

Prégnance de l'explication électrostatique dans la construction du concept de circuit électrique : points de vue historique et didactique

Abdelmadjid BENSEGHIR

Institut de Physique
Université de Sétif, Algérie
et LDPES, Université Paris 7, France

Jean-Louis CLOSSET

Laboratoire de Didactique des Sciences
Faculté des Sciences Agronomiques
8, Avenue de la Faculté, B 5030 Gembloux, Belgique
et LDPES, Université Paris 7, France

Résumé

Dans cet article on étudie la construction du concept de circuit électrique du double point de vue historique et psychogénétique. Dans les deux cas, on montre que la connaissance préalable d'électrostatique constitue un cadre de référence déformant pour la construction du concept de circuit électrique. On met en évidence un processus de réinvestissement électrostatique qui consiste à focaliser son attention sur les pôles du générateur où se trouvent accumulées, même en circuit fermé, des charges constituant l'élément essentiel d'analyse du circuit.

Mots clés : électrostatique, électrocinétique, histoire, didactique, représentation.

Abstract

This study deals with the construction of the concept of an electrical circuit considered from two points of view, historical and psychogenetic. In both cases we show that the previously acquired knowledge of electrostatics is liable to be a "misleading framework" for constructing the concept of an electrical circuit. We provide evidence of a process of reinvestment of their electrostatic knowledge : students focussed their attention on charges located at the generator's terminals, even in a closed circuit, these charges being seen as the essential elements in the analysis of the circuit.

Key words : *electrostatics, electrokinetics, history, teaching, conception.*

Le circuit électrique est une réalité aujourd'hui tellement familière qu'on en oublierait les difficultés d'élaboration du concept correspondant par les élèves. Divers travaux ont été consacrés à ce sujet. Qu'il s'agisse d'élèves en âge d'école primaire (Tiberghien & Delacôte, 1976), d'élèves du secondaire (Closset, 1989 ; Johsua, 1982) ou d'étudiants du supérieur (Closset, 1983), la fermeture du circuit, explicitement d'abord, implicitement ensuite, n'apparaît pas comme nécessaire. Les raisonnements mis en œuvre par les sujets sont du type linéaire causal (Closset, 1989 ; Rozier, 1988) ce qui implique l'ignorance du caractère systémique du circuit.

Nous voudrions étudier dans cet article l'impact tant au plan historique que didactique de l'explication électrostatique dans la construction du concept de circuit électrique. De la même manière que l'électrostatique a précédé historiquement l'électrocinétique, l'enseignement d'un minimum d'électrostatique, ne serait-ce que la notion de charge, précède généralement l'enseignement de l'électrocinétique. Or dans le processus de construction de connaissances nouvelles, la connaissance préalablement acquise joue le plus souvent le rôle de cadre interprétatif, voire de prisme déformant au travers duquel sont analysées les expériences nouvelles (Moscovici, 1976 ; Sanner, 1983).

Nous faisons l'hypothèse que les élèves réutilisent, dans leur analyse des circuits électriques, des connaissances électrostatiques partielles et le plus souvent mal digérées. Leurs représentations du circuit électrique pourraient donc bien avoir une composante "électrostatique" qui s'articulerait avec les autres difficultés d'élaboration du concept étudié, évoquées plus haut. Ce processus n'est pas le privilège de la psychogenèse mais pourrait aussi concerner la phylogenèse. Nous analyserons du point de vue conceptuel les phases principales de l'élaboration historique du concept de circuit électrique. Nous présenterons ensuite les résultats d'une enquête menée auprès de diverses populations d'élèves et d'étudiants en Algérie et en France. Mais nous commencerons d'abord par une brève mise au point théorique.

1. MISE AU POINT THÉORIQUE

Une analyse de manuels assez complète a été réalisée par l'un des auteurs (Benseghir, 1989) dont nous extrayons ici quelques informations significatives.

En 4^e après avoir exposé la structure atomique d'un métal, on enchaîne sur la structure des bornes d'une pile : *"Les bornes d'une pile sont, elles aussi, formées d'atomes métalliques, mais elles ne sont pas identiques : l'une a un déficit en électrons (négatifs) d'où une charge électrique globale positive, l'autre possède un excès d'électrons ; sa charge est donc négative."* (Michaud & Lemoal, 1979)

La dissymétrie des charges aux bornes d'un générateur est évoquée ici en circuit ouvert et, dans ce cas, est légitime. Le mécanisme électromoteur de la pile est à l'origine de cette accumulation de charges, elle-même responsable d'un champ électrostatique opposé au champ électromoteur, qui empêche toute circulation de charges (le champ électromoteur représente le champ électrique qui serait équivalent au champ des forces motrices en jeu dans le générateur, lesquelles ne sont pas en général de nature électrique). Mais dans d'autres manuels (Saison et al., 1979 ; Michaud & Lemoal, 1983 ; Averland et al., 1979), la dissymétrie des charges aux bornes du générateur est présentée en circuit fermé. De là à lui attribuer la responsabilité de la circulation électrique dans le circuit, il n'y a qu'un pas que les élèves franchissent très vite comme nous le verrons plus loin.

