente la valeur de résistance R.
- b) l'ampoule 1 va-t-elle briller aussi fort, plus fort ou moins fort qu'avant ?
- c) l'ampoule 2 va-t-elle briller aussi fort, plus fort ou moins fort qu'avant ?

Les résultats sont rassemblés dans le tableau 2.

Tableau 2

Populations	E1 N = 91	E2 N = 52	E3 N = 96
a) 1 aussi fort que 2 b) 1 moins fort qu'avant c) 2 moins fort qu'avant Réponse correcte	20	31	80
a) 1 plus fort que 2 b) 1 aussi fort qu'avant c) 2 moins fort qu'avant	52	52	10
a) 1 aussi fort que 2 b) 1 aussi fort qu'avant c) 2 aussi fort qu'avant	10	9	5

Nous avons incorporé à la seconde catégorie de réponse (seconde ligne du tableau) la réponse «1 plus fort que 2 / 1 plus fort qu'avant / 2 moins fort qu'avant» (3 copies pour l'ensemble des catégories). De la même manière nous avons également assimilé à cette catégorie un certain nombre (non négligeable) de réponses : «1 moins fort que 2 / 1 moins fort qu'avant / 2 aussi fort qu'avant» qui résultent du choix d'un sens de parcours inverse du courant (sens de parcours des électrons) comme l'indique généralement les justifications.

La première ligne du tableau 2 correspond à la réponse correcte. On constate; comme pour la première question que sa fréquence augmente avec le niveau de formation de la population. Il reste cependant inquiétant de constater qu'au niveau 3, 20% encore des étudiants ne peuvent la fournir.

La seconde ligne correspond à la réponse attendue avec des commentaires sans équivoque dont voici quelques exemples :

E1 «Pour atteindre l'ampoule 2, le courant doit franchir une résistance qu'il ne doit pas franchir pour atteindre l'ampoule 1. Il perdra donc de l'énergie et son intensité sera plus faible».

E3 «La résistance est placée après l'ampoule 1. Elle n'intervient donc en aucune manière sur son intensité».

E3 «Si R augmente, il y aura encore moins de courant qui passera et l'ampoule 2 brillera encore moins fort».

On obtient une confirmation claire de ce qui avait déjà été constaté à l'occasion de la première question. En particulier, il apparaît que le débit initial est indépendant du circuit, reste constant quoi qu'il arrive et constitue en quelque sorte une caractéristique de la pile. Par ailleurs, il apparaît aussi au travers de certaines justifications que, comme chez les plus jeunes élèves, le courant possède une nature énergétique. L'action de la résistance est locale et n'a d'influence que sur l'aval du circuit.

Le raisonnement majoritaire des élèves et des étudiants lorsque leurs réponses ne sont pas correctes peut être décrit comme ceci : tout se passe comme si la pile constituait une réserve de quelque chose de matériel (courant, électricité, électrons) qui soit fourni par elle à débit constant au circuit. Le raisonnement se fait résolument en termes de «courant» et suit le circuit sans influence de l'aval sur l'amont ; nous l'appellerons «raisonnement séquentiel».

On pourrait se demander dans quelle mesure les résultats obtenus ne sont pas dépendants de l'objet agissant sur le courant (ici une résistance) ou même des témoins de ce courant (ici deux ampoules). C'est pourquoi la même expérimentation a été reprise [5] avec d'autres objets agissant sur le courant (condensateur, diode en alternatif, pile, self et même boîte noire) et avec d'autres témoins (condensateurs, résistance avec un oscillo à leurs bornes ou ampèremètres). Chaque fois le même type de raisonnement a été observé ; seules les fréquences variaient quelque peu. La question suivante (A3 figure 5) en constitue un exemple.

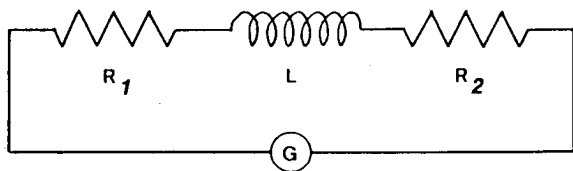


Figure 5 : question A3

Dans le circuit ci-dessus G est un générateur de tension alternative dont la résistance interne est négligeable. R_1 et R_2 sont deux résistances et L une bobine de self-induction de résistance interne négligeable.

La tension U_1 aux bornes de R_1 et la tension U_2 aux bornes de R_2 sont-elles en phase ou non ? Justifiez votre réponse.

