

Charges et champs électriques : difficultés et éléments de stratégie pédagogique en Mathématiques Spéciales Technologiques

Charges and electric fields : difficulties and teaching strategies in «Mathématiques Spéciales Technologiques»

Sylvie RAINSON, Laurence VIENNOT

Laboratoire de Didactique de la Physique dans l'Enseignement Supérieur
Université Denis Diderot, Case 7021
2 place Jussieu
75251 Paris cedex 05, France.

Résumé

Cet article décrit une séquence d'enseignement visant à guider des étudiants de Mathématiques Spéciales Technologiques dans la construction des concepts de charge et de champ électriques. Il expose d'abord une analyse du contenu de la cible conceptuelle et un résumé des principaux résultats d'une enquête préliminaire sur les difficultés communes dans ce domaine. La description de la séquence, expérimentée cinq ans de suite en deux versions successives, est suivie d'un exposé de la méthode utilisée pour l'évaluation – des «profils conceptuels de

groupe» – et des résultats ainsi obtenus. Une discussion sur les approches adoptées dans la séquence et dans l'évaluation termine l'article.

Mots clés : *champ électrique, modes de raisonnements, séquence d'enseignement, profils conceptuels, didactique de la physique.*

Abstract

This paper describes a teaching sequence of the «guided construction» type, dealing with electric charge and field. Two versions of this sequence were successively implemented at college level in an institutional framework subject to severe constraints : «Classe de Mathématiques Spéciales Technologiques», in France. A content analysis of the conceptual target and the main results of an investigation of common ways of reasoning are discussed. The evaluation method, using «group conceptual profiles», is explained and illustrated with the main findings. A discussion of the approche adopted in the teaching sequence and in the evaluation ends the paper.

Key words : *electric field, ways of reasoning, teaching sequence, conceptual profile, didactics of physics.*

Resumen

Este artículo describe una secuencia de enseñanza dedicada a guiar a los estudiantes de "Mathématiques Spéciales Technologiques" (sistema francés) en la elaboración de los conceptos de carga y de campo eléctrico. Expone primero un análisis del contenido del objetivo conceptual y un resumen de los principales resultados de una encuesta previa sobre las dificultades comunes en este campo. La descripción de la secuencia experimentada cinco años seguidos en dos versiones sucesivas precede una ponencia sobre el método de valoración – de los perfiles conceptuales por grupo – y de los resultados así logrados. Una discusión sobre los métodos utilizados en la secuencia y en la valoración rematan el artículo.

Palabras claves : *campo eléctrico, modo de razonamiento, secuencias de enseñanza, perfiles conceptuales, didáctica de la ciencia física.*

1. INTRODUCTION

Après deux décades de recherche intensive sur les conceptions et raisonnements communs concernant les sciences, le centrage principal de la recherche en didactique s'est déplacé vers l'étude des processus d'enseignement et d'apprentissage et donc vers l'évaluation de séquences d'enseignement.

Un credo constructiviste longtemps répandu (voir par exemple Driver, 1989, citée par Millar, 1989) consiste à vouloir calquer la démarche

d'enseignement sur les étapes d'apprentissage considérées comme nécessaires, c'est-à-dire l'explicitation des idées communes, leur confrontation avec d'autres éléments contradictoires, et la résolution des conflits ainsi engendrés. Rapidement, il s'est avéré que l'expérience seule ne pouvait provoquer des basculements cognitifs même temporaires, lorsqu'il s'agissait de remettre en cause l'une de ces idées ou l'un de ces raisonnements non conformes à la physique à la fois très répandus et très résistants à l'enseignement : plutôt nier l'indication des ampèremètres que d'admettre que le courant ne s'use pas dans un circuit en série (Johsua & Dupin, 1989). Et d'ailleurs, au point où en est la connaissance scientifique, pourrait-on sérieusement prétendre que les aspects retenus comme objectifs d'enseignement peuvent tous émerger de la mise en oeuvre d'expériences, même dans une démarche hypothético-déductive ?

Restent donc à trouver les composantes d'un enseignement plus efficace que celui dont vingt ans d'études ont montré les limites, en intégrant l'apport considérable de nos connaissances sur les conceptions et raisonnements des apprenants, mais sans l'illusion d'une solution simple centrée sur le seul conflit cognitif.

Millar (ibid.), dès 1989, avait plaidé pour que l'enseignement ne se détermine pas seulement à partir de cette séquence théorique de l'apprentissage – explicitation/confrontation/résolution – arguant, non sans humour, que les chercheurs en didactique eux-mêmes pensaient connaître leur discipline sans avoir été exposés à ce traitement. Lijnse (1994), très radical dans son souhait d'une détermination de l'enseignement centrée sur l'apprenant, «du bas vers le haut», rejoint pourtant Millar pour recommander l'étude de parcours d'apprentissage détaillés, domaine par domaine. Certes, il s'agit surtout pour lui de déterminer des tâches propres à susciter chez les apprenants de fructueux débats, tandis que Millar envisage plutôt l'enchaînement soigneux des concepts assignés comme objectifs à l'enseignement. Mais, *in fine*, il s'agit, d'une manière ou d'une autre, d'une construction conceptuelle guidée, dans un processus où le maître occupe une place déterminante. Il existe un ensemble de connaissances, objets de consensus dans la communauté savante, dont certains aspects doivent être introduits comme objets et outils de pensée chez des apprenants qui n'en ont au départ à peu près rien à faire. Au maître de susciter la motivation et de guider le parcours : telle est la position qui inspire la séquence étudiée ici, qui rejoint aussi celles exprimées par Johsua (1995) et Ogborn et al. (1996).

Le «comment» de cette opération est une question très ouverte. L'exemple traité ici, au delà d'une proposition particulière, illustre à quel point cette question du «comment» est liée à la détermination de ces aspects du contenu consensuel que l'on décide de prendre comme objectifs

d'enseignement. Autrement dit, le «quoi» et le «comment» sont des questions liées. Le contenu de la physique acceptée est bien unique, mais ce n'est pas seulement un morceau de ce contenu que l'on décide d'enseigner, c'est un morceau plus un «éclairage». La détermination de celui-ci s'effectue, dans notre démarche, en s'appuyant à la fois sur l'analyse de contenus et sur l'étude des difficultés communes des apprenants.

Dans le cas présent, le contexte de l'expérimentation est une classe de Mathématiques Spéciales Technologiques, c'est-à-dire qu'il est extrêmement contraint : le contenu à enseigner sur le sujet abordé ici – charges et champs – est parfaitement défini, en principe, et les horaires et conditions d'enseignement sont lourdement déterminés à la fois par les directives nationales et par la perspective des concours de fin d'année. C'est donc uniquement par des actions «à la marge» que se définira l'éclairage particulier dont on vient de parler. S'il s'agit d'évaluer une séquence d'enseignement, il importera tout naturellement de prendre en compte aussi bien les objectifs particuliers liés à cet éclairage novateur, inspiré par l'analyse des difficultés communes, que les aspects les plus classiques des contenus à enseigner. Nous reviendrons en fin d'article sur ce point, après avoir successivement explicité le domaine conceptuel en cause, les difficultés observées lors d'une enquête préliminaire et les éléments de stratégie pédagogique qui ont été mis en oeuvre et évalués.

2. CHARGES ET CHAMPS ÉLECTRIQUES : ASPECTS RETENUS

Nous nous centrons ici sur la relation entre les charges et les champs électriques associés, dans un contexte – statique ou quasi-statique – où cette relation s'exprime par la loi de Coulomb [$\vec{E}(M) = (q/4\pi\epsilon_0 r^2)\vec{u}$, en notations habituelles]. Plus particulièrement encore, c'est l'indissolubilité de ce lien entre une charge et son champ qui est le point de mire de notre étude, tandis que la dépendance inverse du champ au carré de la distance n'y fait pas l'objet d'attention particulière, pas davantage que la question importante de la distinction entre force et champ.

