

Analogies et enseignement des sciences : une analogie thermique pour l'électricité

Jean-Jacques DUPIN, Samuel JOHSUA

Centre Interdisciplinaire de Recherches :
Apprentissage, Didactique, Évaluation (CIRADE)
Université de Provence, case 92
13331 Marseille cedex 3

Résumé

Les analogies jouent un rôle important dans la construction des connaissances. Leur usage dans l'enseignement, quoique fréquent, ne va pas sans poser de sérieux problèmes : identification des éléments pertinents et des limites, transfert entre domaines... Une analogie thermique pour l'enseignement de l'électricité est présentée ici, montrant à la fois les éléments positifs que l'on peut en attendre et les difficultés rencontrées.

Mots clés : analogies, électricité, thermique, conceptions, modélisation.

Abstract

Analogies are very important in the construction of knowledge. But their use in science teaching, although quite frequent, is problematic : identifying good elements and limits, transferring from a reference to a target domain... The present article deals with a thermal analogy for teaching electricity, showing its positive and negative side effects.

Key words : analogies, electricity, thermal, conceptions, model.

INTRODUCTION

De solides arguments tant épistémologiques que d'ordre psychocognitif jouent en faveur de l'utilisation des analogies dans l'enseignement des sciences. Déjà, l'histoire des sciences a largement montré le rôle positif des analogies dans la construction des savoirs scientifiques. De plus, le développement de l'approche constructiviste dans l'étude des phénomènes d'apprentissage chez l'enfant a accrédité l'idée que tout savoir nouveau est acquis à travers un processus complexe de re-création. Ce savoir nouveau n'est pas seulement empilé sur l'ancien dans un autre registre de mémoire : il y a reconstruction continue, le savoir nouveau étant organisé à partir du savoir ancien, ce dernier pouvant être lui-même modifié par la "compréhension" du nouveau. Dans cette vision, il est clair que l'analogie, en permettant la mise en place d'un degré élevé d'organisation des savoirs, devrait jouer un rôle très important.

Le raisonnement analogique apparaît quand, pour résoudre un problème donné, un sujet se réfère à un autre problème qu'il connaît mieux (Hashweh, 1986). Il y a mise en relation d'un domaine-cible (le problème nouveau posé) et d'un domaine de référence (Kircher, 1977 ; Cauzinille-Marmèche et al., 1985). La mise en correspondance n'est possible que si les deux domaines présentent des ressemblances (entre systèmes, grandeurs, propriétés...) que le sujet est capable de mettre à jour. Si le sujet reconnaît une structure commune aux deux domaines, il pourra utiliser un raisonnement analogique en appliquant au domaine-cible certaines propriétés ou relations du domaine de référence.

La qualité de l'isomorphisme entre ces deux domaines est déterminante. Un isomorphisme complet permet un raisonnement analogique complètement fiable : le transfert des propriétés du domaine de référence vers le domaine-cible donne des informations sûres. Un isomorphisme partiel peut entraîner des risques d'erreurs, surtout quand les limites n'ont pas été bien reconnues.

Le raisonnement analogique est donc puissant car il peut offrir une bonne heuristique de recherche pour résoudre un problème. Mais il présente aussi des limites car il ne s'agit pas d'un raisonnement rigoureux.

LES CONTRAINTES DE L'UTILISATION DES ANALOGIES

L'utilisation du raisonnement analogique suppose que l'on ait perçu des ressemblances entre un problème nouveau et un ancien déjà connu. Mais ces deux problèmes ne sont pas des fac-similés : leur ressemblance se manifeste par un isomorphisme de structure. Le sujet doit donc être capable de faire la comparaison à un niveau d'abstraction élevé. Aussi, l'isomorphisme ne peut être reconnu que s'il existe une structuration importante des connaissances antérieures permettant ce passage à l'abstraction ; et même si les deux

problèmes sont strictement isomorphes, le sujet doit passer par dessus "l'habillage" des problèmes et les variations sémantiques qui en découlent pour pouvoir analyser la structure commune des deux problèmes (Cauzinille-Marmèche et al., 1985). En outre, en cas d'isomorphies partielles, se rajoutent des difficultés liées à la délimitation des caractères communs et des différences. Dans les deux domaines, il faut alors trouver les relations isomorphes et celles qui ne le sont pas.

On comprend donc bien que tout ceci constitue un travail fort difficile qui fait que, dans l'enseignement, l'utilisation de l'analogie ne tient pas toujours ses promesses. Dans celui des sciences et de l'électricité en particulier, de nombreuses études permettent de dresser un inventaire complet des succès et difficultés rencontrés : transfert entre les deux domaines cible et de référence (Tenney & Gentner, 1984), difficultés conceptuelles dans les deux domaines (Johnstone & Mughol, 1976), analogies "positives et négatives" (Hesse, 1966), importance de la bonne domination de la référence (Schweddes, 1984), confusion cible-référence (Kircher, 1984), liste générale des contraintes (Glynn, 1991)... Par exemple, une revue de l'utilisation de l'analogie hydraulique pour l'électricité peut être trouvée dans Dupin & Johsua (1989), avec un bilan final assez mitigé.

