



Superposition des champs électriques et causalité : étude de raisonnements, élaboration et évaluation d'une intervention pédagogique en classe de Mathématiques Spéciales Technologiques.

Sylvie Rainson

► To cite this version:

Sylvie Rainson. Superposition des champs électriques et causalité : étude de raisonnements, élaboration et évaluation d'une intervention pédagogique en classe de Mathématiques Spéciales Technologiques. . Enseignement de la physique [physics.ed-ph]. Université Paris 7 Denis Diderot, 1995. Français. NNT : . tel-01275080

HAL Id: tel-01275080

<https://theses.hal.science/tel-01275080>

Submitted on 16 Feb 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université Paris 7
"Denis Diderot"

THESE

présentée pour obtenir le grade de Docteur

Spécialité : Didactique des disciplines
Option : Sciences physiques

par Sylvie RAINSON

SUPERPOSITION DES CHAMPS ELECTRIQUES ET CAUSALITE :
Etude de raisonnements, élaboration et évaluation d'une intervention
pédagogique en classe de Mathématiques Spéciales Technologiques

Soutenue le 1^{er} décembre 1995, devant la commission d'examen composée de

Monsieur Jean-Michel BERARD
Monsieur Samuel JOHSUA : Rapporteur
Monsieur Bernard PERRIN
Monsieur Dimitris PSILLOS : Rapporteur
Madame Laurence VIENNOT

Laboratoire de Didactique de la Physique dans l'Enseignement supérieur
(L.D.P.E.S)

Je tiens à remercier en tout premier lieu Madame L. Viennot qui m'a guidée lors de mes premiers contacts avec la didactique et qui m'a accueillie au L.D.P.E.S pour entreprendre ce travail. Ses conseils et son soutien m'ont été une aide très précieuse. Je voudrais l'assurer ici de l'expression de ma plus profonde gratitude.

Je remercie vivement Monsieur l'Inspecteur Général J-M Bérard, Messieurs les Professeurs S.Johsua, B.Perrin, D.Psillos qui me font l'honneur de leur présence à ce jury.

Mes remerciements s'adressent aussi aux membres du L.D.P.E.S avec qui j'ai eu des discussions enrichissantes, et particulièrement à E.Saltiel et F.Chauvet pour leur relecture attentive, ainsi qu'à J-L Closset pour son aide en matière de statistiques.

Je remercie enfin tous les collègues qui, par l'intermédiaire de leurs élèves ou étudiants, ont participé à cette recherche.

SOMMAIRE

Page

INTRODUCTION

1

1) Présentation de la problématique: cadres pédagogique et didactique	2
2) Cause, explication et antériorité en physique	4
3) Evolution des systèmes complexes: cadre physique	6
4) Etat de la question en didactique	7
a) Aspects généraux du raisonnement	7
b) Dans le domaine de l'enseignement de l'électricité	11
5) Choix pour l'étude: principe de superposition et causalité	15
6) Démarche suivie	16

CHAPITRE 1 : ENQUETES PRELIMINAIRES

19

I) Introduction	20
II) Méthodologie	20
1) Les entretiens	20
2) Les questionnaires dans l'ensemble de l'étude	21
3) Définition des types d'échantillons pour la suite du travail	21
III) Questionnaire "Gauss"	22
1) Introduction	22
2) Enoncé et réponse correcte	23
3) Conditions d'interrogation	24
4) Tableau des pourcentages de réponses brutes pour les questionnaires	24
5) Les arguments des étudiants	25
a) Arguments pour la réponse correcte "non"	25
b) Arguments pour la réponse incorrecte "oui"	25
6) Une autre version du questionnaire	28
7) Conclusion	28

CHAPITRE 2 : CHAMP ELECTRIQUE ET MOBILITE DES CHARGES. DIFFICULTES ASSOCIEES 30

I) Une vision non unifiée de l'électrostatique et de l'électrocinétique: questionnaire de "La tranche napolitaine" 31

- 1) Introduction 31
- 2) Enoncé et réponse correcte 31
- 3) Conditions d'interrogation 32
- 4) Un extrait d'entretien 32
- 5) Tableau des pourcentages de réponses brutes pour les questionnaires papier-crayon 34
- 6) Les arguments des étudiants 34
 - a) Les arguments pour la réponse " $\vec{E}_{is} = \vec{E}_{cond}$ " 35
 - b) Les arguments pour la réponse " $\vec{E}_{is} \neq \vec{E}_{cond}$ " 35
- 7) Discussion des résultats 37
- 8) L'influence du "niveau de connaissances" 38
- 9) Conclusion 38

II) les difficultés des étudiants à propos des isolants: questionnaire "Isolants" (et "Isolants bis" en annexe) 39

- A) Introduction 39
- B) Questionnaire "Isolants" 39
 - 1) Enoncé et réponse correcte 39
 - 2) Conditions d'interrogation 40
 - 3) Extraits d'entretien 41
 - 4) Tableaux des pourcentages de réponses pour les questionnaires papier-crayon 42
 - 5) Analyse des arguments des étudiants 43
 - a) Principaux commentaires justifiant une réponse "oui" 43
 - b) Le rôle bloquant d'un isolant 44
 - c) Champ et mobilité des charges ou transfert de charges 45
 - 6) Discussion des résultats 47

III) Conclusion sur les questionnaires "La tranche napolitaine" et "Isolants" 48

ANNEXE AU CHAPITRE 2 50

Questionnaire "Isolants bis"

- 1) Enoncé et réponse correcte 51
- 2) Conditions d'interrogation 51
- 3) Tableau des pourcentages de réponses brutes 52
- 4) Les arguments des étudiants: description et discussion 53
 - a) Arguments accompagnant une réponse correcte "q et q' créent un champ en M (ou N)" 53
 - b) Arguments justifiant la réponse "q' ne crée pas de champ en M" 53
 - c) Arguments justifiant la réponse "q et q' ne créent pas de champ en N" 54
- 5) Conclusion sur le questionnaire "Isolants bis" 54

CHAPITRE 3 : EXPRESSIONS LITTERALES DU CHAMP ELECTRIQUE ET SOURCES DE CE CHAMP : DIFFICULTES ASSOCIEES **55**

I) Introduction	56
II) Questionnaire "Coulomb"	57
1) Enoncé et réponse correcte	57
2) Conditions d'interrogation	59
3) Un extrait d'entretien	59
4) Tableaux des pourcentages de réponses	61
5) Premières constatations	62
6) Analyse des arguments des étudiants	62
a) Question Q1	62
b) Les questions Q2abc	64
7) Discussion d'ensemble des résultats	65
a) Cohérence des raisonnements	65
b) Un raisonnement très fréquent	66
III) Questionnaire "Coulomb bis"	67
1) Enoncé et réponse correcte	67
2) Conditions d'interrogation	68
3) Tableau des pourcentages de réponses	68
4) Commentaires des résultats	68
IV) Conclusion sur les tests "Coulomb et Coulomb bis"	69

CHAPITRE 4 : COMBINAISON DES DEUX DIFFICULTES : - CHAMP ELECTRIQUE ET MOBILITE DES CHARGES - EXPRESSIONS LITTERALES DU CHAMP ET SOURCES DU CHAMP **70**

1) Introduction	71
2) Enoncé du questionnaire et réponse correcte	71
3) Conditions d'interrogation	73
4) Tableaux des pourcentages de réponses	73
a) Directions des champs électriques	73
b) Sources des champs	74
c) Explications des changements de directions du champ électrique	74
d) Vous étiez-vous déjà posé la question de l'origine du changement de direction?	75
5) Analyse des résultats	75
a) Représentations du champ électrique	75
b) Les sources du champ électrique	75
c) Explications des changements de direction du champ électrique	77
d) Vous étiez-vous déjà posé la question de l'origine du changement de direction?	79
6) Conclusion	79

CHAPITRE 5 : ETUDE DE MANUELS 81

I) Introduction	82
II) Etude des manuels de 1ère scientifique	82
<i>A) Choix des thèmes de contenu</i>	<i>82</i>
<i>B) Livres examinés</i>	<i>83</i>
<i>C) Analyse de contenu</i>	<i>84</i>
1) Définition et premières propriétés du champ électrique	84
a) Les sources du champ électrique	85
b) Le champ électrique, concept autonome vis à vis de la charge d'épreuve : sa valeur, son existence	85
c) L'iconographie: champ et lignes de champ	87
d) Le principe de superposition	87
2) Lien entre l'électrostatique et l'électrocinétique	88
a) Existence du champ électrique en électrocinétique	89
b) Différence de potentiel	90
<i>D) Conclusion de l'étude des manuels de 1ère scientifique</i>	<i>90</i>
III) Etude des manuels d'enseignement supérieur	91
<i>A) Choix des thèmes de contenu</i>	<i>91</i>
<i>B) Livres examinés</i>	<i>91</i>
<i>C) Analyse de contenu</i>	<i>94</i>
1) La loi de Coulomb	94
2) Définition et premières propriétés du champ électrique	95
3) Le principe de superposition	96
4) Le cas des conducteurs en équilibre : les sources du champ qui règne à l'intérieur ou au voisinage	97
a) Cas de l'intérieur du conducteur	98
b) Cas de l'extérieur d'un conducteur, au voisinage	98
5) Champ électrique et courant électrique	100
<i>D) Conclusion de l'analyse des manuels de début d'enseignement supérieur</i>	<i>102</i>
IV) Conclusion générale de l'analyse de manuels	102

ANNEXE AU CHAPITRE 5 104

I) Etude des manuels de 1ère scientifique	105
1) Définition et premières propriétés du champ électrique	105
a) Les sources du champ électrique	105
b) Le champ électrique, concept autonome par rapport à la charge d'épreuve: sa valeur, son existence	106
2) Lien entre l'électrostatique et l'électrocinétique	107
a) Existence du champ électrique en électrocinétique	107
b) Différence de potentiel	109
II) Etude des manuels de début d'enseignement supérieur	112
1) La loi de Coulomb	112
2) Le principe de superposition	114
3) Le cas des conducteurs en équilibre : les sources du champ électrique qui règne à l'intérieur ou au voisinage	115
a) Cas de l'intérieur d'un conducteur	115
b) Cas de l'extérieur du conducteur, au voisinage	116
4) Champ électrique et courant électrique	117

CHAPITRE 6 : INTERVENTION PEDAGOGIQUE	120
I) Introduction	121
II) Deuxième intervention: 1992-93	123
<i>A) Principes d'élaboration</i>	123
<i>B) Aspects spécifiques de la séquence</i>	124
<i>C) Evaluation de la deuxième intervention</i>	126
1) "Isolants"	127
2) "Conducteur dans condensateur"	129
a) But du questionnaire	129
b) Enoncé et réponse correcte	130
c) Conditions d'interrogation	131
d) Analyse des résultats	132
e) Conclusion sur la deuxième intervention (1992-93)	136
III) Troisième intervention: 1993-94 et 1994-95	137
<i>A) Principes d'élaboration</i>	137
<i>B) Modifications des aspects spécifiques de la deuxième (1992-93) à la troisième (1993-94 et 1994-95) intervention</i>	139
<i>C) Evaluation de la troisième intervention</i>	141
1) Quelques éléments d'appréciation qualitative	141
2) Questionnaire "Conducteur dans condensateur"	142
a) Détail des échantillons	142
b) Résultats	142
c) Conclusion à propos du test "Conducteur dans condensateur"	151
3) "Le champ dans les fils"	152
a) Rappel de l'énoncé et de la réponse correcte	153
b) Conditions d'interrogation	154
c) Résultats	154
d) Conclusion à propos du test "Le champ dans les fils"	157
IV) Récapitulation et conclusion de l'intervention pédagogique	157
<i>A) Indications générales sur l'importance relative du temps passé</i>	158
<i>B) Aspects spécifiques de la séquence</i>	158
<i>C) Résultats évalués par questionnaire</i>	159
<i>D) Profils conceptuels</i>	161
1) Présentation	161
2) Choix des couples "question-élément de réponse" pour notre étude	161
3) Tracé des profils	167
4) Conclusion et interprétation des résultats	169
ANNEXE AU CHAPITRE 6	171
Première intervention: 1991-92	
<i>A) Introduction</i>	172
<i>B) Des situations variées, quelques phrases-clefs</i>	172
<i>C) Evaluation de la première intervention</i>	172
1) "La tranche napolitaine"	173
2) "Coulomb"	173

CONCLUSION	179
-------------------	------------

BIBLIOGRAPHIE	187
----------------------	------------

ANNEXE a :	197
- PROGRAMMES	
- DETAIL DES INTERVENTIONS PEDAGOGIQUES	

I) Programmes	198
<i>A) Classe de 1ère scientifique</i>	<i>198</i>
<i>B) Classes préparatoires</i>	<i>199</i>
II) Plans des différents chapitres du cours des interventions pédagogiques de 1991-92 à 1994-95	202
<i>E4 Champ et potentiel électrostatiques</i>	<i>202</i>
<i>E5 Conducteurs en équilibre</i>	<i>205</i>
<i>E6 Condensateurs</i>	<i>207</i>
III) Détails des interventions pédagogiques	209
<i>Première intervention : 1991-92</i>	<i>209</i>
<i>Deuxième intervention : 1992-93</i>	<i>209</i>
<i>Troisième intervention : 1993-94 et 1994-95</i>	<i>218</i>
IV) Sujets d'exercices et problèmes	224

ANNEXE b : ELEMENTS D'APPRECIATION STATISTIQUE	234
---	------------

<i>A) Méthode statistique utilisée</i>	<i>235</i>
<i>B) Résultats de l'étude statistique pour le test "Conducteur dans condensateur"</i>	<i>237</i>
1) Etude du champ en M1 (à l'intérieur du conducteur)	237
a) Valeur du champ en M1	237
b) Les sources du champ en M1	241
2) Etude du champ en M4 (au voisinage d'une armature)	244
a) Schéma en M4	244
b) Sources du champ en M4	247
3) Etude du champ en M2 et M3 (au voisinage du conducteur)	251
a) Schéma en M2 et M3	251
b) Les sources du champ en M2 et M3	254
4) Prise en compte du phénomène d'influence	258
5) Tableau récapitulatif des comparaisons	261

ANNEXE c : ARTICLES	264
----------------------------	------------

Students' reasoning about the superposition of electric fields	265
Students' understanding of superposition of electric fields	278

INTRODUCTION

1) Présentation de la problématique : cadres pédagogique et didactique.

Pour les étudiants mis en cause dans ce travail l'enseignement de l'électrostatique n'a vraiment commencé qu'en classe de 1ère (seule une allusion à la charge de l'électron, en classe de 4ème, a marqué ce domaine au niveau du collège. Ce n'est que depuis 1993 que les charges électriques sont véritablement introduites depuis la 4ème). L'électrostatique a été ensuite traitée au cours des deux premières années de l'enseignement supérieur.

Relativement abstraite et peu liée aux observations de la vie quotidienne, cette partie de la physique a la réputation, chez les professeurs - d'être difficile à enseigner, et chez les élèves et étudiants - d'être difficile à comprendre.

Elle n'a pas été l'objet de nombreuses recherches didactiques. Cependant les études déjà menées laissent prévoir que, là comme ailleurs, les modes de raisonnement des étudiants ne sont pas quelconques, et qu'il peut leur être associé des difficultés bien spécifiques.

Les travaux, nombreux en revanche, qui ont été consacrés à l'électrocinétique conduisent aussi à s'interroger sur la manière dont les étudiants comprennent l'électrostatique.

Le point de départ de cette étude est une analyse des raisonnements des étudiants en électrostatique et des difficultés associées.

Celle-ci sert ensuite de socle pour une double démarche, l'une de construction, au plan pédagogique, l'autre d'évaluation, au plan de la recherche didactique. Il s'agit

* au plan pédagogique :

- de spécifier des objectifs , c'est à dire des points qui nous paraissent particulièrement pertinents du point de vue de la compréhension de l'électrostatique, et, au-delà, de celle de l'électrocinétique, et le cas échéant, les difficultés que nous aimerions que les étudiants surmontent.

- de bâtir une séquence d'enseignement adaptée aux objectifs choisis, fondée sur l'analyse préalable des difficultés des apprenants.

* au plan didactique :

- de chercher à évaluer les effets de la séquence, c'est à dire :

- . de mettre à l'épreuve les hypothèses faites dans l'analyse préalable des réponses des étudiants ainsi que celles faites pour la construction de la séquence.

- . de chercher à mesurer l'efficacité des moyens élaborés pour agir sur telle ou telle difficulté.

Au plan des contenus, notre domaine d'étude est restreint.

Il est centré sur la notion de champ électrique et plus particulièrement sur le principe de superposition des champs électriques. Nous entendons par là l'ensemble de ces deux énoncés:

1) Toute charge ponctuelle crée un champ électrique en tout point de l'espace, conformément à la loi de Coulomb, ce champ est indépendant de la présence ou de l'absence d'autres charges, et de la nature du milieu environnant.

2) Le champ électrique existant en un point est la superposition des champs électriques créés en ce point par toutes les charges existantes.

De plus, nous nous restreignons aux domaines de l'électrostatique et de l'électrocinétique des régimes quasistationnaires, sans effets inductifs. Alors la contribution d'une charge donnée au champ électrique en un point donné, à un instant donné, est indépendante du "passé du système", c'est à dire des positions relatives des différentes charges avant l'instant considéré.

Ce choix très réducteur peut étonner. Le principe de superposition n'est pas habituellement considéré comme un objectif véritablement consistant de l'enseignement. On n'en parle pas dans les textes des programmes français (voir annexe a, p 198 à 201). Certes, nul ne contesterait que ce principe est essentiel à la construction de l'édifice théorique de l'électromagnétisme, mais dans l'enseignement, tout se passe comme si, une fois cet hommage rendu, sa mise en oeuvre allait de soi.

En fait on peut attendre, à son propos, des difficultés importantes chez les étudiants. En effet, si nous reprenons le premier des énoncés ci-dessus, on lit une formulation si courante qu'elle semble inévitable : " Toute charge ... crée un champ ...". Ce vocabulaire reflète une vision éminemment dissymétrique de l'association charge-champ : la charge est la cause du champ. On dit aussi qu'elle en est "la source", associant implicitement l'évocation d'une propagation à celle de la cause. De plus, le principe de superposition concerne par définition les situations où les "sources" sont multiples. Nous sommes donc confrontés à des analyses de situations définies par plusieurs variables - les charges et leurs positions- et abordées tout naturellement sous l'angle de la causalité.

Or de nombreuses études didactiques ont mis en évidence les difficultés des élèves et des étudiants dans l'analyse de ce type de situations. Prendre en compte l'action de plusieurs facteurs qui interviennent simultanément n'est pas naturel : le raisonnement commun présente, en cette matière, des aspects bien spécifiques et non conformes à la théorie physique enseignée.

En bref, pour éclairer notre étude des difficultés concernant le principe de superposition, il nous faut revenir sur les caractères du raisonnement commun concernant les problèmes à plusieurs variables, ce qui amène à croiser le thème de la causalité.

Dans la suite de ce chapitre introductif, nous allons d'abord tenter de situer, brièvement, quelques repères à propos de ce thème de la causalité en physique : nature de l'explication et rôle du temps.

Revenant ensuite sur l'évolution des systèmes complexes en physique (paragraphe 3), nous introduirons non moins brièvement une discussion sur le caractère a priori plus ou moins "causal" des analyses proposées par la physique.

Après une revue des études didactiques portant sur les raisonnements effectivement observés dans ce domaine (paragraphe 4) nous préciserons nos objectifs (paragraphe 5) et notre démarche (paragraphe 6).

2) Cause, explication et antériorité en physique.

On a plus vite parlé de "cause" que défini de quoi il s'agit. La causalité est un thème au vocabulaire instable et difficile à cerner. Aristote (384 av J-C) soulignait déjà l'étendue sémantique du terme "cause". Dans sa catégorisation des différents types de causes, il distingue notamment la cause formelle, qui est l'idée qui donne à un objet sa forme déterminée ou le modèle auquel correspond un changement, de la cause efficiente, qui est l'agent de la modification, l'antécédent immédiat qui provoque le changement.

Il donne ainsi l'exemple de l'élaboration d'une statue : le marbre est la cause matérielle de la statue, l'idée du sculpteur est sa cause formelle, les coups de ciseau du sculpteur sont sa cause efficiente et l'amour de l'art est sa cause finale.

Vingt-quatre siècles plus tard, T.S.Kuhn (1971) , associant l'idée de cause et celle d'explication, reprend à son compte l'idée de "cause formelle" : "La cause en physique est devenue à nouveau cause au sens large, c'est à dire une explication". Cet auteur suggère que l'explication formelle fonctionne maintenant avec une remarquable efficacité en physique, il indique ainsi qu'une équation différentielle, jointe à des conditions de frontière, peut être considérée comme "une forme, qui fournit une explication de ce qui s'est passé."

F.Halbwachs (1971a) lie, lui aussi, causalité et explication. Il écrit : "Le physicien, consciemment ou non, adopte par nécessité un point de vue réaliste, c'est à dire que, placé en face d'un phénomène à expliquer, il cherche fonctionnellement à le comprendre au moyen d'un rapport causal, auquel il attribue le même degré de réalité qu'aux objets-mêmes dont ce phénomène est le siège."

F.Halbwachs précise cette idée en analysant l'expérience d'Oersted (déviation d'une aiguille aimantée au voisinage d'un fil parcouru par un courant). Il écrit à ce propos : "Les philosophes nous diront en général qu'un phénomène A est cause d'un phénomène B lorsqu'il le précède dans le temps et qu'en outre il est nécessaire à son apparition. Pour

l'expérience d'Oersted, la cause de la déviation de l'aiguille est de ce point de vue la fermeture de l'interrupteur. Mais on voit que c'est là une réponse tout à fait superficielle du type "explication verbale" (...). C'est l'ensemble en tant que totalité qui est responsable de la déviation de l'aiguille. Nous nous apercevons alors que nous avons glissé du problème de la cause à la considération plus générale des *conditions*¹ de production du phénomène. Il est tout aussi évident que nous avons manqué notre but, car la description de cet ensemble de conditions restera encore au niveau de "l'explication verbale". Il lui manque le caractère essentiel de la causalité, la valeur *d'explication*¹ proprement dite (...). En tout cas nous sommes désormais fondés à rejeter l'antériorité comme critère fondamental de la causalité physique."

Voilà donc posée une première distinction entre aspects susceptibles d'être associés, dans l'analyse qu'on fait des phénomènes physiques, à la causalité : l'antériorité de "la cause efficiente" et la valeur d'explication de "la cause formelle".

Mais les choses se compliquent encore, sous la plume de F.Halbwachs (1971b). En effet, parmi les types d'explication qu'il envisage, celui-ci établit une distinction entre les explications "homogènes" et "hétérogènes". Pour lui, certaines lois internes pourront être appelées "explications homogènes ou formelles". Mais parfois "la raison d'être des changements qui s'opèrent à l'intérieur du système doit être cherchée à l'extérieur de celui-ci, dans les changements d'un autre système, ou plus généralement du monde extérieur. Dans ce cas on peut distinguer "un patient" qui est le système considéré, et un "agent" qui est le système extérieur, les modifications du patient peuvent être considérées comme des *effets*¹, celles de l'agent en étant les *causes*¹. On est dans le domaine de l'explication *hétérogène ou causale*¹."

Cependant il n'est plus évident, dans cette catégorie d'explication "hétérogène ou causale", de savoir si l'action de l'agent est antérieure ou simultanée à l'effet manifesté par le patient. Le rôle du temps, rejeté comme critère décisif de la causalité, n'est pas clairement situé dans la perspective agent /patient évoquée par l'auteur.

En résumé, on voit se dessiner, dans ces prises de positions, deux axes d'analyse mettant en jeu l'un le rôle du temps dans le couple cause-effet, l'autre la valeur explicative de la mise en relation.

L'antériorité semble un critère assez facilement décidable. On peut l'associer à l'existence d'une propagation du lien de la "cause" à celui de "l'effet". Mais l'analyse quasistatique, qui efface délibérément cette étape, n'en efface pas vraiment l'image causale, ni l'idée associée de couple agent-patient : le temps ne figure pas dans la loi de Coulomb, mais on comprend bien la charge comme "source" du champ. La question n'est donc pas si simple.

¹ en italique dans le texte.

Quant à la "valeur explicative", c'est une notion qui décourage la quantification. Catégoriser les types d'explication est une opération très difficile, qui a fait couler beaucoup d'encre (voir par exemple : Bunge 1971) et qui dépasse notre propos.

Nous voudrions simplement souligner qu'antériorité et valeur explicative ne sont pas des critères d'application simple, qu'ils ne sont pas mutuellement exclusifs ni individuellement suffisants pour décider qu'un élément d'analyse de situation physique renvoie à la causalité.

Nous convenons ici de parler de registre "légal" lorsque l'explication repose essentiellement sur une relation, éventuellement complexe, entre plusieurs grandeurs prises au même instant. Sinon, en particulier dans le cas où un schéma simple agent-patient semble faire l'affaire, et encore plus dans le cas d'un décalage temporel manifeste, nous parlerons d'un registre "causal". Rappelons à ce propos que, stricto sensu, la "causalité physique" impose un tel décalage.

Comment se situent les situations physiques impliquées dans cette étude du point de vue du type d'explication qu'elles autorisent?

3) Evolution des systèmes complexes : cadre physique.

En physique, on peut décrire l'évolution d'un système complexe de deux façons :

- par une analyse quasistatique, en considérant l'évolution simultanée des variables sous la contrainte permanente de relations simples, telles que " $U=RI$ ", " $PV=nR T$ "...(avec les notations habituelles).
- par une analyse de la situation qui ne néglige plus les temps de propagation entre le "départ" et "l'arrivée" d'une information concernant certaines grandeurs.

En reprenant les catégories du paragraphe précédent, nous pouvons dire que cette deuxième analyse s'intègre particulièrement bien dans un registre causal dans le sens où la cause est antérieure à l'effet. Par contraste, l'analyse quasistatique ne relève pas naturellement d'un raisonnement causal, mais plutôt du registre légal. En effet elle n'implique pas de décalage temporel entre l'évolution des différentes grandeurs impliquées dans les relations, ou si l'on préfère, elle l'efface.

Un deuxième aspect mérite d'être souligné : en physique les interactions interviennent à l'échelle microscopique, alors que beaucoup d'analyses physiques s'effectuent à l'échelle macroscopique. Pour certaines grandeurs, le passage du microscopique au macroscopique ne pose pas de problème, soit parce qu'il n'est même pas soupçonné, soit parce qu'il s'analyse simplement : la force d'attraction gravitationnelle entre deux corps est de ce type. Mais dans d'autres cas, les grandeurs macroscopiques impliquées n'évoquent pas en elles-mêmes l'idée d'interaction et ne se relient pas simplement aux interactions microscopiques qui déterminent

leurs valeurs : ainsi en est-il des grandeurs impliquées dans les relations citées plus haut : " $U=RI$ ", " $PV=nRT$ ".

Dès lors, celles-ci risquent de bien peu satisfaire le désir d'explication. On peut penser que le retour au microscopique suggère plus facilement l'idée de cause car on peut y retrouver l'idée d'action, d'agent (les charges qui créent le champ, les particules qui cognent la paroi...), et de patient associé (les électrons dans les fils, la paroi...). D'ailleurs F.Halbwachs (1971a) parle de "*causalité vraie*¹" à propos de "*cette réduction des phénomènes à ceux d'un niveau sous-jacent*¹." Il restera à passer de la vision microscopique aux relations entre grandeurs macroscopiques. Mais au moins au niveau microscopique peut-on parler de vision causale probable chez les étudiants, même si le décalage temporel entre cause et effet est effacé par l'analyse quasistatique.

Qu'en est-il, en fait, des raisonnements des étudiants dans ce domaine?

4) Etat de la question en didactique.

a) Aspects généraux du raisonnement.

L'importance des schèmes causaux dans les raisonnements des enfants, des élèves et étudiants en physique est depuis longtemps soulignée.

A partir de ses expériences sur les très jeunes enfants, J.Piaget considère que la forme primitive du rapport de causalité est l'un des invariants formés au stade sensori-moteur. F.Halbwachs (1971a) décrit ainsi cet invariant : "Cette forme se caractérise et se distingue des formes plus évoluées, à la fois par le phénoménisme et l'égoцентризм (...). Il est nécessaire que l'action propre du sujet se trouve à l'origine de la succession et en apparaisse comme le premier moteur. Par la suite, il se produit une sorte de contagion du pouvoir causal qui se trouve délégué secondairement aux actions des objets les uns sur les autres."

Ainsi, pour J.Piaget (1971), la causalité est essentiellement caractérisée par l'attribution des opérations aux objets. Analysant l'évolution de la causalité à propos de la notion de force, l'auteur souligne que les enfants ont d'abord besoin d'un effet visible (un mouvement) pour admettre l'existence d'une force, puis qu'une certaine différenciation est faite entre cause et effet : l'existence de la force est envisagée même dans des situations d'équilibre.

Dès les premières études sur les raisonnements naturels en mécanique (cf Migne : 1970, Viennot : 1977, Saltiel : 1978), l'importance de ces schèmes causaux et leurs aspects réducteurs apparaissent. En particulier, l'impossibilité d'envisager un mouvement sans imaginer une cause présente relève de cette vision réductrice.

¹ en italique dans le texte.

Dans un effort de généralisation, A.A.di Sessa (1981, 1983), cherche à caractériser "l'intuition physique, " du "naïf" à l' "expert". Il définit les "phénomènes primitifs" : sortes de structures premières de notre système cognitif, comparables aux axiomes mathématiques (il n'y a pas de justification de ces "phénomènes primitifs", ni de sous-structure). Selon l'auteur, ces "phénomènes primitifs" sont à l'origine des difficultés rencontrées dans l'apprentissage. L'un des "phénomènes primitifs" est le schéma causal "élan-résistance-résultat" ("Ohms'p-prim"). A.A.di Sessa indique que ce schéma est accompagné, chez l'apprenant, d'une série de règles de corrélation qualitative, telles que : "plus d'élan implique plus de résultat" et "plus de résistance implique moins de résultat"; ce qui donne par exemple des raisonnements tels que : "plus je pousse fort, plus l'objet avance vite", ou "plus la résistance électrique est grande, plus l'intensité du courant est petite", qui, appliquée sans considération des autres aspects pertinents de la comparaison, peuvent conduire à des conclusions erronées.

De même, B.Andersson (1986), en suivant G.Lakoff et M.Johnson (1980) , affirme qu'il y a un noyau commun à toutes les explications et prédictions des élèves : une forme causale, qu'il appelle "the experimental gestalt of causation", représentée par le schéma agent-instrument-patient (ou objet). Il en donne divers exemples, notamment en électricité, le schéma "batterie-courant-lampe" et en optique, le schéma "filament de lampe-lumière-écran". Il suggère qu'on peut les considérer comme des chaînes causales, la relation causale nécessitant un contact physique direct entre l'agent et l'instrument et entre l'instrument et le patient.

Partant d'un point de vue associé à l'intelligence artificielle , celui des "modèles mentaux", J.de Kleer et J.S.Brown (1983) recroisent les mêmes questions. Ces auteurs ont cherché à construire un modèle général de raisonnement causal. Ils se sont posé la question suivante : de quoi un système cognitif (humain ou artificiel : programme d'ordinateur) a-t-il besoin, face à un système physique, pour comprendre de quoi est fait celui-ci, comment il fonctionne, et pour faire des prédictions à son sujet?

Pour J.de Kleer et J.S.Brown, la base de toute modélisation est le principe de causalité, accompagné d'un principe de localité : la cause est près de l'effet, et d'un principe d'asymétrie: la cause précède l'effet. Pour reprendre la distinction introduite plus haut, ils envisagent des explications en termes d'actions et d'effets (registre causal), plutôt qu'en termes de lois (registre légal).

Ces auteurs font une large place au temps dans leurs propres raisonnements. Proposant des explications pour les phénomènes physiques qu'ils analysent, ils parlent de "causal stories", en décrivant des successions d'événements dans des histoires où le temps employé est le futur, ou bien dans des schémas avec des flèches, dont la signification est ambiguë, comme on le verra plus loin.

Ainsi, leurs explications sont-elles très marquées par l'écoulement du temps. La simultanéité éventuelle des phénomènes physiques n'y est pas évoquée. L'idée de succession chronologique d'évènements est largement suggérée, mais non discutée.

Dans une perspective assez proche, mais avec le but plus affirmé d'analyser les difficultés et les évolutions conceptuelles des élèves, deux autres auteurs, R.Guterriez et J.Ogborn (1992) analysent le modèle de J.de Kleer et J.S.Brown. Ils ajoutent trois principes, en se référant à M.Bunge (1959) :

- s'il y a un effet, il est toujours produit par une cause.
- s'il y a une cause, invariablement un effet doit suivre.
- la même cause produit toujours le même effet.

Ces auteurs pensent (en rejoignant De Kleer et Brown : 1984) que l'apprenant peut notamment être amené à

- inventer des causes (causes mythiques opérant dans un temps mythique).
- ignorer les causes dont les effets ne sont pas visibles.

Ces idées rejoignent l'étude antérieure de S.Rozier (1987, 1991). Celle-ci, à partir d'études dans le domaine de la thermodynamique, donne une description très complète des difficultés rencontrées à propos des évolutions de systèmes complexes, prenant en compte à la fois les difficultés liées à l'existence de nombreuses variables et celles liées à l'intervention du temps dans l'explication causale.

Elle met d'abord en évidence une tendance chez les étudiants à la réduction fonctionnelle, qui consiste en ceci :

Lorsqu'une quantité physique dépend de plusieurs autres, les étudiants ont tendance à associer certaines d'entre elles, deux à deux, de façon préférentielle, à l'exclusion d'autres variables pertinentes.

L'exemple suivant, donné par S.Rozier, est caractéristique de ce type de raisonnement : pour expliquer de façon microscopique l'élévation de pression d'un gaz dans une compression adiabatique, la pression est préférentiellement associée par les étudiants à la densité moléculaire, à l'exclusion de la vitesse moyenne des molécules.

Ces associations préférentielles s'observent couramment. Elles ont déjà été décrites par de nombreux auteurs, notamment J.Piaget (1946) à propos de la relation entre longueur, temps, vitesse. De même, au cours d'une étude sur les raisonnements d'étudiants dans le domaine des ondes, L.Maurines (1986, 1992) a observé des associations impropres "amplitude-durée" ou "vitesse-durée" à propos de la durée du mouvement d'un point dans un milieu propagatif.

La structure de l'explication, utilisant ces associations préférentielles est donc celle d'une chaîne linéaire $\Phi_1 \rightarrow \Phi_2 \rightarrow \dots \Phi_n$, où chaque Φ est un évènement qui ne met en jeu que l'évolution d'une seule variable.

Un autre aspect du raisonnement, bien moins connu auparavant, est mis en évidence par S.Rozier : dans les chaînes $\Phi_1 \rightarrow \Phi_2 \rightarrow \dots \Phi_n$, les étudiants considèrent plus ou moins explicitement que les variables évoluent les unes après les autres (alors que, du point de vue de l'analyse quasistatique, elles varient toutes simultanément).

Il en résulte que la succession d'arguments prend un statut d'histoire où les phénomènes Φ_i sont implicitement compris comme successifs et donc temporaires.

Par exemple, pour décrire microscopiquement un chauffage isobare, de nombreux étudiants écrivent la chaîne explicative "apport de chaleur $\rightarrow$ augmentation de température $\rightarrow$ augmentation de pression $\rightarrow$ augmentation de volume."

Cette argumentation, qui apparemment contredit l'énoncé ("chauffage isobare"), ne peut en effet s'interpréter que comme la description de phases temporaires et successives : comme le disent certains étudiants, "dans un premier temps", la chaleur provoque une augmentation de température donc de pression (le volume étant constant); puis le piston est relâché et se déplace jusqu'à ce que la pression du gaz soit égale à la pression exercée par l'extérieur (donc on aboutit à une pression égale à la pression constante exercée par l'extérieur).

Les étudiants n'utilisent pas toujours des schémas avec des flèches, mais ils écrivent souvent la conjonction "alors", dont le statut est aussi ambigu que celui des flèches. En effet ce terme "alors", comme son équivalent anglais "then", est, de manière indécidable, intermédiaire entre le "donc" (logique) et le "ensuite" (chronologique).

Pour résumer, la chaîne $\Phi_1 \rightarrow \Phi_2 \rightarrow \dots \Phi_n$, traduit une argumentation linéaire (où les évolutions de chacune des variables sont considérées séparément), à connotation chronologique, qui rend compte, ici comme dans de nombreux autres exemples, d'un mode de raisonnement très fréquent chez les étudiants. Celui-ci a été qualifié par S.Rozier de "raisonnement linéaire causal". Ajoutons que ces chaînes causales en forme d'histoire favorisent la plus grande confusion entre les régimes permanents et transitoires. (Rozier et Viennot : 1991, Viennot : à paraître)

La causalité apparaît donc à travers toutes ces études comme un thème crucial, avec des nuances différentes. Associée à l'analyse des difficultés chez S.Rozier, elle est considérée par ailleurs, chez J.de Kleer et J.S.Brown par exemple, comme la trame fondamentale du raisonnement humain, les difficultés associées étant alors beaucoup moins soulignées.

L'accent mis sur le décalage dans le temps entre cause et effet, est, lui aussi différent d'une étude à l'autre; élément essentiel du raisonnement commun chez S.Rozier, qui analyse les difficultés conceptuelles, ce décalage est pratiqué sans analyse véritable par J.de Kleer et J.S.Brown.

Abordons maintenant les conclusions des chercheurs qui se sont centrés sur le thème particulier de l'électricité.

b) Dans le domaine de l'enseignement de l'électricité.

De nombreux chercheurs en didactique (voir en particulier Closset : 1983a, Johsua : 1982, 1985, Shipstone, von Rhöneck, Jung, Kärrqvist, Dupin, Johsua : 1988) se sont intéressés aux raisonnements des élèves en électrocinétique. Ils ont établi que de nombreux élèves et étudiants :

- paraissent croire que l'intensité du courant débité par une pile est indépendante du circuit auquel elle est reliée, et que ce courant "s'use" tout le long du circuit.
- pensent qu'une modification dans un circuit n'a que des conséquences locales et/ou uniquement sur la suite du circuit sans rétroaction de l'aval sur l'amont (raisonnement séquentiel).
- raisonnent à l'aide d'une notion indifférenciée, qui semble être un amalgame des concepts de tension, courant, énergie (raisonnement mononotionnel).

Pour que les élèves et les étudiants parviennent à surmonter ces obstacles, plusieurs didacticiens préconisent de se placer à un niveau "microscopique" dès le début de l'enseignement de l'électrocinétique, parce que celui-ci paraît plus directement explicatif. Ce niveau renvoie au domaine de l'électrostatique, qui fait le pont entre les niveaux microscopique et macroscopique.

Cette tendance vers un enseignement au niveau du "microscopique" n'est d'ailleurs pas l'apanage de l'électricité, comme en témoignent les Actes du Séminaire "Relating Macroscopic Phenomena to Microscopic Particles". Ainsi P.Lijnse (1991) écrit, dans l'introduction : "Du point de vue scientifique, la science a pour objet d'expliquer le monde d'une manière unifiée, et un modèle particulière fournit une telle explication (...) Ces modèles sont censés fonctionner en tant que modèles explicatifs". Ils sont, selon lui, un moyen d'arriver à une meilleure compréhension des phénomènes ou d'éviter des confusions entre des grandeurs macroscopiques telles que intensité du courant et tension, ou chaleur et température.

Comme nous l'avons souligné plus haut, que les descriptions macroscopique et particulaire soient menées de front ou successivement, il reste à les concilier.

H.Härtel (1982, 1985, 1993) regrette à ce propos que dans les cours d'électrocinétique, on ne donne aucune définition microscopique de la tension, alors que dans le cours (souvent préalable, en Allemagne) d'électrostatique, le potentiel est défini comme le travail de la force électrostatique par unité de charge. Il déplore aussi que l'on dise que, dans un circuit électrique "l'origine du champ se trouve à la source de tension où les charges sont séparées et accélérées grâce à un mécanisme spécial", que d'autre part on présente aux étudiants un champ électrique parallèle aux fils, ne dépendant pas de la distance à la pile, de la longueur du fil, de sa forme... : les étudiants connaissant la loi de Coulomb, et donc l'expression du

champ en $1/r^2$ créé par une charge ponctuelle, ne trouvent aucune réponse à cette apparente contradiction dans les livres scolaires.

De plus, souligne-t-il, dans les ouvrages d'enseignement, lorsqu'on envisage la fermeture de l'interrupteur d'un circuit, on ne parle usuellement que de la mise en mouvement des électrons, mais pas de l'apparition des charges en surface sur les conducteurs et du champ électrique correspondant. Ceci tend, selon H.Härtel, à former une image non systémique du circuit, comme si les électrons étaient des particules indépendantes les unes des autres. L'auteur remarque que lorsqu'un élément d'un circuit est modifié, l'enseignement des circuits électriques, qui ne considère que des états d'équilibre, ne peut répondre à la question : "Comment le circuit est-il *informé*¹ du changement qui s'est produit?"

A.Benseghir (1989a, 1989b, 1993, 1995) souligne les mêmes lacunes, en s'appuyant sur le constat des difficultés à la fois historiques et actuelles. Celles-ci concernent un réinvestissement non maîtrisé de raisonnements (sommaires) électrostatiques en électrocinétique. Une attention excessive aux seules charges des pôles, et donc l'ignorance des charges de surface, une association entre différence de potentiel et densités de charge aux points considérés, sont autant d'éléments du raisonnement qui conduisent à ne pas faire véritablement de distinction entre circuit ouvert et circuit fermé, et à considérer le générateur comme l'ensemble de deux réservoirs de charges.

L'auteur conclut, lui aussi, sur la nécessité de conduire les étudiants à une compréhension unifiée de l'électrostatique et de l'électrocinétique.

Dans le même esprit, en rejoignant le point de vue de P.Licht (1991), B.S.Eylon et U.Ganiel (1990) soulignent que le régime permanent d'un circuit électrique est dû à un grand nombre de mécanismes du type "cause-effet".

Ils pensent que pour parvenir à une bonne compréhension des circuits électriques, il faut maîtriser à la fois les aspects quantitatifs globaux (lois de Kirchhoff, Ohm...), fonctionnels qualitatifs, et le lien entre les niveaux microscopique (vitesses des particules chargées, forces, champs...) et macroscopique (courant, tension, résistance...). D'après eux, l'absence de ce lien empêche les étudiants d'avoir une vue systémique du circuit et d'assimiler les relations fonctionnelles qui existent entre ses différentes parties.

Au niveau microscopique, ils proposent de présenter le mécanisme suivant : (pile → différence de potentiel → champ électrique → force → mouvement de charge).

Pour évaluer leur proposition, ces auteurs analysent les réponses d'étudiants à des questions concernant des situations de régimes transitoires. Par exemple, pour une charge de condensateur, où l'intensité du courant est la même en tout point du circuit à un instant

¹ en italique dans le texte

donné (régime transitoire quasistatique), les auteurs constatent que les étudiants manifestent souvent un raisonnement séquentiel.

Mais là où l'aspect explicatif du raisonnement séquentiel pourrait avoir davantage de légitimité, par exemple pour l'ouverture d'un interrupteur (régime transitoire non quasistatique), les étudiants, selon les auteurs, n'exploitent pas cette opportunité. Ils ne raisonnent pas en termes de champs ou de forces électriques. Ils se souviennent des formules de définition du champ et du potentiel, mais ils ne réinvestissent pas leurs connaissances d'électrostatique devant les situations proposées. Ils parlent de potentiel ou de charge, sans aucune idée du mécanisme des processus microscopiques, a fortiori les étudiants sont incapables à concilier les points de vue macroscopique et microscopique.

Une conclusion semble s'imposer : il serait souhaitable d'aider les étudiants à mettre en oeuvre leurs connaissances d'électrostatique dans le domaine des circuits électriques afin d'éviter une vision morcelée de l'électricité.

De façon assez surprenante B.S.Eylon et U.Ganiel, qui d'ailleurs n'ont pas fait la distinction entre les régimes transitoires quasistatiques et non quasistatiques, suggèrent essentiellement un travail autour des régimes transitoires quasistatiques (circuits R C avec une grande valeur de la constante de temps), ceux pour lesquels le risque de confusion entre le point de vue systémique et le point de vue explicatif microscopique est le plus grand.

En cela, ils rejoignent les propositions de M.S.Steinberg (1985).

Une des propositions les plus complètes pour un enseignement unifié de l'électricité est celle de B.A.Sherwood et R.W.Chabay(1993a, 1993b).

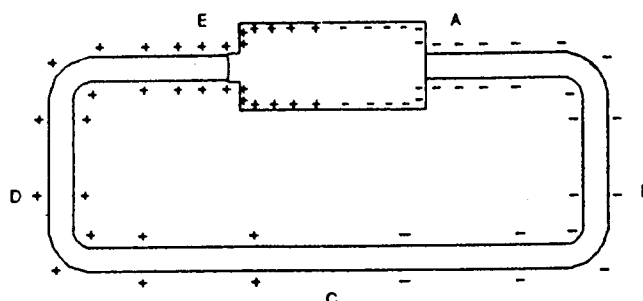
Ces deux chercheurs pensent qu'il est possible que les étudiants comprennent de nombreux phénomènes à partir d'un petit nombre de lois et concepts, et en particulier assimilent à la fois l'électrostatique et l'électrocinétique, uniquement à l'aide d'une forme qualitative de la loi de Coulomb (interaction décroissant avec la distance, force dont la droite d'action est la droite reliant les particules en interaction, force obéissant au principe de superposition) et d'un processus itératif (interactions de Coulomb → accélérations → vitesses → nouvelles positions → interactions de Coulomb → ...), qui assure le lien entre les niveaux microscopique et macroscopique.

B.A.Sherwood et R.W.Chabay, dans leur cours (1993b), analysent longuement les circuits électriques en termes de charges surfaciques sur les conducteurs.

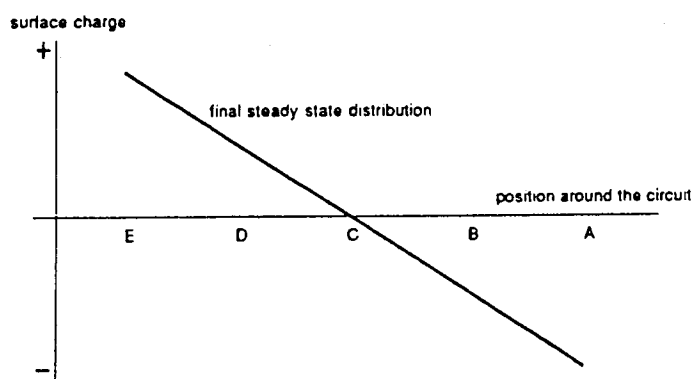
Ils utilisent de nombreuses représentations graphiques :

- logiciels tels que "Electric Field Hockey" de R.W.Chabay où l'on peut observer le mouvement d'une charge en présence de diverses charges fixes.
- dessins représentant les densités variables de charge surfacique tout le long du circuit (voir encadré).

- graphiques représentant la densité surfacique de charge en fonction de la position dans le circuit (voir encadré). Ces graphiques sont réinterprétés ensuite en termes de potentiel.



The amount of surface charge varies approximately linearly along the wire, from point A near the "-" end of the battery around to point E near the "+" end of the battery. The following graph shows the surface charge distribution for the final steady-state distribution (drawn left to right to match the circuit diagram):



Ceci, affirment les auteurs, pourra permettre aux étudiants de répondre à des questions telles que : "Pourquoi le courant sait-il tourner dans les coins?" ou "Comment le courant sait-il se diviser, dans les quantités adéquates, dans chaque branche d'un circuit?"

B.A.Sherwood et R.W.Chabay disent "avoir l'impression" que, compte-tenu des réponses des étudiants à l'examen final, cet enseignement a été accessible aux étudiants, et efficace; mais ils indiquent qu'ils n'ont pas encore eu le temps de faire une véritable évaluation de leur enseignement.

Enfin, D.Psillos et P.Koumaras (1993, 1994) reprennent l'idée que les étudiants emploient volontiers une structure causale linéaire dans les situations qui comportent des changements, en essayant de bâtir des modèles descriptifs et explicatifs des systèmes physiques. Ces auteurs insistent sur la dissymétrie de la relation agent/patient. Ils pensent que dans de nombreuses situations, les étudiants attribuent à l'agent ou au patient un pouvoir constant : par exemple, la pile (agent) débite un courant constant, même si l'on change la lampe (patient). Ils indiquent que les étudiants associent à cette structure des règles de syntaxe telles

que : "plus de cause implique plus d'effet", ou "plus de résistance (au niveau du lien cause-effet) implique moins d'effet"(voir aussi à ce propos di Sessa : 1981).

D.Psillos et P.Koumaras proposent, dans le but d'aboutir à une restructuration des connaissances

- de construire des situations contre-intuitives provoquant des déstabilisations.
- de commencer par prendre en compte le type de causalité accessible à la compréhension des étudiants : une causalité linéaire ne mettant en jeu qu'une variable.
- de parler des régimes transitoires (en fait quasistatiques), plus compatibles avec une vision causale que les régimes permanents.

Ils proposent un curriculum en électricité, pour des élèves âgés d'environ 14 ans, où, après quelques séances sur le courant, la tension, la résistance, l'énergie, sont introduites des notions d'électrostatique et une approche des mécanismes microscopiques.

Ils pensent aussi que l'utilisation des chaînes causales peut faciliter l'accès à une vue systémique du circuit, via un bouclage des liens cause-effet sur la grandeur considérée initialement (causalité circulaire selon Halbwachs : 1971b).

Mais la question des étapes nécessaires pour passer du modèle causal linéaire au modèle systémique reste encore ouverte.

En résumé, toutes les études que nous venons de citer s'accordent à souligner

- chez les étudiants, un manque de vues unifiées sur l'électrostatique et l'électrocinétique.
- la nécessité d'analyser le circuit électrique d'un point de vue microscopique.
- la nécessité de faire le lien entre les descriptions microscopique et macroscopique du circuit électrique.

Nombreux sont les auteurs qui proposent, à cette fin, d'analyser des régimes transitoires (mais sans distinguer transitoires quasistatiques et non quasistatiques).

Les stratégies didactiques évoquées sont encore à l'état de propositions ou de mises en oeuvre récentes.

5) Choix pour l'étude : principe de superposition et causalité.

Pour analyser un circuit électrique d'un point de vue microscopique, il est essentiel d'avoir bien compris le principe de superposition au sens où nous l'avons défini.

Mais l'électrostatique n'est pas naturellement appliquée à l'électrocinétique, une des difficultés de cette application étant la multiplicité des sources du champ électrique.

L'aspect que nous nous proposons d'étudier dans cette thèse est celui de la compréhension de la complexité des interactions dans le système, dans un état d'équilibre donné; il est l'amorce d'une vision systémique des circuits électriques par la prise en compte de

nombreuses charges. Nous n'étudierons pas les autres aspects du lien microscopique-macroscopique, par exemple le processus itératif mentionné par B.A.Sherwood et R.W.Chabay, ni le rôle du temps.

Non pas que ces points soient sans intérêt, loin de là, mais simplement parce qu'il fallait commencer par le début, et que ce seul principe de superposition s'est révélé l'occasion d'une étude déjà consistante.

Le principe de superposition appartient à un registre difficile à situer a priori sur les axes cause $\leftrightarrow$ loi, et, antériorité $\leftrightarrow$ simultanéité.

Exploité à propos de situations quasistatiques, le principe de superposition ne renvoie pas à une forme évidente de causalité.

En effet, on peut considérer qu'il implique l'idée d'antériorité, puisqu'il s'applique à des champs qui se propagent, mais, dans toutes les situations qui seront envisagées dans ce travail, on étudiera des états d'équilibre ou des régimes permanents : la propagation des champs est oubliée dans le traitement classique de ces situations.

Dire que ce principe ne relève que d'un registre légal, autrement dit de contraintes mutuelles d'éléments du système, exprimées formellement, serait également abusif : la charge apparaît clairement comme responsable de son champ. L'idée de couple agent-patient n'est donc pas loin, même si le patient (la charge dite "d'épreuve") n'est pas nécessairement présent. Nous parlerons donc ici de registre causal, même si aucun décalage temporel n'est pris en compte. Les étudiants nous y encouragent d'ailleurs, lorsqu'ils disent : "la cause du champ est telle charge."

Or, l'on peut s'attendre à ce que les étudiants rencontrent les difficultés suivantes :

*Lorsque plusieurs distributions de charges créent un champ résultant, on peut dire qu'il y a plusieurs causes et un seul effet.

* Lorsqu'une charge près d'un conducteur crée un champ et en même temps influence le conducteur, on peut dire qu'une seule cause a plusieurs effets (un effet direct et un effet indirect).

* Lorsqu'il existe un champ électrique dans un isolant où les charges sont immobiles, on peut dire qu'il y a une cause, mais pas d'effet visible.

On peut s'attendre à ce que les difficultés rencontrées puissent être mises en relation avec cette catégorisation.

6) Démarche suivie.

L'amorce de cette étude (chapitre 1) s'est faite à propos d'un questionnaire (appelé questionnaire "Gauss", posé à 176 étudiants), qui a fourni des indications sur les obstacles à la mise en oeuvre du principe de superposition.

Dix entretiens ont permis de poursuivre cette étude exploratoire.

Les résultats obtenus ont orienté la recherche sur les obstacles mis en évidence dans ces premières enquêtes et permis de sélectionner les questions les plus pertinentes.

A partir de là, deux thèmes d'étude se sont dégagés :

- l'existence du champ électrique et la mobilité des charges (chapitre 2). Il s'agit d'analyser dans quelle mesure le facteur "mobilité des charges" se révèle pertinent ou non pour admettre l'existence d'un champ électrique au point considéré. Ce n'est pas le cas dans la théorie physique, mais on a vu plus haut que l'existence d'un effet était souvent nécessaire, dans le raisonnement commun, pour admettre l'existence d'une cause. L'étude exploratoire par entretiens rejoint donc les résultats antérieurs rappelés à propos de la causalité pour suggérer cette ligne d'analyse.

- les sources du champ électrique et les "formules" (chapitre 3). Nous reprenons, ici et dans toute la suite, le terme "formule" utilisé par l'élève ou l'étudiant pour désigner une relation littérale entre grandeurs. Moins prévisible, ce second thème émergeant de l'enquête préliminaire relève d'une interprétation des formules en termes de "responsabilité" de certaines grandeurs pour l'existence d'autres grandeurs. On pourrait dire qu'une causalité "formelle" est retraduite en causalité simple, orientée de l'agent vers la grandeur "créée". la question se compliquera lorsque deux "effets" seront à concilier avec la même "cause".

A chacun de ces thèmes ont été associés plusieurs questionnaires :

- à propos du champ électrique et de la mobilité des charges : les questionnaires appelés "La tranche napolitaine", "Isolants", "Isolants bis" (chapitre 2).
- à propos des sources du champ électrique et des formules : les questionnaires appelés "Coulomb", "Coulomb bis" (chapitre 3).
- les deux thèmes interviennent dans le questionnaire appelé "Le champ dans les fils" (chapitre 4).

La méthodologie utilisée pour analyser les réponses à ces questionnaires (au total 1661 réponses pour ces 6 questionnaires) sera décrite dans le chapitre 1.

Une fois cernées les difficultés des étudiants sur ces thèmes, se pose la question de leur origine. L'évocation des grandes tendances du raisonnement commun sur la causalité et les problèmes à plusieurs variables, faite plus haut, interdit une réponse qui se limite au seul cadre de l'électricité. D'emblée nous avons souligné une résonance probable entre les difficultés observées ici et des aspects généraux du raisonnement (dont nous ne discutons pas l'origine). Mais y a-t-il, relativement au contenu restreint de notre étude, des facteurs plus spécifiques susceptibles d'expliquer les difficultés des étudiants? Les présomptions que l'on peut avancer sur ce point doivent, nous semble-t-il, tenir compte des éléments suivants. Il se peut que ces difficultés trouvent en partie leur source dans la vie courante, comme paraissent l'indiquer les travaux de M.Caillot et A.Nguyen-Xuan (1993) qui ont constaté, par exemple, que les adultes non spécialistes considéraient l'électricité statique comme différente de

l'électricité domestique, et étaient donc bien peu préparés à une vision unifiée de ces deux domaines.

Mais en fait ceux-ci, surtout l'électrostatique, sont relativement peu accessibles à travers le quotidien (voir Closset : 1983a), nous pouvons donc supposer que l'influence de l'enseignement sur les étudiants sera essentielle. Or, l'enseignement de l'électrostatique s'étale, en France, sur plusieurs années. A chaque niveau correspond la présentation de certaines propriétés du champ électrique (comme on le verra dans le chapitre 1). On peut donc s'interroger sur les chances offertes aux étudiants d'avoir une compréhension intégrée. Nous avons voulu éclairer cette question de deux manières.

D'une part nous avons regroupé nos échantillons en fonction de l'enseignement reçu préalablement en électricité (voir détails en chapitre 1) de manière à dégager d'éventuels indices de différences dans les réponses d'étudiants, attribuables au niveau d'étude. Néanmoins il ne nous a pas été possible, et ce n'est pas le but premier ici, de confirmer ces indices par une véritable étude statistique.

D'autre part, nous avons entrepris (chapitre 5) une étude de manuels scolaires aux niveaux secondaire et supérieur, selon les lignes d'analyse qui orientent l'étude des raisonnements des étudiants, afin de repérer dans quelle mesure ces ouvrages sont susceptibles, a priori, de favoriser ou d'entraver la maîtrise des difficultés observées chez les étudiants.

Cette mise en évidence à la fois des difficultés des étudiants et de l'influence probable de l'enseignement actuel nous a conduit à élaborer une séquence pour le début de l'enseignement supérieur. Notre cadre d'enseignement, une classe de Mathématiques Spéciales Technologiques, nous a contraint à des actions très limitées en termes de contenus, durées, style d'enseignement, types d'exercices. Ces actions "à la marge" ont été adaptées au traitement des difficultés en cause, à partir des hypothèses faites lors de l'analyse de ces obstacles. Plus précisément, elles font une place importante à une vision causale des phénomènes physiques du domaine, pour en resituer et en élargir les éléments habituellement retenus par les étudiants.

L'évaluation de la séquence, effectuée par questionnaire papier-crayon, avec trois groupes expérimentaux successifs (total de étudiants impliqués : 111) et divers groupes témoins (total des étudiants impliqués : 146), est décrite au chapitre 6. Elle met en jeu une batterie de couples "question-élément de réponse" dont l'étude préalable de raisonnements a montré la pertinence. Malgré l'étroitesse apparente du domaine conceptuel retenu pour cette étude, c'est donc une évaluation "multidimensionnelle" qui est visée. Elle conduit à comparer finalement des "profils conceptuels" pour les groupes concernés. Cette évaluation nous amènera à la conclusion de ce travail.

CHAPITRE 1

Enquêtes préliminaires.

I. Introduction.

Des enquêtes préliminaires ont été réalisées dans le cadre d'un tutorat de D.E.A (Raison : 1991). Il s'agit d'un questionnaire papier-crayon et d'une dizaine d'entretiens auprès d'étudiants de deuxième année universitaire.

Le questionnaire met en jeu le principe de superposition à travers une situation qui suggère l'emploi du théorème de Gauss. Initialement centrée sur les difficultés de l'application de ce théorème, cette situation a été la première à nous alerter sur le fait que le principe de superposition semblait non pertinent pour les étudiants.

Ensuite dix entretiens de type semi-directif ont été menés, pour permettre de préparer les enquêtes suivantes.

II. Méthodologie.

Nous décrivons à propos de l'enquête préliminaire la méthodologie de toute l'étude de raisonnements, qui s'est faite essentiellement par questionnaires papier-crayon.

1) Les entretiens.

Ces entretiens ont été menés dans une optique essentiellement exploratoire. Leur but est de repérer des causes probables de difficultés et d'orienter l'élaboration de questionnaires démonstratifs à leur propos. De plus, le suivi du raisonnement d'un étudiant particulier et de ses retours en arrière, l'observation de ses résistances, fournissent des indications sur l'importance des obstacles rencontrés.

Ces entretiens sont de type semi-directif : le chercheur présente à l'étudiant l'énoncé d'un test et dialogue avec lui à propos de ce test, pour lui faire préciser sa pensée ou lui faire remarquer d'éventuelles contradictions. Aucun autre élément de solution n'est introduit.

Transcrits intégralement, ces entretiens ont fait l'objet d'une analyse par interprétation naturelle.

Ils ont permis

* d'éliminer plusieurs questionnaires

- soit parce qu'ils pouvaient prêter à confusion. Par exemple, la question "Une charge extérieure q crée-t-elle un champ à l'intérieur d'un conducteur voisin?" est souvent interprétée comme "Un champ nul résulte-t-il de la présence de la charge extérieure?"

- soit parce qu'ils présentaient peu d'intérêt. Par exemple, nous avons supprimé un test dont les difficultés d'origine mathématique occultaient celles qu'on visait.

* de retenir pour la suite de l'étude, les questionnaires

- "Isolants" (voir chapitre 2).
- "La tranche napolitaine" (voir chapitre 2).
- "Coulomb" (voir chapitre 3).

Nous nous bornerons à citer dans les chapitres 2 et 3, des extraits particulièrement significatifs en appui aux analyses de résultats des questionnaires. Ces citations donneront la mesure des résistances considérables observées à propos des difficultés analysées ici.

2) les questionnaires dans l'ensemble de l'étude.

Les questionnaires papier-crayon sont les outils essentiels de notre étude. D'abord parce qu'ils permettent d'obtenir un grand nombre de réponses en un temps relativement court et donc constituent un moyen pour analyser des tendances largement représentées : le nombre de réponses a été de 141 à 440 par questionnaire. Ensuite parce que ces outils sont aussi des moyens de communiquer relativement facilement des résultats : tout enseignant peut s'en saisir et mesurer directement auprès de ses élèves les effets attendus.

Pour chaque questionnaire, la procédure de passation est la suivante : le professeur de la classe reçoit, de la part du chercheur, l'énoncé du test accompagné de la réponse correcte. Il donne l'énoncé à ses élèves ou étudiants, qui doivent répondre en un temps limité.

Le questionnaire étant anonyme, les élèves ou étudiants ont toute liberté d'indiquer leurs doutes, leurs hésitations, ce à quoi ils sont encouragés par le professeur. Après avoir ramassé les réponses, le professeur donne la correction du test.

L'analyse des réponses aux questionnaires comprend deux étapes :

- un dépouillement des réponses brutes (par exemple en oui/non).
- une analyse des commentaires des réponses, conduisant à la définition des catégories.

Tous les pourcentages, dans ce qui suit, sont rapportés à l'ensemble des réponses de l'échantillon concerné.

3) Définition des types d'échantillons pour la suite du travail.

Quatre catégories d'étudiants ont été définies, selon les niveaux d'enseignement en électricité. Les programmes français correspondants figurent dans l'annexe a (pages 198 à 201). Rappelons-en brièvement les principaux points, qui servent à définir les quatre types d'échantillons, qui ont respectivement reçu l'enseignement correspondant.

(H) : Définition du champ électrique par $\vec{F} = q\vec{E}$ (force s'exerçant sur une charge d'épreuve). Cas du champ uniforme. Travail de la force électrique. Différence de potentiel.

(I) : Loi de Coulomb. Théorème de Gauss. Relation entre champ électrostatique et différence de potentiel : $\vec{E} = -\text{grad}V$. Conductibilité des métaux : $\vec{j} = \gamma\vec{E}$.

(J) : Conducteurs en équilibre. Condensateurs.

(K) : Diélectriques.

Les populations que nous avons interrogées, regroupées selon ces catégories, correspondent aux classes suivantes (en France) :

(H) : élèves de 1ère ou Terminale scientifiques (grades 11, 12) ou étudiants en 1ère année d'enseignement supérieur avant le cours d'électrostatique (Mathématiques Supérieures Technologiques ou Université).

(I) : étudiants de Mathématiques Supérieures ou Mathématiques Supérieures Technologiques (niveau de 1ère année d'enseignement supérieur).

(J) : étudiants de Mathématiques Spéciales ou Mathématiques Spéciales Technologiques ou en 2ème année d'Université (niveau de 2ème année d'enseignement supérieur).

(K) : étudiants en 2ème année d'Université, après le cours sur les diélectriques ou étudiants au-delà de la deuxième année d'enseignement supérieur (en I.U.F.M, en licence de physique ou en doctorat).

Quelques questionnaires ont été posés à des étudiants d'Université de niveau (K) en Algérie ou des étudiants d'école d'ingénieurs de niveau (K) en Suède.

Le but n'est pas ici de faire une comparaison entre pays, mais de repérer d'éventuelles tendances communes à un niveau donné.

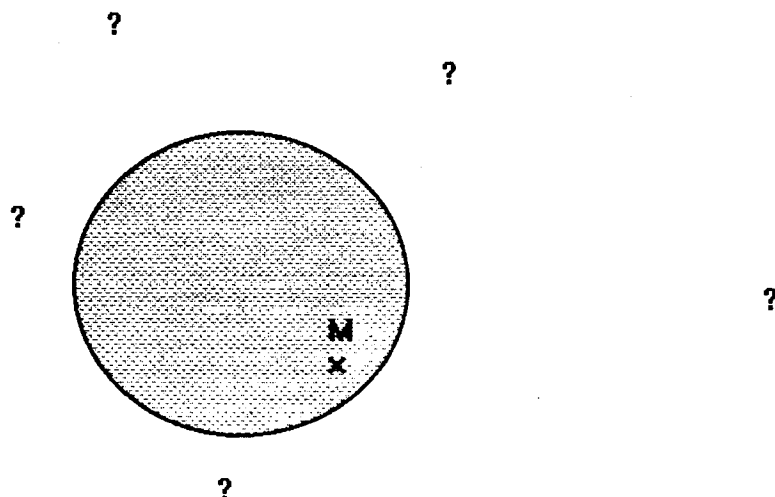
III. Questionnaire "Gauss".

1) Introduction.

Ce questionnaire présente une situation où les sources du champ sont multiples : il s'agit d'une sphère isolante uniformément chargée et de charges extérieures inconnues. La question porte sur le calcul du champ électrique en un point intérieur à la sphère.

La symétrie de la sphère uniformément chargée peut suggérer d'appréhender ce problème à l'aide du théorème de Gauss et d'en faire une application impropre où l'existence des charges extérieures soit occultée. Nous désirons voir ici si les étudiants utilisent le principe de superposition comme garde-fou contre cette tendance.

2) Enoncé et réponse correcte.



Une sphère isolante de rayon R est chargée uniformément avec une densité volumique de charge ρ . On ignore la distribution de charge à l'extérieur de la sphère. (Voir le schéma ci-dessus).

On veut calculer le champ électrostatique en un point M situé à l'intérieur de la sphère, c'est à dire à une distance r du centre telle que $r < R$.

Peut-on effectuer ce calcul sans connaître la distribution de charges à l'extérieur de la sphère?

Si OUI pourquoi et comment?

Si NON pourquoi?

Justifiez en détail votre réponse.

Réponse correcte : non, le champ électrique qui existe en M , $\vec{E}_M$, est créé par toutes les charges de l'univers et on ne peut le calculer si la distribution de charge à l'extérieur de la sphère est inconnue.

$\vec{E}_M = \vec{E}_{\text{créé en } M \text{ par la sphère}} + \vec{E}_{\text{créé en } M \text{ par les charges extérieures à la sphère}}$

Remarquons que, comme la sphère est isolante, ses charges sont immobiles à l'échelle macroscopique, mais il peut y avoir polarisation de la sphère.

3) Conditions d'interrogation.

Ce test a été posé en entretien à 10 étudiants de niveau J (Université Paris 7) et en questionnaire papier-crayon anonyme à 176 étudiants. La durée de passation a été d'environ 15 minutes (pour les entretiens comme pour les questionnaires).

Voici le détail des échantillons, pour les questionnaires :

N désignera dans la suite le nombre d'étudiants dans un échantillon ou sous-échantillon.

(J) : D.E.U.G 2ème année, Université Paris 7, novembre 89, (N=86); D.E.U.G 2ème année, Université Paris 11, mars 90, (N=22); Math Spé T, Raspail, Paris, décembre 94, (N=39).

(K) : 2ème année d'Université, Sétif, Algérie, mars 91, (N=29).

Rappelons que les étudiants (K) ont suivi un cours complet d'électrostatique et que la seule différence entre les échantillons (J) et (K) est que les étudiants (J) n'ont pas eu de cours sur les diélectriques.

4) Tableau des pourcentages de réponses brutes pour les questionnaires.

Nous n'avons pas observé de différence significative entre les réponses des étudiants dans les différents sous-échantillons de type J. C'est pourquoi ceux-ci ont été regroupés.

Echantillon	N	OUI	NON réponse correcte	?
J	147	85%	14%	1%
K	29	86%	14%	0%

La catégorie "?" correspond à une absence de réponse ou au commentaire "je ne sais pas".

Nous pouvons constater que le taux de réponses correctes est faible dans chaque échantillon (14%).

5) Les arguments des étudiants.

a) Arguments pour la réponse correcte "non".

La réponse correcte est parfois accompagnée de commentaires mentionnant le principe de superposition ou tout au moins la contribution des charges extérieures au champ électrique existant en M.

Les commentaires suivants sont caractéristiques de ces arguments :

(J) : "Non, $\vec{E}_{\text{total}}$ en M = $\vec{E}$ en M créé par la sphère + $\vec{E}$ en M créé par l'extérieur. On peut calculer $\vec{E}$ en M créé par la sphère à l'aide du théorème de Gauss. Mais on ne peut pas calculer $\vec{E}$ en M créé par l'extérieur"

(K) : "On doit prendre en compte la densité de charges extérieures ρ_{ext} . Mais je ne sais pas pourquoi elle a toujours été négligée. M sera soumis aux champs $\vec{E}_1$ dû à ρ_{int} + $\vec{E}_2$ dû à ρ_{ext} "

et de façon moins précise : (J) : "Le champ à l'intérieur dépend des charges à l'extérieur."

Quelques étudiants parlent de l'influence de l'extérieur sur la distribution de charge à l'intérieur de la sphère : ils ne disent pas que les charges extérieures créent un champ en M, mais que leur présence modifie la densité de charge dans la sphère (phénomène de polarisation), donc modifie le champ créé par les charges intérieures en M.

Exemple : (K) : "S'il y a d'autres distributions de charges, la sphère sera polarisée, sa densité de charge sera modifiée, d'où la réponse "non"."

On peut se demander si les étudiants qui mentionnent cet effet indirect des charges extérieures pensent aussi à leur effet direct qui est la création d'un champ électrique. Ce problème des effets direct et indirect sera repris dans le chapitre 3 avec le questionnaire "Coulomb".

Certains commentaires mentionnent donc explicitement le principe de superposition ou le phénomène de polarisation, d'autres sont plus ambigus, il est donc impossible de garantir que toutes les réponses "non" résultent d'une application correcte du principe de superposition.

b) Arguments pour la réponse incorrecte "oui".

Nous avons trouvé dans les explications des étudiants, accompagnant la réponse "oui", deux principaux types de commentaires :

- ceux qui s'appuient sur le théorème de Gauss.
- ceux qui s'appuient sur la notion d'isolant.

* Commentaires liés au théorème de Gauss :

Lorsque l'on applique le théorème de Gauss pour calculer un champ électrique $\vec{E}$, il est important de connaître les symétries des distributions de charges pour pouvoir déterminer le champ électrique $\vec{E}$ en un point à partir du calcul du flux électrostatique à travers une surface fermée $\Phi = \oint_S \vec{E} \cdot \vec{n} dS$.

Or, dans le questionnaire "Gauss", la distribution des charges extérieures est inconnue, donc on ne sait rien des symétries du problème. Pourtant d'assez nombreux étudiants pensent, sans le dire ou en le disant, que le problème est à symétrie sphérique d'où $\vec{E} = E(r) \cdot \vec{OM} / OM$ et $\Phi = \oint_S \vec{E} \cdot \vec{n} dS = E \cdot S$.

Il est vrai que quasiment tous les exercices usuellement traités à ce niveau autorisent ce type de calcul.

Ainsi on a pu lire :

(J), en entretien : "Le champ est radial pour des raisons de symétrie, ça, on ne va pas le redémontrer. On applique le théorème de Gauss."