En fait, en circuit fermé, il existe bien des charges statiques mais celles-ci sont **superficielles, réparties le long du circuit** et sans aucun rapport avec une accumulation de charges aux bornes de la pile en circuit ouvert, comme nous allons le montrer.

En régime stationnaire, le champ dans le conducteur est de divergence nulle et obéit à la loi de Gauss (divergence du champ = ρ/ϵ_0) du fait de son caractère électrostatique (absence de champ électromoteur dans le conducteur) ; la charge (ρ) est donc nulle à l'intérieur du conducteur, ce qui s'interprète par la compensation locale de la charge des porteurs mobiles (électrons) par celle des atomes ionisés du réseau.

Cependant l'existence d'un champ électrostatique dans une région de l'espace impose la présence quelque part de charges statiques sources de ce champ. Deux possibilités compatibles avec les considérations précédentes peuvent a priori être évoquées :

- localisation des charges sources dans le générateur et/ou à ses extrémités,
- répartition des charges sources à la surface du conducteur jusqu'aux extrémités du générateur.

Le premier modèle ne peut être retenu dans la plupart des configurations de circuit. Les charges sources correspondantes ne peuvent en effet produire un champ dont les lignes suivent intimement les déformations topologiques du circuit (sinuosités), et qui puisse avoir des valeurs importantes dans les parties éloignées du générateur (dans des portions fortement résistives par exemple).

Le second modèle est susceptible par contre de répondre à ces contraintes. L'obtention d'un champ local correspondant au courant de conduction permanent est tout à fait concevable à partir d'une distribution adéquate de charges statiques superficielles.

Benseghir (1989) a réalisé une étude plus détaillée de la littérature à ce sujet à laquelle nous renvoyons le lecteur intéressé. Nous concluons simplement en signalant que l'ordre de grandeur des charges superficielles est généralement très faible devant celui des charges dynamiques en jeu dans le circuit (Jouguet, 1955 ; Rosser, 1970).

Les charges statiques superficielles ne sont en général pas étudiées à l'université et a fortiori encore moins dans le secondaire. Il est vrai qu'elles n'interviennent pas dans l'analyse quantitative du circuit, préoccupation majeure de l'étude de l'électrocinétique dans la majorité des cursus. Mais ceci ne justifie en rien une focalisation excessive sur les pôles des générateurs au détriment de l'aspect essentiel du circuit électrique qu'est la nécessité de sa fermeture. Que de telles difficultés subsistent encore, au niveau des manuels, au niveau des élèves, comme nous le montrerons par la suite, et sans doute au niveau des maîtres, paraîtra peut-être moins surprenant si on analyse, au plan historique cette fois, les étapes principales de l'élaboration du concept de circuit électrique.

2. GENÈSE HISTORIQUE DU CONCEPT DE CIRCUIT ÉLECTRIQUE

2.1. La "science de l'électricité" au début du XIX^e siècle

La "science de l'électricité", ancêtre de l'actuelle électrostatique constituait jusqu'à la fin du XVIII^e siècle la seule approche de l'électricité. Au tournant du siècle, suite aux expériences de Galvani (1789) et à la mise au point du premier électromoteur par Volta (1800), les phénomènes d'électricité dynamique s'imposent comme un fait scientifique. Nous allons montrer comment, historiquement, les connaissances sur l'électricité statique ont fait obstacle à la formation des concepts d'électrocinétique et particulièrement à celui de circuit électrique.

Deux types de phénomènes constituent l'objet de la "science de l'électricité" : les attractions et les répulsions entre corps électrisés d'une part, les décharges électriques occasionnant des effets divers (étincelles, commotions, etc.) d'autre part.

Les propriétés électriques observées sont considérées comme les manifestations d'une substance spécifique présente sur les corps électrisés : "*le fluide électrique*". Il s'agit d'une matière subtile, impondérable, incompressible et douée d'un pouvoir hypothétique d'élasticité et d'expansibilité désigné par les termes de "*vertu ou force expansive*". Le substantialisme de l'époque est patent (Bauer, 1948). Nous le retrouverons aussi chez les étudiants.

Selon la théorie des deux fluides, présente surtout en France, deux espèces d'électricité sont définies par rapport à un certain "état naturel" des corps ainsi décrit : "*L'on sait que tous les corps contiennent une certaine quantité de fluide électrique ; que l'on peut regarder ce fluide comme étant composé de deux fluides différents ; savoir : de fluide vitré ou positif, et de fluide résineux ou négatif ; que tant que ces deux fluides, constituant le fluide électrique, sont combinés, ils ne manifestent leur présence d'aucune manière ; mais aussitôt que par l'effet de quelques circonstances l'un ou l'autre, ou tous les deux, deviennent libres, ils donnent aux corps qui les recèlent ou à la surface desquels ils se trouvent, la propriété de s'attirer ou de se repousser.*" (Thenard, 1813)

Au seuil du XIX^e siècle, la "science de l'électricité" bénéficie chez les physiciens d'une grande crédibilité. Haüy, faisant état de ce sentiment, écrit en 1803 : "*L'électricité enrichie par les travaux de tant de physiciens distingués, semblait être arrivée au terme où une science n'a plus de pas importants à faire et ne laisse à ceux qui la cultiveront par la suite que l'espoir de confirmer les découvertes de leurs prédécesseurs et de répandre un plus grand jour sur les vérités dévoilées.*" (Haüy, 1803). C'est dans cet état d'esprit que seront reçues et interprétées les premières expériences d'électro-dynamique.

