

Les erreurs en électrocinétique : identification et essai d'analyse

par M. ALLEVAR, R. CARRON, D. MARTIN
Lycée la Martinière, Monplaisir, 69008 Lyon

A.-M. COLONNA, Lycée M. Sambat, 69694 Venissieux Cedex

E. MARQUIS, Lycée S. Weil, B.P. 54, 42272 St Priest-en-Jarez Cedex

G. TOURNIER, Lycée J. Brel, 69694 Venissieux Cedex

B. CHAMPAGNON, B. TRIBOLLET
Université Lyon-I bât. 205, Campus de la Doua,
69622 Villeurbanne Cedex

Cet article est le fruit d'un travail collectif réalisé dans le cadre du stage D1215 organisé à l'Université Claude-Bernard Lyon I pour la Mission Académique à la Formation des Personnels de l'Éducation Nationale (M.A.F.P.E.N.). Ce stage a regroupé pendant 6 jours en 1987, 7 enseignants du secondaire et 2 enseignants de l'Université Lyon I en tant qu'animateurs.

Le point de départ de ce travail nous a été fourni par les recherches de J.L. Closset [1], [2]. S. Joshua [3], J.J. Dupin et S. Joshua [4], [5]. Ces auteurs se sont intéressés aux difficultés des élèves en électrocinétique en s'attachant plus particulièrement aux erreurs dues au raisonnement séquentiel et aux représentations (nous explicitons plus loin aux paragraphes 4 et 5 ces deux notions). Les résultats obtenus sur diverses populations de tous niveaux scolaires et universitaires montrent une permanence de certains types de raisonnement erronés qui n'évoluent que très lentement avec le niveau de l'enseignement. Le «niveau» des questions posées par ces auteurs nous a semblé tellement «élémentaire» que nous avons douté de la pertinence de leurs résultats ! Nos élèves ou nos étudiants commettraient-ils les mêmes erreurs ?

Paradoxalement l'électrocinétique n'est pas ressentie comme une partie de la physique très difficile contrairement à la mécanique par exemple. L'expression mathématique des lois du courant continu résumée à « $U = R I$ » permet assez souvent de «s'en sortir» dans les problèmes. Mais lorsqu'on fait intervenir des questions dans lesquelles

la part du raisonnement est plus importante on s'aperçoit que certaines notions sont incomprises : la notion de tension par exemple est beaucoup moins bien assimilée que la notion de courant ce qui conduit, de fait, les élèves à raisonner en courant et à n'introduire la notion de tension que par l'intermédiaire du «sésame» de la loi d'Ohm.

Dans ce travail notre objectif a été de rechercher quelles sont les notions de base qui provoquent des erreurs en électrocinétique. Nous avons choisi de bâtir des exercices très simples dans lesquels ces notions de base apparaissent les plus dépouillées possibles pour essayer d'interpréter les erreurs des élèves dans des exercices plus compliqués. L'analyse des réponses des élèves en classant les types d'erreurs a ensuite été effectuée. Certains des tests proposés nécessiteraient des modifications que nous indiquons ; nous pensons en effet que d'autres enseignants peuvent à leur tour utiliser ces tests pour détecter les erreurs commises par leurs élèves. Dans l'esprit des auteurs de ce travail ces tests ne sont pas destinés à classer les élèves en «bons» ou «mauvais» mais à mettre en évidence le fait que des notions que nous croyions être des notions élémentaires ne sont pas acquises. L'enseignant doit alors en tenir compte s'il veut construire une didactique adaptée à son public.

Les tests que nous proposons sont reliés aux notions de courant-tension, algébrisation de la loi d'Ohm, association de résistors, raisonnement séquentiel et notion de générateur de tension ; **voir les énoncés des tests en fin d'article**. Ils ont été proposés à 182 élèves de 6 classes de seconde de différents lycées de l'académie dans des filières classiques ou techniques après l'enseignement d'électricité. La durée du test était de 45 minutes à 1 heure 15 selon les classes. Dans le but de comparer l'évolution de ces connaissances ces mêmes tests ont été proposés à 15 étudiants de DEUG 2^{ème} année. Ce test anonyme a été réalisé dans ce cas en une vingtaine de minutes ; les étudiants n'ont pas répondu à toutes les questions et ont moins pris au sérieux ce test. Leurs réponses sont toutefois intéressantes car elles sont le reflet spontané de leur représentation de l'électrocinétique.