(J) : "E ne dépend que de r car ρ est uniforme. On calcule $\vec{E}(r)$ avec le théorème de Gauss (la surface de Gauss étant une sphère.)"

(J) : " $\vec{E} = E(r) \cdot \vec{u}_r$ car la distribution est uniforme, sphérique. On applique le théorème de Gauss à une sphère Σ centrée en O. (Suit un calcul menant à $\vec{E} = \rho r \cdot \vec{u}_r / 3\epsilon_0$). Lorsqu'on utilise le théorème de Gauss, on considère la charge intérieure de la surface Σ ."

D'autres commentaires ne vont pas jusqu'au calcul du champ, mais s'appuient sur la formule $\Phi = Q_{\text{int}} / \epsilon_0$ pour dire que le champ électrique ne dépend que des charges intérieures : il y a un glissement du flux au champ, ainsi la charge intérieure à la surface de Gauss devient la seule source du champ électrique. On peut résumer cela en disant que les étudiants attribuent alors un contenu causal abusif à la formule $\Phi = Q_{\text{int}} / \epsilon_0$.

Voici quelques commentaires typiques à ce propos :

(J) : "Oui, d'après le théorème de Gauss, le champ ne dépend que des charges intérieures."

(J) : "Oui, utiliser le théorème de Gauss met seulement en jeu la distribution des charges intérieures."

(J) : "Oui, car l'application du théorème de Gauss n'intéresse que la distribution de charge à l'intérieur."

Nous avons remarqué aussi que certains étudiants utilisent l'expression "champ extérieur", qui peut aussi bien désigner le champ créé par les charges extérieures à une surface fermée que le champ qui règne en un point à l'extérieur de cette surface. Par exemple :

(J) : "Pour calculer le champ à l'intérieur de la sphère, on n'a pas besoin du champ extérieur."

Il y a là un glissement verbal, qui peut rappeler ce qu'on observe en mécanique lorsque "la force centrifuge de la masse" remplace aussi bien la force exercée par la masse sur le fil qui la fait tourner, que la force subie par la masse qui tourne (Viennot : 1977).

On peut donc se demander si l'insistance apportée dans l'enseignement au théorème de Gauss ne conduit pas les étudiants à une démarche "automatique" de résolution du problème, les étudiants pensant que le théorème de Gauss fournit une expression du champ électrique alors qu'a priori il ne donne qu'une expression du flux.

A ce propos B.Sherwood et R.Chabay repoussent l'étude du théorème de Gauss, relativement loin dans leur cours (1993b) : juste avant l'étude du magnétisme en donnant la justification suivante : "Notre raison pour ce report inhabituel est que, sans une compréhension particulièrement forte des relations entre les charges et le champ électrique, il est presque impossible de comprendre le théorème de Gauss. Il est beaucoup trop précoce d'introduire le théorème de Gauss au début du cours."

Pour revenir au thème central de notre étude, il est remarquable que la prise en compte du principe de superposition ne contrebalance pas cette tendance à une pratique "automatique" du théorème de Gauss.

* Commentaires liés à la notion d'isolant :

Un second type de commentaire est moins prévisible : certains étudiants insistent sur la nature isolante de la sphère considérée.

Plusieurs indiquent simplement que la sphère est isolante. Exemple :

(J) : *"Oui, car la sphère est isolante, elle n'a aucun lien avec l'extérieur."*

Pour certains étudiants la surface de la sphère isolante paraît constituer une barrière entre l'intérieur et l'extérieur. :

(J) : *"La sphère étant isolante, on ne s'occupe pas des charges existant à l'extérieur, car le champ qu'elles créent tout autour de la sphère isolante n'influe en aucune manière sur la densité volumique de charge à l'intérieur."*

(J) : *"La sphère étant isolante, le champ qui pourrait exister à l'extérieur de la sphère n'influe pas sur le champ intérieur."*

(J) : *"Parce que la sphère est isolante. Sa surface ne fournira aucune interaction et la distribution de charge à l'extérieur n'affectera pas le champ en M. Il n'y a pas de relation entre l'intérieur et l'extérieur de la sphère."*

Parfois, une autre idée est ajoutée : le fait que les charges ne peuvent pas bouger dans un isolant. Exemple :

(J) : *"La sphère est isolante, c'est pourquoi les charges sont "gelées", c'est pourquoi la distribution extérieure de charges n'influence pas le champ en M."*

(J) : "Puisque c'est un isolant, les électrons ne peuvent pas se déplacer pour annuler l'effet du champ à l'extérieur."

Nous avons aussi observé dans quelques commentaires une confusion entre les termes "isolant " et "isolé".

* En résumé, le tableau ci-dessous indique les pourcentages des deux types d'arguments :

Echantillon	N	réponses "oui"	Théorème de Gauss	Notion d'isolant
J	147	85%	56%	12%
K	29	86%	72%	10%

L'appui sur le théorème de Gauss apparaît majoritairement dans les deux populations, de manière non surprenante. L'idée d'isolant, peu présente mais commune aux deux échantillons, retient notre attention.

6) Une autre version du questionnaire :

En entretien, après le questionnaire "Gauss", un questionnaire "Gauss bis" a été présenté aux étudiants. Le schéma représente une sphère isolante uniformément chargée en présence d'une charge ponctuelle q extérieure (il n'y a plus de points d'interrogation autour de la sphère), et l'on pose la même question à propos du calcul du champ électrique en un point intérieur à la sphère.

Devant cette deuxième version, 3 étudiants sur 9, qui avaient répondu "oui" au questionnaire "Gauss", sont revenus en arrière : ils ont dit qu'il fallait tenir compte de la charge extérieure q dans cette nouvelle situation et donc qu'il aurait fallu tenir compte de toutes les charges extérieures dans la première situation. Dans un but pédagogique, cette deuxième version, posée après la précédente, pourrait sans doute être utilisée utilement comme outil de remédiation.

7) Conclusion.

La réponse incorrecte "oui" est donnée très majoritairement dans chaque échantillon interrogé par questionnaire, comme chez les étudiants interrogés en entretien. Les commentaires associés sont principalement :

- une application incorrecte du théorème de Gauss, qu'on peut interpréter comme une attribution d'un contenu causal à la formule " $\Phi = Q_{\text{int}} / \epsilon_0$ ".

- des arguments liés à la notion d'isolant, dont la surface paraît être une barrière entre l'intérieur et l'extérieur.

De nombreux étudiants n'utilisent donc pas spontanément le principe de superposition dans cette situation complexe, cette idée est balayée par des considérations sur les formules ou sur la nature isolante d'une substance.

Ces deux types d'arguments orientent la suite de notre étude. D'une part la nature du matériau, associée au type d'effet observable pour le champ, risque fort de contribuer chez les étudiants à une vision morcelée des phénomènes électriques et du champ électrique associé. D'autre part, au-delà des simples automatismes d'emplois de formules, les erreurs qui apparaissent ici suggèrent d'explorer plus avant les distorsions associées à une lecture "causale" et dissymétrisée des formules, dans laquelle les grandeurs impliquées dans un membre (ici de droite) seraient comprises comme seules responsables de l'existence de celles qui figurent dans l'autre membre (ici de gauche).

CHAPITRE 2

**Champ électrique et mobilité des charges.
Difficultés associées.**

I. Une vision non unifiée de l'électrostatique et de l'électrocinétique :
questionnaire de "La tranche napolitaine".

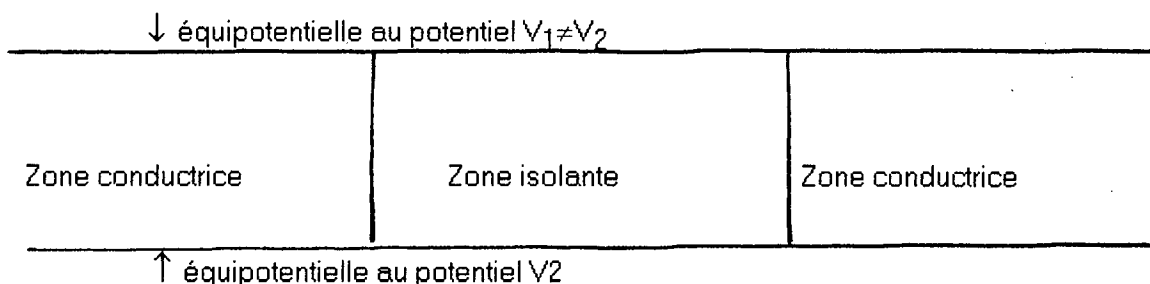
1) Introduction.

Nous avons vu, au cours de l'analyse des réponses au questionnaire exploratoire "Gauss" que le facteur "mobilité ou immobilité des charges" apparaissait pour certains étudiants comme pertinent dans l'appréciation de la valeur du champ électrique. Pour analyser plus précisément ce lien, qui pourrait être un obstacle à une vue unifiée de l'électrostatique et de l'électrocinétique, nous avons utilisé un questionnaire explicitement centré sur ce point : le test de "La tranche napolitaine"¹.

On y demande de comparer les champs électriques dans des zones conductrices ou isolantes, et la difficulté visée est de prendre en compte l'existence d'un champ électrique indépendamment de l'effet qu'il produit.

2) Enoncé et réponse correcte.

Dans la situation représentée ci-dessous, les deux surfaces équipotentielles sont des plans supposés infinis et perpendiculaires au plan de la figure. Décrire le champ électrique entre ces deux surfaces.



Pensez-vous que les champs électriques dans le conducteur et l'isolant

- sont différents? ☐
- sont égaux? ☐
- Je ne sais pas. ☐

Cochez l'une des cases et justifiez.

¹ L'idée de ce test nous a été communiquée par M.Serrero, professeur en classe de Mathématiques Supérieures.

La réponse correcte est que les champs électriques sont égaux, là où l'on peut négliger les effets de bord.

Compte-tenu des contenus qui leur ont été enseignés, le seul argument utilisable par les élèves du niveau H (1ère, terminale) est la relation $E = U/d$, sachant que le champ électrique $\vec{E}$ est uniforme, et que U (tension entre plaques) et d (distance entre plaques) sont les mêmes pour les deux matériaux.

Les étudiants des niveaux I, J, K peuvent dire que les surfaces équipotentiellles sont les mêmes et que la relation entre champ électrique et potentiel ($\vec{E} = -\text{grad}(V)$) ne dépend pas du matériau; ils peuvent aussi utiliser l'argument de continuité de la composante tangentielle du champ électrique à la traversée d'une surface (ici la surface entre matériaux conducteur et isolant).

3) Conditions d'interrogation.

Ce test a été posé en entretien à 10 étudiants de niveau J (Université Paris 7) et en questionnaire papier-crayon anonyme à 420 élèves ou étudiants.

La durée de passation a été d'environ 10 minutes (aussi bien en entretien qu'en questionnaire).

Voici le détail des échantillons, pour les questionnaires :

(H) : 1ère SE, Aubervilliers, avril 91, (N=27); 1ère S, Dijon, mai 92, (N=28); 1èreS, Mirande, mai 92, (N=30); Terminale CE, Aubervilliers, avril 91, (N=13); Terminale D, Mirande, mai 92, (N=28); Terminale C, Dijon, mai 92, (N=25); SupT avant le cours, Aubervilliers, avril 91, (N=34).

(I) : SupT, Aubervilliers, avril 91, (N=27); Sup, Condorcet, Paris, juin 91, (N=38); SupT, Raspail, Paris, juin 92, (N=15).

(J) : SpéT, Aubervilliers, avril 91, (N=32); SpéT, Nogent sur Oise, juin 91, (N=8); SpéT, Raspail, Paris, janvier 92, (N=37).

(K) : Licence de physique, Université Paris 7, avril 91, (N=20); 2ème année d'école d'ingénieurs, Suède, novembre 92, (N=58).

4) Un extrait d'entretien :

Le passage suivant donne une idée des difficultés soulevées par ce questionnaire :

I (l' "interviewer") : "On a deux plaques : l'une est maintenue à un potentiel V_1 constant, l'autre à un potentiel V_2 différent, constant aussi. Entre ces plaques, on met une zone conductrice, une zone isolante, une zone conductrice. et on demande comment est le champ électrique dans le conducteur, dans l'isolant."

E (l'étudiant) : "Euh, alors ça, ce sont deux potentiels et...ça fait un condensateur, en fait, les deux plaques?"

I : "ça ressemble à un condensateur."

E : "Euh, bah, là, ici, on a un champ, euh, vertical, entre les deux plaques dans le conducteur."

I : "oui."

E : "Dans le conducteur et euh...dans l'isolant, euh...vous avez dû vous rendre compte que l'isolant me posait pas mal de problèmes! Parce que si on met du courant aux bornes de ces deux plaques, les charges ici vont bouger, donc ça va créer un champ, alors que, dans l'isolant, euh, non."

I : "Donc, pas de champ dans l'isolant et il y a un champ perpendiculaire aux plaques dans le conducteur."

E : "oui."

I : "Bon, tu as parlé de condensateur, tout à l'heure; ça te fait penser à un condensateur. Qu'est-ce que c'est, un condensateur?"

E : "Euh, un condensateur? Bien, ce sont deux plaques, une positive, une négative."

I : "oui."

E : "Euh, reliées à un générateur qui produit un champ à l'intérieur."

I : "Oui, et entre les deux plaques, qu'est-ce que tu mets? Un isolant ou un conducteur?"

E : "Bah, ça dépend, ça dépend de ce qu'on veut faire dans l'expérience. En cours, on avait fait l'expérience, on avait mis, euh, c'était un isolant, on avait mis une plaque de verre."

I : "Oui, alors? Et il y avait un champ ou pas de champ?"

E : "Oui, il y avait un champ."

I : "Il y avait un champ dans l'isolant."

E : "Oui, il y avait un petit champ, mais très faible, par rapport au champ qui existe entre les deux plaques."

I : "alors, là, il y aurait un petit champ très faible?"

E : "Oui."

I : "Et puis, là, il y aurait un champ plus grand dans le conducteur?"

E : "Oui."

Pour l'étudiant interrogé, si les charges bougent différemment dans l'isolant et le conducteur, les champs électriques y sont différents. On observe une grande difficulté à admettre l'égalité des champs dans les deux matériaux à travers la réticence dans la concession finale : "un tout petit champ dans l'isolant".

Les questionnaires papier-crayon permettent d'évaluer l'ampleur de ces phénomènes.

5) Tableau des pourcentages de réponses brutes pour les questionnaires papier-crayon :

Les sous-échantillons ont été regroupés par niveau (H, I, J, K)¹, les résultats obtenus étant comparables pour les différents sous-échantillons d'un même niveau.

On notera en abrégé $\vec{E}_{is}$ le champ électrique dans l'isolant et $\vec{E}_{cond}$ le champ électrique dans le conducteur.

Echantillon	N	$\vec{E}_{is} = \vec{E}_{cond}$ réponse correcte	$\vec{E}_{is} \neq \vec{E}_{cond}$	Je ne sais pas
H	185	26%	57%	17%
I	80	49%	44%	7%
J	77	27%	60%	13%
K	78	18%	68%	14%

6) Les arguments des étudiants.

Nous donnons ici les catégories retenues pour le classement des justifications, assorties d'exemples et parfois illustrées par des extraits d'entretiens portant sur le même thème. Les premiers éléments de discussion sont déjà introduits à ce niveau détaillé d'analyse, le paragraphe suivant étant réservé à la discussion de l'ensemble des résultats. (Ce format de rédaction sera repris pour les autres questionnaires.)

¹ Rappel des contenus d'enseignement :

(H) : Définition du champ électrique par $\vec{F} = q\vec{E}$ (force s'exerçant sur une charge d'épreuve). Cas du champ uniforme. Travail de la force électrique. Différence de potentiel.

(I) : Loi de Coulomb. Théorème de Gauss. Relation entre champ électrostatique et différence de potentiel : $\vec{E} = -\text{grad}V$. Conductibilité des métaux : $\vec{j} = \gamma\vec{E}$.

(J) : Conducteurs en équilibre. Condensateurs.

(K) : Diélectriques.

a) Les arguments pour la réponse " $\vec{E}_{is} = \vec{E}_{cond}$ ".

La plupart des réponses correctes sont justifiées par l'argument " $E=U/d$, U et d étant les mêmes, les champs électriques sont égaux" (avec parfois oubli d'une variable, ainsi : "parce que U a la même valeur"). Certains signalent de plus l'indépendance du champ vis à vis du matériau ou du courant :

(I) : "car le champ électrique dépend seulement des potentiels V_1 et V_2 mais pas du milieu."

(H) : "Le champ ne dépend pas de l'intensité donc ne dépend pas du courant, donc le champ est le même dans le conducteur et dans l'isolant."

b) Les arguments des étudiants pour la réponse " $\vec{E}_{is} \neq \vec{E}_{cond}$ ".

Ils peuvent être classés en cinq catégories différentes :

* Catégorie " $E_{cond} = 0$ " : Certains étudiants disent que le champ est nul dans un conducteur, en mentionnant ou non le fait que le conducteur soit en équilibre et faisant allusion à un refrain bien appris, ainsi :

(J) : "On m'a dit tout le temps : dans un conducteur, le champ à l'intérieur du conducteur est nul"

(J) : "Au niveau des conducteurs, le champ à l'intérieur est nul. Le champ, qui est créé à l'intérieur du conducteur est nul, parce que le potentiel est constant."

* Catégorie "isolant" : cet argument est basé sur les idées d' "isolant", "isoler", avec ou sans mention de l'immobilité des charges. Il est dit dans ces réponses que le champ est nul dans un isolant, ou ne "passe" pas dans un isolant :

(I) : "Le champ électrique n'est présent que dans les zones conductrices. Un isolant a pour rôle d'isoler, comme son nom l'indique et doit donc atténuer, si ce n'est supprimer le champ électrique."

(H) : "Dans l'isolant, le champ électrique ne passe pas donc $U=0$, donc $E=0$ " (" $U=0$ " contredit l'énoncé, mais probablement l'élève pense-t-il à la relation $E=U/d$, et il lui faut déclarer " $U=0$ " pour aboutir à " $E=0$ ", ce dont il est convaincu.)

(H) "Si un isolant ne conduit pas l'électricité, alors aucun champ ne peut passer".

On retrouve ici la réticence observée chez l'étudiant de deuxième année universitaire, cité plus haut, dans cet extrait d'entretien :

(J) : "- Parce que si on met du courant aux bornes des deux plaques, les charges ici vont bouger, donc ça va créer un champ, alors que dans l'isolant, euh...Mais dans une expérience on avait mis une plaque de verre entre deux armatures.

- y-avait-il un champ dans l'isolant? (Question de l'interviewer)

- *oui, il y avait un petit champ, mais très faible.*"

Ces réponses peuvent être liées à l'obstacle verbal associé au mot "isolant", en référence à la description de G.Bachelard (1938) : "Il s'agit de la fausse explication obtenue à l'aide d'un mot explicatif, d'une image généralisée exprimée par un seul mot, leit-motiv d'une intuition sans valeur."

Ainsi le mot "isolant" paraît-il dans certaines réponses, être une explication suffisante : l'isolant isole de l'extérieur, c'est une barrière. Ce que dit G.Bachelard à propos de l'éponge, pourrait être repris à propos de l'isolant : "La fonction de l'éponge est d'une évidence claire et distincte à tel point qu'on ne sent pas le besoin de l'expliquer".

* Catégorie "courant" : cet argument fait allusion au courant et se fonde sur le fait que celui-ci passe différemment à travers un conducteur et à travers un isolant; parfois l'étudiant "oublie" la variable "conductivité". Ainsi :

(I) : *"Dans l'isolant, $j=0$. Dans le conducteur $j = \rho_m v = \gamma E$ et ainsi les champs électriques sont différents. D'une manière plus simple, comme c'est le champ électrique qui est responsable du courant électrique et que les courants sont différents dans le conducteur et l'isolant, alors les champs divergent."*

* Catégorie "matériau" : il s'agit ici de réponses qui mentionnent la permittivité relative ϵ_r ou les différentes conductivités, ou simplement la différence des matériaux :

(H) : *"l'isolant ne permet pas le passage du champ électrique, aussi s'il existe dans l'isolant, c'est de manière différente. Cette différence est due à la structure de l'isolant par rapport au conducteur."*

* Catégorie "rien" : entrent dans cette catégorie, les cas où aucun commentaire n'accompagne la réponse : "les champs sont différents".

Toutes les réponses tombent dans au moins une des catégories que nous venons d'énumérer.

Plusieurs réponses appartiennent à plus d'une catégorie. Par exemple, la réponse qui a été citée plus haut dans la catégorie "courant" appartient aussi à la catégorie "isolant". La réponse qui a été citée dans la catégorie "matériau" appartient aussi à la catégorie "isolant". Nous avons regroupé dans une colonne Is/C/M les réponses des colonnes "Isolant ou "Courant" ou "Matériau" (avec un "ou" non exclusif), qui sont susceptibles de traduire des idées très voisines. De ce fait, le total des pourcentages des colonnes 4,5,6,7,8 peut dépasser le pourcentage de la 3ème colonne.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Echan- tillon	N	$E_{is} \neq$ E_{cond}	Rien	$E_{cond} =$ 0	Isolant	Cou- rant	Maté- riau	Is/C/M
H	185	57%	12%	3%	25%	13%	10%	43%
I	80	44%	9%	1%	16%	4%	15%	34%
J	77	60%	13%	18%	17%	5%	16%	31%
K	78	68%	8%	19%	3%	9%	29%	41%

7) Discussion des résultats.

Comme l'indique le tableau de la page 34, à l'exception de l'échantillon (I) (étudiants de Math Sup, classe où est enseignée la relation $\vec{E} = -\text{grad}(V)$), il y a peu de réponses correctes (moins de 30% pour (H), (J), (K), et à peu près 50% pour (I)). La proximité de l'enseignement de la relation, sur laquelle repose la réponse correcte, apparaît donc comme un facteur important.

Nous avons vu que, comme commentaire aux réponses incorrectes, on trouvait essentiellement les idées d' "isolant" (pour (H), (I), (J)), de "courant" (pour (H)), de "matériau" (pour (H), (I), (J), (K)), mais aussi le refrain "E=0 dans un conducteur" (pour (J), (K)).

La caractéristique la plus frappante de ces résultats est l'importance du taux Is/C/M. La question qui paraît sous-entendue par les réponses correspondantes semble être : "Comment "ça" passe?" Dans certains commentaires "ça" représente le courant, dans d'autres le champ, et dans d'autres, quelque chose qui n'est pas clairement défini : "l'électricité". On a ici un raisonnement qu'on pourrait qualifier de "mononotionnel" (Closset 1983a).

Parfois, il semble qu'il y ait sur ce point une sorte de blocage, même pour quelques étudiants qui donnent la réponse correcte, et qui ne paraissent pas complètement convaincus, ainsi :

(J), en entretien : "Ca m'embête de dire que le champ est le même, parce qu'il doit bien y avoir une différence entre les conducteurs et les isolants."

(J) : " $\vec{E}_i = -\text{grad } V_i$, $\vec{E}_c = -\text{grad } V_c$, quelle que soit la position $V_i = V_c$ donc $\vec{E}_i = \vec{E}_c$ en tout point. Cela semble quelque peu étonnant, mais cette situation (ce dessin) est, je pense, impossible."

En résumé, de très nombreux arguments sont compatibles avec l'élément de raisonnement suivant : "pas de courant $\Rightarrow$ pas de champ". L'obstacle lié à la mobilité des charges, dont nous avons parlé à propos du test "Gauss", se trouve donc confirmé.

Que peut-on dire, maintenant, de son influence relative à divers niveaux de connaissances?

8) L'influence du "niveau de connaissances".

Pour tous les échantillons, c'est la colonne Is/C/M qui contient le plus grand nombre de réponses, mais certaines différences apparaissent dans les fréquences de justifications selon le niveau d'étude. Aux niveaux (J) et (K), un nombre assez important d'étudiants répondent : "E=0 à l'intérieur d'un conducteur." : environ 20% pour (J), (K) contre au plus 3% en (H), (I). Ceci doit probablement être imputé au fait qu'au niveau (J), les étudiants ont à leur programme les conducteurs en équilibre. Ainsi ils se souviennent du "refrain" électrostatique "E=0", mais ne l'ont pas confronté à l'étude d'un régime permanent hors équilibre.

Une autre différence entre les échantillons est une augmentation du pourcentage de réponses "matériau" pour l'échantillon (K) vis à vis des échantillons (H),(I),(J). Celle-ci correspond à une allusion plus fréquente à la notion de permittivité qui est introduite au niveau (K) au cours de l'étude des diélectriques. Ceci peut expliquer également, sans doute, que les étudiants (K) n'interprètent plus les isolants comme des barrières aux champs électriques (3% de (K) dans la catégorie "isolants" contre plus de 16% dans (H),(I),ou (J)). Le terme de "permittivité" est d'ailleurs évocateur d'un passage, l'aspect verbal redevient favorable.

9) Conclusion.

Ce test confirme un manque de vue unifiée des étudiants sur l'électrostatique et l'électrocinétique. Ceci intervient à différents niveaux de connaissances, y compris au niveau (K) où les étudiants ont eu des cours complets à la fois d'électrocinétique et d'électromagnétisme. D'une certaine manière, les arguments des étudiants se rapportent aux dernières connaissances acquises en classe, comme si chaque partie du programme laissait des "pièces détachées" dans l'esprit des étudiants. De ce kaléidoscope résulte une compréhension très partielle, attachée chaque fois à un phénomène particulier.

Un trait qui caractérise l'ensemble des réponses est le lien très fort entre l'idée que "quelque chose" passe ou non (charges, courant, électricité...) et la valeur du champ électrique.

II. Les difficultés des étudiants à propos des isolants : questionnaires "Isolants " (et "Isolants bis" en annexe).

A) Introduction.

Les réponses des étudiants au questionnaire "Gauss" ont montré que la notion d'isolant pouvait créer des obstacles à une application correcte du principe de superposition. L'étude effectuée à propos du questionnaire "La tranche napolitaine" donne la mesure de cet obstacle lié à la nature du matériau qui "interdit" au champ électrique d'exister là où les charges ne peuvent se déplacer. Nous présentons dans cette partie des questionnaires uniquement centrés sur ce point. Le questionnaire "Isolants" a été construit pour confirmer et éventuellement préciser l'analyse des difficultés relatives aux isolants. Une autre version de ce questionnaire, appelée "Isolants bis", est détaillée en annexe.

B) Questionnaire "Isolants ".

1) Enoncé et réponse correcte.

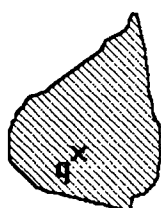
Les questions Q1 et Q2 étaient présentées simultanément sur la même feuille.

Question Q1



On considère un corps isolant et une charge ponctuelle q extérieure à ce corps. La charge q crée-t-elle un champ électrique en un point M intérieur au corps isolant?

Oui, non, pourquoi?

Question Q2 :

x
M

On considère une charge ponctuelle q située à l'intérieur d'un corps isolant. Cette charge crée-t-elle un champ électrique en un point M extérieur au corps isolant?

Oui, non, pourquoi?

La réponse correcte est "oui" aux deux questions, car toute charge électrique crée un champ électrique en tout point de l'espace.

Remarquons que le corps isolant se polarise lorsque la charge q est en son voisinage ou à l'intérieur, et le champ électrique total en M est la superposition du champ créé par la charge q et du champ dû à la polarisation de l'isolant.

2) Conditions d'interrogation.

Ce test a été posé en entretien à 10 étudiants du niveau J (Université Paris 7) et en questionnaire papier-crayon anonyme à 238 élèves ou étudiants de niveau (H), (I), (J) ou (K)¹. La durée de passation était de 15 à 20 minutes (pour les questionnaires et les entretiens).

Voici le détail des échantillons, pour les questionnaires papier-crayon :

(H) : SupT avant le cours d'électrostatique, Aubervilliers, novembre 90, (N=36); 1ère année de D.E.U.G avant le cours d'électrostatique, Université Paris 7, novembre 90, (N=28).

(I) : 2ème année de D.E.U.G, Université Paris 7, décembre 90, (N=25); SupT, Raspail, Paris, juin 94, (N=27).

¹ Rappel des contenus d'enseignement :

(H) : Définition du champ électrique par $\vec{F} = q\vec{E}$ (force s'exerçant sur une charge d'épreuve). Cas du champ uniforme. Travail de la force électrique. Différence de potentiel.

(I) : Loi de Coulomb. Théorème de Gauss. Relation entre champ électrostatique et différence de potentiel : $\vec{E} = -\text{grad}V$. Conductibilité des métaux : $\vec{j} = \gamma\vec{E}$.

(J) : Conducteurs en équilibre. Condensateurs.

(K) : Diélectriques.

(J) : SpéT, Raspail, Paris, décembre 92, (N=38); SpéP, Paul Valéry, Paris, mars 94, (N=20).

(K) : 2ème année de D.E.U.G après le cours sur les diélectriques, Université Paris 7, décembre 90, (N=64).

3) Extraits d'entretien.

De nouveau, des passages d'entretien illustrent les difficultés soulevées par ce test :

Pour la question Q1 :

E (l'étudiant) : "On considère un corps isolant, une charge q extérieure à ce corps. La charge q crée-t-elle un champ électrostatique en un point M intérieur au corps isolant? Oui? Non? Pourquoi? Bon, ce que je sais, dans un corps isolant, c'est que les charges intérieures à ce corps ne sont pas libres, ne peuvent pas se déplacer librement, comment dire, euh...oui, elles ressentent une force et donc, bah, non, puisque je dis que ce qui est à l'intérieur de ce corps ne peut pas se déplacer ou infiniment peu, c'est le contraire d'un...attends..."

I (l' "interviewer") : "oui."

E : (Long silence. Soupirs.) "ça, ça me fait penser un petit peu à une charge...par influence, un petit peu. Ah, toi, tu ne me dis rien." (Rire). "Alors disons, on suppose que q c'est +, donc il fait un champ comme ça, et ça c'est isolant, oui, c'est isolant, donc, en fin de compte, là on aura des petites charges - et là des petites charges + et donc, euh..."

I : "Alors, est-ce qu'il y a un champ créé par q au point M ou pas?"

E : "ah, je sais que les charges, elles ne peuvent pas se déplacer librement, parce qu'elles sont soumises à une sorte de force, c'est ça la différence entre un isolant et un conducteur. Le conducteur...les charges se situent à l'extérieur, pas à l'extérieur, mais à la périphérie, à la surface."

I : "oui."

E : "Puis un isolant...les charges ne peuvent pas bouger, et tout. D'un autre côté, j'ai vu en T.P, puisqu'on pouvait faire le chargement, justement, des choses, de boules isolantes par, par...euh influence, et après elles sont chargées, donc, en fin de compte, euh..."

Pour la question Q2 :

E : "On considère une charge q située à l'intérieur d'un corps isolant. Cette charge crée-t-elle un champ électrique en un point M extérieur au corps isolant? Oui? Non? Pourquoi? Ah! Bah, alors là, je pense que, bah, non. Qu'est-ce que c'est la définition d'un isolant? C'est que... euh...ah, ah, c'est quoi la définition d'un isolant? c'est quand vis à vis du courant électrique, il est insensible au passage des électrons. C'est ça, mais là, il n'y a pas d'électrons, c'est statique."

Electrostatique! alors à mon avis, non, il n'y a pas de champ créé. Pourquoi? Parce que c'est un isolant, et, un isolant...les charges, elles ne se déplacent pas."

I : "La charge qu'on avait tout à l'heure, elle ne se déplaçait pas non plus."

E : "Non, non, mais je veux dire...je voulais dire, les petits + et les petits -, quand même ils arrivaient légèrement à bouger, puisqu'il y avait un, comment dire, elles se chargeaient contre la boule isolante, en fait. Mais là, puisqu'on a un isolant et une charge à l'intérieur...ah! Ah, ah, je réfléchis. Cela me fait penser à quelque chose, ça. Euh, si, par exemple, on a fait en Travaux dirigés, je parle de notre groupe, on a fait en Travaux dirigés...on calculait le champ créé par exemple, par un fil infiniment long, oui, ou une surface, par exemple, un cylindre qui était, euh. Non. On va prendre un cylindre, oui, plein, chargé uniformément qui était isolant et on demandait de calculer le champ créé en tout point de l'espace."

I : "oui."

E : "Donc ça, en fin de compte, c'est la même chose, donc euh...est-ce qu'il y a un champ? Bouh! Je me contredis toutes les cinq minutes."

I : "non."

E : "Et donc, ça, ça me fait penser en fin de compte à, oui à, oui, mais il n'est pas chargé uniformément ce..."

I : "On ne sait pas. On ne dit rien du tout. Disons qu'on va regarder une charge ponctuelle q qui est dans l'isolant. Il y a peut-être d'autres charges dans l'isolant. On n'en sait rien du tout. La question, c'est seulement : est-ce que cette charge q crée un champ en M?"

E : (silence). "Moi, je dis que oui."

I : "d'accord. Bon."

E : "Pourquoi, parce que j'assimile ça au cylindre, au fil infiniment long chargé, aussi isolants, chargés uniformément. Puis, alors, je ne sais pas comment sera le champ, mais je pense qu'il y a un champ. Alors, l'autre, celle d'avant, alors, ça, je ne sais pas trop."

I : "Tu avais dit oui aussi."

E : "Oui, j'avais dit, bon, il y a influence. Bon, je dis oui oui pour les deux."

L'association entre champ électrique et mobilité des charges est ici patente.

4) Tableaux des pourcentages de réponses pour les questionnaires papier-crayon.

Voici le tableau de résultats pour les taux de réponses en oui/non/?

La catégorie "?" contient les absences de réponses ou les réponses telles que "Je ne sais pas".

Echantillon	N	Question Q1			Question Q2		
		oui réponse correcte	non	?	oui réponse correcte	non	?
H	64	42%	42%	16%	27%	64%	9%
I	52	50%	40%	10%	50%	37%	13%
J	58	55%	41%	3%	34%	55%	10%
K	64	64%	23%	13%	67%	25%	8%

Voici le tableau des associations de réponses aux questions {Q1, Q2} :

Echantillon	N	oui-oui (correct)	non-non	oui-non	non-oui	avec un ?
H	64	14%	30%	28%	12%	17%
I	52	25%	13%	23%	25%	13%
J	58	19%	26%	28%	15%	12%
K	64	48%	8%	16%	16%	11%

D'après le premier tableau, il y a au plus deux tiers de réponses correctes à chacune des questions Q1 ou Q2 et d'après le deuxième tableau, le pourcentage d'étudiants répondant correctement aux deux questions ne dépasse 25% qu'au niveau K (48%). Ces étudiants, qui répondent nettement mieux que les autres sont les seuls à avoir suivi un cours sur les diélectriques.

Bien entendu, les commentaires des étudiants sont essentiels pour interpréter les réponses.

5) Analyse des arguments des étudiants.

a) Principaux commentaires justifiant une réponse "oui".

Ils accompagnent des combinaisons de réponses oui-oui, oui-non, non-oui.

Voici quelques exemples de commentaires clairs et corrects :

(H), Q1 : "La charge q crée un champ dans tout l'espace, donc aussi au point M."

(K), Q1 : "La charge q crée un champ au point M, égal à $\vec{E} = q\vec{r} / 4\pi\epsilon_0 r^3$ "

Une remarque est quelquefois ajoutée à propos des isolants, traduisant une difficulté liée à la non-mobilité des charges :

(J), Q1 : "Il n'y a aucune raison pour qu'il n'existe pas de champ $\vec{E}$ en M, même si M est placé dans un corps isolant, $\vec{E} = q\vec{u}/4\pi\epsilon_0 d^2$. Toutefois $\vec{E}$ n'engendrera aucune force car il n'existe pas de charge en M."

ou au contraire manifestant une maîtrise de ce point :

(J), Q1 : "Oui, un isolant est un corps ne laissant pas passer les charges, mais il existe quand même un champ électrique (ex : condensateur.)"

(H), Q2 : "Un corps isolant n'arrête pas le champ électrique."

(I), Q1 : "Un champ est créé au point M. Considérons l'analogie avec le champ $\vec{g}$: un solide posé sur une table subit une force due à son poids, même si le solide ne se déplace pas; il s'agit de la même chose pour le corps isolant; la charge q crée un champ au point M, même si une charge placée en M ne se déplace pas."

Quelques commentaires mentionnent l'existence d'une polarisation :

(K), Q1 : "Oui, car un champ est créé par la polarisation."

Mais dans ce type de réponse, il y a une ambiguïté : après avoir causé la polarisation, la charge ponctuelle est-elle encore considérée comme contribuant directement au champ final? Cette ambiguïté a déjà été soulignée à propos du questionnaire "Gauss" et nous la retrouverons à propos du phénomène d'influence sur les conducteurs, dans le test "Coulomb" (chapitre 3).

On retrouve aussi des arguments incorrects pour appuyer la réponse "oui" :

(K), Q2 : "La surface est autour de la charge, on peut utiliser le théorème de Gauss."

(J), Q1 : "Oui, car par influence, il apparaît -q à l'intérieur, donc il existe $\vec{E}$ à l'intérieur du corps isolant."

En fait, pour chaque question et dans chaque échantillon, le pourcentage d'explications correctes et non ambiguës est inférieur au tiers du taux de réponses "oui".

b) Le rôle bloquant d'un isolant.

Cette catégorie contient les réponses mentionnant l'idée d'isolant-barrière (celles-ci accompagnant toujours une réponse "non" aux questions Q1 ou Q2) qui ne font pas allusion à l'absence de mobilité des charges.

(J), Q1 : "Non, parce que c'est isolant et M se trouve à l'intérieur."

(J), Q2 : "Non, car le corps isole le point M de q."

(H), Q1 : "La propriété isolante d'un corps empêche le champ d'y pénétrer."

(J), en entretien : "L'isolant empêche le champ d'entrer ou de sortir."

(H), Q2 : "Le champ créé à l'intérieur de l'isolant ne pourra se propager au-dehors de celui-ci."

(H), Q1 : "Le corps isolant est globalement soumis au champ créé par q . Mais le point M n'est pas soumis à ce champ, parce qu'il est protégé par l'isolant."

(H), Q2 : "L'isolant bloque le champ à l'intérieur du corps : le champ ne peut être créé de nouveau après l'isolant."

(I), Q2 : "L'isolant empêche l'émanation d'un champ électrique vers l'extérieur, champ créé par la charge q . Ce champ reste intérieur au corps."

(J), Q1 : "Le corps est isolant, les points intérieurs sont isolés des phénomènes électriques. Il n'y a pas de champ électrique en M ."

(K), Q2 : "Non, la charge q étant parfaitement isolée par rapport au reste de l'univers, elle ne pourra créer de champ électrique en un point extérieur au corps isolant."

Entrent aussi dans cette catégorie quelques réponses indiquant qu'à l'intérieur d'un isolant le champ électrique est nul :

(H), Q1 : "Il n'y a pas de champ à l'intérieur d'un isolant."

(I), Q1 : "On sait qu'à l'intérieur d'un isolant le champ est nul."

c) Champ et mobilité ou immobilité des charges ou transfert de charges.

Dans cette catégorie se trouvent les commentaires où un lien est fait entre la non-existence d'un champ électrique et l'impossibilité du mouvement des charges dans un isolant. Ces réponses, qui accompagnent presque toujours un "non" ou un "?" à la question Q1 ou Q2, n'ont pas été incluses dans la catégorie précédente même si elles mentionnent le mot "isolant", car elles explicitent le fait que les charges y sont immobiles.

Parfois ce lien entre champ et mobilité semble être fait pour le point M , situé dans l'isolant, en réponse à Q1 :

(I) : "Comme ce corps est un isolant, les charges à l'intérieur ne peuvent pas bouger. Si q créait un champ, alors les charges dans le corps seraient soumises à un champ électrique."

(K) : "Comme aucune charge n'est libre autour de M , il ne peut y avoir aucun champ électrique au point M ."

(K) : "La charge q ne crée aucun champ. Autrement il y aurait un potentiel et une différence de potentiel; on aurait un courant passant à travers le corps, ce qui est impossible à cause de l'isolant."

A la question Q2, quelques étudiants disent que des charges doivent bouger autour ou à partir de la charge q , pour que cette charge soit capable de créer un champ :

(H) : "La charge q ne crée pas de champ électrique au point M parce que l'isolant bloque tout mouvement d'électrons."

(I) : "Le corps isolant ne permet pas la circulation de la charge et ses effets ne sont pas ressentis en M extérieur à l'isolant."

(K) : "Comme il n'y a pas de mouvement possible des charges dans l'isolant, il ne peut y avoir aucun champ créé au point M."

Dans d'autres commentaires, observés dans les questions Q1 et Q2, il semble que, pour créer un champ au point M, une charge ait besoin d'envoyer des électrons ou des protons jusqu'à ce point :

(H), Q1 : "Les protons ou les électrons envoyés par q ne peuvent atteindre M dans l'isolant, parce que ce corps isole."

(H), Q1 : "L'isolant est un obstacle au mouvement des électrons entre q et M."

(H), Q2 : "Non, car les électrons et protons ne seront pas capables de s'échapper, ou de se propager dans l'isolant, c'est pourquoi ils ne pourront sortir de ce corps pour atteindre le point M."

(I), Q2 : "Non, la charge q reste à l'intérieur de l'isolant et ne peut être capturée."

(J), Q2 : "Non, car le corps isolant ne laisse passer aucune charge."

(K), Q2 : "Pas de champ en M car l'isolant empêche toute formation de charge en un autre point du corps donc pas de champ."

Il n'est pas toujours possible de distinguer finement ces différents commentaires ayant trait à la mobilité des charges, ainsi dans ce commentaire laconique : "car les charges ne peuvent pas circuler."

Enfin, quelques rares commentaires de ce type ont appuyé une réponse "oui", comme :

(H), Q1 : "Les charges internes ne peuvent s'échapper de l'isolant, mais les charges extérieures peuvent y pénétrer."

(I), Q1 : "A l'extérieur du corps, le milieu est conducteur, les charges sont libres de se déplacer, c'est pourquoi q sera capable de créer un champ en M."

En résumé, voici le tableau indiquant les pourcentages de réponses des différents types dans les différents échantillons.

Echan- -tillon	N	Rôle bloquant des isolants			Champ et immobilité des charges		
		Q1	Q2	Q1 ou Q2	Q1	Q2	Q1 ou Q2
H	64	34%	37%	44%	16%	14%	25%
I	52	12%	21%	31%	10%	12%	22%
J	58	26%	35%	46%	14%	6%	13%
K	64	9%	9%	18%	8%	5%	13%

6) Discussion des résultats.

Comme l'indique le 2ème tableau de la page 43, une des caractéristiques frappantes de ces résultats est le faible pourcentage d'associations correctes "oui-oui", même après un cours complet d'électrostatique en 2ème année d'Université.

De plus, il y a un pourcentage élevé (de 40% à 60%) de réponses, qui sont différentes pour les deux questions. Quelques commentaires montrent une discrimination délibérée entre les deux situations, mais ils sont relativement rares, et plus probablement cette différence de réponses est due à une instabilité du raisonnement des étudiants.

Les principales idées qui paraissent influencer les raisonnements des étudiants sont les suivantes :

-Si un corps est isolant, il se comporte comme une barrière pour les champs électriques. Cette idée, déjà observée dans les questionnaires "Gauss" et "La tranche napolitaine", est probablement liée à l'obstacle verbal du mot "isolant", décrit plus haut (pages 35-36), c'est à dire que le terme "isolant" est en lui même une justification pour cette réponse.

Seul l'échantillon (K) se distingue par un faible taux de ce type d'erreur, probablement du fait de l'enseignement des diélectriques à ce niveau.

-Il ne peut y avoir de champ électrique en un point où les charges ne peuvent pas bouger : ce type de réponse a essentiellement été observé en question Q1. On retrouve le schéma qui sous-tend de nombreuses réponses au test de "La tranche napolitaine" : pas de mouvement de charges, donc pas de champ.

-Les charges ont besoin de bouger pour créer un champ : il s'agit de nouveau d'une association entre l'existence du champ et la mobilité des charges; mais cette fois c'est la mobilité de la source et non celle de la charge d'épreuve dont il est question. Ces réponses ont essentiellement été observées en question Q2 et sont relativement rares en particulier pour les échantillons (J) et (K) (voir tableau page 45: 6% pour (J), 5% pour (K)).

Il est à noter que les commentaires des étudiants sont parfois flous au point qu'on est obligé de considérer la situation physique (Q1 ou Q2) pour savoir s'il est question de la mobilité de la source ou de celle du point M, ainsi dans ce commentaire laconique : *"il n'y a pas de champ parce qu'il n'y pas de mouvement de charge"*.

On constate que le taux de réponses ayant trait à la mobilité des charges, selon l'une ou l'autre des modalités que l'on vient de détailler, ne dépasse jamais 25%, et décroît, mais assez faiblement, avec le niveau de connaissances. Toutefois il est possible que cette idée soit plus largement représentée, car il se peut que les étudiants, qui se contentent du mot "isolant" pour justifier leur réponse, aient en tête la propriété d'immobilité des charges.

En ajoutant les pourcentages correspondant à ces diverses idées (pour Q1 ou Q2 : - rôle bloquant d'un isolant, -champ et immobilité des charges) , on trouve qu'au niveau (H) (baccalauréat) plus de 50% des étudiants pensent qu'un isolant bloque le champ électrique d'une manière ou d'une autre et qu'après un cours complet d'électrostatique un tiers environ des étudiants (K) a encore cette opinion.

III. Conclusion sur les questionnaires "La tranche napolitaine" et "Isolants".

Ces deux questionnaires portent essentiellement sur l'existence du champ électrique mise en rapport avec la nature du matériau intervenant dans la situation. Toute charge crée en tout point de l'espace une contribution au champ électrique en ce point, quel que soit le matériau où se situent ce point et la charge en cause. Le questionnaire "La tranche napolitaine" fait apparaître une résistance considérable jusqu'en fin d'études (autour de 40%) pour admettre cette non-pertinence du matériau. Le questionnaire "Isolants" confirme totalement, dans une situation où ne figure qu'un seul matériau (isolant, cette fois), que cette réticence est importante (autour de 50% en 1ère ou Terminale, autour de 25% en fin d'études universitaires) et qu'elle repose sur deux éléments de raisonnement :

- l'idée que l'isolant constitue une barrière. Celle-ci apparaît comme la difficulté principale. S'agit-il d'une idée "première" comme le disent R.Chabay et B.Sherwood (1993b), à la suite de nos premiers résultats (Viennot et Rainson : 1992) : "Les étudiants ont intuitivement l'idée que la matière bloque les champs, et ils ne voient pas immédiatement que ceci est en contradiction avec le principe de superposition.". Ou est-ce une conséquence de l'enseignement "classique" où les isolants sont d'abord définis comme des substances dans lesquelles le courant ne passe pas (ce que l'étudiant risque de généraliser en "ça ne passe pas"), puis utilisés pratiquement en électrocinétique, sans analyse des mécanismes physiques internes, lesquels ne sont étudiés que beaucoup plus tard? Cette étude ne permet pas de répondre, et il est vraisemblable que les deux hypothèses ont leur part de validité.

- l'absence d'effet visible du champ électrique. Celle-ci conduit souvent les étudiants à refuser l'idée que le champ électrique au point considéré soit non nul. On peut aussi penser, pour les étudiants plus avancés ((I), (J), (K)), à une mauvaise interprétation de la relation " $\vec{j} = \gamma \vec{E}$ " liant les idées de champ électrique et de courant. Mais plus profondément, il se peut que l'absence d'effet visible, en terme de mouvement, entraîne pour les étudiants l'absence de cause, c'est à dire ici de champ électrique. On aurait là

la version électrique du lien communément établi entre force et mouvement (Viennot : 1977), que De Kleer et Brown (1984), Guttierrez et Ogborn (1992) expriment sous forme générale : pas d'effet $\Rightarrow$ pas de cause.

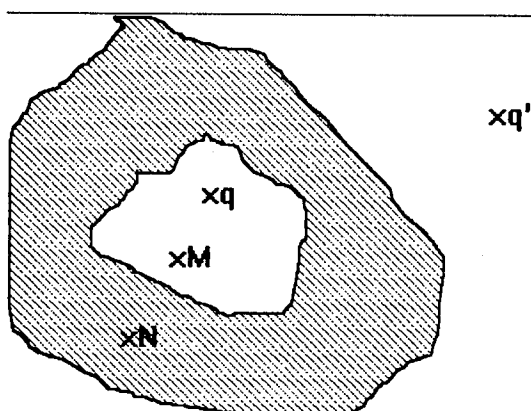
ANNEXE AU CHAPITRE 2

Questionnaire "Isolants bis".

Ce questionnaire a été élaboré pour vérifier la permanence des modes de raisonnement observés avec le questionnaire "Isolants", tout en séparant les réponses de chaque type :

- celles qui sont liées à l'idée d' "isolant-barrière".
- celles qui sont liées à l'immobilité des charges dans l'isolant.

1) Enoncé et réponse correcte



Légende :

-  : substance isolante
-  : vide

- 1) Quelles sont les sources du champ électrique en M, $\vec{E}(M)$?
- 2) Quelles sont les sources du champ électrique en N, $\vec{E}(N)$?

La réponse correcte est que les sources du champ en M (ou en N) sont les charges q et q' et celles de l'isolant (éventuellement chargé et de toute façon polarisé.)

La première question est susceptible de faire surgir des réponses associées à l'idée d'isolant-barrière. La deuxième question est, elle, susceptible de faire surgir en outre, l'obstacle de non-mobilité des charges, les charges q et q' jouant le même rôle vis à vis du point N. Cette seconde question est à rapprocher de la question Q2 du questionnaire "Isolants".

2) Conditions d'interrogation.

Ce test a été posé en questionnaire papier-crayon anonyme à 170 étudiants. La durée de passation était d'environ 10 minutes.

Les étudiants interrogés étaient de niveau (I) ou (J)¹, donc n'avaient pas eu de cours sur les diélectriques. On n'a donc pas tenu compte dans leurs réponses de la mention du champ créé par l'isolant, mais seulement de ce qui a été dit à propos de q et q' (d'autant plus que l'énoncé avait été un peu modifié par l'un des professeurs du niveau (J), qui avait ajouté verbalement que l'isolant ne portait aucune charge en surface ni en volume).

Voici le détail des échantillons :

(I) : SupT, Raspail, Paris, juin 93, (N=25); Sup, Condorcet, Paris, janvier 94, (N=45).

(J) : SpéT, Nogent sur Oise, octobre 93, (N=25); SpéT, Lille, décembre 1994, (N=75).

3) Tableau des pourcentages de réponses brutes.

On a indiqué dans le tableau les pourcentages de réponses citant q , q' , ou $\{q, q'\}$ comme sources du champ

Echan- tillon	N	q source du champ en M	q' source du champ en M	{q,q'} sources du champ en M	q source du champ en N	q' source du champ en N	{q,q'} sources du champ en N
I	70	99%	21%	21%	23%	24%	23%
J	100	98%	37%	37%	39%	37%	36%

Pour quasiment tous les étudiants, la charge q (située dans le vide, près de M) est une source du champ électrique en M situé dans le vide, mais pour une forte proportion d'entre eux (79% des (I), 63% des (J)), la charge q' , située de l'autre côté de l'isolant n'en est pas une, comme c'était le cas pour la question Q2 du test précédent. Pour le point N situé dans l'isolant, les charges q et q' , situées de part et d'autre de l'isolant, jouent le même rôle; pour

¹ Rappel des contenus d'enseignement :

(H) : Définition du champ électrique par $\vec{F} = q\vec{E}$ (force s'exerçant sur une charge d'épreuve). Cas du champ uniforme. Travail de la force électrique. Différence de potentiel.

(I) : Loi de Coulomb. Théorème de Gauss. Relation entre champ électrostatique et différence de potentiel : $\vec{E} = -\text{grad}V$. Conductibilité des métaux : $\vec{j} = \gamma\vec{E}$.

(J) : Conducteurs en équilibre. Condensateurs.

(K) : Diélectriques.

de nombreux étudiants (77% des (I), 64% des (J)), elles ne sont pas sources de champ en N. L'isolant-barrière apparaît donc, à travers ces taux, comme l'aspect déterminant de la situation, que le point sur lequel on s'interroge soit ou non dans le matériau.

4) Les arguments des étudiants : description et discussion.

a) Arguments accompagnant une réponse correcte "q et q' créent un champ en M (ou N)".

Certaines réponses ne sont accompagnées d'aucun commentaire, d'autres comportent comme justification, le principe de superposition :

(I) : "En M, q est source de $\vec{E}(M)$; q' est source de $\vec{E}(M)$ également. $\vec{E}(M)$ = champ créé par q en M + champ créé par q' en M."

Certains étudiants ajoutent une remarque concernant l'isolant, traduisant une maîtrise du problème :

(I) : "q est une source, q' est une source, car le vide permet la propagation du champ électrique, la substance isolante n'isole pas M du champ créé par q. (Elle isole uniquement les charges.)"

(J) : "L'isolant n'arrête pas le champ électrostatique. $\vec{E}(M)$ est dû à q et q' "

b) Arguments justifiant la réponse "q' ne crée pas de champ en M".

Certaines réponses peuvent être de nouveau associées à une idée d' "isolant-barrière" :

(J) : "La source du champ électrique en M est q, car M est séparé de q' par un isolant."

(J) : "La source du champ en M est q, puisque, si la substance entourant le point M est isolante, il n'y a théoriquement pas de champ qui passe au travers."

(I) : "q' étant isolée par rapport à M, elle n'a aucune incidence sur $\vec{E}(M)$ "

(I) : "Seule la charge q crée un champ, puisque q' est séparée de M par la substance isolante qui arrête tout champ."

(I) : "La source est q, car la substance isolante isole les charges et en particulier q' donc q' n'a aucun effet sur le champ électrique en M."

(I) : "M se situe dans l'espace contenant la charge q, et par ailleurs est isolée de l'espace contenant q' par la substance isolante."

(I) : "On remarque que l'influence de q' est neutralisée par la substance isolante."

(I) : "M est compris dans le champ électrique créé par q uniquement, une substance isolante interdit toute influence de q' sur q et M. M subit l'influence de q uniquement et $\vec{E}(M)$ est fonction de q uniquement."

c) Arguments justifiant la réponse "q et q' ne créent pas de champ en N" :

Certains étudiants considèrent que le mot "isolant" est à lui seul une justification :

(J) : "Pas de source, car N appartient à une substance isolante."

D'autres réponses rappellent plus explicitement la représentation d' "isolant-barrière" :

(I) : "N se trouve dans l'enveloppe isolante. Les lignes de champ créées par q et q' ne franchissent pas les parois de l'enveloppe, ainsi $\vec{E}(N)$ serait créé par les charges contenues dans l'enveloppe."

(I) : "La substance est impénétrable aux influences extérieures telles que les champs électriques de q' et q."

(I) : "Aucune charge ne crée de champ en N, ceci en considérant que le coefficient d'isolation est très fort, sinon q et q' influent toutes deux en tout point de l'espace."

Le plus souvent (pour 43% des étudiants (I) et 29% des étudiants (J)), les argumentations mentionnent que le champ électrique en N est nul ou n'existe pas :

(I) : "N est dans l'isolant. Souvent, quand on est dans un isolant, on est isolé. On dirait que $\vec{E}(N) = \vec{0}$."

(J) : "N est dans la substance isolante donc $\vec{E}(N) = \vec{0}$, aucune charge n'intervient sur N"

(J) : "Si l'isolant est fiable, $\vec{E}(N) = \vec{0}$ et N ne voit pas les charges."

D'autre part, les allusions explicites à l'immobilité des charges sont très rares (2 en (I), aucune en (J)). Voici l'une d'entre elles :

(I) : "Il n'y a pas de source de champ en N. N se trouve dans une substance isolante où les charges ne peuvent se déplacer. Il n'y a donc pas de différence de potentiel, donc pas de champ."

5) Conclusion sur le questionnaire "Isolants bis".

Dans cette situation légèrement modifiée par rapport à celle présentée dans le questionnaire "Isolants", le "rôle bloquant" de l'isolant apparaît comme l'argument majeur. L'idée de non-mobilité des charges est ici moins exprimée, encore qu'elle puisse contribuer à justifier les réponses telles que " $E=0$ ". Cette occurrence relative, plus faible que dans le test "Isolants", est sans doute à attribuer à la topologie de la situation présentée, qui majore l'effet de barrière. Le résultat principal est la permanence de ces deux types principaux d'arguments dans ce questionnaire, comme dans les deux ("La tranche napolitaine" et "Isolants") qui font la matière du chapitre2.

CHAPITRE 3

**Expressions littérales du champ
électrique et sources de ce champ :
difficultés associées.**

I. Introduction.

Les réponses au questionnaire "Gauss" nous ont mise sur la piste des difficultés analysées au chapitre précédent et liées à la mobilité des charges. Mais l'effet le plus important apparu à cette occasion est que de nombreux étudiants semblent attribuer un contenu causal abusif à la formule qui traduit le théorème de Gauss, comme si les charges intérieures à une surface de Gauss donnée étaient les seules sources du champ électrique existant en un point de la surface de Gauss.

Cet argument qui renvoie à une lecture causale et dissymétrisée des relations physiques (voir page 29) intervient-il de façon générale dans les raisonnements des étudiants à propos des champs électriques? C'est la question qui oriente ce chapitre.

En particulier on peut se demander si cet argument, que nous nommerons plus loin par raccourci "cause dans la formule" vient à l'esprit des étudiants lorsqu'ils utilisent le théorème de Coulomb et s'il constitue alors un obstacle à la mise en oeuvre du principe de superposition. Il est en effet réducteur puisqu'il exclut l'existence de sources du champ, qui n'auraient pas de trace littérale dans la formule.

Pour répondre à cette question, le questionnaire "Coulomb" a été présenté à des étudiants des niveaux (J) et (K), ayant donc reçu un enseignement à ce propos.

Il y est question d'un conducteur en équilibre, en présence d'une charge ponctuelle. Analysons cette situation :

M est un point à l'extérieur du conducteur, en son voisinage; P un point sur la surface du conducteur, quasiment confondu avec M; σ la densité surfacique de charge en P; $\vec{n}$, un vecteur unitaire, normal au conducteur en P, dirigé vers l'extérieur.

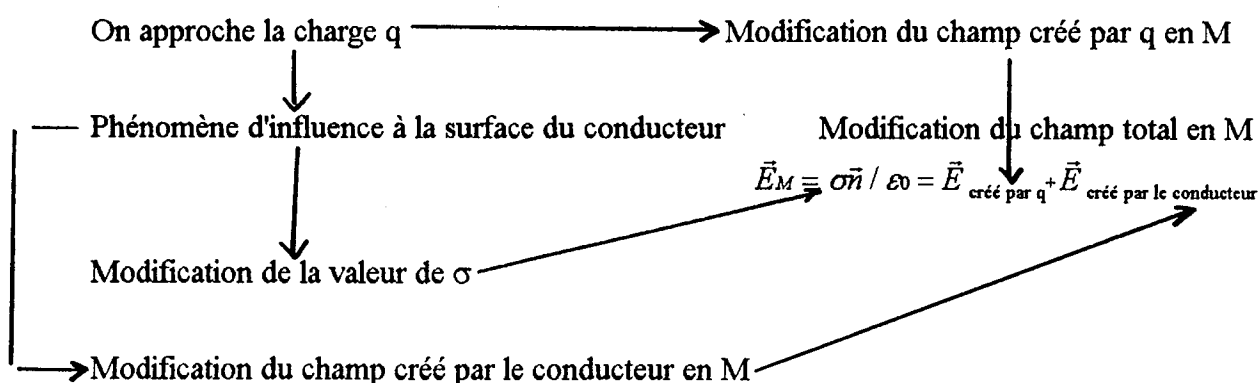
Supposons qu'on approche du conducteur isolé initialement seul dans l'espace, une charge ponctuelle q et que l'on se pose la question du champ électrique qui existe en M.

Cette situation est complexe parce que la charge extérieure q modifie la situation du conducteur de deux façons :

- Elle contribue directement au champ électrique total en tout point de l'espace, selon la loi de Coulomb, c'est le principe de superposition.
- Elle modifie par influence la répartition des charges sur le conducteur et donc modifie la valeur de la densité surfacique de charge σ en tout point du conducteur.

Il se trouve, et c'est l'aspect puissant et élégant du théorème de Coulomb, que la valeur locale de σ permet de résumer ces deux effets - direct et indirect- dans l'expression du champ électrique total : $\vec{E} = \sigma \vec{n} / \epsilon_0$.

En résumé, on peut décrire cette situation physique à l'aide du schéma suivant :



Ce schéma relativement complexe, où interviennent à la fois les phénomènes d'influence et de superposition, fait pressentir que, confrontés à ce type de situation, les étudiants éprouveront des difficultés. Dans l'analyse des résultats de ce test, on cherchera à voir dans quelle mesure les étudiants considèrent simultanément les effets directs (champ créé par la charge ponctuelle en vertu du principe de superposition) et indirects (phénomène d'influence) de la charge, et donc échappent à cette vision réductrice de la causalité évoquée plus haut (introduction, paragraphe 4) : "une cause, un effet."

II. Questionnaire "Coulomb".

1) Enoncé et réponse correcte.

Question Q1¹

En P, à la surface d'un conducteur en équilibre, la densité surfacique de charge vaut σ . On appelle $\vec{n}$ le vecteur unitaire normal en P à la surface du conducteur et dirigé vers l'extérieur du conducteur. A l'extérieur du conducteur, en un point au voisinage de P, le champ électrique vaut $\sigma/\epsilon_0 \vec{n}$

Ce champ est-il créé par :

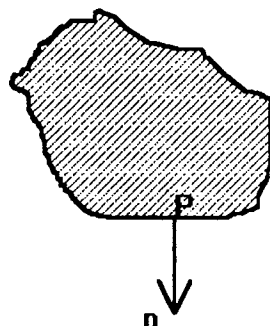
- 1) Les charges au voisinage de P?
 - 2) Toutes les charges du conducteur?
 - 3) Toutes les charges de l'Univers?
- Cochez la bonne réponse (1, 2, ou 3) et justifiez-la.

¹ L'idée de la question Q1 nous a été communiquée par P-Y Gal, enseignant-chercheur à l'Université Paris 13.

Question Q2 :

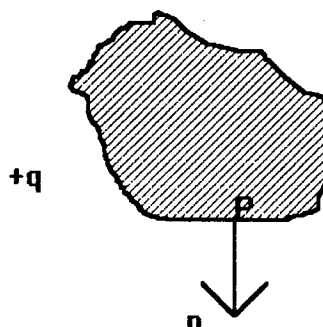
Soient les deux situations suivantes :

Situation A



Situation B

(q est une charge ponctuelle)



$\vec{n}$: vecteur unitaire normal en P à la surface du conducteur et dirigé vers l'extérieur du conducteur.

Q2a) Dans la situation B, le champ électrique $\vec{E}$ en un point au voisinage de P est-il bien donné par la formule $\sigma/\epsilon_0 \vec{n}$?

OUI NON Je ne sais pas

Justifier.

Q2b) Le champ électrique à l'extérieur du conducteur au voisinage de P est-il le même dans les situations A et B ?

OUI NON Je ne sais pas.

Justifier.

Q2c) La densité surfacique de charge σ est-elle la même dans les situations A et B ?

OUI NON Je ne sais pas.

Justifier.

Réponses correctes :

Q1) Le champ $\sigma\vec{n} / \epsilon_0$ est créé par toutes les charges de l'univers.

Q2a) oui : c'est le théorème de Coulomb; le champ électrique total est bien donné par la formule $\sigma\vec{n} / \epsilon_0$.

Q2b) non : soit M un point, à l'extérieur du conducteur, au voisinage de P,

$$\vec{E}_{\text{en } M, (B)} = \sigma' / \epsilon_0 \vec{n}.$$

$$\vec{E}_{\text{en } M, (A)} = \sigma / \epsilon_0 \vec{n}.$$

$\vec{E}_{\text{en } M, (B)} \neq \vec{E}_{\text{en } M, (A)}$, car $\sigma' \neq \sigma$: voir question 2c.

Q2c) non : $\sigma' \neq \sigma$ à cause de l'influence de la charge q qui modifie la répartition surfacique de charge sur le conducteur.

2) Conditions d'interrogation.

Ce test a été posé en entretien à 8 étudiants du niveau (J) (Université Paris 7) et en questionnaire papier-crayon anonyme à 252 étudiants de niveau (J) ou (K)¹. La durée de passation était d'environ 20 minutes (pour les questionnaires ou les entretiens).

Voici le détail des échantillons :

(J) : SpéT, Nogent sur Oise, juin 91, (N=17); SpéT, Raspail, Paris, janvier 92, (N=37); SpéP, Belfort, décembre 92, (N=39); SpéM, Saint-Louis, Paris, décembre 92, (N=45); 2ème année de D.E.U.G, Université Paris 7, décembre 92, (N=56).

(K) : 2ème année d'école d'ingénieurs, Suède, octobre 92, (N=58).

3) Un extrait d'entretien.

Le passage suivant donne une idée des difficultés liées à ce questionnaire.

E (l'étudiant) : "En P, à la surface d'un conducteur en équilibre, la densité superficielle de charge vaut σ . A l'extérieur du conducteur, au voisinage de P, le champ électrostatique qui vaut $\sigma \vec{n} / \epsilon_0$ est-il créé par les charges au voisinage de P? Toutes les charges du conducteur? Toutes les charges de l'univers? Alors...donc on a un champ ici."

I (l'"interviewer") : "On a une formule bien connue. Qu'est-ce qui est responsable du champ $\sigma \vec{n} / \epsilon_0$?"

E : "Toutes les charges du conducteur."

I : "Toutes les charges du conducteur?"

E : "Oui, pas uniquement celles qui sont en son voisinage. Alors, pourquoi?"

I : "Oh, là, on ne demandait pas pourquoi. Enfin ça peut s'ajouter."

E : "Non, mais moi je me demande pourquoi, parce que si je n'arrive pas à répondre à pourquoi, même si c'est faux...ouais, mais je dis ça, mais je ne sais pas pourquoi. Bah, si, si, si, par toutes les charges du conducteur.. Enfin, j'ai ma petite idée là-dessus, mais je ne sais pas expliquer pourquoi, heureusement que ce n'est pas demandé, d'ailleurs! A mon avis, c'est créé par toutes les charges du conducteur et pas seulement celles qui sont au voisinage."

¹ Rappel des contenus d'enseignement :

(H) : Définition du champ électrique par $\vec{F} = q\vec{E}$ (force s'exerçant sur une charge d'épreuve). Cas du champ uniforme. Travail de la force électrique. Différence de potentiel.

(I) : Loi de Coulomb. Théorème de Gauss. Relation entre champ électrostatique et différence de potentiel : $\vec{E} = -\text{grad}V$. Conductibilité des métaux : $\vec{j} = \gamma\vec{E}$.

(J) : Conducteurs en équilibre. Condensateurs.

(K) : Diélectriques.

I : "D'accord, donc c'est la réponse 2."

E : "Oui."

I : "Alors, par rapport à la situation précédente, on a ajouté la charge q à l'extérieur du conducteur. Est-ce que la formule $\vec{E} = \sigma \vec{n} / \epsilon_0$ reste vraie?"

E : "Bien, si ce que je pense, si ce que j'ai dit, si j'ai dit ce que j'ai dit auparavant, à mon avis, la charge q ne devrait rien changer. Mais, est-ce que c'est vrai, ça? Hum, le champ électrostatique créé en un point est...ah...bah...oui, c'est toutes les charges de l'univers; à mon avis, c'était toutes les charges de l'univers et là q va jouer un rôle."

I : "Alors q va..."

E : "Parce que, un champ, un champ créé en un point sur une charge, il est dû à toutes les autres charges présentes dans le système, c'est à dire tout l'univers, excepté lui.""

I : "Oui."

E : "Donc, euh, ah bah, oui, c'était tout l'univers."

I : "Donc c'était tout l'univers tout à l'heure."

E : "Mais est-ce que ça veut dire...est-ce que ça, c'est valable? Est-ce qu'elle est valable?"

I : "On peut aussi demander : est-ce que le champ va être le même que tout à l'heure?" (Silence). "Est-ce que σ va être la même? Et puis, est-ce que la formule reste vraie?"

E : "Ah oui, du fait qu'il y a σ qui...ah oui, est-ce que σ va être la même? Du fait qu'on met des charges à l'extérieur, ça va, ça va influencer la répartition de charge à la surface du conducteur, parce qu'on superpose un champ. A mon avis, elle reste vraie, mais σ , euh, ce ne serait pas le même σ ."

I : "Cela ne serait pas le même σ , donc ce ne serait pas le même champ, puisque la formule est vraie dans les deux cas?"

E : "ça ne serait pas le même σ ."

I : "Si ce n'est pas le même σ , ce n'est pas le même champ."

E : (Rire). "Bon, je dirai que ce n'est pas le même champ, mais je n'en suis pas persuadé."

On voit ici les réticences de l'étudiant pour considérer les deux effets de la charge q : le champ électrique créé par cette charge et la modification de la répartition surfacique de charge du conducteur. L'analyse des résultats des questionnaires fait une large place à cette difficulté.

4) Tableaux des pourcentages de réponses.

Question Q1 : "Les sources du champ $\sigma\bar{n}$ / ε_0 :

Echantillo n	N	Univers réponse correcte	Con- ducteur	Voisinage	Je ne sais pas
J	194	30%	44%	24%	2%
K	58	9%	60%	29%	2%

Question Q2a : "Le champ est-il bien donné par la formule $\sigma\bar{n}$ / ε_0 ?"

Echantillon	N	Oui (réponse correcte)	Non	Je ne sais pas
J	194	51%	44%	5%
K	58	29%	57%	14%

Question Q2b : "Le champ est-il le même dans les situations (A) et (B) ?"

Echantillon	N	Non (réponse correcte)	Oui	Je ne sais pas
J	194	78%	18%	4%
K	58	78%	15%	7%

Question Q2c : " σ est-elle la même dans les situations (A) et (B) ?"

Echantillon	N	Non (réponse correcte)	Oui	Je ne sais pas
J	194	65%	32%	3%
K	58	52%	40%	8%

Regroupement des réponses aux questions Q2 a, b, c :
(échantillons J et K confondus.)

oui oui oui : 5%
 oui oui non : 8%
 oui non oui : 9%
 oui non non : 23% (Association correcte de réponses)
 non oui oui : 2%
 non oui non : 2%
 non non oui : 15%
 non non non : 24%
 avec un ? : 13%

Association totalement correcte (Univers, oui, non, non) :
(échantillons J et K confondus) : 8%.

5) Premières constatations.

On observe qu'excepté aux questions Q2b et Q2c, où les réponses majoritaires sont que le champ électrique et la densité surfacique de charge changent lorsque la situation change, le taux de réponses correctes ne dépasse pas 50% (voir tableaux pages 59-60).

De plus le pourcentage de réponses totalement correctes est extrêmement faible.

Aucune association de réponses aux trois items de la question Q2 n'a un taux d'occurrence important. L'association correcte (oui, non, non) et l'idée que tout change (association (non, non, non)) constituent de faibles maxima (23%, 24%). C'est une impression de dispersion qui domine.

Il n'y a pas de grandes différences entre les résultats des échantillons (J) et (K), sauf pour les questions Q1 et Q2a. Nous n'avons pas trouvé d'argument pour expliquer cette différence (peut-être y-a-t-il moins d'insistance sur le théorème de Coulomb en Suède qu'en France?)

6) Analyse des arguments des étudiants.

a) Question Q1 :

Il y a eu pour les 70% environ de réponses incorrectes (c'est à dire : la source du champ $\vec{\sigma} / \infty$ est le voisinage ou le conducteur) deux principaux types d'arguments :

* "C'est négligeable" :

Dans cette catégorie se trouvent les réponses qui contiennent les termes de "négliger, négligeable, ignorer, petit, grand, loin..." :

Exemples :

(K) : *"Les charges de l'univers auront certainement une influence, mais nous pouvons probablement les négliger."*

(K) : *"Toute charge crée un champ, ainsi toutes les charges donnent une contribution. Je suppose que vous ne vous souciez pas des pauvres charges sans abri qui vagabondent dans l'univers et que vous faites l'approximation que ce sont seulement les charges en P qui interviennent."*

(J) : *"Quant aux charges de l'univers, nous les considérons comme suffisamment loin pour avoir de fait une action négligeable (loi en $1/r^2$ décroissant rapidement quand r augmente.)"*

Pour la plupart des réponses de ce type, seul le paramètre "distance" est pris en compte et la variable "charge" est oubliée. Peut-être cela est-il en partie dû au fait que le schéma donne une indication visuelle de la distance et ne figure en rien la valeur de la charge?