L'un de nos mobiles dans cette étude est la constatation, faite par plusieurs chercheurs (Eylon & Ganiel, 1990 ; Barbas & Psillos, 1993 ; Härtel, 1993 ; Sherwood & Chabay, 1993 ; White et al., 1993 ; Psillos, 1995 ; Chabay & Sherwood, 1995) que les étudiants sont très loin d'une vision unifiée de l'électrostatique et de l'électrocinétique, ce qui conduit à proposer de faciliter la compréhension des circuits électriques par une étude des régimes transitoires préalables à l'établissement d'un courant permanent. Une telle analyse amène notamment Sherwood & Chabay (ibid.) à

s'intéresser aux charges superficielles qui expliquent que le champ suive la direction des fils, par opposition à une centration exclusive sur les charges polaires (Benseghir & Closset, 1993, 1996). Il nous semble que ces propositions sont tout à fait intéressantes, mais aussi qu'il y a peu d'espoir pour avancer sur ce plan si la compréhension du lien fondamental entre charge et champ n'est pas véritablement en place.

Par ailleurs, les premiers résultats de notre enquête (Viennot & Rainson, 1992) ont vite montré que, dans le seul cadre de l'électrostatique, ce lien faisait parfois défaut dans les raisonnements estudiantins.

Le contenu de physique au centre de cette étude est donc en fait le principe de superposition ainsi exprimé.

Considérons un certain nombre de particules de charge électrique q_1, q_2, \dots, q_i . Pour des positions données, les interactions deux à deux entre ces charges sont les mêmes que si les deux charges considérées étaient seules dans l'espace et l'on peut ajouter les forces ainsi calculées pour trouver la force totale \vec{F} exercée sur l'une d'elles. Ceci revient à dire que toutes les charges présentes à un instant donné dans une situation quasi-statique contribuent au champ électrique en tout point de l'espace selon la même loi, celle de Coulomb.

Ce principe *a priori* simple à comprendre est-il mis en oeuvre, quelle que soit la situation, ou bien certaines conduisent-elles les étudiants à le nier de fait ? Cette question oriente une enquête sur les raisonnements communs d'étudiants de niveau universitaire dont nous ne citons ici que les principaux résultats.

3. ENQUÊTE SUR LES RAISONNEMENTS COMMUNS DES ÉTUDIANTS

Environ deux mille étudiants de tous niveaux universitaires ont participé à cette enquête (synthèses des résultats : Rainson, 1995 ; Viennot, 1996). L'annexe 1 précise les acquis supposés de chacun des niveaux envisagés, notés par ordre d'avancement croissant, *G1* à *G4*. Nous avons interrogé des étudiants français, suédois et algériens, sans différence notable entre eux pour ce qui est des résultats cités ici.

Après un premier constat sur le peu de relations spontanément établies entre électrostatique et électrocinétique, nous décrivons des questions plus ciblées sur deux obstacles importants qui semblent largement associés à des aspects causaux du raisonnement.

Déconnexion entre électrostatique et électrocinétique : le champ dans les fils

Le questionnaire «CF» figurant en annexe 2 a été présenté en France à diverses populations : des étudiants de Mathématiques Supérieures (G_2) jusqu'à des doctorants en formation à l'enseignement supérieur (G_4). On s'y intéresse au champ dans diverses portions d'un circuit électrique extrêmement simple, de forme rectangulaire. Les directions et les sources du champ sont demandées. C'est ensuite plus particulièrement sur la cause des changements de direction du champ que porte le questionnement, ainsi que sur cette interrogation de deuxième degré : «vous étiez-vous déjà posé cette question ?».

Au delà des résultats détaillés sur les causes avancées pour l'existence et les changements de direction du champ dans les fils, (ceux-ci sont majoritairement associés aux charges polaires et/ou aux potentiels existant à divers niveaux sur le trajet des fils et/ou à l'intensité, laquelle manifeste l'existence du champ), un résultat massif (Rainson et al., 1994) est que moins de 1 % des étudiants dans tous les échantillons interrogés évoque l'existence des charges de surface grâce auxquelles la direction du champ suit celle des fils. Surtout, les étudiants ne sont guère plus nombreux (5%) à dire s'être jamais demandé auparavant ce qui pouvait bien justifier les changements de direction du champ. Le circuit figuré sur le schéma proposé ne ressemble pourtant pas aux lignes de champ d'un dipôle («+Q, -Q», équivalent supposé du générateur), pas plus que n'importe quel circuit électrique réaliste ou symbolisé. C'est cette absence de questionnement que nous retenons donc ici, sans pourtant nous en étonner outre mesure, sachant bien que ce n'est pas l'enseignement habituel qui soulève cette question, ni qui se préoccupe de vision unifiée entre électrostatique et électrocinétique (on trouvera une étude de manuels dans Rainson, 1995).

À supposer que l'on souhaite remédier à cet état des choses, il faudrait que cette contribution simultanée de toutes les charges du circuit à l'existence et à la direction du champ soit bien comprise, et donc le principe de superposition maîtrisé. La compréhension de ce point est l'objet du corps de notre étude de raisonnements.

Obstacles à la compréhension du principe de superposition et causalité

À l'aide de dix entretiens préliminaires avec des étudiants de deuxième année universitaire scientifique (Rainson, 1995), deux traits de raisonnement sont apparus comme des obstacles majeurs, en relation avec une vision causale des situations physiques proposées.

Cette intervention de la causalité dans les difficultés observées n'est pas pour surprendre. La question de l'interprétation causale des co-occurrences n'est pas nouvelle. Le fait que la charge électrique et son champ, co-occurent s'il en est, donnent lieu à l'interprétation causale est prévisible : la charge ne «*crée*»-t-elle pas son champ, comme on le dit souvent ? La causalité physique impose qu'il y ait un décalage temporel entre une modification de la source et une variation du champ, mais ce point ne semble pas au coeur de la réflexion de ceux qui s'expriment ainsi. La charge est responsable de son champ, voilà qui suffit en général pour mettre l'analyse causale en branle.

Mais les recherches didactiques ont montré à la fois l'importance de la composante causale et les limites de sa pratique dans les raisonnements des apprenants (De Kleer & Brown, 1981 ; Driver et al., 1985 ; Andersson, 1986 ; Rozier & Viennot, 1991 ; Gutierrez & Ogborn, 1992 ; Ogborn, 1993 ; Viennot, 1993, 1996). C'est le plus souvent une réduction de l'analyse que l'on observe, le maillon de base du raisonnement étant l'association d'une seule cause à un seul effet observable, ce qui, à l'occasion, laisse en chemin d'autres variables pertinentes. Or la question de la superposition des champs renvoie, par définition, à une multicausalité.

Les obstacles observés dans notre étude appartiennent à ce registre. Résumons-les brièvement.

«*Champ si mobilité*»

Cette formule traduit le fait suivant : les étudiants raisonnent souvent comme si une cause n'existait qu'en cas d'effet manifeste. Cette façon de penser les conduit à refuser l'existence d'un champ en un point où les charges ne peuvent pas circuler.

Cette conclusion s'appuie sur une première série de questionnaires qui mettent en jeu des isolants (Viennot & Rainson, 1992). Les questionnaires IS₁ et IS₂, donnés en annexe 3, interrogent sur la contribution au champ, en un point d'un isolant, d'une charge extérieure à cet isolant, et inversement, sur la contribution d'une charge, située dans un isolant, au champ en un point extérieur. Outre les justifications des réponses correctes («*OUI, la charge crée un champ...*»), on trouve deux catégories principales de commentaires :

– l'une regroupe les justifications qui font allusion au «*rôle bloquant de l'isolant*» :

«*La propriété isolante du corps empêche le champ de pénétrer*» (IS₁, G₁);

«*L'isolant bloque le champ à l'intérieur du corps....*» (IS₂, G₁).

– l'autre regroupe les allusions à l'impossibilité du mouvement des charges :

«Comme ce corps est un isolant, les charges à l'intérieur sont immobiles. Si q créait un champ, les charges à l'intérieur seraient soumises à un champ électrique»(IS_1, G_2).