2.2. Transition électricité statique - électricité dynamique

Réalisées à partir de 1789, les expériences de Galvani mettent en jeu, pour la première fois de façon systématique, une situation de circuit fermé. Leur principe général est de mettre en contact deux métaux différents (argent et zinc par exemple) et de les relier, l'un au muscle d'un animal, l'autre au nerf de ce muscle (Fig. 1). Au moment où un tel dispositif, "*cercle ou chaîne galvanique*" dira-t-on en la circonstance, est fermé, le muscle "*éprouve des convulsions*".

L'interprétation de ces phénomènes qui comptent parmi les premiers effets d'électricité dynamique observés jusqu'alors pose la question de l'identification de leur agent causal. Dans l'immédiat, à défaut d'avoir une quel-

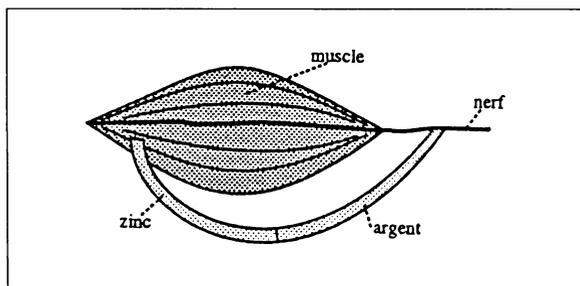


Figure 1 : Cercle galvanique

conque idée sur le fait nouveau, on l'associe à une substance de nature non spécifiée : le "*fluide galvanique*".

La première hypothèse qui apparaît dans un effort d'interprétation appartient à Galvani lui-même et s'inscrit dans une optique vitaliste influente à l'époque : il s'agirait du "*fluide nerveux électrique*", une électricité existant dans les corps organisés. S'opposant à cette thèse de "*l'électricité animale*", Volta soutient dès 1792 l'idée que le "*fluide galvanique*" n'est autre chose que le "*fluide électrique*" commun (Volta, 1801a). Il attribue l'origine de ce fluide au contact de deux métaux différents et situe donc le déséquilibre électrique dont parle Galvani, dans "*l'arc conducteur*".

Mais Volta lui-même, devant la difficulté d'apporter à l'appui de ses conceptions des arguments expérimentaux à partir du "*cercle galvanique*" fermé, est amené à opérer en **circuit ouvert**, déplaçant ainsi le problème au **domaine électrostatique** (Polvani, 1949 ; Varney & Fischer, 1980). Il décrit son expérience ainsi : "*L'un et l'autre (argent et zinc) bien nettoyés et polis, se touchant immédiatement par un ou plusieurs points, déplacent le fluide électrique, rompent son équilibre, de manière à ce qu'il passe de l'argent au zinc, se raréfie dans l'un et se condense dans l'autre, s'y maintient avec ce double état de raréfaction et de condensation...*" (Volta, 1801b)

Pour expliquer l'électrisation par contact, Volta fait intervenir une entité encore mal définie, la "*force électrique motrice*", siégeant à la surface de contact de deux métaux différents et responsable du déséquilibre électrique entre ceux-ci. S'inspirant de cette "*théorie du contact*", Volta réalise vers la fin de 1799 le premier "*électromoteur*" : celui-ci consiste en un empilement alterné de couples identiques de métaux différents et de pièces de cartons humidifiées, dont le rôle présumé est simplement de conduire le fluide électrique et d'éviter l'annulation de l'effet additif du développement de l'électricité de ces couples.

Volta semble maintenant bien différencier entre les effets électrostatiques de la pile en circuit ouvert et les effets produits quand celle-ci est en circuit fermé. Pour rendre compte de ces derniers, Volta fait assumer à la

même “force électrique motrice” le rôle d’impulser de façon continue, le fluide électrique dans le “cercle conducteur” faisant penser à un régime permanent. C’est ainsi qu’il écrit : “...les métaux et autres corps différents ne sont pas seulement tels, ou de simples conducteurs, corps perméables au fluide électrique [...], mais de vrais excitateurs ou moteurs perpétuels de ce fluide, de manière à former quand [...] ils sont mis en contact, une chaîne continue et rentrante ou, ce qui est le même, à compléter un cercle conducteur, **qui entretient un courant électrique continu et non ralenti.**” (Volta, 1802)