Nous noterons ici trois idées fortes présentes dans la littérature :

- pour faciliter le transfert référence / cible, il faut présenter des problèmes épurés, dépouillés du maximum de caractères pouvant parasiter la mise en évidence des caractéristiques pertinentes pour les problèmes à résoudre ;

- l'utilisation d'une analogie est efficace si elle est répétée : la présentation de plusieurs problèmes, l'utilisation renouvelée, permettent une analyse des ressemblances et des différences facilitant la construction d'un schéma applicable à la classe des problèmes rencontrés ;

- l'analogie peut être utilisée en jouant surtout sur son rôle heuristique. Elle ne donne plus alors une conclusion certaine mais seulement une approche du probable ou du possible. Le domaine de référence et le domaine-cible peuvent même être très différents avec des isomorphismes partiels ; l'analogie permet alors de doter l'objet étudié de nouvelles propriétés en utilisant principalement l'aspect métaphorique et pas forcément toutes les possibilités relationnelles. Une telle utilisation peut être très inventive mais elle est aussi plus dangereuse, nécessitant de délimiter les domaines de validité de l'analogie.

L'ANALOGIE MODÉLISANTE

Nous avons utilisé à des fins d'enseignement de la physique ce que nous appelons "*l'analogie modélisante*" (Dupin & Johsua, 1989). Celle-ci doit permettre d'introduire dans le domaine-cible une idée nouvelle, dans une forme concrète. Elle sera utilisée pour son rôle heuristique d'image, de méta-

phore. Le domaine de référence doit être moins complexe (ou en tout cas plus familier) que le domaine-cible, pour que le sujet accepte aisément d’y travailler.

L’analogie doit avoir une fonction “descriptive”. Elle doit permettre de rendre plausible une explication dans le domaine-cible même si le sujet la refuse *a priori* : “si ça se passe comme ceci dans ce domaine, alors il est possible que cela se passe de la même façon dans cet autre domaine...”

Le système doit être adaptable à de nombreuses situations. Aussi doit exister un grand isomorphisme structurel entre les deux domaines, même si l’on n’utilise pas explicitement cet isomorphisme : c’est une garantie de la justesse des aspects métaphoriques et de l’étendue des situations pouvant être étudiées.

Les relations structurant le domaine de référence doivent être facilement accessibles pour permettre un transfert : on doit pouvoir facilement passer sur “l’habillage” du problème. Aussi, l’analogie ne portera pas sur une situation réelle, complexe, mais sur une situation expurgée, idéalisée, où la structure n’est pas masquée. Nous proposons des “*expériences pensées*” et non de nouvelles expériences empiriques. Si des analogies “négatives” existent, il est utile de les étudier spécifiquement, mais elle ne doivent pas être très nombreuses et doivent être visibles facilement.

Supposons qu’un phénomène soit présenté aux élèves et que ceux-ci (et le maître) aient à avancer différentes hypothèses pour l’interpréter. L’analogie est un des moyens permettant d’introduire une hypothèse nouvelle qui n’apparaîtrait pas spontanément dans le domaine-cible de départ. L’utilisation de l’analogie permet aussi une démarche prédictive : à travers la discussion et l’analyse, l’élève doit anticiper le fonctionnement du système étudié. La preuve de la véracité ou de l’erreur est apportée par une expérience réalisée réellement dans le domaine-cible, jamais dans le système de référence qui reste toujours une réalité pensée idéalisée. Il n’y a donc pas confusion entre ce qui est étudié : c’est bien sur le domaine-cible que l’on travaille.

Avec la description sommaire faite ci-dessus, on peut voir que, pour nous, l’utilisation de l’analogie est inséparable, en situation de classe, de l’introduction du “débat scientifique” (Legrand, 1988 ; Johsua & Dupin, 1989) autour des diverses hypothèses émises, débat entre les élèves eux-mêmes ou avec le maître. Cela nécessite aussi une modification du statut de l’expérience qui, souvent, sert alors à sanctionner une hypothèse. Elle n’est plus le préalable obligé du bon cours... mais plutôt une étape intermédiaire décisive.

Cette démarche a été utilisée pour un enseignement d’électricité en courant continu. Deux analogies ont été testées : l’une mécanique, l’autre thermique. La première ayant été plus abondamment décrite (Johsua, 1985 ; Dupin & Johsua, 1989 ; Johsua & Dupin, 1989 ; Dupin & Johsua, 1993), nous parlerons ici de l’analogie thermique.

L'ANALOGIE ENTRE LES CONDUCTIONS THERMIQUE ET ÉLECTRIQUE

La première moitié du XIX^e siècle a vu se développer l'étude des phénomènes de propagation. Précédées par la théorie de la propagation de la lumière dans l'éther, les propagations des vibrations dans les milieux élastiques et de la chaleur dans les conducteurs thermiques sont modélisées entre 1820 et 1840. En particulier, Fourier propose un modèle mathématisant la propagation de la chaleur le long d'une barre.

En 1827, Ohm adapte le formalisme mathématique de Fourier à la conduction électrique et fait ainsi franchir un pas décisif grâce à cet emprunt analogique. Il compare le courant électrique (ou flux d'électricité) au flux de chaleur dans une barre. Pour compléter l'analogie, il introduit une nouvelle grandeur électrique, "*la force électroscopique*" équivalente à la différence de température chez Fourier. Le flux d'électricité entre deux points est proportionnel à la différence de force électroscopique : ceci est connu sous le nom de "loi d'Ohm". Il introduit aussi le concept de "*résistance électrique*". Ce modèle, bien que s'appuyant sur la notion de courant électrique d'Ampère, heurte les conceptions encore dominantes : pour beaucoup d'auteurs contemporains, la pile est un réservoir d'électricité qui se décharge dans le conducteur (Rosmorduc, 1987). Les modèles dominants en électricité menaient alors à une impasse et il a fallu ce saut vers la conservation du courant et la notion de tension ("*force électroscopique*") pour avancer.