* "La cause dans la formule" :

Dans cette catégorie se trouvent les réponses qui font allusion au fait que σ apparaît dans la formule et qui emploient à propos de cette grandeur les termes "créé par, origine de, déterminé par, cause de, dû à,..."

(K) : *"Puisque la valeur du champ est $\sigma\vec{n} / \epsilon_0$, le champ doit avoir pour origine le conducteur, puisque la densité de charge est sur le conducteur et nulle part ailleurs."*

(J) : *" $\vec{E} = \sigma\vec{n} / \epsilon_0$, σ est la densité surfacique de P, donc E est déterminé par toutes les charges du conducteur."*

Dans ces deux commentaires, il est clair que les étudiants vont chercher la "cause de $\vec{E}$ " dans la formule $\vec{E} = \sigma\vec{n} / \epsilon_0$. D'autres commentaires sont plus ambigus :

Exemples :

(K) : *"Cette formule ne prend en compte que la densité de charge du conducteur et ϵ_0 . Les champs des différentes parties de l'univers avec une distribution de charge non uniforme interviendront bien sûr, mais c'est seulement un modèle."*

(K) : *"Toutes les charges de l'univers doivent contribuer au champ à l'extérieur du conducteur. Puisque la densité de charge σ apparaît dans la formule $\sigma\vec{n} / \epsilon_0$, l'origine du champ est le conducteur."*

Ce dernier commentaire témoigne particulièrement d'un malaise puisqu'apparemment les deux phrases se contredisent : l'étudiant a d'abord une idée tout à fait juste de superposition, puis il la nie en s'appuyant sur un contenu causal de la formule.

Enfin il est tout à fait possible que ces deux types d'arguments "c'est négligeable" et "la cause dans la formule" s'appuient mutuellement, implicitement : on est d'autant plus enclin à

négliger la charge extérieure que l'on a tendance à attribuer le champ $\sigma\vec{n}/\epsilon_0$ au conducteur, et réciproquement.

b) Les questions Q2 a, b, c.

On retrouve pour ces questions, l'argument : "C'est négligeable." et des arguments ayant trait à l'influence seule, ou à la superposition seule, ou à la fois à l'influence et à la superposition.

*** "C'est négligeable" :**

Cet argument accompagne parfois une réponse "oui" à la question Q2b (c'est à dire que pour ces étudiants le champ électrique a même valeur dans les situations (A) et (B).)

Exemple :

(K) : *"Le champ ne sera pas affecté par la petite charge ponctuelle q , $E=q/4\pi\epsilon_0\epsilon_r r$, un grand r et un petit q donneront un petit E , qu'on peut ignorer face au champ créé par le conducteur."*

Ce dernier commentaire témoigne d'une grande conviction de l'étudiant, qui, pour justifier sa réponse, ajoute des hypothèses fortes telles que : " q petit, r grand."

*** L'influence :**

Il est remarquable que plus de 30% d'étudiants ignorent ce phénomène dans l'exemple proposé (cf : les taux de réponses à la question Q2c) .

En revanche, certains mentionnent l'influence dans leurs explications :

Exemple :

(J) (avec une association de réponses totalement correcte) : *"La formule est vraie (c'est le théorème de Coulomb). A cause de l'influence de q , $\sigma_{(A)} \neq \sigma_{(B)}$, donc à cause de la formule de Coulomb, $\vec{E}_{(A)} \neq \vec{E}_{(B)}$."*

Cette affirmation est tout à fait cohérente, mais on ne peut savoir en la lisant si l'étudiant a conscience des deux "effets" de la charge extérieure q : modifier la répartition surfacique de charge du conducteur par influence, mais aussi créer son propre champ.

De plus, certains étudiants utilisent ce type d'argument, répondent correctement "oui, non, non" aux items de la question Q2, mais ne disent pas que le champ $\sigma\vec{n}/\epsilon_0$ est créé par tout l'univers. Ainsi ce raisonnement peut très bien "fonctionner" pour un étudiant qui pense que le champ $\sigma\vec{n}/\epsilon_0$ est créé par le conducteur uniquement, ce que nous allons voir plus loin.

*** La superposition :**

En ce qui concerne cet argument, il y a eu un continuum de réponses, des plus floues aux plus explicites :

Exemples :

(J) : *"Le champ n'est pas le même, car en (B) il y a une charge q qui intervient. σ ne change pas."*

(K) : " σ ne change pas. $\vec{E}$ change parce qu'il faut tenir compte de q ."

(K) : " q contribue avec son champ."

(J) : " q crée un autre champ $\vec{E}'$. Dans la situation (A), $\vec{E} = \sigma\vec{n} / \epsilon_0$, créé par le voisinage. dans la situation (B) $\vec{E}_{total} = \vec{E} + \vec{E}'$."

(J) : "En (A) le champ vaut $\sigma\vec{n} / \epsilon_0$, en (B) il y a un terme en q/r^2 ."

(J) : " $\vec{E} = \sigma\vec{n} / \epsilon_0 + q\vec{u} / 4\pi\epsilon_0 r^2$."

Les exemples cités ici ne traduisent pas une compréhension de la situation intégrant les deux effets de la charge extérieure q , voire témoignent explicitement du contraire : " σ ne change pas" ou " $\vec{E} = \sigma\vec{n} / \epsilon_0 + q\vec{u} / 4\pi\epsilon_0 r^2$ ".

* Superposition et influence :

Cette catégorie contient les réponses mentionnant à la fois la superposition des champs créés par la charge q et le conducteur, et la modification de la densité surfacique de charge σ

Voici le tableau des pourcentages des divers arguments donnés en question Q2 :

Echantillon	N	Pas de justification	Négligeable	Seulement influence	Seulement superposition	Superposition et influence	Autres arguments
J	194	10%	3%	31%	29%	18%	10%
K	58	9%	7%	22%	38%	17%	7%

7) Discussion d'ensemble des résultats.

a) Cohérence des raisonnements :

En lisant les commentaires des étudiants, on remarque souvent une recherche de cohérence interne. Assez souvent les étudiants justifient leurs réponses en les liant les unes aux autres, il y a même parfois un souci affirmé de cohérence :

Exemple :

(K) : "La source de $\sigma\vec{n} / \epsilon_0$ est le voisinage, dans la situation (B) $\sigma\vec{n} / \epsilon_0$ est encore vrai, autrement je me contredirais vis-à-vis de la question Q1."

Certaines associations de réponses paraissant contradictoires (telles que "oui, oui, non" : la formule $\vec{E} = \sigma\vec{n} / \epsilon_0$ est vraie, le champ $\vec{E}$ ne change pas, σ change.) peuvent trouver une interprétation cohérente grâce aux commentaires des étudiants.

Exemple :

(J) : "La formule est vraie car σ d'équilibre tient compte de l'influence électrostatique différente, c'est le même champ car $\vec{E} = \sigma\vec{n} / \epsilon_0$ dans les deux cas, et σ est différente."

Ici, lorsque l'étudiant affirme : "c'est le même champ", il pense probablement que le champ garde une expression du même type. Il se peut qu'il n'ait pas compris que la question Q2b signifiait : "est-ce la même valeur du champ?"

Toutefois, quelques réponses semblent largement incohérentes. L'étudiant semble alors être désespéré et se contredire :

Exemple :

(J) (répondant (non, oui, non) à Q2) : "a) La formule n'est pas valable car q exerce un champ électrique en plus de $\sigma\vec{n} / \epsilon_0$ b). C'est le même champ car il vaut $\sigma\vec{n} / \epsilon_0$."

Si l'on fait crédit à l'étudiant d'une certaine cohérence, ce ne peut être qu'en admettant qu'il ne parle pas du même champ en a) et en b). Nous allons voir que c'est parfois clairement le cas.

b) Un raisonnement très fréquent :

A la lumière des réponses explicites telles que celles qui ont été citées plus haut à propos de l'argument de superposition, on peut proposer une hypothèse sur le raisonnement des étudiants, compatible avec un grand nombre de réponses :

Tout se passe comme si pour de nombreux étudiants, le champ total en M, dans la situation (B), valait :

$\sigma\vec{n} / \epsilon_0 + \vec{E}_{\text{créé par } q}$ ($\sigma\vec{n} / \epsilon_0$ étant créé par le conducteur) ou
 $\sigma'\vec{n} / \epsilon_0 + \vec{E}_{\text{créé par } q}$ (avec $\sigma' \neq \sigma$ à cause du phénomène d'influence.)

Ainsi les deux idées se renforcent : la causalité liée à σ et le "+" pour témoigner du principe de superposition. Cela donne un aspect cohérent au raisonnement et un aspect apparemment encore plus satisfaisant aux réponses du type " $\sigma'\vec{n} / \epsilon_0 + \vec{E}_{\text{créé par } q}$ " qui semblent contenir influence et superposition.

Cette hypothèse peut en particulier expliquer des réponses "oui, non, oui" à la question Q2, apparemment incohérentes : pour certains étudiants, la formule $\vec{E} = \sigma\vec{n} / \epsilon_0$ reste vraie, mais le champ donné par cette expression est considéré alors comme champ créé par le conducteur (bien que l'énoncé de la question Q2a parle "du champ électrique $\vec{E}$ en un point au voisinage de P" : il sous-entend qu'il s'agit du champ total régnant en ce point.), et le champ dans la situation (B) est compris comme valant $\vec{E}_{(B)} = \sigma\vec{n} / \epsilon_0 + \vec{E}_{\text{créé par } q} \neq \vec{E}_{(A)}$.

Ainsi on constate que, même pour les réponses fausses, la superposition des champs créés par le conducteur et par la charge q est souvent faite, mais elle n'est pas comprise comme étant exprimée par la formule $\sigma\vec{n} / \epsilon_0$. Le raisonnement des étudiants n'est pas celui qui a été mis en évidence dans le questionnaire "Gauss" où la superposition n'était pas faite. Ici la formule ne bloque pas la superposition, mais il y a mauvaise adaptation de la causalité à la

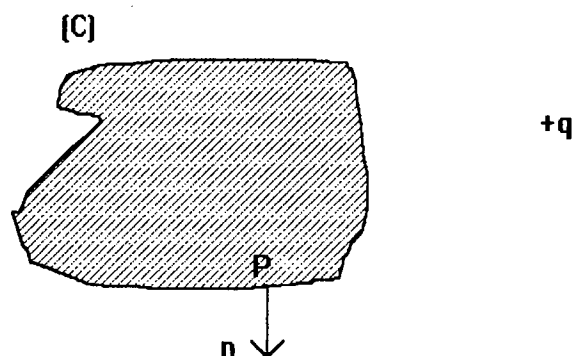
formule et peut-être les étudiants ne comprennent-ils pas que $\sigma \vec{n} / \epsilon_0$ est le champ total, parce que le principe de superposition n'est pas visible dans cette formule?

Néanmoins, beaucoup de réponses floues ne vont pas jusqu'à l'écriture d'une formule du type " $\sigma \vec{n} / \epsilon_0 + \vec{E}_{\text{créé par } q}$."

Aussi, pour voir si l'hypothèse précédente sur le raisonnement des étudiants est correcte, le test "Coulomb bis" a-t-il été élaboré.

III. Questionnaire "Coulomb bis".

1) Enoncé et réponse correcte.



Soit un conducteur (C) et une charge ponctuelle q à l'extérieur du conducteur (cf schéma ci-dessus)

En P à la surface du conducteur, la densité surfacique de charge est σ . $\vec{n}$ est le vecteur unitaire, normal en P à la surface du conducteur, dirigé vers l'extérieur. On suppose l'équilibre électrostatique établi. On désire calculer le champ électrique $\vec{E}(M)$ au point M, qui est à l'extérieur du conducteur, au voisinage de P. Un étudiant propose d'utiliser l'expression $\vec{E}(M) = \sigma / \epsilon_0 \vec{n} + \vec{E}_q$, où $\vec{E}_q$ est le champ électrique créé par la charge q en M.

Question : Cette expression est-elle :

JUSTE? Si oui, pourquoi?

FAUSSE? Si oui écrivez la réponse correcte en la justifiant

AMBIGUE ? Si oui, expliquez pourquoi et donnez une formulation non ambiguë.

Réponse correcte :

Cette expression est fausse : $\vec{E} = \sigma/\epsilon_0 \vec{n}$.

2) Conditions d'interrogation.

Ce test a été posé en questionnaire papier-crayon anonyme à 141 étudiants de niveau (J) ou (K)¹. La durée de passation était de 10 à 15 minutes.

Voici le détail des échantillons :

(J) : SpéP, Paul Valéry, Paris, décembre 92, (N=28); SpéP, Lakanal, Sceaux, novembre 93, (N=46).

(K) : 2ème année d'école d'ingénieurs, Suède, janvier 93, (N=67).

3) Tableau des pourcentages de réponses.

Echantillon	N	La formule est fausse réponse correcte	La formule est ambigüe	La formule est juste	Pas de réponse
J	74	27%	34%	39%	0%
K	67	45%	21%	28%	6%

4) Commentaires des résultats.

On peut noter qu'environ le tiers des étudiants pense que la formule proposée est juste, ce qui corrobore l'hypothèse faite à propos du test "Coulomb".

En ce qui concerne les autres réponses, indiquant que la formule proposée est fausse ou ambigüe, certains étudiants ont fait des confusions entre charge et densité de charge, mais

¹ Rappel des contenus d'enseignement :

(H) : Définition du champ électrique par $\vec{F} = q\vec{E}$ (force s'exerçant sur une charge d'épreuve). Cas du champ uniforme. Travail de la force électrique. Différence de potentiel.

(I) : Loi de Coulomb. Théorème de Gauss. Relation entre champ électrostatique et différence de potentiel : $\vec{E} = -\text{grad}V$. Conductibilité des métaux : $\vec{j} = \gamma\vec{E}$.

(J) : Conducteurs en équilibre. Condensateurs.

(K) : Diélectriques.

surtout il y a eu d'assez nombreux commentaires assortis d'arguments centrés sur l'influence, du type : " $\vec{E} = \sigma' \vec{n} / \epsilon_0 + \vec{E}_q$ avec $\sigma' \neq \sigma$ à cause de l'influence" ou encore :

(J) : "La charge q peut modifier la densité surfacique de charge. Si σ reste constant, par le théorème de superposition, on a bien le résultat trouvé par l'étudiant."

Ces commentaires qui ne remettent pas en cause l'existence de deux termes dans l'expression du champ total traduisent donc une incompréhension de la situation. Finalement, deux tiers d'étudiants environ ont répondu que la formule était fausse ou ambiguë, mais au mieux 25% des étudiants interrogés ont compris la situation; parmi eux certains n'ont écrit aucun commentaire. On peut donc douter de leur bonne compréhension.

L'hypothèse faite précédemment paraît donc confirmée : de nombreux étudiants pensent que la source du champ électrique $\sigma \vec{n} / \epsilon_0$ est le conducteur, et qu'en présence d'une charge ponctuelle, le champ électrique qui règne au voisinage d'un conducteur s'écrit : $\sigma \vec{n} / \epsilon_0 + \vec{E}_q$.

IV. Conclusion sur les tests "Coulomb" et "Coulomb bis".

Il semble qu'intégrer les phénomènes de superposition et d'influence dans une compréhension du théorème de Coulomb, soit très difficile pour les étudiants. L'un des obstacles à cette intégration est une lecture causale "abusive" de la formule " $\vec{E} = \sigma \vec{n} / \epsilon_0$ ", qui associe le conducteur (à travers σ) et l'idée d' "unique cause du champ".

Alors, en présence d'une charge extérieure, le principe de superposition peut bien être pris en compte, mais c'est au prix d'une modification de l'expression du champ total : " $\vec{E}_T = \sigma \vec{n} / \epsilon_0 + \vec{E}_q$ ".

Il arrive aussi que l'effet de la charge extérieure en terme d'influence occulte totalement son effet direct, en vertu de la préférence commune pour le schéma (une cause, un effet). (Voir introduction : De Kleer et Brown : 1984, Rozier : 1987, Gutierrez et Ogborn : 1992).

Ces différents aspects interviennent pour brouiller la compréhension d'un point que l'enseignement usuel clarifie peu, comme on le verra au chapitre 5. Il nous semble que les résultats de cette analyse incitent à faire travailler les étudiants au niveau de la causalité associée au théorème de Coulomb, afin d'aboutir à une compréhension plus profonde, mieux intégrée, des phénomènes de superposition et d'influence, autrement dit de l'effet direct (champ créé) et de l'effet indirect (influence) d'une charge vis à vis d'un conducteur.

Une intervention pédagogique, menée à partir de cette analyse sera décrite dans le chapitre 6.

CHAPITRE 4

Combinaison des deux difficultés :

- Champ électrique et mobilité des charges.**
- Expressions littérales du champ et sources du champ.**

1) Introduction.

Les concepts communs permettant d'articuler l'un sur l'autre les deux domaines de l'électrostatique et de l'électrocinétique sont ceux de charge et de champ. Dans cette articulation, le principe de superposition, tel que nous l'avons défini dans l'introduction (page 3), intervient de manière cruciale. En effet, le champ en un point d'un circuit résulte de causes diverses, à la fois par leur statut et leur position dans le circuit, que sont le générateur et les charges de surface. Il y a là une difficulté conceptuelle élevée, du moins peut-on l'attendre après les travaux évoqués dans l'introduction et nos résultats rapportés dans les chapitres qui précèdent. Cette difficulté (nous le verrons plus loin dans l'analyse de manuels) n'est pratiquement pas prise en compte dans l'enseignement secondaire et le début d'enseignement supérieur. D'autant plus qu'une pratique routinière des circuits électriques, installée depuis l'origine sur des relations entre d'autres grandeurs (tension, intensité du courant, résistance) favorise bien peu l'ancrage de ce domaine sur les concepts fondamentaux de l'électrostatique.

C'est pour analyser ces difficultés que le questionnaire "Le champ dans les fils" a été élaboré. On y demande de représenter le champ électrique en différents points d'un circuit électrique, à l'intérieur des fils de connexion; puis suivent des questions à propos des sources du champ électrique et de l'explication des changements de direction de ce champ. Celles-ci visent deux difficultés attendues et imbriquées. L'une est, compte-tenu de l'enseignement de l'électrocinétique, de se contenter d'une seule cause, le générateur, pour expliquer un effet lui-même localisé abusivement dans les fils (là où les charges bougent) : le champ électrique. L'autre est de limiter les explications aux formules impliquant le potentiel.

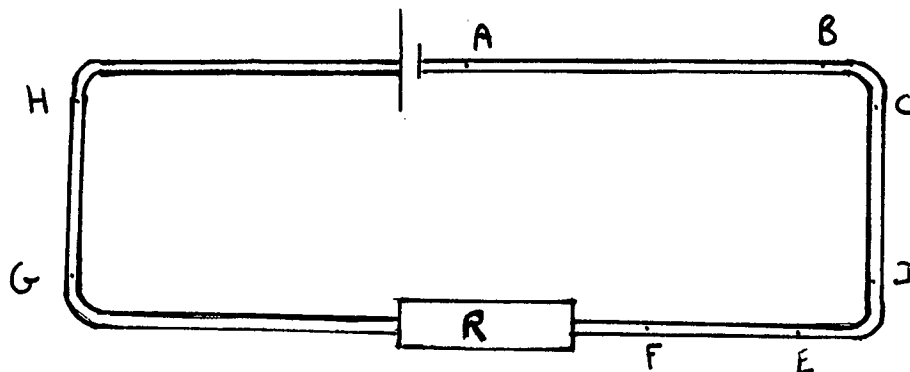
Les obstacles rencontrés dans les chapitres précédents : la mobilité des charges et la lecture causale des formules, sont donc encore en première ligne comme bases de raisonnements probables chez nos étudiants (il s'agit ici de la mobilité des électrons dans les fils conducteurs et des formules où apparaît le champ électrique $\vec{E}$).

2) Énoncé du questionnaire et réponse correcte.

Une première version du questionnaire a été donnée à des doctorants moniteurs (en 1991), sans qu'il ait été précisé dans l'énoncé que les fils avaient une conductivité non infinie. Nombreux sont alors ceux qui ont répondu que les fils étaient des conducteurs parfaits et que le champ électrique y était donc nul. Ceux-là n'ont pas répondu aux questions du test concernant les sources de ce champ électrique. Les résultats de cette première version du test ne feront donc pas partie de notre analyse.

Et, afin de défavoriser des réponses faisant allusion au champ électrique nul dans un conducteur parfait, l'énoncé du questionnaire a été modifié et mentionne la conductivité :

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



Soient : $\vec{E}_1$ le champ électrique à l'intérieur du fil dans la zone AB.

$\vec{E}_2$ le champ électrique à l'intérieur du fil dans la zone CD.

$\vec{E}_3$ le champ électrique à l'intérieur du fil dans la zone EF.

$\vec{E}_4$ le champ électrique à l'intérieur du fil dans la zone GH.

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

2) a) Quelles sont les sources de ces champs?

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

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

Les réponses correctes sont les suivantes :

La direction et le sens du champ électrique sont ceux du courant électrique ($\vec{E} = \vec{j} / \gamma$ où $\vec{j}$ est le vecteur densité de courant, γ est la conductivité du matériau.)

$E_1 = E_2 = E_3 = E_4$ car tous les fils considérés ont même section S et même conductivité γ ($E = I/S\gamma$ où I est l'intensité du courant qui a même valeur en tout point du circuit.)

Les sources de ces champs électriques sont toutes les charges du système et en particulier toutes les charges superficielles existant sur les fils. Ces charges (par leur disposition) sont responsables des variations de direction du champ électrique.

3) Conditions d'interrogation.

Ce test a été posé en questionnaire papier-crayon anonyme à 440 étudiants, de niveau (I), (J) ou (K)¹. La durée de passation a été d'environ 20 minutes.

Voici le détail des échantillons :

(I) : Sup, Orléans, juin 91, (N=40); Condorcet, Paris, février 92, (N=38).

(J) : SpéT, Raspail, Paris, décembre 92, (N=38); SpéT, Lille, octobre 93, (N=90); SpéT, Raspail, Paris, avril 94, (N=30); Spé T, Raspail, Paris, décembre 94, (N=39).

(K) : I.U.F.M 2ème année, Paris, janvier 92, (N=9); Licence de physique, Université Paris 7, janvier 92, (N=25); 3ème année d'Université, Suède, octobre 92, (N=69); Licence de physique, Université Paris 7, mars 93, (N=23); Moniteurs 1ère année, Université Paris 7, juin 94, (N=39).

4) Tableaux des pourcentages de réponses.

a) Directions des champs électriques.

Nous ne nous sommes pas intéressés ici au sens ni à la norme du vecteur champ électrique, mais seulement à sa direction, puisque c'est cet aspect qui change de manière remarquable (mais pas nécessairement remarquée) d'une section à l'autre.

Echantillon	N	Champ dans la bonne direction
I	78	87%
J	197	80%
K	165	85%

¹ Rappel des contenus d'enseignement :

(H) : Définition du champ électrique par $\vec{F} = q\vec{E}$ (force s'exerçant sur une charge d'épreuve). Cas du champ uniforme. Travail de la force électrique. Différence de potentiel.

(I) : Loi de Coulomb. Théorème de Gauss. Relation entre champ électrostatique et différence de potentiel : $\vec{E} = -\text{grad}V$. Conductibilité des métaux : $\vec{j} = \gamma\vec{E}$.

(J) : Conducteurs en équilibre. Condensateurs.

(K) : Diélectriques.

b) Sources des champs.

Les catégories (non exclusives) suivantes ont été utilisées pour l'analyse des réponses :

- La tension ou la d.d.p (sans dire aux bornes de quel dipôle.)
- Le générateur ou la tension aux bornes du générateur ou les pôles +, - .
- Le courant, les électrons en mouvement.
- Les charges en général : sans précision du type de charge considéré.
- Autres réponses : le résistor, l'effet Joule, l'induction, ou "il n'y a pas d'origine car $E=0$ " ...
- Pas de réponse ou "je ne sais pas".

Echan- tillon	N	Tension	Généra- teur	Courant, électrons	Charges	Autres réponses	Pas de réponse
I	78	26%	21%	13%	0%	15%	29%
J	197	7%	22%	24%	10%	7%	36%
K	165	18%	50%	15%	5%	7%	15%

c) Explications des changements de direction du champ électrique.

Les catégories (non exclusives) suivantes ont été utilisées pour l'analyse des réponses :

- Pas de variation : la direction du champ ne varie pas.
- Direction du courant ou des électrons mobiles : le champ électrique a même direction que le courant.
- Forme des fils : le champ électrique suit le fil.
- Autres réponses : le changement de direction est dû à la forme des équipotentiellles, à l'effet Hall ...
- Pas de réponse ou "je ne sais pas".

Echantil- lon	N	Pas de variation	Direction du courant, électrons mobiles	Forme du fil	Autre réponse	Pas de réponse
I	78	3%	10%	28%	13%	46%
J	197	2%	19%	19%	15%	47%
K	165	11%	15%	25%	13%	38%

d) Vous étiez-vous déjà posé la question du changement de direction?

Echantillon	N	Oui
I	78	5%
J	197	6%
K	165	5%

5) Analyse des résultats.

a) Représentations du champ électrique.

On peut noter (cf tableau p73) qu'il y a un fort taux de réponses correctes pour la direction du champ électrique (C'est l'échantillon (J) qui a le taux le plus faible, certains étudiants ayant confondu champ électrique et champ magnétique. C'est en effet à ce niveau qu'on enseigne quelles sont les caractéristiques du champ magnétique créé par un fil.)

La norme du champ électrique n'est pas explicitement demandée et l'on ne s'intéresse pas ici aux réponses de ce point de vue; d'ailleurs l'analyse quantitative des réponses est impossible, car certains étudiants n'ont pas justifié leurs dessins et on peut seulement dire que sur certains schémas, les champs $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \vec{E}_4$ paraissent de normes égales, sur d'autres ils paraissent de normes différentes.

Toutefois, on a pu relever quelques réponses, assez rares, caractéristiques d'un raisonnement séquentiel (décrit par J.L Closset : 1983), habituel pour l'intensité du courant et caractérisant ici le champ électrique :

(I) : " $E_4 > E_3 > E_2 > E_1$, car on s'éloigne de la source."

(K) : "Le champ va décroître du pôle + au pôle - à cause des pertes dans les fils."

Ces réponses renvoient indirectement à l'idée suivante : la source du champ est comprise comme localisée au pôle +, là où le champ est le plus grand.

b) Les sources du champ électrique.

On peut tout d'abord remarquer (cf 1er tableau p74) un assez fort pourcentage de non-réponses (de 14% pour l'échantillon (I) à 36% pour l'échantillon (J)). Cette question a laissé de nombreux étudiants perplexes, qui apparemment ont admis l'existence du champ $\vec{E}$, tel que $\vec{j} = \gamma \vec{E}$, sans se demander ce qui pouvait le créer.

Examinons plus en détail les principaux arguments :

- La tension : cet argument est le plus fréquent dans l'échantillon (I) : 26%. Notons que c'est à ce niveau qu'est enseignée la relation " $\vec{E} = -\text{grad}V$ ", qui peut être interprétée de

façon causale : c'est la variation du potentiel dans l'espace (autrement dit : l'existence d'une d.d.p) qui provoque l'apparition du champ électrique : ce qui est à droite du signe = paraît être la cause de ce qui est à gauche (comme on l'a déjà vu en analysant les questionnaires "Gauss" et "Coulomb").

- Le générateur : il s'agit d'une cause globale : le générateur est une première cause efficiente (au sens d'Aristote) de tous les effets électriques dans le circuit. Et on a pu lire des affirmations justes telles que celles-ci :

(K) : "C'est le potentiel électrochimique de la pile."

(K) : "Dans la pile, il y a en général une réaction d'oxydo-réduction qui est à l'origine du passage des électrons dans le circuit."

On a pu lire aussi le type de raisonnement suivant :

(J) : "C'est la d.d.p de la pile. Grâce à un raisonnement énergétique, on s'aperçoit de la présence de $\vec{E}_1$."

Ce genre de "raisonnement énergétique" est ainsi commenté par Halbwachs (1971a) : "En fin de compte, la cause du courant électrique, c'est la pile, parce que c'est elle qui fournit l'énergie sans laquelle rien ne peut se produire. Nous nous trouvons là en face d'une autre conception philosophique en physique, l'énergétisme, qui prétend ramener l'ensemble des phénomènes de la physique aux différentes transformations d'une entité unique et protéiforme, l'énergie, qui, se conservant en quantité, sera souvent conçue comme une quantité pure."

D'autre part, quelques étudiants répondent que les sources des champs électriques sont les pôles + et - de la pile. Pourtant, comme l'indique A.Benseghir (1989a), "les charges du générateur ne peuvent pas produire de champ dont les lignes suivent intimement les déformations topologiques du circuit (sinuosités) et qui puisse avoir des valeurs importantes dans des parties éloignées du générateur." Selon A.Benseghir, le raisonnement des étudiants se manifeste par "une focalisation quasi-exclusive sur les pôles des générateurs, lieux privilégiés d'accumulation de la causalité". Cette attitude est d'une part incompatible avec une prise en compte systémique du circuit électrique, car c'est un raisonnement local, et s'apparente d'autre part à l'obstacle substantialiste.

- Le courant, les électrons en mouvement : cet argument a surtout été utilisé au niveau (J) : 24%, il est présent aussi chez les étudiants (I) : 13% et (K) : 15%

Il est parfois lié à l'utilisation de la formule " $\vec{j} = \gamma \vec{E}$ ", les étudiants cherchant à appuyer leur raisonnement sur la seule formule d'électrocinétique contenant $\vec{E}$ qu'ils connaissent.

Il est possible aussi que les étudiants cherchent la source du champ électrique dans des charges et qu'ils se focalisent sur les charges dont on parle le plus à propos des circuits électriques : les électrons en mouvement.

Mais si l'on dit que le courant est la cause du champ électrique, il y a en quelque sorte une inversion de l'effet et de la cause, puisqu'il reste plus naturel de dire que c'est grâce au champ électrique que les électrons ont un mouvement ordonné dans le circuit.

Peut-être se produit-il aussi chez certains étudiants un amalgame des concepts de champ électrique et de courant électrique. Comme le disent R.Gutierrez et J.Ogborn (1992) "Si les causes et les effets se mélangent, une cause devient son propre effet."

- Les charges : le pourcentage de réponses dans cette catégorie est très faible. Et il n'y a eu que quelques étudiants pour parler des charges présentes sur ou dans les fils conducteurs :

(K) : "Les sources sont les électrons et plus généralement les charges. Comme les fils ne sont pas des conducteurs parfaits, il y a des accumulations de charges qui, elles, créent un champ électrostatique."

(J) : "La polarisation des fils."

(J) : "Le champ est créé par l'ensemble des charges des fils de connexion."

Certaines réponses assez vagues caractérisent peu les sources :

(J) : "Les sources de ces champs sont : tout le circuit et les charges extérieures à ce circuit s'il y en a."

(J) : "Les sources sont les charges mobiles et fixes."

(J) : "Les sources de ces champs sont les charges qui se trouvent dans les fils. $\vec{E} = \rho \vec{u} d / 4 \pi \epsilon_0 r^2$ "

(K) : "Il doit exister des charges dans l'espace où se trouve le champ."

On peut penser que cette recherche de charges comme sources du champ électrique témoigne d'une bonne compréhension de la question.

Nous allons retrouver des arguments du même type dans l'analyse de la question suivante du test.

c) Explications des changements de direction du champ électrique.

Le pourcentage d'étudiants ne répondant pas à cette question est encore plus fort que pour la question précédente (de 38% pour l'échantillon (K) à 47% pour l'échantillon (J) : voir 2ème tableau p74).

Deux principaux arguments sont donnés par les étudiants : "la direction du courant" et "la forme des fils".

- La direction du courant : comme pour la question des sources, cet argument consiste en une inversion de l'effet et de la cause, parfois associée à la formule " $\vec{j} = \gamma \vec{E}$ " :

(J) : " $\vec{j} = \gamma \vec{E}$, donc $\vec{E}$ a le même sens que le courant; le courant circulant dans le fil, le champ $\vec{E}$ subit alors un changement de direction."

(J) : " $\vec{E} = \rho_m \vec{v} / \gamma$. Or la vitesse des électrons change (reste colinéaire au fil) donc la direction de $\vec{E}$ change aussi."

Certaines réponses témoignent d'une association "force-vitesse".

(J) : "Le mouvement des électrons est globalement dirigé dans le sens des fils, ainsi on peut considérer que la force agissant sur les électrons est globalement dans le sens des fils, il en est donc de même pour $\vec{E}$, donc $\vec{E}$ suit la direction du fil."

(I) : "Les électrons suivent le conducteur. Or $\vec{F} = q\vec{E}$ est la force à laquelle est soumis un électron. Cette force engendre son déplacement suivant le fil donc $\vec{F}$ est dans la direction du fil, donc idem pour $\vec{E}$."

-La forme des fils : cet argument est très souvent descriptif, il n'apporte aucun élément nouveau par rapport à l'énoncé de la question et par rapport au schéma. Ce n'est pas une véritable explication :

(I) : "Les fils tournent, alors ça change de direction."

(J) : " $\vec{E}$ change car le circuit n'est pas droit."

(K) : "Les lignes de champ sont liées au conducteur et le suivent dans l'espace."

Certains étudiants insistent sur le fait que le champ est canalisé dans le fil :

(I) : "Les lignes de champ suivent le métal conducteur (l'air est isolant) comme pour un noyau de fer doux qui resserre les lignes de champ."

(K) : "Le champ est limité à l'intérieur du conducteur ($\gamma_{\text{fil}} \gg \gamma_{\text{air}}$) Courant continu $\Rightarrow$ pas d'émission radio (où $\vec{E}$ sortirait du conducteur.)"

Certains étudiants utilisent les termes "évident", "obligé de", qui, sans doute, témoignent de leur embarras.

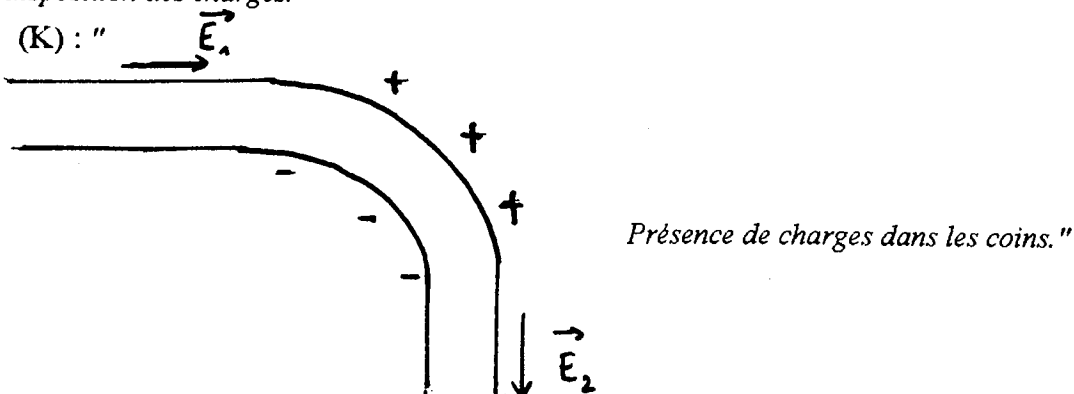
(J) : "Il me semble évident que le champ $\vec{E}$ ne peut inviter les charges à sortir du fil."

(K) : "Entre B et C par exemple, le champ électrique tourne de 90°, ceci étant dû au mouvement des particules qui sont bien obligées de "tourner" en prenant le chemin du fil."

Tout se passe ainsi comme si le champ électrique avait juste à "connaître" la forme des fils pour aller dans la bonne direction.

-Dans les autres réponses, on a pu trouver deux amorces de bonnes réponses (soit 0,5 % du total) :

(J) : "Les changements de direction d'une zone à l'autre s'expliquent par le changement de disposition des charges."



d) Vous étiez-vous déjà posé la question de l'origine du changement de direction?

Le pourcentage très faible de réponses "oui" (cf tableau p75) indique l'absence quasi-totale de questionnement à propos du champ électrique dans un circuit électrique; l'absence de lien entre électrostatique et électrocinétique ne paraît pas préoccuper les étudiants.

6) Conclusion :

Le manque de questionnement des étudiants est probablement le fait le plus frappant des résultats de ce test.

Les charges ont très rarement été vues comme sources du champ électrique, alors que pour des situations d'électrostatique, les étudiants pensent quasiment toujours aux charges comme sources du champ électrique, même s'ils en omettent parfois une partie dans leur analyse.

Pour les étudiants, électrostatique et électrocinétique sont deux sujets disjoints. Cette disjonction est très vraisemblablement dûe aux effets différents du champ dans les deux domaines, ainsi un étudiant du niveau (J) a-t-il dit : *"Comment appréhender un problème de statique (calcul de $\vec{E}$) lorsque le phénomène est dynamique (mouvement d'ensemble des électrons)?"*

Elle est aggravée par des jeux de formules bien distincts, l'électrocinétique ne faisant, de ce point de vue, aucune place aux charges de surface. Comme le dit A. Benseghir (1989) : "A l'université, les charges statiques superficielles ne sont en général pas étudiées ou ne sont évoquées que de manière allusive. Deux raisons principales expliquent ce désintérêt : d'une part ces charges sont difficilement détectables; d'autre part elles n'interviennent pas dans l'analyse quantitative, préoccupation majeure de l'étude de l'électrocinétique dans les cursus universitaires." C'est aussi ce que soulignent Härtel (1985), Steinberg (1985), Walz (1985). De plus, le calcul de la densité superficielle de charges sur les fils de connexion est bien difficile. (Rosser : 1963, 1970, Heald : 1984, Moreau, Ryan, Beuzenberg, Syme : 1985, Aguirregabiria, Hernandez, Rivas : 1992).

Rappelons que, pour apporter une vue plus systémique de ce qui se passe dans un circuit électrique et éviter une focalisation excessive sur les bornes du générateur, plusieurs chercheurs, notamment B. Sherwood et R. Chabay (1993a, 1993b), D. Psillos et P. Koumaras (1993, 1994) (voir introduction p 13 à 15) ont proposé l'idée de considérer dans l'enseignement, les interactions entre les charges surfaciques sur les fils et les charges en mouvement : ainsi B. Sherwood et R. Chabay (1993b) décrivent-ils leur approche : "Nous analysons les circuits en courant continu et les circuits RC d'abord

en termes de champ électrique et de charges surfaciques sur les fils, avant d'introduire le concept plus abstrait de potentiel électrique. Ce changement a des bénéfices à long terme. Cela rend le comportement du circuit beaucoup moins mystérieux et abstrait, et cela unifie l'électrostatique et les circuits électriques, qui usuellement paraissent deux disciplines séparées. Le rôle des charges de surface à la contribution du champ électrique en régime permanent dans un circuit n'est pas largement connu dans la communauté des physiciens, en dépit de nombreux articles sur le sujet dans les journaux de physique, ces cinquante dernières années."

Les résultats de ce questionnaire "Le champ dans les fils", joints à l'analyse de manuels qui suit (chapitre 5), ne peuvent évidemment que leur donner raison, pour autant que cette vision unifiée de l'électrostatique et de l'électrocinétique soit adoptée comme objectif pédagogique. A en juger par la démarche de B.Sherwood et R.Chabay, il s'agit d'un objet relativement coûteux, puisque leur cours y fait une très large place. Bien qu'il nous paraisse hautement justifié, nous n'avons pas tenté d'y souscrire dans la séquence pédagogique décrite plus loin (chapitre 6), étant données les contraintes de temps et de conformité au programme qui nous étaient imposées (enseignement en classe de Mathématiques Spéciales). Retenons au moins la place déterminante du principe de superposition dans cette compréhension unifiée de l'électrostatique et des courants permanents. En ce sens, notre séquence prépare une partie du chemin à parcourir.

CHAPITRE 5

Analyse de manuels.

I. INTRODUCTION.

Le champ électrique est un concept introduit par l'enseignement sans que l'élève ait pratiquement de connaissances préalables issues de la vie courante à ce sujet. La manière dont il est introduit scolairement, la relation établie ou non avec les charges sources ainsi qu'avec ses manifestations, sont donc susceptibles de déterminer d'autant plus la compréhension ultérieure des élèves et étudiants.

Les raisonnements observés chez ceux-ci renvoient à deux obstacles, mis en évidence dans les chapitres précédents :

- * la nécessité d'un effet - en l'occurrence, le mouvement d'une charge - pour que l'existence d'un champ non nul soit admise, ce qu'on peut résumer rapidement par "sans effet, point de cause". Plus ou moins directement associé à l'immobilité des charges, l'obstacle d'isolant-barrière est également apparu.

- * le statut abusif des "formules", dont les symboles semblent désigner les grandeurs seules admises à constituer le champ, c'est à dire à déterminer son existence et sa valeur. En raccourci cet obstacle peut être considéré comme celui de "la cause dans la formule".

Ces obstacles orientent l'analyse que nous faisons des textes scolaires portant sur le champ électrique. Nous nous proposons d'analyser les manuels les plus couramment utilisés dans l'enseignement secondaire (grade 11 : 1ère scientifique en France) et le début d'enseignement supérieur (niveau scolaire équivalent aux deux premières années d'université) pour voir en quoi ils sont susceptibles d'avoir contribué aux raisonnements des élèves et étudiants décrits plus haut.

Pour chaque niveau scolaire, nous isolerons des thèmes de contenu comme unités d'analyse. Ceux-ci sont un reflet à la fois des programmes correspondants et des préoccupations de notre étude.

II. ETUDE DES MANUELS DE 1ère SCIENTIFIQUE.

On trouvera en annexe a (p 198) le programme de la classe de 1ère en vigueur jusqu'en juin 1993. Il correspond à l'enseignement suivi par les élèves que nous avons interrogés.

A) Choix de thèmes de contenu.

Les thèmes suivants ont été analysés. Nous en développerons l'intérêt point par point.

- 1) Définitions et premières propriétés du champ électrique :
 - a) Les sources du champ électrique.
 - b) Le champ électrique, concept autonome par rapport à la charge d'épreuve : sa valeur, son existence.
 - c) L'iconographie : champ et lignes de champ.
 - d) Le principe de superposition.
- 2) Lien entre électrostatique et électrocinétique :
 - a) Différence de potentiel.
 - b) Existence du champ électrique en électrocinétique.

B) Livres examinés.

Les livres suivants ont été examinés. Ils comportent tous à la fois cours et exercices. Dans la suite, ils seront repérés par les premières lettres du nom de l'éditeur, écrites en caractères gras.

Be : Physique 1ère SE.

par J.C.Dumuelle, J.C.Legrand, B.Mercier.
éditions Belin 1988. p 115 à 135 et 147-148.

Bo : Physique 1ère SE. Collection G.Martin

par C.Coq-Legoëdec, B.Denoyer, G.Martin, G.Piqué, N.Trublin.
éditions Bordas 1988. p136 à 173.

C : Physique 1ère SE. Sous la direction de M.Thelliez.

par J.P.Daval, G.Fayard, A.Pailler, G.Aussel.
éditions Colin 1988. p 116 à 138.

D : Physique 1ère SE.

par R.Bourdon, C.Bourquard.
éditions Delagrave 1988. p131 à 155.

Hac : Physique 1ère SE. Collection Eurin-Gié.

par P.Bramand, P.Faye, G.Thomassier.
éditions Hachette 1991. p 134 à 157.

Hat : Physique 1ère SE.

par A.M.Degurse, F.Gozard, L.Rosenfeld-Gipch, L.Soulié, avec la participation d'A.Sayag, T.Zemb.

éditions Hatier 1988. p 174 à 197.

M : Physique 1ère SE. Collection GGE.

par M.F.Allier, M.Fabre, L.Quaranta, A.Rousseau.

éditions Magnard 1988. p 149 à 176.

N : Physique 1ère SE.

par G.Fontaine, M.Lautrette, A.Tomasino

éditions Nathan 1991. p 159 à 181.

Toutes les citations extraites de ces manuels seront écrites en italique. Certaines sont reportées en annexe à ce chapitre.

C) Analyse de contenu.

1) Définition et premières propriétés du champ électrique.

A ce niveau de toute première introduction du concept de champ électrique, nous nous intéressons, en lien direct avec le thème de notre étude, à la façon dont sont présentées les charges sources. Nous examinons, outre la question des sources, celle de la charge dite d'épreuve qui intervient dans la relation " $\vec{F} = q\vec{E}$ " (entre force subie et champ électrique au point où se situe la charge). La charge d'épreuve, en effet, pourrait apparaître comme nécessaire à l'existence du champ à un double titre. Dans la logique du premier obstacle - "sans effet, point de cause" - c'est elle qui associe un effet dynamique à la "cause" que constitue le champ. Elle est de plus associée à la relation la plus fréquentée du domaine, et, de ce fait aussi, peut apparaître comme constitutive du champ.

La présentation iconographique du champ et des lignes de champ nous semble aussi mériter l'attention, car elle est susceptible de souligner, ou non, le rôle des charges sources ou d'épreuve.

Enfin la façon dont est abordé, explicitement, le principe de superposition termine cette étude de la présentation des propriétés du champ.

Nous examinerons donc les points suivants :

- a) Les sources du champ électrique.
- b) Le champ électrique, concept autonome par rapport à la charge d'épreuve : sa valeur, son existence.

- c) L'iconographie: champ et lignes de champ.
- d) Le principe de superposition.

a) les sources du champ électrique.

Dans tous les livres examinés, le champ électrique est introduit par des expériences avec un pendule électrique, mettant en évidence la force électrique $\vec{F}_e$ agissant sur un corps quasi ponctuel de charge q , au voisinage d'un "gros" objet chargé. Il est dit que le champ électrique $\vec{E}$ est créé par des charges, mais l'insistance sur ce point est plus ou moins importante. A ce propos, il est intéressant de voir, à côté de la formule $\vec{E} = \vec{F}_e / q$, quelles sont les phrases d'accompagnement qui définissent le champ électrique (voir le détail en annexe à ce chapitre, p105-106). L'un des cas extrêmes est Hac où le lien entre champ électrique et charges sources est établi de manière allusive : *"La présence de charges électriques dans une région de l'espace en modifie les propriétés"*. Plus loin $\vec{E}$ est défini par analogie avec le champ de pesanteur, mais on se demande au vu du texte quel est le support de cette analogie (nous reviendrons plus loin, p 86, sur ce point). Ensuite on lit en tout petits caractères : *"charges à l'origine du champ : "charges sources" "*. Rien n'est donc véritablement fait pour que l'élève retienne que les charges sont les sources du champ électrique.

C'est uniquement dans M et Be que l'accent est mis sur le fait que les charges sont les sources du champ électrique. Dans M, les phrases suivantes sont encadrées : *"Un corps B fixe et chargé électriquement modifie les propriétés de l'espace environnant puisqu'un autre corps chargé électriquement et placé dans son voisinage subit une action mécanique. Nous dirons que B crée "un champ de forces électrostatiques" ou simplement "un champ électrostatique."* Et plus loin, toujours en encadré : *"Tout corps au repos chargé électriquement (Q) crée dans son espace environnant un champ électrostatique $\vec{E}$. Nous dirons que la charge Q est la source du champ $\vec{E}$."*

Ainsi, dans 6 ouvrages sur 8, il est question des charges sources dans une seule phrase, non mise en relief. Ce point apparaît comme un détail et toute l'attention est centrée sur le champ lui-même.

b) Le champ électrique, concept autonome par rapport à la charge d'épreuve: sa valeur, son existence.

Il s'agit d'un point délicat dont l'acquisition semble d'autant plus utile après les enquêtes décrites dans les chapitres précédents (questionnaires "Isolants" et "Tranche napolitaine" en particulier). Si l'on souhaite, en effet, que les étudiants cessent d'attacher une importance induite à la mobilité des charges d'épreuve, il est particulièrement utile que ceux-ci

comprennent que l'existence et la valeur du champ ne dépendent pas de la présence de telles charges.

Considérons d'abord le problème de l'indépendance de la valeur du champ électrique vis à vis de la valeur de la charge d'épreuve.

Excepté Hac et Bo, les livres indiquent que $\vec{F}_e / q$ ne dépend pas de q avant de poser $\vec{E} = \vec{F}_e / q$. Cette propriété est considérée comme un fait expérimental¹. L'analogie avec le champ de pesanteur (proposée dans le référentiel de 1ère SE) est parfois rappelée. Cette idée est assortie dans certains cas (Hac, Be, Hat) d'une précision : l'invariance du champ en un point suppose l'absence d'effet de la charge d'épreuve sur la position des charges sources.

Ainsi dans Be, on lit : *"Le champ électrostatique en un point de l'espace dépend de toutes les charges électriques en présence. Par exemple, lorsqu'on étudie le champ créé par le disque, il faut veiller à ce que la charge du pendule utilisé comme instrument de mesure (on l'appelle la charge d'épreuve) soit assez faible par rapport à celle du disque (la source du champ) pour ne pas perturber le champ étudié."*

On pourra lire d'autres citations en annexe à ce chapitre (p 106-107).

Considérons maintenant le problème de l'existence du champ électrique en l'absence de la charge d'épreuve.

Dans Hac et D, ce point n'est pas abordé.

Dans Be, nous avons vu ci-dessus que la charge d'épreuve est comparée à un instrument de mesure. Il en est de même dans C : *"Nous pouvons mesurer $\vec{F}_1 / q_1 = \vec{F}_2 / q_2 \dots$ "* et : *"Le champ électrique est déterminé en tous points de l'espace même si on n'y place pas de charge pour le déterminer."* A ce propos, les auteurs emploient l'image du thermomètre, instrument de mesure de la température. Cette analogie sous-entend que la grandeur physique "champ électrique" existe indépendamment de l'instrument de mesure "charge d'épreuve", tout comme la température existe en l'absence de thermomètre. Mais cela n'est pas dit explicitement. Il en est de même dans N où la charge d'épreuve est présentée comme "révélateur" du champ électrique.

Dans M, Bo, Hat, il est dit plus ou moins clairement que le champ électrique existe en l'absence de charge d'épreuve (voir annexe à ce chapitre p 107).

¹Seuls, M; Hat, Be disent clairement que les mesures correspondantes sont délicates. Pour les autres on a l'impression que c'est aisément réalisable en classe!

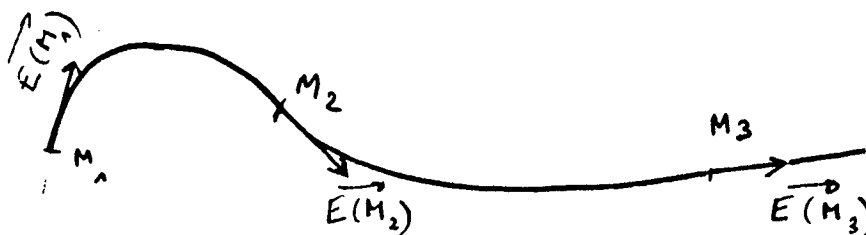
Ainsi tous les livres font allusion à l'idée qui fonde le concept de champ, à savoir l'indépendance de sa *valeur*, définie par la relation " $\vec{F} = q\vec{E}$ ", vis à vis de la charge d'épreuve q . Le plus souvent on indique que le rapport $\vec{F}/q$ est un vecteur qui ne dépend que du point considéré, mais dans 2 livres sur 8 seulement, il est dit clairement que le champ électrique *existe* en l'absence de charge d'épreuve.

c) L'iconographie : champ et lignes de champ.

Les représentations diverses utilisées pour illustrer le concept de ligne de champ peuvent être l'occasion d'insister sur le fait que le champ $\vec{E}$ est créé par des charges sources.

Dans 6 livres sur 8, apparaît le schéma des lignes du champ créé par un système donné de charges : une charge ponctuelle (dans Be, Bo), un corps chargé "vaguement sphérique" (M, Hat), deux cylindres chargés (D, Hac). Sauf exception, on ne peut observer qu'un seul corps chargé, il n'y a pas d'accent sur la possible multiplicité des sources pour le champ électrique.

Les représentations graphiques des lignes de champ peuvent aussi permettre de montrer qu'un champ électrique peut exister en l'absence de charge d'épreuve. Dans chacun des livres examinés, après la définition d'une ligne de champ, on peut voir un schéma tel que :



où les charges d'épreuve sont effectivement absentes, mais où l'on ne voit pas non plus apparaître les sources du champ.

d) Le principe de superposition.

Central pour notre étude, ce principe concerne l'indépendance des divers champs créés par différentes distributions de charges. Celle-ci justifie qu'on ajoute les composantes des champs créés par chacune d'entre elles, lorsqu'elles sont en présence, pour trouver le champ électrique en un point.

Au niveau de la classe de 1ère, il semble qu'on ne puisse qu'énoncer ce principe sans expliciter le problème qui le sous-tend (l'indépendance des divers champs créés par différentes distributions de charges). Plusieurs livres (M, Bo, N, C, D) admettent comme une évidence que les forces électriques exercées sur une charge d'épreuve s'additionnent et

donc les champs aussi, et seul M ajoute : *"Cette propriété de superposition des champs électrostatiques est fondamentale, elle suppose que les champs $\vec{E}_1$ et $\vec{E}_2$ ne s'influencent pas mutuellement, sont indépendants."*

Be dessine seulement une somme vectorielle, dans la marge, avec deux charges ponctuelles sources; et on lit en légende : *"Le champ $\vec{E}$ au point M est la somme des champs $\vec{E}_1$ et $\vec{E}_2$ créés par chaque charge au point M"* sans aucune explication.

Hat et Hac ne disent rien, dans le cours, du principe de superposition. Pourtant dans ces livres comme dans les autres, des exercices (n° 11.12 B de Hac, n° 29 de Hat) ne peuvent être résolus sans appliquer ce principe.

Sans doute la règle implicite est-elle qu'il s'agit d'un principe qu'on applique sans en parler.

Il semble donc, à propos de la définition et des premières propriétés du champ électrique, qu'il y ait dans certains livres beaucoup de sous-entendus que le professeur reconnaîtra sans doute, mais que l'élève n'a pas les mêmes raisons de dépister par lui-même. En particulier, peu d'insistance est apportée au fait que le champ électrique a pour sources des charges électriques et qu'il s'obtient en ajoutant les contributions de chacune d'elles calculées comme si chaque charge source était seule.

2) Lien entre l'électrostatique et l'électrocinétique.

Une compréhension intégrée de ces deux domaines implique le principe de superposition en ceci : si l'on associe par trop exclusivement l'existence, la valeur du champ électrique aux effets qu'il produit, alors le champ électrique de l'électrostatique et celui de l'électrocinétique ont peu à voir. Si, au contraire, on s'attache à souligner ce qu'il y a de commun à ces deux domaines, on est amené, hors phénomènes inductifs, à rechercher dans les deux cas, les sources statiques du champ électrique. Cette analyse conduit à faire appel au principe de superposition. Elle est susceptible, a priori, de contribuer à en faire comprendre le contenu et le caractère non trivial.

Le programme de 1ère SE (en vigueur jusqu'en juin 1993) est rédigé de façon extrêmement laconique (voir annexe a p 198). L'établissement d'un lien entre électrostatique et électrocinétique n'est pas explicitement demandé, cependant il apparaît deux fois comme nécessaire :

- Lors de l'étude du travail de la force électrique, la différence de potentiel est définie comme le quotient du travail de la force électrique par la charge d'épreuve. Par ailleurs, dès la classe de seconde, les élèves ont été amenés à utiliser l'expression de "différence de potentiel", considérée comme synonyme du terme "tension", employé dès le collège pour désigner le résultat d'une mesure effectuée avec un voltmètre. A ce niveau de 1ère SE, on ne

peut qu'admettre l'identification de la différence de potentiel telle qu'elle est définie dans le cours de 1ère et de la grandeur mesurée au voltmètre.

- Lors de l'étude de la puissance électrique en régime permanent, la relation " $P=U.I$ " est démontrée à partir de l'expression du travail des forces électriques " $W_{AB}=q(V_A-V_B)$ ", démontrée dans le cours précédent pour une charge en mouvement dans un champ électrostatique. Il semble donc important, avant d'utiliser cette formule, de souligner qu'il existe effectivement un champ électrique dans un conducteur parcouru par un courant.

Pour voir comment les livres se sont situés par rapport à cette nécessité de liaison, nous envisageons successivement deux points d'analyse :

- a) Existence du champ électrique en électrocinétique.
- b) Différence de potentiel.

a) Existence du champ électrique en électrocinétique.

4 livres sur 8 (C, D, Hac, Hat) utilisent, pour un électron dans un métal parcouru par un courant, la formule " $W_{AB}=q(V_A-V_B)$ ", démontrée en électrostatique, mais ils ne posent pas la question de l'existence du champ électrique dans le métal. Comment comprendre que cette formule s'applique encore? Aucun de ces 4 ouvrages ne mentionne que l'existence d'une d.d.p implique obligatoirement l'existence d'un champ électrique. Même dans Hat où est décrite une expérience qui a pour but d'identifier les d.d.p définies en électrostatique et électrocinétique (voir annexe à ce chapitre p 110 à 111), il n'est pas dit qu'il existe un champ électrique dans le conducteur ohmique parcouru par un courant. L'un de ces livres, C, évoque bien le champ électrique dans un métal, mais en se référant sans le dire à une situation d'électrostatique : *"Un conducteur métallique constitue toujours une surface équipotentielle."* La phrase *"L'existence d'une composante du champ électrostatique dans le plan du conducteur serait source d'un courant électrique."* peut même suggérer qu'un courant électrique est interdit dans un conducteur.

Les autres auteurs (4 sur 8) mentionnent l'existence du champ électrique dans un conducteur parcouru par un courant. (Voir détail en annexe à ce chapitre p 107 à 109).

Dans seulement 2 livres sur 8 (N, Be) sont évoquées quelques caractéristiques du champ électrique dans un conducteur parcouru par un courant. De plus l'origine de ce champ est un mystère. Pourtant il aurait été possible sur les schémas de circuits électriques d'ajouter des charges superficielles et d'indiquer que toutes les charges existantes étaient sources du champ électrique.

b) Différence de potentiel (ou d.d.p).

La définition de la d.d.p vient presque toujours, pour les ouvrages examinés, après le calcul, dans le cas où le champ électrique $\vec{E}$ est uniforme, du travail de la force électrique. La formule $W_{AB} = q\vec{E} \cdot \vec{AB}$ permet de poser $V_A - V_B = \vec{E} \cdot \vec{AB}$. Mais dans 3 livres sur 8, l'identification entre la d.d.p $V_A - V_B$ qui vient d'être définie et la tension U_{AB} , connue depuis le collège n'est pas faite, bien que plusieurs auteurs proposent des expériences dont le but est, selon eux, d'amener à l'identification d.d.p-tension (voir D, Hac, Hat, en annexe à ce chapitre p 109 à 112).

C'est seulement dans N (et en moindre mesure dans Bo) que l'on sait véritablement où l'on en est, car le résultat est admis et annoncé comme démontrable ultérieurement : *"On pose : $V_A = -Ez_A = Cte =$ potentiel au point A (...) Vous devez absolument savoir que la différence de potentiel $V_A - V_B$ entre les points A et B est identique à la tension électrique U_{AB} entre ces points, grandeur qui s'exprime en volts. Vous devez admettre ce résultat qu'il n'est pas possible de démontrer cette année."* Et plus loin, à propos des dipôles passifs en électrocinétique : *" $W_{fe} = q(V_A - V_B)$. On utilise ici la formule démontrée en électrostatique et qui reste vraie en électrocinétique."* C'est également dans ce seul livre qu'on peut noter cette remarque.

Dans tous les livres, l'élève rencontre donc des termes (tension, d.d.p), des symboles (U, V) identiques en électrostatique et en électrocinétique. Mais la tension ou la d.d.p sont définies d'une manière très différente en classe de Seconde (mesure électrocinétique au voltmètre) et en classe de 1ère (en relation avec le champ électrique). Dans la plupart des livres (6 sur 8) la connexion n'est pas faite entre les domaines de l'électrostatique et de l'électrocinétique.

D) Conclusion de l'étude des manuels de 1ère scientifique.

Il semble, à la lecture de ces ouvrages, qu'une propriété essentielle du champ électrique, à savoir "toute charge électrique crée un champ en tout point de l'espace, la valeur du champ électrique en un point est déterminée par toutes les charges existantes", ne soit pas mise en évidence. La non-nécessité d'une charge d'épreuve - et a fortiori d'un effet - pour l'existence d'un champ électrique n'est pas davantage soulignée.

En outre, l'existence du champ électrique en électrocinétique est à peine suggérée. Le lien entre la différence de potentiel liée au champ électrique et la tension mesurée en électrocinétique est souvent très mystérieux. On est donc peu encouragé, à la lecture de ces manuels, à une compréhension intégrée de l'électrostatique et de l'électrocinétique.

La compréhension du principe de superposition n'est donc guère favorisée, a priori, ni indirectement par un exposé clair, ni directement en faisant appel à lui pour comprendre ce qui rattache l'électrocinétique à l'électrostatique. On voit donc mal dans ces conditions comment un élève de 1ère pourrait utiliser le concept de champ électrique, comme grandeur physique sur laquelle il puisse appuyer des raisonnements.

III. ETUDE DES MANUELS DE DEBUT D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR.

On trouvera en annexe a (p 199 à 201) les programmes d'électromagnétisme correspondant au deux premières années d'enseignement supérieur.

A) Choix des thèmes de contenu.

Compte-tenu

- des difficultés des étudiants analysées ici et
- du contenu des livres qui est en rapport avec le champ électrique, les points suivants ont été examinés :

- 1) La loi de Coulomb : son énoncé (dans le vide, dans un conducteur, dans un isolant).
- 2) Définition et premières propriétés du champ électrique : les sources du champ, le statut du champ vis à vis de la charge d'épreuve.
- 3) Le principe de superposition.
- 4) Le cas des conducteurs en équilibre : le champ électrique à l'intérieur du conducteur et à l'extérieur, en son voisinage.
- 5) Champ électrique et courant électrique : existence du champ, ses sources.

Là encore, nous en développerons l'intérêt point par point.

B) Livres examinés.

Il y a un très grand nombre de livres d'électrostatique à ce niveau. Une étude exhaustive en est impossible.

Nous avons choisi d'étudier plus particulièrement des livres avec un cours développé (seront donc exclus les livres d'exercices comportant un bref rappel du cours), couramment utilisés et si possible récents.

Voici la liste de ces livres :

Ouvrages plus particulièrement destinés aux classes préparatoires : Sup. Spé M,M', P, P' :

Be : Electromagnétisme tome 1 (électrostatique, milieux conducteurs) par M.Bertin, J.P.Faroux, J.Renault.
éditions Bordas 1984.

et aussi un (peu) : Electromagnétisme tome 3 (magnétostatique, induction, équations de Maxwell et compléments d'électronique) par les mêmes auteurs
éditions Bordas 1986.

ainsi que : Electromagnétisme tome 4 (milieux diélectriques et milieux aimantés) par les mêmes auteurs.
éditions Bordas 1984.

Gi : Mécanique 1 par H.Gié et J.P.Sarmant.
éditions Technique et Documentation 1984.
et Electromagnétisme tomes 1 et 2 par les mêmes auteurs.
éditions Technique et Documentation 1985.

Q : Précis de physique : électricité 1 et 2 par J.L.Queyrel et J.Mesplède.
éditions Bréal 1985 et 1986.

Ouvrage plus particulièrement destiné aux classes préparatoires Sup bio Spé bio et Vétô :

Gr : Physique 1 par P.Grécias et J.P.Migeon.
éditions Technique et Documentation 1987.

Ouvrage plus particulièrement destiné aux classes préparatoires Sup T Spé T :

Ga : Electricité 1 par A.Galichon et F.Lucas.
éditions Delagrave 1977.
et un peu : Electricité 2 par F.Lucas.
éditions Delagrave 1979.

Ouvrages plus particulièrement destinés aux étudiants d'Université D.E.U.G 1ère et 2ème années :

H : Les bases de l'électromagnétisme par M.Hulin et J.P.Maury.
éditions Dunod 1991.

et un peu : Equations de Maxwell, ondes électromagnétiques par M.Hulin, N.Hulin,
D.Perrin.
éditions Dunod 1992.

L : Comprendre et appliquer l'électrostatique par J.P.Longchamp.
éditions Masson 1991.

P : Electromagnétisme, vide et milieux matériels par J.P.Perez, R.Carles, R.Fleckinger.
éditions Masson 1991.

Nous avons aussi examiné trois ouvrages que de nombreux professeurs considèrent comme des "références" et que les étudiants plus avancés consultent souvent dans les bibliothèques :

Bk : Electricité et magnétisme, cours de physique de Berkeley, volume 2 par E.M.Purcell,
traduction de C.Guthman et P.Lallemand.
éditions Colin 1973.

Br : Cours de physique générale :électricité de Bruhat, 8ème édition révisée par G.Goudet.
éditions Masson 1967.

F : Electromagnétisme 1 du cours de physique de R.Feynmann par R.Feynmann,
R.B.Leighton et M.Sands, version française de A.Cremieu et M.L.Duboin.
éditions Interéditions 1979.

Ces ouvrages seront repérés dans la suite par les premières lettres du nom de l'auteur écrites en caractères gras. Les citations extraites de ces manuels seront écrites en italique et de nouveau, certaines sont reportées en annexe à ce chapitre.

C) Analyse de contenu.

1) La loi de Coulomb.

Quasiment tous les cours d'électrostatique commencent par l'énoncé de cette loi, dont il est important de souligner l'universalité. En particulier cette loi est valable (et s'écrit toujours de la même façon) quel que soit le milieu dans lequel sont situées les charges sources et les charges d'épreuve. C'est là une composante essentielle du contenu conceptuel mis en jeu dans notre étude (cf page 3).

Or, il semble à la lecture de certains manuels que la formulation de la loi dépende de la nature du milieu contenant les charges.

Quelquefois, il est dit, sans plus de précisions, que la loi s'applique dans le vide.

Ainsi dans Q : *"Nous nous limiterons au cas du vide (ou ce qui revient sensiblement au même, au cas de l'air)"*, et les auteurs ne reviennent pas sur ce point dans tout l'ouvrage.

Il en est de même de Gi .

Dans 5 ouvrages sur 11, le cas des isolants est abordé explicitement.

Mais dans 4 de ces livres (Be, F, Ga, Gr), ainsi que dans les ouvrages de chimie (voir annexe à ce chapitre p 112-113), il semble qu'il y ait un amalgame entre *la force exercée par la charge ponctuelle q_0 sur la charge ponctuelle q ($q_0 q \vec{u} / 4 \pi \epsilon_0 r^2$) *et la résultante de la force exercée par q_0 sur q et des forces exercées par le milieu isolant sur q , cette résultante valant $q_0 q \vec{u} / 4 \pi \epsilon_0 \epsilon r^2$. Et celle-ci est improprement appelée dans les livres précédemment cités "force exercée par q_0 sur q dans un milieu isolant." Les difficultés des étudiants mises en évidence dans le test de "La tranche napolitaine" nous laissent penser que cet amalgame n'est pas anodin. Dans Br seulement (voir annexe à ce chapitre p 113), une distinction est faite entre toutes ces forces.

Enfin dans 4 ouvrages sur 11 (P, L, H, Bk), la question de la nature du milieu n'est pas soulevée et la loi de Coulomb est donnée comme loi d'interaction entre deux charges ponctuelles, sans qu'il soit dit que les charges sont dans le vide.

Qu'en est-il de la loi de Coulomb dans les substances conductrices?

Très peu d'ouvrages (3 sur 11 : Be, Ga, Q : voir annexe à ce chapitre p 113-114) en parlent pour signaler que la loi reste valable, mais sans s'attacher à préciser les sources. Lorsqu'ils le font, c'est avec la même imprécision qu'à propos des isolants.

En conclusion, en lisant ces ouvrages, l'étudiant peut avoir du mal à savoir s'il est question, dans l'expression qu'on lui propose, du champ créé par une charge ponctuelle,

ou du champ total créé par une charge ponctuelle et celles portées par un isolant ou un conducteur. Le principe de superposition n'est pas mis en oeuvre pour analyser le rôle du milieu.

2) Définition et premières propriétés du champ électrique.

Nous avons vu au cours de l'étude des manuels de 1ère qu'il n'était pas toujours dit qu'un champ électrique avait pour sources des charges électriques et que les facteurs dont dépendait où ne dépendait pas le champ électrique n'étaient pas toujours précisés.

Ces précisions sont d'autant plus utiles en début d'enseignement supérieur que la notion de champ est couramment utilisée sans que l'on ait besoin de recourir aux forces.

Dans tous les livres examinés ici, il est clair que les charges électriques sont sources du champ électrique et que le champ en un point ne dépend que de la position du point et des charges sources, mais pas de la charge d'épreuve (Gi, Gr, Br seulement ne font pas de remarque à propos de la charge d'épreuve.)

Citons quelques paragraphes particulièrement significatifs :

- à propos du concept de champ électrique, propriété locale de l'espace :

Dans Be : *"On est tenté de ne voir dans le champ électrique qu'un simple intermédiaire pour le calcul de la force. Il n'en est rien : l'idée est beaucoup plus forte : l'introduction du champ électrique tend à substituer à la notion d'action à distance entre les charges q_1 et q_2 , la notion d'action locale; autrement dit, on attribue la force s'exerçant sur q_2 à un champ $\vec{E}_1$ existant au point M_2 où se trouve la charge q_2 , ce champ étant créé par la charge q_1 . La justification de ce concept de champ est liée au fait expérimental que sa connaissance locale, en une région de l'espace, suffit à décrire entièrement les phénomènes électrostatiques qui s'y produisent, sans que l'on soit obligé de faire appel à la description détaillée des sources du champ."*

- à propos de la charge d'épreuve :

Dans Ga : *"Les charges électriques portées par les corps électrisés $A_1, A_2, \dots$ sont les **sources**¹ du champ électrostatique. Ainsi des charges **modifient**¹ par leur seule présence les propriétés de l'espace qui les entoure, cet espace fût-il le vide. (On emploie parfois le terme imagé de "déformation" de l'espace). La charge q met en évidence l'existence du champ électrostatique mais ce champ existe en l'absence de cette charge. D'ailleurs il faut que l'introduction de q ne perturbe pas, par son action sur les charges sources, le champ au point M : on dit que cette charge doit être **passive**¹, c'est à dire analogue à un instrument de mesure qui ne modifie pas la grandeur à mesurer."*

¹ en gras dans le texte de cet ouvrage.

En conclusion la définition du champ électrique, propriété locale de l'espace, paraît donc traitée de façon explicite dans les ouvrages analysés.

3) Le principe de superposition.

Il est intéressant de voir dans les ouvrages considérés si ce principe est sous-entendu ou s'il est considéré comme fondamental, s'il est traité ou non comme propriété évidente. Dans 4 livres sur 11 (Ga, Gr, Gi, Q), il paraît évident que les forces électriques sont additives et donc les champs aussi : on lit par exemple : *"Pour un système de charges ponctuelles, le champ résultant sera évidemment $\sum_i \vec{E}_i$."* Le mot de superposition n'est pas mentionné et

l'adverbe "évidemment" peut laisser songeur!

Dans Br, il est écrit que la propriété est admise, mais sans commentaire.

En revanche, 6 ouvrages sur 11 (Be, Bk, F, H, L, P) posent clairement le problème (voir citations en annexe à ce chapitre p 114-115).

C'est dans Bk qu'il y a le plus d'insistance sur le côté non évident du principe : *"Supposons que nous ayons 3 corps portant des charges q_1, q_2, q_3 . Nous pouvons mesurer la force sur q_1 quand q_2 est à 10 cm de q_1 par exemple et q_3 très loin. Nous pouvons alors éloigner q_2 , amener q_3 à la position qu'occupait primitivement q_2 et mesurer à nouveau la force s'exerçant sur q_1 . Enfin nous pouvons amener q_2 et q_3 l'un contre l'autre, toujours à 10 cm de q_1 . Une mesure nous montre alors que la force sur q_1 est la somme des 2 forces précédemment mesurées. Ceci est un résultat essentiel. Il ne peut pas¹ être déduit d'arguments logiques (basés sur la symétrie par exemple). La force avec laquelle interagissent 2 charges n'est pas modifiée par la présence d'une 3ème charge.¹ Quel que soit le nombre de charges dont est composé notre système, la loi de Coulomb peut être utilisée pour calculer l'interaction de chaque paire. Ceci constitue la base du principe de superposition¹ que nous invoquerons sans cesse au cours de notre étude de l'électromagnétisme (...) De fait nous connaissons certains phénomènes quantiques de nature magnétique qui représentent bien, du point de vue classique, un échec du principe de superposition."*

En conclusion le principe de superposition est traité très différemment d'un ouvrage à un autre, parfois comme une évidence à peine explicitée (dans 5 livres sur 11), parfois comme un principe non trivial dont on développe plus ou moins le contenu (dans 6 livres sur 11).