Ces deux catégories de commentaire sont exclusives du point de vue du décompte des justifications, puisqu'elles se différencient par la mention explicite de la non-mobilité des charges. La première rassemble de 44% ($G_1, N=64$) à 19% ($G_4, N=64$) des étudiants, la seconde de 25% ($G_1, N=64$) à 14% ($G_4, N=64$) (Rainson, 1995). Si l'on regroupe tous ces commentaires centrés avec plus ou moins de précision sur l'idée qu'un isolant rend impossible l'interaction électrostatique entre charges, on obtient des taux impressionnants d'étudiants concernés : de 69% à 33%, selon le niveau d'étude. Le lien indissoluble entre charge et champ est oublié, la cause étant, semble-t-il, «bloquée» ou simplement non manifestée par un effet, sans autre évocation (notamment des charges de polarisation).

Un second questionnaire vise la même difficulté (Rainson et al., 1994). Le questionnaire «TN» (annexe 4) met en scène deux surfaces équipotentielles planes, à des potentiels différents, réunies par une zone conductrice et deux zones isolantes s'étendant chacune d'une plaque à l'autre. Aux effets de bord près, le champ dans ces zones est le même, perpendiculaire aux plaques et d'intensité donnée par la relation $E=|V_1-V_2|/d$, où d est la distance entre plaques. La difficulté est d'admettre cette identité alors que les effets du champ sont très différents dans les deux types de zone : un courant permanent s'établit dans la zone conductrice alors que les zones isolantes s'installent dans un régime de polarisation statique.

De 44 % ($G_2, N=80$) à 68 % ($G_4, N=78$) des étudiants nient l'égalité des champs dans les différentes zones. De 31 % ($G_3, N=77$) à 43 % ($G_1, N=185$) attribuent la différence des champs explicitement à la différence des matériaux, ou à la présence d'isolant, argumentation assortie éventuellement de commentaires tels que :

«Le champ électrique n'existe que dans les zones conductrices. Le rôle de l'isolant est d'isoler, comme le suggère son nom, et donc il amortit ou supprime le champ» (G_2) ;

«Puisqu'un isolant ne conduit pas l'électricité, le champ ne peut pas passer» (G_1) ;

ou encore à l'existence d'un courant, comme l'explique cette justification :

«Comme le champ électrique est responsable du courant et comme les courants sont différents dans le conducteur et dans l'isolant, alors les champs sont différents.» (G_2)

Par delà les différences d'occurrence de ces variantes selon le niveau scolaire (Rainson, 1995), le fait que quelque chose passe ou ne passe pas dans ces différentes zones se révèle déterminant pour accepter l'existence d'un champ.

L'obstacle «champ si mobilité» est à l'oeuvre.

Voyons le second.

«Cause dans la formule»

Dans cette rubrique, nous mettons les réponses qui peuvent s'interpréter en considérant que les étudiants attribuent un statut causal abusif aux «formules» : une grandeur, X , mentionnée dans l'expression algébrique d'une autre grandeur $G=f(X)$, est interprétée comme une «cause» exclusive du phénomène associé à cette grandeur G . Ceci conduit à ne pas prendre en compte la contribution au champ électrique total de charges dont la valeur ne figure pas explicitement dans l'expression de ce champ.

C'est un premier questionnaire sur le théorème de Gauss qui nous avait alertées sur ce point (Viennot & Rainson, 1992). La formule rituelle s'interprétait, pour 80% des étudiants universitaires interrogés, comme si, une fois un champ calculé en un point, on pouvait modifier les charges extérieures à la surface de Gauss correspondante sans modifier la valeur de ce champ. Motif avancé : ce sont les charges intérieures qui comptent (sous entendu ou explicité : «dans la formule»).

La seconde série de questionnaires clarifie ce point à propos du théorème de Coulomb, qui exprime le champ total (\vec{E}) au voisinage d'un conducteur par une formule où figure la densité de la charge σ présente *sur le conducteur au voisinage du point considéré* ($\vec{E} = \sigma/\epsilon_0 \vec{n}$, voir l'annexe 5). La variable σ , à première vue très locale, s'adapte en fait à la disposition de l'ensemble des charges présentes dans tout l'univers : les charges du conducteur s'y répartissent en fonction de toutes les autres. L'expression du champ (\vec{E}) est valable quelles que soient les charges extérieures au conducteur, et, même si cette expression ne mentionne que la variable σ , les sources du champ en question sont toutes les charges de l'univers.

Le questionnaire «C» donné en annexe 5C interroge notamment sur la validité de la formule de Coulomb dans le cas où une charge est placée assez près du conducteur en cause pour l'influencer.

La question est alors de savoir si la formule, $\vec{E} = \sigma/\epsilon_0 \vec{n}$ laisse croire, à tort, que les sources du champ sont exclusivement sur le conducteur. En fait, une compréhension complète de la situation consiste à considérer qu'une charge extérieure au conducteur a deux effets. L'un est de modifier la densité de charges sur le conducteur, par influence. L'autre, direct celui-là, demeure la contribution au champ total en tout point en vertu du principe de superposition.

On note un très faible taux de réponses complètement correctes (8%) et une difficulté manifeste à prendre en compte à la fois superposition et influence (Rainson et al., 1994 ; Rainson, 1995).

Certains commentaires mentionnent la superposition des contributions des charges du conducteur et de la charge extérieure q sous la forme d'une relation clairement erronée (avec ou sans prise en compte de l'influence) :

« q crée un autre champ \vec{E}' . En situation A, $\vec{E} = \sigma/\epsilon_0 \vec{n}$ est créé par le voisinage. En situation B, $\vec{E}_T = \vec{E} + \vec{E}'$ » (G_3);

« $\vec{E} = \sigma/\epsilon_0 \vec{n} + \vec{u}q/4\pi\epsilon_0 r^2$ » (G_3) ;

« $\vec{E} = \sigma'/\epsilon_0 \vec{n} + \vec{E}_q$ » (G_3).

Dans ces réponses, le premier terme apparaît comme la contribution supposée du conducteur et le second comme celle de la charge extérieure. La formule correcte $\vec{E} = \sigma/\epsilon_0 \vec{n}$ a donc été réinterprétée, et le champ \vec{E} attribué aux seules charges du conducteur (évoquées dans le membre de droite : $\sigma/\epsilon_0 \vec{n}$).

Nous avons, au vu de ces réponses, construit un questionnaire reproduit en annexe 5 (version C') qui confronte explicitement l'étudiant à la formule $\vec{E} = \sigma/\epsilon_0 \vec{n} + \vec{E}_q$ et lui demande de porter un jugement sur celle-ci. Un tiers environ des étudiants interrogés déclare, correctement, que la formule est fautive. Mais l'examen de certains arguments révèle une incompréhension :

« La formule est fautive, puisque σ change, il aurait fallu écrire :

$\vec{E} = \sigma/\epsilon_0 \vec{n} + \vec{E}_q$ » (G_2).

Ce sont finalement 75 % des étudiants interrogés qui montrent leur absence de maîtrise du problème.

4. ÉLÉMENTS D'UNE SÉQUENCE D'ENSEIGNEMENT

Ces diverses difficultés mises en évidence, il nous a semblé opportun de centrer une intervention pédagogique sur la mise en oeuvre du lien entre charge et champ d'abord dans des situations statiques. Le programme de Mathématiques Spéciales Technologiques comportant l'étude des conducteurs uniquement en équilibre électrostatique, l'obstacle susceptible d'intervenir était le second : « cause dans la formule » ; telle a donc été notre cible.

Trois étapes ont marqué la construction de la séquence. Toutes ont respecté les mêmes contraintes horaires (15 heures d'électrostatique pour

le cours et les exercices), de programme, de contexte qu'un enseignement normal. Dans tous les groupes expérimentaux, l'enseignante a été S. Rainson.

La première étape est l'échec total d'un premier essai, S_o , marqué par la conscience des problèmes, et l'insistance, le désir de clarté que tout enseignant motivé cherche à mettre en oeuvre dans ces cas-là.

La seconde est la mise en oeuvre (1992-1993) d'une séquence encore non totalement informée par les résultats de l'enquête sur les raisonnements et difficultés des étudiants : nous notons S_i cette séquence.

La forme finale de notre séquence, S_f , a été mise en oeuvre quatre années de suite (1993-1997) avec des résultats stables.