L'analogie formelle entre les conceptions électrique et thermique pour des corps homogènes et isotropes peut être résumée comme suit. A la tension électrique correspond la différence de température ; au courant électrique, le courant de chaleur ; à la résistance électrique, la résistance thermique. Ces grandeurs sont reliées entre elles par des lois (Ohm et Fourier) formellement identiques. De même, les relations donnant les résistances équivalentes à des associations de conducteurs sont isomorphes.

USAGE DE CETTE ANALOGIE EN SITUATION D'ENSEIGNEMENT

Cette analogie a été utilisée par deux professeurs dans leurs classes de seconde (niveau 10, âge moyen 16 ans) d'un lycée d'enseignement général à Marseille. Le temps consacré traditionnellement à cette partie du programme a été respecté ainsi que son contenu officiel, imposé réglementairement en France. L'utilisation de l'analogie ne devait pas entraîner un allongement du temps passé à l'étude de l'électricité ou une amputation de certaines parties du cours. Cela nous a paru essentiel pour pouvoir mener une évaluation par comparaison avec des classes-témoins.

Modèle à consommation du courant (Mc Dermott & Van Zee, 1984), modèle du générateur à courant constant (Dupin & Johsua, 1987), raisonne-

ment séquentiel (Closset, 1983 ; Shipstone, 1984), absence d'utilisation du concept de tension : toutes ces conceptions subsistent encore majoritairement chez les élèves du niveau 10 et bien souvent coexistent. Notre objectif était de combattre explicitement ces conceptions et de favoriser les raisonnements en tension, de développer le modèle du générateur de tension parfait délivrant une force électromotrice constante. Il fallait donc bien situer les relations existant entre trois concepts : tension, intensité et résistance du circuit électrique.

Dans l'enseignement traditionnel, tel que nous avons pu l'observer dans des classes ou dans les manuels scolaires, ces grandeurs sont introduites de façon très opératoire (l'intensité, c'est ce que mesure l'ampèremètre, puis c'est le "flux de charges" ; la tension, c'est ce que mesure le voltmètre, puis c'est "une différence d'état électrique"). Ceci ne permet pas de structurer les relations entre ces grandeurs. Bien souvent, les élèves n'étudient que des portions de circuit : l'étude du générateur ne venant que vers la fin, c'est tardivement que l'on considère des circuits complets, condition nécessaire pour considérer le circuit comme un système.

Pour notre part, nous avons fait le choix d'introduire une relation de "causalité linéaire" (Halbwachs, 1971) : un générateur de tension est la cause du déplacement des charges électriques. Suivant les caractéristiques du circuit dans son ensemble, ces charges se déplacent plus ou moins facilement. C'est dans ce cadre que le recours à l'analogie thermique est testé : de même que la tension aux bornes du générateur donne naissance à un courant électrique dans un circuit fermé, de même une différence de température entre deux corps donne naissance à un courant de chaleur à travers un conducteur thermique.

D'un côté, la notion de courant électrique s'installe facilement chez les élèves, alors que celle de tension électrique a du mal à émerger. De l'autre, la notion de différence de température semble être intégrée plus facilement que celle de courant de chaleur (Driver et al., 1985). Il existe donc une complémentarité des conceptions des élèves dans ces deux domaines. L'hypothèse est d'utiliser ce "croisement", les concepts en correspondance dans l'analogie occupant une place opposée dans une échelle de difficulté : en s'appuyant sur la notion de courant électrique, faire ressortir celle de courant de chaleur ; en s'appuyant sur la notion de différence de température, faire ressortir celle de tension électrique.

Si le circuit électrique est nécessairement fermé, il n'en est pas de même pour le circuit thermique. Il est préférable de proposer aux élèves une situation analogique exhibant la même "fermeture" : un courant de chaleur circulant en circuit fermé. Il faut en outre que cette situation soit connue et accessible...

Dans cette expérimentation, les notions de courant et de tension ont été introduites selon les pratiques habituelles des professeurs, de façon

essentiellement expérimentale, la tension étant "ce que mesure le voltmètre", ou ce qui permet la déviation d'un faisceau d'électrons dans un tube à vide. Parallèlement, dans le cours de chimie, les élèves travaillent sur température et chaleur. Là aussi, introduction expérimentale permettant d'arriver à la formulation : le corps plus chaud cède de la chaleur au corps plus froid ; la température du premier diminue, celle du second augmente jusqu'à ce que les températures soient égales.

L'analogie est alors introduite, pour être exploitée sous sa forme métaphorique. Le professeur demande aux élèves ce qu'ils savent des réfrigérateurs. Il / elle note au tableau les réponses lui paraissant importantes de façon à préparer la forme épurée de l'analogie : température intérieure au réfrigérateur maintenue constante et inférieure à la température ambiante de la salle ; isolation thermique des parois, isolant parfait, mauvais isolant, fuites, rôle du thermostat, du moteur, mise en évidence des échanges thermiques, etc.