Dans ce qui suit nous analyserons chacun des tests proposés en donnant notre interprétation des erreurs rencontrées.

1. CIRCUIT SÉRIE SIMPLE - TENSIONS/COURANT (test 1)

Ce test consiste à définir le courant et la tension en plusieurs points

d'un circuit série, ouvert ou fermé. Nous avons relevé 3 types d'erreurs caractéristiques (l'ambiguïté éventuelle sur la notion d'interrupteur ouvert ou fermé étant supprimée par le schéma).

1.1. Tension aux bornes d'un interrupteur

Cette notion est celle responsable du plus grand nombre d'erreurs 76% des élèves de seconde de notre enquête pensent qu'il existe une tension nulle aux bornes d'un interrupteur ouvert ($U_{DE} = 0$ circuit 1) et 66% que cette tension est différente de zéro lorsque l'interrupteur est fermé ($U_{DE} \neq 0$ circuit 2). Ces pourcentages sont cohérents avec ceux correspondants à l'erreur qui consiste à indiquer une tension non nulle aux bornes d'un court-circuit (73% donnent U_{AB} ou U_{CD} ou $U_{EF} \neq 0$ circuit 1 ou 2). Ces mêmes questions posées aux étudiants de deuxième année d'université montre la persistance de ces erreurs de manière significative. Il est alors aisé de comprendre pourquoi l'explication du transistor en commutation en utilisant une analogie avec un interrupteur rencontre aussi des difficultés (cette explication est utilisée en DEUG par exemple).

Il s'agit dans ce cas d'une notion élémentaire, supposée acquise depuis le premier cycle des collèges, sur laquelle on revient rarement au lycée. Le remède semble relativement simple puisque la démonstration expérimentale est aisée à réaliser. Mais des enseignants ayant fait mesurer ces tensions aux bornes d'un interrupteur ont vu des réactions paradoxales : des élèves persuadés du résultat corrigeaient leurs mesures expérimentales pour être en accord avec ce qu'ils croyaient être la bonne réponse. Pour combattre cette erreur il faut donc probablement plus qu'une expérience rapidement réalisée : il faut que cela consitue un objectif explicite que les enseignants traitent comme tel puis évaluent [6], [7], [8].

1.2. Intensité du courant dans un circuit série

La continuité du courant tout au long d'un circuit série est enseignée très tôt. Cependant les tests montrent que 37% des élèves indiquent deux intensités différentes dans deux portions au moins du circuit série fermé. Un nombre encore plus important trouve une intensité de courant dans l'une au moins des portions du circuit série ouvert. Un cas typique est celui du courant qui circule dans la lampe et s'arrête aux bornes de l'interrupteur : ($i_{BC} \neq 0$, $i_{DC} \neq 0$ et $i_{EF} = 0$ circuit 1).

Cette erreur relève aussi de la catégorie «Raisonnement séquentiel» que nous analyserons au paragraphe 4.

Notre surprise est ici venue du fait que la notion de continuité du courant dans un circuit semble facilement acquise dans le premier cycle. En fait il n'en est rien pour près de la moitié des élèves (46% trouvent également une tension non nulle aux bornes de l'ampoule en circuit ouvert : $U_{BC} \neq 0$ circuit 1). La confusion courant-tension qui apparaît aussi dans le mélange des unités (14% des cas) est probablement une cause de ces erreurs.

1.3. Signe de la tension

Le signe de la tension provoque 82% d'erreurs dans l'exercice n° 1 (réponse $U_{FA} \neq -4,5 \text{ V}$) ; le test suivant portant exclusivement sur l'algèbrisation nous permet de mieux analyser ces réponses.