Les réponses obtenues en fonction des différentes populations interrogées sont présentées dans le tableau 3.

Tableau 3

Populations	E1 N = 18	E2 N = 16	E3 N = 40
U1 et U2 en phase Réponse correcte	50	56	60
U1 et U2 déphasées	50	38	35

On constate qu'une proportion très significative d'étudiants de chacune des populations pratiquent, même dans cette situation, le raisonnement séquentiel indépendamment d'une référence au courant comme le montrent les quelques exemples de justification qui suivent :

E1 «La tension mesurée en R2 sera $<$ à celle de R1, dû à la self-induction produite par la bobine ; déphasée de $\pi / 2$ ».

E3 «L'introduction de la self provoque un déphasage entre R1 et elle-même de $\pi / 2$. La tension sortante de L va aussi être déphasée par rapport à R2 de $\pi / 2$. D'où le déphasage global est π ».

On voit bien ici que le raisonnement séquentiel dépasse le simple problème de la dualité du «fluide électrique», à la fois matière qui se conserve et énergie qui est consommée. Il trouve une expression plus large liée à une conception particulière du circuit doté d'un point de départ privilégié, le générateur, et d'une règle de progression à partir de celui-ci en direction des divers éléments du circuit. D'un point de vue causal le schéma est unidirectionnel (linéaire comme chez les jeunes enfants) et le circuit n'est pas considéré comme un «système» où la règle du feedback serait obligatoire mais comme un parcours où les actions locales n'ont d'influence que sur l'aval.

Ainsi partant de leurs conceptions primaires du circuit électrique (modèle unipolaire ou modèle des courants antagonistes) les jeunes élèves ont décrité l'enseignement du régime circulaire avec leurs outils cognitifs, c'est-à-dire une causalité linéaire, pour adopter un raisonnement

séquentiel qu'ils conservent même lorsqu'ils renoncent à l'usure du courant, renonciation qui peut d'ailleurs n'être que très provisoire comme nous allons le voir.

5. STABILITÉ DU RAISONNEMENT SÉQUENTIEL

Quand on examine les secondes lignes des tableaux 1 et 2 on constate que la tendance au raisonnement séquentiel s'atténue rapidement, pour ces deux questions, avec l'élévation du niveau de formation et que le nombre de réponses correctes devient au niveau E3 très nettement majoritaire. Après tout, le problème se résout-il peut-être tout seul avec l'enseignement. Le caractère évasif de certaines justifications aux réponses correctes ainsi que les résultats observés à l'occasion d'autres manipulations non présentées dans cet article nous ont conduit cependant à formuler une hypothèse différente : la disparition du raisonnement séquentiel avec le niveau d'enseignement pour une situation déterminée, ou un groupe de situations déterminées, est bien un effet de l'enseignement mais il est spécifique de ce type de situation et n'affecte pas définitivement le raisonnement séquentiel. Autrement dit, lorsqu'un enseignement adéquat a installé des mécanismes de production de réponses correctes, le raisonnement «naturel» n'a plus de conséquence, en tout cas à ce niveau de la réponse, mais dès qu'on présente aux étudiants une situation non familière, le raisonnement «naturel» se manifeste à nouveau : il se transfère de préférence au raisonnement appris.

Pour tester cette hypothèse nous avons proposé à quelques populations des différents niveaux d'enseignement la question suivante (A4, figure 6).

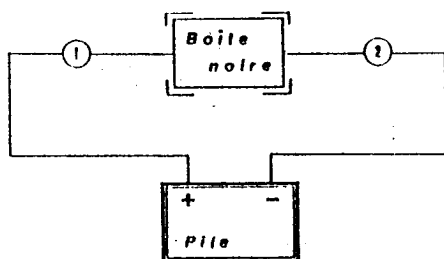


Figure 6 : question A4

1 et 2 sont des ampoules identiques. La boîte noire cache une partie du circuit. La partie cachée du circuit, outre des fils conducteurs, peut comprendre des piles et des ampoules.

On voudrait que l'ampoule 1 brille aussi fort que l'ampoule 2. Est-ce toujours le cas, jamais le cas où seulement pour un ou des circuits particuliers dans la boîte noire et dans ce cas, lesquels ?

Les réponses obtenues à cette question en fonction des différentes populations auxquelles elle a été présentée sont regroupées dans le tableau 4.