2.3. Réinvestissement électrostatique

Les physiciens français de l’Institut auprès desquels Volta défend sa thèse en 1801, dont certains ont grandement contribué à l’essor de la “science de l’électricité”, acceptent fort mal l’aspect dynamique de cette théorie (Brown, 1969) et ne retiennent d’elle que le principe, en circuit ouvert, de l’électricité par le contact. Dans le rapport rédigé par Biot (Biot, 1801) à l’instigation d’une commission de l’Institut, l’idée d’un “courant continu de fluide électrique” disparaît complètement. Haüy qui se réfère à ce rapport semble cautionner cette omission en manifestant sa circonspection à propos de l’idée d’impulsion du fluide électrique : “Ce célèbre physicien [Volta] paraît admettre une impulsion qui agit pour chasser dans le zinc une partie du fluide électrique que possédait le cuivre [...]. **Nous avons préféré d’en user ici comme par rapport à l’électricité produite par le frottement ou par la chaleur, c’est-à-dire de nous borner au simple énoncé des faits, sans entrer dans la considération de la force motrice qui ne semble pas encore bien connue.**” (Haüy, 1803b)

Cette tendance à réduire le nouveau au familier, que nous observerons aussi chez les élèves, fait apparaître ici la “science de l’électricité” comme le cadre approprié pour étudier les phénomènes obtenus avec la pile de Volta. Ainsi Haüy poursuit en écrivant : “Les nouvelles recherches qui restent à faire pour dissiper le nuage encore répandu sur cette partie de la science, ne peuvent avoir pour résultat d’établir une distinction essentielle entre le galvanisme et l’électricité, mais seulement de concilier l’électricité avec elle-même.” (Haüy, 1803b)

Ce mouvement de réinvestissement de l’acquis “électrostatique” a pour support l’analogie de la pile avec la bouteille de Leyde. Dans cet ordre d’idée Pouillet écrit près de cinquante ans plus tard : “La pile de Volta est donc une véritable bouteille de Leyde qui se rechargerait d’elle-même et qui ne s’épuise qu’après un temps très long, au lieu de s’épuiser après chaque décharge comme une batterie ordinaire.” (Pouillet, 1847)

Les phénomènes en jeu sont ainsi appréhendés au travers de conceptions relatives à des phénomènes usuels, modifiées de façon minimale pour intégrer les traits phénoménologiques nouveaux. Il s’agit là d’un fait épistémologique assez général (Kuhn, 1973), observable notamment en cours d’enseignement (Johsua, 1988).

L'implication principale du réinvestissement électrostatique est d'ordre méthodologique. Les conceptions précédentes entraînent les physiciens concernés à focaliser leurs recherches sur la pile isolée, c'est-à-dire en circuit ouvert (Brown, 1969 ; Blondel, 1982). On ne pouvait ainsi "voir" dans les phénomènes nouveaux que ce que l'on était disposé à "voir". A ce sujet, on peut lire chez Pfaff : *"C'est aussi dans cet état, avant la réunion des deux extrémités pour former la chaîne proprement dite, que le phénomène s'offre dans sa plus grande simplicité et qu'on peut espérer saisir plus sûrement les conditions vraiment essentielles que dans le cas d'une combinaison plus compliquée."* (Pfaff, 1829)

Outre la reproduction et l'étude des effets "électroscopiques", les savants s'efforcent obstinément, au moins jusqu'à la découverte d'OErsted en 1820, de produire des effets chimiques et magnétiques à partir des pôles d'une pile isolée. Dès les premières réalisations de l'électrolyse de l'eau, on cherchera à produire des gaz par action directe des pôles de la pile. Cette procédure schématisée en figure 2 est évoquée par exemple par Cuvier : *"... tous devaient commencer par une recherche semblable, par voir si on parviendrait à produire les deux gaz dans des eaux séparées. Si ces eaux sont absolument isolées, les gaz ne se montrent point..."* (Cuvier, 1801)

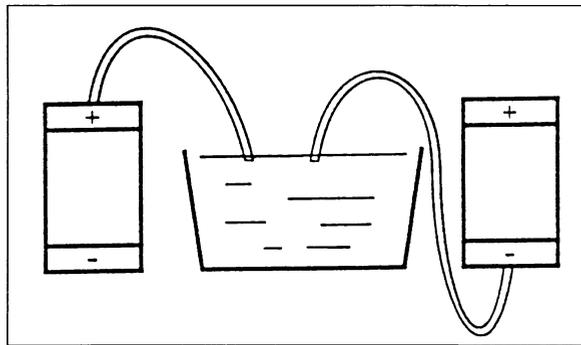


Figure 2 : Dispositif expérimental de De La Rive

En dépit du fait que leur caractère inopérant soit reconnu, ces procédures sont reprises par des physiciens de renom tel que De La Rive, qui note en 1825 : *"Ainsi je me suis assuré qu'on ne réussit point à produire de décompositions chimiques en plongeant uniquement dans le liquide l'un des pôles de la pile, et pas mieux en plongeant les deux pôles opposés de deux piles différentes."* (Fig. 2).

Réalisées en 1820, les expériences d'OErsted inaugurent en quelque sorte la deuxième transition entre l'électricité statique et l'électricité dynamique. Elles permettent de mettre en évidence la déviation d'une aiguille aimantée placée près du fil conducteur reliant les pôles d'une pile voltaïque.