2. LOI D'OHM ALGÈBRIQUE (test 2)

L'algèbrisation de la tension est connue pour provoquer de nombreuses erreurs et est souvent ressentie comme la «bête noire» des élèves du secondaire en ce qui concerne l'électrocinétique. Les questions de notre test portaient donc sur la valeur algébrique des tensions et leur fléchage dans une portion de circuit simple. Le fléchage consiste à tracer la flèche correspondant à la tension indiquée avec la convention qui fait aller la flèche de B vers A quand on écrit U_{AB} .

A l'analyse, l'exercice qui consiste à déterminer la valeur algébrique de la tension dans la portion de circuit comportant un seul résistor avec un courant de sens donné fait apparaître 65% d'erreurs chez les élèves de seconde et pratiquement autant chez les étudiants de DEUG. La réponse n'est considérée comme bonne que si l'élève a donné la bonne réponse pour les quatre exercices proposés. Le fléchage des tensions qui est un moyen d'obtenir le signe de la tension est encore plus mal réalisé puisqu'il conduit à 82% d'erreurs. Cette différence montre bien que l'outil « fléchage » n'est pas utilisé par certains élèves qui répondent cependant correctement pour le signe des tensions. Les discussions entre les enseignants membre du groupe ont montré qu'un bon nombre d'entre-eux parvenaient aussi au résultat correct sans utiliser le fléchage.

Cette non-compréhension de la valeur algébrique a probablement son origine dans la méthode de présentation par les «conventions générateurs» et «conventions récepteurs» (livre Delagrave classe de seconde par exemple). Elles font croire à l'élève qu'il y a plusieurs choix arbitraires contradictoires alors qu'une fois choisie la tension à déterminer U_{AB} ou U_{BA} et l'orientation du conducteur de A vers B le fléchage permet de donner une représentation correcte de l'algébrisation (figure 1) (livres de la collection Niart par exemple).

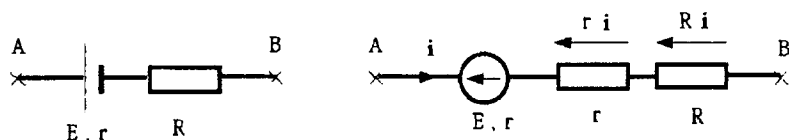


Figure 1

Des difficultés peuvent cependant encore exister dans le cas de récepteurs non polarisés [9] mais son incidence pratique est très faible et ne justifie pas que l'on complique le problème ! Les élèves de l'enseignement technique ayant suivis l'approche de la figure 1 de l'algébrisation ont eu un pourcentage d'erreurs significativement plus faible pour cette question (30% d'erreurs)

Une autre difficulté est liée à la notation U_{AB} pour la tension puisque $U_{AB} = U_A - U_B$ est représenté par un vecteur ayant son extrémité en A et son origine en B. Cette notation est l'opposé de la notation vectorielle AB correspondant à un vecteur dont l'origine est en A et l'extrémité en B. Cette confusion peut-être la source de nombreuses erreurs et nous pensons qu'une notation explicite $U_A - U_B$ est préférable même si la notion de potentiel n'a pas été introduite.

En conclusion de ce test, nous avons obtenu la confirmation de la complexité des problèmes liés à l'algébrisation, un premier pas dans la bonne direction serait la normalisation des présentations entre les différents livres et entre les différents enseignants...

3. ASSOCIATION DE RÉSISTORS (test 3)

Les exercices proposés relatifs à l'association de résistors ont fait apparaître une bonne connaissance de la relation $1/R_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2$ pour des résistors en dérivation (17% d'erreurs). Par contre le fait de

reconnaître sur un schéma si des résistors sont en dérivation ou en série, ce que nous appelons erreurs dues à la disposition géométrique (ou topologique) et au langage, provoque 64% d'échecs. Ce résultat a été obtenu en recherchant les élèves qui ont calculé correctement R_{AB} pour le circuit 1 et qui se sont trompés dans le cas du circuit 2 alors qu'il n'existe qu'une différence dans la représentation géométrique des circuits. Ce problème de topologie n'est que très rarement exposé et peut apparaître comme un piège. En effet la standardisation des représentations des résistors «en parallèle» effectivement disposés parallèlement sur 2 horizontales ou 2 verticales conduit à une non reconnaissance de la notion physique de résistors en dérivation. Dans le cas général il nous semble qu'un objectif spécifique de cette partie du programme pourrait être de rendre les élèves capables de reconnaître si des résistors sont effectivement en dérivation même si cette notion ne coïncide pas avec le parallélisme des représentations géométriques. Par exemple on peut demander de calculer la résistance équivalente entre A et B des 2 circuits de la figure 2