¹ en italique dans le texte de cet ouvrage

4) Le cas des conducteurs en équilibre : les sources du champ qui règne à l'intérieur ou au voisinage.

Nous chercherons à voir ici ce qui est dit au sujet des sources du champ électrique, nul à l'intérieur d'un conducteur en équilibre, égal à $\sigma / \epsilon_0 \vec{n}$ à l'extérieur du conducteur en équilibre, en son voisinage. Nous examinerons particulièrement les situations où un conducteur est en présence d'autres charges : comment sont-elles traitées du point de vue de la valeur du champ total, de ses sources et du principe de superposition?

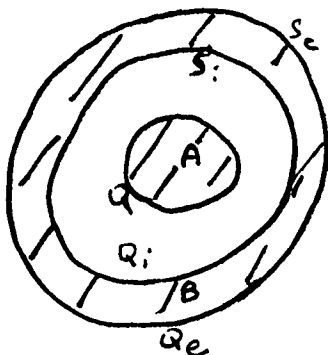
a) Cas de l'intérieur d'un conducteur.

A propos du champ nul à l'intérieur d'un conducteur, dans la plupart des livres examinés, les commentaires sont très rares.

Dans 5 ouvrages sur 11, on ne présente qu'un conducteur seul dans l'espace. Dans les autres livres (Be, Bk, Gi, Gr, H, P : voir annexe à ce chapitre p 115) d'autres situations sont étudiées. Il y a alors essentiellement description du phénomène d'influence, le plus souvent en simple remarque.

Quatre d'entre eux seulement (Bk, Gi, Gr, H) décrivent sans ambiguïté (mais rapidement) ce phénomène et la contribution de toutes les charges au champ nul dans un conducteur en équilibre. Ainsi dans Bk, un conducteur entre deux plans chargés est présenté avec le commentaire suivant : *"Les charges du conducteur se déplacent jusqu'à ce que le champ d'origine soit exactement annulé à l'intérieur. La distribution finale des charges est telle que le champ qu'elle crée et le champ des charges sources extérieures fixes s'ajoutent pour donner un champ électrique nul à l'intérieur d'un conducteur."*

Il arrive aussi que le principe de superposition ne soit pas toujours clairement appliqué : par exemple, dans Q, au cours de l'étude d'un condensateur :



"Portons le conducteur A au potentiel V_1 et le conducteur B au potentiel V_2 . En un point quelconque de l'espace, le champ est créé par l'ensemble des charges Q , Q_i , Q_e . L'ensemble des charges Q et Q_i créent un champ nul entre (S_i) et (S_e) ." Il semble que cette dernière affirmation contredise la phrase précédente. Les sources du champ nul qui existe

entre (S_i) et (S_e) sont pourtant Q , Q_i , Q_e et c'est bien sur le champ total qu'on peut se prononcer facilement. Puis on lit à la suite : "pour ces charges (S_i) ne constitue pas une frontière : on en déduit que le champ créé par ces charges en tout point situé au-delà de (S_i) , même à l'extérieur de B , est nul. Ainsi, à l'extérieur de (S_e) , le champ électrostatique est créé uniquement par les charges de (S_e) ". On se demande une nouvelle fois pourquoi toutes les sources ne sont pas mentionnées. Peut-être les auteurs pensent-ils au théorème des écrans électriques : "Lorsqu'un conducteur creux C est porté à un potentiel constant (et rien ne le laisse supposer ici), le champ à l'intérieur de C est indépendant de la présence de charges extérieures et le champ à l'extérieur de C est indépendant de la présence de charges intérieures." Mais le terme "indépendant" ne signifie pas que le champ créé par les charges extérieures en un point intérieur est nul et, de plus, on ne parle pas, dans ce livre, de ce théorème des écrans électriques.

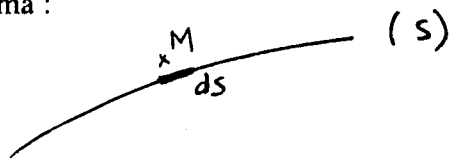
En résumé, on peut dire que dans tous les livres examinés, sur ce point de la nullité du champ électrique à l'intérieur d'un conducteur en équilibre, les situations où le conducteur n'est pas seul dans l'espace sont traitées très rapidement, souvent en "remarque". L'accent n'est pas mis sur le point délicat de la coexistence de deux phénomènes : - l'influence, - la superposition des champs.

b) Cas de l'extérieur du conducteur, au voisinage.

Qu'est-il dit du champ électrique qui règne au voisinage d'un conducteur en équilibre et de ses sources? On en parle essentiellement au moment où l'on démontre le théorème de Coulomb, et aussi lorsqu'on étudie la pression électrostatique; un problème analogue se pose quand on étudie la discontinuité du champ électrique à la traversée d'une surface chargée.

On lit dans 3 livres sur 11 que " $\sigma \vec{n} / \epsilon_0$ est créé par le conducteur."

Ainsi dans Q lors de la démonstration du théorème de Coulomb, on ne voit qu'une partie de conducteur sur le schéma :



"Soit $\vec{E}$ le champ électrostatique existant en M . On peut considérer $\vec{E}$ comme la somme de 2 champs : $\vec{E}_1$ créé par les charges portées par ds et $\vec{E}_2$ créé par les charges de (S) autres que celles de ds " et pour l'étude de la pression électrostatique : "Soit $d\vec{f}$ la force exercée sur la charge élémentaire $q ds$ de ds , par l'ensemble de toutes les charges du

conducteur autres que σdS ." La présentation du théorème de Coulomb est la même dans Gr.

En fait, ou bien le conducteur est seul dans l'espace et ce qui a été dit est vrai, mais comment l'étudiant pourra-t-il traiter un problème où on lui présentera un conducteur en présence d'autres charges? Ou bien le conducteur n'est pas seul dans l'espace, dans ce cas ce qui est écrit dans Q et Gr est faux, car $\sigma\vec{n}/\epsilon_0$ est créé par toutes les charges de l'univers et non par les charges du conducteur!

De même l'ambiguïté existe dans les cas où l'on ne dit pas que le conducteur est seul dans l'espace, mais où l'on ne dessine que lui (voir F, P en annexe à ce chapitre p 116).

Dans d'autres livres (4 sur 11), il est bien affirmé que $\sigma\vec{n}/\epsilon_0$ est créé par toutes les charges existantes, mais il n'y a pas d'exemple à l'appui. Br, Ga, L (voir annexe à ce chapitre p 116, 117) sont assez explicites, mais dans Be, il est dit succinctement : "*Le champ $\vec{E}$ au voisinage immédiat de ΔS est la somme du champ $\vec{E}_1$ dû aux charges de ΔS et du champ $\vec{E}_2$ dû aux autres charges.*" L'expression "autres charges" est bien vague : s'agit-il des autres charges du conducteur ou bien les charges extérieures au conducteur sont-elles envisagées?

Enfin dans seulement 3 ouvrages sur 11 ((Bk, Gi) : voir annexe à ce chapitre p117, H), on insiste sur le fait que $\vec{E} = \sigma\vec{n}/\epsilon_0$ ne signifie pas que le conducteur est source de $\vec{E}$:

Par exemple, H écrit à propos du champ électrique au voisinage d'un conducteur : "*Rem : il s'agit du champ électrique total au point considéré, créé par toutes les charges présentes dans l'univers, et pas du tout du champ créé par d'éventuelles charges portées par le conducteur lui-même.*" et : "*On arrive ainsi à un résultat tout à fait curieux : pour calculer E il suffit de connaître σ , bien que E soit le champ créé en M par toutes les charges présentes à la fois sur le conducteur et à l'extérieur, quelles qu'elles soient! Ceci est dû au fait que σ elle-même est commandée par toutes les autres charges, c'est à dire que celles-ci étant données, les charges superficielles vont se répartir sur le conducteur de manière précisément que "tout aille bien" pour le champ total, c'est à dire que celui-ci soit nul à l'intérieur, normal à la surface et égal à σ/ϵ_0 au voisinage.*"

On voit donc que dans trois ouvrages sur 11 seulement, le problème de l'influence et de la superposition est clairement posé à propos du théorème de Coulomb, encore n'y a-t-il pas d'exemple simple traité qualitativement, pour illustrer ces notions délicates.

En conclusion, au cours de l'étude des conducteurs en équilibre, il est rarement fait mention des sources du champ électrique, aussi bien pour le champ nul à l'intérieur du conducteur, que pour le champ " $\sigma\vec{n}/\epsilon_0$ " au voisinage du conducteur. Les notions d'influence et de superposition sont rarement mises en jeu simultanément.

L'articulation des effets directs (champs créés) et indirects (phénomène d'influence) des charges extérieures sur les conducteurs est peu soulignée.

5) Champ électrique et courant électrique.

Cette question nous importe pour les raisons déjà détaillées à propos de l'analyse des manuels de 1ère (voir pages 88 à 90). Il y est fait allusion dans les ouvrages examinés (sauf dans L, où l'étude est restreinte à l'électrostatique) à propos de la loi d'Ohm locale (" $\vec{j} = \gamma \vec{E}$ "), mais on y parle peu, voire pas du tout (dans 3 ouvrages sur 11 : Bk, F, Gi) des charges qui créent le champ électrique.

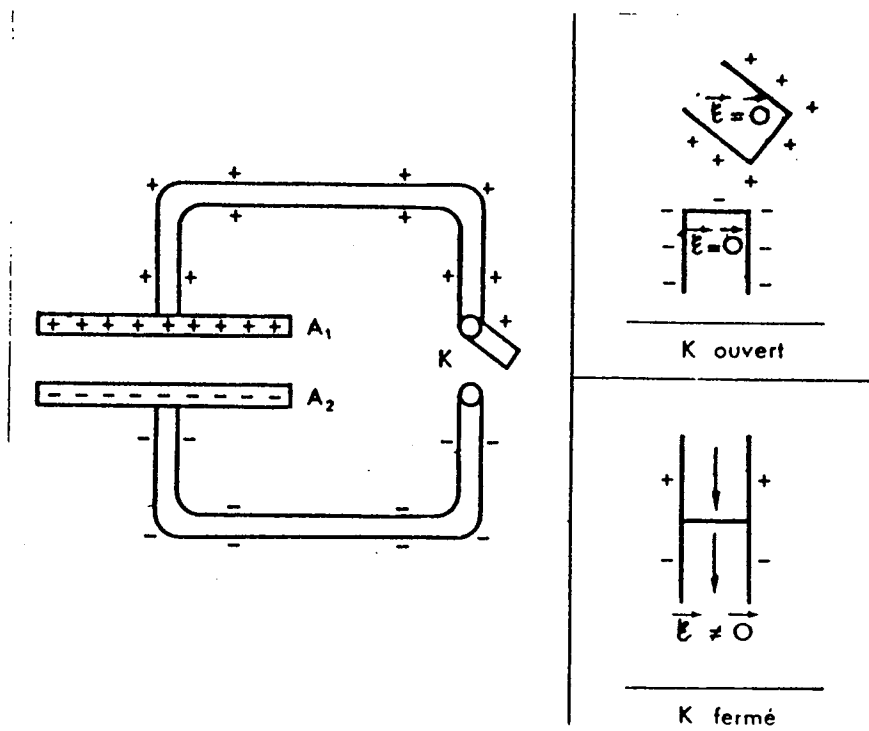
Dans 4 livres sur 11 ((Be, H, P) : voir annexe à ce chapitre p 118, Q), il semble que "l'origine" du champ électrique soit la différence de potentiel.

Par exemple dans Q : *"Lorsque le conducteur est soumis à une différence de potentiel, les électrons sont mis en mouvement de sorte que leurs positions moyennes se déplacent (...) Etablissons entre deux points A et B d'un conducteur métallique ou électrolytique une différence de potentiel $V = V_A - V_B$. On admet qu'en régime permanent (intensité du courant constante, seul cas qu'on envisage ici) en tout point du conducteur existe un champ électrique (on ne l'appellera plus électrostatique puisque les charges électriques sont alors en mouvement) donné par la relation $\vec{E} = -\text{grad} V$ et qu'une charge électrique q placée dans ce champ est soumise à une force $\vec{f} = q\vec{E}$." Et : "En régime permanent, ce champ dû à une différence de potentiel $V_A - V_B$ entre les extrémités A et B du conducteur est tout simplement un champ électrostatique."*

Dans Gr, il semble que l'origine du champ électrique soit le générateur : *"Considérons à présent un déséquilibre électrostatique permanent dans la barre métallique, réalisé au moyen d'un générateur (dispositif électrique susceptible de maintenir une d.d.p constante entre ses bornes, quel que soit le système qui lui est connecté). Dans ce cas, il existe un champ macroscopique permanent $\vec{E}(M)$ orienté dans le sens des potentiels décroissants, à l'intérieur du conducteur."*

Dans deux ouvrages seulement (Br, Ga) il est fait mention des charges superficielles sur les fils conducteurs. Mais Br ne les appelle pas charges "sources" et indique dans un but, qui reste mystérieux : *" $\sigma = \epsilon_0 E_N$. Les charges superficielles sont d'ailleurs tout à fait négligeables devant la charge des électrons de conductivité."*

C'est seulement dans Ga que les charges superficielles sont représentées graphiquement et considérées comme sources du champ électrique : ainsi à propos d'une décharge de condensateur, on observe le schéma suivant :



Avec le commentaire suivant : "Pendant le temps (qui peut être très court) correspondant au passage de l'état d'équilibre initial (condensateur chargé) au nouvel état d'équilibre (condensateur neutre), des électrons libres se sont déplacés de A_2 vers A_1 : ce mouvement d'ensemble des électrons constitue un courant électrique. (On parle de "courant de décharge du condensateur".)

Un tel courant ne peut se produire que si les électrons sont soumis, à l'intérieur des conducteurs, à l'action d'un champ électrostatique : ce champ est dû aux charges électriques superficielles réparties sur la surface externe des conducteurs; en effet, ces charges créent dans les conducteurs un champ

- nul, tant que K est ouvert;
- différent de zéro, juste après la fermeture de K ."

On pourra voir d'autres schémas et commentaires très clairs de Ga en annexe à ce chapitre p 118-119.

En conclusion, excepté dans Ga, il y a très peu de lien entre électrostatique et électrocinétique. Le champ électrique est relié au potentiel par une formule mais l'origine physique du champ électrique qui règne dans un conducteur parcouru par un courant est rarement indiquée. Les étudiants sont donc laissés à eux-mêmes pour imaginer l'existence des charges superficielles sur les fils.

D) Conclusion de l'analyse des manuels de début d'enseignement supérieur.

On constate que, dans la plupart des ouvrages de début d'enseignement supérieur, les lois (telles que la loi de Coulomb, le théorème de Coulomb...) ne sont présentées que dans des cas très simples (deux charges dans le vide, un conducteur seul dans l'espace...).

Les manuels étudiés préparent donc peu l'étudiant à envisager des situations plus complexes où des charges sont dans un milieu matériel, un conducteur n'est pas seul dans l'espace... Dans plusieurs livres toutefois cette généralisation est présente, mais elle est seulement énoncée, on n'y trouve pas d'études qualitatives présentant diverses situations.

Le manque d'unification entre électrostatique et électrocinétique, mis en évidence chez les étudiants, est probablement dû en partie à l'enseignement. En effet, comme au niveau de la classe de 1ère, les deux domaines sont traités très séparément, le champ électrocinétique n'apparaît que dans quelques formules et il est rarement fait mention de ses charges sources.

III Conclusion générale de l'analyse de manuels.

Pour conclure cette analyse de manuels, rappelons que nous l'avons effectuée en référence au principe de superposition, au sens où nous l'avons spécifié plus haut :

- 1) Toute charge ponctuelle crée un champ électrique en tout point de l'espace, conformément à la loi de Coulomb, ce champ est indépendant de la présence ou de l'absence d'autres charges, et de la nature du milieu environnant.
- 2) Le champ électrique existant en un point est la superposition des champs électriques créés en ce point par toutes les charges existantes.

Nous avons interrogé les textes analysés à propos de contenus susceptibles de mettre en jeu certains aspects de ce "principe de superposition", et en référence aux raisonnements d'élèves ou étudiants analysés dans l'enquête précédente. Les principaux points qui se dégagent de cette analyse sont les suivants :

- il y a en général peu d'insistance sur la notion de charge-source du champ électrique (enseignement secondaire et supérieur).
- le principe de superposition est souvent considéré comme une évidence (enseignement secondaire et supérieur).

- l'étude du champ électrique à l'intérieur d'un conducteur en équilibre ou en son voisinage est faite dans le cas d'un conducteur seul dans l'espace, mais rarement dans le cas d'un conducteur en présence d'autres distributions de charges.

- il est rarement explicité que l'expression " $\vec{E} = \sigma \vec{n} / \epsilon_0$ " ne signifie pas que les charges du conducteur sont seules sources du champ $\vec{E}$ (enseignement supérieur).

- l'indépendance de la loi de Coulomb vis à vis de la nature du milieu (vide, conducteur, isolant) est rarement mentionnée (enseignement supérieur).

- il y a rarement établissement d'une connexion entre l'électrostatique et l'électrocinétique et en particulier, les charges de surface sur les fils ne sont quasiment jamais présentées comme sources du champ électrique dans un fil parcouru par un courant (enseignement secondaire et supérieur).

Ces éléments sont de nature à contribuer à une faible prise en compte des sources du champ électrique et du principe de superposition chez les élèves et étudiants. Peut-être faut-il y voir le versant négatif du souci des auteurs de souligner le statut du champ comme propriété locale de l'espace? Mais l'idée que celle-ci représente précisément l'action des charges de tout l'univers semble quelque peu atténuée.

On note souvent, à propos du théorème de Coulomb, une absence de vigilance sur l'interprétation abusive des formules que l'on peut mettre en relation avec les difficultés observées chez les étudiants.

En revanche peu d'éléments, dans notre analyse de manuels, peuvent être directement mis en rapport avec l'obstacle "champ si mobilité". Dans ces textes, rien ne suggère la nécessité du mouvement des charges d'épreuve pour l'existence du champ. Certes, la non-nécessité de la charge d'épreuve pour l'existence du champ est, dans les livres de 1ère, assez peu relevée. L'enseignement supérieur cependant lui fait une plus large place. Il est raisonnable de penser que l'obstacle "sans effet, point de cause", qui se traduit ici par "champ seulement si mobilité", est ancré suffisamment profondément dans les modes de raisonnement généraux des élèves et étudiants pour se manifester même sans encouragement scolaire. Aucun manuel ne s'attache à mener l'étudiant à une certaine maîtrise de cette difficulté. Le lien entre l'électrostatique et l'électrocinétique, qui serait une occasion de s'y confronter, ne fait pas l'objet d'attention et n'apparaît pas à travers ces textes, comme un objectif d'enseignement.

Cette conclusion peut sans doute s'étendre à l'ensemble du contenu conceptuel que nous avons associé au principe de superposition pour en faire l'objet de notre étude.

ANNEXE AU CHAPITRE 5

On trouvera dans cette annexe les citations extraites des livres que nous avons examinés, venant en appui à l'analyse de manuels, et qui complètent celles qui ont déjà été reproduites dans le chapitre 5.

1. Etude des manuels de 1ère scientifique.

1) Définition et premières propriétés du champ électrique.

a) Les sources du champ électrique.

Dans ce qui suit, les livres cités le sont dans un ordre d'insistance croissante sur l'idée qu'à la source du champ électrique il y a des charges.

Hac : voir p 85.

C : Seules les formules sont encadrées et on lit : "*Le champ électrique apparaît comme une modification de l'espace provoquée par l'état électrique du corps A*", phrase bien abstraite pour un élève de 1ère, et : "*Un corps électrisé A crée en tout point de l'espace un champ électrique $\vec{E}$* ". L'expression "corps électrisé" est assez vague; curieusement l'expression "charge électrique" est employée pour caractériser le système d'épreuve mais pas le système source.

D : Le chapitre commence par l'observation de la déviation d'un pendule électrique : "*Si à l'équilibre, le pendule est incliné, c'est qu'il se superpose un champ électrostatique au champ de pesanteur*". Que peut ici comprendre l'élève, qui a une notion encore très vague du champ de pesanteur? De plus la phrase peut laisser croire qu'on peut additionner les champs électriques et de pesanteur. On lit plus loin : "*Lorsqu'on introduit une charge dans un champ électrique, elle subit une action électrique. cette charge est un témoin qui permet de prouver l'existence du champ électrique (...) Lorsqu'un système S contient des charges électriques, il produit en chaque point M de son espace champ électrique un vecteur champ électrique $\vec{E}$* ". Le terme "espace champ électrique" n'a pas été défini et ne le sera pas plus loin. Pourquoi ne pas dire "en tout point de l'espace"? (On peut lire le mot "produire", mais l'élève risque d'oublier ce qui est la source du champ électrique).

N : Le champ électrique est défini par la phrase suivante : "*En un point de l'espace, il existe un champ électrostatique, si, amenant en ce point une charge ponctuelle, celle-ci est soumise à une force électrostatique (...) Formule de définition : $\vec{E} = \vec{f}_e / Q$* ". et ensuite : "*ce champ est créé par toutes les charges de l'espace autres que Q*." Cette phrase est plus claire que dans les autres ouvrages, mais on insiste peu sur ce point.

Bo : On lit en caractères gras : "*Il existe un champ électrostatique, en une région de l'espace lorsqu'une charge électrique y est soumise à une force électrostatique.*" et plus loin une phrase est noyée à l'intérieur d'un paragraphe : "*La charge q_0 qui est la cause du*

champ électrostatique dans l'espace qui l'entoure, peut être appelée charge source" et cette fois le terme "charge source" est en caractères gras.

Hat : La phrase suivante est encadrée : *"Champ électrostatique : il existe en tout point de l'espace où une charge électrique est soumise à une force électrostatique. Il est créé par d'autres charges électriques."* Cette phrase est dans la page du résumé, ce qui indique qu'elle est un objectif de connaissance du chapitre.

Dans Be : ceci n'est ni encadré ni souligné : *"L'expérience montre que le champ électrostatique créé en un point par le disque ne dépend que de sa forme et de la charge qu'il porte. Plus généralement, un système quelconque de charges modifie les propriétés électriques de l'espace qui l'entoure. Cette modification se manifeste par un vecteur champ électrostatique $\vec{E}$ défini en tout point de cet espace."*

M : voir p 85.

b) Le champ électrique, concept autonome par rapport à la charge d'épreuve: sa valeur, son existence.

Qu'est-il dit à propos de l'indépendance de la valeur du champ électrique vis à vis de la valeur de la charge d'épreuve?

Bo : La formule $\vec{F} = q\vec{E}_M$ est écrite, mais il n'est fait aucune allusion à une expérience vérifiant que $\vec{F}/q$ ne dépend pas de q . Cette propriété n'est même pas écrite. On lit seulement en petits caractères : *" $\vec{E}$ dépend de la position dans l'espace-champ."* et on doit deviner que le champ ne dépend pas de la valeur de la charge d'épreuve.

Hac : Il est dit que la force électrique dépend de q (charge d'épreuve) et de la position de M (où est située q), et on définit alors $\vec{E}$ par $\vec{F} = q\vec{E}$, par analogie avec $\vec{P} = m\vec{g}$, mais il n'y a aucune raison avancée pour cette analogie. Le fait que $\vec{F}_1/q_1 = \vec{F}_2/q_2 = \dots$ vient seulement après : *"Si nous plaçons successivement différentes charges $q_1, q_2, q_3, \dots$ en M , ces charges seraient soumises à des forces $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3, \dots$ telles que $\vec{F}_1/q_1 = \vec{F}_2/q_2 = \vec{F}_3/q_3 = \dots = \vec{E}(M)$."* Il n'est pas dit si ceci est un fait expérimental ou une propriété admise. Cela paraît aller de soi ... par analogie avec $\vec{P} = m\vec{g}$. Mais, en suivant ce raisonnement, par analogie on pourrait alors associer un champ à n'importe quel type de force. Plus loin, on lit en tout petits caractères : *"Le vecteur champ électrostatique ne dépend pas des charges placées au point M à condition que ces dernières, appelées encore "charges d'essai" soient suffisamment petites pour ne pas perturber l'équilibre des autres charges qui sont à l'origine du champ ("charges sources")."*

Be : voir p 86.

N : Après la constatation expérimentale de $\vec{f}_{e1}/Q_1 = \vec{f}_{e2}/Q_2 \dots$ il y a une mise en garde : *"Attention. Comprenez bien que ce champ électrostatique $\vec{E}$ n'est pas créé par la charge*

Q, mais par toutes les autres charges de l'espace. la charge *Q* est seulement utilisée pour le révéler."

D : Il est d'abord fait référence aux expériences avec les pendules électriques : "Quelle que soit la charge témoin *q*, le vecteur $\vec{F}/q$ est toujours le même. Ce vecteur ne dépend que de la source du champ électrique (boule *A* dans l'expérience) et de la position du point *M* dans ce champ (...) La charge témoin produit elle aussi un champ électrique, mais ce champ n'a pas d'action sur elle." Il y a ainsi une distinction claire entre charges source et témoin.

Enfin, dans Hat, le rôle de la charge d'épreuve est clairement défini : "Le champ existait en *M*, avant qu'on y apporte les charges d'essai *q*. Mais pour le mettre en évidence, il est nécessaire de placer en ce point une charge d'essai *q*. Elle est alors soumise à une force $q\vec{E}$." et : "Nous avons supposé que la charge d'essai *q* est telle que, placée en *M*, elle ne modifie pas le champ électrostatique créé par les objets chargés *C1*, *C2*...environnant ce point."

Qu'est-il dit à propos de l'existence du champ électrique en l'absence de charge d'épreuve?

Hac, D, Be, C, N : voir p 86.

Dans M : Une question est posée : "Les propriétés électrostatiques de l'espace environnant *B* (grosse boule de charge *Q*) existent-elles en l'absence de *b* (pendule électrique de charge *q*) .Nous devons répondre par l'affirmative car nous avons montré que quelle que soit la valeur *q* de la charge de *b*, il existe en *b* une force $\vec{F}$ telle que $\vec{F}/q = \vec{F}_1/q_1...$ et ceci quelle que soit la position de *b* par rapport à *B*." Mais on lit aussi : "Le vecteur champ électrostatique $\vec{E}$ est caractérisé par une origine : le point *A* (placé dans le voisinage de la charge *Q*) où se trouve la charge *q*." Ceci risque de laisser penser qu'on ne peut dessiner $\vec{E}$ si la charge d'épreuve n'existe pas et que donc $\vec{E}$ n'existe pas non plus.

Dans Bo, on lit une phrase très claire : "Le champ électrostatique en un point *M* de l'espace est une propriété caractéristique de l'espace en ce point. Cette propriété subsiste que la charge *q* soit, ou non, placée en *M* pour tester ce champ." L'analogie avec masse-source et masse-test pour le champ de pesanteur est alors donnée.

Dans Hat aussi, nous avons vu plus haut qu'il était clairement dit que le champ électrique existait en l'absence de charge d'épreuve.

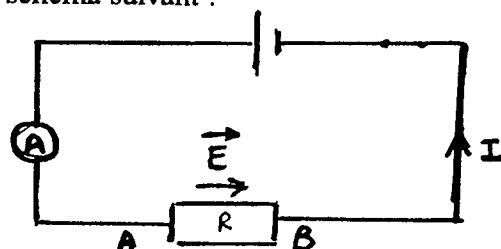
2) Lien entre l'électrostatique et l'électrocinétique.

a) Existence du champ électrique en électrocinétique.

Plusieurs livres ne posent pas la question de l'existence du champ électrique dans un métal : D, Hac, C, Hat : voir p 89.

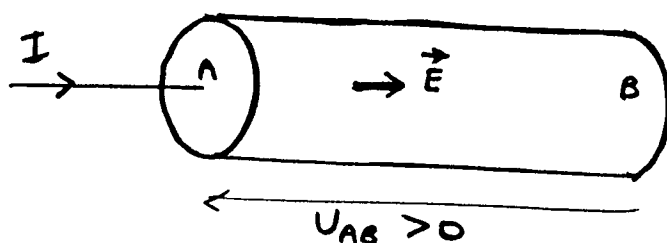
Dans Bo la formule " $E_p = -neV$ " (où n est un nombre d'électrons, $-e$ la charge de l'électron, V un potentiel) est appliquée "sans précaution" pour démontrer la relation " $P=UI$ " et c'est seulement au cours de l'étude de l'effet Joule qu'on lit : "Un conducteur métallique est constitué par un réseau d'ions positifs, entre lesquels des électrons libres sont animés, en l'absence de champ électrique, de mouvements désordonnés de très grande vitesse (100 km/s) Lorsqu'une tension est établie aux bornes du conducteur, les électrons placés dans un champ électrique, prennent un mouvement d'ensemble de vitesse très faible (de l'ordre du mm/s) qui se superpose à leur agitation désordonnée. Ainsi apparaît un courant électrique." Ces phrases ne sont accompagnées d'aucun schéma, on ne sait pas comment est le vecteur $\vec{E}$.

Dans M on a le schéma suivant :



et les commentaires : "Le générateur crée entre A et B un champ électrique $\vec{E}$ dirigé de A vers B ($U_A > U_B$). Les électrons sont soumis à une force électrique $\vec{f} = q\vec{E}$ (...) Le travail de la force $\vec{f}$ s'écrit $W = q(U_B - U_A)$ ". On voit qu'ici, en électrocinétique, le potentiel est noté U , alors que quelques pages avant, en électrostatique, il était noté V . D'autre part, le schéma peut prêter à confusion : $\vec{E}$ n'existe-t-il qu'entre A et B? Et à l'extérieur du conducteur ohmique?

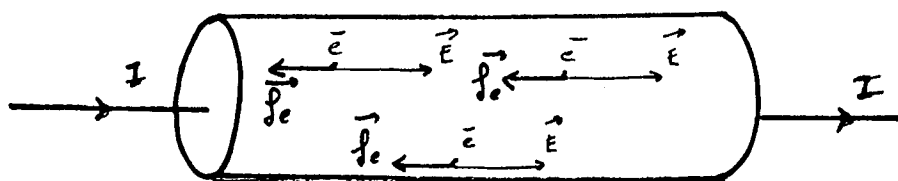
Dans Be l'existence du champ électrique dans un métal parcourue par un courant est affirmée dans la rubrique "Pour en savoir plus" (en-dehors du cours proprement dit, donc ceci ne semble pas, pour les auteurs, essentiel à l'élève de 1ère) : "Dans un métal si on se limite à une observation macroscopique, on constate qu'en moyenne le champ électrostatique est nul (...) Si on branche un générateur aux extrémités du conducteur, on crée une différence de potentiel $U_{AB} = V_A - V_B$. En même temps, on observe le passage d'un courant et donc une mise en mouvement des électrons libres. Or, nous venons de voir que l'existence de forces nécessaires à la mise en mouvement de charges électriques peut s'interpréter comme l'existence d'un champ électrostatique. Relier le conducteur à un générateur revient à créer, à l'intérieur, un champ électrostatique $\vec{E}$." Ceci est accompagné du schéma reproduit ci-dessous, mais on ne sait pas quelles sont les sources de ce champ.



$$E = U_{AB}/l$$

$\vec{E}$ est dans le sens du courant."

Dans N on peut voir le schéma suivant :



et les commentaires : "Dans un fil de cuivre rectiligne, homogène et cylindrique (voir figure), le champ électrostatique $\vec{E}$ est sensiblement uniforme lorsque le fil est dans un circuit fermé comprenant un générateur. Les électrons de conduction du métal sont alors soumis à une force $\vec{f}_e$ que l'on appelle maintenant force électrique de même direction que $\vec{E}$ mais de sens inverse. C'est le mouvement d'ensemble de ces électrons sous l'action de $\vec{f}_e$ qui crée le courant d'intensité I qui circule dans le sens inverse de celui des porteurs de charge."

b) Différence de potentiel.

Voyons comment les auteurs relient la d.d.p définie en électrostatique dans le cours de 1ère et la tension introduite au collège.

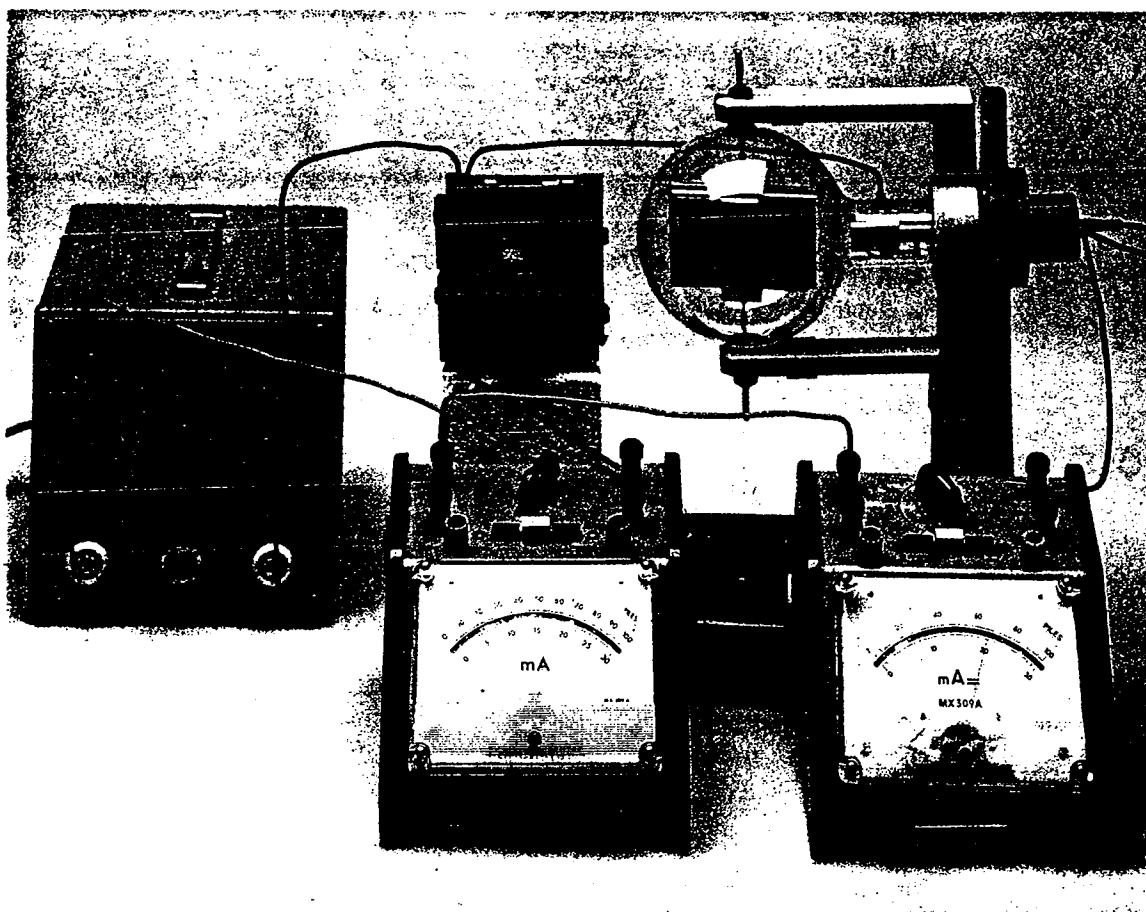
Dans Be, en introduction au chapitre : "Nous étudierons dans ce chapitre l'énergie potentielle électrostatique que nous relierons à la variation du potentiel électrique étudiée en seconde." Mais cette liaison n'est faite que très incomplètement, car on lit plus loin : " $V_M = -E \cdot x_M - V_0$ est appelé le potentiel électrostatique.(...) Son unité est le volt comme l'unité des tensions électriques." En effet il a été posé au chapitre précédent que E était en Volt par mètre, mais on ne lit pas que la d.d.p est égale à la tension mesurable avec un voltmètre. On ne saura pas d'ailleurs comment on mesure une d.d.p.

Dans M : "Nous posons $\vec{E} \cdot \vec{MN} = V_M - V_N$ "différence de potentiel". $V_M - V_N$ s'exprime en volts. On note fréquemment $U_{MN} = V_M - V_N$. U_{MN} s'appelle alors la tension entre les points M et N ." Nulle part il n'est dit à l'élève que cette grandeur est la tension électrique qu'il connaît déjà. En fin de chapitre, un T.P de rhéographie est proposé où une différence de potentiel est mesurée au voltmètre...comme si cela allait de soi.

C : Après la démonstration de la relation " $W_{A \rightarrow B} = q\vec{E} \cdot \vec{AB}$ " on lit : "Ce produit $\vec{E} \cdot \vec{AB}$ mesure la différence de potentiel qui existe entre le point de départ A et le point d'arrivée B . Elle est notée $V_A - V_B$ ou U_{AB} (encore appelée tension entre A et B), cf classe de seconde." Mais le "cf" ne permet pas à l'élève de savoir si cette propriété est admise, évidente...Comment pourrait-il deviner la relation qu'il y a entre la quantité $\vec{E} \cdot \vec{AB}$ et la tension qu'il connaît comme grandeur mesurable avec un voltmètre?

Certains livres proposent des expériences dont le but est, selon les auteurs, d'amener à l'identification d.d.p-tension.

Hat : Après la démonstration de $E_p = qEx + K$, on lit : " $V = Ex$ est appelé potentiel électrostatique. Il caractérise l'état électrique du point M (...) Une différence de potentiel $V_A - V_B = E(x_A - x_B)$ se mesure dans certaines conditions (On ne saura pas lesquelles!) avec un voltmètre." Le mot "tension" n'est pas écrit, et il n'est fait aucune référence aux connaissances antérieures des élèves à propos du voltmètre. Il faut attendre le chapitre suivant, quinze pages plus loin, pour lire : "*Les différences de potentiel définies en électrostatique et en électrocinétique sont identiques. Elles se mesurent avec un voltmètre.*" Cette identification vient à la suite d'une expérience, l'extrait correspondant de cet ouvrage est reproduit ci-dessous :



1.

Les différences de potentiel définies en électrostatique et en électrocinétique sont identiques. Elles se mesurent avec un voltmètre.



Électrostatique et électrocinétique

a) Expérience : un circuit comporte un générateur de haute tension aux bornes A et B duquel sont montées deux dérivation. L'une, notée (1), est constituée de la partie canon à électrons de l'appareil de production de faisceaux d'électrons. Elle est montée en série avec un ampèremètre. L'autre, notée (2), est constituée d'un conducteur ohmique en série avec un autre ampèremètre (**fig. 1**). Les deux ampèremètres indiquent le passage d'un courant.

b) Interprétation : dans la dérivation (1), les électrons sont placés dans un champ électrostatique créé par la différence de potentiel $V_A - V_B$. Dans la dérivation (2), les électrons sont mis en mouvement par la tension U_{AB} . Nous identifions les notions de tension (classe de Seconde) et de d.d.p.

Il est difficile de voir dans cette expérience où est l'électrostatique, puisqu'on parle d'électrons en mouvement et d'une déviation de l'aiguille de l'ampèremètre! Cet exemple risque de provoquer des confusions : où est la différence entre les branches (1) et (2)? On a le même générateur et à chaque fois des électrons en mouvement, en (1) dans le vide, en (2) dans un conducteur. Et qu'est-ce qui justifie l'assimilation tension-d.d.p?

Dans Hac, il est question de la d.d.p mesurée en classe de Seconde et de la d.d.p du cours de Première $V_A - V_B = \vec{E} \cdot \vec{AB}$, mais ces deux d.d.p ne sont pas clairement identifiées : *"En classe de Seconde, nous avons introduit la notion de tension U_{AB} ou différence de potentiel $V_A - V_B$, entre deux points A et B d'un circuit électrique. L'existence d'une tension entre ces points révèle une "différence d'état électrique" (...) Considérons deux points A et B situés dans un champ électrostatique uniforme $\vec{E}$. Ils n'occupent pas la même position par rapport aux plaques. Nous dirons qu'entre eux existe une différence de potentiel. Cette différence de potentiel dépend du champ $\vec{E}$ et des positions respectives des points A et B dans le champ. Par définition la différence de potentiel entre deux points A et B situés dans une région de l'espace où règne un champ électrostatique est $V_A - V_B = \vec{E} \cdot \vec{AB}$."* Plus loin est proposé un T.P de rhéographie où *"le voltmètre mesure la tension u_{iN} . L'expérience indique que $u_{iN}/l = \text{Cte}$ (...) La tension u_{iN} suit la même loi de variation que la différence de potentiel $V_i - V_N$: $E = V_i - V_N / l = u_{iN} / l$."* L'identification est bien rapide! $V_i - V_N$ pourrait être proportionnel à u_{iN} sans lui être égal. Cette expérience permet d'avancer dans la compréhension de $u_{iN} = V_i - V_N$. Il est difficile de dire qu'elle amène à l'identification.

Dans D, il n'est pas dit que $V_M - V_O$ est la tension "bien connue" : *"On a été conduit à poser que le produit Ex , qui s'exprime en volt (V), mesure le potentiel du point M par rapport au point de référence O pris à potentiel zéro."* Vient ensuite le TP de rhéographie : *"Le voltmètre mesure la tension $U_{MN} = V_M - V_N = V_M$ en choisissant $V_N = 0$."* Il faut alors deviner que la tension du cours de Seconde est égale à la d.d.p. Puis on lit : *"Vérification de l'expression du potentiel électrique $V_M = Ex$."* L'expérience permet alors de dire que V_M est proportionnel à x et on lit : *"Ce rapport mesure le champ électrique."* Ceci est une affirmation, où est donc la vérification de " $V_M = Ex$ " ? Rien ne prouve ici que le rapport " V_M/x " est égal au champ électrique, défini précédemment comme le rapport de la force

électrique sur la charge d'épreuve. On peut seulement appeler ce TP "Mesure de E" ou "Vérification de la proportionnalité entre V_M et x ."

Dans Bo, la d.d.p est définie ainsi : "Par définition, dans un champ uniforme, la différence de potentiel entre deux points A et B s'exprime par $V_A - V_B = \vec{E} \cdot \vec{AB}$." et le lecteur est renvoyé à une note en bas de page, en tout petits caractères : "En classe de Seconde, nous avons étudié la notion de différence de potentiel U_{AB} entre deux points A et B d'un circuit. Il s'agit de la même grandeur physique : $U_{AB} = V_A - V_B$." Pourquoi est-ce écrit si petit?

N : voir p 90.

II. Etude des manuels de début d'enseignement supérieur.

1) La loi de Coulomb.

Quelquefois le cas des isolants est examiné assez longuement :

Dans Ga, la loi de Coulomb est énoncée dans le vide, puis on lit : "Lorsque les charges sont dans un milieu isolant, celui-ci est siège d'un phénomène particulier, la polarisation qui, toutes choses égales par ailleurs, modifie la valeur des forces de Coulomb." Mais à la suite de ceci, rien n'est dit de cette modification. Par contre, on trouve beaucoup plus loin : "L'hypothèse de base $\vec{E} = q\vec{u} / 4\pi\epsilon_0 r^2$ apparaît comme universelle : c'est la raison pour laquelle toutes ses conséquences sont applicables aux diélectriques polarisés." Ceci paraît contredire la remarque précédente.

Plusieurs livres introduisent la permittivité relative ϵ_r dans l'expression de la force d'interaction électrostatique, ainsi dans Be : "La loi de Coulomb que nous venons d'écrire ($q_1 q_2 \vec{u}_{12} / 4\pi\epsilon_0 r^2 = \vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$) concerne deux charges ponctuelles placées dans le vide (...) Un "milieu" isolant, tel que l'air, peut modifier cette interaction. Nous verrons dans le volume 4, que si le milieu isolant est homogène, isotrope, linéaire (le sens de ce dernier mot sera expliqué ultérieurement), ce qui représente un cas assez courant, et si le milieu emplit tout l'espace où se manifestent les effets électrostatiques, la force entre les deux corps macroscopiques est bien représentée par la loi de Coulomb à condition de remplacer ϵ_0 par une constante ϵ différente ($\epsilon > \epsilon_0$) qui suffit alors à rendre compte de l'influence du milieu."

D'après F, la force entre deux conducteurs chargés dans un diélectrique liquide homogène est celle qui existe entre les deux conducteurs dans le vide, divisée par ϵ_r : "Un grand nombre de vieux livres d'électricité commencent par dire que la loi "fondamentale" est celle de la force entre deux charges $F = q_1 q_2 / 4\pi\epsilon_0 K r^2$, point de vue qui ne convient pas du tout. Pour commencer cette loi n'est pas vraie en général; elle n'est vraie que dans un monde rempli de liquide. Deuxièmement cela dépend du fait que K est une constante, ce qui n'est qu'approximativement vrai pour la plupart des matériaux réels. Il vaut bien mieux

commencer par la loi de Coulomb pour des charges dans le vide (qui est toujours valable pour des charges stationnaires)."

Dans Gr, les sources du champ total régnant dans un diélectrique sont mentionnées : *"Lorsque les charges se trouvent dans un milieu diélectrique, il y a deux phénomènes à considérer :*

-l'action directe de la charge q_0 sur q à travers le vide existant entre les centres nucléaires du milieu.

-l'action de la charge q_0 sur les atomes du milieu : modification de la répartition des charges (polarisation), le milieu "ainsi polarisé" exerçant une action sur q . Dans ce cas idéal le bilan est de la forme $\vec{f} = q_0 \vec{q} / 4\pi\epsilon_0\epsilon_r r^2$, ex : $f_{(eau)} Na^+, Cl^- = f_{(air)} Na^+, Cl^- / 80$ "

On lit très souvent la même chose dans les ouvrages de chimie : en voici quelques exemples:

Selon R.Mahé et J.Fraissard (1989) *"Dans un solvant, les forces d'interaction électrostatique entre deux ions sont divisées par un facteur ϵ_r appelé permittivité relative (par rapport au vide) et caractéristique du solvant."* et selon R.Didier (1984) *"Dans l'eau, les forces électrostatiques sont divisées par $\epsilon_r = 78,5$ "*, selon P.Morlaës et J.C.Morlaës (1981) *"Les solvants polaires sont également des composés à permittivité relative élevée. La loi de Coulomb $f = qq' / 4\pi\epsilon_0\epsilon_r d^2$ nous indique que dans un tel milieu, les interactions électrostatiques sont divisées par ϵ_r , si bien que les ions formés se comportent comme des espèces chimiques individualisées : il y a dispersion des ions dans cette solution."*

Dans Br seulement, une distinction est faite entre toutes ces forces et on ajoute bien que chaque force élémentaire entre deux charges obéit à la même loi : *"Si l'on suppose que les 2 charges considérées sont placées seules dans un espace vide et indéfini, la seule force qui s'exerce sur l'une d'elles est la force prévue par la loi de Coulomb. Il n'en est plus ainsi si les charges sont placées en présence d'un milieu matériel qui peut remplir en totalité ou en partie l'espace extérieur aux charges. La loi de Coulomb continue pourtant à s'appliquer sans aucune modification, mais dans le milieu introduit existent d'autres charges électriques, dont il faut prendre en considération les effets en leur appliquant aussi la loi de Coulomb. Nous préciserons ce point dans l'étude des conducteurs et celle des isolants."* Mais plus loin se produit un "glissement" : *"Une charge ponctuelle q' placée dans un diélectrique parfait, fluide, homogène, indéfini et non chargé, exerce sur une autre charge ponctuelle q placée à la distance r , une force dirigée suivant la droite qui les joint et dont l'intensité est $F = qq' / 4\pi\epsilon r^2$. C'est la loi de Coulomb dans un diélectrique, parfait, fluide, homogène, non chargé, remplissant tout l'espace."*

Qu'en est-il de la loi de Coulomb dans les substances conductrices?

Dans Be, il est signalé qu'on peut encore appliquer le théorème de Gauss (conséquence de la loi de Coulomb) dans les conducteurs : *"Lorsque nous avons introduit la loi de Coulomb*

traduisant l'interaction de 2 charges ponctuelles, nous avons supposé celles-ci placées dans le vide (ou dans l'air, ce qui en électrostatique, revient pratiquement au même); les propriétés qui découlent de la loi de Coulomb, et en particulier le théorème de Gauss, supposent donc que nous nous plaçons dans le vide. Ici cependant, nous allons à plusieurs reprises appliquer le théorème de Gauss à des surfaces qui passent en partie dans le métal; la justification d'un tel procédé n'est pas évidente et pour le moment nous admettrons la validité de cette méthode en constatant que les résultats ainsi obtenus sont conformes à l'expérience. Nous reviendrons cependant sur ce point." et plus loin : "Approchons une charge Q d'une sphère métallique initialement neutre (...) D'après ce que nous avons dit, ces charges se répartissent uniquement à la surface du conducteur; le volume du conducteur est neutre, c'est à dire qu'en chaque point, les charges positives et négatives se compensent exactement. On ne changerait donc rien en supprimant la matière du conducteur et en le remplaçant par une distribution superficielle σ répartie sur sa surface. On comprend ainsi pourquoi on peut utiliser dans l'étude des conducteurs les résultats de l'électrostatique du vide, et en particulier le théorème de Gauss. Il en est tout autrement pour les isolants; sous l'action de la charge Q , les charges de l'isolant ne sont pas libres de se mouvoir pour aller à sa surface, et nous montrerons dans l'étude des diélectriques que chaque élément de volume se comporte alors comme un dipôle qui intervient dans le calcul du champ.", mais de quel champ s'agit-il ici : du champ total régnant en un point de l'espace?

On peut se demander pourquoi ces auteurs éprouvent le besoin de spécifier que la loi de Coulomb est valable dans les conducteurs. On lit aussi dans Ga : "Nous supposons donc comme **hypothèse**¹ de départ, que toutes les lois déduites de la définition de $\vec{E}$ et du postulat fondamental (loi de Coulomb) sont applicables aux charges non compensées portées par les conducteurs."

et dans Q : "On admettra, ce qui est confirmé par l'ensemble des conséquences, que le principe de Coulomb que l'on a énoncé dans le vide, reste valable dans un conducteur."

2) Le principe de superposition.

Plusieurs auteurs posent clairement la question sous-tendue par ce principe.

H : "Principe de superposition : Soit une charge q située en A. Si on place en B_1 une charge q'_1 , celle-ci exerce sur q une force $\vec{f}_1$. Si on place en B_2 une charge q'_2 , celle-ci exerce sur q une force $\vec{f}_2$. Nous **admettrons**¹ que les forces de Coulomb satisfont au principe de superposition, c'est à dire que la charge q subit une force $\vec{f}_1 + \vec{f}_2$ quand on place à la fois q'_1 en B_1 et q'_2 en B_2 (en d'autres termes la présence de q'_2 ne modifie pas la force exercée par q'_1 sur q .) Rem : les charges q , q'_1 , q'_2 sont ici des charges

¹ en gras dans le texte de cet ouvrage

ponctuelles, maintenues à leur place indépendamment des conditions extérieures. La situation se compliquerait évidemment si q'_1 par exemple, était portée par un conducteur susceptible d'être influencé par la présence de q'_2 . Ainsi le principe de superposition ne doit-il pas être utilisé sans précaution. Nous le réserverons aux systèmes de charges ponctuelles de positions bien définies."

Dans F, L, P on lit à peu près la même chose, plus rapidement exposée.

Dans Be il est précisé de plus : "Ce principe est extrêmement important car il permet de ramener l'étude de l'interaction de deux systèmes de charges à celle de l'interaction de deux charges ponctuelles; il est, avec la loi de Coulomb, à la base de l'électrostatique."

Ga, Gi, Gr, Q, Br, Bk : voir p 96.

3) Le cas des conducteurs en équilibre : les sources du champ électrique qui règne à l'intérieur ou au voisinage.

a) Cas de l'intérieur d'un conducteur.

Dans certains livres, des situations autres que celles d'un conducteur seul dans l'espace sont présentées :

Bk : voir p 97.

Dans Gi on considère une sphère S en présence d'un très petit objet A. Le régime transitoire est décrit puis l'équilibre électrostatique : "Dans cet état, la répartition superficielle σ obtenue est telle que le champ qu'elle crée compense le champ créé par A de façon à réaliser $\vec{E} = \vec{0}$ dans tout le volume de la sphère. Comme nous le verrons ultérieurement, la distribution σ réalisant cette condition pour une position donnée du conducteur et de A est unique."

Dans P, on étudie l'équilibre d'un système de deux conducteurs : "Une distribution d'équilibre est un ensemble (σ_1, σ_2) de 2 distributions surfaciques sur S_1 et S_2 qui réalisent l'annulation du champ à l'intérieur des conducteurs."

Dans H, on lit en remarque après la démonstration de " $\vec{E} = \vec{0}$ " : "Nous ne faisons ici aucune hypothèse quant à la présence d'autres objets chargés soit en-dehors du conducteur, soit dans des cavités. Le résultat que nous venons d'énoncer est valable, sans exception, dans tous les cas."

Dans Gr, on lit aussi en remarque : "Les charges mobiles se répartissent à la surface du conducteur en équilibre électrostatique afin de réaliser $\vec{E}_i(M) = \vec{0}$ en tout point M intérieur (ce champ $\vec{E}_i(M)$ étant produit par cette distribution surfacique (σ) et éventuellement par d'autres distributions de charges extérieures au conducteur)."

Dans Be, le phénomène d'influence est d'abord présenté par des expériences avec un électroscope, puis de façon plus générale : "Lorsqu'on plonge un conducteur dans un

champ électrique (créé par des charges ponctuelles ou par d'autres conducteurs chargés), la répartition superficielle des charge se modifie à la surface de ces conducteurs; c'est en cela que réside le phénomène d'influence. La nouvelle répartition des charges doit être telle que, une fois l'équilibre atteint, le volume de chaque conducteur soit équipotentiel. Le problème du calcul du potentiel à l'équilibre semble "a priori" très complexe : l'expression générale de V rappelée plus haut ($\iint \sigma dS / 4\pi\epsilon_0 r$ dans le cas d'un ensemble de conducteurs) dépend de la répartition superficielle σ qui n'est pas, ici, une donnée du problème, mais qui s'ajuste "d'elle-même" à l'équilibre."

b) Cas de l'extérieur du conducteur, au voisinage.

On a l'impression, à la lecture de certains manuels, que $\sigma\vec{n}/\epsilon_0$ est créé par les charges du conducteur.

Q, Gr : voir p 98-99.

F : "Les charges au voisinage immédiat d'un point P de la surface créent en fait un champ local $\sigma/2\epsilon_0$ à l'intérieur et à l'extérieur de sa surface. Mais toutes les autres charges du conducteur "conspirent" pour produire un champ additionnel au point P égal en intensité au champ local. Le champ total à l'intérieur devient zéro, et le champ à l'extérieur σ/ϵ_0 ." A lire cet énoncé, il semble bien que σ/ϵ_0 soit créé par toutes les charges du conducteur. De même dans P, après la démonstration du théorème de Coulomb : "Notons que la valeur du champ $\vec{E}_\sigma = \sigma\vec{n}/\epsilon_0$ produit par toute la distribution de charge du conducteur ne dépend que de la densité superficielle au voisinage du point considéré." et au cours de l'étude de la pression électrostatique : "D'après la propriété de superposition, le champ en tout point est la somme du champ $\vec{E}_\sigma$ créé par la charge σdS elle-même et du champ créé par le reste de la distribution." Un peu plus loin, on parle du cas particulier d'un conducteur seul dans l'espace, ce qui laisse supposer que précédemment le conducteur n'était pas forcément seul dans l'espace et on a pourtant lu que $\sigma\vec{n}/\epsilon_0$ est produit par la distribution de charge du conducteur.

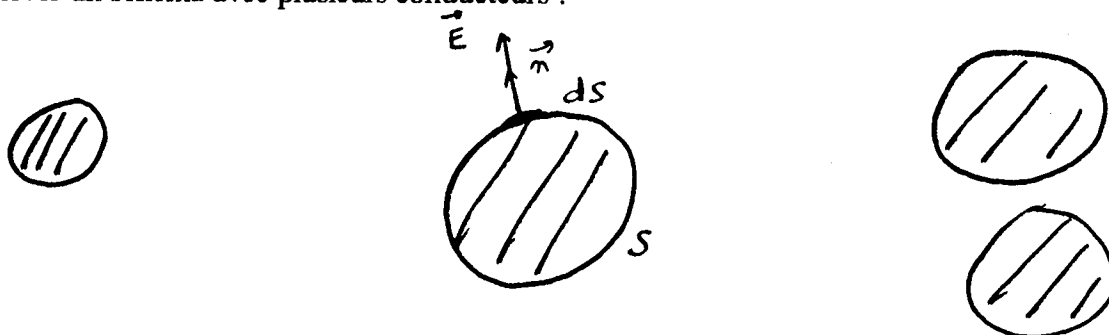
Quelquefois il est dit que $\sigma\vec{n}/\epsilon_0$ est créé par toutes les charges existantes, mais sans exemple à l'appui.

Be : voir p 99.

Dans Br, il est précisé que : " $d\vec{F} = \sigma dS \cdot \vec{E}$ où $\vec{E}$ est créé par toutes les charges électriques autres que la charge σdS réparties sur le conducteur ou en d'autres points de l'espace."

Dans L, aussi : " $\vec{E}_M = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ où $\vec{E}_1$ est créé par les charges de la surface voisines de M et $\vec{E}_2$ est créé par toutes les autres charges de l'espace (il ne s'agit pas des seules charges portées par le conducteur en question mais bien de toutes les charges autres que celles donnant naissance à $\vec{E}_1$, quelle que soit leur localisation."

Dans Ga est traité le problème de plusieurs conducteurs en équilibre (mais pas de conducteurs en présence de charges ponctuelles ou de distributions volumiques). On peut observer un schéma avec plusieurs conducteurs :



" $\vec{E} = \vec{e} + \vec{E}'$ où $\vec{e}$ est créé par dS et $\vec{E}'$ est créé par toutes les autres charges réparties sur S_i et sur les autres conducteurs du système."

Dans 3 ouvrages, on insiste sur le fait que $\vec{E} = \sigma \vec{n} / \epsilon_0$ ne signifie pas que le conducteur est source de $\vec{E}$.

H : voir p 99.

Dans Bk, on considère un système de conducteurs : "Comme $E = \sigma / \epsilon_0$ ne relie E qu'à σ , densité locale de charge de surface, vous pouvez être tentés par la pensée que σ est source de $\vec{E}$. Ce serait une erreur. $\vec{E}$ est le champ total dû à toutes les autres charges du système, qu'elles soient proches ou lointaines, et la charge de surface du conducteur est obligée de "se réajuster" jusqu'à ce que la relation soit satisfaite."

On lit aussi dans Gi : "La relation $\vec{E} = \sigma \vec{n} / \epsilon_0$ peut à bon endroit paraître étrange : le champ à la surface d'un conducteur ne dépend que de la densité superficielle locale σ et pas de la répartition des autres charges de l'espace." mais cinq pages plus loin on trouve : "La répartition des charges portées par un conducteur en équilibre électrostatique dépend des charges portées par les autres corps ainsi que de la position de ces derniers. Ce phénomène est appelé influence électrostatique." Et au cours de l'étude de la pression électrostatique : " $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ où $\vec{E}_1$ est créé par les charges portées par dS et $\vec{E}_2$ est créé par toutes les charges extérieures à dS , c'est à dire portées par le reste de la surface du conducteur ou par d'autres conducteurs." Et ensuite en tout petits caractères : "Bien noter que la démonstration ci-dessus, de même que toutes les propriétés générales des conducteurs en équilibre électrostatique, ne suppose en rien que le conducteur considéré soit seul dans l'espace."

4) Champ électrique et courant électrique.

Il semble, à la lecture de certains livres, que l'origine du champ électrique soit la différence de potentiel.

De même dans P : "L'apparition d'un courant électrique dans un milieu conducteur traduit la rupture d'un équilibre. Expérimentalement on constate qu'un courant peut apparaître dans un conducteur s'il existe un gradient de température, de potentiel électrique ou de concentration de porteurs. Dans ce chapitre, nous ne considérerons que le cas d'un courant provoqué par un gradient de potentiel."

De même, dans H, après que la formule " $U=RI$ " a été admise : "Dans un fil cylindrique rectiligne nous admettrons que le champ de vecteurs $\vec{j}$ est uniforme dans le fil et dirigé suivant l'axe du fil. Dans ce cas également, le champ $\vec{E}$ à l'intérieur du fil est lui aussi uniforme et parallèle au fil." puis : "dans un tronçon de fil conducteur, entre les extrémités duquel on établit une d.d.p donnée, le champ électrique garde en tout point une valeur indépendante des déformations éventuellement imposées au fil, et sa direction est toujours celle du fil."

Et enfin, dans Be : "Nous postulons l'existence de $\vec{E}$. Pour un milieu conducteur immobile, homogène et à température uniforme, les porteurs de charge ne sont mis en mouvement que par un champ électrique créé par une source externe. Ce champ peut être un "champ électrostatique" créé par des charges; on peut alors écrire $\vec{E} = -\text{grad}V$ où V est le potentiel électrostatique associé."

Ici il a été fait mention de "champ créé par des charges" mais on ne sait absolument pas lesquelles.

Q, Gr : voir p 100.

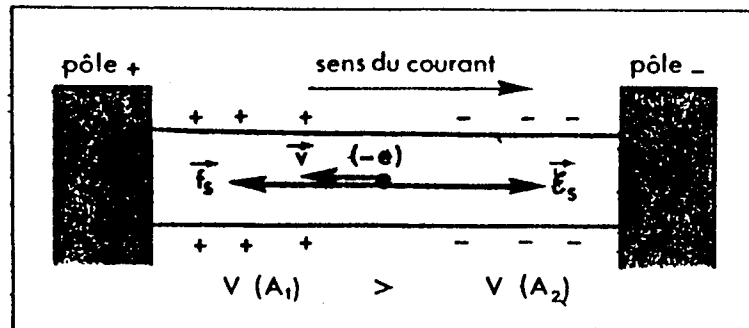
Dans Ga : voir p 100-101 et aussi :

a propos d'un conducteur parcouru par un courant constant, on peut lire : "Dans l'expérience du paragraphe 1, nous avons signalé que, dès la fermeture de K, les charges disposées sur la surface externe des conducteurs donnent naissance, dans ces conducteurs, à un champ électrostatique : c'est lui qui met en mouvement les électrons des fils métalliques reliant les armatures et assure ainsi le courant électrique.

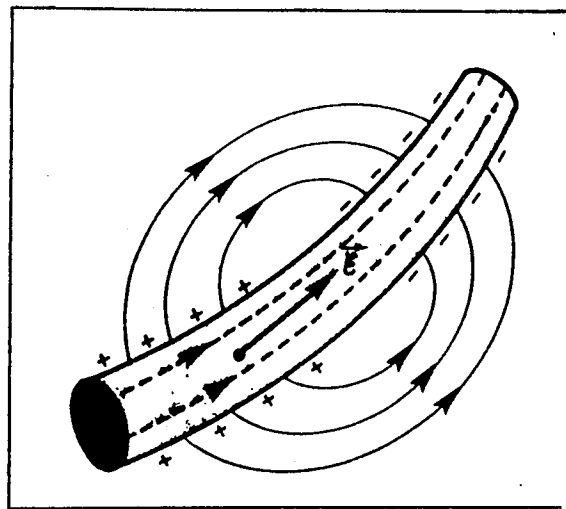
Ce phénomène est général : lorsqu'un fil métallique est parcouru par un courant, des charges superficielles non compensées créent dans ce fil un champ électrostatique $\vec{E}_s$, responsable du mouvement des électrons libres puisque ceux-ci sont soumis au champ de forces électrostatiques $\vec{f}_s = (-e)\vec{E}_s$.

Les charges superficielles, dont la distribution est immuable en régime stationnaire, ont une densité σ relativement faible.

A l'extérieur du générateur, les électrons vont du pôle (-) vers le pôle (+) : cela exige que la région du fil situé près du pôle (+) soit couverte de charges positives, tandis que celle située à proximité du pôle (-) soit couverte de charges négatives. (voir figure ci-dessous.)



(...) Remarque : les charges superficielles créent un champ électrostatique $\vec{E}_s$ non seulement à l'intérieur du conducteur mais encore à l'extérieur (voir figure ci-dessous) ".



CHAPITRE 6

Intervention pédagogique

1. Introduction.

Les chapitres 2, 3, 4 ont mis en évidence un certain nombre de difficultés chez les étudiants à propos du principe de superposition. Très brièvement, celles-ci se concentrent autour de deux obstacles :

- l'un, lié à la nature du matériau, interdit au champ électrique d'exister là où les charges ne peuvent se déplacer.
- l'autre est lié à une interprétation "causale" des formules, qui exclut de la responsabilité du champ toute grandeur ne figurant pas dans son expression littérale.

Que peut-on faire au niveau de l'enseignement pour essayer de les résoudre?

L'intervention pédagogique, dont la description suit, a été menée dans une classe de Mathématiques Spéciales Technologiques (nous noterons plus loin, en abrégé, Spé T) , dont l'auteur de ce travail est le professeur. Les contraintes de temps et de programme y sont extrêmement fortes. S'écarter un tant soit peu des objectifs habituels est une opération difficile.

Nous nous plaçons donc, dans cette expérimentation, dans un cadre extrêmement contraint, où notre action spécifique s'exerce tout à fait à la marge, du moins en termes de contenu et de volume horaire. Nous ne pouvons songer à modifier que l'éclairage apporté au contenu classique de l'enseignement en classe de Spé T, et tenter d'en évaluer l'impact.

Nous choisissons de mener cette évaluation par comparaison externe à l'aide de questionnaires écrits, avec des populations de niveau comparable. Plusieurs raisons nous y conduisent. La première est que nos conditions d'enseignement n'autorisent pratiquement pas ce qu'un regard extérieur à la didactique qualifierait de "perte de temps" : on y reste presque exclusivement cantonné dans le style transmissif de la part du professeur, peu de place est disponible pour des débats en classe. Tel est le contexte des classes de concours en France. La seconde raison de notre choix est l'espoir d'associer à notre réflexion des collègues de classes analogues à la nôtre. Il est essentiel, dans cette visée, de respecter les contraintes auxquelles eux-mêmes se voient confrontés. D'où, en particulier, le soin que nous mettons dans la suite à spécifier le déroulement de l'ensemble de l'enseignement du thème concerné, même si nous ne considérons pas que tous les paramètres ainsi spécifiés sont, dans le détail, didactiquement pertinents.

La question est donc la suivante : une action à la marge par rapport à l'enseignement classique, orientée par notre étude, peut-elle influencer sensiblement les raisonnements d'étudiants sur le champ électrique, pour les aspects analysés ici? La première chose est de choisir, à l'intérieur de ce domaine conceptuel déjà restreint, le ou les points sur lesquels portera l'effort.

Le programme comporte l'étude des conducteurs en équilibre et des condensateurs (voir annexe a, p 199-200). Compte-tenu de cela, c'est sur le champ électrique au voisinage d'un conducteur que nous avons choisi de faire travailler une pratique cohérente du principe de superposition, en relation plus spécifique avec les difficultés mises en évidence au chapitre 3.

Le volume horaire consacré à l'électrostatique est à peine plus important que celui que les professeurs utilisent d'habitude : il est de 13 à 15 heures environ pour l'ensemble du cours et des exercices, contre 10 à 13 heures chez divers collègues. La répartition cours/exercices/problèmes est indiquée dans le tableau suivant :

	1991-92	1992-93	1993-94	1994-95
Cours	6,75 h	7 h	7,6 h	8,3 h
Exercices	5,8 h	6,4 h (+ 1,25h en révision)	7,3 h	6,3 h
Devoirs surveillés	2 problèmes	2 problèmes	3 problèmes	3 problèmes
Devoirs à la maison	2 problèmes + 2 exercices	2 problèmes + 3 exercices	1 problème + 3 exercices	1 problème + 1 exercice
T.P informatisés	2 h	1,5 h	1 h	1 h

La division du cours en trois parties a été la même pour les quatre années scolaires :

E4 : Champ et potentiel électrostatiques.

E5 : Conducteurs en équilibre électrostatique.

E6 : Condensateurs.

Les plans de chaque cours ont été à peu près les mêmes pour les trois années. Ceux de 1993-94 sont en annexe a (p 202 à 208) . Les thèmes des exercices et problèmes et le détail de certains d'entre eux sont également fournis en annexe a (voir p 224 à 233).

Chaque année, les résultats de l'évaluation de cette intervention ont servi de base aux modifications de l'année suivante, aussi la description sera-t-elle entreprise chronologiquement.

La première intervention, réalisée au tout début de ce travail, fut très superficielle. Elle consista en l'insertion de quelques phrases-clefs à divers moments du cours (voir en annexe a p 209) . Celles-ci mentionnent l'éventuelle existence de charges extérieures au conducteur à propos des théorèmes classiques de l'électrostatique. ("E=0 à l'intérieur d'un conducteur en équilibre", théorème de Coulomb, expression de la pression électrostatique). Dès cette

première intervention, on s'est également attaché à ce que près de la moitié des exercices mette en oeuvre le principe de superposition.

Les résultats largement négatifs de cette intervention (en annexe à ce chapitre voir en particulier p 176 à 178) ont au moins le mérite de rappeler qu'en matière d'enseignement, les interventions appuyées de quelques déclarations ne suffisent pas.

Nous centrons la suite de ce chapitre sur les deux étapes suivantes de notre cheminement :

- "la deuxième intervention" : 1992-93
- "la troisième intervention" : 1993-94 et 1994-95.

Le lecteur pressé peut se diriger directement sur le compte-rendu de la troisième et dernière intervention où l'on rappelle les résultats de la seconde.

Nous terminons cette évaluation par une récapitulation (paragraphe IV de ce chapitre) qui rappelle les principales caractéristiques des interventions et les éléments d'évaluation dont nous disposons à leur propos. Une présentation synthétique (p 161 à 170) de ceux-ci sous forme de "profils conceptuels" de groupes expérimentaux et témoins sera proposée avant de conclure.

II. Deuxième intervention : 1992-1993.

A) Principes d'élaboration.

Les résultats de l'évaluation faite en 1991-92 montrent les insuffisances des actions purement déclaratives entreprises cette année-là. La complexité des concepts en cause dans le théorème de Coulomb ne permet pas, c'est du moins notre hypothèse au début de la seconde intervention, que l'étudiant parvienne de lui-même en un temps nécessairement réduit à une bonne maîtrise du domaine à partir de la seule démonstration du théorème. Nous avons donc choisi de traiter en cours, avec discussion de classe, la question soulevée dans le test "Coulomb" (et donc d'en choisir un autre pour l'évaluation). Ce traitement a été mené avec bien sûr un appel important et explicite au principe de superposition, mais en outre une attention plus spécifique qu'auparavant à l'obstacle de "la cause dans la formule". La situation d'un conducteur en présence de charges extérieures a été ainsi traitée en détail, avec analyse du champ et de ses sources en un point intérieur et au voisinage de la surface.

D'autre part, dans le cours sur les condensateurs, quelques remarques qualitatives à propos des diélectriques ont été ajoutées (voir en annexe a, p 217) afin que les étudiants ne pensent pas que les lois fondamentales de l'électrostatique dépendent de la nature du matériau.

Du point de vue de la méthode d'exposition, l'effet visuel a été renforcé par rapport à l'année précédente à l'aide d'assez nombreux schémas (comportant souvent des corps chargés

au voisinage du conducteur étudié), effets de couleur et superpositions de transparents pour illustrer l'effet des charges intérieures et extérieures au conducteur (voir en annexe a, p 209 à 216).

Enfin, le volume horaire a été un peu augmenté (10% environ), mais reste acceptable par rapport à la structure du programme de la classe.

Qu'en a-t-il été à l'intérieur des différents chapitres?

B) Aspects spécifiques de la séquence.