Tableau 4

Populations 1 aussi fort que 2 si	E1 N = 58	E2 N = 83	E3 N = 42
toujours le cas Réponse correcte	36	48	33
Conditions portant sur piles, ampoules, etc...	52	46	43

On constate que la fréquence des réponses attendues (seconde ligne du tableau 4) reste importante quelle que soit la population alors que les justifications fournies ne laissent aucun doute quant au mode de raisonnement adopté. En voici quelques exemples :

E2 «*Comme l'ampoule 2 brillera moins fort que l'ampoule 1 (l'étudiant considère qu'il s'agit là d'une évidence) l'intensité est plus faible, il suffirait, dans la boîte noire, d'ajouter une pile qui compenserait la perte de flux d'électrons due à la première ampoule.*»

E3 «*Tant que la boîte noire ne contient pas un condensateur, 1 brille comme 2.*»

E3 «*Pas toujours le cas car la boîte noire peut renfermer un générateur, donc le courant sera différent à la sortie*» (même au niveau 3, il arrive encore que l'on considère qu'une pile «crache» du courant).

Ainsi les étudiants du niveau 3 qui à l'occasion des questions A1 et A2 n'adoptaient le raisonnement séquentiel qu'à raison, respectivement, de 15 et 10% rejoignent presque les autres populations avec une fréquence de 43% de réponses de type séquentiel. D'autres questions [5] nous ont conduit aux mêmes constatations. C'est pourquoi nous parlions plus haut d'une renonciation très provisoire à l'usure du courant. Le raisonnement séquentiel apparaît donc comme particulièrement résistant à l'enseignement même si celui-ci donne l'illusion d'un impact positif sur les réponses obtenues.

6. LE RAISONNEMENT À COURANT CONSTANT

Indépendamment de ce retour au raisonnement séquentiel que nous venons d'évoquer, il existe aussi chez les étudiants qui ne succombent plus à cette tentation devenue trop grossière pour eux, une autre forme de réinvestissement de la causalité linéaire. Nous l'avons mise en évidence notamment à l'occasion de la question suivante (A5 figure 7).

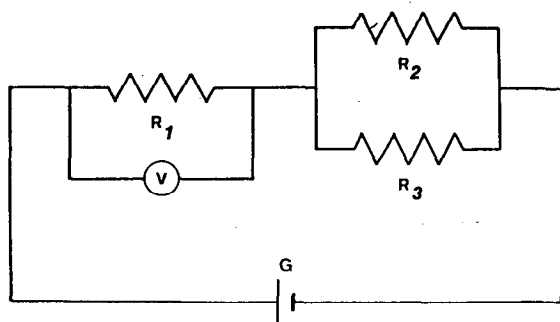


Figure 5 : question A5

On augmente la valeur de R_1 ; on constate que la tension mesurée par le voltmètre augmente aussi. Pourquoi ?

L'augmentation de la résistance R_1 entraîne une diminution du courant dans le circuit et une indétermination quant à l'évaluation du produit $R_1 \cdot I$ mesuré par V . La réponse correcte ne peut résulter que de l'examen de la répartition des tensions entre R_1 et R_2 , 3 lors de l'augmentation de R_1 .

Le tableau 5 présente la synthèse des résultats obtenus. La seconde ligne de ce tableau fait apparaître une forme de raisonnement qui n'est plus strictement séquentiel puisque l'intensité de courant ne se trouve pas modifiée après passage dans la résistance. Il ne s'agit pas non plus d'un autre effet sur l'aval qui serait sans influence sur l'amont. Ici il n'y a pas d'influence sur l'amont et sans doute pas davantage sur l'aval. I est posé comme une constante non seulement le long du circuit mais également dans le temps et quoi qu'il arrive dans ce circuit. I devient une caractéristique de la pile ou du générateur. Sur ce point il y a compatibilité avec le raisonnement séquentiel. Les justifications sont à nouveau sans ambiguïté ; voici deux exemples de ce que nous appellerons un raisonnement en courant constant :

Tableau 5

Populations	E1 N = 52	E2 N = 49	E3 N = 37
Justification correcte	2	4	16
$U_R = RI$ $I = \text{constante}$ si $R \uparrow$ $U_R \uparrow$	33	61	76
Séquentiel	25	4	3

E1 « $U = RI$; par la loi d'Ohm, on remarque que V est proportionnel à la valeur de R puisque I est fixé étant donné G ».

E3 «Le courant est le même dans les deux cas. $V = RI$: une augmentation de R provoque une augmentation de V ».