Rompant avec les démarches expérimentales de ses contemporains, OErsted explique clairement la nécessité opératoire de fermeture du "circuit" pour produire le nouveau phénomène. Mais il reporte la causalité sur les deux pôles en parlant du "*conflit électrique*", terme réservé au XVIII^e siècle aux effets de décharge entre pôles (Bauer, 1948).

Bien que les travaux d'Ampère à partir de 1820 montrent des propriétés communes à la pile et au conducteur de connexion (déviation d'aiguilles aimantées), le courant électrique est encore fréquemment interprété à l'époque au moyen d'un modèle des courants antagonistes : les pôles de la pile sont considérés comme des "*sources indéfinies d'électricités contraires*" (Pouillet, 1828) alors que "*le conducteur interpolaire réunit incessamment les électricités accumulées.*" (Lame, 1837)

C'est seulement en 1836 que Peltier présentera une vue du circuit électrique quelque peu systémique : "*... la pile et le conducteur de connexion constituent un système unique dont toutes les parties sont solidaires en sorte que l'électromoteur n'est plus dans les mêmes conditions quand, par exemple, le conducteur est modifié.*" (Peltier, 1836b)

3. ÉTUDE EMPIRIQUE

Sans prétendre à un parallélisme strict entre l'ontogenèse et la phylogénèse, nous pensons que des difficultés semblables à celles rencontrées historiquement peuvent exister au plan didactique. C'est ce que l'étude expérimentale, dont les principaux résultats sont présentés ci-dessous, va montrer.

Les populations concernées par l'étude empirique sont reprises dans le tableau 1. Elles ont en principe toutes reçu un enseignement de l'électricité dans leur cycle. Si tel n'était pas le cas, il en serait fait explicitement mention.

ALGÉRIE	FRANCE
* 2 ^e AS (grade 11) filiale sciences et mathématique	* 2de (grade 10) * Première (grade 11)
* 3 ^e AS (grade 12)	* Terminale (grade 12) filiale scientifique
* Univ. 1 première année universitaire filiale scientifique	* DEUG 1 * DEUG 2 première et seconde années d'enseignement universitaire en science

Tableau 1 : Populations

La première situation (Fig. 3) utilisée lors de l'étude empirique est directement inspirée du dispositif expérimental de De La Rive (voir Fig. 2).

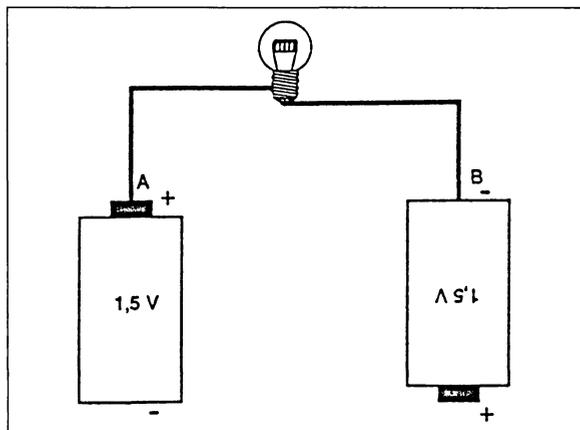


Figure 3 : Situation 1

La question est la suivante :

– L'ampoule brille-t-elle ? OUI NON Pourquoi ?

Du fait de l'absence de fermeture du circuit, il n'y a pas de différence de potentiel entre les bornes A et B et l'ampoule ne brille pas. Les fréquences des réponses obtenues sont synthétisées dans le tableau 2.

	FRANCE				ALGÉRIE	
	2de avant ens.	2de après ens.	1 ^{re}	DEUG	2 ^e AS	Univ. 1
OUI	69	19	10	16	55	51
NON (correcte)	31	81	90	82	44	49
S.R.	0	0	0	2	1	0
N	35	53	60	83	112	94

Tableau 2 : Situation 1

La réponse correcte (NON) est largement majoritaire dans les populations françaises après enseignement, encore qu'on puisse s'étonner qu'en DEUG 16% des étudiants estiment encore que l'ampoule peut s'allumer dans cette situation. Les justifications de la réponse correcte reposent essentiellement sur l'argument de non-fermeture du circuit électrique, souvent évoqué de façon purement opératoire comme dans cet exemple :

– “*Tout d’abord j’ai essayé et la lampe ne s’est pas allumée et pour que la lampe s’allume il faut que le circuit soit fermé et dans ce cas il ne l’est pas.*” (2^e AS)

La réponse OUI est la réponse spontanée de la très grande majorité des élèves de seconde avant enseignement, ainsi que de la majorité des étudiants algériens même après enseignement. Au sujet des populations algériennes, notons qu’au second cycle du secondaire, l’électricité n’est enseignée, en Algérie, qu’en deuxième année et qu’un enseignement substantiel d’électrostatique constitue la base de l’étude de l’électrocinétique. En première année d’université la même démarche est généralement adoptée (cours d’électrostatique suivi de l’analyse des circuits électriques). Cette prépondérance de l’électrostatique renforcerait, selon nous, les dispositions des étudiants à pratiquer un réinvestissement électrostatique inadéquat.