A partir de ces échanges oraux, le professeur propose un schéma idéalisé. Le réfrigérateur est considéré comme une enceinte close, entourée d'un isolant thermique parfait. L'ensemble des "fuites thermiques" est ramené à un défaut dans l'enceinte parfaite par où se fait l'échange de chaleur. La température externe T_1 de la pièce est supposée constante, ainsi que la température interne T_2 . Il faut donc faire ressortir de la chaleur pour maintenir T_2 constante et c'est le rôle du moteur et de toute la machinerie autour de lui. Une schématisation du modèle est présentée (figure 1).

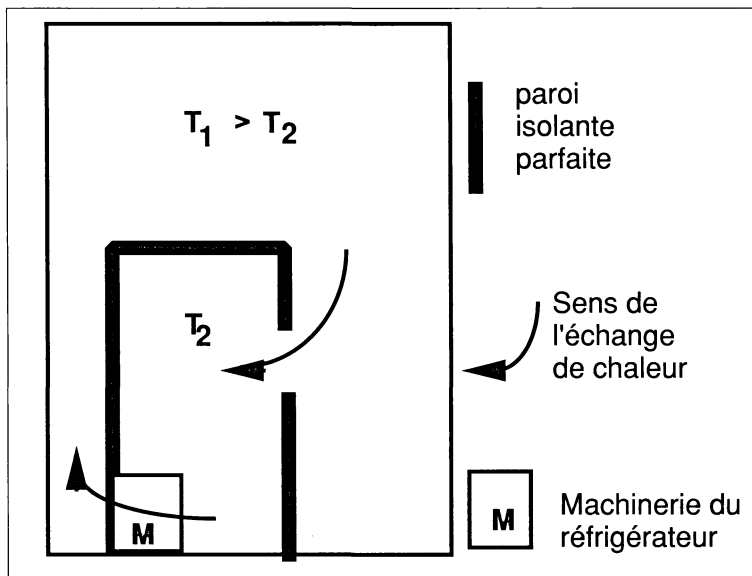


Figure 1 : L'analogie du réfrigérateur.

La séance suivante est consacrée à utiliser le modèle précédent pour faire des prédictions dans le cas de situations nouvelles. Le professeur propose les situations, les élèves doivent prévoir les réponses :

- l'isolation thermique est parfaite. La résistance thermique est infinie. Aucun courant de chaleur ne circule ;

- on crée un défaut dans l'isolation. Un courant de chaleur s'établit. Une relation qualitative est introduite : si la différence de température est maintenue constante, plus la fuite est importante (i.e. plus la résistance thermique est faible), plus le courant de chaleur est important ;

- on peut faire diminuer le courant de chaleur en réduisant la "fuite" avec une plaque isolante non parfaite (figure 2). La différence de température est maintenue constante par le "moteur". Si on rajoute une seconde plaque non parfaite (le professeur précise : *"on dira qu'on a deux isolants en série..."*), le courant de chaleur diminue. Les élèves prévoient aussi que le courant de chaleur à travers les deux plaques en série est le même ;

- si l'on crée une deuxième fuite dans la paroi isolante parfaite (figure 3), le courant de chaleur total, somme des courants à travers chaque fuite, est plus grand qu'avec une seule fuite. Le courant de chaleur à travers la première fuite n'est pas modifié par la création de la seconde : c'est le courant total qui varie. La différence de température de part et d'autre de chacune des deux fuites est la même. Le professeur précise : *"on dira que les deux fuites sont en parallèle, ou en dérivation."*

A cette étape, le débat paraît assez fortement dirigé. Le professeur présente la situation, sélectionne les prédictions des élèves, les valide ou non après une courte discussion. Pour chaque situation, il / elle propose à la fin du débat une schématisation standard et fait écrire sur le cahier des élèves une présentation synthétique des prédictions.

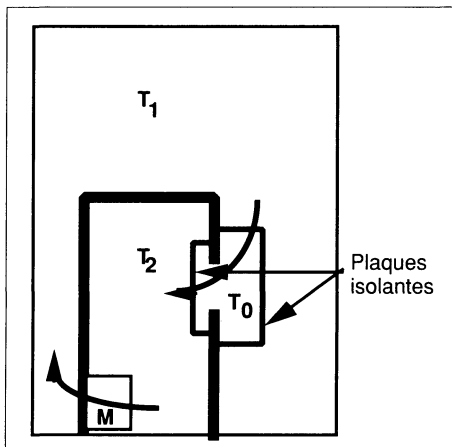


Figure 2 : Éléments résistants en série.

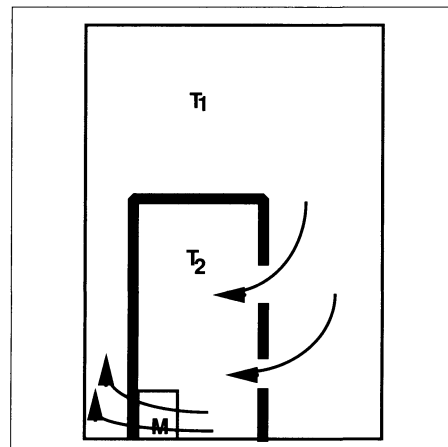


Figure 3 : Résistances en parallèle.