Les éléments de stratégie pédagogique utilisés sont décrits ci-dessous. Ils sont rapportés dans chaque cas aux séquences où ils ont été mis en oeuvre. On notera que la séquence S_i n'a mis en oeuvre que trois des quatre éléments exposés ci-dessous, tandis que la toute première séquence, S_o , n'en avait mis aucun.

Les deux premiers éléments de stratégie concernent les exposés de l'enseignant, les deux suivants sont intervenus surtout dans les débats proposés aux élèves.

Cause et effet associés sur transparent (S_i et S_f)

Il s'agit d'une action d'illustration. Chaque charge en cause est représentée avec son champ, dans une couleur donnée, sur un transparent donné : impossible d'amener cette charge quelque part sans son champ.

Multiplicité des causes : des corps chargés incongrus dans l'illustration des lois (S_i et S_f)

La remarquable puissance de «théorèmes» de l'électrostatique tels que celui de Gauss et son dérivé dit de Coulomb, rappelé en annexe, ou plus simplement d'un énoncé tel que «*le champ est nul à l'intérieur d'un conducteur en équilibre électrostatique*», ou encore des conditions de (dis)continuité des champs au passage d'une surface, est que ces énoncés sont indifférents à la présence de corps chargés au voisinage de ce dont on parle ; les valeurs des grandeurs changent, les lois demeurent. Cette multiplicité des causes possibles de champ, au delà de celles qui apparaissent dans «la formule», nous avons choisi de l'accentuer systématiquement dans la présentation du cours, par la présence incongrue, sur les dessins illustratifs, d'un bric-à-brac de corps chargés.

Multiplicité des effets : analyse approfondie (avec transparents) de la situation, charge près d'un conducteur (S_1 et S_2)

La situation particulière de charges ponctuelles au voisinage d'un conducteur a été l'objet d'une analyse approfondie, débattue en classe avec l'appui de transparents : celui associé à la charge extérieure, disons en vert, pour illustrer la permanence de l'effet direct, et un autre (en rouge) illustrant les charges développées par influence sur le conducteur et leur champ (effet indirect). La surprise de constater que le champ «créé par le conducteur» (rouge) n'est pas perpendiculaire à la surface du conducteur est attendue (figure 1), pour une stimulation du débat.

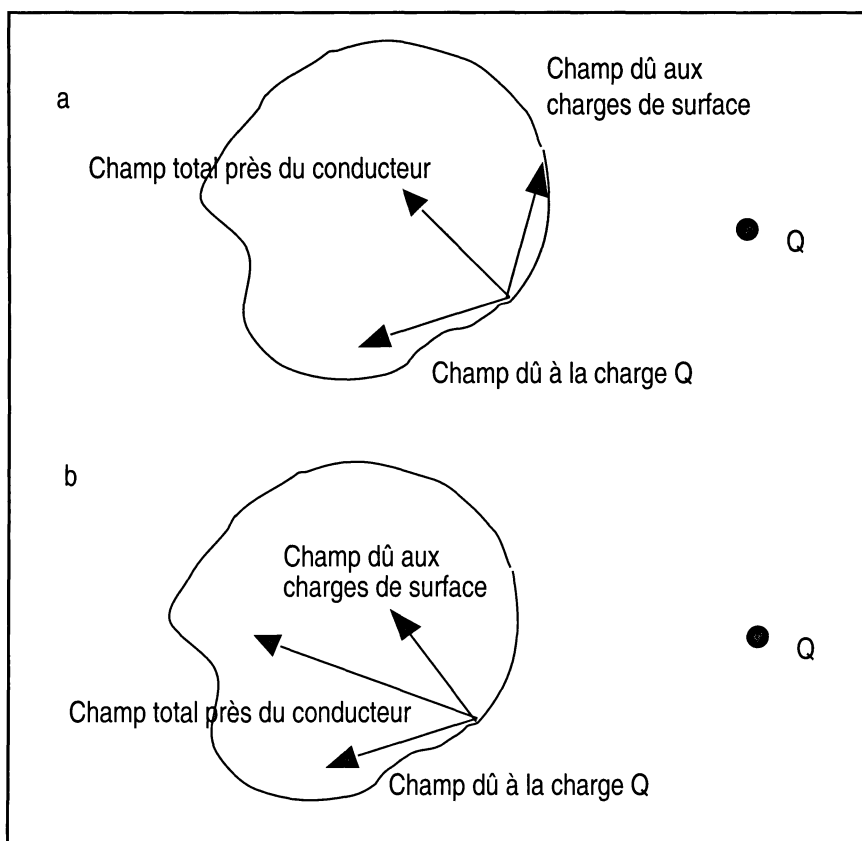


Figure 1 : Champ près d'un conducteur en équilibre électrostatique en présence d'une charge ponctuelle extérieure :

a : analyse correcte, le champ total est perpendiculaire au conducteur,

b : erreur souvent observée, où le champ dû aux seules charges du conducteur est présenté comme perpendiculaire à la surface de celui-ci

Analyses causales appuyées par la mise en oeuvre de modifications (quasi-statiques) des situations physiques étudiées (S_i)

Dans la dernière version de la séquence, nous avons décidé d'accentuer encore la mise en oeuvre d'un raisonnement causal chez nos étudiants, en mettant en jeu des modifications de situation, par opposition à la simple analyse d'états d'équilibre. Ceci s'est fait avec des questions du type : «*qu'est-ce qui change si on double la valeur de la charge ?*», ou «*si on l'éloigne*», etc. L'idée est de mettre explicitement en action le raisonnement causal des élèves, d'en faire apparaître les limites et d'en étendre la portée par la discussion de la non unicité des causes et des effets.

L'évaluation de la séquence s'est faite principalement par questionnaires.

Le même questionnaire a été utilisé cinq années de suite, une (1992-1993, échantillon E₁) pour la séquence S_i et quatre (1993-1997, E₂, E₃, E₄, E₅) pour la séquence finale S_r.

Ce questionnaire («C dans C» : conducteur dans condensateur) est reproduit en annexe 6. Un conducteur isolé et globalement neutre y est présenté, situé entre les plaques d'un condensateur chargé. On interroge sur les champs et leurs sources en quatre points, M₁ à l'intérieur du conducteur, M₂ et M₃ au voisinage de celui-ci, de part et d'autre, et enfin M₄ au voisinage d'une des plaques.

Ce questionnaire a été présenté, en fin de séquence, aux cinq groupes expérimentaux (E₁ à E₅, d'environ 30 élèves chacun), et à des groupes témoins de niveau globalement équivalent (rassemblés, C₁ : classes de Mathématiques Spéciales Technologiques, N=107) ou notoirement supérieur selon les critères habituels (C₂ : classe de Mathématiques Spéciales M' d'un grand lycée parisien, N=39).

Le questionnaire «CF», déjà montré en annexe 2, a également été présenté à deux groupes expérimentaux (E₁ et E₃) et à un groupe témoin C'₁ (N=90) de niveau *a priori* équivalent.

Résultats du questionnaire «C dans C»

Avec le questionnaire «C dans C», nous avons souhaité évaluer simultanément des compétences de type différent. Pour reprendre la métaphore initiale, l'éclairage apporté au contenu par la séquence décrite plus haut est susceptible de produire des effets modulés selon les types de compétence évaluée. Ainsi, il est possible qu'un approfondissement de l'analyse causale s'accompagne d'une régression sur le plan des connaissances classiquement développées, à savoir la valeur du champ

dans un conducteur ou sa direction au voisinage de celui-ci. Nous repérons donc les taux d'occurrence de neuf observables, constituées chacune d'un couple «élément(s) de réponse/item de question», et regroupées en trois «familles» (tableau 1) : connaissances classiques (famille 1), analyse causale (famille 2), synthèse des connaissances classiques et d'une analyse causale maîtrisée (famille 3).

Le tableau 2 détaille les taux d'occurrence correspondant à ces neuf couples pour les cinq groupes expérimentaux.