La troisième ligne du tableau reprend les fréquences du raisonnement séquentiel. Voici deux exemples de commentaires s'y rapportant :

E1 «Le voltmètre mesure la différence d'intensité entre l'entrée et la sortie de $R1$. Si on augmente la résistance, l'intensité à la sortie va diminuer. La différence sera donc plus grande».

E3 «A l'entrée de $R1$, le courant se subdivise en 2 : si on augmente $R1$, on freine le courant qui entre dans $R1$; d'après la conservation du courant, il y en a plus qui passe dans V ».

Ici le début de la justification est de type séquentiel et la fin fait apparaître un raisonnement en courant constant. Ceci est à rapprocher des constatations qui suivent. Si le raisonnement séquentiel est encore très fréquent au niveau E1 (25%), il disparaît avec le niveau de formation (4% en E2 et 3% en E3) non pas au profit d'un raisonnement correct, mais au profit d'un raisonnement en courant constant beaucoup plus tenace encore, puisque loin d'être en régression avec le niveau d'enseignement, il progresse passant de 33% en E1 à 61% en E2 et 76% en E3. Des résultats semblables ont été observés à l'occasion d'autres questions [5] qui montrent, de même que ceux-ci, comment les structures cognitives des élèves et des étudiants peuvent transformer l'enseignement reçu sur l'unicité du courant dans un circuit série en un raisonnement en courant constant tel que nous l'avons décrit, adaptant ainsi le discours de l'enseignant aux moindres frais pour le rendre compatible avec des tendances fortes déjà en place.

Il faut aussi constater ici que ce raisonnement est compatible avec la réalité expérimentale ce qui bien sûr ne peut que le renforcer.

Une critique qui pourrait être faite à nos questions est qu'elles sont toutes formulées qualitativement alors que l'enseignement, en France comme en Belgique, est essentiellement basé sur l'utilisation du formalisme. Or on observe que c'est précisément le formalisme qui sert de moyen d'expression au raisonnement en courant constant. Si l'on classe a priori les trois populations par ordre croissant de compétence à utiliser le formalisme (E1, E2, E3) on obtient aussi la séquence des fréquences croissantes du raisonnement en courant constant. Nous n'en déduisons évidemment pas qu'une plus grande habileté à manier le formalisme conduit à raisonner en courant constant, mais nous pensons qu'une plus grande familiarité avec le formalisme pousse à davantage s'en servir. Or ce formalisme mal digéré, déconnecté de ses sources et pour une bonne part réduit à son seul aspect mathématique, constitue un bon support pour les raisonnements que nous avons décrits.

6. LA DIFFÉRENCE DE POTENTIEL

Une caractéristique de tous les raisonnements que nous avons évoqués est qu'ils se font en termes de courant au sens où nous avons défini plus haut cette «notion» multiforme qui tient lieu de concept. Le raisonnement est essentiellement monotionnel et, dans sa logique, la différence de potentiel est une grandeur non pertinente.

Néanmoins l'enseignement en fait grand usage et l'on pourrait se demander comment les élèves et les étudiants l'incorporent à leur système. La réponse à cette question se trouve dans la thèse de A. BENSEGHIR [9] trop complexe et trop riche pour être résumée ici mais dont nous extrayons le résultat suivant.

A propos de la situation reprise à la figure 8, l'auteur au cours d'entretiens, rappelle l'existence d'une différence de potentiel entre les bornes d'une résistance branchée aux pôles d'un générateur, pose les questions et obtient les réponses suivantes :

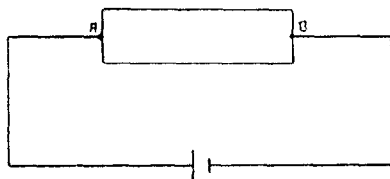


Figure 8

Quand on parle d'une d.d.p. qu'est-ce que cela évoque pour toi ?

— «Une différence de charges»

Comment peut-on expliquer ici l'inégalité des potentiels V_A et V_B ?

— «Ca vient du générateur. Il y aurait moins d'électrons en A qu'en B».

L'auteur poursuit son étude en utilisant de très nombreuses autres situations et conclut en écrivant notamment :

— «Le potentiel en un point est étroitement associé à la présence d'une charge en ce point».

— «La d.d.p. est associée à la dissymétrie de signe des charges (charges positives en un point, charges négatives en un autre) dans les situations d'électrostatique, et à la dissymétrie de quantité de charges (différence de densité locale instantanée des charges dynamiques) dans les situations d'électrocinétique».

— «L'attention est focalisée sur les pôles des générateurs considérés comme des points d'accumulation de charges».