Les justifications à la réponse OUI sont quasi unanimement argumentées sur la différence de signe des charges aux pôles comme le montrent les exemples suivants :

– “*Car les électrons de la pile 2 chargés négativement sont attirés par le pôle + de la pile 1. Ils passeront donc par le filament et allument ainsi l’ampoule.*” (DEUG 1)

– “*Car le courant électrique va normalement du + vers le -. Le circuit peut être ouvert du fait de la présence de deux générateurs.*” (Seconde)

On ne peut s’empêcher de penser ici à l’expression de Pouillet citée plus haut à propos des pôles de la pile : “*sources indéfinies d’électricités contraires*”. Une élève de 2^e AS se référant à une expérience précédente affirme néanmoins que l’ampoule doit s’allumer :

– “*Car il y a, quelles que soient les deux piles [...] passage d’électrons de l’une à l’autre. Mais j’ai fait cette expérience et elle n’a pas marché.*”

Commentaire qui illustre parfaitement les propos de Greco : “*La vérité de l’idée est plus coercitive que la vérité du fait si elle provient non d’une conjecture arbitraire, mais d’une certaine logique correcte ou incorrecte ou, pour mieux dire, complète ou incomplète.*” (Greco & Piaget, 1959)

Revenant aux réponses correctes, nous voudrions montrer qu’elles ne préjugent en rien d’une maîtrise du concept de circuit électrique, l’argument opératoire dominant provisoirement les arguments de type “électrostatique”. C’est pourquoi nous avons utilisé la situation 2 suivante (Fig. 4) et posé la même question :

– L’ampoule brille-t-elle ? OUI NON Pourquoi ?

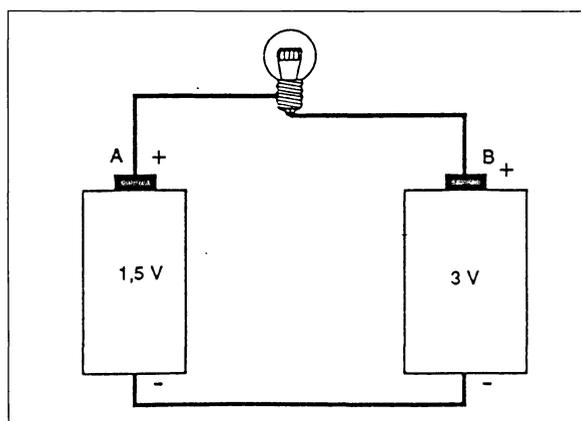


Figure 4 : Situation 2

Les fréquences des réponses obtenues sont rassemblées dans le tableau 3.

	FRANCE				ALGÉRIE		
	2de avant ens.	2de après ens.	1 ^{re}	Term.	2 ^e AS	3 ^e AS	Univ. 1
OUI (correcte)	6	24	10	41	34	20	35
NON	91	76	90	57	64	77	56
S.R.	3	0	0	2	0	3	9
N	35	21	103	44	204	71	45

Tableau 3 : Situation 2

On expliquera aisément les différences de résultats entre populations par le fait que la première classe a été interrogée avant enseignement et que les élèves de première appartiennent à des classes non spécifiquement scientifiques, alors que ceux de terminale appartiennent à une filière scientifique ; il reste que le fait dominant est que, pratiquement dans tous les cas, 60 à 90% des élèves interrogés pensent qu'il est impossible à l'ampoule de s'allumer. Quels sont leurs arguments ?

- "L'ampoule ne peut s'allumer, car elle se trouve entre deux bornes positives, et donc le courant ne circule pas." (Première)
- "Elle ne peut pas briller car il y a répulsion entre les deux pôles car ils sont tous les deux positifs." (2^e AS)
- "Car pour allumer une ampoule, il faut qu'il lui arrive un courant + et un courant -, alors que dans ce schéma il lui arrive deux courants +." (Seconde avant enseignement)

Ce dernier commentaire, où l'on relève des traces du modèle des courants "antagonistes", n'est pas fondamentalement différent des autres ; ils se caractérisent tous par l'argument : "absence de dissymétrie de signe de charges aux pôles", et manifestent ici aussi un réinvestissement "électrostatique" inapproprié qui fait obstacle à la maîtrise du concept de circuit électrique. Nous parlerons à ce propos de "raisonnement électrostatique".

Ce même raisonnement "électrostatique" pollue également l'étude de l'électrostatique elle-même comme nous allons maintenant le voir avec la situation 3 (Fig. 5).

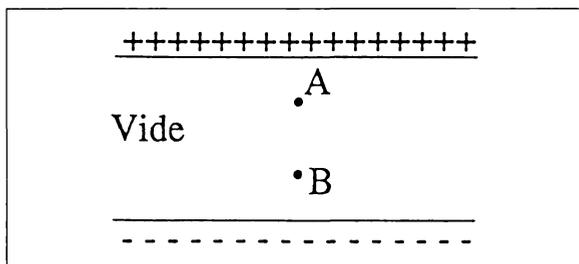


Figure 5 : Situation 3.

