

D'où proviennent certaines "erreurs" rencontrées chez les élèves et les étudiants en électrocinétique ? Peut-on y remédier ?

par J.-L. CLOSSET,

L.D.P.E.S. Université Paris VII

Faculté des Sciences agronomiques de l'Etat
Gembloux (Belgique).

I. INTRODUCTION.

De nombreux travaux ont mis en évidence l'existence, en particulier en physique, de manières de raisonner des élèves et des étudiants à propos des concepts enseignés, différentes de celles des scientifiques. Ces raisonnements spontanés et largement intuitifs sont fréquemment en contradiction avec ceux du physicien mais possèdent le plus souvent une certaine structure et une relative stabilité.

Beaucoup d'erreurs rencontrées dans les copies ou au laboratoire de travaux pratiques, apparaissent très différemment à celui qui connaît le raisonnement spontané de ses élèves dans le champ conceptuel concerné : d'où l'intérêt de ces études. Elles ouvrent la porte à un autre regard sur les « erreurs » des élèves et des étudiants et elles permettent de suggérer une pratique différente prenant en compte l'existence de cette physique naturelle : nous y reviendrons.

En électrocinétique, quelques travaux ont été publiés dont nous citons des exemples en référence (1, 2, 3, 4). Personnellement, nous nous sommes gardés de faire l'étude d'un concept isolé préférant mettre au centre de nos préoccupations la façon dont les étudiants articulent ces concepts dans des raisonnements et les propriétés qu'ils leur attribuent selon le problème proposé. En effet, un concept ne se définit qu'à partir des relations qu'il a avec d'autres et ceci en fonction du problème traité. De ce point de vue, le terme de « représentation » souvent utilisé ne nous paraît pas clair et nous lui préférons celui de « raisonnement naturel ou spontané ».

Le Laboratoire de Didactique de la Physique dans l'Enseignement Supérieur (L.P.D.E.S.) de l'Université Paris-7 auquel

nous appartenons a fait, pour les raisons que nous venons de citer, le choix d'insister sur ces raisonnements. Une partie des travaux publiés qui concernent la mécanique (5, 6), mettent en évidence l'existence de raisonnements stables, présents dès le plus jeune âge, qui constituent une physique parallèle à la physique enseignée. C'est donc dans un sens « extra-scolaire » que les termes de « naturel et spontané » ont été alors employés. Cela paraît particulièrement justifié puisque c'est probablement du vécu de chacun et du besoin d'explication qu'il suscite que provient cette mécanique spontanée et largement intuitive. Elle possède un certain degré de cohérence interne, ce qui explique sa stabilité et son manque d'interférence avec l'enseignement des matières correspondantes.

L'électricité, par contre, garde pour l'élève un aspect mystérieux lié à l'absence d'une expérimentation directe. Contrairement à ce qui se passe en mécanique, le système explicatif pourrait se construire à l'occasion de l'enseignement et lui être plus sensible. C'est ce que nous montrons dans notre travail : d'où son intérêt particulier. Il suggère qu'un enseignement différent puisse peut-être mettre en place un système explicatif différent moins incompatible avec celui de la physique.

L'expérience d'un enseignement d'électrocinétique nous a confronté aux difficultés rencontrées par les étudiants et nous a conduit à nous interroger sur leur origine, d'abord à l'aide d'interviews pratiquées avec un petit nombre d'étudiants, puis de questionnaires de plus en plus précis présentés à des groupes d'environ 50 élèves ou étudiants tant dans l'enseignement secondaire que dans l'enseignement supérieur. Ce travail fait l'objet dès à présent d'un rapport de recherche interne disponible au L.D.P.E.S. (*).

Les résultats acquis montrent que le raisonnement intuitif est essentiellement local « en suivant le circuit » (ce qui se passe en aval n'influence pas l'amont) : nous l'avons baptisé « séquentiel ». Ce mode de raisonnement prend surtout naissance à l'occasion de l'introduction de la notion de courant, grandeur qui est privilégiée, par les élèves et par leurs professeurs, par rapport à celle de différence de potentiel. Ceci se traduit de façon spectaculaire aussi bien dans la manière d'interpréter la topologie des circuits que par le non-respect des lois élémentaires, telles que les lois de conservation de la charge ou de l'énergie. Les conséquences de ce raisonnement prennent des formes simples au début de l'enseignement, telle l'usure du courant le long du cir-

(*) L.D.P.E.S., Tour 23 C. 23-24 L 503 - 5^e étage. Université Paris 7. 2, place Jussieu, 75005 Paris.

cuit, pour se retrouver sous des formes plus subtiles en fin de cursus universitaire et même chez des physiciens de métier. Nous voudrions dans cet article donner un aperçu de ce travail, en présenter les résultats sous une forme immédiatement utilisable par les enseignants et suggérer d'éventuelles actions pédagogiques.

II. RAISONNEMENT SEQUENTIEL.

A propos du circuit repris en fig. 1, on pose la question suivante (*) :

a) Les ampoules du dessin ci-après sont toutes identiques. Ces ampoules vont-elles briller toutes de la même façon ? L'une ou l'autre va-t-elle briller différemment ? Si oui, laquelle ou lesquelles ?

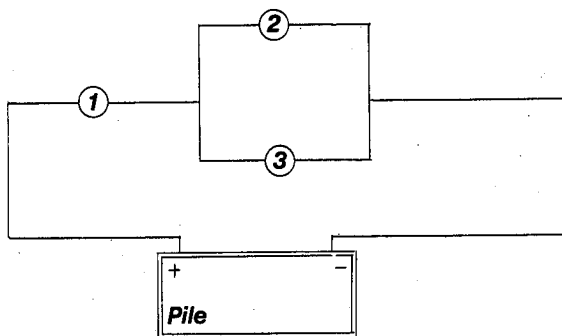


Fig. 1

On propose cette question en Belgique à des élèves en troisième année d'enseignement secondaire qui n'ont pas reçu d'enseignement d'électricité (Ens. sec. Début) et à des élèves en fin du même cursus qui ont reçu un enseignement d'électrocinétique (Ens. sec. Fin). On obtient les résultats présentés au tableau 1.