Lors d'une séance suivante, le professeur introduit les correspondances entre le système fermé réfrigérateur - moteur - pièce et le circuit électrique à partir de la figure 1. Les termes de l'analogie sont les suivants :

moteur du réfrigérateur	générateur de tension
différence de température	tension ou différence de potentiel
température	potentiel local
courant de chaleur	courant électrique
fuite thermique	branche du circuit électrique
résistance thermique	résistance électrique

Les élèves doivent établir la relation qualitative liant la tension aux bornes du générateur et l'intensité du courant, compte tenu de la grandeur de la résistance : plus la résistance est grande, moins le courant est important. A ce premier niveau de l'utilisation de l'analogie, aucune difficulté insurmontable n'apparaît dans la classe et la quasi-totalité des élèves est capable d'établir cette relation.

Les élèves doivent ensuite établir le schéma électrique analogue à la figure 2. Très rapidement, certains proposent le bon schéma. L'équivalence des systèmes peut être établie et plusieurs résultats prévus qualitativement : la tension reste la même aux bornes du générateur, le courant est moins fort quand on ajoute une deuxième résistance en série, le courant est le même dans les deux résistances.

Au début de la séance suivante, le professeur distribue une fiche récapitulative, sous forme de "texte à trous" que les élèves doivent compléter par binôme, de façon à bien fixer les termes de l'analogie. Ceci ne soulève pas de difficultés majeures, sauf pour l'équivalent du court-circuit qui n'est pas trouvé. Cette situation n'ayant jamais été évoquée, il aurait fallu posséder une grande maîtrise de l'analogie pour y répondre (résistance thermique nulle, fuite "infiniment grande", porte du réfrigérateur ouverte, températures intérieure et extérieure égales...).

Le professeur passe ensuite au circuit thermique en parallèle (figure 3). Là-aussi, le schéma électrique analogue est rapidement trouvé, les relations qualitatives importantes synthétisées : même tension aux bornes des deux résistances en parallèle, courants différents dans chacune d'entre elles, courant total plus grand avec deux résistances qu'avec une seule, etc.

Le développement de l'analogie s'arrête là : utilisation de son aspect "modélisant" pour structurer des relations opératoires liant les trois notions de tension, intensité et résistance. Le professeur revient ensuite à une approche plus classique pour établir les lois quantitatives en électricité : additivité des courants et des tensions, loi d'Ohm...

Le professeur, après avoir établi une loi, s'efforce de la commenter qualitativement par une référence à l'analogie thermique. Cependant, à de très

rares exceptions près, les élèves ne font jamais spontanément usage de l'analogie. Si le professeur, face à un élève en difficulté, dit : "*comment cela se passait avec le réfrigérateur ?*", alors, la plupart du temps, l'élève peut faire fonctionner l'analogie. Mais cette stimulation est toujours nécessaire, révélant sans doute une difficulté dans la maîtrise ou dans le transfert de l'analogie.

ÉVALUATION DES RÉSULTATS

Les performances des élèves de ces deux classes ont été comparées à celles d'autres élèves-témoins. Le groupe expérimental comprenait 87 sujets, le groupe témoin 99. L'évaluation a été faite à l'aide d'un questionnaire papier-crayon comportant 44 items, avant et après enseignement. Ce questionnaire n'est pas nouveau, il a par ailleurs servi à évaluer les conceptions d'élèves avant et après enseignement. Il s'agit donc d'un domaine bien connu. Les résultats obtenus, en particulier par les classes-témoins, sont en accord avec ceux trouvés dans des études antérieures par nous-mêmes (Dupin & Johsua, 1989) ou par d'autres auteurs (Rhöneck & Völker, 1984). Nous cherchons à voir ici si l'action sur quelques variables didactiques limitées produit des effets décelables et dans quel sens agissent les modifications. Nous ne présentons donc pas une analyse exhaustive des résultats, mais donnons quelques exemples illustrant les tendances les plus significatives concernant les notions-cibles de notre expérimentation (tension / courant, générateur de courant constant).

Dans les tableaux de résultats sont données :

- les performances avant enseignement de toutes les classes regroupées, notées G10 dans les tableaux (aucune différence significative entre les diverses classes) ;
- les performances après enseignement en séparant classes expérimentales (EXP10) et témoins (T10) ;
- les performances d'étudiants en première année d'université (134 sujets) ayant choisi une filière "Mathématiques-Physique-Chimie" (U1) de façon à pouvoir situer les résultats des élèves testés.

Courant et tension dans des circuits ouverts ou fermés

Plusieurs items portaient sur cette question. Ils étaient dispersés dans le questionnaire mais nous en regroupons ici certains, notés Q₁, Q₂ et Q₃ (voir annexes). Il s'agissait de tester si les sujets pouvaient diagnostiquer l'existence ou non d'une tension ou d'un courant dans diverses situations plus ou moins complexes. La réponse incorrecte la plus répandue (avant comme après enseignement) est la suivante : il y a bien un courant et une tension dans le cas C où la lampe est éclairée. Mais il n'y a ni courant ni tension dans les cas

A et B. Les réponses erronées à la question Q₂ (un courant circule même dans le circuit ouvert) ont leur correspondant chez une petite minorité d'élèves qui pensent de même qu'un courant existe dans le cas Q₁B. Mais alors une tension existe aussi...

Le comportement toujours similaire du courant et de la tension se retrouve dans les réponses erronées à la question Q₃. Autrement dit, le schéma des réponses incorrectes à ces questions semble fondé sur l'idée que le courant et la tension apparaissent toujours ensemble, comme des notions fort peu différenciées. Ce résultat est d'ailleurs classique et bien établi dans la littérature (Shipstone et al., 1988).