	Couple	Elément(s)	Item de question
Famille 1 → Connaissances classiques	1	valeur correcte (zéro) du champ	en M_1
	2	direction correcte du champ (perpendiculaires à la surface)	en M_2 et M_3
	3	direction correcte du champ (perpendiculaire à la surface)	en M_4
Famille 2 → Analyse causale	4	identification correcte des sources du champ...	en M_1
	5	identification correcte des sources du champ...	en M_2 et M_3
	6	identification correcte des sources du champ...	en M_4
Famille 3 → Synthèse	7	valeur et sources du champ correctes	en M_1
	8	direction et sources du champ correctes...	en M_2 et M_3
	9	direction et sources du champ correctes...	en M_4

Tableau 1 : Couples «élément(s) de réponse/item de question» utilisés dans l'évaluation de la séquence

Couple → Groupe ↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E ₁ N=38	71	37	95	5	42	0	5	5	0
E ₂ N=34	88	56	91	20	62	18	20	27	12
E ₃ N=39	87	67	87	28	59	31	28	36	23
E ₄ N=26	88	54	100	23	50	19	12	23	19
E ₅ N=30	73	47	87	27	73	20	20	37	23

Tableau 2 : **Taux d'occurrence des 9 couples «élément(s) de réponse/item de question»** (définis en tableau 1) **pour les cinq groupes expérimentaux**

Ces résultats détaillés font apparaître la stabilité sur tous les groupes de la forme de l'histogramme correspondant à chaque famille : dans tous les échantillons, la question «classique» la moins bien réussie concerne les points M₂ et M₃ (couple 2) qui sont aussi l'occasion du plus fort taux de succès quand il s'agit des sources du champ (couple 5). Ce caractère se retrouve avec les groupes témoins.

Plus globalement, tous les groupes manifestent beaucoup plus de difficultés en matière d'analyse causale que sur les connaissances classiques.

Les groupes expérimentaux E₂ à E₅ ayant reçu la séquence finale S₇, manifestent une grande stabilité de performance sur les quatre années correspondantes : les écarts des taux d'occurrence des couples par rapport à la moyenne obtenue en regroupant tous ces groupes expérimentaux en un seul, E₁, ne dépassent pas 11%, ce qui correspond à quatre élèves. Ceci nous amène à comparer les taux d'occurrence dans ce groupe témoin reconstitué, E₁ (tableau 3), d'une part à ceux observés dans la séquence initiale, S₁ (figure 2), d'autre part à ceux observés respectivement dans les groupes témoins C₁ et C₂ (tableau 3 et figure 3).

Les figures 2 et 3 représentent des «profils conceptuels» de groupe (Chauvet, 1994, 1996 a et b ; Viennot, 1994) où l'on reconnaît, pour chaque «famille» la forme caractéristique déjà décrite, traduisant ce qu'on nomme, en termes habituels d'enseignement, la «difficulté relative» qu'il y a à réussir selon les items de question à l'intérieur d'une catégorie donnée : histogramme

en «V» pour les connaissances classiques (famille 1), en «Λ» pour l'analyse causale (famille 2) et pour la synthèse de ces deux compétences (famille 3).

Couple → Groupe ↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E ₁ N=129	84	57	91	25	61	23	21	31	19
C ₁ N=107	62	46	96	1	21	2	1	7	2
C ₂ N=39	85	72	100	5	36	0	0	10	0

Tableau 3 : Taux d'occurrence des 9 couples «élément(s) de réponse/item de question» (définis en tableau 1) pour le groupe expérimental reconstitué, E₁, et les deux groupes témoins de niveaux respectifs similaire (C₁) et supérieur (C₂)

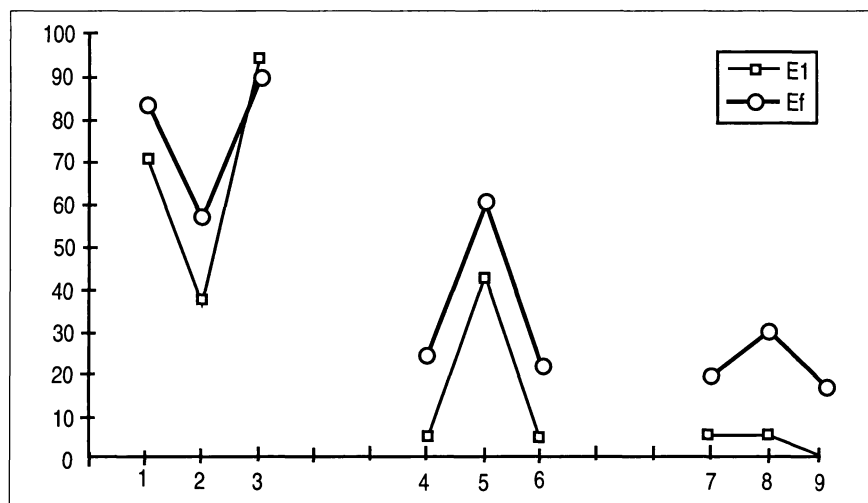


Figure 2 : Taux d'occurrence des 9 couples «élément(s) de réponse/item de question» (définis en tableau 1) pour les groupes expérimentaux E₁ (séquence S₁) et E₂ (séquence S₂)

On observe, en figure 2, que la séquence S₁ (groupe E₁) se traduit par des taux de succès presque partout inférieurs ($p < 0.01$ au test de χ^2 , Rainson, 1995) à ceux du groupe reconstitué E₁ enseigné avec la séquence S₁, une seule exception concernant les taux très élevés correspondant au

couple 3 : direction du champ au voisinage (en M_4) d'une plaque du condensateur. Il semble que les étudiants de ce groupe (E_1) aient, dans une certaine mesure, pris conscience de la multiplicité des sources du champ (42 % contre 21 % dans le groupe C_1 pour le couple 5) mais il se peut qu'ils aient été, de ce fait, déstabilisés pour trouver la direction des champs correspondants (37 % contre 46 % dans le groupe C_1 pour le couple 2). De nombreux schémas du type représenté en figure 1b en témoignent.

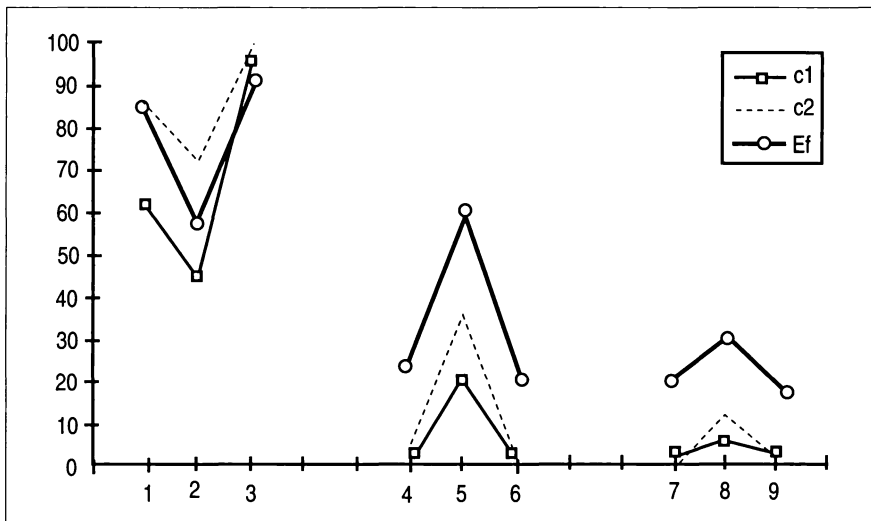


Figure 3 : Taux d'occurrence des 9 couples «élément(s) de réponse/item de question» (définis en tableau 1) pour le groupe expérimental E_1 (séquence S_1) et les deux groupes témoins de niveaux respectifs similaire (C_1) et supérieur (C_2)

La figure 3 montre que le groupe E_1 se situe, pour les connaissances classiques, entre le groupe de niveau *a priori* comparable C_1 et le groupe de niveau *a priori* excellent C_2 , rejoignant ce dernier pour les couples 1 et 3, c'est-à-dire à propos des points M_1 et M_4 du questionnaire. La séquence finale n'a donc rien fait perdre sur ce terrain, où l'on n'observe plus de trace de déstabilisation.

En matière d'analyse causale, alors que le groupe C_2 voisine avec le groupe témoin «normal» C_1 dans les piètres performances, le groupe expérimental E_1 s'en détache par une supériorité des taux d'occurrence de l'ordre de 25 % ($p < 0.01$ au test de χ^2) pour les trois «couples» (4, 5 et 6) de cette «famille». La famille 3 reflète très largement les résultats obtenus pour la famille 2, dans la mesure où c'est par l'analyse causale que pèchent la plupart des réponses erronées.