En début d'enseignement secondaire, la réponse majoritairement obtenue est « 1, 2 et 3 brillent de la même façon » avec des justifications du type suivant :

- « Raccordées à la même pile ».
- « Le brillage n'est pas dû au nombre d'ampoules, mais à la force du voltage ».

(*) Les questions qui sont présentées dans cet article ont été proposées toutes sous une forme plus complète aux élèves et aux étudiants. Il est possible de s'en procurer le texte original au L.D.P.E.S.

TABLEAU 1

I(A)	ENS. SECONDAIRE DEBUT	ENS. SECONDAIRE FIN
2 ET 3 MOINS FORT RÉPONSE CORRECTE	20	<u>72</u>
1,2 ET 3 PAREIL	<u>54</u>	12
CE TABLEAU NE DONNE QUE LES PRINCIPALES REPONSES OBTENUES; LES FREQUENCES SONT EXPRIMEES EN % POUR DES POPULATIONS D'ENVIRON 50 ELEVES.		

Les élèves ne tiennent aucun compte de la topologie détaillée du circuit, le raisonnement n'est pas lié à la circulation de quoi que ce soit : il est relativement global.

En fin d'enseignement secondaire, la réponse majoritairement obtenue est « 2 et 3 brillent moins fort que 1 » avec des justifications du type suivant :

— « Les ampoules 2 et 3 sont mises en parallèle : le courant doit se diviser en deux pour bifurquer vers la 3 et vers la 2 ».

L'effet de l'enseignement est manifeste et apparemment positif puisque la réponse obtenue est correcte. Observons cependant que le raisonnement est local (« le courant doit se diviser en deux pour bifurquer ») et lié à la circulation du courant. On ne retrouve dans les justificatifs quasiment aucune utilisation de la notion de différence de potentiel.

Ce mode de raisonnement va s'avérer moins efficace si on propose aux mêmes élèves les questions suivantes se rapportant au même circuit :

b) Je coupe les fils de part et d'autre de l'ampoule 3, je l'enlève et je ne mets rien à la place.

1) L'ampoule 2 va-t-elle briller aussi fort, plus fort ou moins fort qu'avant ?

2) L'ampoule 1 va-t-elle briller aussi fort, plus fort ou moins fort qu'avant ?

On obtient les réponses présentées au tableau 2.

TABLEAU 2		
I (B)	ENS. SECONDAIRE DEBUT	ENS. SECONDAIRE FIN
1 AUSSI FORT 2 AUSSI FORT QU'AVANT	<u>43</u>	20
2 PLUS FORT 1 AUSSI FORT QU'AVANT	9	<u>50</u>
1 PLUS FORT 2 PLUS FORT QU'AVANT	13	9
CE TABLEAU NE PRESENTE QUE LES PRINCIPALES REPONSES OBTENUES. LES FREQUENCES SONT EXPRIMEES EN % POUR DES POPULATIONS D'ENVIRON 50 ELEVES. LA REPOSE CORRECTE : "1 MOINS FORT, 2 PLUS FORT QU'AVANT" N'EST PAS REPRIS DANS CE TABLEAU; SA FREQUENCE EST TRES FAIBLE.		

En début d'enseignement secondaire, la réponse la plus fréquemment obtenue est « 1 et 2 aussi fort qu'avant » avec des justifications du type :

— « Même pile, même voltage ».

Le raisonnement reste global ; il conduit à une réponse incorrecte par manque d'information.

En fin d'enseignement secondaire, la réponse majoritaire est « 2 plus fort et 1 aussi fort qu'avant » avec des justifications du type :

— « Rien ne va changer pour l'ampoule 1 car elle n'est pas dans la division du circuit ; à son niveau, il n'y a aucun changement ».

- « Lorsque la 3 existait, le courant devait se partager pour aller à la 2 et à la 3 ».

Le raisonnement est local ; tout se passe comme si le courant était envoyé de la pile avec un débit constant et qu'il lui arrivait des aventures au fur et à mesure de sa progression le long du circuit. Il ne tient pas compte de la modification de la résistance du circuit qui, ici, a pour effet de réduire l'intensité du courant principal. Ce raisonnement conduit à une réponse incorrecte pour ce qui est de l'ampoule 1 et à une justification incomplète pour ce qui est de l'ampoule 2.

On peut objecter que le problème sera sans doute résolu par la suite. C'est pourquoi nous avons proposé la même question à 34 étudiants de maîtrise de Physique en France.

Nous avons obtenu 62 % de réponses du type dénoncé précédemment et seulement 26 % de réponses correctes dont la moitié étaient incomplètement justifiées. Nous avons notamment relevé les commentaires suivants à la question I b) 1. :

- « Tout le courant *initial* passera par 2, et 1 et 2 brilleront de la même façon »,
- et à la question I b) 2. :
- « L'intensité passant par l'ampoule 1 reste identique puisque la différence de potentiel imposée par la pile reste inchangée ».
- « Jusque 1, le courant circule sans se préoccuper des éléments du circuit qui forment le montage après ».
- « Le courant passant dans 1 n'est pas modifié lorsqu'on coupe le fil car il ne dépend pas de la forme du circuit après 1 ; il ne dépend que de la pile ».
- « Toujours pareil, la pile déchargeant toujours le même courant ».