Le tableau 1 donne les pourcentages de réponses correctes : 1/3 des élèves-témoins de seconde peuvent répondre à Q₁ (moins de 2/3 pour les étudiants à l'université), montrant ainsi qu'elle est bien plus difficile qu'il n'y paraît ! Les sujets des classes expérimentales réussissent mieux (75 % de réussite), se plaçant même au dessus des sujets universitaires. Ces meilleurs résultats sont confirmés pour les questions Q2 et Q3. L'essentiel de la différence entre les tests et les témoins provient des questions portant sur la tension pour Q1 et Q3.

Questions	G10 avant enseignement	T10 après enseignement	EXP10 après enseignement	U1
Q1	24	33	75	58
Q2	38	27	51	58
Q3	22	41	58	77

G10: toutes classes de grade 10 confondues, avant enseignement
T10: classes-témoins (effectif : 99)
EXP10: classes expérimentales (effectif : 87)
U1: 1^{re} année d'université scientifique (effectif : 134)

Tableau 1: Pourcentages de réponses correctes aux questions Q1, Q2 et Q3.

Le générateur de courant constant

Un générateur parfait de tension maintient une tension constante entre ses bornes et délivre un courant variable suivant la résistance du circuit auquel il est connecté. Or de nombreux élèves considèrent que le générateur délivre un courant constant, indépendant du circuit. Le courant devient une caractéristique du générateur. Cette conception étant fort répandue (Dupin & Johsua, 1987), nous l'avons recherchée par plusieurs questions dont deux sont présentées.

Question "déclarative"

Les sujets devaient donner leur opinion sur deux affirmations :

"Dites ce que vous pensez des phrases suivantes :

1 - Une pile délivre le même courant électrique quel que soit le circuit.

2 - La tension aux bornes d'une pile est la même quel que soit le circuit."

Comme il avait été précisé que la pile était considérée comme un générateur parfait (résistance interne négligeable), les réponses correctes étaient : faux en 1, vrai en 2.

Si les classes expérimentales réussissent mieux que les classes-témoins sur la question de la tension (73 % contre 54 % de bonnes réponses), les réponses concernant le courant sont du même ordre (47 % pour les deux : la moitié des deux échantillons considère que la pile délivre un courant constant). Aussi le résultat pour l'ensemble n'est pas très différent (expérimentales : 46 %, témoins : 39 %).

Question opératoire dans un circuit parallèle (question Q₄ voir annexes)

Pour les tensions, on doit répondre vrai en (a) et faux en (b). Pour l'intensité, la réponse correcte est faux en (c) : le courant dans chaque lampe demeure le même ; le courant total délivré par la pile croît. Les sujets estimant que le courant délivré par la pile est constant répondront vrai en (c) (puisque le courant se partagera entre les deux lampes...). Les résultats (tableau 2) sont cohérents avant les précédents : meilleure performance concernant la tension pour les classes expérimentales, mais resserrement des résultats par rapport au "déclaratif", résultats identiques pour le courant, donc résultats peu différents sur l'ensemble de la question.

	G10 avant enseignement	T10 après enseignement	EXP10 après enseignement	U1
Générateur de courant constant	66	66	65	76
Juste pour le courant	30	33	35	22
Juste pour la tension	31	48	58	65
Juste pour courant et tension	17	17	22	20

Tableau 2 : Pourcentages de réponses correctes à la question Q4.

DISCUSSION

L'analyse de l'ensemble des items conduit à remarquer que des progrès sont réalisés par tous les élèves (classes témoins et expérimentales) surtout sur les questions concernant la tension. Les classes expérimentales pour lesquelles, par l'analogie thermique, ont été déployés de grands efforts pour asseoir cette notion ont plus progressé que les autres. Les classes expérimentales présentent un avantage important sur les questions de diagnostic courant / tension ou sur les questions déclaratives. Sur les questions opératoires les résultats de deux échantillons sont comparables : si les expérimentales progressent pour la tension, il n'y a rien de gagné sur la question du courant. Lorsque l'élève doit mettre en œuvre ces notions dans une situation un peu délicate, il semble bien utiliser, dans tous les cas, le modèle qui s'impose comme dominant : le générateur de courant constant. Et même, paradoxalement, l'insistance apportée dans les classes expérimentales sur la constance de la tension aux bornes de la pile semble renforcer ce modèle. Finalement, rien ne varie : tension et courant sont constants et *"ceci n'est pas étonnant puisque la loi d'Ohm dit $V = R I$ "* ! L'élève peut récupérer son modèle spontané en l'habillant d'une justification "théorique", en jouant sur la confusion entre grandeurs constantes et variables dans un circuit donné ou lorsqu'on change de circuit (Viennot, 1985).

Il semble bien que les résultats obtenus ici soient moins bons que ceux obtenus avec l'analogie mécanique du "petit train". Il est cependant difficile d'imputer de façon certaine ceci à une moins bonne "qualité" de l'analogie thermique. En effet, les conditions générales des deux expérimentations n'étaient pas identiques en tous points. Plusieurs variables didactiques étaient différentes et cela a pu avoir des effets importants : introduction opératoire du courant et de la tension, moins bonne maîtrise du "débat scientifique", arsenal d'expériences-tests moins élaboré... Nous nous heurtons bien là à une difficulté majeure : comment maîtriser l'ensemble des variables didactiques pour analyser la reproductibilité des phénomènes créés et évaluer les résultats obtenus ? Et comment faire pour que cette exigence soit supportable par le professeur en exercice... ?