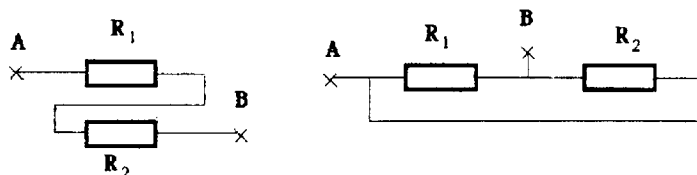


Figure 2

Une seconde erreur très fréquente dans ces tests (61%) est la réponse $R_{AC} = R$ pour chacun des 3 circuits du test 3. Cette réponse que nous avons d'abord appelée «raisonnement du plus court chemin» consiste à choisir la branche la plus directe pour aller d'un point à un autre sans considération du reste de la maille. Cette erreur est encore présente chez la moitié des étudiants du DEUG. Il y a donc là une évidence que la notion de résistor équivalent n'est pas comprise ; cette erreur se différencie à notre avis de l'erreur précédente car la disposition géométrique des circuits 1 et 2 fait apparaître des résistors parallèles au résistor entre A et C. Une explication de ce type d'erreur pourrait être la confusion résistance-tension que quelques élèves font explicitement en fléchant ces circuits dans le but de calculer R. Cette explication demande cependant d'être vérifiée soit avec de nouveaux tests soit en demandant aux élèves de justifier leurs réponses.

Ces questions sur l'association de résistances montrent qu'au delà de la formule assez souvent connue correctement d'autres causes

d'erreurs, disposition géométrique du circuit, utilisation des expressions «résistors en parallèle», choix du plus court chemin pour le résistor équivalent, interviennent. Un enseignement correct de ces notions est cependant indispensable pour d'autres applications : pont de Wheatstone, étude des filtres par exemple.

4. RAISONNEMENT SÉQUENTIEL (test 4)

Ce type de raisonnement a fait l'objet de la thèse de J.L. Closset [1] et de différents articles de ce même auteur [2]. Il désigne ainsi un type de raisonnement intuitif, essentiellement local, où l'on suit le circuit comme un fleuve de sa source à l'embouchure et où l'aval n'influence pas l'amont. Nous avons constaté sur un des exemples donné par J.L. Closset la concordance de nos résultats avec les siens bien qu'il y eu au départ dans notre groupe une bonne dose d'incrédulité ! Les 3 questions du test posé ont été analysées en classant dans la colonne «raisonnement séquentiel complet» les élèves qui ont fait un raisonnement faux mais cohérent pour les 3 questions (L_1 brille plus fort que L_2 dans le premier cas, aussi fort qu'avant lorsqu'on augmente R alors que L_2 brille moins fort). 35% des élèves font donc un raisonnement séquentiel complet avec un pourcentage comparable chez les étudiants de DEUG.

L'étude de J.L. Closset montre les liaisons de ce raisonnement avec les analogies hydrauliques ainsi que sa présence à tous les niveaux d'étude. Nous renvoyons le lecteur à ce travail très détaillé pour «en savoir plus».

Deux points nouveaux semblent cependant pouvoir se dégager de nos résultats :

- d'une part le raisonnement séquentiel complet est relativement plus fort dans certaines «bonnes classes». Nous expliquons cela par le fait que ce sont des élèves qui sont le plus capables de maîtriser un type de raisonnement pour le mener jusqu'au bout, fut-il erroné. La dispersion du pourcentage des élèves effectuant un tel raisonnement, allant suivant les classes de 4% à 75%, est d'ailleurs très importante.
- d'autre part un petit nombre d'élèves (6%) donnent des réponses qui correspondent à un raisonnement séquentiel mais avec un sens opposé du courant (celui du sens réel des électrons). Leur nombre est probablement à rajouter à celui des adeptes du raisonnement séquentiel.