Nous avons également proposé cette question I b) à quelques physiciens de métier parfaitement capables de fournir la réponse correcte. La simplicité de la question les a incités à raisonner spontanément et la majorité d'entre eux ont répondu comme la plupart des étudiants interrogés, c'est-à-dire, en faisant l'erreur attendue et en justifiant leur réponse par un raisonnement séquentiel.

Ce mode de pensée ne disparaît donc pas avec le niveau de formation. Ses manifestations, comme nous le verrons, peuvent être différentes.

Nous avons observé de façon beaucoup plus précise encore les manifestations de ce raisonnement séquentiel à l'occasion de

la question suivante (fig. 2) proposée à des élèves en fin d'enseignement secondaire.

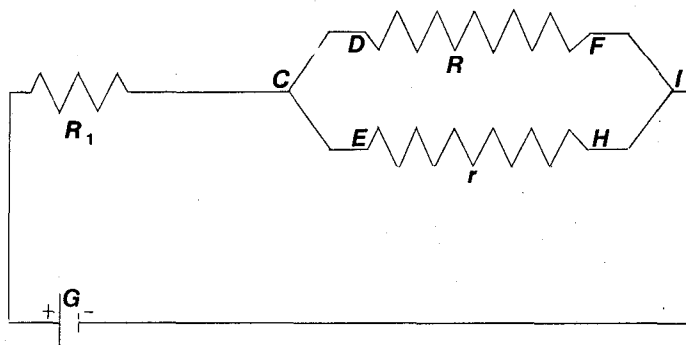


Fig. 2

G est un générateur de résistance interne négligeable. R_1 est une résistance quelconque. R et r sont des résistances ; R est plus grand que r .

a) L'intensité du courant dans la portion CD est-elle identique, plus grande ou plus petite que l'intensité du courant dans la portion CE ?

b) L'intensité du courant dans la portion FI est-elle identique, plus grande ou plus petite que l'intensité du courant dans la portion HI ?

Les réponses obtenues sont consignées dans le tableau 3.

TABLEAU 3	
CD = CE ET FI < HI	49
CD = CE ET FI = HI	22
CD < CE ET FI < HI (REPONSE CORRECTE)	15
CE TABLEAU NE FOURNIT QUE LES PRINCIPALES REPONSES OBTENUES. LES FREQUENCES SONT EXPRIMEES EN % POUR UNE POPULATION D'ENVIRON 50 ELEVES.	

Près de la moitié des élèves considèrent que les intensités dans les portions de branches « avant » les résistances ne sont pas influencées par celles-ci ; ce n'est qu'après passage dans ces résistances qu'elles sont modifiées. Notons que dans les 49 % indiqués, quelques élèves ont raisonné sur les électrons et obtiennent la réponse symétrique de celle indiquée. Le raisonnement est donc extrêmement local : tout se passe comme si au point C le courant ne « savait » pas qu'il existait plus loin des résistances différentes l'une de l'autre. Dès lors, il n'a aucune raison de se partager autrement qu'en deux parties égales. Les justifications sont du type suivant :

- « Le courant est réparti équitablement aussi bien dans la portion CD que dans la portion CE ».
- « Car le courant qui passe par R subit une perte en chaleur plus importante que dans r ».
- « C'est en sortant des résistances que les intensités auront changé ».

22 % des élèves ne tiennent aucun compte des résistances et 15 % répondent correctement. L'effet local des résistances observé chez la moitié des élèves était déjà présent dans les raisonnements rencontrés lors de la question précédente : sa manifestation était cependant plus subtile. Les résultats obtenus à l'occasion de la seconde question confirment l'interprétation que nous donnons des réponses à la première permettant ainsi de compléter une autre interprétation possible : dans toute relation ternaire telle que « $v = l/t$ » ou « $U = RI$ », une tendance naturelle est de figer l'une des variables et de lier la variation des deux autres. Ici, le choix de la variable figée n'est pas dû au hasard, il est bel et bien téléguidé par une forme spécifique de raisonnement.

Ce type de raisonnement qui fait intervenir l'usure du courant apparaît sous une forme encore plus nette dans le premier exercice d'une série que nous discuterons plus loin.

Cette question (fig. 3) a été proposée à des élèves de fin d'enseignement secondaire en Belgique et à des étudiants de seconde année de D.E.U.G. S.S.M. (*) en France ayant choisi une U.V. d'électronique (*).

a) R est une résistance quelconque. 1 et 2 sont des ampoules identiques.

L'ampoule 1 va-t-elle briller aussi fort, plus fort ou moins fort que l'ampoule 2 ?

(*) Correspond à une seconde année de premier cycle universitaire en sciences exactes avec un cours à option d'électronique (Unité de Valeur).

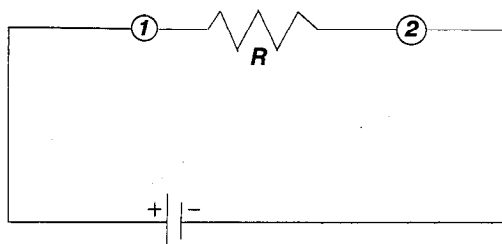


Fig. 3

b) On augmente la valeur de la résistance R .

1) L'ampoule 1 va-t-elle briller aussi fort, plus fort ou moins fort qu'avant ?

2) L'ampoule 2 va-t-elle briller aussi fort, plus fort ou moins fort qu'avant ?

Les réponses obtenues sont consignées dans le tableau 4.