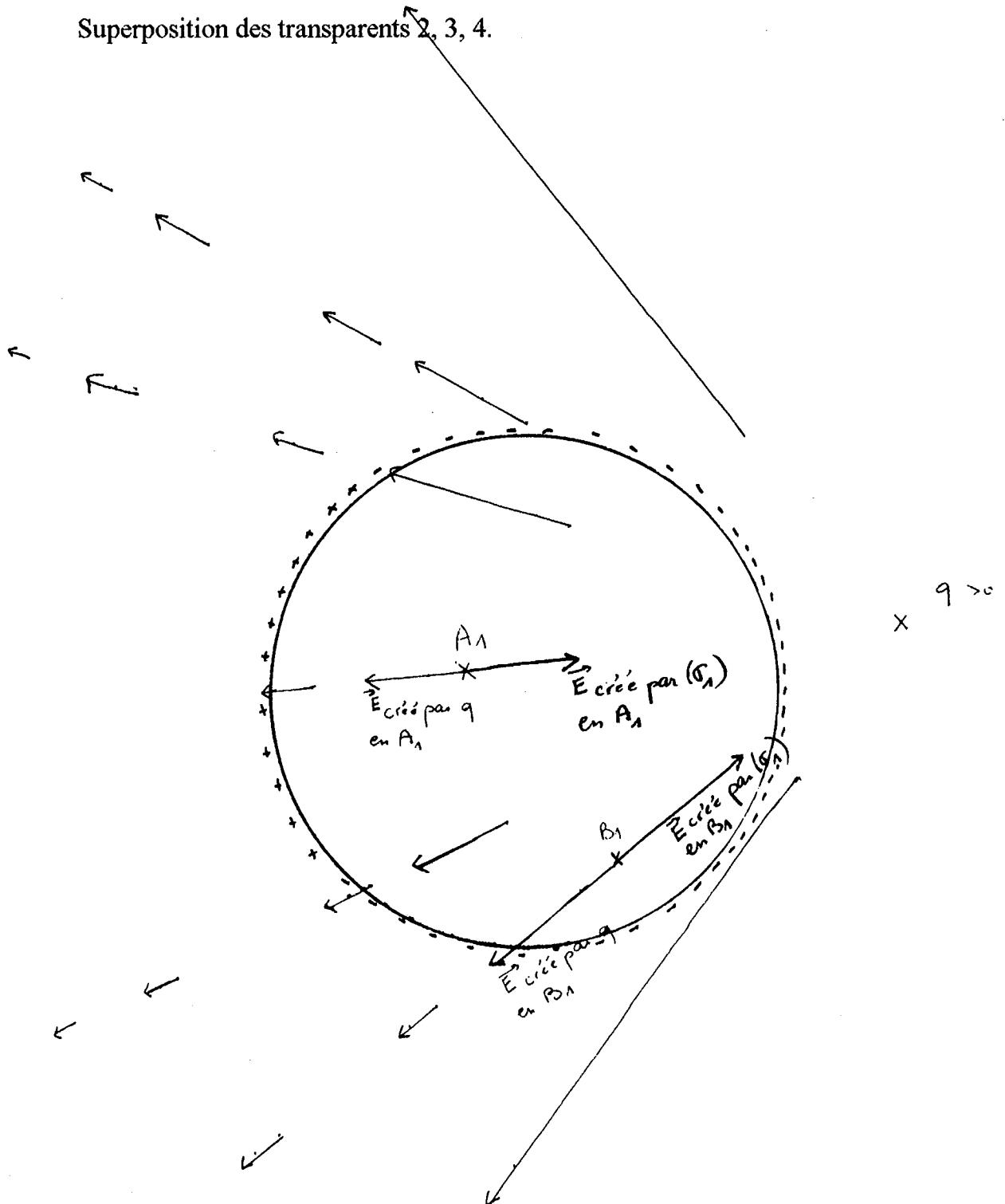
On en trouvera le détail en annexe a (p 209 à 217 pour le cours, p 224 à 233 pour les exercices) et ceux-ci peuvent se résumer ainsi :

*Le cours sur le champ et le potentiel électrostatiques (E4) n'a pas été modifié.

*Dans le cours sur les conducteurs en équilibre (E5), la principale modification a été une étude plus détaillée des sources du champ électrique à l'intérieur d'un conducteur.

Cette étude a été constituée d'une explication orale avec projection de transparents, puis d'une transcription au tableau (donc transcription par les étudiants sur leurs notes de cours). Elle consiste en une sorte de "bande dessinée" figurant les situations des charges et les valeurs des champs associés à l'intérieur du conducteur, pour diverses étapes d'un processus physique : une sphère chargée, d'abord seule dans l'espace, est de plus en plus perturbée par l'approche d'une charge extérieure (voir p 209 à 216). A titre d'exemple, nous reproduisons à la page suivante la superposition des transparents correspondant à l'une des situations d'équilibre considérées.

Superposition des transparents 2, 3, 4.



(σ_1) non uniforme à cause de l'influence de la charge q

$\vec{E}$ en $A_1 = \vec{0} = \vec{E}$ créé par (σ_1) en $A_1 + \vec{E}$ créé par q en A_1

$\vec{E}$ en $B_1 = \vec{0} = \vec{E}$ créé par (σ_1) en $B_1 + \vec{E}$ créé par q en B_1

Une étude analogue a été entreprise à propos du champ électrique au voisinage d'un conducteur (étude d'une situation d'équilibre où un conducteur sphérique est en présence d'une charge ponctuelle)

*Pour alléger le cours sur les condensateurs (E6), le calcul de la capacité du condensateur sphérique a été supprimé du cours et mis en exercice.

D'autre part, les diélectriques ne sont pas au programme en Spé T et on doit admettre la formule $C = \epsilon_r C_0$ donnant la capacité d'un condensateur contenant un diélectrique de permittivité relative ϵ_r (C_0 étant la capacité d'un condensateur identique, mais avec le vide entre les armatures). Cependant, quelques remarques qualitatives ont été ajoutées dans le cours à propos des diélectriques (voir en annexe a, p 217).

En ce qui concerne les thèmes d'exercices, il y a eu quelques changements mineurs :

Compte-tenu des difficultés des étudiants à propos des lignes de champ, (cf Törnkvist, Petterson, Tranströmer 1993) , un exercice sur les lignes de champ (voir texte p 226) a été posé, et nous avons à ce propos insisté sur le fait que si ces lignes correspondaient à un champ électrostatique, il y avait des charges sources quelque part, susceptibles de le créer.

- Au total, il y a eu 6 exercices sur 14 (au lieu de 5 sur 12 en 1991-92) faisant explicitement appel au principe de superposition (ou ayant trait aux sources du champ).

- De plus, en fin d'année, les étudiants ayant suivi l'intervention pédagogique ont demandé un problème de révision d'électrostatique, car ils considéraient cette partie comme "non évidente" (alors que ce sont d'autres parties du programme qui avaient été qualifiées comme telles en 1991-92)

Les changements introduits par cette intervention n'ont donc pas été massifs, ni dans les thèmes abordés, ni dans les volumes horaires correspondants. Si l'on en constate un effet appréciable, il faudra l'attribuer au seul traitement explicite de la situation d'un conducteur en présence de charges extérieures.

C) Evaluation de la deuxième intervention.

A la fin du cours d'électrostatique, trois questionnaires ont été proposés :

- "Le champ dans les fils".

- "Isolants".

- "Conducteur dans condensateur".

Les deux premiers tests n'étaient pas directement liés à l'intervention pédagogique, mais nous pouvions attendre une meilleure performance des étudiants du groupe expérimental vis à vis d'autres étudiants de scolarité analogue, à cause de l'insistance accordée en cours au fait que toute charge électrique crée un champ en tout point de l'espace et que si un champ existe

quelque part, il existe des charges qui en sont sources. Le troisième test a été imaginé spécifiquement pour l'évaluation de l'intervention pédagogique.

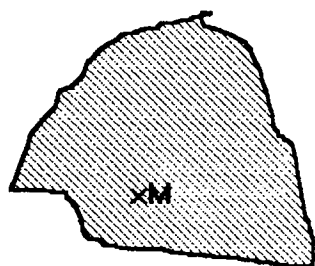
Le test "Le champ dans les fils" a été proposé également aux étudiants du groupe expérimental lors de l'intervention pédagogique suivante. On a pu constater, lors de l'analyse des réponses à ce questionnaire, que les étudiants n'avaient pas effectué de transfert de l'électrostatique à l'électrocinétique. Pour ce test, les résultats des groupes expérimentaux ayant suivi la deuxième ou la troisième intervention pédagogique ont été très voisins. C'est pourquoi nous les avons regroupé dans l'évaluation de la troisième intervention (p 152 à 157 de ce chapitre).

Nous nous attacherons donc dans ce qui suit aux questionnaires "Isolants" et "Conducteur dans condensateur".

1) "Isolants".

Ce test a été présenté dans le chapitre 2. On peut lire ci-dessous le rappel de l'énoncé et de la réponse correcte.

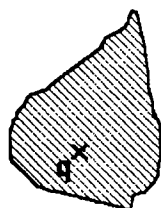
Question Q1



$\times q$

On considère un corps isolant et une charge ponctuelle q extérieure à ce corps. La charge q crée-t-elle un champ électrique en un point M intérieur au corps isolant?

Oui, non, pourquoi?

Question Q2 :

x
M

On considère une charge ponctuelle q située à l'intérieur d'un corps isolant. Cette charge crée-t-elle un champ électrique en un point M extérieur au corps isolant?

Oui, non, pourquoi?

La réponse correcte est "oui" aux deux questions, car toute charge électrique crée un champ électrique en tout point de l'espace.

Remarquons que le corps isolant se polarise lorsque la charge q est en son voisinage ou à l'intérieur, et le champ électrique total en M est la superposition du champ créé par la charge q et du champ dû à la polarisation de l'isolant.

Dans toute la suite les groupes expérimentaux seront notés "R" en abrégé (ce symbole "R" rappelant le nom du lycée Raspail où l'intervention pédagogique a été effectuée). Les résultats des étudiants R ont été comparés à ceux d'autres étudiants de niveau J (niveau défini page 20) : 20 étudiants en Spé P (Voir détail des échantillons p 40-41). Il est important de rappeler que ces étudiants n'ont pas eu de cours sur les diélectriques.

Question Q1 (q à l'extérieur et M dans l'isolant)

	N	Oui (réponse correcte)	Non	?
R (1992-93)	38	55%	45%	0%
autres J	20	55%	35%	10%

Le pourcentage de réponses correctes est le même pour les étudiants R et les autres J.

Dans les arguments cités par les R, il a été fait allusion à une superposition de champs, détaillée en cours dans le cas où la substance entourant M est un conducteur, avec parfois l'idée fausse qu'un isolant crée un champ nul (cf chapitre 2).

Exemple :

$$\vec{E}_M = \vec{E}_{\text{créé en } M \text{ par } \text{isolant}} + \vec{E}_{\text{créé en } M \text{ par } q}$$

$$\vec{E}_{\text{créé en } M \text{ par } q} \neq \vec{0}$$

$$\vec{E}_{\text{créé en } M \text{ par } \text{isolant}} = \vec{0}$$

car le corps est isolant."

Il arrive aussi que l'étudiant transforme l'énoncé en remplaçant l'isolant par le conducteur du cours : "Le champ électrique créé par la charge s'annule avec le champ électrique du conducteur: $\vec{E}_\sigma + \vec{E}_q = \vec{0}$

En dehors de ces traces de notre insistance sur le principe de superposition, les étudiants R ont eu des réponses semblables à celles des autres (voir chapitre 2) : l'isolant paraît être une barrière, ou bien il n'y a pas de champ car les charges ne peuvent pas bouger dans un isolant.

Question Q2 (q est dans l'isolant et M à l'extérieur)

	N	Oui (réponse correcte)	Non	?
R (1992-93)	38	29%	66%	5%
autres J	20	45%	35%	20%

Cette fois les étudiants R ont fourni moins souvent la réponse correcte. Plusieurs ont rapproché ce problème d'un exercice sur les écrans électriques traité en classe, et on retrouve alors l'idée "d'isolant barrière" : "Le champ d'une charge q dans un isolant est complètement atténué par celui-ci"

et : "cette charge q placée dans un corps isolant n'a aucune possibilité de s'exprimer, elle n'engendre donc pas de champ en M"

La difficulté liée à la matière n'a donc pas été dominée.

2) "Conducteur dans condensateur."

a) But du questionnaire.

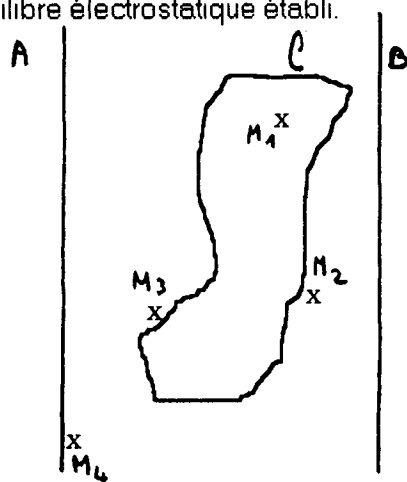
Ce test vise directement l'évaluation de l'intervention pédagogique. Il est centré sur les propriétés du champ électrique au voisinage d'un conducteur en équilibre ou à l'intérieur de ce conducteur, en présence d'un élément extérieur, ici un condensateur. On y demande de représenter les champs électriques régnant en divers points, et de trouver les sources de ces champs électriques. Le point dont la compréhension est visée est la généralité d'énoncés tels que celui du théorème de Coulomb, et "le champ électrique est nul à l'intérieur d'un

conducteur en équilibre", à concilier avec le principe de superposition y compris lorsque des charges extérieures sont présentes. En ce sens, ce questionnaire se situe dans la droite ligne de l'intervention, tout en présentant une situation très nouvelle.

b) Enoncé et réponse correcte.

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 en M_1, M_2, M_3, 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 $\vec{E}_4$?

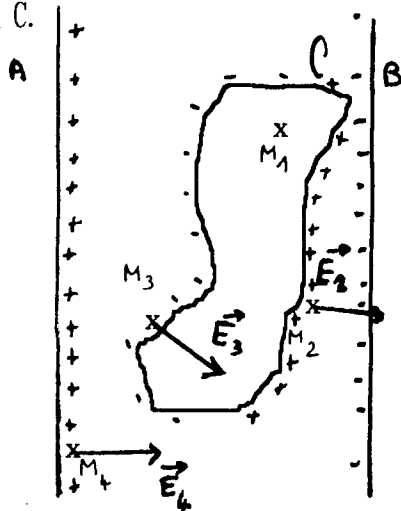
Réponse correcte : Introduit dans le condensateur, le conducteur C acquiert une densité surfacique de charge non uniforme à cause du phénomène d'influence. (La répartition des

charges sur les armatures A et B est également modifiée par influence : il y a influence mutuelle de A, B, C.)

En M_1 , $\vec{E}_1 = \vec{0}$ (M_1 est à l'intérieur d'un conducteur en équilibre.)

En M_2 , M_3 , M_4 , selon le théorème de Coulomb, $\vec{E}_i = \sigma_i \vec{n}_i / \epsilon_0$ ($\sigma_i > 0$ pour M_2 et M_4 , $\sigma_i < 0$ pour M_3 ; $\vec{n}_i$, vecteur normal à la surface considérée, unitaire, dirigé vers l'extérieur.)

Pour $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \vec{E}_4$, les sources du champ électrique sont toutes les charges du système : celles de A, B, C.



c) Conditions d'interrogation.

Ce test a été posé en questionnaire papier-crayon à des étudiants de niveau (J), ayant suivi ou non, l'intervention pédagogique décrite plus haut.

La durée de passation était d'environ 20 minutes.

Voici le détail des échantillons :

groupe expérimental : "R 1992-93" : SpéT, Raspail, Paris, décembre 92, (N=38).

groupes témoins : "autres SpéT" : SpéT, Nogent sur Oise, octobre 92, (N=33); SpéT, Lille, décembre 92, (N=74)

Les différentes classes des groupes expérimental et témoin étaient considérées par leurs professeurs comme "moyennes, plutôt pas très bonnes". Nous avons regroupé les différents groupes témoins sous la rubrique "autres Spé T".

Pour analyser les différences entre le groupe expérimental et les groupes témoins, nous avons effectué des calculs de " χ^2 ", rapportés dans l'annexe b (pages 234 à 263). Nous y ferons appel au cours de l'analyse des résultats.

d) Analyse des résultats.

Pour faire l'analyse des résultats, il sera plus clair de distinguer les questions portant sur le point M_1 (intérieur de C), le point M_4 (au voisinage d'une armature), les points M_2 et M_3 (à l'extérieur, au voisinage de C), car à chaque type de point ont été associés des arguments de type différent.

* Etude du champ en M_1 (à l'intérieur du conducteur) :

Valeur du champ en M_1 :

	N	$=\vec{0}$ (réponse correcte)	$\neq \vec{0}$	?
R (1992-93)	38	71%	13%	16%
autres Spé T	107	62%	30%	8%

La différence entre les taux de réponses correctes des "R 1992-93" et des "autres Spé T" n'est pas significative (voir en annexe b, p 240). De plus il y a un nombre assez important de non-réponses chez les étudiants R (16%). On ne peut donc pas parler d'effet positif de l'intervention.

Parmi les propositions de champs en M_1 non nuls, il y a eu principalement des champs de direction orthogonale aux armatures, comme si le conducteur épousait le comportement du condensateur. On peut interpréter ces réponses comme une superposition impropre, telle que: $\vec{E}_1 = \vec{E}_{\text{créé par le condensateur}} + \vec{0}_{\text{créé par le conducteur}}$. Cette erreur peut être rapprochée de la réponse " $\vec{E}_{\text{total}} = \sigma \vec{n} / \epsilon_0 + \vec{E}_q$ ", mise en évidence dans les tests "Coulomb" et "Coulomb bis".

Il y a eu aussi quelques (rares) réponses, telles que : " $\vec{E}_1 = -\vec{E}_4$ ", comme si $\vec{E}_1$ était créé par le conducteur uniquement.

Par ailleurs, si l'on présente à ces étudiants un conducteur seul dans l'espace, en équilibre, ils savent répondre que le champ à l'intérieur du conducteur est nul (100% de bonnes réponses à cette question, posée par écrit aux étudiants de la classe Spé T de Nogent sur Oise).

L'effet perturbateur du condensateur est donc ici très important, et les étudiants du groupe expérimental n'apparaissent pas mieux armés pour y résister.

Sources du champ en M1 :

	N	C,A,B réponse correcte	C	Condensa- teur A,B	Pas de source	autre réponse	Pas de réponse
R 1992- 93	38	5%	0%	2%	8%	8%	77%
autres Spé T	107	1%	12%	13%	10%	2%	62%

Les nombres de réponses correctes sont très faibles dans les deux échantillons, de ce fait le calcul de χ^2 n'est pas valide (voir annexe b, p 243).

Il y a un très grand nombre de non-réponses dans tous les échantillons et surtout dans R, ce qui peut témoigner d'une grande perplexité; on peut aussi associer ces non-réponses à la réponse "Pas de source" : certain étudiants pensent peut-être qu'ils n'ont pas besoin de répondre à la question "quelles sont les sources?", puisque le champ est nul.

Sur ce point encore, l'intervention pédagogique avec les transparents a eu peu d'effets.

* Etude du champ en M₄ (au voisinage d'une armature) :

Schéma en M₄ :

	N	Direction juste	Direction fausse	Pas de réponse
R (1992-93)	38	95%	5%	0%
autres Spé T	107	96%	3%	1%

On a pu observer des champs $\vec{E}_4$ dans la bonne direction (perpendiculaire aux armatures), mais avec un sens faux (les réponses correspondantes sont dans la colonne "direction juste"). Ceci n'entre pas dans les préoccupations de notre étude (et reste sans explication particulièrement évidente). Toujours est-il que la réponse correcte en termes de direction ne pose pratiquement aucun problème dans les deux échantillons.

Sources du champ en M_4 :

	N	A,B,C (réponse correcte)	A, B; C étant négligeable	A, B	A	Autre réponse	Pas de réponse
R (1992- 93)	38	0%	5%	50%	21%	3%	21%
autres Spé T	107	2%	7%	41%	20%	4%	26%

Les réponses des étudiants expérimentaux "R" sont ici à peu près identiques à celles des autres et le pourcentage de réponses correctes est trop faible pour que le calcul de χ^2 soit valide (voir en annexe b, p250).

On peut remarquer que pour presque la moitié des étudiants, dans les deux échantillons, le champ au voisinage d'une armature n'est créé que par les charges du condensateur. Tout se passe comme si le conducteur C n'existait pas!

Et dans chaque échantillon, un cinquième des étudiants pense que seules les charges au voisinage de M_4 (l'armature A) produisent le champ en M_4 , ce qui signifie que dans un problème aussi courant que le condensateur plan, avec le vide entre les plaques, ils n'envisagent pas le principe de superposition.

* Etude des champs en M_2 et M_3 (au voisinage du conducteur) :

Schéma en M_2 et M_3 :

Parmi les étudiants qui ont donné au champ électrique en M_3 la bonne direction, 50% lui ont donné un sens faux (le champ en M_3 est en fait un champ "rentrant", car $\sigma_3 < 0$). Nous considérons cette erreur comme non pertinente pour notre analyse.

Nous nous intéressons donc seulement à la direction du champ.

Dans le tableau suivant, la colonne "superposition incorrecte" correspond aux réponses où le schéma fait par l'étudiant montre un champ total, somme d'une composante perpendiculaire à C et d'une composante perpendiculaire aux armatures.

	N	Champ perpendi- culaire à C (réponse correcte)	Superpo- sition incorrecte	Champ perpendi- culaire aux armatures	Autre direction	Pas de réponse
R (1992- 93)	38	37%	39%	5%	5%	13%
autres Spé T	107	46%	14%	32%	3%	5%

Les différences entre les taux de réponses correctes des deux échantillons ne sont pas significatives (voir en annexe b, p 253).

D'assez nombreux étudiants ont dessiné un champ perpendiculaire aux armatures, de nouveau comme si le conducteur C n'existait pas. On constate que les étudiants R font beaucoup moins que les autres cette erreur, qui consiste à ignorer le rôle du conducteur (5% contre 32%).

Mais corrélativement dans l'échantillon expérimental "R" il y a un pourcentage élevé (39%) de dessins avec une addition de vecteurs, corroborant ce qui a été vu page 69 à propos des tests "Coulomb " et "Coulomb bis" : tout se passe comme si le champ total était la somme d'un champ orthogonal à C qui serait produit par C et d'un champ orthogonal aux armatures qui serait produit par A,B. C'est ce que nous retrouverons en étudiant les sources des champs en M_2 et M_3 .

Les sources des champs en M_2 et M_3 :

Dans le tableau suivant, la colonne "réponse correcte" correspond aux réponses telles que "A, B, C sont les sources" ou " $\vec{E}_{total} = \vec{E}_{créeparA} + \vec{E}_{créeparB} + \vec{E}_{créeparC}$ " ou à un schéma montrant cette superposition (la direction du champ total étant juste ou non).

Dans une autre colonne, C^+ et C^- sont des notations utilisées par les étudiants pour désigner la partie de la surface de C qui est chargée positivement (C^+) ou négativement (C^-).

	N	réponse correcte	C	A, C ou B, C ou B, C^+ ou A, C^-	A ou B ou A,B	autre réponse	Pas de réponse
R 1992- 93	38	42%	24%	5%	0%	3%	26%
autres Spé T	107	21%	9%	14%	14%	2%	41%

Cette fois, les étudiants R mentionnent l'ensemble des sources plus souvent que les autres. Certains n'ont pas répondu explicitement à la question des sources, mais ont fait une superposition graphique. Cette superposition est parfois traduite au niveau des formules, ainsi on peut lire : " $\vec{E}_{total} = \sigma\vec{n} / \epsilon_0 + \vec{E}_{créeparlecondensateur}$ ", alors que la formule juste $\vec{E} = \sigma\vec{n} / \epsilon_0$ a été écrite aussi.

Il y a eu un indice de superposition en commentaire, dessin ou formule chez 44% des étudiants R et 21% des autres Spé T. La différence entre les deux échantillons est significative (voir annexe b, p 257).

Remarquons pourtant que, pour les champs en M_2 et M_3 , une bonne compréhension du principe de superposition et du théorème de Coulomb se manifeste par un schéma correct et une reconnaissance correcte des sources. Cela n'a été réalisé que par 5% des étudiants R et 7% des autres Spé T. Ces faibles pourcentages rejoignent à peu près les 10% de réponses correctes au test "Coulomb" pour les étudiants J.

e) Conclusion sur la deuxième intervention (1992-93)

L'accent mis dans le cours et les exercices sur le principe de superposition a permis aux étudiants expérimentaux "R" d'envisager plus souvent (42%) que les autres (21%) toutes les sources du champ électrique : A, B, C.

En revanche, il n'y a pas d'amélioration par rapport aux classes-témoins quant à la compréhension du théorème de Coulomb : " $\sigma\vec{n} / \epsilon_0$ " est vu par beaucoup comme la valeur du champ créé par le conducteur : l'obstacle causal lié à la formule reste très fort.

L'intervention pédagogique a en quelque sorte provoqué une déstabilisation sans stabilisation ultérieure : le problème a été "vu" par une bonne partie des étudiants R, mais mal traité en ce qui concerne le champ total. Pour certains étudiants R, il semble que des schémas de superposition faits au tableau, il ne reste que des additions de vecteurs où les différentes composantes et le champ total se confondent. La direction, la valeur particulières du champ total ont été oubliées. Il se peut que l'insistance sur l'effet visuel de la superposition ait favorisé une addition impropre telle que " $\vec{E}_{total} = \sigma\vec{n} / \epsilon_0 + \vec{E}_{condensateur}$ ".

Cette déstabilisation est analogue à celle qu'a observée A.Benseghir (1989) au cours de son intervention pédagogique. Celui-ci a remarqué en effet qu'une déstabilisation du raisonnement naturel, grâce à une intervention pédagogique basée sur des recherches didactiques, n'aboutit pas toujours à l'acquisition d'un raisonnement correct : "Selon la classe et la situation considérées, un nombre plus ou moins appréciable d'élèves délaissent le raisonnement naturel mis en cause sans acquérir pour autant une compétence dans le traitement des situations du type étudié; ces élèves en reviennent alors à un autre mode de raisonnement naturel, se confinent dans l'explication verbale ou manifestent, en produisant des réponses incohérentes ou non justifiées, une grande confusion vis-à-vis du sujet traité."

Cette déstabilisation est ici un résultat important, mais elle montre que l'intervention pédagogique doit être modifiée pour parvenir à une meilleure remédiation au niveau des difficultés considérées.

III. Troisième intervention : 1993-94 et 1994-95

A) Principes d'élaboration.

L'évaluation de l'intervention pédagogique menée en 1992-93 montre qu'aux prix d'un léger additif à un cours "classique", tel qu'il a été décrit dans l'analyse de manuels, le principe de superposition peut être nettement mieux assimilé par les étudiants dans le sens d'une meilleure prise en compte de l'ensemble des sources. Par contre cette intervention n'a pas apporté de remédiation quant à la compréhension du théorème de Coulomb : la densité surfacique de charge locale σ n'est pas comprise comme résumant l'action de toutes les charges.

Aussi de nouvelles modifications ont-elles été faites, essentiellement afin de travailler plus en profondeur au niveau de l'obstacle de "la cause dans la formule", lié au théorème de Coulomb, et dont l'achèvement de notre enquête sur les raisonnements montrait toute l'importance.

L'analyse que nous avons menée dans cette enquête montre plus largement l'importance décisive des raisonnements impliquant des causes et des effets. Souvent ceux-ci conduisent à restreindre l'analyse systémique, car ils se limitent à enchaîner des maillons du type "une cause $\Rightarrow$ un effet". Mais la deuxième intervention montre déjà que, pour autant que l'obstacle lié à la mobilité des charges soit absent, les étudiants accèdent relativement facilement à l'idée de superposition : plusieurs causes pour un champ résultant. Reste à dominer l'obstacle associant des formules ($\vec{E} = \sigma \vec{n} / \epsilon_0$) ou des énoncés ("le champ électrique est nul à l'intérieur d'un conducteur en équilibre") à l'idée de responsabilité exclusive : une grandeur ou un objet mentionnés (le conducteur et/ou ses charges) dans la formule ou l'énoncé sont alors improprement considérés comme seules sources du champ dont on parle.

Ainsi d'une part nous avons insisté sur la présence de charges extérieures au conducteur étudié, en représentant systématiquement des corps chargés au voisinage de celui-ci. d'autre part et surtout l'idée qui a mûri tout au long de cette étude est de mettre en oeuvre des raisonnements mettant l'accent, eux aussi, sur la causalité, mais dans un registre plus complet. Ainsi le double effet d'une charge au voisinage d'un conducteur a été illustré à propos de modifications de situations (plusieurs exemples en cours (voir annexe a, p 222) ou en exercices (p 227) , avec discussion dans la classe). Il ne s'agit plus seulement d'une charge extérieure présente mais d'une charge qu'on déplace ou dont on change la valeur, avec une demande d'analyser "ce qui va changer". La modification d'une situation, plutôt que la comparaison de deux situations, est favorable à une perception en termes "agent-effet" (voir à ce sujet les travaux de S.Fauconnet : 1981). Le temps employé dans la question "Qu'est-ce qui va changer?" est celui du raisonnement linéaire causal (voir l'introduction et Rozier 1987) et rentre donc en résonance avec l'analyse commune des liens de causalité. L'hypothèse faite pour cette troisième intervention pédagogique est qu'il est profitable d'utiliser cette forme de raisonnement pour donner du relief, vis à vis des étudiants, à chacun des effets d'une charge extérieure : l'effet direct et l'effet d'influence. Autrement dit, l'idée est de retenir le "causal" tout en échappant au "linéaire". Une fois ce dédoublement d'effets admis, l'enseignement peut probablement mettre plus efficacement en oeuvre ses outils habituels, et ceux déjà un peu plus sophistiqués des interventions pédagogiques précédentes.

Rappelons à ce propos que, comme dans l'intervention précédente, nous utilisons l'effet visuel (schémas colorés, transparents). Cet effet visuel a été renforcé dans cette dernière intervention

- pour mieux distinguer le champ total et ses diverses composantes (ainsi les schémas du champ total seul ont été nettement séparés des schémas de décomposition)
- pour associer une grande diversité de distributions de charges ou de situations aux énoncés classiques (conditions de passage, nullité du champ électrique à l'intérieur d'un conducteur en équilibre, théorème de Coulomb), contrairement à l'usage qui consiste à représenter le plus souvent le conducteur seul dans l'espace.

L'intervention pédagogique de 1994-95 a été identique à celle de 1993-94, excepté pour le choix de certains exercices et problèmes, mais ceux-ci ont gardé le même esprit.

Par rapport aux années antérieures, le volume horaire a un peu augmenté en 1993-94, mais faiblement (d'environ 10%) pour décroître en 1994-95. Nous regroupons ces deux dernières années sous le label "Troisième intervention".

B) Modifications des aspects spécifiques de la deuxième (1992-93) à la troisième (1993-94 et 1994-95) intervention.

Le cours est resté presque inchangé, mis à part deux additifs qui sont décrits dans le détail, en annexe a, p 218 à 222. Nous en donnons ci-dessous les principaux éléments.

***Cours sur le champ et le potentiel électrostatiques (E4) :**

La démonstration des conditions de passage du champ électrique à la traversée d'une surface chargée a été accompagnée de schémas, présentant une multiplicité de sources (y compris des circuits électriques) pour les champs électriques régnant dans les deux demi-espaces définis par la surface chargée.

***Cours sur les conducteurs en équilibre (E5) :**

Au cours de la démonstration du théorème de Coulomb, on indique par un premier schéma que le conducteur n'est pas forcément seul dans l'espace et que la densité surfacique de charge n'y est pas forcément uniforme.

L'exemple d'une sphère conductrice en présence d'une charge ponctuelle a de nouveau été utilisé. Pour ne pas risquer d'induire des confusions entre le champ électrique total et ses diverses composantes, le premier schéma n'a représenté que le champ total.

Un deuxième schéma a représenté le champ créé par la charge ponctuelle en un point au voisinage de la sphère et les étudiants ont été invités à représenter le champ créé par le conducteur.

Puis l'étude a été poursuivie avec une modification de situation par déplacement de la charge ponctuelle, et une recherche des divers champs électriques dans la nouvelle situation d'équilibre; la question posée étant "Qu'est-ce qui va changer?", avec discussion de l'ensemble de la classe. Une situation analogue a été reprise en exercice en modifiant la valeur de la charge q sans modifier sa position.

*Dans le cours sur les condensateurs (E6), il n'y a quasiment pas eu de changement mais la partie "Rappels sur le phénomène d'influence" a été un peu plus développée.

En ce qui concerne les exercices, il y a eu quelques changements :

En 1993-94, 13 exercices ont été cherchés en classe dont 6 nécessitant l'emploi du principe de superposition (ce qui fait à peu près la même proportion que les années précédentes.)

L'exercice n°5 E5 (dont le texte figure en annexe a, p 228) a repris l'étude faite en cours à propos du théorème de Coulomb : il a fortement déconcerté certains étudiants qui, de prime abord pensaient qu'un champ $\vec{E}$ tangent au conducteur était impossible. Bien entendu cette situation était possible car $\vec{E}$ désignait ici le champ créé par le conducteur, qui peut avoir une direction quelconque, contrairement au champ total, toujours normal au conducteur.

L'exercice n°1 E5 (dont le texte figure en annexe a, p 227) était comparable au changement de situation étudié en cours, on y modifiait la valeur de la charge ponctuelle située près du conducteur. L'étudiant envoyé au tableau a dit que le champ créé par le conducteur n'était pas modifié, mais certains de ses camarades n'étaient pas d'accord. il y a donc eu discussion, jusqu'à ce que tous reconnaissent qu'il ne fallait pas oublier la modification du phénomène d'influence due à la modification de la charge q .

De plus, dans les sujets de problèmes, nous avons introduit une explication de texte (dont le texte figure en annexe a, p 229-230), afin de conduire les étudiants à explicitier le rôle des différentes charges dans le phénomène d'influence et leurs contributions aux différents champs.

D'autre part tout au long de l'étude de l'électromagnétisme, avec plus d'insistance que dans les interventions précédentes, les expressions telles que "le champ du conducteur" ont été bannies et les étudiants ont été encouragés à dire précisément : "le champ créé par... en tel point" ou " le champ total qui règne en tel point". Le "champ du conducteur" est en effet une expression ambiguë et qui fait penser que le champ est une propriété du conducteur (comme "la force de l'objet" en mécanique : voir Viennot 1977).

C) Evaluation de la troisième intervention.

L'évaluation de l'intervention pédagogique a de nouveau été menée à l'aide du test "Conducteur dans un condensateur", ce qui permet une comparaison avec les résultats de 1992-93.

Pour analyser la possibilité de transfert sur un sujet qui n'appartient pas au domaine des conducteurs en équilibre, mais à celui de l'électrocinétique, les étudiants expérimentaux "R" ont également répondu aux questions du test "Le champ dans les fils". Nous n'avons pas repris le test "Isolants" pour des raisons conjoncturelles (manque de temps).

Nous commencerons l'étude de l'évaluation par quelques éléments d'appréciation qualitative.

1) Quelques éléments d'appréciation qualitative.

En-dehors du test "Conducteur dans condensateur", l'effet de l'intervention pédagogique peut être caractérisé qualitativement par une prise de conscience des difficultés (après les cours ou exercices, il y a eu de nombreuses demandes d'explications autour du théorème de Coulomb), et par un recours fréquent et spontané des étudiants à la superposition, même devant des problèmes totalement nouveaux (exemple : champ magnétique total nul dans un supraconducteur, créé par le supraconducteur et l'extérieur).

De plus, les réponses à un devoir à la maison (voir texte en annexe a, p 229-230), à un devoir surveillé de 1993-94 (voir texte en annexe a, p 231-232), et à un devoir surveillé de 1994-95 (voir texte en annexe a, p 232-233), ont été analysées. Les quelques remarques qui figurent à ce propos en annexe a, p 223-224 tendent à montrer qu'un mois après le test "Conducteur dans condensateur", les difficultés liées au théorème de Coulomb et en particulier aux sources du champ électrique $\sigma \vec{n} / \epsilon_0$ subsistent chez de nombreux élèves. Par contre une superposition "simple", consistant à écrire, lorsqu'il y a deux distributions de charges sources de même type (par exemple : deux sphères (voir texte en annexe a, p 232-233) ou deux charges ponctuelles) que le champ électrique total est la somme des champs électriques créés par les deux distributions, ne semble poser aucun problème aux étudiants.

En outre, après le test "Conducteur dans condensateur", les étudiants R 1993-94 ont eu à répondre aux questions suivantes :

"Que pensez-vous du cours (et des T.D et problèmes) d'électrostatique de cette année? Qu'est-ce qui vous a surpris? Qu'est-ce qui vous a paru difficile?"

Dans l'ensemble, le cours a paru abstrait et plus difficile que les autres parties du programme (L'électronique, la thermodynamique, la thermochimie, la cinétique chimique avaient été étudiées préalablement).

Voici quelques commentaires symptomatiques :

"Les parties difficiles selon moi sont : 1) Les sources du champ 2) Les notations $V_{\text{créé par...}}$ idem pour $\vec{E}$ "

"Le cours d'électrostatique est pour l'instant celui que j'ai le plus de mal à comprendre cette année en physique. L'esprit à avoir pour résoudre les problèmes est assez particulier et nouveau."

Ceci rejoint notre première remarque sur la prise de conscience des difficultés chez les étudiants.

2) Questionnaire "Conducteur dans un condensateur".

L'énoncé et la réponse correcte ont été donnés p 130-131.

a) Détail des échantillons.

groupes expérimentaux : "R 1992-93" : SpéT, Raspail, Paris, décembre 1992, (N=38),

"R 1993-94" : SpéT, Raspail, Paris, décembre 1993, (N=34),

"R 1994-95" : SpéT, Raspail, Paris, décembre 1994, (N=39)

groupes témoins : "autres SpéT" : SpéT, Nogent sur Oise, octobre 92, (N=33),

SpéT, Lille, décembre 92, (N=74).

"M" : Spé M, Condorcet, Paris, février 1994, (N=39).

En ce qui concerne les "performances scolaires générales" (moyennes annuelles dans toutes les matières) celles des R de 1993-94 et 1994-95 sont à peu près équivalentes à celles des R de 1992-93. Nous rappellerons systématiquement les résultats, pour ce test, des "R 1992-93" et des "autres Spé T", dont nous avons déjà parlé au cours de l'évaluation de la deuxième intervention pédagogique.

Pour ce qui est des groupes témoins, les "autres Spé T" sont de niveau scolaire global équivalent aux étudiants expérimentaux, mais les M' sont des étudiants de niveau général très supérieur. Ils sont un très bon reflet de l'enseignement classique, dont ils assimilent les contenus beaucoup plus facilement que la moyenne des étudiants.

b) Résultats.

Comme en 1992-93, compte-tenu des arguments utilisés, les résultats seront analysés pour le point M₁, puis le point M₄, puis les points M₂, M₃. On étudiera aussi la prise en compte du phénomène d'influence.

* Etude du champ en M_1 (à l'intérieur du conducteur) :

Valeur du champ en M_1 :

	N	$=\vec{0}$ (réponse correcte)	$\neq \vec{0}$	?
R (1994-95)	39	87%	13%	0%
R (1993-94)	34	88%	12%	0%
R (1992-93)	38	71%	13%	16%
autres Spé T	107	62%	30%	8%
M'	39	85%	10%	5%

Les réponses donnant un champ non nul en M_1 consistent toujours en un champ perpendiculaire aux armatures : celui qui serait créé par le condensateur en l'absence de C. Elles contredisent le résultat du cours : " $\vec{E} = \vec{0}$ à l'intérieur d'un conducteur en équilibre" et peuvent même être données par de "très bons" étudiants : 10% des M'.

On peut constater que les "R 1994-95" et les "R 1993-94" ne présentent pas de différence significative (voir annexe b, p 237). Le pourcentage de réponses fausses est le même qu'en 1992-93, mais en 1993-94 et 1994-95 il n'y a plus d'indécis et le pourcentage de réponses correctes est plus élevé qu'en 1992-93.

La différence entre les "R 1993-94" ou "R 1994-95" et les "autres Spé T" est hautement significative (voir p 238-239), elle peut sans doute être attribuée à l'intervention pédagogique. Quant à la différence hautement significative (voir p 240) entre les M' et les "autres Spé T", elle est à attribuer au niveau scolaire nettement supérieur des M'. Ainsi la troisième intervention pédagogique a tout juste mis les étudiants expérimentaux de 1993-94 et 1994-95 au "niveau naturel" des M'.

Les sources du champ en M_1 :

	N	C, A, B réponse correcte	C	Con- densa- teur	Pas de source	Autre réponse	Pas de réponse
R 1994- 95	39	28%	10%	15%	8%	0%	39%
R 1993- 94	34	20%	0%	9%	15%	3%	53%
R 1992- 93	38	5%	0%	2%	8%	8%	77%
autres Spé T	107	1%	12%	13%	10%	2%	62%
M'	39	5%	10%	0%	10%	0%	75%

La différence entre les "R 1994-95" ou les "R 1993-94" et les "autres SpéT" est très hautement significative et la différence entre les "R 1994-95" et les M' ou les "R 1992-93" est hautement significative (voir annexe b, p 241 à 243), ceci tend à montrer une certaine efficacité de la dernière intervention pédagogique du point de vue des objectifs visés.

Si on groupe les résultats aux deux questions concernant le champ en M_1 (valeur du champ, sources du champ) on obtient comme réponses correctes :

28% pour R 1994-95

20% pour R 1993-94

5% pour R 1992-93

1% pour les autres Spé

0% pour les M'.

On peut donc noter en 1993-94 et encore plus en 1994-95 chez les étudiants R un pourcentage de réponses correctes nettement supérieur à celui des autres échantillons (y compris les R de 1992-93). Toutefois ce pourcentage reste faible et près de la moitié des étudiants ne répondent pas à la question, pensant probablement qu'il est inutile de parler des sources du champ, lorsque celui-ci est nul.

De plus, malgré l'insistance apportée en cours au fait que différentes sources contribuent au champ nul à l'intérieur du conducteur, il y a encore de 8 à 15% des R de 1993-94 ou 1994-95 qui affirment : "puisque le champ est nul, il n'y a pas de sources."

* Etude du champ en M_4 (au voisinage d'une armature) :

Schéma en M_4 :

	N	Direction juste	Direction fausse	Pas de réponse
R (1994-95)	39	87%	13%	0%
R (1993-94)	34	91%	9%	0%
R (1992-93)	38	95%	5%	0%
autres Spé T	107	96%	3%	1%
M'	39	100%	0%	0%

Le pourcentage de réponses correctes est très élevé ce qui rend les calculs de χ^2 non valides (voir annexe b, p 244).

Les réponses fausses correspondent à l'addition d'un champ perpendiculaire aux armatures qui serait créé par le condensateur et d'un champ qui serait créé par C, dirigé approximativement du bas de C vers M_4 . Elles ont été données surtout par les R de 1993-94 et 1994-95, mais malgré tout par un petit nombre d'étudiants, peut-être obnubilés par les schémas d'additions de vecteurs du cours et en tout cas alertés d'un problème que les autres échantillons d'étudiants ont pu ignorer totalement, comme le montre le tableau suivant.

Sources du champ en M_4 :

	N	A, B, C réponse correcte	A, B; C étant né- gligeable	A, B	A	Autre réponse	Pas de réponse
R (1994-95)	39	31%	13%	18%	13%	5%	20%
R (1993-94)	34	18%	23%	15%	18%	3%	23%
R (1992-93)	38	0%	5%	50%	21%	3%	21%
autres Spé T	107	2%	7%	41%	20%	4%	26%
M'	39	0%	28%	41%	8%	5%	18%

La différence entre les résultats des "R 1993-94" et "R 1994-95" n'est pas significative (voir annexe b, p 247). En revanche la différence entre les "R 1994-95" et les "R 1992-93" ou les "autres SpéT" ou même les M' est très hautement significative (voir p 248), ce que l'on peut vraisemblablement imputer à cette troisième intervention pédagogique.

Si on groupe les résultats concernant les deux questions à propos du champ en M_4 , (direction du champ, sources du champ), on obtient comme pourcentages de réponses correctes :

23% pour R 1994-95

12% pour R 1993-94

0% pour R 1992-93

2% pour les autres Spé T

0% pour les M'.

Ces pourcentages sont tous faibles mais ceux des R 1993-94 et encore plus des R 1994-95 sont nettement meilleurs que les autres.

Certains étudiants (environ le quart des R 1993-94 et des M') disent explicitement qu'en M_4 , le champ créé par C est négligeable, ou disent de façon plus vague : " M_4 est loin de C, donc C n'intervient pas". Ceci peut être à la limite considéré comme une bonne réponse, mais aussi comme une façon d'esquiver la difficulté.

De plus, il reste 18% des R de 1993-94 et 13% des R 1994-95 qui citent A comme seule source du champ en M_4 : la charge du conducteur à proximité de M_4 est vue comme seule source et donc le problème du condensateur plan n'est pas compris par ces étudiants. On

retrouve à peu près ce pourcentage dans toutes les classes de Spé T. En revanche les étudiants de Spé M' font rarement cette erreur.

* Etude des champs en M_2 et M_3 (au voisinage du conducteur) :

Schéma en M_2 et M_3 :

Les différentes catégories de réponses ont été définies p 135.

	N	Champ perpendi- culaire à C (réponse correcte)	Superpo- sition incorrecte	Champ perpendi- culaire aux armatures	Autre direction	Pas de réponse
R 1994-95	39	67%	31%	0%	0%	2%
R 1993-94	34	56%	35%	3%	6%	0%
R 1992-93	38	37%	39%	5%	5%	13%
autres Spé T	107	46%	14%	32%	3%	5%
M'	39	72%	26%	0%	2%	0%

La différence entre les "R 1994-95" et les "R 1992-93" ou les "autres Spé T" est très hautement significative (voir annexe b, p 251-252), ce qu'on doit probablement imputer à la troisième intervention pédagogique (les diverses classes étant de même niveau scolaire). La différence entre les M' et les "R 1992-93" est hautement significative (voir p 253), la différence entre les M' et les "autres Spé T" est significative (voir p 254), ceci est probablement dû à la différence de niveau scolaire global déjà signalée entre les M' et les autres classes.

Les sources des champs en M_2 et M_3 :

Les différentes catégories de réponses ont été définies p 136.

	N	Répon -se correcte	C	A, C ou B, C ou B,C ⁺ ou A, C ⁻	A ou B ou A, B	Autre réponse	Pas de réponse
R 1994-95	39	59%	8%	8%	0%	5%	20%
R 1993-94	34	62%	3%	12%	12%	8%	3%
R 1992-93	38	42%	24%	5%	0%	3%	26%
autres Spé T	107	21%	9%	14%	14%	2%	40%
M'	39	36%	31%	5%	5%	5%	18%

Ce tableau met en évidence une différence significative entre les "R1994-95" et les M' (voir annexe b, p 255), malgré la différence de niveau scolaire global. On observe également des différences très hautement significatives entre les "R 1994-95" ou "R1993-94" et les "autres SpéT" (voir p 255, 256), c'est à dire entre des classes de niveau scolaire équivalent ayant suivi la troisième intervention pédagogique ou n'ayant suivi aucune intervention.

Si on groupe les réponses aux deux questions concernant les champs en M_2 et M_3 (directions des champs, sources des champs), on obtient comme pourcentages de réponses "totalement correctes" :

36% pour les R 1994-95

27% pour les R 1993-94

5% pour les R 1992-93

7% pour les autres Spé T

10% pour les Spé M'.

Par rapport aux R de 1992-93, les R de 1993-94 et 1994-95 donnent plus souvent une réponse correcte à propos de la direction du champ (le pourcentage de schémas corrects en 1994-95 atteint presque celui des M' : 67% contre 72%), et le pourcentage de réponses "totalement correctes" pour $(\vec{E}_2, \vec{E}_3)$ est aussi le plus élevé pour les R 1993-94 et 1994-95.

L'intervention pédagogique paraît avoir permis à environ un quart des étudiants de bien intégrer dans ce problème les concepts d'influence et de superposition à travers le théorème de Coulomb.

D'ailleurs on a pu relever uniquement dans cet échantillon quelques commentaires très clairs accompagnant des réponses "totalement correctes", tels que : *"Le théorème de Coulomb nous indique que le champ $\vec{E}$ est perpendiculaire à la surface. Ce champ est résultant de toutes les charges de l'Univers, c'est à dire que la densité surfacique de charge qui se situe sur le conducteur à l'équilibre a tendance à se modifier suivant les charges qui peuvent être dans l'Univers."* On a pu aussi relever des schémas de superposition correcte avec un champ total perpendiculaire au conducteur, un champ créé par le condensateur perpendiculaire aux armatures et un champ créé par le conducteur déduit par différence de ces deux champs.

Dans les autres échantillons, les schémas corrects n'impliquent pas forcément une bonne compréhension de la situation (ainsi pour les M' il y a eu 72% de schémas corrects mais seulement 10% de réponses "totalement correctes".)

De plus, dans certains commentaires, il est dit que le condensateur a un rôle d'influence : "il induit des charges + et - sur C", mais ensuite C est vu comme seule source du champ $\sigma\vec{n} / \epsilon_0$: on retrouve une erreur faite fréquemment dans le test "Coulomb", qui est probablement due ici encore à l'obstacle lié à une lecture causale de la formule $\sigma\vec{n} / \epsilon_0$.

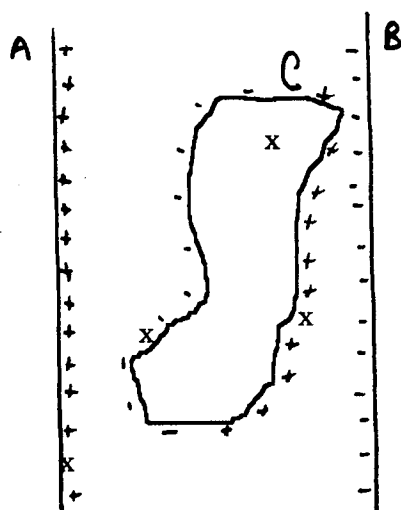
On observe aussi que les R mentionnent beaucoup les multiples sources du champ que les autres étudiants et mettent souvent en oeuvre le principe de superposition. Mais en 1992-93, cette superposition était mal intégrée dans le théorème de Coulomb (seulement 5% de réponses "totalement correctes"). En 1993-94 et 1994-95, le pourcentage d'étudiants pensant à la superposition mais dessinant mal le champ total est à peu près le même qu'en 1992-93 (39% en 1992-93; 35% en 1993-94, 31% en 1994-95), il reste plus élevé que pour les autres

Spé T et les M'; mais il y a nettement plus d'étudiants qui donnent une réponse "totalement correcte".

De plus, on remarque que la réponse équivalente à " $\vec{E}_{2total} = \sigma_2 \vec{n} / \epsilon_0 + \vec{E}_{créé\ par\ le\ condensateur}$ " existe chez 26% des étudiants d'une "très bonne classe" (M'), il s'agit donc d'une difficulté largement partagée.

* Phénomène d'influence.

On peut évaluer le pourcentage d'étudiants prenant en compte ce phénomène, en recherchant les étudiants qui l'ont mentionné dans leurs explications ou qui ont fait un schéma du type :



Ainsi, les résultats sont les suivants :

	N	Prise en compte de l'influence
R (1994-95)	39	59%
R (1993-94)	34	50%
R (1992-93)	38	21%
autres Spé T	107	20%
M'	39	77%

Les résultats des R 1993-94 et 1994-95 sont voisins (pas de différence significative : voir annexe b, p 258) et nettement supérieurs à ceux des R 1992-93 et des autres SpéT (différences hautement ou très hautement significatives : voir p 258 à 260). Les résultats des "R 1994-95" ne présentent pas de différence significative avec ceux des M' (voir p 259).

*** Sur l'ensemble du test "Conducteur dans condensateur".**

Si on examine toutes les questions du test, seuls 4 étudiants R 1993-94, 4 étudiants R 1994-95, 1 étudiant parmi les autres Spé T, ont répondu entièrement juste (en considérant comme juste en M_4 , l'argument équivalent à : "l'action de C est négligeable, les sources du champ en M_4 sont donc A et B). En ce qui concerne les 4 derniers étudiants R, ils semblent avoir acquis une certaine maîtrise à propos des sources du champ, car ils ont répondu de façon globale : "*Les sources de $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \vec{E}_4$ sont toutes les charges existantes, c'est à dire celles de A, B, C ou toutes les charges de l'univers*".

Notons aussi à propos de ce test quelques éléments d'appréciation qualitative.

Les réactions des R 1993-94 et 1994-95 à la correction du test ont été plus nombreuses que l'année précédente et significatives d'un intérêt certain, peut-être d'une importante prise de conscience de la difficulté. Ainsi, à propos du champ total certains ont dit : "*C'est vrai, on a déjà fait cette erreur, on a vu cela en cours*". (réaction observée aussi lors de la correction des exercices n° 1 et 5 du chapitre E5, dont le texte figure en annexe a, p 227-228).

En outre, certains étudiants ont voulu aller plus loin et ont proposé des questions supplémentaires pour approfondir leur compréhension ou pour s'assurer de celle-ci :

"Et si on ajoutait une charge q' à l'extérieur du condensateur? Serait-elle aussi source d'un champ en M_1, M_2, M_3, M_4 ?" (q' est une source de champ supplémentaire, mais le champ en M_1 est toujours nul, et les directions des champs en M_1, M_2, M_3, M_4 sont toujours les mêmes.)

"Et en M_5 à l'intérieur du condensateur, mais pas au voisinage des armatures, ni au voisinage de C que peut-on dire du champ?" (Les sources du champ sont toujours A, B, C mais on ne sait rien a priori du champ total).

On peut remarquer aussi que, pour chacune des questions de ce test, le taux d'abstention est le plus faible pour les étudiants R 1993-94 et R 1994-95, ce qui semblerait indiquer que le mot "source" s'est peu à peu intégré au vocabulaire de ces étudiants, mais l'association source-charges n'est pas encore évidente dans tous les cas (pour les sources des champs en M_2, M_3 il y a assez peu de non-réponses, mais pour le champ en M_1 il y en a autour de 50%, ce qui, malgré tout, est moins que dans les autres échantillons).

c) Conclusion à propos du test "Conducteur dans condensateur".

Les interventions pédagogiques menées en 1993-94 et 1994-95 ont apparemment été plus efficaces qu'en 1992-93, avec des étudiants de performances scolaires d'ensemble équivalentes.

Rappelons que dans l'intervention de 1992-93, nous nous étions déjà attachée à

- mettre l'accent sur le principe de superposition.
- étudier le champ au voisinage d'un conducteur en présence de charges extérieures, effets visuels à l'appui.
- mettre en jeu des situations variées par la configuration des charges extérieures au conducteur étudié.

Pour l'intervention sous sa forme finale (1993-94 et 1994-95), ces aspects ont été maintenus, et peut-être accentués par l'effet d'une meilleure maîtrise de la part de l'enseignant. Le fait de dessiner d'abord le champ total, perpendiculaire au conducteur, avant d'analyser ses composantes, ou encore d'exclure de plus en plus systématiquement l'expression ambiguë "le champ du conducteur", participent peut-être à cet effet d'expertise.

L'aspect explicitement nouveau de l'intervention finale est la mise en oeuvre de modifications de situations physiques, propres selon nos hypothèses à souligner les deux effets d'une charge extérieure et à favoriser leur prise en compte. Il se trouve que l'évaluation par ce test "Conducteur dans condensateur" va dans le sens d'une validation de cette hypothèse (les calculs de χ^2 indiquent, pour plusieurs questions du test, une différence significative entre les "R 1993-94" ou "R 1994-95" et les autres groupes, y compris ceux de niveau scolaire global supérieur), mais il faut rester très prudent et ne pas exclure que les meilleurs résultats soient attribuables dans une certaine mesure à une expertise accrue de l'enseignant sur l'ensemble des aspects de la séquence.

Si l'effet de l'intervention est nettement positif, il reste que des obstacles persistent pour la majorité des étudiants comme en témoigne le faible taux de réponses justes sur l'ensemble des questions. Comme ce ne sont pas des obstacles mathématiques qui justifient un tel taux d'échec, il faut bien admettre que la difficulté porte sur les concepts en cause.

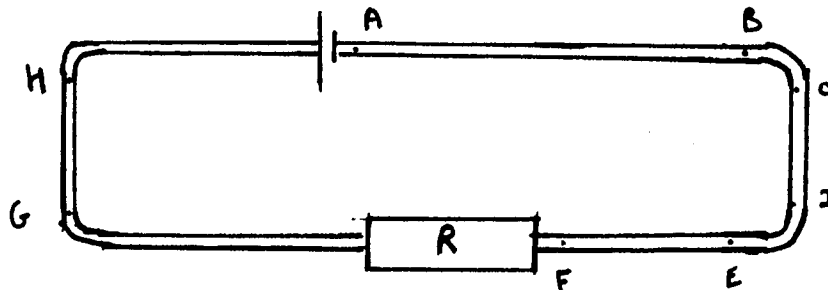
Le test suivant est moins directement lié au contenu de la séquence en ce sens que la situation physique présentée n'a pas été évoquée auparavant. Mais ce test fait appel essentiellement à la liaison entre champ électrique et sources, largement travaillée lors de la séquence. Il évalue donc un transfert un peu plus "distant" que le test "Conducteur dans condensateur". Après le succès très modeste des étudiants expérimentaux au test précédent, on ne peut pas attendre un fort taux de réussite sur celui-ci.

3) "Le champ dans les fils".

Ce test a été présenté dans le chapitre 4.

a) Rappel de l'énoncé et de la réponse correcte.

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



Soient : $\vec{E}_1$ le champ électrique à l'intérieur du fil dans la zone AB.

$\vec{E}_2$ le champ électrique à l'intérieur du fil dans la zone CD.

$\vec{E}_3$ le champ électrique à l'intérieur du fil dans la zone EF.

$\vec{E}_4$ le champ électrique à l'intérieur du fil dans la zone GH.

- 1) Représenter les vecteurs $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \vec{E}_4$. Justifier votre représentation (direction, sens, valeur relative des normes).
- 2) a) Quelles sont les sources de ces champs?
 b) Comment s'expliquent les éventuels changements de direction d'une zone à l'autre?
 c) Vous étiez-vous déjà posé la question b) ?

Les réponses correctes sont les suivantes :

La direction et le sens du champ électrique sont ceux du courant électrique ($\vec{E} = \vec{j} / \gamma$ où $\vec{j}$ est le vecteur densité de courant, γ est la conductivité du matériau.)

$E_1 = E_2 = E_3 = E_4$ car tous les fils considérés ont même section S et même conductivité γ ($E = I/S\gamma$ où I est l'intensité du courant qui a même valeur en tout point du circuit.)

Les sources de ces champs électriques sont toutes les charges du système et en particulier toutes les charges superficielles existant sur les fils. Ces charges (par leur disposition) sont responsables des variations de direction du champ électrique.

b) Conditions d'interrogation.

Ce questionnaire a été posé aux étudiants expérimentaux "R 1994-95" peu de temps après la fin du cours d'électrostatique afin de voir si ces étudiants pourraient réinvestir dans une situation d'électrocinétique ce qu'ils avaient vu à propos des charges sources en électrostatique.

Les "R 1994-95" vont ici être comparés aux "R 1992-93" et à d'autres Spé T", de formation et niveau équivalents (90 étudiants correspondant à deux classes de Lille) et à des doctorants moniteurs : voir détail des échantillons p 73. L'échantillon des "moniteurs" n'est là que pour illustrer, au passage, la permanence jusqu'en fin d'études des difficultés soulevées ici. Nous ne commenterons pas en détail les résultats qui les concernent.

c) Résultats.

Examinons les réponses aux différentes questions.

Directions des champs :

	N	$\vec{E}$ parallèle au fil
R (1994-95)	39	90%
R (1992-93)	38	76%
autres Spé T	90	71%
Moniteurs	39	97%

Dans chacun des échantillons, il y a un fort pourcentage de bonnes réponses, la direction du champ est pour la plupart des étudiants R justifiée par la relation $\vec{j} = \gamma \vec{E}$ (où γ est la conductivité et $\vec{j}$ la densité de courant).

Les sources du champ :

Les différentes catégories de réponses ont été définies p 74.

La réponse qui ressemble le plus à la réponse correcte est : "toutes les charges existantes", que nous avons appelée réponse "pseudo-correcte".

	N	toutes les char- ges	la d.d.p	le généra- teur	le courant les élec- trons mobiles	Autre réponse	Pas de réponse
R 1994- 95	39	8%	5%	18%	15%	0%	54%
R 1992- 93	38	5%	3%	16%	26%	8%	53%
autres Spé T	90	4%	10%	28%	18%	11%	32%
Moni- teurs	39	8%	41%	44%	3%	3%	5%

En 1994-95, les résultats sont comparables à ceux des autres échantillons : de nombreux étudiants ne répondent pas et on observe très peu de réponses correctes. Aucun étudiant n'a clairement mentionné les charges superficielles sur les fils conducteurs.

Comment expliquez-vous les changements de direction du champ?

Les titres des colonnes du tableau suivant rappellent brièvement les différentes catégories de réponses, définies p 74.

	N	Pas de variation	Direction du courant, électrons mobiles	Forme des fils	Autre réponse	Pas de réponse
R 1994-95	39	2%	13%	26%	13%	46%
R 1992-93	38	1%	13%	24%	16%	58%
autres Spé T	90	0%	18%	21%	17%	46%
Moniteurs	39	18%	8%	18%	28%	28%

On constate que les résultats sont très homogènes dans les trois premiers échantillons ("R " ou "autres Spé T").

Vous étiez-vous déjà posé cette question?

	N	Oui
R (1994-95)	39	8%
R (1992-93)	38	8%
autres Spé T	90	6%
Moniteurs	39	5%

Les résultats de tous les échantillons sont analogues : il y a une absence de questionnement sur ce problème, qui se maintient jusqu'en fin d'études comme en témoignent les "moniteurs".

d) Conclusion à propos du test "Le champ dans les fils".

Compte-tenu des contraintes de programme, dans l'intervention pédagogique il n'y a pas eu d'application du principe de superposition à une situation d'électrocinétique ni d'étude de l'influence de la nature du milieu. Pour ce test, la différence entre les étudiants des groupes expérimentaux et témoins porte a priori uniquement sur les deux points suivants de l'intervention pédagogique : l'insistance sur la notion de charge-source du champ électrique et l'attention prêtée à une éventuelle interprétation causale des relations physiques.

Comme on avait pu s'y attendre, le test "Le champ dans les fils" ne fait pratiquement pas apparaître de différence entre les étudiants expérimentaux et les autres dans la compréhension des sources du champ électrique pour un circuit en régime permanent. Il faut reconnaître qu'il est difficile d'imaginer l'existence des charges superficielles lorsqu'on n'en a jamais entendu parler, et que ce seul fait renforce considérablement la difficulté : répondre "toutes les charges" lorsqu'on n' imagine pas où elles sont n'est pas naturel, manifestement. Il reste néanmoins toujours remarquable que si peu d'étudiants reconnaissent s'être un jour posé la question.

Il semble qu'un progrès à ce niveau ne puisse être obtenu que grâce à une intervention spécifique sur ce sujet, telle celle qui est menée par R.Chabay et B.Sherwood (1993b).

IV Récapitulation et conclusion de l'intervention pédagogique.

Pour chacune des années scolaires (1991-92, 1992-93, 1993-94 et 1994-95), nous allons rappeler les traits caractéristiques de l'intervention pédagogique. Ceci résume en fait nos hypothèses de départ : le souhait était, grâce à ces points caractéristiques, de favoriser une meilleure compréhension des étudiants sur les liens entre champ électrique et sources, et de mesurer à l'aide des tests d'évaluation le chemin parcouru dans ce sens.

Nous rappellerons ensuite les points marquants des résultats obtenus et nous verrons en comparant les groupes expérimentaux R et les groupes témoins si ces tests ont été discriminants ou non du point de vue de l'intervention didactique.

Rappelons que la durée globale des cours et exercices a peu varié d'une année à la suivante:

13 heures en 1991-92

14,4 heures en 1992-93

15,7 heures en 1993-94

15,3 heures en 1994-95

A) Indications générales sur l'importance relative du temps passé.

Rappelons que notre action, en termes de contenu, se situe à la marge de l'enseignement classique pour les classes de Spé T. Les contraintes extrêmement fortes de ce type d'enseignement ne nous laissent pas d'autres choix.

Dans le tableau suivant, pour un sujet donné (dans une colonne), le nombre de croix suggère l'importance relative du temps passé, en cours et exercices, pour les trois types d'intervention, à durée globale pratiquement constante.

1	2	3	4	5	6
	Superposition	Sources du champ nul dans un conducteur	Sources du champ $\vec{\sigma}/\epsilon_0$ à la surface d'un conducteur	Phénomènes d'influence	Notions sur les isolants
1991-92	x	x	x		x
1992-93	x	xx	xx	x	xx
1993-94 et 1994-95	x	xx	xxx	xx	xx

Les 3ème, 4ème, 5ème colonnes du tableau ci-dessus sont en rapport avec l'obstacle de "la cause dans la formule" (voir chapitres 1 et 3). La 6ème colonne est en rapport avec l'obstacle "champ seulement si mobilité" (voir chapitre 2). La 2ème colonne a trait au principe de superposition en lui-même, objectif prioritaire, selon nous, pour que les étudiants puissent acquérir une vue unifiée du champ électrique et mieux dominer les deux obstacles cités ci-dessus.

B) Aspects spécifiques de la séquence.

Dès la première intervention et de manière constante ensuite, des phrases-clefs ont été écrites dans le cours. Elles concernaient le principe de superposition et le champ électrique à

l'intérieur d'un conducteur ou à sa surface. Les exercices où il faut appliquer explicitement le principe de superposition ont été assez nombreux (ils ont constitué environ la moitié des exercices en tout).

En 1992-93 et les années suivantes a été entreprise l'étude qualitative détaillée d'une situation : une sphère conductrice en présence d'une charge ponctuelle. En ce qui concerne le champ nul à l'intérieur de la sphère une modification de situation a été analysée et l'effet visuel a été privilégié grâce à l'utilisation de transparents superposés, où charges et composantes de champs associées ont la même couleur.

En 1993-94 et 1994-95, de façon systématique, au cours de toutes les démonstrations, des théorèmes, des corps chargés ont été représentés dans l'environnement des conducteurs. De plus nombreuses modifications de situations physiques ont été considérées. L'évocation du changement, c'est notre hypothèse, est de nature à centrer l'attention de l'étudiant sur une analyse en termes de cause et d'effet, le travail de détail avec transparents superposés ayant pour but d'éviter la linéarité souvent afférente à ce type d'analyse.

Ce qui nous paraît être la caractéristique essentielle distinguant les différentes interventions, est donc l'attention plus ou moins grande apportée à l'obstacle de "la cause dans la formule". Ceci se fait via une centration sur des sources de champ extérieures au conducteur et sur l'étude de ce qui se transforme lorsqu'on les modifie. De ce point de vue la comparaison entre les différentes interventions peut se résumer par le tableau suivant :

	Etude détaillée d'une situation (conducteur en présence d'une charge ponctuelle)	Analyse de modifications de situations
1991-92		
1992-93	x	
1993-94 et 1994-95	x	x

C) Résultats évalués par questionnaires.

1991-92 (voir annexe à ce chapitre p 171 à 178).

Questionnaire "Tranche napolitaine" : les résultats des étudiants expérimentaux R ont quasiment été identiques à ceux des autres Spé T. Ce test n'a pas été discriminant, ce qui était prévisible, car cet aspect du principe de superposition, lié à la matière, n'a pas été travaillé particulièrement.

Questionnaire "Coulomb" : Les étudiants R ont été comparés à des étudiants de niveau J. Les réponses des étudiants R aux questions sur les sources des champs ont été meilleures, la superposition a été mieux appréhendée mais les réponses à propos de l'influence ont été moins bonnes. La situation n'a donc pas été comprise entièrement, on peut parler d'amélioration partielle mais très insuffisante. Il y a eu déstabilisation d'un raisonnement faux (qui consiste à dire le champ à la surface du conducteur n'est créé que par le conducteur) mais sans restabilisation ultérieure.

1992-93

Questionnaire "Le champ dans les fils" : les étudiants R ont été comparés à d'autres Spé T (niveau J) et à des moniteurs (niveau K).

Le lien causal entre champ, charges et courant semble aussi mal compris dans tous les échantillons.

Questionnaire "Isolants" : les résultats des étudiants R ont été assez voisins de ceux des autres étudiants J. Ce test n'a pas été discriminant.

Questionnaire "Conducteur dans condensateur" : Les étudiants R ont été comparés à d'autres Spé T (niveau J).

Les étudiants R ont plus souvent pensé à la superposition, mais cette superposition a été mal intégrée dans le théorème de Coulomb. De nouveau il y a eu déstabilisation sans restabilisation ultérieure.

1993-94 et 1994-95

La même intervention a été menée en 1993-94 et 1994-95; les résultats des évaluations pour les deux années sont très voisins. Cette reproductibilité des résultats est à noter.

Questionnaire "Conducteur dans condensateur" : Les étudiants expérimentaux "R" ont été comparés à d'autres Spé T et à des Spé M' (niveaux J).

Les étudiants R ayant suivi la troisième intervention pédagogique, ont mieux répondu que les autres à pratiquement toutes les questions. Il semble qu'environ 25% d'entre eux puissent maîtriser qualitativement une situation où interviennent superposition et influence. L'effet de l'intervention pédagogique est donc tout à fait positif, mais limité à un quart des étudiants.

Questionnaire "Le champ dans les fils" : les étudiants R (uniquement en 1994-95) ont été comparés à d'autres Spé T (niveau J) et à des moniteurs (niveau K).

Le lien causal entre champ, charges et courant semble aussi mal compris dans tous les échantillons. Les résultats des étudiants "R" ayant suivi la deuxième ou la troisième intervention pédagogique sont voisins.

D) Profils conceptuels.

1) Présentation.

Pour montrer l'impact des obstacles précédemment cités et caractériser les "états conceptuels" de divers groupes dans le domaine des champs électriques, nous nous proposons, en suivant les travaux de F.Chauvet (1994), d'élaborer des profils conceptuels.

Rappelons brièvement en quoi ils consistent.

Ils sont définis par le choix de couples "question-élément de réponse", caractéristiques de tel ou tel aspect du raisonnement des étudiants, puis par le regroupement de certains couples par familles. Le point commun aux couples d'une même famille peut être, par exemple, un thème de la physique, un type de difficulté, un mode de présentation des questions. Ce regroupement en famille constitue en fait une hypothèse sur les facteurs qui sont susceptibles d'influencer le raisonnement des étudiants. Ici le regroupement est fait de manière assez classique, autour de types de difficulté qui s'expriment simplement en termes de contenus de la discipline.

Le profil conceptuel représente, en fonction du numéro du couple, le pourcentage d'élèves ou d'étudiants d'un échantillon donné, ayant fourni l'élément de réponse choisi à la question choisie (pour le couple considéré). On peut ainsi disposer d'une description synthétique, organisée, multidimensionnelle, des résultats d'une recherche sur les raisonnements des apprenants.

Cette description peut constituer un mode d'évaluation d'une intervention pédagogique. Ainsi F.Chauvet a-t-elle évalué une intervention pédagogique, menée dans une classe de B.T.S en arts appliqués, dans le but d'aboutir à une compréhension intégrée du concept de couleur. Dans une évaluation par groupes "expérimentaux" et "témoins", les profils conceptuels lui permettent de comparer de manière pluridimensionnelle les effets de divers types d'enseignement sur divers groupes. Comme l'écrit F.Chauvet (1994), "nous chercherons à savoir si la séquence se traduit à la fin par un profil conceptuel de groupe caractérisé. (...) L'idée est de mesurer l'impact de la séquence sur un éventail de compétences."

2) Choix des couples "question-élément de réponse" pour notre étude.

Les analyses de raisonnements faites dans les chapitres précédents à propos des différents questionnaires permettent de choisir certains couples, montrant les différentes facettes du concept de champ électrique et les types de raisonnements d'étudiants associés.

Nous avons ainsi utilisé les familles de couples suivantes, définies ici par différents aspects du contenu conceptuel associé au champ électrique :

- Direction, expression du champ électrique.
- Phénomène d'influence.
- Sources du champ électrique.
- Superposition.
- Influence de la nature du matériau.