5. LA PILE VUE COMME UN GÉNÉRATEUR DE COURANT (test 5)

Le dernier test (test 5) est tiré du travail de S. Joshua [3]. La question est moins aisée à dépouiller car seule la réponse à la troisième question révèle véritablement la notion de générateur de courant (l'intensité mesurée par l'ampèremètre dans le circuit 2 est aussi forte que dans le circuit 1). La précision statistique du pourcentage obtenu en cochant 1 case sur 3 est alors moindre ; cependant 55% de réponses de ce type parmi les 75% de réponses fausses à cette troisième question indiquent une grande prééminence du raisonnement «pile = générateur de courant» ; un pourcentage équivalent est retrouvé en DEUG. En fait cette notion fausse semble coexister avec celle, exacte, de «pile = générateur de tension», si on s'en réfère aux 35% de réponses fausses à la première question. Il y a donc beaucoup d'élèves qui passent de l'une à l'autre des représentations suivant la manière dont est posée la question.

Nous nous sommes alors demandé s'il ne fallait pas enseigner la notion de générateur de courant. C'est une connaissance de base qui est plus difficile à enseigner que le générateur de tension ; mais cette difficulté se retrouve à l'Université avec le générateur de Norton. Cependant cette notion semble présente de manière confuse chez tous les élèves, ne vaut-il pas mieux l'explicitier ?

Nous n'avons pas tranché sur cette question, disons simplement, pour répondre à l'objection que les générateurs de courant ne sont pas disponibles en salle de travaux pratiques, que les multimètres numériques sur leurs calibres «ohmmètre» sont de bons générateurs de courant dans la gamme du calibre affiché et dont on peut connaître le courant I_0 . De même une pile en série avec un résistor de forte valeur ($> 1 \text{ M}\Omega$) constitue également une bonne approximation du générateur de courant de quelques microampères ; il est nécessaire dans ce cas d'enfermer pile et résistor dans une «boîte noire» si l'on ne veut pas désorienter les élèves !

6. CONCLUSION

En conclusion notre travail a montré que des notions dites élémentaires n'étaient pas assimilées (tension aux bornes d'un interrupteur, résistors en dérivation par exemple). Nous avons également essayé de comprendre quels mécanismes sont mis en jeu dans certaines erreurs

révélatrices, soit d'une mauvaise compréhension du phénomène physique (raisonnement séquentiel), soit d'une difficulté liée au langage (résistance «en parallèles»). Détecter ces erreurs est une démarche importante : dans certains cas des objectifs peuvent être définis permettant de corriger ces erreurs (test 1, 3) ; dans d'autres cas des modifications dans la présentation de l'enseignement sont à envisager (test 2, 4, 5) y compris à d'autres niveaux que ceux auxquels se sont adressés ces tests : il est en effet nécessaire dès la 6^{ème} d'éviter toute explication pouvant renforcer le raisonnement séquentiel.

La comparaison des erreurs à différents niveaux d'étude a montré leurs persistances d'un cycle à l'autre. Il peut y avoir alors blocage à un niveau supérieur si l'élève n'a pas acquis ces contenus aux contours flous que l'on désigne par «connaissance élémentaires».

Ce travail n'a probablement pas cerné toutes les difficultés de l'électrocinétique. Nous pensons qu'il peut cependant être utile aux enseignants pour évaluer où en sont leurs élèves par rapport à ces question fondamentales. Nous n'avons pas proposé de solutions aux différents problèmes ; ceci impliquerait une expérimentation beaucoup plus longue où différentes approches seraient testées : seul le suivi des élèves sur plusieurs années pourraient indiquer si les objectifs ont été atteints. La sensibilisation des enseignants à ces difficultés nous paraît cependant constituer une étape préalable très importante.

Nous remercions A. Boyrivent pour ses remarques qui ont permis de nombreuses améliorations du manuscrit.