TABLEAU 4		
III A ET B	ENS. SEC. FIN	U.V. ELECTRONIQUE
1 BRILLE PLUS FORT QUE 2 1 AUSSI FORT QU'AVANT 2 MOINS FORT QU'AVANT	51	11
1 AUSSI FORT QUE 2 1 AUSSI FORT QU'AVANT 2 AUSSI FORT QU'AVANT	15	7
1 AUSSI FORT QUE 2 1 MOINS FORT QU'AVANT (REPONSE CORRECTE) 2 MOINS FORT QU'AVANT	17	25
CE TABLEAU NE CONTIENT QUE LES PRINCIPALES REPONSES, LES FREQUENCES SONT EXPRIMEES EN % POUR DES POPULATIONS D'ENVIRON 40 ELEVES.		

Comme pour la question II., la réponse fournie par la moitié des élèves de fin de secondaire manifeste une usure du courant due aux résistances : leur action est locale. Les commentaires sont du type suivant :

- « 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 ».
- « 1 recevra plus d'électrons que 2 car R en aura retenu une certaine partie ».
- « La résistance n'influence pas 1 mais influence 2, donc 1 brillera aussi fort qu'avant ».

15 % des élèves ne tiennent pas compte de la résistance et 17 % répondent correctement. Ces résultats sont extrêmement voisins de ceux obtenus pour la même population lors de la question II. Celle-ci était cependant posée en termes d'intensité de courant alors que la question III. est proposée en termes de brillance d'ampoule. Le raisonnement est donc cohérent en termes d'intensité et en termes de brillance d'ampoule.

En U.V. d'électronique, le raisonnement séquentiel n'est plus présent qu'à raison de 11 % et 75 % des étudiants répondent correctement : le problème apparaît résolu.

III. LES SITUATIONS CHANGENT, LA FORME DU RAISONNEMENT RESTE.

Nous allons montrer que la difficulté surmontée par les étudiants d'U.V. d'électronique à l'occasion de la question III. ne l'est qu'en apparence. Nous proposons la question suivante (fig. 4) à une autre population du même groupe et à un groupe d'étudiants de maîtrise de physique :

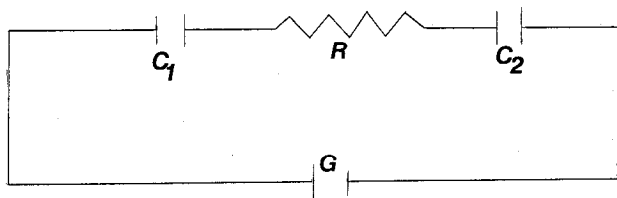


Fig. 4

a) C_1 et C_2 sont deux condensateurs identiques. R est une résistance.

G est un générateur dont la résistance interne est négligeable.

On ferme le circuit. Un des condensateurs sera-t-il chargé avant l'autre ? Pourquoi ?

Les réponses obtenues sont reprises dans le tableau 5.

TABLEAU 5		
IV	U.V. ELECTRONIQUE	MAITRISE
$C_{1(2)}$ AVANT $C_{2(1)}$	56	34
C_1 EN MEME TEMPS QUE C_2 (REONSE CORRECTE)	42	56
CE TABLEAU NE DONNE QUE LES PRINCIPAUX RESULTATS. LES FREQUENCES SONT EXPRIMEES EN % POUR DES POPULATIONS D'ENVIRON 40 ETUDIANTS.		

En U.V. d'électronique, 56 % des étudiants raisonnent séquentiellement alors qu'ils avaient dominé une difficulté du même ordre dans la question III. En maîtrise, il y a encore 34 % des étudiants qui pensent que le premier condensateur « dans le sens du courant » se chargera avant l'autre. Les justificatifs pour les deux populations sont du type suivant :

- « Le courant passe d'abord par C_1 et la résistance freine le courant ».
- « Le courant à la sortie de la résistance ne sera pas le même, il aura du mal à passer la résistance ».
- « C_1 en courant continu équivaut à un interrupteur, donc le courant n'atteindra pas R ni C_2 ».
- « Car le courant perd du temps dans la résistance ».

La réapparition du raisonnement séquentiel n'est pas spécifiquement liée à la nature de la question posée, par exemple à l'intervention de condensateurs, elle est tout à fait générale ; pour autant qu'on présente aux étudiants une situation non familière, le raisonnement naturel se manifeste. Les résultats obtenus à la question suivante (fig. 5) le montrent encore :

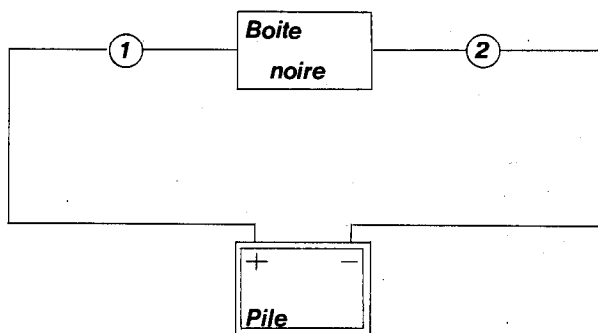


Fig. 5

1 et 2 sont deux ampoules identiques. La boîte noire cache une partie du circuit. La partie cachée du circuit, outre les 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 ou seulement pour un ou des circuits particuliers dans la boîte noire et dans ce cas, lesquels ?

Les réponses obtenues sont reprises dans le tableau 6. Les populations envisagées sont un groupe d'étudiants d'U.V. d'électronique en France (42) et un groupe d'étudiants ingénieurs de première candidature (83) (correspond à un premier D.E.U.G. en France) en Belgique, ayant reçu un enseignement d'électrocinétique.

Comme on peut le constater, 43 et 46 % des étudiants interrogés imposent des conditions sur le contenu de la boîte noire. Quelles qu'elles soient, elles sont incompatibles avec une conservation de la charge, loi par ailleurs connue des étudiants mais dont l'application au cas présent est oblitérée par la manifestation du raisonnement séquentiel tel qu'il apparaît dans les justifications :

- « Pas toujours le cas car la boîte noire peut renfermer un générateur, donc le courant sera différent à la sortie ».
- « Comme l'ampoule 2 brillera moins que l'ampoule 1, 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 ».
- « Si nous mettons une pile à la place de la boîte noire, 2 brillera plus fort que la lampe 1 ».