Il s'agit donc d'un succès, à la fois modeste et remarquablement stable, dans la direction de l'objectif visé par la séquence, c'est-à-dire une intégration entre les connaissances classiques d'une part, et, d'autre part, une prise en compte de l'association entre charges et champs qui respecte le principe de superposition.

Transfert à l'électrocinétique ? Résultats du questionnaire «CF»

Devant le relatif succès dont on vient de faire état, la question se pose de savoir jusqu'où va l'acquisition conceptuelle observée dans les groupes expérimentaux, plus précisément quelle est sa disponibilité pour un transfert à des situations d'électrocinétique. L'association entre le champ et ses sources se maintient-elle lorsqu'il s'agit d'expliquer le comportement du champ dans les fils d'un circuit parcouru par un courant quasi-stationnaire ? Le questionnaire «CF» décrit plus haut (et annexe 2) a été utilisé pour éclairer cette question. Il a été proposé à un groupe expérimental E' (69 étudiants regroupés ayant reçu la séquence finale) et à un groupe témoin C' (128 étudiants regroupés, de même niveau que le groupe expérimental). Les résultats ne font apparaître aucune supériorité de ce dernier groupe sur le groupe témoin, l'un comme l'autre rejoignant à quelques pour cents près les résultats obtenus avec d'autres populations (voir plus haut). Le transfert ne s'est donc pas produit spontanément, ce qui confirme, s'il en était besoin, que ces questions n'ont rien d'immédiat.

5. CONCLUSION

Les points qui nous semblent importants sont les suivants.

En termes d'efficacité scolaire, cette étude paraît de nature à relativiser un fatalisme souvent observé, selon lequel la marge de manoeuvre est à peu près nulle dès que les conditions aux limites de l'enseignement sont strictement fixées. Les classes préparatoires aux grandes écoles françaises constituent typiquement un contexte extrêmement contraint, où il peut être tentant de croire que peu d'aspects de l'enseignement peuvent être modifiés. C'est le moment de rappeler l'un de nos résultats, passé peut-être inaperçu : la motivation et la conscience du problème qui animait l'enseignante lors d'un premier essai d'intervention pédagogique ont donné un résultat nul. En revanche, il semble que des actions «à la marge», mais fondées sur une analyse précise, soient d'une efficacité que le niveau relativement moyen des groupes expérimentaux ne parvient pas à dissimuler, et ceci sans perte sur le terrain des connaissances classiquement valorisées. Voilà pour le versant positif de nos résultats.

Une fois de plus, pourtant, il faut noter la difficulté des acquisitions conceptuelles que vise l'enseignement, si l'on en juge par les faibles progressions obtenues. Ce principe de superposition n'apparaît pas bien mystérieux, *a priori*, mais, comme toujours, c'est la constance dans la prise en compte des lois qui pose problème. Quant au transfert de l'acquisition en question ici de l'électrostatique vers l'électrocinétique, il ne faut pas l'espérer à moindre coût.

En matière de recherche sur les séquences d'enseignement, notre tentative repose la question des méthodes d'évaluation. Il peut arriver qu'une hypothèse précise soit émise sur un processus d'apprentissage d'un contenu précis (Méheut, 1996), et que l'expérimentation permette l'examen d'un minimum de paramètres quitte à ne pas respecter les conditions aux limites habituelles de l'enseignement. Ici, nous avons fait le choix de travailler en contexte contraint avec des actions à la marge. Celles-ci sont orientées selon une ligne directrice, ici la causalité vue à la fois comme source de difficulté et comme voie d'accès à une meilleure maîtrise conceptuelle, mais elles sont aussi multiples : nous renonçons à évaluer la part de chaque ingrédient injecté dans la forme finale de la séquence. En revanche, nous nous imposons de faire une évaluation multidimensionnelle de l'ensemble.

Il faut souhaiter que, en matière d'évaluation de séquences, la réflexion sur ces divers types de recherche se développe et qu'elle puisse s'appuyer sur un nombre accru d'exemples.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDERSSON B. (1986). The experiential Gestalt of Causation : A common core to pupils' preconceptions in science. *European Journal of Science Education*, vol. 8, n° 3, pp. 151-171.
- BARBAS A. & PSILLOS D. (1993). Designing a computer-based course on basic electricity for prospective primary school teachers. In P.Lijnse (Éd.), *European Research in Science Education. Proceedings of the first PhD Summerschool*. Utrecht, Cdb Press, pp. 215-223.
- BENSEGHIR A. & CLOSSET J.-L. (1993). Transition électrostatique électrocinétique : points de vue historique et didactique. *Didaskalia*, n° 2, pp. 31-47.
- BENSEGHIR A. & CLOSSET J.-L. (1996). The electrostatics-electrokinetics transition. Historical and educational difficulties. *International Journal of Science Education*, vol. 18, n° 2, pp. 179-192.
- CHABAY R.W. & SHERWOOD B.A. (1995). *Electric and Magnetic Interactions*. New York, John Wiley and Sons.
- CHAUVET F. (1994). *Construction d'une compréhension de la couleur intégrant sciences, techniques et perception : principes d'élaboration et évaluation d'une séquence d'enseignement*. Thèse de doctorat, Université Paris 7.
- CHAUVET F. (1996a). Un instrument pour évaluer un état conceptuel : exemple du concept de couleur. *Didaskalia*, n° 8, pp. 61-79.

- CHAUVET F. (1996b). Teaching colour : designing and evaluation of a sequence. *European Journal of Teacher Education*, vol. 19, n° 2, pp. 119-134.
- DE KLEER J. & BROWN J.S. (1981). Mental models of physical mechanisms and their acquisition. In R.J. Anderson (Éd.), *Cognitive skills and their Acquisition*. Hillsdale, Lawrence Erlbaum.
- DRIVER R., GUESNES E. & TIBERGHEN A. (1985). Some features of Children's Ideas and their Implications for Teaching. In R. Driver, E. Guesnes & A. Tiberghien (Éds), *Children's Ideas in Science*. Milton Keynes, Open University Press, pp. 193-201.
- DRIVER R. (1989). Changing conceptions. In P. Adey et al. (Éds.), *Adolescent Development and School Science*. Lewes, Falmer Press, p. 141.
- EYLON S. & GANIEL U. (1990). Macro-micro relationships : The missing link between electrostatics and electrodynamics in students' reasoning. *International Journal of Science Education*, vol. 12, n° 1, pp. 79-94.
- GUTIERREZ R. & OGBORN J. (1992). A causal framework for analysing alternative conceptions, *International Journal of Science Education*, vol. 14, n° 2, pp. 201-229.
- HÄRTEL H. (1993). New approach to introduce Basic Concepts in Electricity. In M. Caillot (Éd.), *Learning Electricity and Electronics with Advanced Educational Technology*. NATO ASI Séries F, vol. 115. Berlin, Springer-Verlag, pp. 5-21.
- JOHSUA S. (1995). Réponse au point de vue de P.J. Lijnse paru dans *Didaskalia* n° 3, La recherche-développement : une voie vers une «structure didactique» de la physique empiriquement fondée. *Didaskalia* n° 6, pp.133-135.
- JOHSUA S. & DUPIN J.-J. (1989). Représentations et modélisations : le débat scientifique dans la classe et l'apprentissage de la physique. Berne, Peter Lang.
- LIJNSE P.L. (1994). La recherche-développement : une voie vers une «structure didactique» de la physique empiriquement fondée. *Didaskalia*, n° 3, pp. 93-108.
- MÉHEUT M. (1996). Enseignement d'un modèle particulaire cinétique de gaz au collège : questionnement et simulation. *Didaskalia*, n° 8, pp. 7-32.
- MILLAR R. (1989). Constructive criticisms. *International Journal of Science Education*, Special issue, n° 11, pp. 587-596.
- OGBORN J. (1993). Approches théorique et empirique de la causalité. *Didaskalia*, n° 1, pp. 29-477.
- OGBORN J., KRESS G., MARTINS I., & MCGILLICUDDY K. (1996). *Explaining Science in the Classroom*. Buckingham, Open University Press.
- PSILLOS D. (1995). Adapting Instruction to Students' Reasoning. In D. Psillos (Éd.), *European Research in Science Education*. Proceedings of the second PhD Summerschool. Leptokaria, Greece, pp. 57-71.
- RAINSON S. (1995). *Superposition des champs électriques et causalité : Étude de raisonnements, élaboration et évaluation d'une intervention pédagogique en classe de Mathématiques Spéciales Technologiques*. Thèse de doctorat, Paris, Université Denis Diderot.
- RAINSON S., TRANSTRÖMER G. & VIENNOT L. (1994). Students' understanding of superposition of electric fields. *American Journal of Physics*, vol. 62, n° 11, pp. 1026-1032.
- ROZIER S. & VIENNOT L. (1991). Students' reasoning in thermodynamics. *International Journal of Science Education*, vol. 13, n° 2, pp. 159-170.
- SHERWOOD B.A. & CHABAY R.W. (1993). Electrical Interactions and the Atomic Structure of Matter. In M. Caillot (Éd.), *Learning Electricity and Electronics with Advanced Educational Technology*. NATO ASI Series F, vol. 115. Berlin, Springer-Verlag, pp. 23-35..
- VIENNOT L. & RAINSON, S. (1992). «Students' reasoning about the superposition of electric fields. *International Journal of Science Education*, vol.14, n° 4, pp. 475-487.