Malgré les limites indiquées, on peut cependant tirer quelques conclusions optimistes. Le passage par la tension constante aux bornes de la pile est une étape nécessaire ; elle n'est pas suffisante. Il nous semble que l'on peut schématiser en plusieurs étapes les progressions cognitives des sujets :

- étape 1 : le générateur est à courant constant. La tension est variable ou n'est même pas un concept utilisé ;
- étape 2 : la tension aux bornes de la pile est constante ;
- étape 3 : le courant débité dépend du circuit ;
- étape 4 : capacité à coordonner les étapes 2 et 3 permettant une mise en œuvre du modèle.

La majorité des élèves des classes expérimentales atteint l'étape 2, alors que les autres restent en 1. Ils ont donc progressé d'un point de vue cognitif, même si cela ne se mesure pas encore dans les questions opératoires.

Les séquences étaient essentiellement conçues pour donner un sens au concept de tension et pour asseoir l'idée du générateur de tension constante. Il semble bien que cet objectif ait été atteint.

L'analogie thermique constitue un recours, une aide didactique auxquels peut faire appel le maître pour aider un élève dans une situation délicate. Elle présente l'avantage de ne pas nécessiter un investissement en temps trop important pour permettre des raisonnements qualitatifs et des prédictions transférables d'un domaine à l'autre. Cela ne signifie nullement qu'il s'agit d'une analogie meilleure que les autres - simplement qu'elle peut être utilisée de façon féconde pour combattre des blocages spécifiques.

Comme les analogies du type "*chaîne de bicyclette*" (Closset, 1983) ou "*petit train*" (Dupin & Johsua, 1989), elle permet d'introduire la force électromotrice constante aux bornes du générateur, de faire des prédictions concernant les circuits-série. Par rapport aux deux analogies précédentes, elle présente l'avantage de permettre l'étude des circuits avec dérivation et d'introduire la notion de potentiel local le long du circuit (utilisation non évoquée ici).

Certes, elle ne permet pas de dépasser à elle seule la conception du générateur de courant constant : c'est un blocage cognitif à combattre spécifiquement et qui ne relève pas typiquement de l'analogie choisie.

On pourrait enfin - et ce n'est pas un mince problème - se poser la question de l'utilisation de l'analogie électrique pour les problèmes de conduction thermique et voir si, hélas, une retombée perverse de cette analogie ne serait pas de donner une assise "théorique" à la substantialisation de la chaleur...

Une analogie peut aider à résoudre certaines questions bien délimitées. Elle ne peut prétendre tout résoudre... Il faut donc l'utiliser avec précaution. Il y a rarement des solutions miracles.

BIBLIOGRAPHIE

CAUZINILLE-MARMÈCHE E., MATHIEU J. & WEIL-BARAIS A. (1985). Raisonnement analogique et résolution de problèmes. *L'année Psychologique*, n° 85, pp. 49-72.

CLOSSET J.-L. (1983). *Le raisonnement séquentiel en électrocinétique*. Thèse de doctorat, Université Paris 7.

DRIVER R., GUESNE E. & TIBERGHIE A. (1985). *Children's ideas in science*. Milton Keynes, Open University Press.

DUPIN J.-J. & JOHSUA S. (1987). Conceptions of french pupils concerning electric circuits : structure and evolution. *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 24, n° 9, pp. 791-806.

DUPIN J.-J. & JOHSUA S. (1989). Analogies and "modeling analogies" in teaching. Some examples in basic electricity. *Science Education*, vol. 73, n° 2, pp. 207-224.

DUPIN J.-J. & JOHSUA S. (1989). *Expérimentations d'approches hypothético-déductives de la physique en classe de seconde*. Rapport au Ministère de l'Éducation nationale. Marseille, CRDP.

DUPIN J.-J. & JOHSUA S. (1993). Electrocinétique en classe de seconde. *TREMA*, n° 3-4, pp. 140-155.

GLYNN S.M. (1991). Explaining science concepts : a teaching-with-analogies model. In M. Glynn, R.H. Yeany, B.K. Britton (Eds), *The Psychology of Learning Science*. Hillsdale-NJ, L.E.A.

HALBWACHS F. (1971). Causalité linéaire et causalité circulaire en physique. In F. Halbwachs (Ed.), *Les théories de la causalité*. Paris, PUF, pp. 19-38.

HASHWEH M.Z. (1986). Toward an explanation of conceptual change. *European Journal of Science Education*, vol. 8, n° 3, pp. 229-249.

HESSE M.B. (1966). *Models and analogies in Science*. South Bend-IN, University of Notre Dame Press.

JOHNSTONE A.H. & MUGHOL A.R. (1976). Concepts of Physics at secondary level. *Physics Education*, n° 11, pp. 466-469.

JOHSUA S. (1985). *Contribution à la délimitation du contraint et du possible dans l'enseignement de la physique*. Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille 2.

JOHSUA S. & DUPIN J.-J. (1989). *Représentations et modélisations : le "débat scientifique" dans la classe et l'apprentissage de la physique*. Berne, Peter Lang.