TABLEAU 6

TABLEAU 6						
QUESTION V			U.V. ELECTRONI.		ING.	
TOUJOURS LE CAS (REPOSE CORRECTE)			33		48	
CONDITIONS PORTANT SUR	PILES		29	43	19	46
	AMPOULES OU RESISTANCES		2		3	
	PILES ET AMPOULES		7		12	
	DIVERS		5		12	
CE TABLEAU NE FOURNIT QUE LES PRINCIPALES REPOSES. LES FREQUENCES SONT EXPRIMEES EN % DES POPULATIONS INTERROGEES SOIT RESPECTIVEMENT 42 ET 83 ETUDIANTS.						

— « Ce n'est jamais le cas s'il y a des résistances ou des ampoules (qui ont une résistance propre) dans la boîte noire ».

Il est cependant à remarquer que les conditions portent en majorité sur des éléments actifs (piles) susceptibles de « créer » localement du courant plutôt que sur des éléments passifs comme ceux évoqués lors des questions précédentes.

D'autres questions, qu'il serait trop long d'évoquer ici, manifestent les mêmes phénomènes ; l'apprentissage a familiarisé l'étudiant à certains cas, qui ne posent dès lors plus de problème, mais son mode de raisonnement naturel n'a pas changé.

IV. RAISONNEMENT INCOMPATIBLE AVEC UNE CONSERVATION DE L'ENERGIE.

A propos des circuits de la fig. 6, on propose, en Belgique, la question VI à quatre populations différentes : des élèves de l'enseignement secondaire n'ayant pas reçu d'enseignement d'électrocinétique (Ens. sec. Début), des élèves de l'enseignement secondaire ayant reçu un enseignement très élémentaire d'électricité (Ens. sec. Elém.), des élèves en fin d'enseignement secondaire (Ens. sec. Fin) et des étudiants de première candidature

(correspond à un premier D.E.U.G. S.N.V. en France) en Sciences agronomiques (*) n'ayant pas encore reçu d'enseignement d'électricité à ce niveau (première candi.).

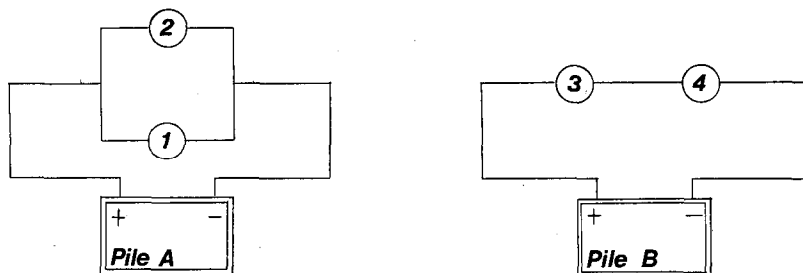


Fig. 6

a) Les ampoules et les piles des 2 dessins précédents sont toutes les mêmes. Certaines ampoules brilleront-elles plus fort que d'autres ? ou brilleront-elles toutes de la même manière ?

b) La pile B durera-t-elle plus longtemps que la pile A ? Ou sera-ce l'inverse ? Ou dureront-elles aussi longtemps l'une que l'autre ?

Quelques élèves ont répondu que l'ampoule 3 brillerait plus fort que l'ampoule 4 et que l'ampoule 1 brillerait comme l'ampoule 2. D'autres indiquent simplement que 1 et 2 brillent différemment de 3 et 4 sans autre précision. Certains ne répondent pas. Mais la grosse majorité indique que les ampoules 1 et 2 brillent plus, moins ou aussi fort que les ampoules 3 et 4.

Qu'il s'agisse de l'une ou de l'autre de ces trois dernières réponses, la plupart des élèves qui les ont proposées répondent à la partie b) de la question, indiquant si la pile A dure plus, moins ou aussi longtemps que la pile B. Pour ceux-là, on peut vérifier si les réponses aux deux parties de la question sont compatibles avec une conservation de l'énergie. Ainsi, par exemple l'étudiant qui répond que les ampoules 1 et 2 brillent plus fort que les ampoules 3 et 4, devrait aussi indiquer que la pile A s'use plus vite que la pile B. Les résultats de la comparaison des réponses aux deux parties de la question sont présentés dans le tableau 7. Les fréquences sont exprimées en pourcentage des feuilles utilisables.

(*) Ces étudiants n'ont pas reçu d'enseignement d'électricité au niveau universitaire. Ils constituent donc une population très voisine des élèves de fin de secondaire.

Comme on peut le constater, plus le niveau de formation est élevé, moins les réponses sont compatibles avec une conservation de l'énergie qui pourtant suffit à justifier la réponse à la seconde partie de la question.

TABLEAU 7				
QUESTION VI	ENS. SEC. DEBUT	ENS. SEC. ELEM.	ENS. SEC. FIN	1 ^{RE} CANDI
REPONSES COMPATIBLES AVEC UNE CONSERVATION DE L'ENERGIE.	90	82	55	56
REPONSES NON COMPATIBLES AVEC UNE CONSERVATION DE L'ENERGIE.	10	18	45	44
LES FREQUENCES SONT EXPRIMEES EN POURCENTAGE DES COPIES UTILISABLES.				

La signification de ce résultat n'est pas évidente ; il est en effet connu que la conservation de l'énergie est naturelle, aussi bien pour les enfants du début du secondaire que pour les étudiants de premier cycle universitaire. Nous allons montrer, en analysant les réponses fournies en début et en fin d'enseignement secondaire que c'est l'utilisation d'un raisonnement séquentiel lié à la topologie des circuits qui oblitère la capacité d'utiliser la conservation de l'énergie.