La question proposée aux étudiants est la suivante :
 A et B sont deux points pris dans l'espace compris entre deux plaques conductrices chargées, l'une positivement, l'autre négativement et se faisant face dans le vide. Existe-t-il une différence de potentiel entre les points A et B ?
 OUI NON Pourquoi ?

Le tableau 4 présente les fréquences des réponses obtenues.

	FRANCE				ALGÉRIE	
	2nde	1 ^{re}	Term.	DEUG 1	3 ^e AS	Univ. 1
OUI (correcte)	33	22	48	59	37	30
NON	67	64	52	32	63	65
S.R.	0	14	0	9	0	5
N	70	14	27	83	38	74

Tableau 4 : Situation 3

A l'exception d'une seule population de DEUG, la réponse très largement majoritaire est la réponse incorrecte correspondant à une absence de différence de potentiel aux points A et B, justifiée par une absence de charge en ces points comme l'illustrent les commentaires suivants :

- *“Les points A et B sont neutres. Ils ne sont pas chargés de signes contraires.”* (Seconde)
- *“A et B ne sont pas matériels. Ils ne possèdent pas de charge donc il n’y a pas de ddp entre A et B.”* (DEUG 1)
- *“A et B non chargés d’électricité ; les deux plaques ne peuvent être d’aucun effet sur les deux points.”* (2^e AS)

Ainsi donc le concept de potentiel, d’un niveau d’abstraction élevé, est remplacé par celui de charge électrique, plus facilement substantialisable et disponible dans le savoir précédemment acquis. Il s’agit non seulement d’un concept de charge substantialisé, mais aussi déconnecté d’autres concepts, qui peut se suffire à lui-même, remplaçant avantageusement le champ et le potentiel. Les propriétés d’attraction et de répulsion de ces charges règlent l’essentiel des mécanismes des phénomènes dans lesquels elles sont impliquées. On retrouve ici les caractéristiques que Closset (1983) a attribué au pseudo-concept de courant utilisé par les élèves et les étudiants et qu’il a baptisé “notion” pour le différencier du concept du physicien. Le raisonnement “naturel” est ici aussi, comme en électrocinétique, essentiellement monotionnel.

4. CONCLUSIONS

L’analyse historique a permis de mettre en évidence, dans les démarches d’appréhension des phénomènes de courant, un processus de réinvestissement de conceptions et de procédures opératoires liées à une première approche de l’électricité statique. A la lumière des résultats de l’enquête précédente, on peut penser qu’une partie des raisonnements des élèves en électrocinétique est mobilisée à partir d’un fonds conceptuel intégrant des connaissances plus ou moins intuitives d’électrostatique. Cette analogie du “cadre de référence” de l’étude du circuit électrique sur les deux plans, historique et individuel, rend plausible l’observation de similitudes entre les démarches historiques et les raisonnements des élèves.

Le point commun le plus frappant est l’attitude de focalisation sur les pôles. Au plan historique les perspectives de recherche et d’interprétation, limitées par un cadre de référence lié à l’électricité statique, ne prenaient que peu en compte les situations de circuit fermé ; les nouveaux phénomènes ne pouvaient dès lors représenter tout au plus qu’une extension de phénomènes électroscopiques ou de décharge (au sens de l’époque). Aussi la distinction circuit ouvert - circuit fermé ne pouvait-elle être significative à ce moment. Ce contexte impliquait donc le recours à une causalité polaire. Les élèves manifestent également dans leur raisonnement une focalisation sur les pôles qu’ils “voient” comme “isolés”. Ils affectent à ces pôles des charges qui sont considérées comme l’élément essentiel de l’analyse du circuit. Dans cette perspective la distinction circuit ouvert - circuit fermé n’apparaît pas pertinente.

A partir de 1820, s'est imposée l'idée qu'en fermant le circuit on pouvait obtenir des phénomènes irréductibles à l'électricité statique. La notion de circuit ainsi dégagée n'impliquait pas néanmoins une idée claire sur la circulation électrique, mais visait surtout la continuité morphologique des montages utilisés. La focalisation sur les pôles, encore persistante, s'est adaptée à l'objet nouveau qu'est le circuit fermé : les "excès d'électricité" développés aux pôles de la pile génèrent dans le conducteur de "connexion", le "courant électrique", euphémisme désignant l'ensemble de deux "courants antagonistes". Même si la majorité des élèves testés ont dépassé ce modèle des courants antagonistes, leur comportement s'est pareillement adapté à la nécessité opératoire de fermeture du circuit : le modèle le plus fréquemment observé correspond au mouvement de charges issues d'un pôle du générateur et attirées par les charges d'un autre pôle de signe contraire.

Le parallélisme que nous avons observé trouve sans doute son explication dans une certaine économie de pensée impliquant une tendance à se fonder sur ce qui est le plus accessible du point de vue conceptuel pour appréhender le réel. Le substantialisme dont on a eu l'occasion de vérifier la prégnance sur les deux plans évoqués, serait alors à relier à cette tendance.