KIRCHER E. (1977). *Allgemeine Bemerkungen und seine Bedeutung für die Physik Didactik*. Dissertation, Kiel, IPN.

KIRCHER E. (1984). Analogies for the electric circuit ? In R. Duit, W. Jung & C.V. Rhöneck (Eds), *Aspects of Understanding Electricity*. Kiel, IPN, pp. 299-310.

LEGRAND M. (1988). Génèse et étude sommaire d'une situation co-didactique : le débat scientifique en situation d'enseignement. In C. Laborde (Ed.), *Actes du Premier Colloque Franco-Allemand de Didactique des Mathématiques*. Grenoble, La Pensée Sauvage, pp. 53-66.

Mc DERMOTT L. & VAN ZEE E. (1984). Identifying and addressing student difficulties with current electricity. In R. Duit, W. Jung & C.V. Rhöneck (Eds), *Aspects of Understanding Electricity*. Kiel, IPN, pp. 39-40.

ROSMORDUC J. (1987). *Histoire de la physique : la formation de la physique classique*. Paris, Lavoisier.

RHÖNECK C.V. & VÖLKER B. (1984). Semantic structures describing the electric circuit before and after instruction. In R. Duit, W. Jung & C.V. Rhöneck (Eds), *Aspects of Understanding Electricity*. Kiel, IPN, pp. 95-106.

SHIPSTONE D.M. & GUNSTONE R. (1984). Teaching children to discriminate between current and energy. In R. Duit, W. Jung & C.V. Rhöneck (Eds), *Aspects of Understanding Electricity*. Kiel, IPN, pp. 73-82.

SHIPSTONE D.M., RHÖNECK C.V., JUNG W., KÄRRQVIST C., DUPIN J.-J., JOHSUA S., & LICHT P. (1988). A study of students' understanding of electricity in five European countries. *International Journal of Science Education*, vol. 10, n° 3, pp. 303-316.

SCHWEDES H. (1984). The importance of water circuits in teaching electricity. In R. Duit, W. Jung & C.V. Rhöneck (Eds), *Aspects of Understanding Electricity*. Kiel, IPN, pp. 319-330.

TENNEY Y. & GENTNER D. (1984). What makes water analogies accessible : Experiments on the water-flow analogy for electricity. In R. Duit, W. Jung & C.V. Rhöneck (Eds), *Aspects of Understanding Electricity*. Kiel, IPN, pp. 311-318.

VIENNOT L. (1982). L'implicite en physique : les étudiants et les constantes. *European Journal of Physics*, n° 3, pp. 174-180.

ANNEXES

QUESTION Q1

Regardez les quatre figures ci-dessous : A, B, C et D.

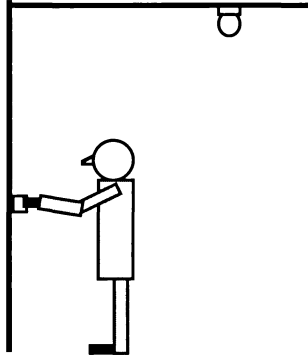
A B C D

Lisez chacune des phrases ci-dessous et cochez la case si vous pensez que la phrase est vraie. Si vous ne savez pas, mettez une croix dans la colonne correspondante.

	A	B	C	D	Je ne sais pas
1. La lampe est éclairée dans la figure...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Il y a un courant électrique dans la figure...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Il y a une tension électrique dans la figure...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

QUESTION Q2

Dans la figure ci-dessous, l'interrupteur est en position "marche", mais le filament de la lampe est "grillé".

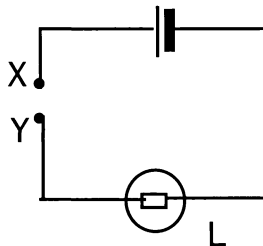


Dites ce que vous pensez de la phrase suivante :

	Vrai	Faux	Je ne sais pas
Il y a du courant électrique qui circule dans les fils menant à la lampe "grillée".	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

QUESTION Q3

Considérons le montage suivant. Il est ouvert entre X et Y.

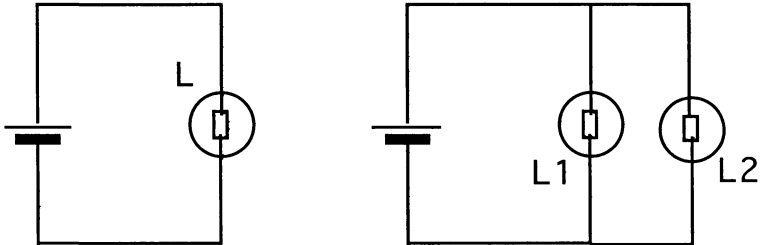


Que pensez-vous des phrases suivantes ?

	Vrai	Faux	Je ne sais pas
1. Le courant est nul dans le circuit.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. La tension est nulle entre X et Y.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

QUESTION Q4

Dans les deux schémas électriques suivants, tous les éléments sont identiques (générateurs parfaits et lampes).



Que pensez-vous des phrases suivantes ?

	Vrai	Faux	Je ne sais pas
1. Les tensions mesurées aux bornes des lampes L1 et L2 sont égales.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Les tensions mesurées aux bornes des lampes L1 et L2 sont plus faibles que celle mesurée aux bornes de L.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Les lampes L1 et L2 brillent moins fort que la lampe L.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>