En effet, les enfants du début du secondaire ne tiennent absolument pas compte de la topologie détaillée des circuits et ne retiennent que l'existence, dans les deux cas, de deux ampoules et d'une pile, toutes identiques. Ils considèrent donc que les 4 ampoules brillent de la même manière et que les piles s'usent aussi vite l'une que l'autre.

Les justifications sont du type : « mêmes piles, mêmes ampoules » et quant à l'usure des piles « il y a chaque fois deux ampoules pour chaque pile ». Cette réponse incorrecte est néanmoins compatible avec une conservation de l'énergie.

En fin de secondaire, on ne retrouve plus que 17 % (copies utilisables) des élèves qui raisonnent encore ainsi. Les autres sont informés de l'importance du circuit et raisonnent en faisant la différence entre les deux topologies proposées. Ils constituent le reste des copies utilisables (83 %) et se répartissent en 28 % qui fournissent la réponse correcte aux deux questions (et ont donc des réponses compatibles avec la conservation de l'énergie), 10 % qui proposent une réponse incorrecte mais néanmoins respectant la conservation de l'énergie, et 45 % qui ont des réponses incompatibles avec une conservation de l'énergie. Ces derniers considèrent pour la plupart que la pile fournit du courant à débit constant et que celui-ci se partage entre les ampoules en parallèle (elles brillent donc moins fort) alors qu'il traverse les deux ampoules en série (elles brillent donc plus fort). L'usure de la pile est liée au courant : puisqu'il est fourni à débit constant et que les piles sont identiques, elles s'usent aussi vite l'une que l'autre.

Il se trouve que l'erreur introduite par le raisonnement séquentiel conduit à ne pas respecter la conservation de l'énergie. La non-utilisation de cette loi provoquée par un raisonnement local, constitue également une faute d'économie de raisonnement : la réponse à la seconde question est en effet immédiate par application de la conservation de l'énergie. Elle peut être aussi considérée comme une faute de contrôle puisque l'étudiant qui, dans un premier temps, avait choisi un raisonnement en termes de courant aurait pu vérifier la cohérence de ses réponses vis-à-vis de la loi évoquée. Le raisonnement en termes d'énergie est plus global, ce qui nous permet de faire remarquer encore une fois une préférence pour un raisonnement local qui doit sans doute se retrouver dans d'autres domaines.

Remarquons enfin que nous avons un bel exemple de ce que nous affirmions dans l'introduction au sujet de la non-pertinence des études portant sur un concept isolé. Il est sans grand intérêt de se demander si les élèves admettent la conservation de l'énergie dans l'absolu puisqu'on vient de montrer que cette notion est liée au problème dans le cadre duquel elle est envisagée. Il est donc non pertinent d'envisager des études qui postulent que les élèves ou les étudiants ont de l'énergie la même idée que le physicien ou au moins qu'ils peuvent isoler ce concept et définir les relations qu'il a avec d'autres.

Dans le raisonnement naturel, les concepts s'interpénètrent souvent et éventuellement d'une manière différente suivant le problème posé. Ainsi, dans notre travail, nous proposons une question dans l'énoncé de laquelle un calcul de la puissance utilisée dans le circuit est effectué et la valeur de l'intensité du

courant est donnée pour deux piles disposant d'une même réserve d'énergie sous des tensions différentes. Les étudiants préfèrent lier l'usure de la pile à la valeur de l'intensité du courant plutôt qu'à celle de la puissance consommée. Ce résultat s'observe encore de façon significative au niveau universitaire. Ainsi, le raisonnement naturel a chargé le courant d'une partie des propriétés de l'énergie sans pour autant lui enlever toutes les siennes : il y a interpénétration des concepts d'énergie et d'intensité de courant. Elle est liée au problème envisagé et ne pourrait évidemment pas se produire s'il n'était pas question de courant. Nous développerons ultérieurement ce point de vue.

V. APPLICATIONS PEDAGOGIQUES.

Confronté au problème du raisonnement séquentiel, il est légitime de s'interroger sur les remèdes à apporter. Disons tout de suite qu'il n'y a pas de solution miracle et que nous n'avons nullement l'intention d'être dogmatique dans le domaine. Nous voudrions simplement faire part au lecteur de quelques idées qui sont aussi celles de l'équipe à laquelle nous appartenons.

Nous pensons d'abord qu'il est essentiel d'informer les enseignants du raisonnement naturel de leurs élèves mais qu'il est aussi important d'informer les élèves de leur propre raisonnement. S'il n'est pas raisonnable de penser détruire le raisonnement naturel une fois celui-ci installé, il est par contre possible d'apprendre aux élèves et aux étudiants à s'en défier : pour cela, il faut qu'ils en prennent conscience. Il reste alors à proposer un raisonnement correct. Les questions que nous avons mises au point à des fins de recherche peuvent être utilisées dans ce cadre : nous l'avons expérimenté avec nos étudiants. Dans un premier temps, nous leur proposons la question qu'ils résolvent à titre d'exercice ; tout en leur laissant leur copie, nous indiquons le type de réponse incorrecte auquel nous nous attendons et leur expliquons quel type de raisonnement les y a sans doute conduits. Nous proposons ensuite une correction où nous explicitons un raisonnement plus global (en terme de différence de potentiel ou de conservation de l'énergie par exemple) où nous insistons sur l'interdépendance des phénomènes dans un circuit que nous opposons au raisonnement suivi par les étudiants. Les résultats constatés nous ont paru positifs.