Dans la famille "superposition", nous avons introduit trois subdivisions :

- * Superposition simple (addition des champs créés par deux sources de même type, par exemple deux charges ponctuelles).
- * Superposition bien intégrée dans le théorème de Coulomb (effets directs et indirects des charges extérieures à un conducteur bien perçus).
- * Superposition incorrecte (réponses incorrectes du type $\vec{E}_{total} = \sigma \vec{n} / \epsilon_0 + \vec{E}_{créepar...}$)

Excepté pour la famille "superposition", nous ne considérerons que des couples où l'élément de réponse est correct. Il est souvent inutile de définir des couples correspondant à des éléments de réponses opposés, car les pourcentages de réponses sont simplement complémentaires des précédents. Toutefois, pour certaines questions (voir par exemple plus loin les couples n°9 et 10), le taux d'abstention est très important et les pourcentages de réponses correctes et incorrectes ne sont pas complémentaires. Pour d'autres questions, il est essentiel de distinguer plusieurs types de réponses incorrectes (par exemple une absence de superposition (qui sera repérée ici par une absence de réponse correcte à une question sur les sources du champ : voir plus loin les couples n°10, 13, 14) , et une superposition mal intégrée dans le théorème de Coulomb : voir plus loin les couples n°26, 27, 28).

Voici la liste des principaux couples "question-élément de réponse" qui ont déjà été envisagés dans les études qui précèdent, reclassés ici par familles.

Un astérisque (*) signale les couples dont l'interprétation est ambiguë, comme on en discutera plus loin, et qui, de ce fait, ne seront pas utilisés dans la suite.

Numéro du couple	Nom du questionnaire	Eventuellement numéro de question ou détail de la question	Elément de réponse
-Direction, expression du champ électrique			
1 (*)	"Coulomb"	Q2a	"oui"
2	"Coulomb bis"		"L'affirmation est fausse"
3	"Le champ dans les fils"	Représenter les champs	Bonne direction
4	"Conducteur dans condensateur"	Représenter $\vec{E}_1$	"Champ nul"
5	"Conducteur dans condensateur"	Représenter $\vec{E}_{2,3}$	Bonne direction
6	"Conducteur dans condensateur"	Représenter $\vec{E}_4$	Bonne direction
- Phénomène d'influence			
7	"Coulomb"	Q2c	"non"
8	"Conducteur dans condensateur"		Représenter des charges à la surface de C
- Prise en compte des sources du champ électrique			
- à l'intérieur d'un conducteur.			
9	"Le champ dans les fils"	Quelles sont les sources?	"Toutes les charges."
10	"Conducteur dans condensateur"	Quelles sont les sources de $\vec{E}_1$?	"C et A et B"

Numéro du couple	Nom du questionnaire	Eventuellement numéro de question ou détail de la question	Elément de réponse
- Prise en compte des sources du champ électrique			
- à l'extérieur d'un conducteur, en son voisinage.			
11 (*)	"Coulomb"	Q1	"Tout l'univers"
12 (*)	"Coulomb"	Q2b	" $\vec{E}_A \neq \vec{E}_B$ "
13	"Conducteur dans condensateur"	Quelles sont les sources de $\vec{E}_{2,3}$?	"C et A et B"
14	"Conducteur dans condensateur"	Quelles sont les sources de $\vec{E}_4$?	"C et A et B"
- à l'intérieur d'un isolant.			
15	"Isolants bis"		"q et q' créent un champ en M, en N"
16	"Gauss"		"Le champ n'est pas calculable"
- Superposition			
- Superposition simple			
17	"Les pendules" (annexe a, p 227)		calculer la somme des forces de Coulomb
18	"Les deux sphères" (annexe a, p 232-233)		Additionner les champs électriques créés par les deux sphères

Numéro du couple	Nom du questionnaire	Eventuellement numéro de question ou détail de la question	Elément de réponse
- Superposition			
- <i>Superposition bien intégrée dans le théorème de Coulomb</i>			
19	"Coulomb"		Réponse totalement correcte au test entier
20	"Conducteur dans condensateur"	pour $\vec{E}_1$	Champ nul et sources correctes
21	"Conducteur dans condensateur"	pour $\vec{E}_{2,3}$	Bonnes directions des champs et sources correctes
22	"Conducteur dans condensateur"	pour $\vec{E}_4$	Bonne direction du champ et sources correctes
23	"Conducteur dans condensateur"		Réponse totalement correcte au test entier
- <i>Superposition incorrecte</i>			
24	"Coulomb"		Ecrire $\vec{E}_{total} = \sigma \vec{n} / \epsilon_0 + \vec{E}_q$
25	"Coulomb bis"		"L'affirmation est juste ou ambiguë"
26	"Conducteur dans condensateur"	pour $\vec{E}_1$	$\vec{E}_1 = \vec{0} + \vec{E}_{crée\ par\ le\ cond}$
27	"Conducteur dans condensateur"	pour $\vec{E}_{2,3}$	$\vec{E} = \sigma \vec{n} / \epsilon_0 + \vec{E}_{crée\ par\ le\ cond}$
28	"Conducteur dans condensateur"	pour $\vec{E}_4$	$\vec{E} = \sigma \vec{n} / \epsilon_0 + \vec{E}_{crée\ par\ le\ cond}$

Numéro du couple	Nom du questionnaire	Eventuellement numéro de question ou détail de la question	Elément de réponse
- Influence de la nature du matériau			
29	"Tranche napolitaine"		Egalité des champs dans le conducteur et l'isolant
30	"Isolants"		Réponse totalement correcte au test entier
31	"Isolants bis"		Réponse totalement correcte au test entier

L'étude qui précède (chapitre 3) conduit à ne pas retenir certains couples présentant une certaine ambiguïté pour l'interprétation. Ce sont les couples marqués d'un astérisque.

Le couple n°1 correspond à la réponse "oui" à la question "Lorsqu'un conducteur est en présence d'une charge ponctuelle, le champ électrique au voisinage de la surface est-il donné par la formule $\sigma\vec{n}/\epsilon_0$?" (questionnaire "Coulomb"). Or, nous avons vu dans le chapitre 3 que plusieurs étudiants répondant "oui" à cette question pensent que $\sigma\vec{n}/\epsilon_0$ est le champ créé par le conducteur : en clair on ne sait pas très bien de quel champ il s'agit.

Le couple n°11 correspond à la réponse "Tout l'univers" à la question "Quelles sont les sources du champ $\sigma\vec{n}/\epsilon_0$?" (questionnaire "Coulomb"). Cette réponse est, pour certains étudiants, purement verbale, c'est un refrain bien appris, contredit parfois par les réponses ultérieures aux autres questions de ce test. Aussi ce couple est-il un indicateur limité de compréhension des étudiants.

Le couple n°12 correspond à la réponse "non" à la question "Les champs au voisinage du conducteur sont-ils les mêmes en présence ou en l'absence d'une charge ponctuelle?" (questionnaire "Coulomb"). Ce couple est encore un indicateur limité, car, en lisant certaines réponses, on ne peut savoir si l'étudiant considère alors le champ total ou le champ créé par le conducteur.

Le questionnaire "Coulomb" requiert donc une certaine prudence dans l'interprétation des réponses aux items considérés chacun isolément. Pour ce questionnaire, seuls les couples

n°7, 19, 24 ont une signification non ambiguë, le second de ces "couples" étant entendu au sens large puisque "l'élément de réponse" retenu est alors une réponse correcte à l'ensemble du test.

Le test "Conducteur dans condensateur", qui porte sur le même sujet que le test "Coulomb", fournit, lui, davantage de couples non ambigus, mieux utilisables pour une évaluation de séquence.

3) Tracé des profils.

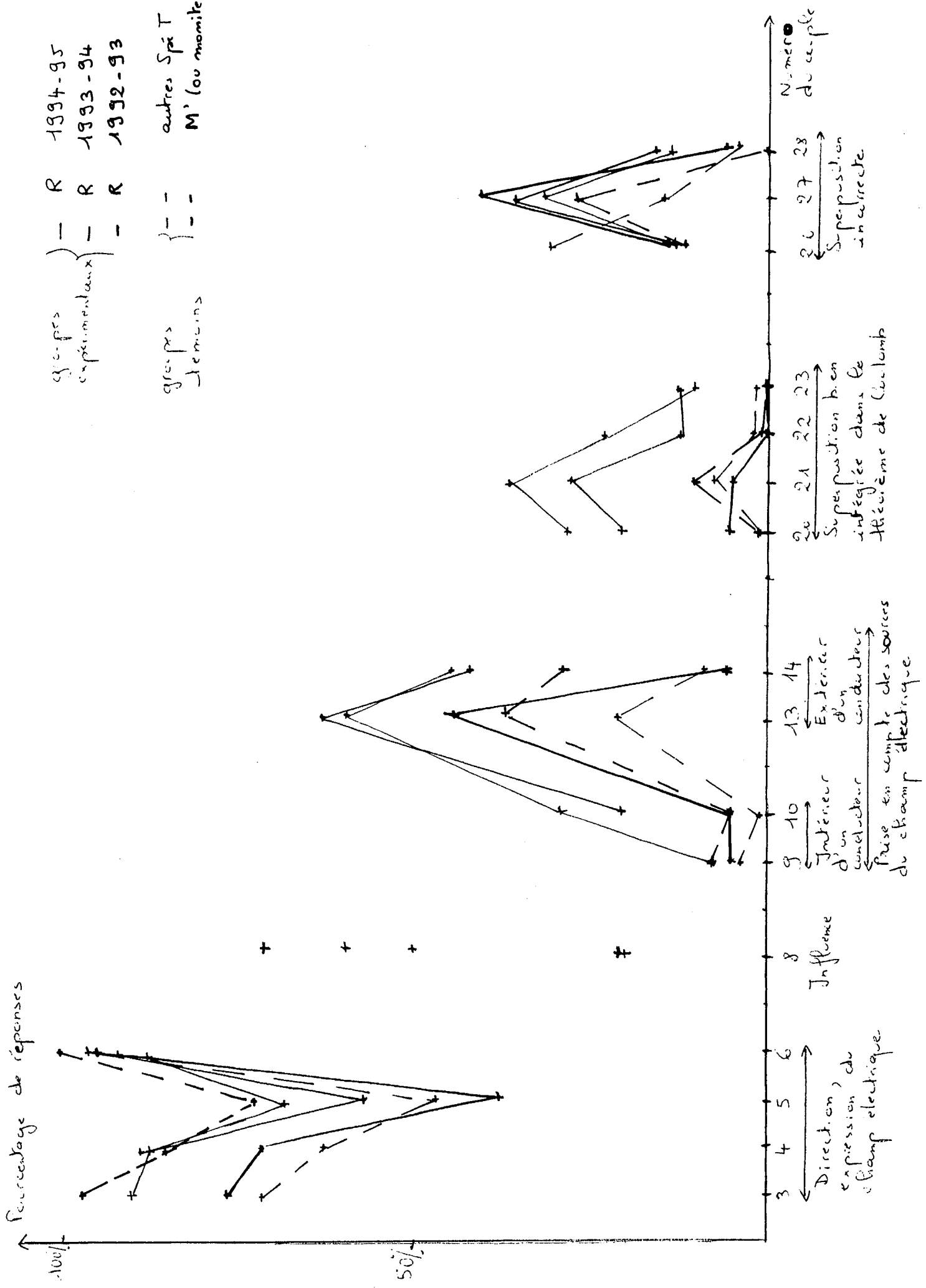
Pour évaluer notre séquence d'enseignement, nous n'avons retenu que les couples associés aux questionnaires "Conducteur dans condensateur" et "Le champ dans les fils", seuls tests à avoir été posés systématiquement en fin de séquence à tous les groupes expérimentaux et témoins. Il y a toutefois une exception : le groupe "R 1993-94" n'a pas été retenu pour le questionnaire "Le champ dans les fils", car ce test y a été passé plus tard que dans les autres groupes (à la fin du cours d'électromagnétisme, et non pas à la fin du cours d'électrostatique).

En ce qui concerne les groupes expérimentaux, l'échantillon "R 1991-92" a été éliminé, d'une part parce que l'intervention pédagogique n'était qu'ébauchée, d'autre part parce que les tests mentionnés ci-dessus n'ont pas été passés dans cet échantillon.

pourcentage de réponses

groupes expérimentaux } — R 1994-95
 — R 1993-94
 — R 1992-93

groupes témoins } — — autres Spé T
 — — M' (ou moniteurs)



4) Conclusion et interprétation des résultats.

L'utilisation de profils conceptuels permet de comparer globalement les réponses à divers types de questions ou aux différentes questions portant sur un même thème, et de rendre compte, plus commodément qu'avec des tableaux de résultats, d'une intervention pédagogique dans son ensemble.

Une première remarque concerne nos regroupements de couples par "familles". Nous disions plus haut que le regroupement effectué dans chacune d'elles traduisait une hypothèse sur un type de difficulté. Celles qui sont définies ici correspondent à un aspect de contenu conceptuel défini très classiquement : expression du champ électrique, sources de ce champ, par exemple.

Or, on voit que tous les couples d'une même famille ne sont pas associés à une même fréquence. Manifestement certains aspects des situations proposées influencent fort les réponses, pour un contenu conceptuel en première approximation analogue, ce qui n'est pas pour nous surprendre. Doit-on pour autant renoncer à l'idée de "famille", ou restreindre celle-ci à l'extrême? Les éléments d'appréciation suivants incitent à ne pas le faire :

- Les "sous-profils" correspondant à chaque "famille" gardent une forme relativement stable d'un échantillon à l'autre. Autrement dit, ils se déplacent "en bloc" à la suite de nos interventions, indiquant que la hiérarchie de difficulté se maintient à l'intérieur d'une "famille", d'un groupe à l'autre.

- D'une famille à l'autre, les "sous-profils" évoluent de manière différente : certains montent (en bloc), d'autres descendent, ou restent quasiment stables.

C'est sur la base de ces éléments, de nature plus appréciative que statistique, que nous risquons les conclusions suivantes :

- Les questions classiques, qui concernent la direction du champ ou son expression (couples n°3 à 6) sont dans l'ensemble mieux résolues que les questions concernant les sources du champ et la superposition. Nous observons aussi que les résultats des échantillons "R 1994-95" et "R 1993-94" rejoignent ceux des étudiants les plus brillants ("Spé M ") en ce qui concerne ces questions "classiques" (alors que ceux de l'échantillon "R 1992-93" sont assez proches de ceux des étudiants de niveau scolaire équivalent du groupe témoin ("autres Spé T"). Il est toujours utile de constater qu'un accent mis sur des aspects non classiques d'enseignement ne fait rien perdre sur les aspects plus classiques.

En ce qui concerne les sources du champ électrique, les étudiants des groupes expérimentaux "R" ont de meilleurs résultats que les groupes témoins, avec une légère augmentation du taux de réponses correctes d'une année à la suivante. Dans la dernière intervention pédagogique, la moitié environ des étudiants prend correctement en compte les sources du champ au voisinage d'un conducteur : un résultat remarquable par comparaison

avec le groupe témoin M' : ces étudiants brillants sur les questions classiques s'effondrent lorsqu'il s'agit de comprendre les sources du champ.

Quel que soit l'échantillon, le taux de réponses correctes est plus faible pour l'étude du champ électrique à l'intérieur d'un conducteur que pour l'étude du champ électrique au voisinage d'un conducteur. Lorsque celui-ci est en équilibre (couple n°10) il y a une difficulté particulière à considérer qu'un champ nul peut avoir des sources. Lorsque le conducteur est parcouru par un courant permanent (couple n°9) il faut imaginer la présence de charges que l'enseignement n'a pas introduites, et renoncer à raisonner dans le seul cadre de l'électrocinétique.

En ce qui concerne la superposition, on voit monter d'une année à la suivante les taux d'occurrence des couples (n°20 à 23) manifestant une compréhension de la superposition bien conciliée avec l'expression $\vec{E} = \sigma\vec{n} / \epsilon_0$. Pour la dernière intervention, un quart environ des étudiants a atteint cet objectif. ceci prend toute sa valeur par comparaison avec les échantillons d'étudiants de niveau global très supérieur (M'), qui, sur les mêmes questions, présentent un taux très faible de réponses correctes (autour de 10%). Néanmoins il s'agit d'un succès bien limité, comme en témoigne aussi le taux quasiment constant de "superposition incorrecte", caractérisée par l'expression inexacte " $\vec{E}_{total} = \sigma\vec{n} / \epsilon_0 + \vec{E}_{créepar...}$ ", sur les divers échantillons témoins ou expérimentaux (couples n°26 à 28). C'est en effet le taux d'omission complète de l'idée de superposition qui évolue favorablement, plutôt que les taux d'erreurs : une fois encore on constate que le premier effet d'une séquence visant une difficulté particulière est la prise de conscience du problème, et que la maîtrise conceptuelle suit plus lentement.

Résumons nous :

A travers les situations proposées dans nos questionnaires, l'expérimentation pédagogique semble avoir eu un effet

- nettement positif pour la prise en compte des sources du champ, essentiellement pour des points au voisinage de conducteurs
- limité pour la conciliation des idées d'influence et de superposition avec la formule qui traduit le théorème de Coulomb (" σ " résume l'action de toutes les charges)
- nul pour la compréhension du circuit en régime permanent.

On peut dire que la forme d'ensemble du profil conceptuel des groupes expérimentaux est modifiée par rapport aux groupes témoins, y compris des étudiants brillants.

ANNEXE AU CHAPITRE 6

Première intervention : 1991-1992.

A) Introduction.

Lors de ce premier essai, l'innovation a été assez modeste et nous le verrons assez naïve. Elle se fonde sur les résultats de l'enquête. En effet, le questionnaire "La tranche napolitaine" a mis en évidence chez les étudiants des difficultés liées à la matière (conductrice ou isolante). Le questionnaire "Coulomb" a permis d'observer un manque de compréhension intégrée du principe de superposition et du phénomène d'influence (une source importante de difficulté étant une interprétation causale abusive de la formule apparaissant dans le théorème de Coulomb), et de manière générale des difficultés à reconnaître toutes les sources du champ électrique existant en un point.

B) Des situations variées, quelques phrases- clefs.

Les difficultés des étudiants, rappelées ci-dessus, nous ont incitée à faire apparaître dans le cours et les exercices une certaine variété de substances (conductrices ou isolantes) et de distributions de charges. Outre cela, l'intervention a essentiellement consisté en l'incorporation de quelques "phrases-clefs", écrites au tableau et dans le cours des étudiants (voir annexe a, p 209). Elles concernent essentiellement les sources du champ électrique $\vec{\sigma} / \epsilon_0$, qui règne au voisinage d'un conducteur (théorème de Coulomb).

Au niveau des exercices, une insistance particulière a été accordée au principe de superposition, qu'il fallait explicitement appliquer dans 5 des 12 exercices cherchés en Travaux dirigés. Le questionnaire "Gauss" a aussi été traité en exercice.

C) Evaluation de la première intervention.

Pour évaluer cette intervention pédagogique, les questionnaires papier-crayon "La tranche napolitaine" et "Coulomb" ont été proposés.

A propos de "La tranche napolitaine", il n'y quasiment rien eu dans le cours permettant une bonne compréhension de ce problème (excepté la remarque du cours E4 III) citée en annexe a, p 209). Par contre le test "Coulomb" permet de faire une évaluation de la démarche pédagogique adoptée.

Voici les résultats de ces deux tests :

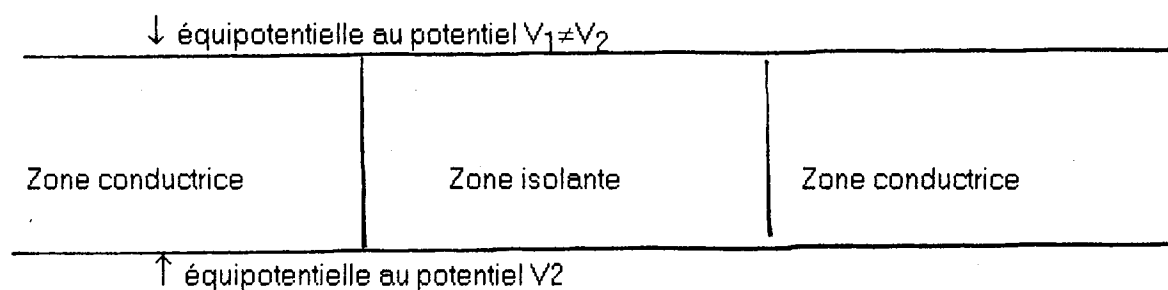
Dans toute la suite R (comme lycée Raspail) désignera la classe dans laquelle a été menée l'intervention pédagogique.

1) "La tranche napolitaine".

Ce test a été présenté dans le chapitre 2.

On peut lire ci-dessous le rappel de l'énoncé et de la réponse correcte.

Dans la situation représentée ci-dessous, les deux surfaces équipotentiellles sont des plans supposés infinis et perpendiculaires au plan de la figure. Décrire le champ électrique entre ces deux surfaces.



Pensez-vous que les champs électriques dans le conducteur et l'isolant

sont différents? ☐

sont égaux? ☐

Je ne sais pas. ☐

Cochez l'une des cases et justifiez.

La réponse correcte est que les champs électriques sont égaux, là où l'on peut négliger les effets de bord : " $\vec{E}_{is} = \vec{E}_{cond}$ " (dans toute la suite $\vec{E}_{is}$ et $\vec{E}_{cond}$ désigneront respectivement les champs électriques dans l'isolant et le conducteur.)

Les résultats de l'échantillon R ont été comparés à ceux d'autres étudiants de Math Spé T (8 de Nogent sur Oise et 32 d'Aubervilliers : voir détail des échantillons p 32).

Comparaison des champs dans l'isolant et le conducteur :

	N	$\vec{E}_{is} = \vec{E}_{cond}$ (réponse correcte)	$\vec{E}_{is} \neq \vec{E}_{cond}$	?
R (91-92)	37	19%	62%	19%
autres Spé T	40	35%	53%	12%

Les étudiants R répondent moins bien que les autres et paraissent plus désespérés devant la question (il y a un assez grand nombre de "?").

Les arguments des étudiants :

Les arguments correspondant aux colonnes du tableau suivant ont été définis page 35-36.

	N	$E_{cond}=0$	Isolant	Courant	Matériau	Is/C/M	Rien
R (91-92)	37	27%	19%	3%	14%	35%	8%
autres Spé T	40	10%	15%	3%	17%	28%	17%

Les étudiants R qui avaient hésité à répondre " $\vec{E}_{is} = \vec{E}_{cond}$ " ou " $\vec{E}_{is} \neq \vec{E}_{cond}$ " ne sont pourtant pas à court d'arguments (il n'y a que 8% de "Rien"), peut-être parce que nous les avons fortement encouragés à répondre de la façon la plus détaillée possible.

Ils ont à peu près les mêmes arguments que les autres étudiants, mais ils répondent plus fréquemment : "le champ est nul dans la zone conductrice", refrain scolaire bien appris.

En conclusion, la petite phrase ajoutée au cours (voir annexe a, p 209 : cours E4 III) pour tenter de montrer la généralité des lois de l'électrostatique, indépendamment du milieu n'a pas permis à ce groupe de répondre mieux que les autres classes interrogées.

2) "Coulomb ".

Ce test a été présenté dans le chapitre 3.

On peut lire ci-dessous le rappel de l'énoncé et de la réponse correcte.

Question Q1

En P, à la surface d'un conducteur en équilibre, la densité surfacique de charge vaut σ . On appelle $\vec{n}$ le vecteur unitaire normal en P à la surface du conducteur et dirigé vers l'extérieur du conducteur. A l'extérieur du conducteur, en un point au voisinage de P, le champ électrique vaut $\sigma/\epsilon_0 \vec{n}$.

Ce champ est-il créé par :

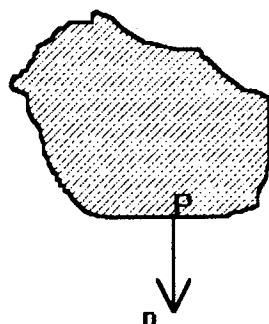
- 1) Les charges au voisinage de P?
- 2) Toutes les charges du conducteur?
- 3) Toutes les charges de l'univers?

Cochez la bonne réponse (1,2, ou 3) et justifiez-la.

Question Q2 :

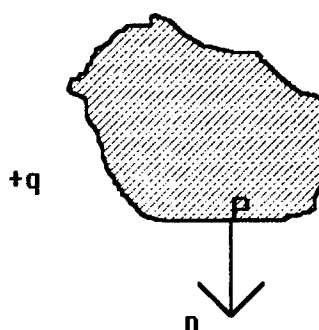
Soient les deux situations suivantes :

Situation A



Situation B

(q est une charge ponctuelle)



$\vec{n}$: vecteur unitaire normal en P à la surface du conducteur et dirigé vers l'extérieur du conducteur.

Q2a) Dans la situation B, le champ électrique $\vec{E}$ en un point au voisinage de P est-il bien donné par la formule $\sigma/\epsilon_0 \vec{n}$?

OUI NON Je ne sais pas

Justifier.

Q2b) Le champ électrique à l'extérieur du conducteur au voisinage de P est-il le même dans les situations A et B ?

OUI NON Je ne sais pas.

Justifier.

Q2c) La densité surfacique de charge σ est-elle la même dans les situations A et B ?

OUI NON Je ne sais pas.

Justifier.

Réponses correctes :

Q1) réponse 3 : le champ $\sigma\vec{n} / \epsilon_0$ est créé par toutes les charges de l'univers.

Q2a) oui : c'est le théorème de Coulomb : le champ électrique total est bien donné par la formule $\sigma\vec{n} / \epsilon_0$

Q2b) non : Soit M_1 un point, à l'extérieur du conducteur, au voisinage de P.

$$\vec{E}_{\text{en } M_1(B)} = \sigma' / \epsilon_0 \vec{n}.$$

$$\vec{E}_{\text{en } M_1(A)} = \sigma / \epsilon_0 \vec{n}.$$

$$\vec{E}_{\text{en } M_1(B)} \neq \vec{E}_{\text{en } M_1(A)}, \text{ car } \sigma' \neq \sigma \text{ voir question Q2c).}$$

Q2c) non : $\sigma' \neq \sigma$ à cause de l'influence de la charge q qui modifie la répartition surfacique de charge sur le conducteur.

Les résultats des étudiants R à ce test ont été comparés à ceux d'un plus grand nombre d'étudiants que dans le test précédent : il s'agit d'étudiants de niveau J (niveau défini p 22) : 17 en Spé T à Nogent sur Oise, 44 en Spé M au lycée St Louis de Paris, 39 en Spé P à Belfort, 56 en 2ème année de DEUG à l'Université Paris 7 (voir détail des échantillons p 59).

Question Q1 (les sources du champ $\sigma\vec{n} / \epsilon_0$) :

	N	Univers (réponse correcte)	Con- ducteur	Voisinage	?
R (91-92)	37	51%	27%	22%	0%
autres J	156	25%	49%	24%	2%

Les étudiants R se distinguent ici par un pourcentage de réponses correctes deux fois plus élevé que celui des autres J. Ils ont bien appris la phrase du cours : "le champ électrique est créé par toutes les charges de l'univers". Mais cette réponse est loin de garantir, à elle seule, une bonne compréhension du principe de superposition.

Question 2a ("le champ est-il bien donné par la formule $\vec{\sigma} / \epsilon_0$?") :

	N	Oui (réponse correcte)	Non	?
R (1991-92)	37	65%	35%	0%
autres J	156	48%	47%	5%

Encore un bon "score" pour les étudiants R. Ceci pourrait aller dans le sens d'une bonne compréhension, mais on a vu dans le chapitre 3 qu'un étudiant pouvait considérer cette formule comme vraie, mais appliquée au champ électrique créé par le conducteur.

Question 2b ("le champ est-il le même dans les situations (A) et (B) ?") :

	N	Non (réponse correcte)	Oui	?
R (1991-92)	37	70%	24%	6%
autres J	156	80%	16%	4%

Pour cette question les réponses des étudiants R sont légèrement moins bonnes que celles des autres J, elles vont de pair avec un recours assez fréquent à l'argument "l'effet de q est négligeable", ce que nous verrons plus loin. Toutefois le pourcentage de réponses correctes reste assez élevé.

Question 2c (σ est-elle la même dans les situations (A) et (B) ?)

	N	Non (réponse correcte)	Oui	?
R (1991-92)	37	49%	49%	2%
autres J	156	70%	27%	3%

Cette fois le pourcentage de réponses correctes chez les étudiants R est très inférieur à celui des autres J, certainement parce que le phénomène d'influence avait été peu abordé en cours.

C'est aussi pour les étudiants R que les associations de réponses "oui-non-oui" sont les plus fréquentes (35% pour R et 22% pour les autres J). Ces associations peuvent s'interpréter, comme on l'a vu page 66 : $\sigma\vec{n} / \epsilon_0$ est le champ créé par le conducteur, $\sigma\vec{n} / \epsilon_0 + \vec{E}_{\text{créé par q}}$ est le champ total, et σ n'est pas modifiée (les étudiants qui répondent ainsi ne pensent pas au phénomène d'influence).

Ceci est confirmé par le tableau suivant montrant que les étudiants R pensent fréquemment à la superposition des champs créés par le conducteur et par la charge ponctuelle.

Justifications données dans les questions 2a, 2b, 2c :

Les arguments apparaissant dans le tableau ci-dessous ont été définis page 65.

	N	Rien	Négligeable	Seulement influence	Seulement superposition	Influence+superposition	autre réponse
R (1991-92)	37	14%	11%	8%	46%	11%	16%
autres J	156	9%	1%	37%	25%	20%	8%

L'accent mis en classe sur le principe de superposition a porté ses fruits (46% des R donnent cet argument, contre 25 % des autres J). Le quasi-silence observé en classe à propos du phénomène d'influence a eu aussi ses conséquences (19% des R en parlent contre 57% des autres J).

Mais, pour savoir si les étudiants intègrent bien le principe de superposition dans le théorème de Coulomb, il faut regarder les associations de réponses.

Ainsi l'association totalement correcte "univers-oui-non-non" a été donnée par 8% des étudiants R contre 11% des autres J (avec des valeurs extrêmes de 7% à 21% dans les sous-échantillons, constitués par les diverses classes des autres J).

Globalement l'intervention pédagogique n'a donc pas eu le résultat escompté : le principe de superposition est très présent dans l'esprit des étudiants R, mais la compréhension du théorème de Coulomb dans une situation où le conducteur n'est pas seul n'est pas acquise.

CONCLUSION

Au terme de ce travail nous pouvons en résumer les principales étapes comme suit.

Nous nous proposons, tout d'abord, d'analyser les raisonnements des étudiants en électrostatique, et principalement à propos du principe de superposition des champs électriques. Celui-ci est un élément conceptuel central pour arriver à une compréhension de la complexité des interactions dans un système tel qu'un circuit électrique, dans un état donné d'équilibre ou de régime permanent. Il est également essentiel, si l'on désire acquérir une vision intégrée du concept de champ électrique de l'électrostatique à l'électrocinétique.

Plusieurs travaux antérieurs de didactique, notamment sur les raisonnements des étudiants dans les situations où plusieurs grandeurs varient simultanément, nous ont fait pressentir que certaines difficultés dans l'utilisation de ce principe seraient liées à la causalité.

Une enquête préliminaire (essentiellement à l'aide du questionnaire "Gauss") nous a permis de mettre en évidence deux obstacles entraînant une application incorrecte du théorème de Gauss :

- * le lien établi entre l'existence d'un champ électrique et la mobilité des charges : "sans mobilité, pas de champ".

- * l'attribution d'un contenu causal abusif à la formule qui traduit ce théorème : toute charge non mentionnée dans la formule ne contribue pas au champ.

Nous nous sommes donc intéressée à ces deux points.

En ce qui concerne la mobilité ou l'immobilité des charges, les questionnaires "La tranche napolitaine", "Isolants", "Isolants bis" ont montré que d'assez nombreux étudiants possédaient une conception d' "isolant-barrière", allant parfois de pair avec l'idée que le champ électrique est nul dans un isolant. Il semble ainsi que l'absence d'un effet visible (mouvement de charges) empêche de reconnaître l'existence d'un champ électrique.

De plus, ces questionnaires ont été soumis à des échantillons de différents niveaux scolaires et cela nous a permis d'observer que l'enseignement paraissait laisser dans l'esprit des étudiants, à propos du champ électrique, des idées en forme de strates successives, non articulées les unes sur les autres, loin de la vision unifiée qu'on pourrait souhaiter après un enseignement de l'électrostatique et de l'électrocinétique.

Nous avons ensuite centré notre analyse sur l'obstacle "cause dans la formule", à l'aide des questionnaires "Coulomb" et "Coulomb bis". Il s'agit d'une situation complexe, où une seule cause (charge ponctuelle en présence d'un conducteur) a plusieurs effets (créer un champ électrique et modifier par influence la distribution de charge du conducteur). Il ressort clairement de l'analyse des réponses à ces questionnaires que de nombreux étudiants vont rechercher la cause du champ électrique existant en un point dans la formule donnant l'expression du champ en ce point, et que ceci entraîne une incompréhension du théorème de Coulomb et une incapacité à l'utiliser correctement du moins en réponse à nos questionnaires.

Enfin, un autre questionnaire, "Le champ dans les fils", implique les deux difficultés citées ci-dessus. Il a provoqué la perplexité de nombreux étudiants face à des questions à propos des sources du champ électrique dans un circuit parcouru par un courant, à tel point que nous avons assez souvent observé une inversion de "l'effet" et de "la cause", le courant électrique devenant la source du champ électrique, et ceci parfois à travers la formule " $\vec{j} = \gamma \vec{E}$ ". Non seulement la nécessité de charges de surface sur les fils pour expliquer les changements de direction du champ est ignorée de pratiquement tous les étudiants, mais encore le problème ainsi posé semble découvert à l'occasion du test.

Le bilan de cette étude de difficultés fait donc apparaître un morcellement de connaissances chez les étudiants. Isolants, conducteurs, situations statiques ou de régimes permanents sont l'occasion de réponses qui semblent nier la permanence de la loi de Coulomb et du principe de superposition. Les obstacles qui contribuent à ce morcellement semblent être effectivement ceux que notre premier questionnaire laissait entrevoir et que nous résumons par les slogans : "champ seulement si mobilité" et "cause dans la formule".

Le premier rejoint une grande tendance du raisonnement commun observée sur d'autres domaines, tout particulièrement en mécanique : en l'absence d'effet, l'existence de la cause est difficilement admise. Et corrélativement il est difficile d'admettre que des effets très différents - présence ou absence de courant- puissent correspondre à la même cause, au même champ.

Le deuxième obstacle renvoie davantage aux acquis scolaires, où les "formules", moyens de calcul, prennent une importance déterminante, voire constitutive des grandeurs concernées.

Nous avons d'emblée soupçonné les difficultés liées à l'existence d'un effet dû à plusieurs causes (principe de superposition), ou de la considération d'effets différents pour une même cause (lien entre électrostatique et électrocinétique, effets direct et indirect d'une charge au voisinage d'un conducteur). Il nous restait à apprécier au-delà de ces considérations générales sur la (multi)causalité, quelle était la contribution probable de l'enseignement classique aux raisonnements d'étudiants à propos du champ électrique.

Le principe de superposition des champs électriques, en effet, ne saurait être considéré comme un point sur lequel la vie courante, à elle seule et directement, détermine la compréhension des étudiants.

Nous avons analysé des manuels de classe de 1ère scientifique et de début d'enseignement supérieur en référence aux difficultés analysées dans notre étude, pour voir dans quelle mesure ils étaient susceptibles de favoriser ou non une bonne maîtrise conceptuelle à leur propos.

Nous avons constaté que, dans ces ouvrages :

- * il était, en général, peu question des sources du champ électrique.
- * le principe de superposition était souvent considéré comme une évidence.
- * les situations où plusieurs distributions de charges sont sources d'un champ électrique en un point étaient rarement traitées d'un point de vue qualitatif.
- * le théorème de Coulomb était essentiellement appliqué à un conducteur seul dans l'espace.
- * il était rarement précisé que la formule " $\vec{E} = \sigma \vec{n} / \epsilon_0$ " ne signifie pas que la densité surfacique " σ " ou le conducteur sont la source du champ $\vec{E}$.
- * l'indépendance des lois fondamentales (comme la loi de Coulomb) vis à vis de la nature du milieu était rarement soulignée.
- * l'électrostatique et l'électrocinétique étaient présentées comme deux domaines peu liés entre eux.
- * il était rarement fait mention des charges de surface sur les fils, sources du champ électrique dans un fil parcouru par un courant.

Le moins que l'on puisse dire est donc que les manuels, dans leur ensemble, ne prennent pas les difficultés précédentes en considération au point de leur accorder une attention particulière.

L'ensemble de ces constats nous a conduite, compte tenu du programme de notre classe (Mathématiques Spéciales Technologiques) à considérer la compréhension du principe de superposition comme un objectif prioritaire dans l'enseignement de l'électrostatique, et à tenter d'agir sur les difficultés liées à l'interprétation causale du théorème de Coulomb.

Très contrainte par les conditions aux limites extrêmement fortes de ces classes de concours nous n'avons pu que mettre en oeuvre des changements mineurs en termes de temps passé : notre intervention s'est étalée, chaque année, sur les 15 heures environ consacrées à l'électrostatique, ce qui est tout à fait analogue au temps passé par nos collègues. Les thèmes d'exercices, du moins leurs contenus de surface, ont été très voisins de ceux traités habituellement. Cette compatibilité, d'une part devrait favoriser la prise en compte ultérieure de nos résultats par nos collègues, d'autre part rend pertinente l'évaluation par comparaison avec des groupes témoins.

Après l'échec d'un essai préliminaire (1991-92), consistant essentiellement en une insistance verbale sur le concept de source du champ électrique et sur le principe de superposition, nous avons réfléchi plus profondément sur les difficultés des étudiants liées à la causalité et nous avons construit une nouvelle séquence pédagogique. Celle-ci a été menée, trois années de suite, dans des classes équivalentes. Chaque année notre groupe expérimental a été comparé à des groupes témoins de deux types : des groupes de niveau scolaire équivalent aux groupes expérimentaux, des groupes de niveau scolaire plus élevé

(M'), essentiellement à l'aide du questionnaire "Conducteur dans condensateur". Nous avons choisi de représenter les résultats de l'évaluation à l'aide de la technique des profils conceptuels, qui permet de prendre en compte simultanément plusieurs facettes du concept de champ électrique et qui répond bien à notre objectif de faire accéder les étudiants à une compréhension intégrée de ce concept.

Les caractères spécifiques de notre séquence, au-delà de la prise d'objectif déjà signalée, se sont introduits progressivement, sur une période de trois ans (1991-94) puis stabilisés la quatrième année (1994-95).

Ce que nous avons appelé la première intervention (1991-92) n'a guère consisté qu'en déclarations très explicites dans le cours et un accent mis sur le principe de superposition, dans les exercices aussi, puisque 5 sur 12 y faisaient appel. Le résultat totalement négatif est là pour rappeler que les actions seulement orientées par une idée d'objectif et des renforts pédagogiques classiques ne suffisent pas nécessairement pour que les étudiants maîtrisent des domaines conceptuels reconnus comme non évidents.

Notre seconde intervention (1992-93) a mis en oeuvre un traitement détaillé de la situation problématique du conducteur en présence d'une charge extérieure, avec effets visuels où des transparents figurant charges et champs associés de la même couleur se superposaient pour rendre compte du champ total.

Cette intervention a provoqué une déstabilisation des étudiants, qui ont eu, plus nombreux que ceux du groupe témoin, un fréquent recours au principe de superposition. Cependant une compréhension des phénomènes d'influence et de superposition, bien conciliée avec le théorème de Coulomb n'a pas été acquise.

Les deux dernières années (1993-94, 1994-95), l'intervention pédagogique a comporté les éléments précédents avec un accent supplémentaire inspiré par les conclusions mûries de notre étude de raisonnements. Nous avons souhaité solliciter fortement, chez les étudiants, une approche causale des situations physiques abordées, de façon à les rejoindre, en quelque sorte, sur leur terrain favori. A cette fin, l'accent a été mis, en cours comme en exercices, non seulement sur l'étude de situations de conducteurs en présence de charges mais sur l'analyse de ce qui changeait lorsqu'on modifiait les positions où les valeurs des charges extérieures au conducteur. Cette approche est typiquement du registre causal, avec un schéma agent-patient sous-jacent. Il s'agit de lui donner une réponse dans le cadre légal, c'est à dire en se fondant sur une relation et donc de réorienter le raisonnement causal, naturellement linéaire vers une analyse impliquant des évolutions simultanées de plusieurs grandeurs. Cette réorientation a utilisé les mêmes techniques visuelles que précédemment (1992-93). De plus, de façon systématique, des corps chargés ont été introduits sur les schémas ici ou là, lorsque précisément la validité de ce qu'on disait sur le corps en question n'était pas affectée par ces "corps étrangers". Cette dernière intervention a permis à environ

un quart des étudiants d'atteindre le but visé : une compréhension intégrée de l'influence et de la superposition et par là-même une application correcte du théorème de Coulomb.

Le profil des groupes témoins de niveau scolaire équivalent aux groupes expérimentaux met en évidence des difficultés de ces étudiants pour tous les types de questions utilisés dans cette étude. Le profil du groupe expérimental 1992-93 en est assez voisin, excepté pour les questions concernant les sources du champ électrique, où ce groupe a mieux réussi. Le profil du groupe témoin de très bon niveau scolaire (M') indique un fort taux de succès pour les questions classiques concernant les expressions des champs électriques, mais d'importantes difficultés à propos des sources du champ électrique et de l'utilisation du principe de superposition. Enfin les profils des deux derniers groupes expérimentaux (1993-94 et 1994-95) rejoignent ceux des étudiants brillants à propos des questions classiques, et indiquent un taux de succès plus élevé pour les questions ayant trait aux sources des champs ou au principe de superposition.

La mise à profit de cette étude sur le plan pédagogique peut prendre les formes suivantes :

- Connaissant les difficultés des étudiants à propos des sources du champ électrique, de celles dues à l'absence de mobilité des charges à grande échelle dans les isolants ou à l'utilisation des formules, le professeur sera à même de mieux aider ses élèves. Ce travail incite d'abord à une rigueur particulière au niveau du langage, et à définir clairement le champ créé par telle distribution, en tel point, ou le champ total existant en tel point, en demandant aux élèves ou étudiants la même rigueur.

- Mais on a vu que cela ne suffisait pas. Une prise de conscience des difficultés par les étudiants eux-mêmes est très probablement nécessaire. Les questionnaires que nous avons élaborés proposent des situations problématiques incitant les élèves ou étudiants à réfléchir sur certains automatismes dans l'application des théorèmes de Gauss ou/et Coulomb, à faire évoluer leurs conceptions à propos des substances conductrices ou isolantes, à rendre leurs analyses causales moins restrictives.

- Enfin, après l'échec de l'essai préliminaire et la déstabilisation de l'année suivante, la concordance des résultats positifs de l'évaluation de l'intervention pédagogique en 1993-94 et 1994-95 est un indice important que ceux-ci ne sont pas dûs au hasard et s'expliquent très probablement par les choix pédagogiques qui ont été faits au niveau du principe de superposition. L'un de ces choix est de tenter de s'appuyer sur l'aspect causal du raisonnement pour faire sentir les effets des charges et leurs relations avec le champ, tout en écartant la linéarité habituelle du raisonnement (une cause $\Rightarrow$ un seul effet). Au moins peut-on dire que l'hypothèse correspondante n'est pas disqualifiée par l'expérience.

Quelles sont maintenant les questions que l'on peut se poser au terme de cette recherche?

Les deux obstacles que nous avons étudiés :

- existence d'un champ électrique subordonnée à la mobilité des charges,
 - attribution d'un contenu causal abusif aux formules,
- ne sont certainement pas propres à l'électrostatique.

Le premier obstacle peut être rapproché du lien entre force et vitesse, décrit dans de nombreuses recherches didactiques dans le domaine de la mécanique (Mac Dermott, 1984).

Le deuxième a trait aux formules, or, celles-ci apparaissent dans tous les domaines de la physique, et à tous les niveaux. On peut donc se poser la question de la généralité de cet obstacle. La plupart des formules de physique peuvent être lues de manière causale. Ainsi, en énonçant le principe fondamental de la dynamique " $\sum \vec{F} = m\vec{a}$ ", on peut penser que la force est cause de l'accélération. En énonçant la loi de Faraday " $e = -d\Phi/dt$ ", on peut penser qu'une variation de flux magnétique cause l'existence d'une f.e.m induite. Mais outre qu'une lecture causale s'accompagne souvent de l'idée impropre de décalage temporel entre évolutions des grandeurs impliquées, elle peut aussi aller avec l'idée de cause exclusive. C'est le cas pour les théorèmes de Gauss et Coulomb. Cette dernière difficulté s'étend-elle, comme la première, à divers domaines de la physique?

En considérant un domaine proche de celui que nous avons étudié, le magnétisme, l'étude que nous avons effectuée au niveau du principe de superposition et des sources du champ pourrait être reprise, en particulier dans l'étude des milieux aimantés : par exemple, plonger un noyau de fer doux dans une bobine parcourue par un courant provoque l'aimantation du fer doux. Le courant modifie alors le champ magnétique en tout point de l'espace par un effet direct, et aussi par un effet indirect, puisqu'il oriente les moments magnétiques élémentaires de la substance aimantée. On peut prévoir que l'application du théorème d'Ampère à ce type de situation causera des difficultés analogues à celles du théorème de Coulomb en électrostatique.

Il semble donc que, dans le domaine du magnétisme, le principe de superposition pourrait être l'objet d'une étude analogue à celle que nous avons faite à propos du champ électrique.

Enfin ce travail comprend, outre une étude de raisonnement dans la tradition maintenant classique de la didactique, une expérimentation pédagogique. Il pose à nouveau la difficile question de l'évaluation de telles entreprises. Il nous semble que notre effort vers une évaluation "multidimensionnelle" de la compréhension qu'ont les étudiants du champ électrique devrait être repris et étendu. Ce travail montre en effet que des étudiants réputés de haut niveau peuvent exceller dans la compréhension de certains aspects du concept (l'expression et le schéma du champ total, par exemple), alors que d'autres (les sources du champ, la liaison entre électrostatique et électrocinétique, par exemple) leur échappent totalement. Le "profil conceptuel", sa déformation après expérimentation pédagogique sont

probablement des outils utiles pour le suivi de tentatives pédagogiques. Le "spectre" de notre outil d'évaluation est encore bien étroit, comme le sont restés notre objectif pédagogique et notre liberté d'action. Mais les acquis de ce travail pourraient servir de point de départ pour l'élaboration de profils conceptuels à base plus large en électricité. Cela sera bien nécessaire quand il s'agira de comparer les mérites respectifs d'approches aussi contrastées que l'approche classique dont les manuels se font l'écho et dont notre séquence reste proche, et celle par exemple de B.Sherwood et R.Chabay (1993) ou encore celle de D.Psillos et P.Koumaras (1994), avec leur insistance sur les régimes transitoires d'établissement du courant.

Si, en effet, la tendance des chercheurs cités en introduction est d'appuyer davantage l'enseignement de l'électricité sur une vision causale et sur l'analyse de modifications de situations et de régimes transitoires, il ne faut pas oublier que la physique quasistatique en reste fondamentalement éloignée, par la "simultanéité" qu'elle suppose pour les évolutions de grandeurs. La question est donc de concilier plusieurs visions sur la physique, et de ne pas trop perdre de terrain sur l'une en gagnant sur l'autre.

Là, comme chaque fois qu'une compréhension intégrée est visée, un outil d'évaluation qui soit à spectre étendu, tout en restant maniable et bien ciblé sur chacun des points retenus, devrait être disponible.

Nous souhaitons y avoir contribué, et poursuivre dans cette voie.

BIBLIOGRAPHIE

AGUIRREGABIRIA J.M., HERNANDEZ A. & RIVAS M. (1992). An example of surface charge distribution on conductors carrying steady currents. *American Journal of Physics*, vol. 60, n°2, pp 138-141.

ALLIER M.-F., FABRE M., QUARANTA L. & ROUSSEAU A. (1988). *Physique 1ère SE*. Paris, Magnard.

ANDERSSON B. (1986). The experiential gestalt of causation : a common core to pupils' preconceptions in science. *European Journal of Science Education*, vol. 8, n°2, pp 155-171.

ARISTOTE. (384-322 av J-C). *Métaphysique, tome 1, livre Δ*. Traduction et notes par J. Tricot (1991). Paris, librairie philosophique J.Vrin.

BACHELARD G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris, librairie philosophique J.Vrin.

BENSEGHIR A. (1989a). *Transition électrostatique-électrocinétique : Point de vue historique et analyse des difficultés des élèves*. Thèse, Université Paris 7.

BENSEGHIR A. (1989b). Formation des concepts d'électrocinétique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n°713, pp 451-466.

BENSEGHIR A. (1993). Signes + et - : perception du circuit électrique. *Actes du deuxième Séminaire National de Recherche en Didactique des Sciences physiques. Trema*, n°3-4, pp 18-25.

BENSEGHIR A. & CLOSSET J.-L. (1993). Prénance de l'explication électrostatique dans la construction du concept de circuit électrique : points de vue historique et didactique. *Didaskalia*, n°2, pp 31-47.

BENSEGHIR A. & CLOSSET J.-L. (à paraître). The electrostatics-electrokinetics transition. Historical and educational difficulties. *International Journal of Science Education*.

BERTIN M., FAROUX J.-P. & RENAULT J. (1984). *Electromagnétisme tomes 1 et 4*. Paris, Bordas.

- BERTIN M., FAROUX J.-P. & RENAULT J. (1986). *Electromagnétisme tome 3*. Paris, Bordas.
- BOURDON R. & BOURQUARD C. (1988). *Physique 1ère SE*. Paris, Delagrave.
- BRAMAND P., FAYE P. & THOMASSIER G. (1991). *Physique 1ère SE*. Paris, Hachette.
- BRUHAT G. (1967). *Cours de physique générale : électricité*. 8ème édition révisée par G.Goudet. Paris, Masson.
- BUNGE M. (1959). *Causality. The place of the Causal Principle in Modern Science*. Cambridge, MA, Harvard University Press.
- BUNGE M. (1971). Conjonction, succession, détermination, causalité. In M.Bunge, F.Halbwegs, T.S.Kuhn, J.Piaget, L.Rosenfeld, *Les théories de la causalité*, Paris, PUF, pp 112-132.
- CAILLOT M. & NGUYEN-XUAN A. (1993). Adults' understanding of electricity. In M.Caillet (Ed), *Learning Electricity and Electronics with Advanced Educational Technology*, Berlin, NATO ASI Series F, vol. 115, Springer Verlag, pp131-146.
- 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, Université Paris 7.
- CLOSSET J.-L. (1983a). *Le raisonnement séquentiel en électrocinétique*. Thèse, Université Paris 7.
- CLOSSET J.-L. (1983b). D'où proviennent certaines "erreurs" rencontrées chez les élèves et étudiants en électrocinétique? Peut-on y remédier? *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n°657, pp 81-102.
- CLOSSET J.-L. (1985). Using cognitive conflict to teach electricity. In R.Duit, W.Jung, C. von Rhöneck (Eds), *Aspects of Understanding Electricity : Proceedings of an international Workshop*, Kiel, IPN, Schmidt and Klaunig, pp 267-273.
- CLOSSET J.-L. (1989). Les obstacles à l'apprentissage de l'électrocinétique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n°716, pp 931-950.

COHEN R., EYLON B.S., GANIEL U. (1983). Potential Difference and Current in Simple Electric Circuits : A Study of Students' Concepts. *American Journal of Physics*, vol. 51, pp 407-412.

COQ-LEGOEDEC C., DENOYER B., MARTIN G., PIQUE G. & TRUBLIN N. (1988). *Physique 1ère SE*. Paris, Bordas.

DAVAL J.-P., FAYARD G., PAILER A. & AUSSEL G. (1988). *Physique 1ère SE*. Paris, Colin.

DEGURSE A.-M., GOZARD F., ROSENFELD-GIPCH L. & SOULIE L. (1988). *Physique 1ère SE*. Paris, Hatier.

DE KLEER J. & BROWN J.S. (1983). Assumptions and ambiguities in mechanistic mental models. In D.Gentner and A.L.Stevens (Eds), *Mental models*, Hillsdale, NJ, Lawrence Erlbaum Associates, pp 155-190.

DE KLEER J. & BROWN J.S. (1984). A qualitative physics based on confluences. *Artificial Intelligence*, vol. 24, n°1, pp 7-83.

DIDIER R. (1984). *Chimie générale*. Paris, Technique et Documentation.

DI SESSA A.A. (1981). *Phenomenology and the evolution of intuition*. M.I.T, Division for Study and Research in Education.

DI SESSA A.A. (1983). Phenomenology and the evolution of intuition. In D.Gentner and A.L.Stevens (Eds), *Mental models*, Hillsdale, NJ, Lawrence Erlbaum Associates, pp 15-19.

DUMIELLE J.-C., LEGRAND J.-C. & MERCIER B. (1988) *Physique 1ère SE*. Paris, Belin.

DUPIN J.-J. & JOHSUA S. (1985). Teaching electricity : interactive evolution of representations, models and experiments in a class situation. In R.Duit, W.Jung, C. von Rhöneck (Eds), *Aspects of Understanding Electricity : Proceedings of an international Workshop*, Kiel, IPN, Schmidt and Klaunig, pp 331-341.

EYLON B.-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.

FAUCONNET S. (1981). *Etude de résolution de problèmes : quelques problèmes de même structure en physique*. Thèse, Université Paris 7.

FEYNMANN R., LEIGHTON R.B. & SANDS M. (1979). *Electromagnétisme 1*. Version française de A.Cremieu et M.L.Duboin. Paris, Interéditions.

FONTAINE G., LAUTRETTE M. & TOMASINO A. (1991). *Physique 1ère SE*. Paris, Nathan.

GALICHON A. & LUCAS F. (1977). *Electricité 1*. Paris, Delagrave.

GALILI I. (1995). Mechanics background influences students' conceptions in electromagnetism. *International Journal of Science Education*, vol. 17, n°3, pp 371-387.

GARY C. (1994). *La foudre. Des mythologies à la recherche moderne*. Paris, Masson.

GIE H. & SARMANT J.-P. (1984). *Mécanique*. Paris, Technique et Documentation.

GIE H. & SARMANT J.-P. (1985). *Electromagnétisme tomes 1 et 2*. Paris, Technique et Documentation.

GRECIAS P. & MIGEON J.-P. (1987). *Physique 1*. Paris, Technique et Documentation.

GUTIERREZ R. & OGBORN J. (1992). A causal framework for analysing alternative conceptions. *International Journal of Science Education*, vol. 14, n°2, pp 201-220.

HALBWACHS F. (1971a). Réflexions sur la causalité physique. In M.Bunge, F.Halbwachs, T.S.Kuhn, J.Piaget, L.Rosenfeld, *Les théories de la causalité*, Paris, PUF, pp 19-38.

HALBWACHS F. (1971b). Causalité linéaire et causalité circulaire en physique. In M.Bunge, F.Halbwachs, T.S.Kuhn, J.Piaget, L.Rosenfeld, *Les théories de la causalité*, Paris, PUF, pp 39-111.

HARTEL H. (1982). The electric circuit as a system: a new approach. *European Journal of Science Education*, vol. 4, n°1, pp 45-55.

HARTEL H. (1985). The electric voltage. What do students understand? What can be done for a better understanding? In R.Duit, W.Jung, C. von Rhöneck (Eds), *Aspects of Understanding Electricity : Proceedings of an international Workshop*, Kiel, IPN, Schmidt and Klaunig, pp 353-362.

HARTEL H. (1993). New Approach to Introduce Basic Concepts in Electricity. In M.Caillot (Ed), *Learning Electricity and Electronics with Advanced Educational Technology*, Berlin, NATO ASI Series F, vol. 115, Springer Verlag, pp 5-21.

HEALD M.A. (1984). Electric fields and charges in elementary circuits. *American Journal of Physics*, vol. 52, n°6, pp 522-526.

HULIN M. & MAURY J.-P. (1991). *Les bases de l'électromagnétisme*. Paris, Dunod.

HULIN M., HULIN N. & PERRIN D. (1992). *Equations de Maxwell, ondes électromagnétiques*. Paris, Dunod.

JOHSUA S. (1982). *L'utilisation du schéma en électrocinétique. Aspects perceptifs et aspects conceptuels*. Thèse, Université Aix-Marseille 2.

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

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

KOUMARAS P., KARIOTOGLOU P. & PSILLOS D. (1994). Devons-nous utiliser des phénomènes évolutifs en introduction à l'étude de l'électricité? Le cas de la résistance. *Didaskalia*, n°4, pp 109-119.

KUHN T.S. (1971). Les notions de causalité dans le développement de la physique. In M.Bunge, F.Halbwachs, T.S.Kuhn, J.Piaget, L.Rosenfeld, *Les théories de la causalité*, Paris, PUF, pp 7-18.

LAKOFF G. & JOHNSON M. (1980). *Metaphors we live by*. Chicago, University of Chicago Press.

LICHT P. (1991). A microscopic model for a better understanding of the concepts of voltage and current. In P.L.Lijnse, P.Licht, W.de Vos, A.J.Warloo (Eds), *Relating macroscopic phenomena to microscopic particles. A central problem in secondary science education*, Proceedings of a Seminar, Utrecht, CD- β Press, pp 316-327.

LIJNSE P.L. (1991). Macro-micro : what to discuss? In P.L.Lijnse, P.Licht, W.de Vos, A.J.Warloo (Eds), *Relating macroscopic phenomena to microscopic particles. A central problem in secondary science education*, Proceedings of a Seminar, Utrecht, CD- β Press, pp 6-11.

LONGCHAMP J.-P. (1991). *Comprendre et appliquer l'électrostatique*. Paris, Masson.

LUCAS F. (1979). *Electricité 2*. Paris, Delagrave.

LUMBROSO H. (1978). *Problèmes résolus d'électrostatique et magnétostatique*. Paris, Bordas.

MAC DERMOTT L.C. (1984). Critical Review of Research in the Domain of Mechanics. In *Actes du premier atelier international de recherche en didactique de la physique de La Londe-les-Maures*, Paris, CNRS.

MAHE R. & FRAISSARD J. (1989). *Equilibres chimiques en solution aqueuse*. Paris, Masson.

MAURINES L. (1986). *Premières notions sur la propagation des signaux mécaniques: Etude des difficultés des étudiants*. Thèse, Université Paris 7.

MAURINES L. (1992). Spontaneous reasoning on the propagation of visible mechanical signals. *International Journal of Science Education*, vol. 14, n°3, pp 279-293.

MIGNE J. (1970). *Etude de représentations de notions physiques : la chute des corps*. Document R3 de l'Institut National pour la Formation des adultes, Nancy.

MOREAU W.R., RYAN S.G., BEUZENBERG S.J. & SYME R.W.G. (1985). Charge density in circuits. *American Journal of Physics*, vol. 53, n°6, pp 552-554.

MORLAES P. & MORLAES J.C. (1981). *Solutions aqueuses*. Paris, Vuibert.

PEREZ J.-P., CARLES R. & FLECKINGER R. (1991). *Electromagnétisme, vide et milieux matériels*. Paris, Masson.

PIAGET J. (1946). *Les notions de mouvement et de vitesse chez l'enfant*. Paris, PUF.

PIAGET J. & GARCIA R. (1971). *Les explications causales*. Paris, PUF.

PSILLOS D., KOUMARAS P. & TIBERGHIE A. (1988). Voltage presented as a primary concept in an introductory teaching on D.C circuits. *International Journal of Science Education*, vol.10, n°1, pp 29-43.

PSILLOS D. & KOUMARAS P. (1993). Multiple Causal Modelling of Electrical Circuits for Enhancing Knowledge Intelligibility. In M.Caillot (Ed), *Learning Electricity and Electronics with Advanced Educational Technology*, Berlin, NATO ASI Series F, vol. 115, Springer Verlag, pp 57-75.

PSILLOS D. (à paraître). Adapting instruction to students' reasoning. In *Proceedings of the Second European Summer School of Thessaloniki*.

PURCELL E.M. (1973). *Electricité et magnétisme, cours de physique de Berkeley*. Traduction de C.Guthman et P.Lallemand. Paris, Colin.

QUEYREL J.-L & MESPLEDE J. (1985). *Précis de physique : électricité 1*. Paris, Bréal.

QUEYREL J.-L & MESPLEDE J. (1986). *Précis de physique : électricité 2*. Paris, Bréal.

RAINSON S. (1991). *Raisonnements d'étudiants à propos du champ électrique*. Mémoire de tutorat de D.E.A, Université Paris 7.

RAINSON S., TRANSTROMER G. & VIENNOT L. (1994). Students' understanding of superposition of electric fields. *American Journal of Physics*, vol. 62, n°11, pp 1026-1032.

REUCHLIN M. (1987). *Précis de statistique*. Paris, PUF.

ROSSER W.G.V. (1963). What makes an electric current "flow". *American Journal of Physics*, vol. 31, n°11, pp 884-885.

ROSSER W.G.V. (1970). Magnitude of Surface Charge Distributions Associated with Electric Current Flow. *American Journal of Physics*, vol. 38, n°2, pp 265-266.

ROZIER S. (1987). *Le raisonnement linéaire causal en thermodynamique élémentaire*. Thèse, Université Paris 7.

ROZIER S. & VIENNOT L. (1991). Students' reasonings in thermodynamics. *International Journal of Science Education*, vol. 13, n°2, pp 159-170.

SALTIEL E. (1978). *Concepts cinématiques et raisonnements naturels : étude de la compréhension des changements de référentiels galiléens par les étudiants en sciences*. Thèse d'état, Université Paris 7.

SALTIEL E. & MALGRANGE J.L. (1980). "Spontaneous" ways of reasoning in elementary kinematics. *European Journal of Physics*, vol. 1, pp 73-80.

SHERWOOD B.A. & CHABAY R.W. (1993a). Electrical Interactions and the Atomic Structure of Matter : Adding Qualitative Reasoning to a Calculus-Based Electricity and Magnetism Course. In M.Caillot (Ed), *Learning Electricity and Electronics with Advanced Educational Technology*, Berlin, NATO ASI Series F, vol. 115, Springer Verlag, pp 23-35.

SHERWOOD B.A. & CHABAY R.W. (1993b). *Instructor Manual to accompany Electric and Magnetic Interactions: a workbook*. Pittsburgh, PA, Carnegie Mellon University.

SHIPSTONE D.M. (1985). On children's use of conceptual models in reasoning about current electricity. In R.Duit, W.Jung, C. von Rhöneck (Eds), *Aspects of Understanding Electricity : Proceedings of an international Workshop*, Kiel, IPN, Schmidt and Klaunig, pp 73-93.

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

STEINBERG M.S. (1985). Construction of causal models : experimenting with capacitor-controlled transients as a means of promoting conceptual change. In R.Duit, W.Jung, C. von Rhöneck (Eds), *Aspects of Understanding Electricity : Proceedings of an international Workshop*, Kiel, IPN, Schmidt and Klaunig, pp 363-372.

TORNKVIST S., PETTERSON K.A., TRANSTROMER G. (1993). Confusion by Representation: on Students' Comprehension of the Electric Field Concept. *American Journal of Physics*, vol. 61, n°4, pp 335-338.

VIENNOT L. (1977). *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*. Thèse d'état, Université Paris 7.

VIENNOT L. (1979). Spontaneous Reasoning in Elementary Dynamics. *European Journal of Science Education*, vol. 1, n°2, pp 205-221.

VIENNOT L. & RAINSON S. (1992). Students' reasonings about the superposition of electric fields. *International Journal of Science Education*, vol. 14, n°4, pp 475-487.

VIENNOT L. (à paraître). The contents of physics : essential elements, common views. In C.Tarsitani, C.Bernardini, M.Vincentini (Eds), *Thinking Physics for Teaching*, Rome, Plenum Publishing Corporation.

WALZ A. (1985). Fields that accompany currents. In R.Duit, W.Jung, C. von Rhöneck (Eds), *Aspects of Understanding Electricity : Proceedings of an international Workshop*, Kiel, IPN, Schmidt and Klaunig, pp 403-412.

ANNEXE a

Programmes.

Détail des interventions pédagogiques.

I. PROGRAMMES

A) Classe de 1ère scientifique.

Le libellé du programme d'électricité des classes de 1ère S et E, valable jusqu'en juin 1993, est le suivant :

Extrait du B.O n°21 du 2 juin 1988.

Programme.

I. Le champ électrostatique.

1.1. Champ électrostatique. Cas particulier du champ uniforme.

1.2. Energie potentielle d'une charge électrique dans un champ électrostatique. Différence de potentiel.

II. Puissance électrique.

2.1. Effet calorifique en régime permanent dans un conducteur ohmique. Loi de Joule.

2.2. Loi d'Ohm pour un générateur ou un récepteur. Puissance électrique fournie ou reçue en régime permanent.

2.3 Bilan énergétique dans un circuit électrique.

III. Le condensateur.

3.1. Le condensateur du point de vue électrocinétique.

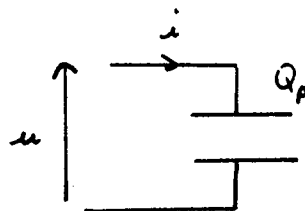
Relations " $Q_A = C(V_A - V_B)$ " et " $i = dQ_A/dt$ ".

Associations de condensateurs en parallèle.

Expression de l'énergie d'un condensateur.

3.2. Montages dérivateur et intégrateur. Utilisation des circuits intégrés linéaires considérés comme parfaits.

3.3. Réalisation d'une alimentation continue stabilisée.



Instructions et commentaires (Partie I uniquement).

1.1. On considérera le champ uniforme existant entre les armatures d'un condensateur plan. La loi de Coulomb n'est pas au programme.

1.2. On se limitera au seul cas du champ uniforme. La cuve ou le papier rhéographique permettent de créer un champ uniforme et de l'explorer. Un voltmètre de grande impédance est nécessaire pour remonter, à partir des mesures de différences de potentiel, au champ électrique.

B) Classes préparatoires.

Extraits des programmes (et commentaires) ayant un rapport avec le champ électrique.

Mathématiques Supérieures (B.O n°33 du 24 septembre 1987) et Mathématiques Supérieures T (B.O n°35 du 20 octobre 1988).

B.Mécanique.

Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique ou dans un champ magnétique uniformes et indépendants du temps.

D1.Electricité.

1. Charges et courants : charge élémentaire, distribution continue, densité de charge, densité de courant, conservation de la charge.

2. Loi de Coulomb. Champ électrostatique dans le vide. Potentiel électrostatique. Flux, théorème de Gauss. Expression générale du potentiel et du champ créés par une distribution de charges quelconque statique. Energie potentielle d'interaction d'un système de charges ponctuelles.

3. Dipôle; champ créé; action d'un champ électrique uniforme.

(Commentaire : il s'agit ici d'un ensemble rigide de deux charges q et $-q$. Tout développement multipolaire est hors programme.)

4. Conductibilité; loi d'Ohm.

(Commentaire : on se limitera à la conductibilité électrique des métaux. La théorie des bandes est hors programme.)

Mathématiques Spéciales M, M', P, P' (B.O n°34 du 19 octobre 1988) et Mathématiques Spéciales T (B.O n°35 du 20 octobre 1988).

C.Electromagnétisme.

1. Electrostatique.

Equilibre électrostatique d'un conducteur dans le vide : théorème de Coulomb.

Condensateurs.

Energie d'un condensateur.

(Commentaire : on introduira à propos du condensateur plan la densité volumique d'énergie $\epsilon_0 E^2/2$. On admettra la validité générale de cette expression; l'expression de l'énergie électrostatique en fonction du potentiel et de la densité de charges est en dehors du programme.)

2. Magnétostatique dans le vide.

Champ magnétique défini par son action sur des courants. Force de Lorentz, force de Laplace. Action d'un champ magnétique uniforme sur un circuit filiforme indéformable, moment magnétique, énergie potentielle d'interaction, couple.

Les courants comme sources du champ magnétique. Champ créé par une distribution stationnaire de courants. Loi de Biot et Savart. Conservation du flux de $\vec{B}$.

Potentiel vecteur $\vec{A}$. Expression du potentiel vecteur créé par une distribution stationnaire de courants.

Théorème d'Ampère.

Equations locales du champ magnétostatique.

Dipôle magnétique : signification physique. Champ créé, actions subies.

3. Induction.

Champ électro-moteur d'induction; f.e.m d'induction pour un circuit ou une portion de circuit filiformes.

(Commentaire : on considérera le déplacement d'un circuit dans un champ magnétique stationnaire et le cas d'un circuit fixe dans un champ magnétique variable.)

Induction mutuelle de deux circuits; induction propre.

(Commentaire : On se limitera au cas deux circuits filiformes)

Energie magnétique.

(Commentaire : on introduira à propos du solénoïde infini la densité d'énergie $B^2/2\mu_0$ dont on admettra la validité générale; l'expression de l'énergie magnétostatique " $\iiint \vec{j} \cdot \vec{A} \cdot d\tau / 2$ " est en-dehors du programme.)

Expression de la loi de Faraday sous forme locale.

4. Equations de Maxwell.

Equations de Maxwell.

(Commentaire : le formalisme quadridimensionnel et les transformations relativistes des champs sont hors programme).

Energie électromagnétique, puissance échangée entre un champ électromagnétique et des porteurs de charges libres.

Vecteur de Poynting, densité d'énergie électromagnétique.

5. Propagation.

Equation de propagation des champs électrique et magnétique dans le vide. transversalité des champs.

(Commentaire : les potentiels retardés sont hors programme).

Caractère vectoriel des ondes électromagnétiques, états de polarisation.

Comportement sous incidence normale d'une onde électromagnétique au voisinage d'un conducteur. Limite du conducteur parfait.

6. Rayonnement (pas en Math Spé T).

Champ électromagnétique rayonné à grande distance par un dipôle électrique. Puissance rayonnée. Approximation locale par une onde plane.

(Commentaire : on énoncera sans démonstration la formule donnant le champ électromagnétique à grande distance. La théorie générale du rayonnement est hors programme. Toute étude des antennes est hors programme).

Mathématiques Spéciales P et P' (B.O n°34 du 19 octobre 1988).

E. Milieux.

1. Milieux diélectriques.

Notions sur les processus microscopiques de polarisation : polarisation électronique, atomique et ionique, polarisation d'orientation.

(Commentaire : toute étude thermodynamique des propriétés des milieux diélectriques est hors programme. Les aspects dynamiques seront abordés et illustrés à l'aide du modèle de la "charge élastiquement liée" pour la polarisation électronique et du modèle de Debye avec l'introduction d'un temps de relaxation pour la polarisation d'orientation).

Champ électrique macroscopique. Vecteur polarisation macroscopique. Distribution macroscopique de charges équivalentes; densité de courant équivalente dans le cas d'une polarisation variable dans le temps.

(Commentaire : on introduira le champ macroscopique comme une moyenne spatiale du champ microscopique sans toutefois soulever les difficultés méthodologiques que pose cette moyenne. On introduira la notion de champ local et on admettra l'expression de Lorentz pour les milieux denses isotropes.)

Approximation linéaire; susceptibilité. Vecteur $\vec{D}$. Relation de passage entre deux milieux. Propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu diélectrique, linéaire, homogène, isotrope et non magnétique; dispersion; absorption; indice complexe; vitesse de phase; vitesse de groupe.

(Commentaire : on se limitera au cas des milieux isotropes.)

II. Plans des différents chapitres du cours des interventions pédagogiques de 1991-92 à 1994-95.

E4 Champ et potentiel électrostatiques.

D) Révisions du cours d'électrostatique de Math Sup T.

Polycopié donné à l'avance aux étudiants : ils révisent eux-mêmes leur cours de Math Sup T, en s'aidant du plan suivant :

1) Champ électrostatique et charges

-Rappel sur les charges électriques.

-Champ électrostatique (défini par $\vec{F} = q\vec{E}$ où q est la charge d'épreuve, $\vec{E}$ est le champ électrique créé par toutes les charges de l'univers sauf q)

-Loi de Coulomb d'où l'expression du champ électrostatique créé par une charge ponctuelle q située en P : $\vec{E}(M) = q\vec{u} / 4\pi\epsilon_0 PM^2$ avec $\vec{u} = \vec{PM} / PM$.