BIBLIOGRAPHIE

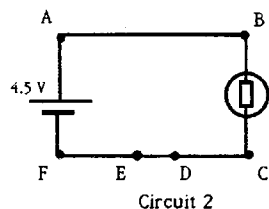
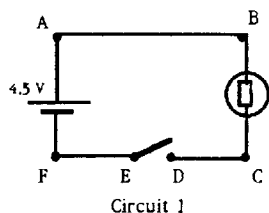
- [1] J. L. CLOSSET «Le raisonnement séquentiel en électrocinétique» Thèse de 3^{ème} Cycle, Université Paris VII (1983).
- [2] J. L. CLOSSET «D'où proviennent certaines erreurs rencontrées chez les élèves et les étudiants en électrocinétique ?» Bulletin de l'Union des Physiciens **657**, 81 (1983)*

* Le lecteur pourra se reporter également à l'article de J. L. Closset (B.U.P. n° 716 de juillet 1989, page 931) qui n'avait pas été publié quand le présent article a été proposé en avril 1988. (N.d.R.).

- [3] S. JOHSUA «Contribution à la délimitation du contraint et du possible dans l'enseignement de la Physique» (Essai de didactique expérimentale) Thèse d'État Université Aix-Marseille II, (1985).
- [4] J. J. DUPIN et S. JOHSUA «L'électrocinétique du Collège à l'Université» Bull. des Phys. **683**. 779 (1985).
- [5] J. J. DUPIN et S. JOHSUA Bull. de la Société Française de Physique, supplément pédagogique, **58** 171 (1985).
- [6] D. HAMELINE «Les objectifs pédagogiques en formation initiale et continue» Éditions E.S.F. Paris (1979).
- [7] R. MAGER «Comment définir les objectifs pédagogiques ?» Gauthiers-Villars Paris (1972).
- [8] M. CHASTRETTE, J. CHAUCHARD M-A et CH. MICHOU-SAUCET « La technique des objectifs pédagogiques». L'approche par les objectifs pédagogiques, Éducation Permanente **85**, 125, 135 (1986).
- [9] J. RZEPKA «Histoires d'Ohms...» Bull. de l'Union des Phys. **627**, 25 (1981).

TEST 1 : NOTION DE COURANT/TENSION

Compléter le tableau ci-dessous pour les circuits 1 et 2 :



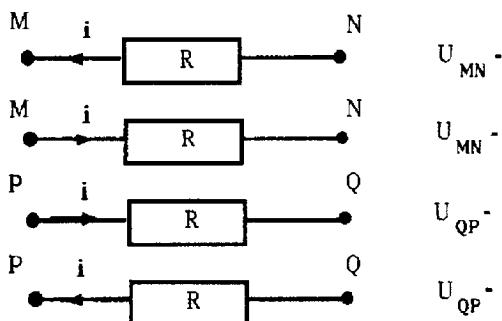
Circuit 1	Circuit 2
U_{AB}	
U_{BC}	
U_{CD}	
U_{DE}	
U_{EF}	
U_{FA}	
I_{AB}	
I_{BC}	
I_{CD}	
I_{DE}	
I_{EF}	
I_{FA}	

Fréquence des erreurs rencontrées :

	Seconde	Deug
Tension nulle aux bornes d'un interrupteur ouvert	76 %	3/15
Tension non nulle aux bornes d'un interrupteur fermé	66 %	4/15
Tension non nulle aux bornes d'un court-circuit	73 %	6/15
Confusion des unités courant / tension	14 %	0/15
Signe de la tension U_{FA}	82 %	10/15
Courant non nul dans un circuit ouvert	49 %	2/15
Courants différents dans différentes portions d'un circuit série	37 %	5/15
Tension non nulle aux bornes de la lampe (circuit 1)	46 %	3/15
Toutes réponses exactes	1 %	0/15

TEST 2 : LOI D'OHM ALGÈBRE

Fléchez et donnez l'expression des tensions :

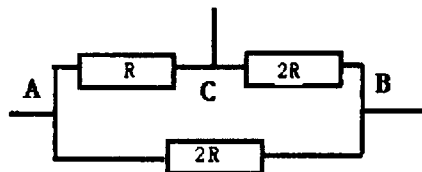
**Fréquence des erreurs rencontrées :**

	Seconde	Deug
Une erreur au moins dans les valeurs algébriques	65 %	6/11
Fléchage incorrect ou pas de fléchage	82 %	6/8