Il nous paraît aussi important d'éviter dans l'enseignement tout ce qui renforce inutilement la tendance naturelle au raisonnement que nous avons dénoncé précédemment. Il en est ainsi de l'analogie hydraulique telle qu'elle est généralement pratiquée. On la rencontre le plus souvent sous deux formes. La première est la comparaison avec l'écoulement d'un fleuve souvent utilisée pour illustrer la séparation du courant entre deux branches du circuit en parallèle (fig. 7).

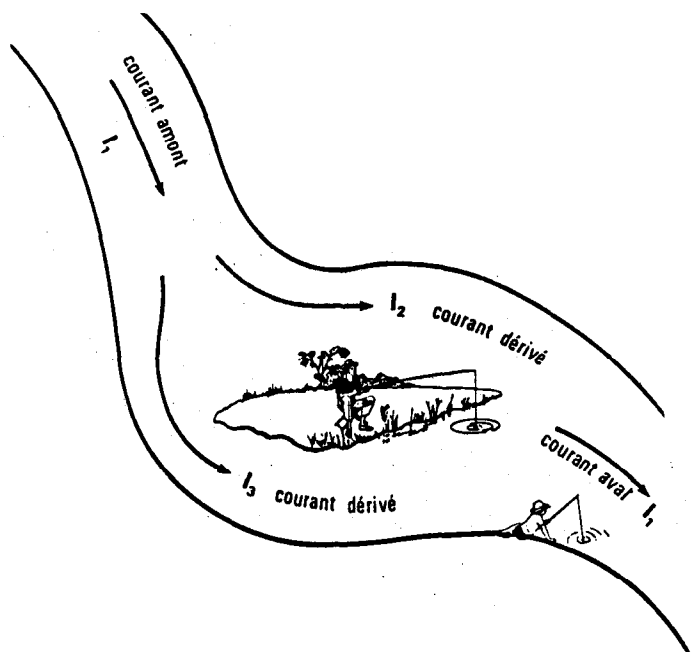


Fig. 7. — Tiré de « Sciences physiques », Eurin 2^e C.T., Hachette.

Elle correspond à l'enseignement d'une erreur qui consiste à penser que le courant arrive avec un débit constant et ne « sait » pas qu'il va devoir se partager.

Alors qu'il faudrait insister sur le fait que la présence d'une seconde branche en parallèle modifie la résistance du circuit et conditionne la valeur du courant dans la partie principale de celui-ci.

La seconde forme d'analogie hydraulique consiste à considérer un écoulement d'eau à partir d'un réservoir supérieur vers un réservoir inférieur en assimilant les différences de hauteur aux différences de potentiel. Elle renforce l'idée d'une pile « réserve de courant » le laissant s'écouler à débit constant.

Elle ne tient pas compte de la nécessité d'avoir un circuit fermé en régime permanent même si, comme le montre la fig. 8, certains auteurs complètent le système par une pompe assurant le remplissage du réservoir supérieur : cette fermeture du circuit n'apparaît pas comme nécessaire à la circulation du courant et n'assure pas l'image d'un mouvement d'ensemble des charges. De plus, cette analogie présente le potentiel comme une fonction

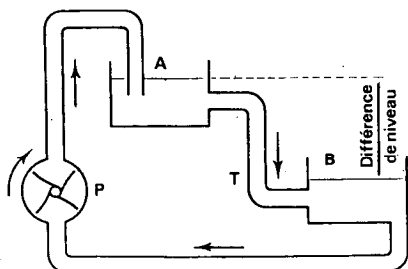


Fig. 8. — Tiré de « Physique », Fernand Nathan, 2^e C. et T.

de points, le potentiel gravifique étant fonction uniquement de l'endroit où on le mesure, alors que le potentiel en un point d'un circuit électrique et même la différence de potentiel aux bornes d'un élément d'un circuit est fonction de l'ensemble des éléments de ce circuit. De nouveau, c'est le caractère local de ces analogies qui est dangereux : il renforce la tendance au raisonnement séquentiel. Il vaudrait mieux utiliser des analogies compatibles avec le caractère global du circuit qui implique que ce qui se passe en un endroit de celui-ci l'influence en tous ses points et en dépend. C'est pourquoi nous préférons utiliser deux autres analogies. La première est également une analogie hydraulique, mais présentée horizontalement et en circuit fermé.

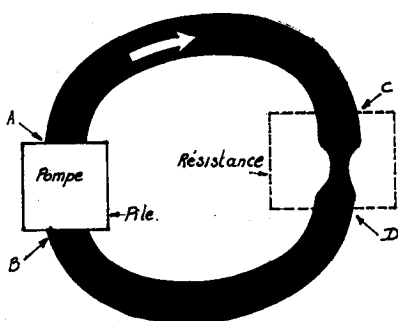


Fig. 9

Une pompe joue le rôle de la pile et applique une différence de pression au circuit. Des rétrécissements dans le circuit tiennent la place des ampoules ou des résistances (fig. 9). Cette

analogie permet de rendre compte de très nombreux aspects du circuit électrique mais elle a l'inconvénient de n'être pas accessible à tous les niveaux. Nous utilisons également une analogie plus simple mais d'une portée limitée poursuivant le seul but d'insister sur le caractère global du circuit. Il s'agit de l'analogie avec une chaîne de vélo (fig. 10).

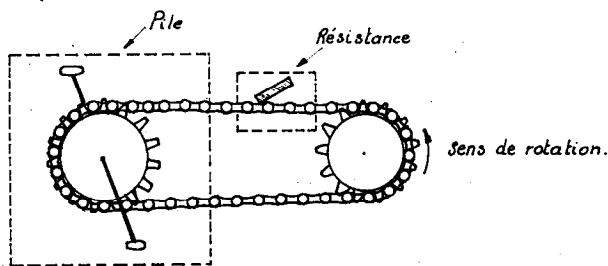


Fig. 10

L'objet frottant sur la chaîne provoque un frottement localement qui influence globalement le mouvement de tous les maillons. Elle permet d'expliquer ainsi que le circuit électrique n'est que la courroie de transmission de l'énergie. Nous avons constaté un vif intérêt des étudiants pour ce type d'analogie.