-Principe de superposition.

-Calcul direct du champ électrostatique créé par une distribution continue de charges :

distribution volumique : $\vec{E}(M) = \iiint_{\text{sur la distribution}} \rho \cdot d\tau \cdot \vec{u} / 4\pi\epsilon_0 PM^2$, P décrivant la distribution ,

$\vec{u} = \vec{PM} / PM$.

distribution surfacique : $\vec{E}(M) = \iint \sigma \cdot dS \cdot \vec{u} / 4\pi\epsilon_0 PM^2$

distribution linéique : $\vec{E}(M) = \int \lambda \cdot dl \cdot \vec{u} / 4\pi\epsilon_0 PM^2$

-Continuité de $\vec{E}$ (propriétés admises)

-Considérations de symétrie.

2) Théorème de Gauss.

-Notions succinctes sur le flux d'un champ de vecteurs, sur les angles solides.

-Démonstration du théorème de Gauss.

-Applications : calcul du champ électrostatique (ou gravitationnel) créé par un fil infini uniformément chargé, un plan uniformément chargé (savoir par coeur $\pm \sigma / 2\epsilon_0 \vec{n}$), une sphère uniformément chargée en surface ou en volume (savoir par coeur qu'à l'extérieur $\vec{E}(M) = Q\vec{u} / 4\pi\epsilon_0 OM^2$)

3) Potentiel.

- V défini par $\vec{E} = -\text{grad} V$

- Expressions du potentiel créé par un ensemble de charges ponctuelles, par une distribution continue de charges ($V(M) = \iiint \rho d\tau / 4\pi\epsilon_0 / PM$ dans le cas où il n'y a pas de charges à l'infini et où on choisit $V=0$ à l'infini)
- Quelques propriétés des équipotentiels.
- Energie électrostatique (charge ponctuelle dans $\vec{E}$ externe permanent, ensemble de charges ponctuelles en interaction)

4) Dipôle électrostatique.

- Définition. Moment dipolaire ($\vec{p} = q\vec{B} - \vec{B}^+$)
- Potentiel et champ électrostatiques créés par un dipôle ($V = \vec{p} \cdot \vec{u} / 4\pi\epsilon_0 r^2$)
- Lignes de champ et équipotentiels.
- Actions subies par un dipôle dans $\vec{E}$ extérieur uniforme.

5) Charges et courants. (On n'est plus en électrostatique.)

- Densité de courant ($\vec{j} = \sum_{\text{porteurs}} \rho_n \vec{v}_n$). Intensité du courant ($i = \pm dq / dt$)
- Relation entre i et j . Démonstration pour un conducteur filiforme cylindrique ($i = j.S$.
($(dj/dx)_t + (d\rho_m/dt)_x = 0$)
- Cas du régime permanent. Loi des noeuds.
- Approximation des régimes quasistationnaires.
- démonstration de la loi d'Ohm locale ($\vec{j} = \gamma \vec{E}$) pour un métal ou un électrolyte (hypothèse de départ : $\vec{v} = \pm \mu \vec{E}$).
- Démonstration de la loi d'Ohm intégrale ($U=RI$) pour un conducteur filiforme cylindrique.

II) Lois locales de l'électrostatique.

1) Potentiel électrostatique V.

$$\vec{E} = -\text{grad} V$$

$$\int_{M_1}^{M_2} \vec{E} \cdot d\vec{l} = V(M_1) - V(M_2)$$

Expression du gradient dans différents systèmes de coordonnées.

$$r\vec{\alpha}\vec{E} = \vec{0}$$

$$\oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot d\vec{l} = \iint_{\Sigma} r\vec{\alpha}\vec{E} \cdot d\vec{S}$$

2) Théorème de Gauss.

$$\Phi_{\Sigma}(\vec{E}) = \iint_{\Sigma} \vec{E} \cdot \vec{n} dS = Q_{\text{int}} / \epsilon_0 = \iiint_V \text{div} \vec{E} d\tau$$

$$\text{d'où } \text{div} \vec{E} = \rho / \epsilon_0$$

3) Equations de Poisson et de Laplace.

$$\vec{E} = -\text{grad}(V) \text{ et } \text{div} \vec{E} = \rho / \epsilon_0 \Rightarrow \Delta V + \rho / \epsilon_0 = 0$$

Résolution : unicité de la solution (propriété admise).

Solution admise (s'il n'y a pas de charges à l'infini) $V = \iiint \rho d\tau / 4\pi\epsilon_0 r$ d'où on

déduit $\vec{E}$

Extremum de potentiel.

4) Cas d'un régime stationnaire non statique.

Quelles sont les équations qui restent vraies?

III) Conditions de passage de $\vec{E}$ à la traversée d'une surface chargée.

Démonstration de $\vec{E}_2 - \vec{E}_1 = \sigma \cdot \vec{n}_{1,2} / \epsilon_0$

E5 Conducteurs en équilibre électrostatique.

I) Définition de l'équilibre électrostatique d'un conducteur

1) Conducteurs.

Un conducteur est un corps à l'intérieur duquel et sur la surface duquel, des charges peuvent se déplacer sous l'action d'une force aussi petite soit-elle. Il contient des "porteurs de charge" ou "charges libres" (électrons dans un métal, ions dans un électrolyte).

2) Conducteur en équilibre électrostatique.

Définition.

II) Propriétés d'un conducteur en équilibre électrostatique.

1) Champ électrostatique.

Démonstration de la propriété : $\vec{E} = \vec{0}$.

2) Potentiel électrostatique.

Démonstration de la propriété : V est le même en tout point d'un conducteur en équilibre.

3) Densité volumique de charge.

Démonstration de la propriété : $\rho=0$ d'où les charges ne peuvent être que superficielles.

σ dépend de tout l'univers : exemple d'une sphère et d'une charge ponctuelle à l'extérieur : étude du champ électrique à l'intérieur du conducteur.

4) Cas d'un conducteur creux.

Cavité vide de charge : démonstration des propriétés suivantes : $V=\text{cste}$, $\vec{E} = \vec{0}$, pas de charge à la surface conducteur/cavité.

Expérience de la cage de Faraday.

Applications pratiques.

III) Champ électrique au voisinage d'un conducteur en équilibre.

1) Théorème de Coulomb.

On utilise la condition de passage de $\vec{E}$ pour montrer que : $\vec{E} = \sigma \vec{n} / \epsilon_0$

Application numérique : valeur de " σ " à la surface de la terre.

Exemple d'une sphère en présence d'une charge ponctuelle à l'extérieur.

Pouvoir des pointes avec expérience.

2) Pression électrostatique.

Expérience.

Démonstration de $d\vec{F} = \sigma^2 \cdot dS \cdot \vec{n} / 2\epsilon_0$.

Application numérique.

IV) Equilibre électrostatique d'un système de conducteurs séparés par le vide.

1) Définition.

Définition de l'équilibre.

Il faut chercher la solution de $\Delta V=0$ avec des conditions limites.

2) Théorème de superposition des états d'équilibre.

Démonstration.

3) Théorème d'unicité.

Démonstration sur polycopié.

Si on se donne pour un ensemble de conducteurs en équilibre, séparés par le vide,

-soit les potentiels de tous les conducteurs,

-soit les charges totales de tous les conducteurs,

-soit les potentiels des uns et les charges totales des autres,

l'état d'équilibre (c'est à dire la fonction potentiel en tout point de l'espace) est parfaitement déterminé.

4) Capacité d'un conducteur seul dans l'espace.

Définition.

Exemple d'une sphère.

E6 Condensateurs.

I) Rappels sur le phénomène d'influence.

Etude qualitative et expérience.

II) Définitions.

1) Condensateur.

Un condensateur est un ensemble de deux conducteurs dont l'un entoure complètement l'autre.

Schéma.

On dit aussi qu'un condensateur est un système de deux conducteurs en influence totale, c'est à dire que toute ligne de champ issue de l'un aboutit sur l'autre.

2) Charge du condensateur.

On montre que : $Q_1 = -Q_2$ (appelée la charge du condensateur).

Q_1 est proportionnelle à $U = V_1 - V_2$.

d'où $Q_1 = C(V_1 - V_2)$: définition de la capacité.

III) Calculs de capacités.

1) Méthode de calcul.

2) Exemples lorsqu'il y a le vide entre les armatures.

Condensateurs plan, cylindrique (sphérique en exercice).

3) Influence d'un diélectrique.

Quelques mots sur les diélectriques.

On admet $C = \epsilon_r C_0$

Valeurs numériques de ϵ_r et du champ disruptif.

Différents condensateurs utilisés en pratique.

4) Résistance de fuite.

Exemple du condensateur cylindrique.

5) Associations de condensateurs.

Capacité équivalente.

IV) Energie d'un condensateur.**1) Définition.**

Schéma d'une décharge avec états initial, intermédiaire, final (avec source de tension variant de E à 0).

On montre que $W = Q^2/2C$.

2) Localisation de l'énergie.

On montre pour le condensateur plan $W/\tau = \epsilon_0 E^2/2$ (τ étant le volume considéré).

Généralisation admise ($W = \iiint \epsilon_0 E^2 d\tau / 2$).

III. Détails des interventions pédagogiques.

Dans tout ce qui suit, ce qui a été noté au tableau (parfois en "style télégraphique") et donc écrit par les élèves sera transcrit en italique (excepté les titres des paragraphes).

Première intervention : 1991-92

L'intervention a essentiellement consisté en l'incorporation de quelques phrases-clefs.

Cours E4 : III Conditions de passage du champ électrique à la traversée d'une surface chargée :

La surface chargée est conductrice ou isolante.

Cours E5 : II Propriétés d'un conducteur en équilibre électrostatique :

Après avoir démontré que la distribution de charge d'un conducteur en équilibre ne peut être que superficielle (on la note (σ)) : *les charges superficielles sont réparties de façon à ce que $\vec{E}(M) = \vec{0}$ en tout point M intérieur au conducteur, $\vec{E}(M)$ étant produit par (σ) et d'éventuelles distributions de charges à l'extérieur du conducteur.*

III Champ électrique au voisinage d'un conducteur en équilibre :

1) Théorème de Coulomb :

Après la démonstration du théorème : *$\vec{E}(M) = \sigma \vec{n} / \epsilon_0$ est le champ électrique en M , créé par toutes les charges de l'univers et la valeur de σ sur le conducteur dépend de toutes les charges de l'univers.*

III 2) Pression électrostatique :

La force élémentaire cherchée est : *" $d\vec{F} = dq \cdot \vec{E}_1 = \sigma dS \cdot \vec{E}_1$ " où dq est la charge de la surface dS et $\vec{E}_1$ est le champ créé par tout l'univers sauf dS*

Deuxième intervention : 1992-1993.

Voici le détail des modifications à l'intérieur des cours E5 et E6.

Cours E5 II 3) Densité volumique de charge :

Après avoir démontré que la densité volumique de charge était nulle à l'intérieur d'un conducteur : *Les charges superficielles sont réparties de façon à ce que $\vec{E}(M) = \vec{0}$ en tout point M intérieur au conducteur.*

Exemple :

Considérons un conducteur sphérique seul dans l'espace

On observe le schéma du transparent 1 (voir p 211).

Dans tout le cours " (σ) " désigne une distribution surfacique de charge (alors que " σ " désigne la valeur de la densité surfacique de charge).

(σ) répartie uniformément (par raison de symétrie), crée un champ $\vec{E} = \vec{0}$ en tout point intérieur à la sphère.

Supposons qu'on approche du conducteur une charge ponctuelle q , avec pour le schéma $\sigma < 0$ $q > 0$.

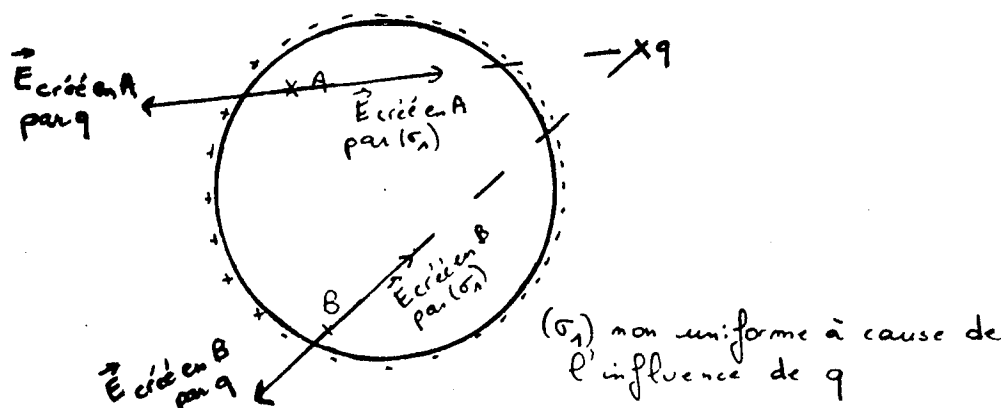
la charge q crée un champ électrique en tout point de l'espace : $\vec{E}_{\text{créé par } q} = q\vec{u} / 4\pi\epsilon_0 r^2$.

La projection des transparents a été accompagnée du commentaire (oral) suivant de la part du professeur.

"Associons à q quelques vecteurs champs : voici le transparent 2 (voir p 212) , où les champs en $1/r^2$ ont été représentés à l'échelle. En tout point M du conducteur, q crée donc un champ. Le champ total existant en M est la superposition du champ crée par les charges du conducteur : (σ_1) et par la charge q . Et nous savons que ce champ total est nul. En fait la répartition de charges (σ_1) n'est plus uniforme : q influence le conducteur : les charges négatives du conducteur attirées par $q > 0$ se groupent vers q d'où un défaut de charges négatives du côté du conducteur opposé à q (c'est ce que montre le transparent 3 (voir p 213)). Et (σ_1) crée en tout point du conducteur un champ opposé à celui créé par q (ce qu'on observe sur la superposition des transparents 2 et 3 et d'un transparent 4 pour la légende (voir p 214)).

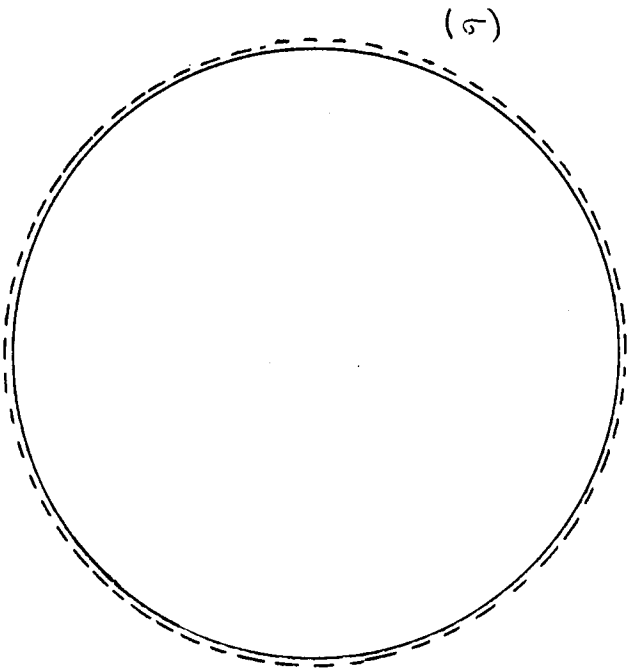
Si on continue à approcher q , la répartition de charge du conducteur est modifiée de nouveau, les champs $\vec{E}$ créé par q en A et $\vec{E}$ créé par (σ_1) en A sont modifiés, mais leur somme est toujours nulle, il en est de même en d'autres points : c'est ce qu'indique la superposition des transparents 2 et 5 (voir p 215).

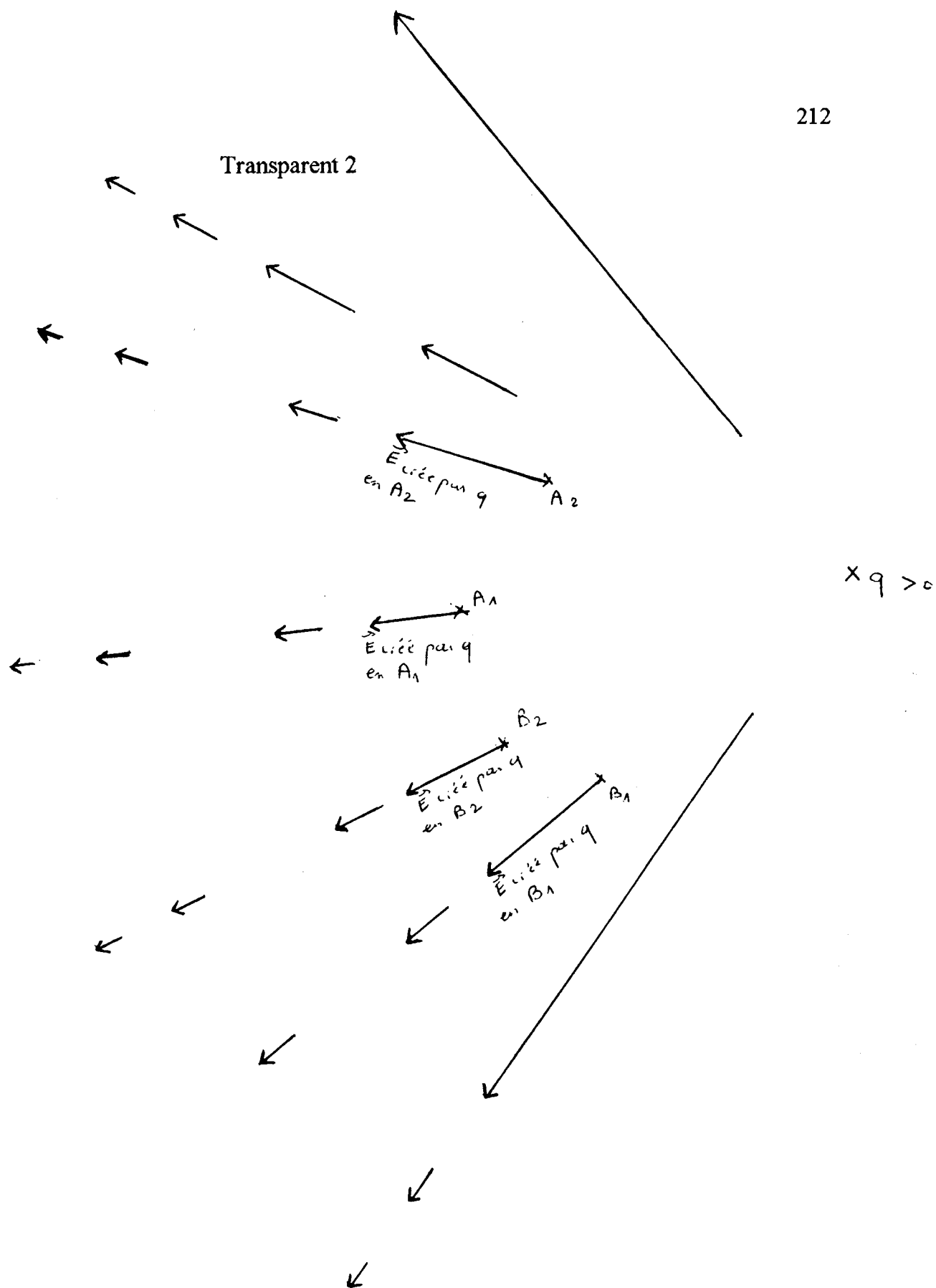
Résumons ceci par un schéma au tableau :



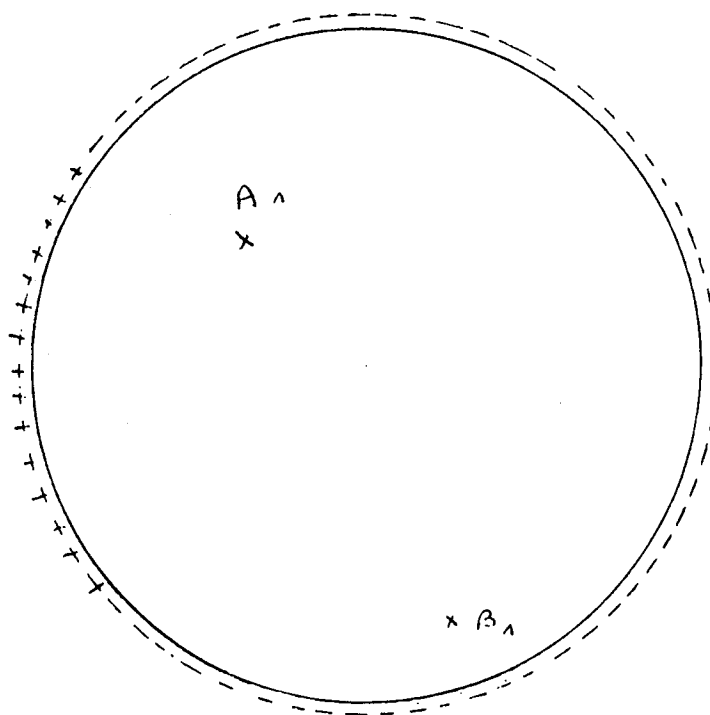
A l'équilibre, en tout point à l'intérieur du conducteur, $\vec{E}_{\text{créé par } q} + \vec{E}_{\text{créé par } (\sigma_1)} = \vec{0}$

Transparent 1



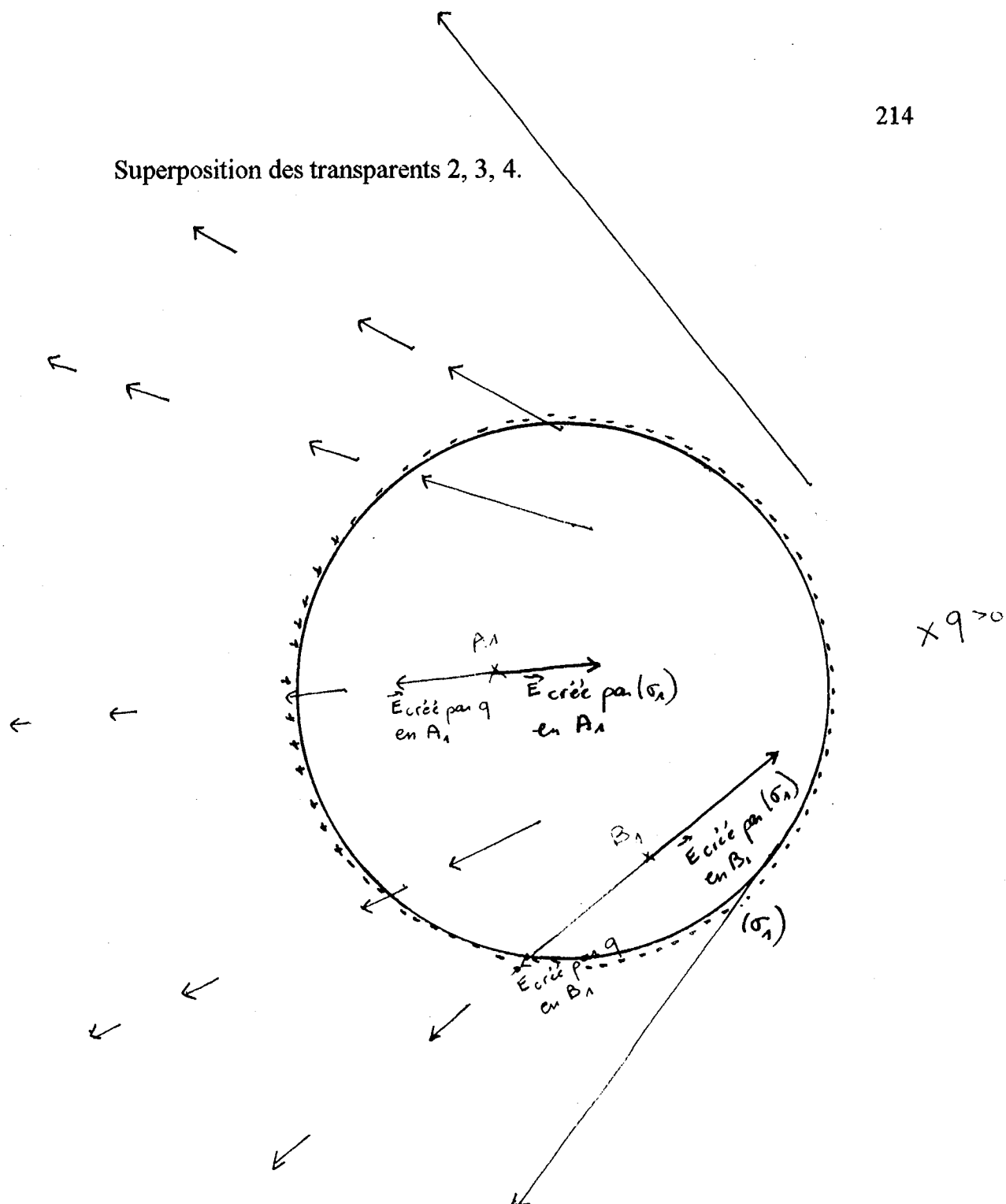


Transparent 3



$$x q > 0$$

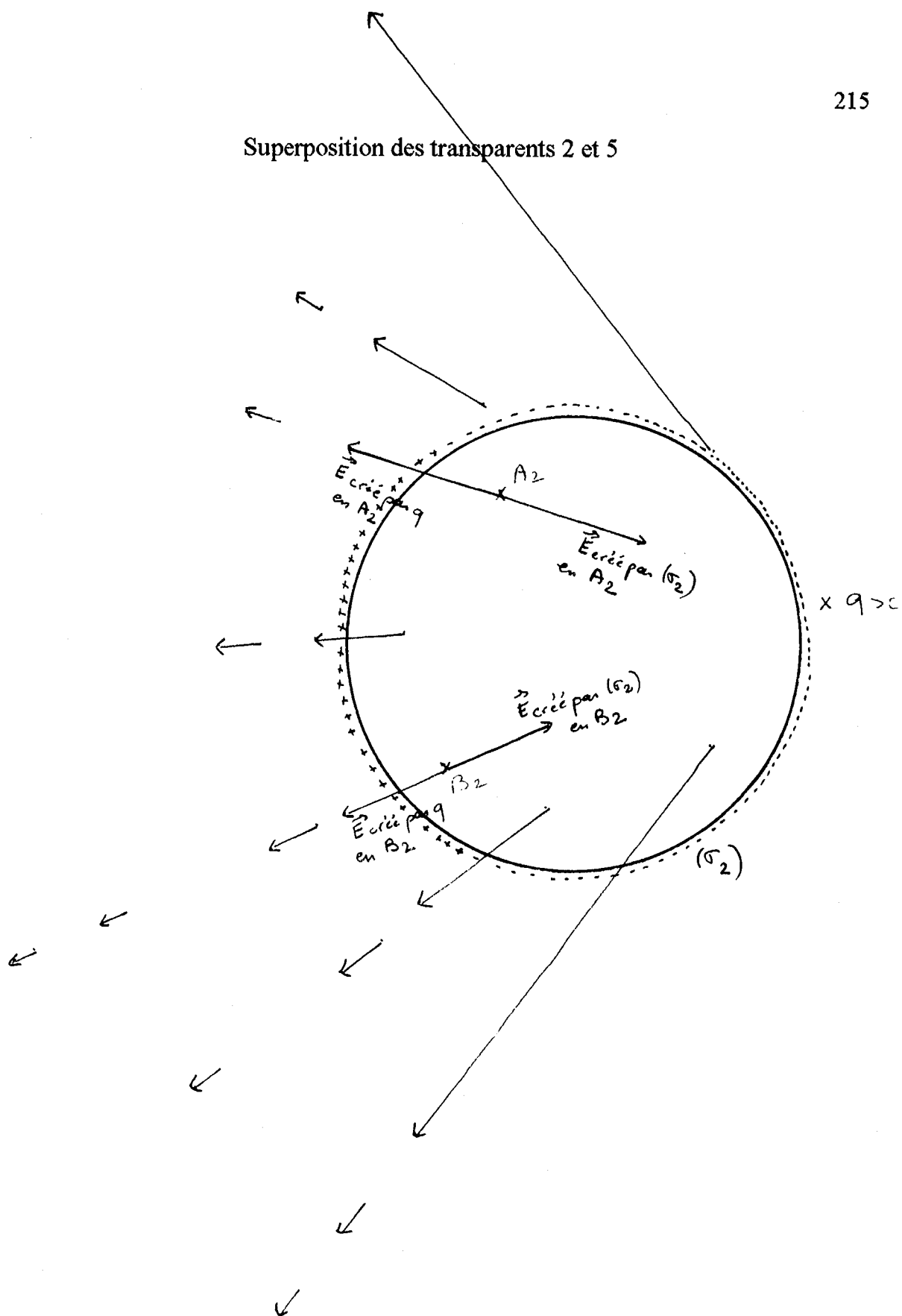
Superposition des transparents 2, 3, 4.



(σ_1) non uniforme à cause de l'influence de la charge q

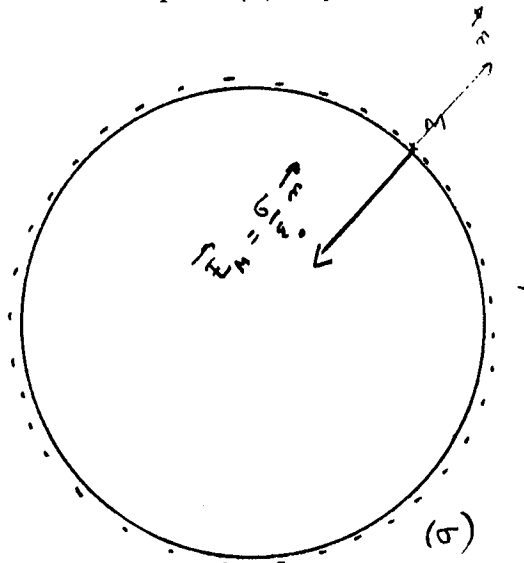
$\vec{E}$ en A_1 $\vec{E}$ créé par (σ_1) en A_1 $\vec{E}$ créé par q en A_1
 $\vec{E}$ en B_1 $\vec{E}$ créé par (σ_1) en B_1 $\vec{E}$ créé par q en B_1

Superposition des transparents 2 et 5



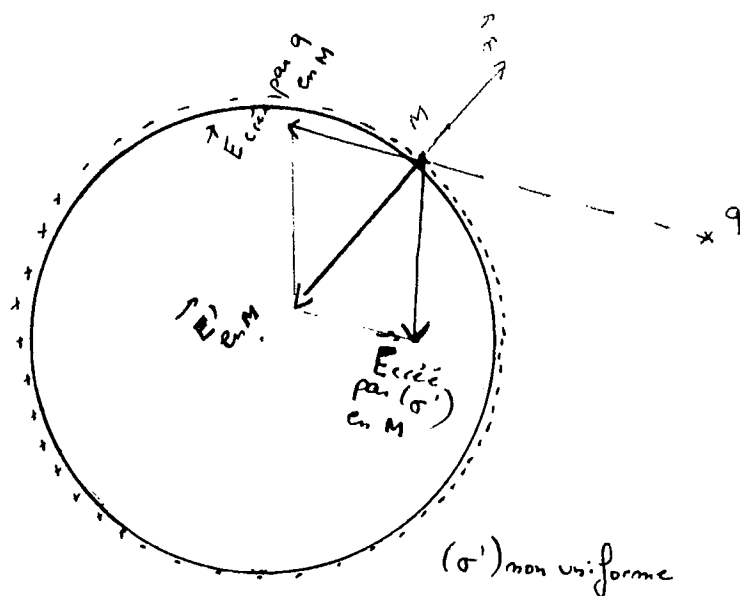
III Après la démonstration du théorème de Coulomb vient un exemple :

Soit une sphère seule dans l'espace, (σ) uniforme $\sigma < 0$



Supposons la sphère en présence de la charge $q > 0$

On représente le champ électrique créé par q , le champ électrique total. On en déduit le champ électrique créé par le conducteur.



$$\vec{E}'_{\text{en } M} = \vec{E}_{\text{créé par } q \text{ en } M} + \vec{E}_{\text{créé par } (\sigma') \text{ en } M} = \sigma' \vec{n} : \epsilon_0$$

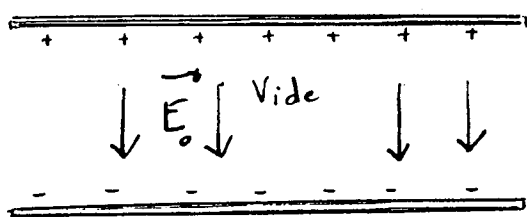
Cours E6

-Pour alléger ce chapitre, le calcul de la capacité du condensateur sphérique a été supprimé du cours et mis en exercice.

-D'autre part, les diélectriques ne sont pas au programme en Spé T et on doit admettre la formule $C = \epsilon_r C_0$ donnant la capacité d'un condensateur contenant un diélectrique de permittivité relative ϵ_r (C_0 étant la capacité d'un condensateur identique, mais avec le vide entre les armatures). Mais en 1992-93, quelques remarques qualitatives ont été ajoutées dans le cours à propos des diélectriques :

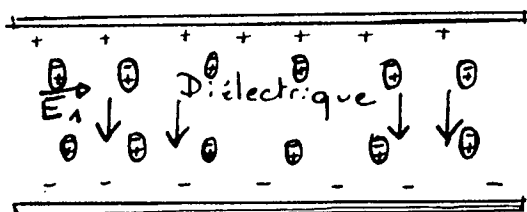
Le calcul de C doit être modifié à cause du champ électrique créé par les charges du diélectrique (molécules polarisées=ensemble de dipôles).

Les schémas suivants ont été observés au rétroprojecteur :



$$E_0 = Q/S\epsilon_0$$

(S=surface d'une armature)



Dans le diélectrique

$$E_1 = Q/S\epsilon_0\epsilon_r < E_0$$

Ces schémas ont été accompagnés du commentaire (oral) suivant de la part du professeur.

"Les dipôles du diélectrique s'orientent de façon à ce que leurs moments dipolaires aient la direction et le sens du champ électrique, ils sont alors en équilibre stable : l'énergie potentielle $E_p = -\vec{p} \cdot \vec{E}$ (formule vue en Sup T) est minimale.

Les charges des armatures et les dipôles du diélectrique produisent des champs de sens inverses, c'est pourquoi le champ dans le diélectrique est plus petit que celui qu'on obtenait dans le vide pour la même charge : en présence de diélectrique $E = Q/S\epsilon_0\epsilon_r$ et $\epsilon_r > 1$."

Lorsque le diélectrique est linéaire, homogène, isotrope, nous admettons que la capacité du condensateur est $C = \epsilon_r C_0$.

Troisième intervention : 1993-94 et 1994-95.

Cours E4 :

La démonstration des conditions de passage du champ électrique à la traversée d'une surface chargée a été accompagnée d'un schéma, présentant une multiplicité de sources pour les champs électriques régnant dans les deux demi-espaces définis par la surface chargée.

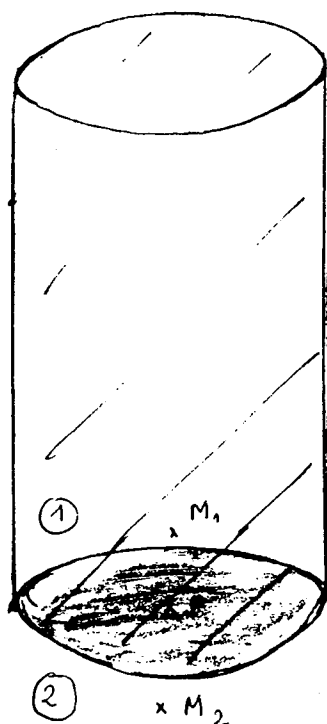
Avant de débiter la démonstration classique, le problème a été posé le plus complètement possible :

Schémas possibles :

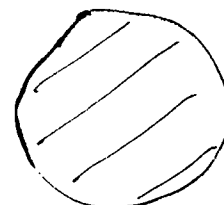
En rouge : tout ce qui est chargé.

En violet : la surface étudiée.

Exemple 1



$\times q_1$



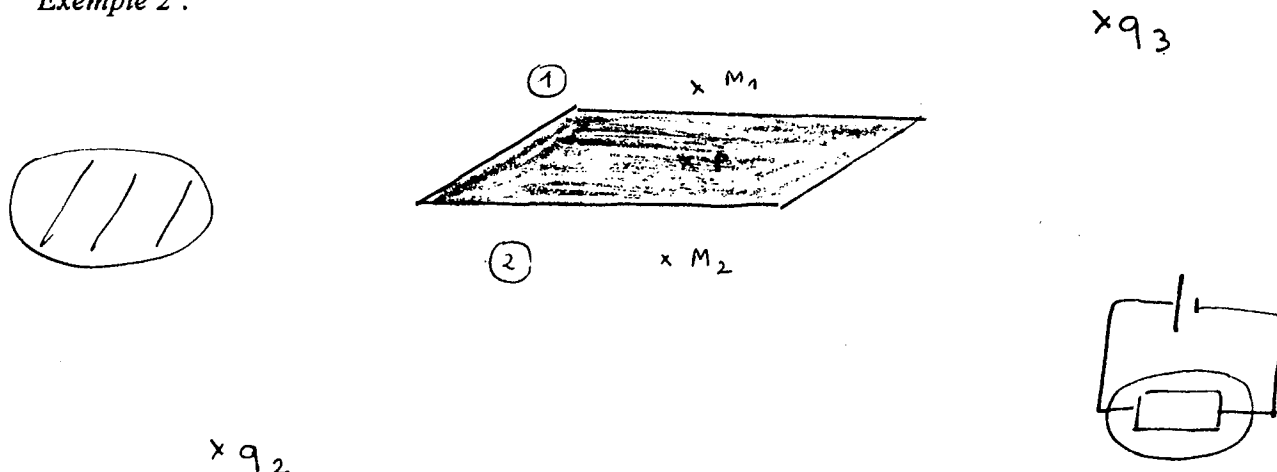
Ces schémas ont été accompagnés du commentaire (oral) suivant de la part du professeur.

"Remarques : Nous verrons dans le cours du chapitre E5 qu'à l'équilibre électrostatique, un conducteur n'est chargé qu'en surface. Par contre un isolant peut être chargé en volume et aussi en surface.

Ce que nous allons démontrer dépasse le cadre de l'électrostatique : cela est valable en régime permanent d'électrocinétique, c'est pourquoi j'ajouterai un circuit électrique dans le schéma suivant (De plus nous

verrons plus tard que le résultat reste vrai en régime variable, mais la démonstration sera alors différente)".

Exemple 2 :



Soient : P sur la surface chargée,

σ la densité surfacique de charge en P .

Le plan tangent à la surface en P permet de définir deux demi-espaces 1 et 2.

Soient : $\vec{n}_{1,2}$ un vecteur unitaire, normal en P à la surface chargée, orienté de la zone 1 vers la zone 2,

M_1, M_2 tout près de la surface chargée, M_1 dans la zone 1, M_2 dans la zone 2; M_1, M_2 sont quasiment confondus avec P .

On appelle

$\vec{E}_1$: le champ électrique qui règne en M_1 (champ créé par toutes les charges de l'Univers).

$\vec{E}_2$: le champ électrique qui règne en M_2 (champ créé par toutes les charges de l'Univers).

cherchons quelle relation il y a entre $\vec{E}_1$ et $\vec{E}_2$.

Suit la démonstration habituelle.

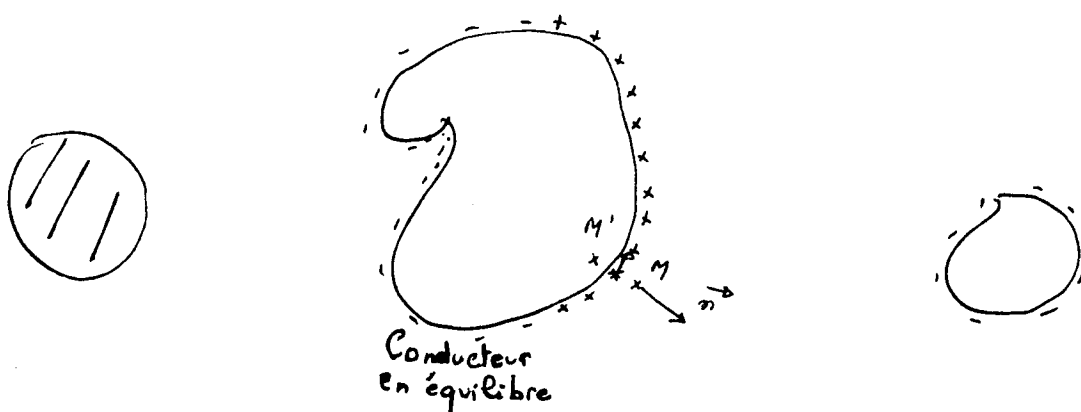
La position préalable du problème a donc déjà permis de mettre en évidence les multiples sources d'un champ total tel que $\vec{E}_1$ ou $\vec{E}_2$.

Cours E5 :

III Champ électrique au voisinage d'un conducteur en équilibre :

1) Théorème de Coulomb :

a) démonstration :



On indique par ce premier schéma que le conducteur n'est pas forcément seul dans l'espace et que la densité surfacique de charge n'y est pas forcément uniforme.

P est à la surface du conducteur étudié.

σ est la densité surfacique de charge en P .

M est à l'extérieur du conducteur, au voisinage de la surface du conducteur en P .

M' est à l'intérieur du conducteur, au voisinage de P .

$\vec{n}$ est normal à la surface en P , unitaire, vers l'extérieur du conducteur.

Condition de passage :

$$\vec{E}(M) - \vec{E}(M') = \sigma \vec{n} / \epsilon_0$$

$$\vec{E}(M') = \vec{0} \text{ (intérieur d'un conducteur en équilibre).}$$

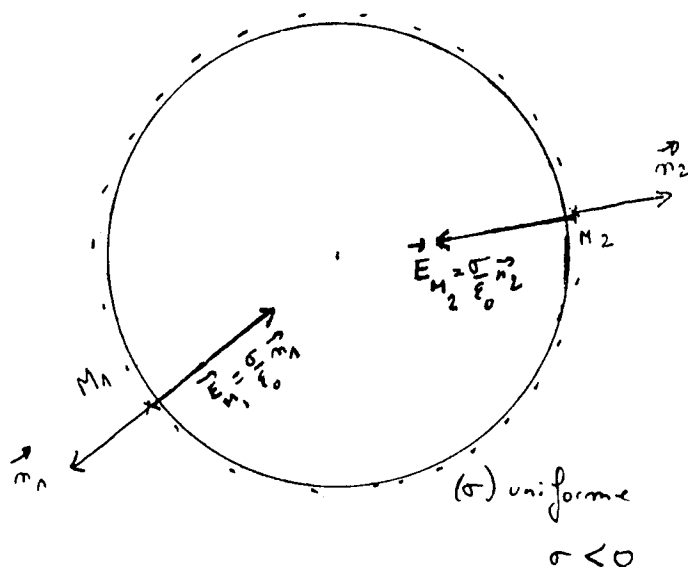
$$\text{donc } \vec{E}(M) = \sigma \vec{n} / \epsilon_0$$

Remarque : il s'agit du champ électrique créé par toutes les charges de l'Univers et la valeur de σ dépend de toutes les charges de l'Univers.

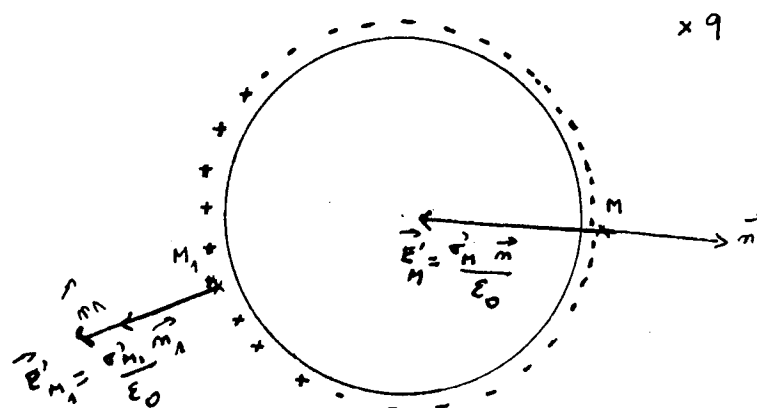
b) exemple :

Pour ne pas risquer d'introduire des confusions entre les différentes composantes et le champ total, nous avons pris soin de ne dessiner d'abord que le champ total.

Sphère seule dans l'espace :



Sphère en présence de $q > 0$:



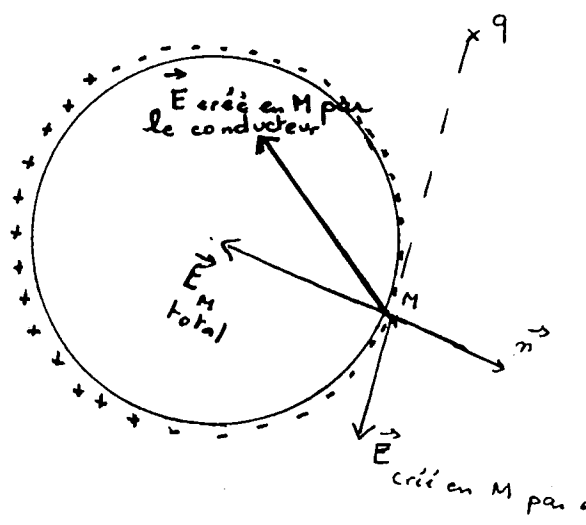
On a supposé ici
en M : $\sigma'_M < 0$
en M_1 : $\sigma'_{M_1} > 0$

Ce schéma a été accompagné de la remarque suivante de la part du professeur.

"Il faut bien retenir que $\sigma' \vec{n} / \epsilon_0$ désigne le champ total régnant en un point au voisinage de la surface du conducteur. Dans notre exemple, les sources de ce champ $\sigma' \vec{n} / \epsilon_0$ sont la charge q et les charges superficielles (σ').

Seriez-vous capables de trouver le champ créé par les charges superficielles du conducteur?"

Plusieurs étudiants ont su répondre à cette question : on connaît le champ total $\sigma' \vec{n} / \epsilon_0$, on connaît, par la loi de Coulomb, le champ créé par la charge q . Par différence, on peut donc en déduire le champ créé par le conducteur.



On trouve le champ créé par le conducteur grâce au principe de superposition :

$$\vec{E}_{\text{tot}} = \sigma' \vec{n} / \epsilon_0 = \vec{E}_{\text{créé par le conducteur}} + \vec{E}_{\text{créé par } q}$$

$$\text{donc : } \vec{E}_{\text{créé par le conducteur}} = \sigma' \vec{n} / \epsilon_0 - \vec{E}_{\text{créé par } q}$$

"Remarque : $\sigma' \neq \sigma$ à cause du phénomène d'influence d'où $\sigma \vec{n} / \epsilon_0 \neq \sigma' \vec{n} / \epsilon_0$.
Le champ total en M a changé par rapport à la situation où la sphère était seule. C'était prévisible et on le vérifie à l'aide des expressions du champ total."

Puis l'étude a porté sur une modification de situation :

"Que se passe-t-il si la charge q change de place?"

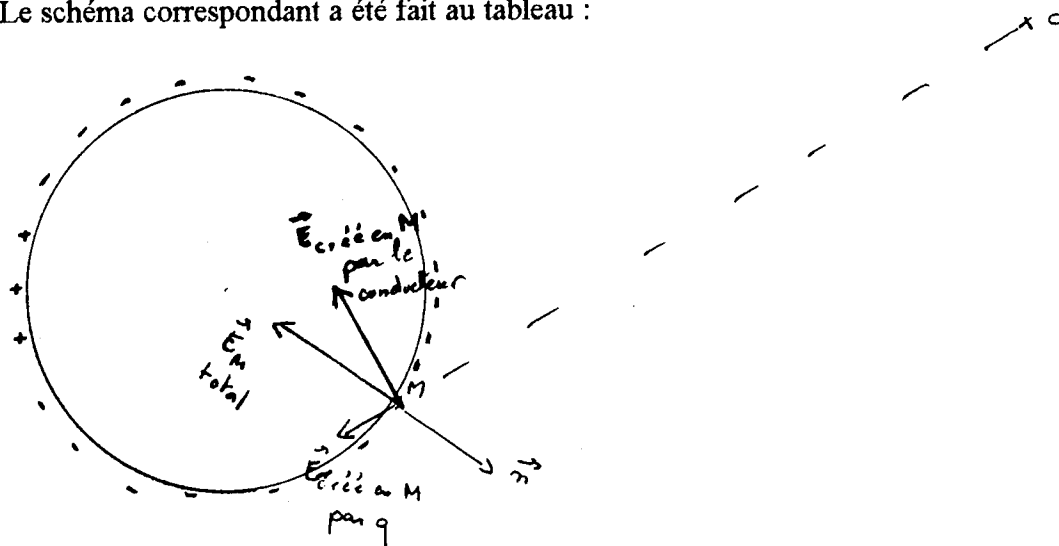
Supposons la charge q un peu plus loin du conducteur :

"Qu'est-ce qui va changer?"

Les étudiants ont dit d'emblée que conformément à la loi de Coulomb, le champ créé par la charge q changeait. Puis ils ont dit que le champ total changeait (certains ont alors utilisé un argument basé sur l'utilisation du théorème de Coulomb, avec considération du phénomène d'influence). Le point le plus sensible du problème (et celui qui les a le plus gênés) était le champ créé par le conducteur.

Mais après une courte discussion les étudiants ont admis que puisque la distribution superficielle de charge sur le conducteur était modifiée, le champ créé par cette distribution devait changer en tout point.

Le schéma correspondant a été fait au tableau :



Une situation analogue a été reprise en exercice en modifiant la valeur de q sans modifier la position de cette charge.

Cours E6 : il n'y a quasiment pas eu de changement par rapport à la deuxième intervention pédagogique, mais la partie I Rappels sur le phénomène d'influence a été un peu plus développée.

En ce qui concerne les exercices par rapport à la deuxième intervention pédagogique, il y a eu quelques changements :

13 exercices ont été cherchés en classe dont 6 nécessitant l'emploi du principe de superposition (ce qui fait à peu près la même proportion que les années précédentes.)

L'exercice n°5E5 (dont le texte figure p 228) a repris l'étude faite en cours à propos du théorème de Coulomb : il a fortement déconcerté certains étudiants qui, de prime abord pensaient qu'un champ $\vec{E}$ tangent au conducteur était impossible. Bien entendu cette situation était possible car $\vec{E}$ désignait ici le champ créé par le conducteur, qui peut avoir une direction quelconque, contrairement au champ total, toujours normal au conducteur.

L'exercice n°1E5 (dont le texte figure en p 227) était comparable au changement de situation étudié en cours, on y modifiait la valeur de la charge ponctuelle située près du conducteur. L'étudiant envoyé au tableau a dit que le champ créé par le conducteur n'était pas modifié, mais certains de ses camarades n'étaient pas d'accord. il y a donc eu discussion, jusqu'à ce que tous reconnaissent qu'il ne fallait pas oublier la modification du phénomène d'influence due à la modification de la charge q .

Devoir à la maison n°7 : explication de texte

L'énoncé figure p 229-230.

Une coquille sphérique métallique isolée et neutre contient une charge ponctuelle q au centre, alors qu'une charge ponctuelle q' est située à l'extérieur.

A propos de cette situation plusieurs étudiants ont répondu ainsi : *"Ce n'est pas q' qui agit directement sur q mais q subit une force par influence de la sphère métallique donc la répartition n'est plus uniforme et donc la sphère crée en O un champ et donc q subit une force."*

L'effet indirect de q' (influence) est donc compris mais son effet direct (création d'un champ en tout point de l'espace) est ignoré.

Mais d'autres réponses témoignent d'une meilleure compréhension : *"La phrase 'la charge q ne subit rien du tout' signifie en fait que la charge q est soumise à plusieurs forces dont la somme est le vecteur nul."*

Devoir surveillé n°6 :

L'énoncé figure p 231-232.

Dans ce problème, il est question de plusieurs sphères concentriques et on y demande

- le calcul du champ électrique en tout point de l'espace
- le résultat obtenu au voisinage des surfaces conductrices (vérification du théorème de Coulomb)
- les sources de ce champ.

Il y a eu quelques réponses correctes (4 sur les 12 ayant abordé cette question, l'un d'entre eux ayant répondu entièrement juste au test "Conducteur dans condensateur", les autres non.) comme : "Toutes les charges de l'univers à savoir les charges portées par la sphère S_0 et les calottes A et B."

Mais il y a eu aussi des erreurs associées à la formule $\sigma \vec{n} / \epsilon_0$: "pour $r \rightarrow R_0$ "

$$\vec{E} = \sigma_0 \vec{n}_0 / \epsilon_0$$

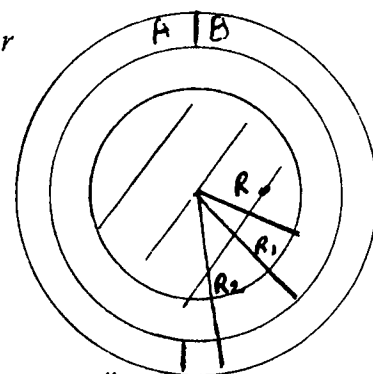
$$r \rightarrow R_1^-$$

$$\vec{E}_1 = \sigma_1 \vec{n}_1 / \epsilon_0$$

$$r \rightarrow R_2^+$$

$$\vec{E}_2 = \sigma_2 \vec{n}_2 / \epsilon_0$$

La source de champ $\vec{E}_0$ est σ_0 , la source de $\vec{E}_1$ est σ_1 , la source de $\vec{E}_2$ est σ_2 ."



Ce devoir a été posé un mois environ après la fin du cours d'électrostatique. Il semble, à la lecture des réponses, que de nombreux étudiants n'ont pas vaincu l'obstacle de "la cause dans la formule" lié au théorème de Coulomb.

IV. Sujets d'exercices et de problèmes.

Sauf indication contraire, il s'agit des sujets pour 1993-94.

Dans ce qui suit certaines références d'ouvrages sont notées en abrégé comme dans l'étude de manuels (voir pages 88-89)

Applications du cours E4.

exercice n°1 : questionnaire "Gauss" (voir énoncé dans le chapitre 1 page 23).

exercice n°2 : propriétés des lignes de champ (Bk p73) : voir texte p 226.

exercice n°3 : application du théorème de Gauss dans ses versions locale et intégrale : détermination de la composante radiale du champ électrique créé par une distribution de charges à symétrie cylindrique, en un point au voisinage de l'axe.

exercice n°4 : calcul de l'énergie électrostatique d'une sphère uniformément chargée en volume (Be tome 1, n°5 p14).

exercice n°5 : calcul du champ de gravitation régnant au sommet d'un volcan conique, superposition des champs créés par le volcan et la terre (Gi).

exercice n°6 : calcul de la force exercée par un dipôle permanent sur une molécule polarisable : force de Debye (Be tome1 p84).

exercice n°7 : résolution de l'équation de Laplace pour un condensateur diédrique (Concours ENSI 1971).

exercice n°8 (1992-93) : étude de l'équilibre d'un système de pendules électriques (texte de S.Fauconnet (1981)) : voir texte p 227.

Applications du cours E5.

exercice n°1 : équilibre d'un conducteur en présence d'une charge ponctuelle (étude d'une modification de situation) : voir texte p 227.

exercice n°2 : étude d'un système de 2 sphères conductrices. (Lumbroso n°1p96).

exercice n°3 : calcul d'une résultante de forces électrostatiques à l'aide de la pression électrostatique (Lumbroso n°4p161).

exercice n°4 : démonstration du théorème des écrans électriques.

exercice n°5 : champ électrique créé par un conducteur : voir texte p 228.

Applications du cours E6.

exercice n°1 : calcul de la capacité et de la résistance de fuite d'un condensateur sphérique, application à un système Terre-nuage.

exercice n°2 : étude de l'équilibre d'un électromètre à plateaux (Lumbroso n°9 p175).

exercice n°3 : calcul de la capacité d'un condensateur plan dans lequel on a introduit une lame conductrice ou isolante (concours EIT 1993).

Devoirs à la maison.

D.M n°6 : Etude d'un système comprenant un pendule électrique et une grosse sphère chargée (L p34) : voir texte p 229.

D.M n°7 : Etude énergétique d'un condensateur plan dont l'une des armatures est mobile (concours de l'Ecole Navale 1986).

D.M n°7 : Explication de texte à propos des phénomènes de superposition et d'influence : voir texte p 229-230.

Devoirs surveillés.

D.S n°3 : Recherche du champ électrique créé par un cylindre de longueur finie (Concours ENAC 1988).

D.S n°4 : Etude d'une ligne bifilaire constituée de deux cylindres.

D.S n°6 : Equilibre électrostatique d'un système de plusieurs sphères (concours commun TA 1993) : voir texte p 231-232.

-En 1994-95 : Etude d'une distribution de charges constituée par deux sphères : voir texte p 232-233.

Interrogation écrite.

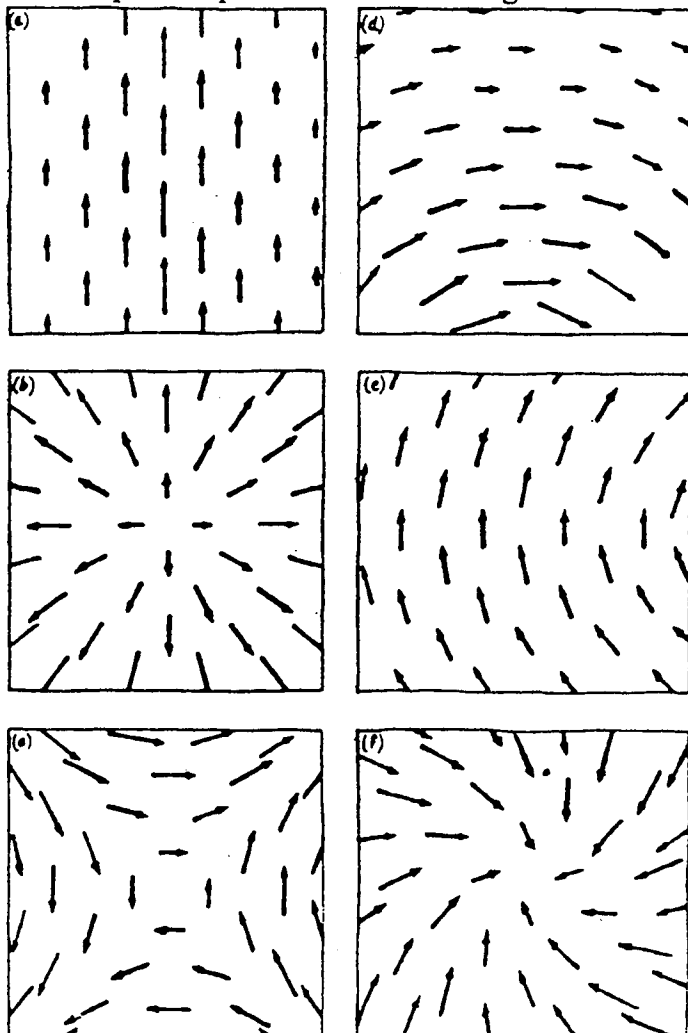
Champ électrique dans un conducteur en équilibre. Conditions de passage. Champ électrique créé par un plan infini uniformément chargé : voir texte p 233.

Quelques énoncés.

Nous avons reproduit les énoncés de quelques exercices ou problèmes, portant plus spécifiquement sur les difficultés analysées dans l'étude de raisonnements, en particulier les difficultés à identifier les sources du champ électrique et à utiliser le théorème de Coulomb.

exercice n°2 E4 (à propos des sources du champ électrique).

Quelles sont parmi les configurations de champ suivantes, celles qui peuvent représenter un champ électrostatique? Où pourraient être les charges sources correspondantes?



Exercice n°8 E4 (principe de superposition).

1) Un pendule électrostatique portant une charge q_A interagit avec une charge q_B située dans le plan horizontal passant par q_A ($q_A q_B < 0$).

La position d'équilibre est schématiquement représentée ci-contre.

On déplace la charge q_B légèrement vers la droite.

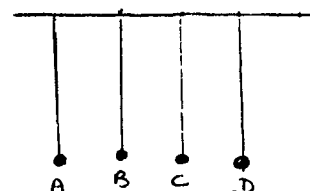
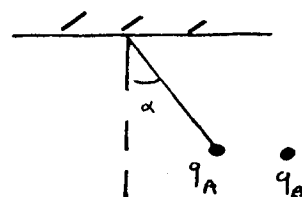
Dans quel sens le pendule va-t-il se déplacer? Pourquoi?

2) Quatre pendules A, B, C, D, alignés, chargés, sont maintenus dans la position indiquée sur le schéma.

On a $AB=BC=CD=d$ et $q_A=2q_0$, $q_B=5q_0$, $q_C=-q_0$, $q_D=3q_0$.

A l'instant t_0 , on lâche simultanément les quatre pendules.

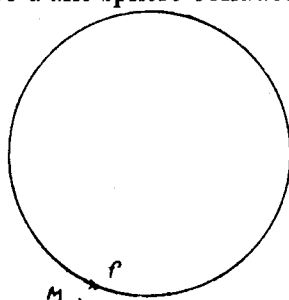
Indiquez sur le schéma la direction et le sens dans lesquels vont partir chacune des charges et expliquez votre réponse.

**Exercice n°1 E5** (analyse d'une modification de situation).

On considère les 2 situations d'équilibre électrostatique suivantes, où une charge ponctuelle q est en présence d'une sphère conductrice chargée isolée.

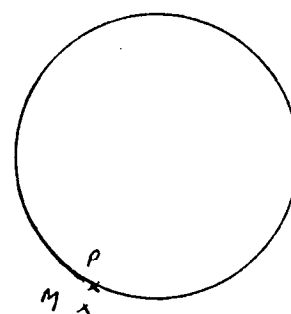
Situation A

q



Situation B

$2q$



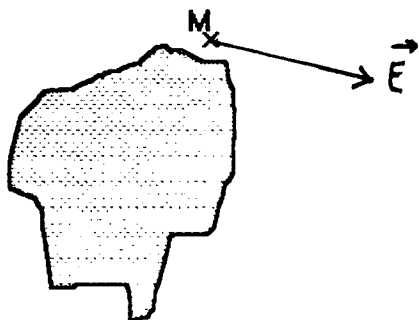
Remplir le tableau suivant :

	oui	non
Le champ créé en M par la charge ponctuelle est le même en A et B.		
Le champ créé en M par la sphère est le même en A et B.		
Le champ total en M est le même en A et B.		
La densité surfacique de charge en P est la même en A et B.		

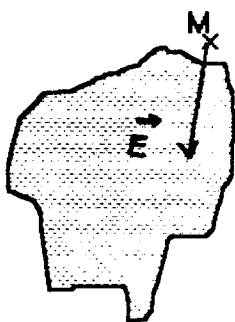
Exercice n°5 E5 (à propos du champ électrique créé par le conducteur et du champ électrique total).

$\vec{E}$ est le champ électrique créé par le conducteur C en M. Les situations 1, 2, 3, sont-elles possibles?

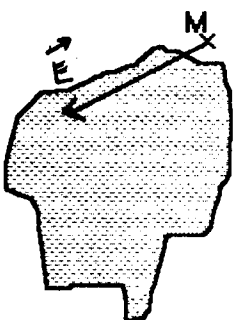
1



2



3



Devoir à la maison n°6 (illustrant les phénomènes de superposition et d'influence).

Un pendule électrique constitué par un petit conducteur sphérique s , de rayon r , de masse m , est suspendu en O par un fil conducteur.

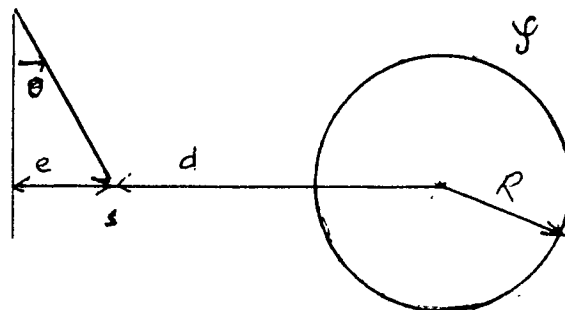
O est relié au sol.

On pose L = distance de O au centre de s .

Une sphère S , de rayon R , isolée dans l'espace, est portée à un potentiel V , puis isolée électriquement.

Elle a alors acquis la charge Q .

On approche alors S de s et on l'arrête dans une position telle que le centre de S soit à la distance d du centre de s et à la même hauteur (voir schéma).



1) Dans la situation finale d'équilibre, déterminer littéralement la charge Q , la charge q' de s , le potentiel V_S de S en fonction de V , r , R , d .

On pourra admettre que $d \gg r$ et $d \gg R$ (cette dernière approximation étant assez grossière en question 2) et que la charge portée par le fil de suspension est négligeable.

2) Exprimer l'écart horizontal e (supposé petit) entre le centre de s et la verticale au point O , en fonction de V , R , L , d , r , m , g (intensité de la pesanteur).

Application numérique : calculer V sachant que : $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$, $m = 1 \text{ dg}$, $r = 1 \text{ cm}$, $R = 5 \text{ cm}$, $d = 25 \text{ cm}$, $L = 98 \text{ cm}$, $e = 6,4 \text{ mm}$, $g = 9,8 \text{ ms}^{-2}$.

Devoir à la maison n°7 (illustrant la recherche des sources du champ électrique et l'analyse de changements de situation).

Explication de texte.

Lire l'énoncé ci-dessous et la solution proposée (extraits de H n°8 p61) et répondre aux questions suivantes :

- 1) Rédiger de façon détaillée la réponse à la question a) de l'énoncé.
- 2) Que signifie la phrase de la solution "La charge q ne subit rien du tout"? Comment pourrait-on formuler plus clairement la question b) de l'énoncé et quelle serait la réponse correspondante?
- 3) En supposant par exemple $q > 0$ et $q' < 0$, détailler la réponse à la question c) de l'énoncé en utilisant des schémas.

Enoncé :

Une charge q se trouve au centre d'une coquille sphérique métallique isolée et neutre.

a) Calculer le champ électrique en tout point à l'intérieur et à l'extérieur de la sphère. Vérifier que ce champ a les valeurs convenables au voisinage des surfaces métalliques.

b) Une charge q' , placée à l'extérieur de la sphère, subit une force $\vec{F}$ due à la présence dans la sphère, de la charge q . La charge q subit-elle une force due à la présence de q' ? Qu'en pensez-vous?

c) La force $\vec{F}$ est-elle plus grande ou plus petite que si la sphère était absente?

d) On remplace la charge q' par une charge double. La force subie sera-t-elle égale à $2\vec{F}$? Y-a-t-il là une contradiction avec la notion de champ électrique? Avec le principe de superposition?

Solution proposée dans le livre :

a) Pour calculer le champ électrique, nous profiterons de la symétrie sphérique pour utiliser des sphères de Gauss concentriques au système.

Nous trouvons ainsi, en tout point intérieur, un champ radial égal à $q/4\pi\epsilon_0 r^2$, et en tout point extérieur aussi.

Dans la masse de la coquille le champ est nul. Près de la surface intérieure, le champ vaut $q/4\pi\epsilon_0 R_1^2$, R_1 étant le rayon de cette face. Comme cette face porte une charge $(-q)$, l'application de la formule donnant le champ au voisinage d'un conducteur en équilibre donne :

$$E = \sigma/\epsilon_0 = -q/4\pi\epsilon_0 R_1^2$$

(le champ E étant compté positivement sur la normale orientée dans le sens métal-vide, c'est à dire vers le centre). On retrouve bien la même valeur. Même chose au voisinage de la surface extérieure, qui porte la charge q .

b) La charge q ne subit rien du tout. On est tenté, à première vue, de trouver là une violation de la loi de l'action et de la réaction. Mais on se rend vite compte du caractère trompeur et ambigu de l'expression "force due à la présence de.. "

Ce qui exerce une force sur q' , ce sont les charges situées sur la surface extérieure. Et q' exerce bien sur elle des forces opposées.

c) Les forces exercées par q' sur les charges portées par la surface extérieure les attirent si q et q' sont de signes contraires, les repoussent si q et q' sont de même signe.

Dans le premier cas, l'attraction sera plus grande qu'en l'absence de sphère. Dans le second cas, la répulsion sera plus faible qu'en l'absence de sphère.

d) Non, car les charges portées par la surface de la sphère seront davantage déplacées.

Il n'y a là aucune contradiction avec la notion de champ électrique : le système de charges créant le champ (les charges sur la sphère) étant modifié, il n'est pas étonnant que le champ ait changé.

Quant au principe de superposition, rappelons qu'il s'applique à des systèmes de charges maintenues à leurs places, et non pas à des "situations" où on ne prendrait pas en compte les déplacements des charges en présence.

Devoir surveillé n°6 (illustration des phénomènes de superposition et d'influence, étude d'une situation d'électrocinétique).

I) Préliminaires.

1) Donner sans démonstration l'expression du champ électrique créé par un plan infini uniformément chargé.

2) Donner avec démonstration l'expression de la capacité d'un condensateur plan (en supposant que le vide règne entre les armatures).

3) Donner sans démonstration l'expression de l'énergie W d'un condensateur en fonction de sa capacité et de la tension à ses bornes. En déduire que, pour un condensateur plan,

$$W = \iiint_{\text{sur tout l'espace}} \epsilon_0 E^2 d\tau / 2$$

où $d\tau$ désigne un volume infiniment petit

ϵ_0 = permittivité du vide

$\vec{E}$ = champ électrique régnant en un point donné.

On admettra la généralité de cette expression de l'énergie dans le cas d'une distribution de charges quelconque.

II) Equilibre électrostatique d'un système de conducteurs.

1) Une sphère parfaitement conductrice (S_0) de rayon R_0 est portée à un potentiel V_0 puis isolée seule dans l'espace.

a) Déterminer sa charge q_0 .

b) Déterminer le champ électrique créé par (S_0) en tout point de l'espace.

c) Déterminer son énergie électrique U_{e0} en fonction de R_0 et V_0 .

d) Où est localisée l'énergie de cette sphère?

e) Calculer U_{e0} pour $R_0 = 6,0 \text{ cm}$ et $V_0 = 10 \text{ kV}$. $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$.

2) Un opérateur entoure (S_0) de deux hémisphères métalliques initialement neutres formant une coquille sphérique (S) isolée, de rayons $R_1 = 10 \text{ cm}$ et $R_2 = 12 \text{ cm}$ et de même centre O que (S_0).

Déterminer en fonction de V_0 et des rayons R_0, R_1, R_2 :

a) La répartition des charges sur les conducteurs.

b) Le champ électrique $\vec{E}(M)$ et le potentiel $V(M)$ en tout point de l'espace.

c) Tracer E et V en fonction de $r = OM$.

d) Commenter les résultats obtenus pour le champ électrique lorsque $r \rightarrow R_0^+$, $r \rightarrow R_1^-$, $r \rightarrow R_2^+$? Quelles sont, dans ces 3 cas, les sources de ces champs électriques?

e) Déterminer, en fonction de V_0 et des différents rayons, la force s'exerçant sur un des deux hémisphères constituant (S) et calculer numériquement sa valeur.

f) Calculer l'énergie électrique du système de conducteurs. En déduire le travail de l'opérateur qui a formé (S) autour de (S_0) et justifier son signe.

3) Les deux sphères précédentes, concentriques et placées dans l'air de permittivité ϵ_0 , forment un condensateur sphérique. L'armature extérieure (S) est mise à la masse et percée d'une petite ouverture permettant à l'armature intérieure (S_0) d'être portée au potentiel V_0 .

Déterminer l'expression de la capacité C_0 de ce condensateur.

III) Effet Joule.

L'espace (l'espace extérieur autant que celui situé entre les armatures par l'intermédiaire de l'ouverture précédemment citée) est rempli d'une substance très faiblement conductrice, de conductivité γ , de permittivité relative $\epsilon_r \approx 1$.

a) Déterminer l'intensité I du courant passant d'une armature à l'autre.

b) En déduire la résistance R de ce système et exprimer la relation liant R à la capacité C .

La conductivité de la substance est de 10^{-13} S/m .