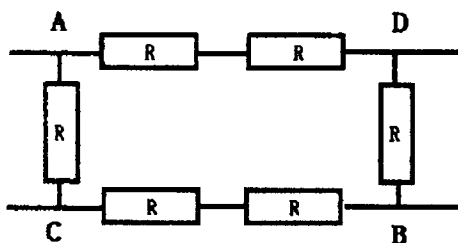
TEST 3 : ASSOCIATION DE RÉSISTANCES

Calculez les résistances équivalentes R_{AB} et R_{AC} dans les circuits ci-dessous :

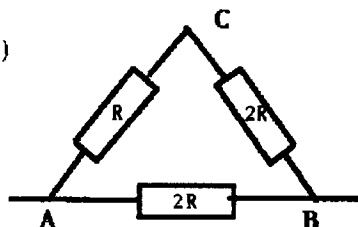
1)



2)



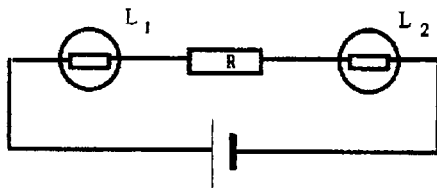
3)

**Fréquence des erreurs rencontrées :**

	Seconde	Deug
$R_{AC} = R$ dans les 3 montages	61 %	6/11
R_{AB} exact dans le circuit 1 ; R_{AB} faux dans le circuit 2	64 %	2/9
Calcul de la résistance équivalente par la formule inhomogène		
$R_{AB} = 1/R_1 + 1/R_2$	17 %	1/10
Réponses exactes	7 %	2/11

TEST 4 : RAISONNEMENT SÉQUENTIEL

Dans ce circuit, L_1 et L_2 sont 2 lampes identiques :



L_1 brille PLUS AUSSI MOINS fort que L_2

☐ ☐ ☐

On augmente la valeur de la résistance R ;

L_1 brille PLUS AUSSI MOINS fort qu'avant

☐ ☐ ☐

L_2 brille PLUS AUSSI MOINS fort qu'avant

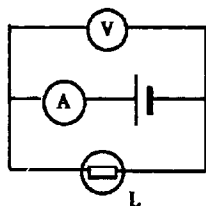
☐ ☐ ☐

Fréquence des erreurs rencontrées :

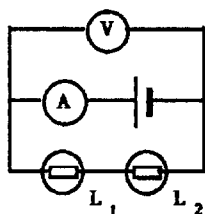
	Seconde	Deug
Raisonnement séquentiel complet		
L_1 brille plus fort que L_2		
L_1 brille aussi fort qu'avant	35 %	4/15
L_2 brille moins fort qu'avant		
Raisonnement séquentiel avec le sens du courant inversé	6 %	0/15
Réponses exactes	11 %	7/15

TEST 5 : PILE EN TANT QUE GÉNÉRATEUR DE COURANT

Dans les deux schémas suivants, tous les éléments sont identiques (piles de résistances interne nulle, voltmètre, ampèremètre, ampoules L , L_1 , L_2) :



Circuit 1



Circuit 2

1) La tension mesurée par le voltmètre dans le circuit 2 est :

PLUS
☐

AUSSI
☐

MOINS
☐

forte que la tension mesurée dans le circuit 1.

2) La lampe L_1 brille :

PLUS
☐

AUSSI
☐

MOINS
☐

fort que la lampe L

3) L'intensité mesurée par l'ampèremètre dans le circuit 2 est :

PLUS
☐

AUSSI
☐

MOINS
☐

forte que l'intensité mesurée dans le circuit 1

Fréquence des erreurs rencontrées :

	Seconde	Deug
Réponse fausse à la première question	37 %	1/15
Réponse fausse à la troisième question dont	75 %	9/15
réponse «aussi» à cette question	55 %	7/15
Toutes réponses exactes	12 %	5/15