- VIENNOT L. (1993). Temps et causalité dans les raisonnements des étudiants, *Didaskalia* n° 1, pp 13-27.
- VIENNOT L. (1994). A multidimensional approach in characterising a conceptual state in students : the role played by questions. In D.Psillos (Éd.), *European Research in Science Education II. Art of Text* Thessaloniki, pp. 178-187.
- VIENNOT L. (1996). *Raisonnement en physique : la part du sens commun*. Louvain la Neuve, De Boeck.
- WHITE B.Y., FREDERIKSEN J.R. & SPOEHR K.T. (1993). Conceptual models for Understanding the behavior of Electrical circuits. In M. Caillot (Éd.), *Learning Electricity and Electronics with Advanced Educational Technology*. NATO ASI Series F, vol. 115. Berlin, Springer-Verlag, pp. 77-95.

ANNEXE 1

Contenus traités antérieurement auprès des étudiants interrogés dans l'enquête préliminaire

Les étudiants interrogés ont reçu respectivement des enseignements sur les notions suivantes :

(G_1) : circuits électriques et introduction à l'électrostatique ; le champ électrique \vec{E} défini par la relation $\vec{F} = q \vec{E}$; le cas d'un champ uniforme, en relation avec le condensateur, et la relation $E = U/d$ (U est la tension et d la distance entre plaques) ;

(G_2) : (en outre), la loi de Coulomb et le théorème de Gauss ; le potentiel (V) défini par la relation $\vec{E} = -\text{grad} V$; la conductivité g définie par la relation $\vec{j} = \gamma \vec{E}$, \vec{j} est la densité de courant ; quelques rudiments de calcul vectoriel, dont la définition du gradient ;

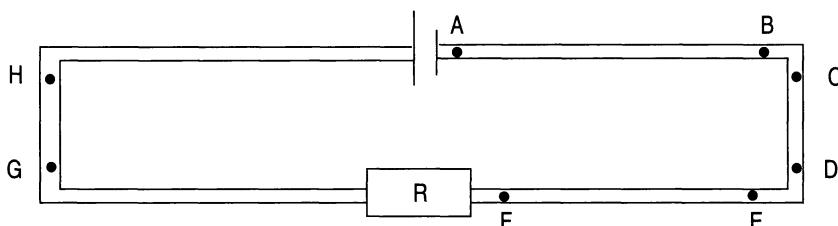
(G_3) : (en outre), les conducteurs en équilibre électrostatique, le fait que le champ électrique est nul à l'intérieur de ceux-ci, le théorème de Coulomb ;

(G_4) : (en outre), les diélectriques (ou encore : «isolants») et les équations de Maxwell.

ANNEXE 2

Le questionnaire «Champ dans les fils» (CF)

On considère un circuit représenté par le schéma suivant, où l'on a volontairement grossi les fils de connexion (de section constante, de matériau identique, de conductivité γ).



\vec{E}_1 est le champ électrique dans la zone AB

\vec{E}_2 est le champ électrique dans la zone CD

\vec{E}_3 est le champ électrique dans la zone EF

\vec{E}_4 est le champ électrique dans la zone GH

1) Représentez les vecteurs \vec{E}_1 , \vec{E}_2 , \vec{E}_3 , \vec{E}_4 . Justifiez votre représentation (direction, sens, valeur relative des normes).

2a) Quelles sont les sources de ces champs ?

2b) Comment s'expliquent les éventuels changements de direction d'une zone à l'autre ?

2c) Vous étiez-vous déjà posé la question 2b ?

Éléments de la réponse correcte

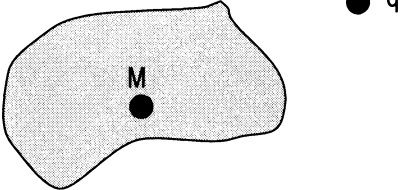
Le champ est de norme identique dans les quatre sections indiquées : la norme de la densité de courant \vec{j} et la conductivité γ y sont identiques, or $\vec{j} = \gamma \vec{E}$. Le champ est dirigé le long des fils, du pôle + vers le pôle -. Les sources de ces champs sont toutes les charges présentes dans tout le circuit, sur les pôles et la surface des fils. Ce sont les charges de surface qui expliquent que la direction du champ s'adapte aux changements de direction des fils.

ANNEXE 3

Les questionnaires « Isolants » (IS1 et IS2)

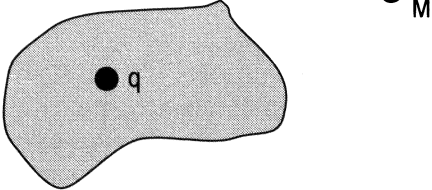
IS1 :

Une charge ponctuelle est située à l'extérieur d'un isolant. Cette charge crée-t-elle un champ électrique en un point M situé à l'intérieur de l'isolant (voir le schéma ci-dessous) ?

	<p>OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/></p> <p>Pourquoi ?</p>
---	--

IS2 :

Une charge ponctuelle est située à l'intérieur d'un isolant. Cette charge crée-t-elle un champ électrique en un point M situé à l'extérieur de l'isolant (voir le schéma ci-dessous) ?

	<p>OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/></p> <p>Pourquoi ?</p>
---	--

Dans les deux cas, la réponse correcte, en vertu du principe de superposition, est que la charge crée un champ électrique non nul au point considéré, en d'autres termes, sa contribution au champ total est non nulle.

ANNEXE 4

Le questionnaire «Tranche Napolitaine» (TN)

<p><i>Dans la situation représentée ci-dessous, les deux surfaces équipotentielles sont des plans infinis, perpendiculaires au plan de la figure. Décrire le champ électrique entre les deux surfaces.</i></p>		
<p><i>surface équipotentielle (potentiel V_1)</i></p>		
<p><i>zone conductrice</i></p>	<p><i>zone isolante</i></p>	<p><i>zone conductrice</i></p>
<p><i>surface équipotentielle (potentiel $V_2, V_2 = \pi V_1$)</i></p>		
<p><i>Selon vous, les champs électriques dans la zone isolante et dans les zones conductrices sont-ils</i></p> <ul style="list-style-type: none"><i>différents ?</i><i>identiques ?</i><i>je ne sais pas</i> <p><i>Justifiez votre réponse.</i></p>		

La réponse correcte est que les champs sont égaux (en négligeant les effets de bord). Le seul argument correct dont disposent les étudiants *G1* est la relation $E = U/d$ (la tension U et la distance d entre plaques sont identiques pour les deux matériaux).

À des niveaux plus avancés, on peut invoquer la relation $\vec{E} = -\text{grad } V$ qui s'applique dans tout matériau. Enfin, les étudiants les plus avancés peuvent s'appuyer sur la continuité de la composante tangentielle du champ électrique \vec{E} à l'interface entre isolant et conducteur.