D'une façon plus générale, nous considérons que tout ce qui peut être fait pour insister sur le caractère global du circuit va dans le sens d'une atténuation de la tendance au raisonnement séquentiel ; nous pensons par exemple, aux raisonnements en termes de potentiel, de conservation de la charge et de conservation de l'énergie.

VI. CONCLUSIONS.

Nous avons présenté les types de réponses à quelques questions proposées à différentes populations d'élèves et d'étudiants. Elles manifestent les difficultés rencontrées par ceux-ci : chaque réponse erronée permet des interprétations qui pourraient diverger d'une question à l'autre mais l'ensemble des réponses obtenues impose une interprétation en termes de raisonnement local ou séquentiel. Les exemples que nous en avons donnés ne constituent qu'une partie de notre travail, les autres résultats obtenus confirment cette interprétation (*).

Les conséquences de ce mode de raisonnement sont importantes ; il conduit à des réponses incompatibles avec des lois

(*) Voir rapport interne.

simples comme la conservation de la charge et de l'énergie ; il justifie beaucoup d'erreurs rencontrées dans les copies. Nous pensons également qu'il est responsable d'erreurs liées à des topologies différentes de circuits. Nous montrons encore dans notre travail que le courant apparaît comme chargé de propriétés qui sont celles de l'énergie, ce qui explique qu'il se trouve affaibli après passage dans une résistance (*).

Les effets de ce raisonnement séquentiel peuvent, dans des cas particuliers, s'estomper au cours du cursus scolaire mais le raisonnement lui-même ne disparaît pas : on le retrouve dans des situations nouvelles, moins familières pour l'étudiant ou le physicien (*).

Nous avons aussi constaté, dans quelques cas, que des personnes ayant une formation technique ont tendance à raisonner davantage en termes de différence de potentiel plutôt qu'en termes de courant. Elles évitent ainsi les pièges du raisonnement séquentiel en raisonnant plus globalement sur le circuit. Une investigation menée dans l'enseignement technique devrait nous éclairer à ce sujet. Si le résultat se confirme, il constituerait une bonne indication pédagogique quant à l'enseignement de l'électricité.

Nous pensons, d'ores et déjà, que ce mode de raisonnement différent pourrait être lié à une plus grande pratique expérimentale et technique et nous croyons qu'une plus grande pratique de l'électricité au laboratoire serait une manière de remédier partiellement aux difficultés que nous dénonçons.

Enfin, nous avons montré que le raisonnement séquentiel s'établissait surtout à l'occasion de l'introduction de la notion de courant. Nous pensons qu'une introduction différente de l'électricité pourrait mettre en place un raisonnement naturel différent, plus compatible avec celui du physicien. En particulier, nous croyons qu'il conviendrait d'insister sur le caractère global des phénomènes électriques dans les circuits et que des présentations en termes d'énergie parallèlement à l'introduction de la notion de courant et de différence de potentiel favoriserait cela.

L'analogie de la chaîne de vélo pourrait être utilisée dans ce cadre. Une plus grande pratique manipulative, tout particulièrement en début d'enseignement, devrait favoriser une meilleure assimilation des concepts, encore faudrait-il que ces manipulations soient construites en fonction du but poursuivi. Les questions que nous avons mises au point pour la réalisation de notre enquête, transformées en manipulations, pourraient en être un exemple.

(*) Voir rapport interne.

Une fois l'introduction des concepts réalisée dans ces conditions, il resterait cependant à garder le souci permanent d'un raisonnement global qui est adapté à la réalité physique du circuit alors que le raisonnement local ne correspond qu'à une plus grande facilité de description. Nous craignons en effet que le raisonnement séquentiel ne réapparaisse malgré tout sous une forme plus évoluée, car nous pensons que l'introduction des notions de courant et de circuit n'est que l'occasion de l'apparition de cette forme de pensée. Elle doit être très probablement liée à des schèmes disponibles avant l'enseignement et vis-à-vis desquels celui-ci ne sert que de catalyseur si toutes les précautions ne sont pas prises.

VII. REMERCIEMENTS.

Nous tenons, en terminant, à adresser nos plus vifs remerciements à Madame Laurence VIENNOT pour l'aide efficace qu'elle nous a apportée tout au long de cette recherche et pour les remarques qu'elle a bien voulu nous faire lors de la rédaction de cet article.

REFERENCES

1. A.-H. JOHNSTONE and A.-R. MUGHOL. — *The concept of electrical resistance*. Phys. Educ. Vol. 13 n° 1, p. 46-49 (1978).
 2. A. TIBERGHIEU et G. DELACÔTE. — *Manipulations et représentations de circuits électriques simples par des enfants de 7 à 12 ans*. Revue Française de pédagogie n° 34, p. 32-44 (1976).
 3. D.-J. WILKINSON. — *A study of the development of the concept of flow with reference to the introduction of electric current in the early years of the secondary school*. Thèse University of Leeds (1973).
 4. R.-J. OSBORNE and J.-K. GILBERT. — *An approach to student understanding of basic concepts in science*. Guilford : I.E.T., University of Surrey (1979).
 5. E. SALTIEL, J.-L. MALGRANGE. — *Les raisonnements naturels en cinématique élémentaire*. B.U.P. n° 616, p. 1325-1355 (1979).
 6. L. VIENNOT. — *Intuition et formalisme en dynamique élémentaire*. B.U.P. n° 587, p. 49-84 (1976).
-