BIBLIOGRAPHIE

- AVERLAND P. et al. (1979). *Physique 4^e*. Paris, Hachette.
- BAUER E. (1948). *L'électromagnétisme, hier et aujourd'hui*. Paris, Albin Michel.
- BENSEGHIR A. (1989). *Transition électrostatique-électrocinétique : point de vue historique et analyse des difficultés des élèves*. Thèse. Paris, Université Paris 7.
- BIOT J.-B. (1801). Rapport fait à la classe des sciences mathématiques et physiques de l'institut national sur les expériences du cit. Volta. *Annales de Chimie*, n° 41, pp. 3-23.
- BLONDEL C. (1982). *Ampère et la création de l'électrodynamique*. Paris, Bibliothèque Nationale.
- BROWN T. (1969). The electric current in early nineteenth century french physics. In *Historical studies in the physical sciences*. Vol. 1. Princeton, Russel-Mac Cormmach, pp. 61-103.
- CLOSSET J.-L. (1983). *Le raisonnement séquentiel en électrocinétique*. Thèse. Paris, Université Paris 7.
- CLOSSET J.-L. (1983). Les obstacles à l'apprentissage de l'électrocinétique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 716, pp. 931-950.
- CUVIER G. (1801). Rapport sur le galvanisme. *Journal de Physique*, n° 52, pp. 318-324.

DE LA RIVE A. (1825). Mémoire sur quelques uns des phénomènes que présente l'électricité voltaïque dans son passage à travers les conducteurs liquides. *Annales de Chimie et de Physique*, n° 28, pp. 190-221.

GRECO P. & PIAGET J. (1959). *Apprentissage et connaissance*. Paris, PUF.

HAÛY R.J. (1803). *Traité élémentaire de physique*, tome 1, 1^{re} édition. Paris, Deterville.

JOHSUA S. (1982). *L'utilisation du schéma en électrocinétique : aspects perceptifs et aspects conceptuels*. Thèse. Marseille, Université de Provence.

JOHSUA S. & DUPIN J.-J. (1988). La gestion des contradictions dans les processus de modélisation en physique, en situation de classe. In *Didactique et acquisition des connaissances scientifiques, actes du colloque de Sèvres, mai 1987*. Paris, La Pensée Sauvage.

JOUGUET M. (1955). *Traité d'électricité théorique*, tome 2. Paris, Gauthiers-Villars.

KUHN T.S. (1973). *La structure des révolutions scientifiques*. Paris, Flammarion.

LAMÉ G. (1837). *Cours de l'école polytechnique*, tome 2, 2^e partie. Paris, École Polytechnique.

MICHAUD Y. & LE MOAL Y. (1979). *Physique 4^e*. Paris, Magnard.

MICHAUD Y. & LE MOAL Y. (1983). *Physique 4^e*. Paris, Magnard.

MOSCOVICI S. (1976). *La psychanalyse, son image, son public*. Paris, PUF, 2^e édition.

PFAFF C.-H. (1829). Défense de la théorie de Volta relative à la production de l'électricité par le simple contact, contre les objections de M. le Professeur De La Rive. *Annales de Chimie et de Physique*, n° 41, pp. 236-247.

PELTIER A. (1836). Courants électriques. Définition des expressions Quantité et Intensité. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, n° 2, pp. 475-476.

POLVANI G. (1949). L'invention de la pile. *Revue de l'histoire des sciences*, n° 2, pp. 340-351.

POUILLET C.S.M. (1828). *Éléments de physique expérimentale*, tome 1, 1^{re} édition, p. 635.

POUILLET C.S.M. (1847). *Éléments de physique expérimentale*, tome 1, 5^e édition, p. 596.

ROSSER W.G.V. (1970). Magnitudes of surfaces charge distributions associated with electric current flow. *American Journal of Physics*, n° 38, pp. 265-266.

ROZIER S. (1988). *Le raisonnement linéaire causal en thermodynamique classique élémentaire*. Thèse. Paris, Université Paris 7.

SAISON A., MALLEUS P., HUBER P. & SEYFRIED B. (1979). *Physique 4^e*. Paris, Nathan.

SANNER M. (1983). *Du concept au fantasme*. Paris, PUF.

THENARD L.-J. (1813). *Traité élémentaire de chimie*, tome 1, 1^{re} édition. Paris, Guérin.

TIBERGHIEU A. & DELACÔTE G. (1976). Manipulations et représentations de circuits électriques simples par des enfants de 7 à 12 ans. *Revue Française de Pédagogie*, n° 34, pp. 32-44.

VARNEY R.N. & FISCHER L.H. (1980). Electromotive force : Volta's forgotten concept. *American Journal of Physics*, n° 48, pp. 405-408.

VOLTA A. (1801a). Lettre du professeur Volta à J.-C. De La Mètherie sur les phénomènes galvaniques. *Journal de Physique*, n° 53, pp. 309-316.

VOLTA A. (1801b). De l'électricité dite galvanique. *Annales de Chimie*, n° 40, pp. 223-256.

VOLTA A. (1802). Lettre de Volta sur l'identité du fluide électrique avec le prétendu fluide galvanique, à M. Bancks. *Journal de Chimie*, n° 2, pp. 158-169.