Il parle à ce propos de raisonnement «électrostatique» et montre comment dans toute une série de situations celui-ci est aussi lié à un raisonnement séquentiel :

— «Pour un grand nombre d'élèves la d.d.p. n'est concevable qu'en deux points du circuit ayant un statut particulier au sens où il est permis d'admettre en ces points une «dissymétrie de signe ou de quantité des charges». La «dissymétrie apparaît comme l'effet de l'usure du courant par l'élément du circuit compris entre les points concernés».

Ici encore, l'enseignement de la différence de potentiel a été passé à la moulinette des structures cognitives des élèves et des étudiants. Le concept a été substantialisé et rendu compatible, entre autres, avec le raisonnement séquentiel.

7. CONCLUSION

Comme nous l'annonçons dans l'introduction, c'est avec ses outils cognitifs construits dès la plus jeune enfance que l'enfant aborde les réalités des phénomènes électriques. Il construit un système explicatif qu'il fait évoluer en fonction des informations nouvelles que lui communique son environnement, environnement qu'il interroge par ses manipulations. Dès le départ la causalité est linéaire et le restera pratiquement jusqu'en fin d'enseignement universitaire pour une majorité d'étudiants. Le raisonne-

ment évoluera en interaction avec l'enseignement mais seulement en y prenant ce qui est le plus compatible avec le raisonnement ancien au besoin en déformant le message. L'élève réalise toujours l'adaptation minimale nécessaire. Ainsi d'un modèle unipolaire, il passera à un modèle des courants antagonistes qui n'est jamais que le doublet du précédent. Il acceptera sans trop de difficulté un modèle circulatoire dès l'instant où l'usure du courant lui permet de rendre compte de l'alimentation de l'ampoule en énergie. Cette adaptation le conduira à raisonner séquentiellement abandonnant plus tard l'usure du courant, du moins en apparence, pourvu que la non influence de l'aval sur l'amont lui permette de conserver un raisonnement causal linéaire. Ce dernier subira une ultime adaptation sous la forme du raisonnement en courant constant qui n'impose pas la prise en compte du circuit en tant que système où tous les éléments interagissent l'un avec l'autre. Le raisonnement séquentiel, et d'une façon plus générale, le raisonnement causal linéaire, n'est pas le propre de l'électrocinétique : on le rencontre dans toute une série d'autres domaines et notamment en thermodynamique comme l'a montré S. ROZIER [10].

Enfin une autre tendance forte du raisonnement naturel des élèves et des étudiants est le substantialisme qui permet de substituer des «équivalents» concrets aux concepts les plus abstraits les intégrant ainsi dans le système explicatif pré-existant et ne remettant que rarement en cause son caractère monotonotiel.

RÉFÉRENCES

- [1] TIBERGHIE A. et DELACOTE G. (1976), Manipulations et représentations de circuits électriques simples par des enfants de 7 à 12 ans, *Rev. F. de Péd.* 34, pp. 32-44.
- [2] BENSEGHIR A. (1988), Formation des concepts d'électrocinétique : un point de vue historique, *Technologies, Idéologies, Pratiques*. Publication de l'Université de Provence, VII, 2, pp. 7-21.
- [3] AMPÈRE A.M. (1822), *Recueil d'observations électrodynamiques*.
- [4] JOSHAU S. et DUPIN J.J. (1987), Taking into account student conceptions in instructional strategy : an example in physics, *Cognition and instruction*, 4 (2), pp. 1217-135.
- [5] CLOSSET J.L. (1983), Le raisonnement séquentiel en électrocinétique, Thèse de 3ème cycle, Université Paris 7 (écrire à l'auteur).
- [6] JOHSUA S. (1982), L'utilisation du schéma en électrocinétique. Propositions pour l'introduction de la notion de potentiel en électrocinétique, Thèse de 3ème cycle, Université Marseille III.

- [7] CLOSSET J.L. (1983), D'où proviennent certaines «erreurs» rencontrées chez les élèves et les étudiants en électrocinétique ? Peut-on y remédier, B.U.P. n° 657, p. 81.
- [8] 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, Publication de l'Université de Provence, VII, 2, pp. 43-58.
- [9] BENSEGHIR A. (1989), Transition électrostatique-électrocinétique : point de vue historique et analyse des difficultés des élèves, Thèse, Université Paris VII (disponible au L.D.P.E.S.).
- [10] ROZIER S. (1988), Le raisonnement linéaire causal en thermodynamique classique élémentaire, Thèse, Université Paris VII (disponible au L.D.P.E.S.).