ANNEXE 5

Le questionnaire «Coulomb» (deux versions, C et C')

Première version (C) :

En P , à la surface d'un conducteur en équilibre, la densité surfacique de charge est s . Le vecteur unitaire, perpendiculaire à la surface du conducteur en P et dirigé vers l'extérieur, est \vec{n} . À l'extérieur du conducteur en un point proche de P , le champ électrique est $\vec{E} = \sigma/\epsilon_0 \vec{n}$.

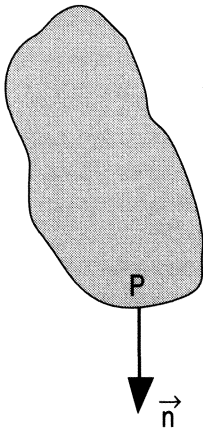
1 – Le champ est-il créé par

- a) les charges au voisinage de P ?
- b) toutes les charges du conducteur ?
- c) toutes les charges de l'univers ?

Choisissez la réponse correcte et justifiez la.

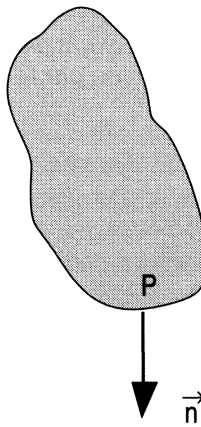
2 – On considère les deux situations ci-dessous

Situation A



Situation B

(q est une charge ponctuelle)



● q

Le vecteur unitaire perpendiculaire au conducteur en P et dirigé vers l'extérieur est \vec{n} .

a) Dans la situation B, le champ électrique \vec{E}' à l'extérieur du conducteur en un point proche de P est-il donné par l'expression $\vec{E} = \sigma/\epsilon_0 \vec{n}$?

Oui

Non

Je ne sais pas

Justifiez votre réponse.

b) le champ électrique \vec{E}' à l'extérieur du conducteur en un point proche de P est-il le même dans les situations A et B ?

Oui Non Je ne sais pas

Justifiez votre réponse.

c) La densité surfacique de charge σ , est-elle la même dans les situations A et B ?

Oui Non Je ne sais pas

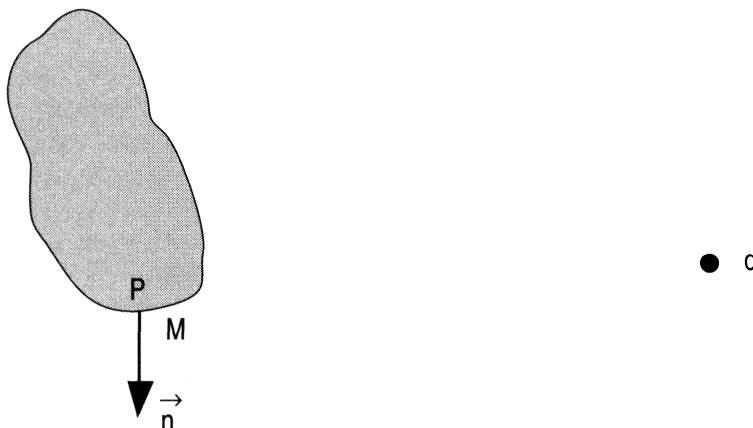
Justifiez votre réponse.

Les réponses correctes sont les suivantes.

La formule $\vec{E} = \sigma/\epsilon_0 \vec{n}$ concerne l'expression du champ total au voisinage de P, créé par toutes les charges de l'univers. Elle reste valable quel que soit l'environnement du conducteur (réponse OUI en question 2a). Les valeurs des grandeurs \vec{E} et s_p sont, elles, affectées par la présence de la charge extérieure (réponses NON aux questions 2b et 2c).

Deuxième version (C') :

Un étudiant suggère l'expression « $\vec{E} = \sigma/\epsilon_0 \vec{n} + \vec{E}_q$ »
où \vec{E}_q est le champ créé par la charge q en un point M voisin d'un conducteur.



<i>Qu'en pensez vous ?</i>	<i>Cette expression est-elle</i>
<i>correcte</i>	<i>OUI NON Expliquez pourquoi</i>
<i>incorrecte ?</i>	<i>OUI NON Expliquez pourquoi et donnez l'expression correcte</i>
<i>ambigüe ?</i>	<i>OUI NON Expliquez pourquoi et donnez une expression non ambigüe</i>

Réponse correcte

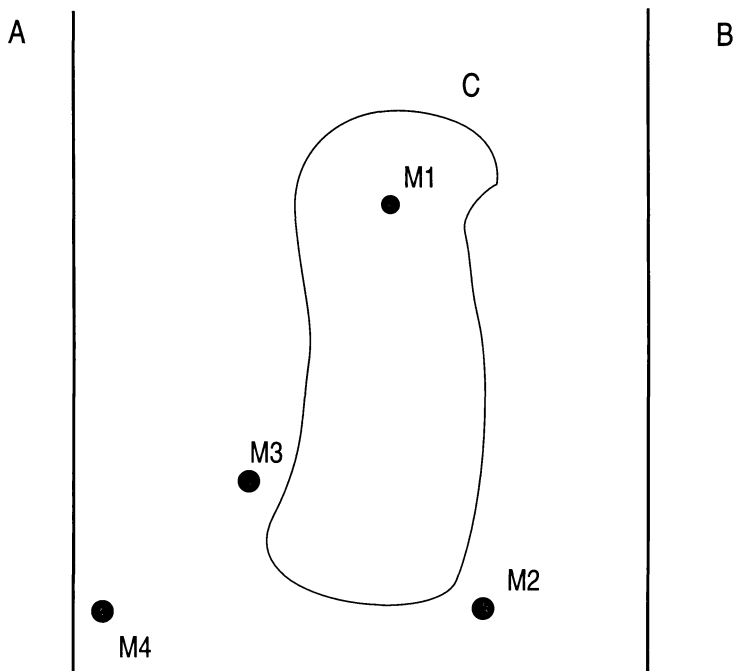
Cette expression est fausse. La formule $\vec{E} = \sigma/\epsilon_0 \vec{n}$ concerne l'expression du champ total au voisinage de P, créé par toutes les charges de l'univers. Elle reste valable quel que soit l'environnement du conducteur. La variable s résume en quelque sorte l'action au point M de l'ensemble des charges en présence, car sa valeur s'adapte à la charge extérieure *via* le phénomène d'influence.

ANNEXE 6

Le questionnaire «Conducteur dans Condensateur» (C dans C)

Soit un conducteur C initialement neutre, isolé.

Soit un condensateur plan, d'armatures (A, B) séparées par le vide, chargé et isolé (on suppose $Q_A > 0$). On introduit C dans le condensateur plan : voir figure ci-dessous. On suppose l'équilibre électrostatique établi.



On considère les points

M_1 , à l'intérieur de C ,

M_2, M_3 , à l'extérieur de C , au voisinage de sa surface,

M_4 , entre les armatures du condensateur, au voisinage de l'armature A .

Représentez les champs électriques $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \vec{E}_4$ qui existent respectivement aux points M_1, M_2, M_3 et M_4 .

Justifiez votre schéma.

Quelles sont les sources de \vec{E}_1 ?

Quelles sont les sources de \vec{E}_2 ?

Quelles sont les sources de \vec{E}_3 ?

Quelles sont les sources de \vec{E}_4 ?

Réponses correctes

Introduit dans le condensateur, le conducteur C, par le phénomène d'influence, acquiert une densité surfacique de charge non uniforme et perturbe la densité de charge sur les armatures.

En M_1 , le champ est nul. Ailleurs, il est donné par l'expression $\vec{E} = \sigma/\epsilon_0 \vec{n}$ (voir annexe 5). En M_2 et M_3 , il est normal à la surface de C, vers l'extérieur de ce corps pour M_2 ($s > 0$) et vers l'intérieur de celui-ci pour M_3 ($s < 0$). En M_4 , il est normal à l'armature A ($s > 0$) et dirigé vers l'armature B.

Dans tous les cas, les sources du champ sont l'ensemble des charges en présence (sur A, B et C).