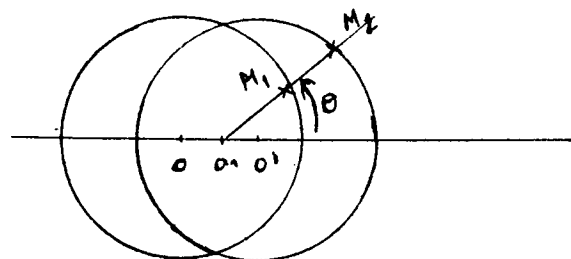
Calculer numériquement C et R . (Les valeurs numériques de R_0 , R_1 , R_2 , V_0 ont été données plus haut).

Devoir surveillé n°3 de 1994-95 (Utilisation du principe de superposition. Vérification de la condition de passage du champ électrique dans le cas où celui-ci a des sources multiples).

1) On considère 2 sphères de même rayon R , uniformément chargées en volume avec des densités volumiques de charge ($-\rho$) pour la sphère de centre O et ρ pour la sphère de centre O' .

Les centres de ces deux sphères sont presque confondus et $OO' = d\vec{e}_x$ ($\vec{e}_x$ unitaire). $d \gg R$.

O'' est le milieu de OO' . Pour M quelconque, on pose $(\vec{e}_x, O''\vec{M}) = \theta$.



1) On peut considérer que l'ensemble de ces deux sphères est équivalent à une distribution de charges réparties sur la surface d'une sphère de centre O'' et de rayon R avec une densité superficielle σ .

Exprimer σ en fonction de ρ , d et θ (on pourra préalablement chercher l'expression de $O''M_2 - O''M_1$: voir schéma).

2) Soit N un point intérieur à chacune des deux sphères.

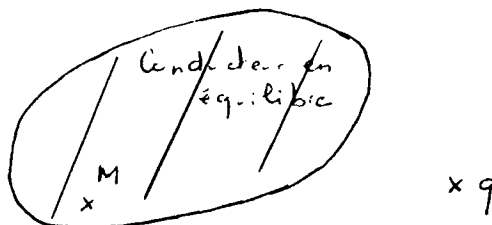
a) Donner avec démonstration l'expression du champ électrique créé par chacune des deux sphères en N .

b) En déduire l'expression du champ électrique total en N .

- 3) Soit P un point extérieur à chacune des deux sphères.
- a) Déterminer le potentiel au point P (on pourra donner sans démonstration, mais avec une phrase explicative, l'expression du potentiel créé par une sphère uniformément chargée en un point extérieur).
- b) En déduire le champ électrique en P.
- 4) On suppose P et N très près des surfaces des sphères : $O''P \rightarrow R^+$, $O''N \rightarrow R^-$.
- a) A l'aide des résultats des questions précédentes, déterminer la différence des champs électriques $\vec{E}(P) - \vec{E}(N)$.
- b) Exprimer cette différence en fonction de σ et commenter le résultat obtenu.
- 5) Tracer l'allure des lignes de champ électrique dans tout l'espace.
- 6) On assimile l'ensemble des deux sphères à un dipôle de moment dipolaire $\vec{p} = \iint \sigma \cdot dS \cdot O'' \vec{M}$.
- a) Justifier cette définition.
- b) Déterminer l'expression du moment dipolaire.
- c) Retrouver ainsi l'expression du potentiel à l'extérieur des sphères (on utilisera sans démonstration l'expression du potentiel créé par un dipôle).

Interrogation écrite de cours (Analyse des sources du champ nul à l'intérieur d'un conducteur en équilibre).

I)



M est à l'intérieur du conducteur en équilibre.

La charge q crée-t-elle un champ électrique en M? Pourquoi?

Que dire du champ électrique total qui existe en M?

II) Enoncer les conditions de passage du champ électrostatique à travers une surface chargée.

III) Donner avec démonstration l'expression du champ électrique créé par un plan infini uniformément chargé en tout point de l'espace.

ANNEXE b
Eléments d'appréciation statistique.

Nous nous proposons dans cette partie d'étudier statistiquement l'évaluation de l'intervention pédagogique par le test "Conducteur dans condensateur" (comparaison entre groupes expérimentaux et témoins).

A) Méthode statistique utilisée.

Il s'agit de la méthode du χ^2 , décrite dans de nombreux ouvrages de statistique (par exemple Reuchlin: 1987), et dans laquelle on effectue les calculs suivants:

- On dispose d'un tableau (échelle nominale) donnant, pour chaque échantillon, le nombre de réponses d'une catégorie donnée (effectif observé). Nous noterons O_{ij} le nombre de réponses observées dans la catégorie i pour l'échantillon j .

- On étudie les échantillons 2 à 2. Pour les 2 échantillons choisis, on dresse le tableau des effectifs théoriques, que l'on calcule en supposant que le taux de réponses d'une catégorie donnée est indépendant de l'échantillon considéré. On notera T_{ij} le nombre théorique de réponses de la catégorie i pour l'échantillon j ($j=1, 2$). Puis on calcule la quantité $\chi^2 = \sum_{j=1}^2 \sum_i (O_{ij} - T_{ij})^2 / T_{ij}$. Ensuite on utilise la table suivante, dans laquelle dl désigne le nombre de degrés de liberté :

$dl = (\text{nombre de catégories} - 1) \cdot (\text{nombre d'échantillons} - 1)$, α désigne une valeur critique de χ^2 (α est souvent appelé "probabilité d'erreur de 1ère espèce").

Par exemple $\alpha_{5\%} = 3,9$ pour $dl=1$. Cela veut dire que si l'on trouve $\chi^2 = 3,9$ pour $dl=1$, alors la configuration observée (tableau des O_{ij}) a une probabilité égale à 5% de se produire si les échantillons sont équivalents. Si $\chi^2 \leq \alpha_{5\%}$, on dit que la différence entre les deux échantillons est non significative. Si $\alpha_{5\%} \leq \chi^2 < \alpha_{1\%}$, on dit que cette différence est significative. Si $\alpha_{1\%} \leq \chi^2 < \alpha_{0,1\%}$, on dit que cette différence est hautement significative. Si $\alpha_{0,1\%} \leq \chi^2$, on dit que cette différence est très hautement significative.

Tableau des valeurs critiques de χ^2 :

dl	$\alpha_{5\%}$	$\alpha_{2,5\%}$	$\alpha_{1\%}$	$\alpha_{0,1\%}$
1	3,9	5,0	6,6	10,8
2	6,0	7,4	9,2	13,8
3	7,8	9,3	11,3	16,3
4	9,5	11,1	13,3	18,5
5	11,1	12,8	15,1	20,5
6	12,6	14,5	16,8	22,5
7	14,1	16,0	18,5	24,3
8	15,5	17,5	20,1	26,1
9	16,9	19,0	21,7	27,9
10	18,3	20,5	23,2	29,6
11	19,7	21,9	24,7	31,3
12	21,0	23,3	26,2	32,9
13	22,4	24,7	27,7	34,5
14	23,7	26,1	29,1	36,1
15	25,0	27,5	30,6	37,7
16	26,3	28,8	32,0	39,3
17	27,6	30,2	33,4	40,8
18	28,9	31,5	34,8	42,3
19	30,1	32,9	36,2	43,8
20	31,4	34,2	37,6	45,3

- Cette étude statistique, qui compare la valeur de χ^2 à des valeurs tabulées de "probabilités d'erreur de 1ère espèce", n'est valide que si aucun effectif théorique n'est strictement inférieur à 1 et si le nombre d'effectifs théoriques strictement inférieurs à 5 est inférieur à 20% du nombre total d'effectifs théoriques (soit $2/i$ pour i catégories et 2 échantillons). Pour cette raison, nous avons effectué des regroupements de catégories de réponses. En effet, pour un nombre d'étudiants donnés, plus le nombre de catégories est élevé, plus il y a de chances pour que les effectifs observés ou théoriques soient petits, l'étude statistique risque alors de ne pas être valide. Aussi, pour chaque question du test "Conducteur dans condensateur", nous avons décidé de considérer seulement 2 ou 3 catégories pour l'étude statistique :

correct / incorrect ou incomplet ou sans réponse.

ou correct / incorrect ou incomplet / sans réponse.

- Lorsque l'étude statistique est valide, la comparaison de χ^2 aux valeurs critiques tabulées permet de savoir si le traitement expérimental (ici : l'intervention pédagogique), appliqué à l'un des deux échantillons, suscite une variation systématique dont l'ampleur dépasse celle des variations fortuites.

B) Résultats de l'étude statistique pour le test "Conducteur dans condensateur".

1) Etude du champ en M1 (à l'intérieur du conducteur).

a) Valeur du champ en M1.

* Tableau des effectifs observés (cf page 136).

	N	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1994-95	39	34	5
R 1993-94	34	30	4
R 1992-93	38	27	11
autres Spé T	107	66	41
M'	39	33	6

* Comparaison des "R 1994-95" et "R 1993-94".

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1994-95	34,19	4,81
R 1993-94	29,81	4,19

Dans ce tableau il y a 2 cases d'effectif théorique inférieur à 5, donc, en principe, l'étude statistique n'est pas valide. Cependant ces effectifs sont proches de 5 (ils valent respectivement 4,81 et 4,19), donc, à la limite, la valeur de χ^2 peut tout de même être interprétée. On obtient $\chi^2=0,019$; dl=1, donc $\alpha_{5\%}=3,9$, $\chi^2 < \alpha_{5\%}$ donc la différence entre les 2 échantillons n'est pas significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1994-95" et "R 1992-93".

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1994-95	30,90	8,10
R 1992-93	30,10	7,90

$$\chi^2=3,041 < \alpha_{5\%}$$

La différence entre les 2 échantillons n'est pas significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1994-95" et "autres Spé T".

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1994-95	26,71	12,29
autres Spé T	73,29	33,71

$$\chi^2=8,611. \text{ Or, pour } dl=1, \alpha_{1\%}=6,6 \text{ et } \alpha_{0,1\%}=10,8.$$

La différence entre les 2 échantillons est hautement significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1994-95" et M'.

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1994-95	33,5	5,5
M'	33,5	5,5

$$\chi^2=0,106.$$

La différence entre les 2 échantillons n'est pas significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1993-94" et "R 1992-93".

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1993-94	26,92	7,08
R 1992-93	30,08	7,92

$$\chi^2=3,212.$$

La différence entre les 2 échantillons n'est pas significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1993-94" et "autres Spé T".

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1993-94	23,15	10,85
autres Spé T	72,85	34,15

$$\chi^2=8,372$$

La différence entre les 2 échantillons est hautement significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1993-94" et M'.

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1993-94	29,34	4,66
M'	33,66	5,34

Dans ce tableau il y a une case d'effectif inférieur à 5, mais proche de 5, donc, à la limite, la valeur de χ^2 peut tout de même être interprétée.

$$\chi^2=0,201.$$

La différence entre les 2 échantillons n'est pas significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1992-93" et "autres Spé T".

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1992-93	24,37	13,63
autres Spé T	68,63	38,37

$$\chi^2=1,070.$$

La différence entre les 2 échantillons n'est pas significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1992-93" et M'.

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1992-93	26,61	8,39
M'	30,39	8,61

$$\chi^2=2,058.$$

La différence entre les 2 échantillons n'est pas significative pour cette question.

* Comparaison des "autres Spé T" et M'.

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
autres Spé T	72,55	34,45
M'	26,45	12,55

$$\chi^2=6,886.$$

La différence entre les 2 échantillons est hautement significative pour cette question.

b) Les sources du champ en M1.

** Tableau des effectifs observés (cf page 137).*

	N	Réponse correcte	Réponse incorrecte	Pas de réponse
R 1994-95	39	11	13	15
R 1993-94	34	7	9	18
R 1992-93	38	2	7	29
autres Spé T	107	1	40	66
M'	39	2	8	29

** Comparaison des "R 1994-95" et "R 1993-94".*

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte	Pas de réponse
R 1994-95	9,62	11,75	17,63
R 1993-94	8,38	10,25	15,37

$$\chi^2=1,554.$$

$$dl=2, \text{ donc } \alpha_{5\%}=6,0.$$

La différence entre les 2 échantillons n'est pas significative pour cette question.

** Comparaison des "R 1994-95" et "R 1992-93".*

	Réponse correcte	Réponse incorrecte	Pas de réponse
R 1994-95	6,58	10,13	22,29
R 1992-93	6,42	9,87	21,71

$$\chi^2=12,474.$$

$$dl=2, \text{ donc } \alpha_{1\%}=9,2, \alpha_{0,1\%}=13,8.$$

La différence entre les 2 échantillons est hautement significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1994-95" et "autres Spé T".

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte	Pas de réponse
R 1994-95	3,21	14,16	21,64
autres Spé T	8,79	38,34	59,36

$$\chi^2=28,769.$$

La différence entre les 2 échantillons est très hautement significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1994-95" et M'.

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte	Pas de réponse
R 1994-95	6,50	10,50	22,00
M'	6,50	10,50	22,00

$$\chi^2=11,876.$$

La différence entre les 2 échantillons est hautement significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1993-94" et "R 1992-93".

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte	Pas de réponse
R 1993-94	4,25	7,56	22,19
R 1992-93	4,75	8,44	24,81

Dans ce tableau il y a 2 cases d'effectif inférieur à 5, mais proche de 5, donc, à la limite, la valeur de χ^2 peut tout de même être interprétée.

$$\chi^2=5,396.$$

La différence entre les 2 échantillons n'est pas significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1993-94" et "autres Spé T".

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte	Pas de réponse
R 1993-94	1,93	11,82	20,26
autres Spé T	6,07	37,18	63,75

$$\chi^2=18,782.$$

La différence entre les 2 échantillons est très hautement significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1993-94" et M'.

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte	Pas de réponse
R 1993-94	4,19	7,92	21,89
M'	4,81	9,08	25,11

Dans ce tableau il y a 2 cases d'effectif inférieur à 5, mais proche de 5, donc, à la limite, la valeur de χ^2 peut tout de même être interprétée.

$$\chi^2=5,092.$$

La différence entre les 2 échantillons n'est pas significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1992-93" et "autres Spé T".

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte	Pas de réponse
R 1992-93	0,79	12,32	24,90
autres Spé T	2,21	34,68	70,10

Il y a une case d'effectif inférieur à 1 dans ce tableau, donc l'étude statistique n'est pas valide.

** Comparaison des "R 1992-93" et M'.*

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte	Pas de réponse
R 1992-93	1,97	7,40	28,62
M'	2,03	7,60	29,38

Dans ce tableau il y a 2 cases d'effectif inférieur à 5, donc l'étude statistique n'est pas valide.

** Comparaison des "autres Spé T" et M'.*

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte	Pas de réponse
autres Spé T	2,20	35,18	69,62
M'	0,80	12,82	25,38

Dans ce tableau il y a une case d'effectif inférieur à 1, donc l'étude statistique n'est pas valide.

2) Etude du champ en M4 (au voisinage d'une armature).

a) Schéma en M4.

** Tableau des effectifs observés (cf page 138).*

	N	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1994-95	39	34	5
R 1993-94	34	31	3
R 1992-93	38	36	2
autres Spé T	107	103	4
M'	39	39	0

Dans chacun des tableaux d'effectifs théoriques, qui vont suivre, il y a 1 ou 2 cases d'effectif inférieur à 5. Par conséquent, aucune des études statistiques correspondantes n'est valable.

Ceci est dû au très faible pourcentage de réponses incorrectes ou de non-réponses dans chaque échantillon.

** Comparaison des "R 1994-95" et "R 1993-94".*

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse corecte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1994-95	34,73	4,27
R 1993-94	30,27	3,73

** Comparaison des "R 1994-95" et "R 1992-93".*

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse corecte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1994-95	35,45	3,55
R 1992-93	34,55	3,45

** Comparaison des "R 1994-95" et "autres Spé T".*

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse corecte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1994-95	36,60	2,40
autres Spé T	100,40	6,60

** Comparaison des "R 1994-95" et M'.*

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse corecte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1994-95	36,50	2,50
M'	36,50	2,50

** Comparaison des "R 1993-94" et "R 1992-93".*

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse corecte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1993-94	31,64	2,36
R 1992-93	35,36	2,64

** Comparaison des "R 1993-94" et "autres Spé T".*

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse corecte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1993-94	32,31	1,69
autres Spé T	101,69	5,31

** Comparaison des "R 1993-94" et M'.*

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse corecte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1993-94	32,60	1,40
M'	37,40	1,60

** Comparaison des "R 1992-93" et "autres Spé T".*

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse corecte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1992-93	36,43	1,57
autres Spé T	102,57	4,43

* Comparaison des "R 1992-93" et M'.

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse corecte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1992-93	37,01	0,99
M'	37,99	1,01

* Comparaison des "autres Spé T" et M'.

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse corecte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
autres Spé T	104,07	2,93
M'	37,93	1,07

b) Sources du champ en M4.

* Tableau des effectifs observés (cf page 139).

	N	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou incomplète	Pas de réponse
R 1994-95	39	12	19	8
R 1993-94	34	6	20	8
R 1992-93	38	0	30	8
autres Spé T	107	2	77	28
M'	39	0	32	7

* Comparaison des "R 1994-95" et "R 1993-94".

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou incomplète	Pas de réponse
R 1994-95	9,62	20,84	8,55
R 1993-94	8,38	18,16	7,45

$$\chi^2=1,691.$$

dl=2, donc $\alpha_{5\%}=6,0$.

La différence entre les 2 échantillons n'est pas significative pour cette question.

** Comparaison des "R 1994-95" et "R 1992-93".*

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou incomplète	Pas de réponse
R 1994-95	6,08	24,82	8,10
R 1992-93	5,92	24,18	7,90

$$\chi^2=14,459.$$

dl=2, donc $\alpha_{0,1\%}=13,8$.

La différence entre les 2 échantillons est très hautement significative pour cette question.

** Comparaison des "R 1994-95" et "autres Spé T".*

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou incomplète	Pas de réponse
R 1994-95	3,74	25,64	9,62
autres Spé T	10,26	70,36	26,38

$$\chi^2=27,615.$$

La différence entre les 2 échantillons est très hautement significative pour cette question.

** Comparaison des "R 1994-95" et M'.*

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou incomplète	Pas de réponse
R 1994-95	6,00	25,50	7,50
M'	6,00	25,50	7,50

$$\chi^2=15,380.$$

La différence entre les 2 échantillons est très hautement significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1993-94" et "R 1992-93".

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou incomplète	Pas de réponse
R 1993-94	2,83	23,61	7,56
R 1992-93	3,17	26,39	8,44

Dans ce tableau, il y a 2 cases d'effectif inférieur à 5, mais proche de 5, donc on peut à la limite interpréter la valeur de χ^2 .

$$\chi^2=7,802.$$

dl=2, donc $\alpha_{1\%}=9,2$ et $\alpha_{5\%}=6,0$.

La différence entre les 2 échantillons est significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1993-94" et "autres Spé T".

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou incomplète	Pas de réponse
R 1993-94	1,93	23,39	8,68
autres Spé T	6,07	73,61	27,32

$$\chi^2=12,038.$$

La différence entre les 2 échantillons est hautement significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1993-94" et M'.

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou incomplète	Pas de réponse
R 1993-94	2,79	24,22	6,99
M'	3,21	27,78	8,01

Dans ce tableau, il y a 2 cases d'effectif inférieur à 5, mais proche de 5, donc on peut à la limite interpréter la valeur de χ^2 .

$$\chi^2=8,533.$$

La différence entre les 2 échantillons est significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1992-93" et "autres Spé T".

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou incomplète	Pas de réponse
R 1992-93	0,52	28,04	9,43
autres Spé T	1,48	78,96	26,57

Dans ce tableau, il y a 1 case d'effectif inférieur à 1, donc l'étude statistique n'est pas valable.

* Comparaison des "R 1992-93" et M'.

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou incomplète	Pas de réponse
R 1992-93	0,00	30,60	7,40
M'	0,00	31,40	7,60

Dans ce tableau, il y a 2 cases d'effectif nul, donc l'étude statistique n'est pas valable.

* Comparaison des "autres Spé T" et M'.

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou incomplète	Pas de réponse
autres Spé T	1,47	79,88	25,65
M'	0,53	29,12	9,35

Dans ce tableau, il y a 1 case d'effectif inférieur à 1, donc l'étude statistique n'est pas valable.

3) Etude du champ en M2 et M3 (au voisinage du conducteur).

a) Schéma en M2 et M3.

**Tableau des effectifs observés (cf page 140).*

	N	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1994-95	39	26	13
R 1993-94	34	19	15
R 1992-93	38	14	24
autres Spé T	107	49	58
M'	39	28	11

** Comparaison des "R 1994-95" et "R 1993-94".*

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1994-95	24,04	14,96
R 1993-94	20,96	13,04

$$\chi^2=0,894.$$

$$dl=1, \text{ donc } \alpha_{50\%}=3,9.$$

La différence entre les 2 échantillons n'est pas significative pour cette question.

** Comparaison des "R 1994-95" et "R 1992-93".*

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1994-95	20,26	18,74
R 1992-93	19,74	18,26

$$\chi^2=6,858.$$

$$dl=1, \text{ donc } \alpha_{1\%}=6,6 \text{ et } \alpha_{0,1\%}=10,8.$$

La différence entre les 2 échantillons est hautement significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1994-95" et "autres Spé T".

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1994-95	20,03	18,97
autres Spé T	54,97	52,03

$$\chi^2=4,985.$$

La différence entre les 2 échantillons est significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1994-95" et M'.

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1994-95	27,00	12,00
M'	27,00	12,00

$$\chi^2=0,24.$$

La différence entre les 2 échantillons n'est pas significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1993-94" et "R 1992-93".

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1993-94	15,58	18,42
R 1992-93	17,42	20,58

$$\chi^2=2,620.$$

La différence entre les 2 échantillons n'est pas significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1993-94" et "autres Spé T".

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1993-94	16,40	17,60
autres Spé T	51,60	55,40

$$\chi^2=1,052.$$

La différence entre les 2 échantillons n'est pas significative pour cette question.

** Comparaison des "R 1993-94" et M'.*

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1993-94	21,89	12,11
M'	25,11	13,89

$$\chi^2=2,005.$$

La différence entre les 2 échantillons n'est pas significative pour cette question.

** Comparaison des "R 1992-93" et "autres Spé T".*

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1992-93	16,51	21,49
autres Spé T	46,49	60,51

$$\chi^2=0,914.$$

La différence entre les 2 échantillons n'est pas significative pour cette question.

** Comparaison des "R 1992-93" et M'.*

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
R 1992-93	20,73	17,27
M'	21,27	17,73

$$\chi^2=9,483$$

dl=1, donc $\alpha_{1\%}=6,6$ et $\alpha_{0,1\%}=10,8$.

La différence entre les 2 échantillons est hautement significative pour cette question.

* Comparaison des "autres Spé T" et M'.

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou pas de réponse
autres Spé T	56,43	50,57
M'	20,57	18,43

$$\chi^2=5,068.$$

La différence entre les 2 échantillons est significative pour cette question.

b) Les sources des champs en M2 et M3.

* Tableau des effectifs observés (cf page 141).

	N	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou incomplète	Pas de réponse
R 1994-95	39	23	8	8
R 1993-94	34	21	12	1
R 1992-93	38	16	12	10
autres Spé T	107	22	42	43
M'	39	14	18	7

* Comparaison des "R 1994-95" et "R 1993-94".

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou incomplète	Pas de réponse
R 1994-95	23,51	10,68	4,81
R 1993-94	20,49	9,32	4,19

$$\chi^2=6,021.$$

dl=2, donc $\alpha_{5\%}=6,0$.

Dans ce tableau, il y a 2 cas d'effectif inférieur à 5, mais proche de 5, on peut à la limite considérer la valeur de χ^2 , mais comme $\chi^2 \approx \alpha_{5\%}$, la différence entre les 2 échantillons n'est pas significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1994-95" et "R 1992-93".

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou incomplète	Pas de réponse
R 1994-95	19,75	10,13	9,12
R 1992-93	19,25	9,87	8,88

$$\chi^2 = 2,266.$$

La différence entre les 2 échantillons n'est pas significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1994-95" et "autres Spé T".

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou incomplète	Pas de réponse
R 1994-95	12,02	13,36	13,62
autres Spé T	32,98	36,64	37,38

$$\chi^2 = 19,782.$$

$$dl=2, \text{ donc } \alpha_{0,1\%}=13,8.$$

La différence entre les 2 échantillons est très hautement significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1994-95" et M'.

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou incomplète	Pas de réponse
R 1994-95	18,50	13,00	7,50
M'	18,50	13,00	7,50

$$\chi^2 = 6,0102.$$

$$dl=2, \text{ donc } \alpha_{5\%}=6,0.$$

La différence entre les 2 échantillons est significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1993-94" et "R 1992-93".

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou incomplète	Pas de réponse
R 1993-94	17,47	11,33	5,19
R 1992-93	19,53	12,67	5,81

$$\chi^2=7,841.$$

dl=2, donc $\alpha_{5\%}=6,0$ et $\alpha_{1\%}=9,2$.

La différence entre les 2 échantillons est significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1993-94" et "autres Spé T".

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou incomplète	Pas de réponse
R 1993-94	10,37	13,02	10,61
autres Spé T	32,63	40,98	33,39

$$\chi^2=25,939.$$

La différence entre les 2 échantillons est très hautement significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1993-94" et M'.

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou incomplète	Pas de réponse
R 1993-94	16,30	13,97	3,73
M'	18,70	16,03	4,27

Dans ce tableau, il y a 2 cases d'effectif inférieur à 5, mais proche de 5, on eut donc à la limite interpréter la valeur de χ^2 obtenue.

$$\chi^2=6,789.$$

La différence entre les 2 échantillons est significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1992-93" et "autres Spé T.

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou incomplète	Pas de réponse
R 1992-93	9,96	14,15	13,89
autres Spé T	28,04	39,85	39,11

$$\chi^2=6,886.$$

La différence entre les 2 échantillons est significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1992-93" et M'.

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou incomplète	Pas de réponse
R 1992-93	14,81	14,81	8,39
M'	15,19	15,19	8,61

$$\chi^2=1,850.$$

La différence entre les 2 échantillons n'est pas significative pour cette question.

* Comparaison des "autres Spé T" et M'.

Tableau des effectifs théoriques.

	Réponse correcte	Réponse incorrecte ou incomplète	Pas de réponse
autres Spé T	26,38	43,97	36,64
M'	9,62	16,03	13,36

$$\chi^2=7,185.$$

La différence entre les 2 échantillons est significative pour cette question.

4) Prise en compte du phénomène d'influence.

** Tableau des effectifs observés (cf page 143).*

	N	oui	non
R 1994-95	39	23	16
R 1993-94	34	17	17
R 1992-93	38	8	30
autres Spé T	107	21	86
M'	39	30	9

** Comparaison des "R 1994-95" et "R 1993-94".*

Tableau des effectifs théoriques.

	oui	non
R 1994-95	21,37	17,63
R 1993-94	18,63	15,37

$$\chi^2=0,591.$$

$$dl=1, \text{ donc } \alpha_{5\%}=3,9.$$

La différence entre les 2 échantillons n'est pas significative pour cette question.

** Comparaison des "R 1994-95" et "R 1992-93".*

Tableau des effectifs théoriques.

	oui	non
R 1994-95	15,70	23,30
R 1993-94	15,30	22,70

$$\chi^2=11,508.$$

$$dl=1, \text{ donc } \alpha_{0,1\%}=10,8.$$

La différence entre les 2 échantillons est très hautement significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1994-95" et "autres Spé T".

Tableau des effectifs théoriques.

	oui	non
R 1994-95	11,75	27,25
autres Spé T	32,25	74,75

$$\chi^2=21,018.$$

La différence entre les 2 échantillons est très hautement significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1994-95" et M'.

Tableau des effectifs théoriques.

	oui	non
R 1994-95	26,50	12,50
M'	26,50	12,50

$$\chi^2=2,885.$$

La différence entre les 2 échantillons n'est pas significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1993-94" et "R 1992-93".

Tableau des effectifs théoriques.

	oui	non
R 1993-94	11,81	22,19
R 1992-93	13,19	24,81

$$\chi^2=6,634.$$

$$dl=1 \text{ donc } \alpha_{1\%}=6,6.$$

La différence entre les 2 échantillons est hautement significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1993-94" et "autres Spé T".

Tableau des effectifs théoriques.

	oui	non
R 1993-94	9,16	24,84
autres Spé T	28,84	78,16

$$\chi^2=12,091.$$

La différence entre les 2 échantillons est très hautement significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1993-94" et M'.

Tableau des effectifs théoriques.

	oui	non
R 1993-94	21,89	12,11
M'	25,11	13,89

$$\chi^2=5,742.$$

dl=1 donc $\alpha_{1\%}=6,6$ et $\alpha_{5\%}=3,9$.

La différence entre les 2 échantillons est significative pour cette question.

* Comparaison des "R 1992-93" et "autres Spé T".

Tableau des effectifs théoriques.

	oui	non
R 1992-93	7,60	21,40
autres Spé T	30,40	85,60

$$\chi^2=0,036.$$

La différence entre les 2 échantillons n'est pas significative pour cette question.

* *Comparaison des "R 1992-93" et M'.*

Tableau des effectifs théoriques.

	oui	non
R 1992-93	18,75	19,25
M'	19,25	19,75

$$\chi^2=24,036.$$

La différence entre les 2 échantillons est très hautement significative pour cette question.

* *Comparaison des "autres Spé T" et M'.*

Tableau des effectifs théoriques.

	oui	non
autres Spé T	37,38	69,62
M'	13,62	25,38

$$\chi^2=41,283.$$

La différence entre les 2 échantillons est très hautement significative pour cette question.

5) Tableau récapitulatif des comparaisons.

Ce tableau résume les comparaisons effectuées entre divers échantillons expérimentaux ou témoins à l'aide du test "Conducteur dans condensateur".

	Direction de $\vec{E}_1$	Sources de $\vec{E}_1$	Direction de $\vec{E}_{2,3}$	Sources de $\vec{E}_{2,3}$	Direction de $\vec{E}_A$	Sources de $\vec{E}_A$	Influence
R 1994-95/ R 1993-94	non si- gnificatif	non si- gnificatif	non valide	non si- gnificatif	non si- gnificatif	non si- gnificatif	non si- gnificatif
R 1994-95/ R 1992-93	non si- gnificatif	haut si- gnificatif	non valide	<u><i>t haut</i></u> <u><i>si-</i></u> <u><i>gnificatif</i></u>	haut si- gnificatif	non si- gnificatif	<u><i>t haut</i></u> <u><i>si-</i></u> <u><i>gnificatif</i></u>
R 1994-95/ autres SpéT	haut si- gnificatif	<u><i>t haut</i></u> <u><i>si-</i></u> <u><i>gnificatif</i></u>	non valide	<u><i>t haut</i></u> <u><i>si-</i></u> <u><i>gnificatif</i></u>	<i>si-</i> gnificatif	<u><i>t haut</i></u> <u><i>si-</i></u> <u><i>gnificatif</i></u>	<u><i>t haut</i></u> <u><i>si-</i></u> <u><i>gnificatif</i></u>
R 1994-95/ M'	non si- gnificatif	haut si- gnificatif	non valide	<u><i>t haut</i></u> <u><i>si-</i></u> <u><i>gnificatif</i></u>	non si- gnificatif	<i>si-</i> <u><i>gnificatif</i></u>	non si- gnificatif
R 1993-94/ R 1992-93	non si- gnificatif	non si- gnificatif	non valide	<i>si-</i> <u><i>gnificatif</i></u>	non si- gnificatif	<i>si-</i> <u><i>gnificatif</i></u>	haut si- gnificatif
R 1993-94/ autres SpéT	haut si- gnificatif	<u><i>t haut</i></u> <u><i>si-</i></u> <u><i>gnificatif</i></u>	non valide	haut si- gnificatif	non si- gnificatif	<u><i>t haut</i></u> <u><i>si-</i></u> <u><i>gnificatif</i></u>	<u><i>t haut</i></u> <u><i>si-</i></u> <u><i>gnificatif</i></u>
R 1993-94/ M'	non si- gnificatif	non si- gnificatif	non valide	<i>si-</i> <u><i>gnificatif</i></u>	non si- gnificatif	<i>si-</i> <u><i>gnificatif</i></u>	*<i>si-</i> <u><i>gnificatif</i></u>
R 1992-93/ autres SpéT	non si- gnificatif	non valide	non valide	non valide	non si- gnificatif	<i>si-</i> <u><i>gnificatif</i></u>	non si- gnificatif
R 1992-93/ M'	non si- gnificatif	non valide	non valide	non valide	*haut <i>si-</i> <u><i>gnificatif</i></u>	non si- gnificatif	<u><i>*t haut</i></u> <u><i>significatif</i></u>
autres SpéT /M'	*haut <i>si-</i> <u><i>gnificatif</i></u>	non valide	non valide	non valide	*<i>si-</i> <u><i>gnificatif</i></u>	*<i>si-</i> <u><i>gnificatif</i></u>	<u><i>*t haut</i></u> <u><i>significatif</i></u>

Lorsque, pour une question donnée, l'étude statistique indique qu'il y a une différence entre 2 échantillons, l'échantillon nommé en premier a un taux de réponses correctes supérieur à celui nommé en second, sauf dans les cas repérés par une astérisque (*) dans le tableau ci-dessus.

La première ligne de ce tableau semble montrer que la même intervention pédagogique a eu quasiment le même effet, lors de ses deux applications successives (1993-94 et 1994-95). La deuxième, et en moindre mesure la cinquième ligne, semblent montrer que la 3ème intervention pédagogique (celle de 1993-94 et 1994-95) a permis aux étudiants de mieux réussir le test "Conducteur dans condensateur" que la 2ème intervention pédagogique (celle de 1992-93). La 3ème et la 6ème ligne semblent indiquer que la 3ème intervention pédagogique a permis aux étudiants des groupes expérimentaux de mieux réussir ce test que les étudiants témoins de même niveau scolaire (autres Spé T). En revanche, la 2ème intervention pédagogique paraît avoir eu très peu d'effet de ce point de vue (voir 8ème ligne). La 4ème et la 7ème ligne du tableau semblent montrer que pour les questions "classiques" de ce test (direction du champ, influence) les résultats des étudiants ayant suivi la 3ème intervention pédagogique rejoignent ceux des étudiants M' de meilleur niveau scolaire et qu'ils les dépassent pour les questions concernant les sources des champs. Enfin les 9ème et 10ème lignes sont révélatrices de la différence de niveau scolaire entre les échantillons (autres Spé T et M').

ANNEXE c
Articles.

Students' reasoning about the superposition of electric fields

L. Viennot and S. Raison, Laboratoire de Didactique de la Physique dans l'Enseignement Supérieur, University of Paris 7, France

This study concerns students' ideas about the superposition of electric fields. Two paper-and-pencil questionnaires were given to university students to investigate possible obstacles to a correct use of this principle.

The results confirm an expected difficulty about Gauss's theorem, i.e., the idea that only 'internal' charges create a field on a given closed surface. Another more surprising finding is that students are reluctant to admit that a field can penetrate into, or go out of, an insulator, particularly because 'charges cannot move'.

These first findings are discussed in connection with common features of students' reasoning about mechanics and about multivariable problems. Some directions of future research are proposed.

Introduction

Reasoning about electric circuits has been extensively investigated in secondary schools as well as at university level (Hartel 1982, Closset 1983, Cohen *et al.* 1983, Riley 1985, Dupin and Johsua 1987, Shipstone 1984, 1985, Shipstone *et al.* 1988). Among the observed difficulties, one is especially resistant to teaching: students tend to adopt sequential reasoning in which an event occurring at a given point in a circuit only affects quantities further downstream (Closset 1983, Shipstone 1984, 1985). Instead, in the accepted 'quasistatic' analysis, the circuit should be seen as a system where several variables change simultaneously under the constraint of several relationships. In this accepted view, a local change in the circuit affects the whole circuit.

Some pedagogical suggestions to overcome this lack of a systemic view of circuits and this sequential approach have been made in recent years. In particular, special attention was given to analogies which emphasize the interactive aspects in the circuit (Hartel 1982, Closset 1983). A need to lead students towards 'voltage minded', rather than 'current minded', reasoning was stressed by Cohen *et al.* (1983). In order to give meaning to the notion of voltage, Psillos *et al.* (1988) suggest focusing on charge concentration at the ends of the battery. Licht (1987) places emphasis on the charge concentration at different points in the circuit. However, Benseghir and Closset (1991) underline the dangers of a careless identification between voltage and differences in charge concentration.

These recent studies and debates support Eylon and Ganiel's (1990) plea for the improvement of students' understanding of 'macro-micro' relationships. Their findings amply show students' difficulties in seeing the role of electric fields in the interplay of the different elements of a circuit. But the electric field itself, and more generally the notion of fields, has not been at the centre of any research on students' reasoning.

The study

After a preliminary phase of interviews and questionnaires, we chose to focus on the principle of the superposition of electric fields created by different systems of charges. This seems of interest for two reasons:

1. This principle is very basic in electrostatics and more generally in linear physics.
2. Teaching experience shows that practically all students accept and spontaneously use this principle – be it correctly or not – for calculating the field created by several charges of given positions in empty space. The point under study in this exploratory inquiry is to what extent this seemingly obvious idea of superposition is resisted when students are confronted with more complex situations.

A set of paper-and-pencil questionnaires was developed and given to different samples of university students in France and Algeria, before or after courses at different levels in electrostatics. The first questionnaire (Q1) deals with a topic where difficulties about the principle of superposition are *a priori* to be expected, namely in Gauss's theorem. The flux of a field created by charges that are external to a given 'Gauss's surface' is zero inside this surface. This is expected to induce the idea that the field created by such charges at a point inside the surface is also zero. The question that then arises is whether students will adopt this idea despite the fact that it contradicts the principle of superposition. The second questionnaire arose from answers to Q1 which showed that the notion of insulators may create obstacles to a correct addition of electric fields. We then decided to investigate this point in greater detail with a set of two questions, Q2 and Q3.

In this paper, questionnaires Q1 on the one hand, Q2 and Q3 on the other, are presented in two separate sections (A and B), each with the corresponding findings. The main reason for this unusual format is that the physical situations involved are rather different, and that neither the correct answers nor the students' comments are very easy to understand. It therefore seems more appropriate to concentrate successively on each type of problem. The three questions bring together pieces of information about the same points: is the principle of superposition a conceptual tool available to students? If not, can we characterize some common obstacles to an appropriate usage of this principle?

The three questions concern insulators, i.e., bodies in which, roughly speaking, charges cannot move. This choice was made to simplify, as far as possible, the questions and the interpretation of the answers. The phenomenon of polarization is not at the centre of this study, but will be taken into account in the interpretation of the answers, when necessary.

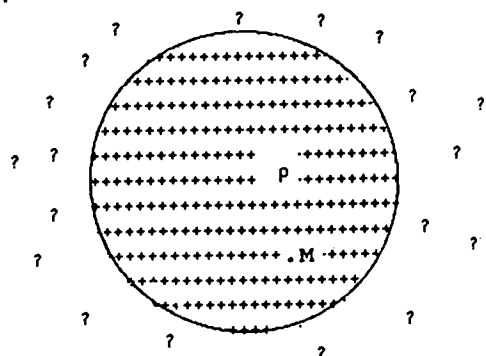
The questionnaires

A. Superposition of fields and Gauss's theorem

1. Question and correct answer

The first part of our investigation relies on a paper-and-pencil questionnaire, Q1, also referred to as the 'Gauss questionnaire' in this paper (see figure 1).

Q1



An insulating sphere of radius R is charged with a *uniform* density of charge ρ . The distribution of charge outside the sphere is unknown. One would like to calculate the electrostatic field at a point M located inside the sphere, that is to say at a distance r from the centre such that $r < R$. Is it possible to make this calculation without knowing the distribution of charge outside the sphere?

If YES, WHY?, and HOW?

If NO, WHY?

EXPLAIN YOUR ANSWER IN DETAIL

Figure 1. The first questionnaire (Q1).

The correct answer is NO. Indeed, whatever the conductivity of the sphere may be, the following expression of the theorem of superposition is valid:

$$\vec{E}_{\text{total}} (\text{at point } M) = \vec{E}_{\text{int}} (\text{at point } M, \text{ due to charges in or on the sphere}) + \vec{E}_{\text{out}} (\text{at point } M, \text{ due to charges outside the sphere})$$

Here, because the sphere is an insulator, the only displacement of charges that can occur in the influence of external charges is local and is due to polarization.

2. Samples

Two samples of university students were questioned:

- G1 students in their second year at the University of Paris 7, in France ($N = 108$);
- G2 students in their second year at the University of Setif, in Algeria ($N = 29$).

All these students had taken at least one course about electrostatics, which included Gauss's theorem and the equilibrium states of conducting bodies. The G2 group had also taken a course about dielectrics. We do not intend to present a formal comparative study of the students' knowledge in these two countries. At this exploratory stage, our goal is simply to see if the same difficulties are present in groups of rather different background.

The questionnaires were administered during a class period and students had 20 minutes to answer, which in fact means that they were not limited in time. They were invited to express themselves completely and in an anonymous way.

3. Analysis of results

(a) The answers

Table 1 shows the percentages of answers in terms of 'Yes', 'No', '?' (which means 'I don't know'), or 'no answer'.

(b) Comments on the correct answer: 'No'

The correct answer is sometimes accompanied by arguments mentioning the superposition of fields or the contribution of the external distribution of charges to the field at point M , for instance:

One must take into account the external density of charges. But I don't know why it has always been neglected. M will be submitted to the field $\vec{E}_1$ due to ρ_{int} + $\vec{E}_2$ due to ρ_{ext} . $\vec{E}$ inside can be the algebraic sum of the two densities. (G2)

In other comments, it is not clear whether the external distribution of charges is still considered as acting directly on point M after other effects ('modified density of charges' in the insulator, 'polarization', ...) have occurred:

If there are other distributions of charges, the sphere will be polarized, its density of charge will be modified → the response No. (G2)

This question may even be asked for seemingly quite 'transparent' comments:

The distribution of external charges can modify the field inside the conductor. (G2)

As the reasons given for this correct answer range widely, we cannot give any precise percentage for each type of the above comments, and we cannot warrant that *all* these 'correct answers' rely on a comprehension of the principle of superposition. This point will be discussed below.

(c) Comments on the incorrect answer: 'Yes'

The answer 'Yes', massively given in every sample, is justified with comments that can be classified under two main categories:

(i) *Misunderstood Gauss's theorem*: Many students in the two samples (see table 2) give arguments relying on the fact that, in Gauss's theorem, only the 'internal' charge would matter, for instance:

Yes, [a calculation using Gauss's formula appears here] we only need the total internal charge. (G1)

Yes, using Gauss's theorem only puts into play the internal distribution of charges. (G1)

Yes, ... [a calculation using Gauss's formula appears here] external charges do not influence the interior of the sphere. (G2)

Yes, [a calculation using Gauss's formula appears here] it is precisely why the Gauss's theorem is so valuable! (G2)

Table 1. Answers to the 'Gauss questionnaire' (Q1).

Sample	N	Yes (%)	No (%)	? (%)
G1	108	83	15	2
G2	29	86	14	0

Table 2. Comments for 'Yes' answers to the 'Gauss questionnaire' (Q1).

Sample	Rate of 'Yes' (%)	Misunderstood Gauss's theorem (%)	Insulator (%)
G1	83	49	15
G2	86	72	10

(ii) *Insulators and electric field*: Some arguments rely on the fact that the sphere is an insulating body:

Yes, because the sphere is an insulator, it has no connection with the exterior . . . (G1)
 The sphere is an insulator, there is no interaction between internal and external charges.
 G1)

Sometimes another idea is added – charges cannot move:

The sphere is insulating, therefore charges are 'frozen', therefore the external distribution of charges does not influence the field at M . (G1)
 The internal charges are motionless, therefore the internal field is constant whatever the external field produced by external charges may be. (G1)

In the text, the sphere is only said to be 'an insulating sphere' but the schema suggests that it is also isolated from the ground. In some comments, the two ideas of 'insulating' and 'isolated' body do not seem to be clearly discriminated:

Yes, the sphere is insulated, it depends only on internal charges. (G1)
 One can calculate E at point M only knowing the distribution of charge inside the sphere because the sphere is insulated, therefore there is no influence of the external medium on this sphere, $\rightarrow$ the sphere keeps its charge and E at M keeps the same. (G2)
 As the sphere is an insulator, the internal charges are isolated from the external ones, which therefore have no effect on the field at a point inside the sphere. (G1)

We have regrouped all these 'Yes' answers linked with this idea of insulation, and have given their corresponding percentages in table 2. In some comments, the argument concerning the insulating property of the sphere is followed by a calculation of the electric field with Gauss's theorem. These comments have not been counted in the preceding section, because the misunderstanding of Gauss's theorem that they show is not the very basis of the argument.

Discussion

There are few correct answers to this questionnaire in the two samples. Sometimes, the correct answers explicitly rely on the principle of superposition. Other arguments, however, recall a very common way of reasoning identified by Rozier and Viennot (1991): linear causal reasoning. In situations where the *simultaneous* influence of several factors should be taken into account, this way of reasoning gives rise to 'story-like' comments. Such arguments are based on a sequence of simple events that are considered as *successive*, each causing the following one. Here this would give: 'A charge is placed somewhere, then the insulator gets polarized, then there is a field created at point M ', i.e., practically identical with one of the comments quoted above. The question then arises whether or not the students mentioning such an indirect effect consider that the direct effect of the charge is still present in the equilibrium state when finally reached. Our results leave this question unanswered.

The most serious finding of this questionnaire is a very high percentage, in all our three examples, of the expected error, which is to ascribe the field in the sphere uniquely to 'internal' charges. The total 'internal' charge ' Q_{int} ', in fact the total charge *inside the Gauss's surface*, is indeed mentioned in the formula giving the flux Φ of the field through this surface:

$$\Phi = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}$$

This fact seems to endow ' Q_{int} ' with a kind of causal exclusivity. One can also imagine that such a focus on the interior also works considering the symmetry of the problem: if the interior is symmetric, that is enough, in students' minds, to use the flux in a simple way to calculate the field. Whatever the precise mechanism of such reasoning, a very striking fact is that the principle of superposition is implicitly denied and does not help students in their answers.

Much less frequent arguments, relying on the idea of insulation, and sometimes of the mobility of charges, also deserve attention. The next section focuses on this point.

B. Electric fields and insulators

1. Questions and correct answers

Two short questions about electric fields and insulators, Q2 and Q3, were asked in a single paper-and-pencil questionnaire (see figure 2). In both cases, the correct answer is that the considered charge creates an electric field at 'point M'. The theorem of superposition holds for all materials. According to the conductivity of these materials, displacements of charges may or may not occur. But, at any time, the

Q2 A point charge is outside an insulating body. Does this charge create an electric field at a point M inside this insulating body (see schema below)?



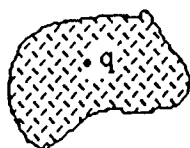
• q

YES ☐

NO ☐

WHY?

Q3 A point charge is inside an insulating body. Does this charge create an electric field at a point M outside this insulating body (see schema below)?



• M

YES ☐

NO ☐

WHY?

Figure 2. The second questionnaire (Q2 and Q3).

total field integrates the effect of every charge. Here, the bodies considered are insulators that get polarized when an additional charge is nearby (in, or out of, the body). The total field anywhere is then the sum of the field due to polarization and of the field created by this additional charge.

2. Samples

This questionnaire was presented to three types of students in scientific courses at university level in France:

G3 students in their first year after baccalauréat, having had no course in electrostatics at university, $N=64$;

G4 students in their second year at university, having had a course in electrostatics up to Gauss's theorem but without the chapter about dielectrics, $N=25$;

G5 students in their second year at university, having had a course in electrostatics, chapter about dielectrics included, $N=64$.

All these students had taken courses in secondary school about electric circuits, and had been taught some ideas about electric fields, e.g., the $\vec{F}=q\vec{E}$ relationship, used to calculate the motion of particles in the uniform field existing between the plates of a capacitor. In France, Coulomb's law is introduced after baccalauréat. As in the case of the Gauss's questionnaire, our study is only exploratory and we do not claim to make a formal assessment of students' ideas versus their academic level. Our results in this respect are only indicative.

The conditions under which the questionnaire was administered are similar to those described for Q1: 20 minutes during a class period, anonymous answers.

3. Analysis of results

(a) The answers

Table 3 shows the percentages of answers to each question, Q2 ($\vec{E} \rightarrow$ into ... ?) and Q3 ($\vec{E} \rightarrow$ out ... ?), in terms of 'Yes', 'No', or '?' (which means 'I don't know') or 'no answer'. An additional category has been used to classify the answers: ' $E=0$ ' means that the students did not directly answer the question that was asked, 'does the charge create a field at M ?' but used a periphrase: 'the field at M is zero'. We have not considered this answer as equivalent to a 'No' because it might mean that the total field at M , due to 'charge q ' plus other unspecified charges, is zero.

One can see from table 3 that the percentages of correct and incorrect answers, respectively, follow a rather predictable evolution between the samples G3 and G5, i.e., from the less to the most '*a priori* competent' group of students.

Table 4 gives the percentages of combined answers: identical answers to both questions, 'Yes-Yes', 'No-No' or others, for instance '?-?', on the one hand, and different answers to Q1 and Q2, 'Yes-No', 'No-Yes' and others on the other hand.

One can see from table 4 that taking into account pairs of answers smoothes out a lot of the differences observed between samples. As usual, students' comments are essential in order to interpret their answers. We used the following categories, which are not all necessarily linked with a definite answer (Yes, No, ?), as can be expected concerning a rather complex conceptual domain. These categories have been shown to permit the most significant groupings.

Table 3. Answers to questionnaire about insulators (Q2 and Q3).

Sample	N	Question 2 (%)				Question 3 (%)			
		Yes	No	E=0	?	Yes	No	E=0	?
G3	64	42	42	2	14	27	64	0	9
G4	25	36	48	0	16	60	20	4	16
G5	64	64	23	8	5	67	25	0	8

Table 4. Pairs of answers to both questions about insulators (Q2 and Q3).

Sample	N	Similar response Q2-Q3 (%)				Different response Q2-Q3 (%)			
		Yes-Yes	No-No	Others	Total	Yes-No	No-Yes	Others	Total
G3	64	14	30	6	50	28	15	11	54
G4	25	28	16	16	60	4	32	4	40
G5	64	48	8	3	59	16	16	8	40

(b) Comments justifying a positive answer (*q* creates a field...)

The most clearly correct comments observed with positive answers (in 'Yes-Yes', 'Yes-No' or 'No-Yes' combined answers) are similar to one of these instances:

Charge *q* creates a field in the whole space, therefore also at point *M*. (Q2, G3)
 Yes, because an insulator does not influence a field but it is not conductor for the currents. (Q2, G3)

An insulating body does not stop an electric field. (Q3, G3)

Charge *q* creates a field in the whole space. (Q3, G4)

Charge *q* creates a field at a point *M* equal to

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{r}}{r^3}$$

Because it creates a field in the whole space. (Q2, G5)

Because *q* creates a potential around the insulator. (Q3, G5)

Sometimes the arguments are quite questionable:

The surface is around the charge, one may use Gauss's theorem. (Q3, G5)

or

Yes, charge *q* will produce a field at point *M* inside the insulating body. As the charge at point *M* is zero, there will be a potential difference between the two considered points. (Q2, G3)

Finally, some comments mention the existence of polarization in the insulator (see table 5):

Yes, charge *q* polarizes the insulator. (Q2, G4)

Yes, because a field is created by polarization. (Q5, G4)

Again it is not always clear whether, after having caused the polarization, charge *q* is still considered to contribute directly to the final field: we find here the same

Table 5. 'Yes' answers to questions about insulators in which polarization is mentioned.

Sample	N	Question 2 (%)	Question 3 (%)	Students (%)
G3	64	0	0	0
G4	25	0	0	0
G5	64	8	12	16

Table 6. Types of comments to questionnaire about insulators (Q2 and Q3).

Sample	N	'Blocking role of insulators' (%)			'Field if mobility' (%)		
		Q2	Q3	Students	Q2	Q3	Students
G3	64	34	37	44	16	14	25
G4	25	8	20	28	16	4	20
G5	64	9	9	19	8	5	14

ambiguity already pointed out and discussed in section A. In fact the last of these quotations strongly suggests that only the indirect effect of charge q , i.e., the one through polarization, is considered.

A precise sorting out of these comments given with a 'Yes' answer is difficult and we will not attempt to draw a line between correct arguments and those that are less clearly correct. Broadly speaking, for each question and in every sample, the percentage of unambiguous and correct explanations is less than a third of the percentage of correct answers.

(c) The blocking role of an insulator

This idea can be very straightforwardly expressed: 'No, because q (or M , according to the question) is in an insulator'. More often, the idea is more developed, for instance:

The insulating property of the body prevents the field from penetrating it. (Q2, G3)
 The insulating body is globally submitted to the electric field created by q . But point M is not submitted to this field because it is protected by the insulator. (Q2, G3)
 The insulator prevents any type of ray getting in. At the surface, the ray is not reflected, but it cannot go through. (Q2, G3)
 The insulator blocks the field inside the body: this field cannot be created again after the insulator. (Q3, G3)
 Because it is an insulator: it does not exert any force on the outside. (Q3, G5)

All these arguments are given with the answer 'No' to Q2 or Q3. We have put in this category every comment mentioning this single idea of 'insulation' (see table 6). The corresponding percentage of answers decreases rather drastically (44%→19%) with the academic level of our samples.

(d) Charges cannot move, therefore there is no electric field or, more briefly, 'field if mobility'

We have put under this heading every comment where a link was made between the non-existence of an electric field and the impossibility of charges moving in the

insulator. Such comments have not been included in the preceding category even if they mention the word 'insulator', because they are more specific.

Sometimes, this link between field and mobility seems to be made for the 'point M ' located in the insulator, in response to Q2 ($\vec{E} \rightarrow \text{into} \dots ?$), for instance:

As this body is an insulator, the charges inside are motionless. If q created a field, the charges in the body would then be submitted to an electric field. (Q2, G4)
 As no charge is free around M , there cannot be any electric field at point M . (Q2, G5)
 The charge does not create any field. Otherwise, there would be a potential, and a potential difference: one would have a current passing through this body, which is impossible because of the insulator. (Q2, G5)

In other comments, observed in both questions, it seems as if, to create a field at point M , a charge would need to send 'electrons' or 'protons' up to this point:

The protons or the electrons sent by q cannot reach M inside the insulator because this body insulates. (Q2, G3)
 The insulator is an obstacle to the motion of electrons between q and M (Q2, G3)
 No, because electrons and protons will not be able to escape out of, or to propagate in, the insulator, therefore they will not go out of this body to reach point M . (Q3, G3)
 No, ... the charge stays inside the insulator and cannot be captured. (Q3, G4)

Finally, on Q3 ($\vec{E} \rightarrow \text{out} \dots ?$), some students say that some charges must move around or away from (?) 'charge q ', for this charge to be able to create a field:

Charge q does not create an electric field at point M because the insulator blocks every motion of electrons. (Q3, G3)
 As there is no possible motion of charges in the insulator, there cannot be any field created at point M . (Q3, G5)

It is not always possible to discriminate between these different meanings of comments linking the mobility of charges and the existence of a field, in a comment such as this for instance:

Because there cannot be any motion of electrons. (Q2, G3)

This is why we have kept this single broad category: 'field if mobility'. Comments classified in this category are nearly all found with a response 'No', '?' or ' $E=0$ ' to either question. Only three comments of this type have been found with a positive response:

Internal charges cannot escape out of the insulator, but external charges can penetrate into it. (Q2, G3)
 Charge q creates an electric field at a point M inside the body because this body is made of mobile particles. (Q2, G3)
 Outside the body, the medium is conductor, charges are free to move, therefore q will be able to create a field at M . (Q2, G4)

The percentages of answers corresponding to this 'field if mobility' type, are also shown in table 4. They decrease slowly with the level of competency of our samples (25% $\rightarrow$ 14%)

(e) Charges at point M ?

Some rare comments link the existence of a field at point M with the presence of charges at this point, without any allusion to mobility at all:

?, it all depends on the charge at point M . (Q3, G3)
 No, because the point is neutral from an electric point of view. (Q3, G3)

As rare as they may be, they deserve attention. They might be very close to some of those classified in the 'field if mobility' type, specifying that 'protons' or 'electrons' would have to reach point M for a field to exist there. They throw some doubt on the meaning ascribed by students to the $\vec{F} = q\vec{E}$ relationship: would this formula suggest that no field can exist at a given point if there is no charge placed at this point? Such comments also introduce a doubt about the actual meaning of arguments (quoted in section B3b) which, in Question 2, mention 'polarization', i.e., the existence of charges near point M .

4. Discussion

These results present some striking features. The first is the low percentage of correct answers (Yes-Yes) even after a complete course in electrostatics in second year at university. Correlatively, there is a high percentage (40% or more) of answers which are different for the two questions. Some comments show a deliberate discrimination between the two situations, but they are relatively rare, and more probably the predominant phenomenon is an instability in students' reasoning.

The main ideas that seem to influence students' reasonings are the following:

- If a body is an *insulator*, the field is blocked either in (for an 'outgoing' field, Q3), or at the boundary of (for an 'incoming' field, Q2), the body. This idea, already observed in the 'Gauss questionnaire', is probably linked with the word 'insulator' itself. The fact that the words 'insulated' and 'isolated' are sometimes not clearly discriminated in students' comments probably goes with the same type of verbal obstacle. The importance of this obstacle seems to decrease rapidly with the level of students' academic competence, although it is still non-negligible after a complete course on electrostatics (G5, 19%).
- There cannot be any electric field at a point where *charges* cannot *move*. This may be an electric version of the well-known link established by students between force and motion (Viennot 1979), and/or a distorted interpretation of the $\vec{j} = \sigma\vec{E}$ relationship, linking the ideas of field and current. More deeply, students might need to imagine an effect to accept a virtual cause. This type of answer is less frequently observed than the preceding one for students starting their higher education (25% versus 44%), but it is nearly as frequent (14% versus 19%) for students having had a complete course of electrostatics (G5).

More rarely, other ideas are expressed:

- There cannot be any electric field at a given point if there is no force acting on a charge placed there, so there cannot be a field if there is no charge at this point. This might come from a distorted interpretation of the $\vec{F} = q\vec{E}$ relationship, and/or, again, from a need to have an effect to accept the existence of a virtual cause.
- Some 'electrons' or 'protons' must be travelling from the active charge to a given point for an electric field to exist at this point.
- Charges need to move to be able to create a field. This might be an outcome of the 'field if mobility' idea combined with a confusion between active and passive agents in the electric interaction. This last feature of reasoning has been observed for other kinds of interactions (Viennot 1985).

Adding up the percentages of answers corresponding to these ideas, one finds that, after a complete course in electrostatics in second year at university, a third of the students think that insulators block the electric field.

There are relatively few comments mentioning an *indirect effect* of the 'active' charge at point *M* (in Q2 or in Q3) through polarization of the insulator. This was partly predictable because the only students who had taken a course on dielectrics were those from the G5 sample and some from G4 who took the course for the second time. But even in G5, such comments are not very frequent. Anyway, we observed in these comments traces of a way of reasoning, linear causal reasoning, that does not envisage all the charges present in the final state of equilibrium as *simultaneously* contributing to the field.

Concluding remarks

Although exploratory, this study clearly shows some students' difficulties in the understanding of electric fields.

The significance of our findings using the 'Gauss questionnaire' (Q1) is not that it shows that 'Gauss's theorem' is poorly understood by students. This is a well established fact. It is to pinpoint one of the components of this incomprehension, i.e., that students do not spontaneously use the principle of the superposition of fields created by all the charges of the universe to determine their answers.

Another difficulty, shown by the results of the two questionnaires, is a link between the existence of a field and the mobility of charges. Again a striking fact is the ineffectiveness of the idea of superposition in students' reasoning. This principle does not help students form their answers, and it is apparently swept aside by more important considerations which focus on the effects of electric fields.

It is worth noting that certain aspects of electric fields are successively introduced in different contexts: motion of particles between the plates of a capacitor ($\vec{F} = q\vec{E}$), microscopic Ohm's law in electric circuits ($\vec{j} = \sigma\vec{E}$), electrostatics ('the field is zero inside a conductor'), Maxwell's equations If the effects of the electric field are so important in the way students grasp this concept, it is important to analyse the impact of these different contexts, and to look for ways of unifying the patchwork of ideas that may result from their successive introduction. We therefore suggest that we should not only follow Eylon and Ganiel's (1990) proposal concerning an early semi-qualitative teaching of macro-micro relationships in *electric circuits*, but also more explicitly to link, at least at college level, the electrostatic view of the electric field in the whole space with the electrodynamic aspect of this concept.

References

- BENSEGHIR, A. and CLOSSET, J. L. (1991). Transition between electrostatics and electrodynamics: historical difficulties and students' reasoning. Internal report, on request from the authors.
- CLOSSET, J. L. (1983). Sequential reasoning in electricity. In *Research on Physics Education: Proceedings of the First International Workshop* (pp. 313-319). Paris, Edition du CNRS.
- COHEN, R., EYLON, B. and GANIEL, U. (1983). Potential difference and current in simple electric circuits: a study of students' concepts. *American Journal of Physics*, 51, 407-412.
- DUPIN, J. J. and JOHSUA, S. (1987). Conceptions of French pupils concerning electric circuits: structure and evolution. *Journal of Research in Science Teaching*, 6, 791-806.

- EYLON, B. S. and GANIEL, U. (1990). Macro-micro relationships: the missing link between electrostatics and electrodynamics. *International Journal of Science Education*, 12 (1), 79-94.
- HARTEL, H. (1982). The electric circuit as a system: a new approach. *European Journal of Science Education*, 4 (1), 45-55.
- LICHT, P. (1987). A strategy to deal with conceptual and reasoning problems in introductory electricity education. In J. Novak (Ed.), *Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics: Proceedings of the Second International Seminar* (pp. 275-297). Ithaca, NY, Cornell University.
- PSILLOS, D., KOUMARAS, P. and TIBERGHEN, A. (1988). Voltage presented as a primary concept in an introductory teaching sequence on d.c. circuits. *International Journal of Science Education*, 10 (1), 29-43.
- RILEY, M. S. (1985). Structural understanding and problem solving skill. In R. Duit, W. Jung and C. V. Rhoneck (Eds.), *Aspects of Understanding Electricity: Proceedings of an International Workshop, Ludwigsburg, 1984* (pp. 165-195). Kiel, IPN.
- ROZIER, S. and VIENNOT, L. (1991). Students' reasoning in thermodynamics. *International Journal of Science Education*, 13 (2), 159-170.
- SHIPSTONE, D. M. (1984). A study of children's understanding of electricity in simple d.c. circuits. *European Journal of Science Education*, 6, 185-198.
- SHIPSTONE, D. M. (1985). On children's use of conceptual models in reasoning about current electricity. In R. Duit, W. Jung and C. V. Rhoneck (Eds.), *Aspects of Understanding Electricity: Proceedings of an International Workshop, Ludwigsburg, 1984* (pp. 73-93). Kiel, IPN.
- SHIPSTONE, D. M., RHONECK, C. VON, JUNG, W., KARRQUIST, C., DUPIN, J. J., JOHSUA, S. and LICHT, P. (1988). A study of students' understanding of electricity in five European countries. *International Journal of Science Education*, 10 (3), 303-316.
- VIENNOT, L. (1979). Spontaneous reasoning in elementary dynamics. *European Journal of Science Education*, 1 (2), 205-221.
- VIENNOT, L. (1985). Analysing students' reasoning: tendencies in interpretation. *American Journal of Physics*, 53 (5), 432-436.

Students' understanding of superposition of electric fields

S. Rainson

Laboratoire de Didactique de la Physique dans l'Enseignement Supérieur, Tour 24, 2 Place Jussieu, case 7021, University of Paris 7, 75251 Paris Cedex 05, France

G. Tranströmer

Department of Physics, Royal Institute of Technology, S-100 44 Stockholm, Sweden

L. Viennot

Laboratoire de Didactique de la Physique dans l'Enseignement Supérieur, Tour 24, 2 Place Jussieu, case 7021, University of Paris 7, 75251 Paris Cedex 05, France

(Received 16 July 1993; accepted 17 June 1994)

In this article an analysis of the difficulties experienced by students when applying the principle of superposition to electric fields is presented. A study of university level students in France and Sweden revealed the existence of difficulties arising out of two issues: (1) a causal interpretation of some relationships, (2) the student's need for an effect, motion of some kind, to accept the existence of a field. The links between these obstacles and a lack of a unified view on electric phenomena are discussed from a pedagogical point of view.

I. INTRODUCTION

Science education research in the last 15 years has been to a large extent devoted to probing students' understanding of basic topics in physics. The now widely shared underlying hypothesis is that students' ideas before and during the teaching-learning process strongly influence the manner in which their understanding of a particular concept develops.^{1,2}

Among these basic topics, the subject of electric circuits has been extensively examined. One well-established result^{3,4} is that students often reason about series circuits as if something (current, voltage, electricity) left the generator without "knowing" what was to happen further along the circuit, then met successive obstacles, and was consequently affected (for instance "damped" or "used up") at each step, without any influence from a "downstream" section on the "upstream" part. This way of describing students' reasoning accounts for a number of different questions-and-responses sets, for instance the idea that the generator provides a constant current whatever the circuit.

More recently, the problem of "the missing link" between electrodynamics and electrostatics was raised in an article by Eylon and Ganiel.⁵ It was argued that one of the reasons it is

so difficult for students to master the concepts involved in electric circuits is that they cannot grasp any kind of causal explanation in this area.

Another line of research considers the electric field inside the wires. This leads to the question of the surface charges that contribute to the field. The existence of this surface charge explains, in particular, that the field follows all the windings of the wires. Fields from the charge distribution in some simple cases have recently been published.⁶⁻¹⁰ From an instructional point of view, the idea of considering the interaction between the charges on the surfaces of circuit elements with the charges in motion has been proposed as providing a more causal view of what happens in a circuit^{11,12} and as avoiding an excessive focusing on the terminals of the generator.^{13,14}

Very few pedagogical studies have been carried out on the concept of an electric field. Recent research in which G.T. participated¹⁵ focused on field lines in empty space. This investigation showed that students tend to attach far too much reality to the field lines, often treating them as isolated entities in the Euclidean space and not as a set of curves representing a vectorial property of that space.

The work to be presented here concerns students' difficulties in applying the principle of superposition to electric

fields. The extent to which university students accept and use the idea that *at a given time, every unit charge contributes in the same way* (i.e., Coulomb's law) to the electric field at any given point, was investigated. Further, in a quasistationary analysis, as used in electrostatics and electric circuits at elementary level, the contribution of a given charge to the field at a given time and point is independent of the system's past history, i.e., of the relative positions of the charges before the time under consideration. This holds in particular when analyzing influence phenomena: whatever the displacements caused by the "arrival" of a charge q , once the new equilibrium is reached, charge q still contributes directly to the field, as do all the other charges.

A clear understanding of the preceding statements is essential, if one is to reach a unified view of electrostatics and electric circuits. A preliminary inquiry¹⁶ indicated that (at least) two types of obstacles hinder a proper comprehension of the principle of superposition. After a brief review of these first findings, the results of a more systematic inquiry using university students in France and Sweden are analyzed. How these obstacles hinder a unified view of electric circuit is investigated. Finally some pedagogical implications are briefly discussed.

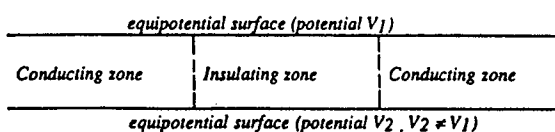
II. MISUNDERSTOOD CAUSALITY: TWO KINDS OF OBSTACLES

In preliminary research (see the Appendix), students in their first and second years at universities in France and Algeria were presented with written questions, P_1 and P_2 . These preliminary questions and their main results are in the Appendix. The results of this limited inquiry can be interpreted with two different hypotheses.

(1) Students accept the existence of a cause only when they can imagine an effect (see also Ref. 17). In response to a question (P_1) involving insulators, many students gave an argument like: "charges cannot move in an insulator, therefore there is no electric field." Is this "field if mobility" argument an anecdotal phenomena, or does it reveal a really important feature of students' common reasoning about fields and more generally about causality: "cause only if motion?" This is our first question.

(2) Students interpret formulas as if the quantities mentioned to the right of equal sign were the cause of those mentioned to the left. In the case of Gauss' theorem (question P_2), this suggests a response like "to calculate the electric field, I only need the internal charges," or "the electric field is due to the internal charges only." Such comments are inappropriate to the system described, in which nothing is said about charges situated at the exterior of a symmetrically charged sphere. Yet, the comments are very common and the response compatible with this reasoning was given, in the corresponding test, by more than 80% in every sample. This

In the situation represented in the drawing below, the two equipotential surfaces are infinite planes, perpendicular to the plane of the figure. Describe the electric field between the two surfaces.



In your opinion, are the electric fields in the conductor and in the insulator:

different ☐ equal ☐ I don't know ☐

Justify your answer.

Fig. 1. The Neapolitan ice cream question.

"cause in the formula" feature of reasoning, which we will refer to in this article, is the second of the targets of the present research.

Another issue arose from our preliminary study. During their course of study, students seem to develop successive and unconnected concepts of an electric field. This problem, which agrees with the concern of Eylon and Ganiel about "missing links,"⁵ induced us to pose our questions to students at different academic levels. More precisely, we are interested in a possible relationship between the "layers of knowledge" already taught to a given sample of students and their responses to questions about the principle of superposition.

III. METHOD AND RESULTS

In trying to measure the impact of these obstacles, ten students were interviewed. After this preparation, the principal inquiry method has been the use of four written questions, each one associated with one or both of the different obstacles (see Table I). They will be successively presented and analyzed.

A total of 1145 students have been tested in Sweden and in France. They were presented with the French or Swedish translations of the texts appearing below.

We group them in four categories according to the levels of their studies.

" S_1 " signifies pupils who have had a course in electric circuits and an introduction to electrostatics. E has been defined by $F=qE$. The case of a uniform field, and the relationship $E=U/d$ (U is the voltage and d the distance between the plates) have been presented.

" S_2 " stands for students who, in addition to S_1 , have been introduced to Coulomb's law and to Gauss' theorem. The potential has been defined by $E=-\text{grad } V$. The conductiv-

Table I. The four questions: labels and targets.

Labels ↓	A priori important aspects	
	Cause in formula	Field if mobility
Neapolitan ice cream		×
Near a conductor: NC	×	
Near a conductor: NC'	×	
E in the wires	×	×

Table II. Neapolitan ice cream: rates of answers.

Sample	Number	$E_{\text{int}} = E_{\text{cond}}$ (correct)	$E_{\text{int}} \neq E_{\text{cond}}$	I do not know
S_1	185	26%	57%	17%
S_2	80	49%	44%	7%
S_3	77	27%	60%	13%
S_4	78	18%	68%	14%

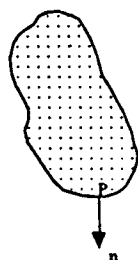
At a point P on the surface of a conducting material, charge carriers being static, the surface charge density is σ . n is defined as the normal unit vector to the surface at P , pointing outwards. Outside the conductor, at a point very near P , the electric field is $\sigma/\epsilon_0 n$.

- 1-Is the field due to
- the charges in the vicinity of P ?
 - all the charges of the conductor?
 - all the charges of the universe?

Choose the right answer and justify.

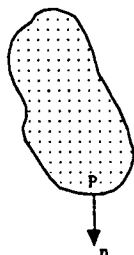
2-Given the two situations below :

Situation A



Situation B

(q is a point charge)



The unit vector perpendicular to the surface of the conducting material at P and pointing outwards is n .

- a) In situation B, will the electric field E at a point very near P be given by the formula $E = \sigma/\epsilon_0 n$? Yes ☐ No ☐ I don't know ☐

Justify your answer.

- b) Is the electric field outside the conductor, at a point very near P , the same in situation A and B? Yes ☐ No ☐ I don't know ☐ Justify your answer.

- c) Is the surface charge density σ the same in situation A and B? Yes ☐ No ☐ I don't know ☐ Justify your answer.

Fig. 2. A question about the electric field near a conducting material (NC).

ity, γ , has been defined by $j = \gamma E$ (j is the current density). Students have been taught a few rudiments of vector calculus including the definition of a gradient.

" S_3 " students are those who, in addition to S_2 , have studied conductors in electrostatic equilibrium. They have been introduced to the charge distribution on a conductor, to the fact that the electric field is zero inside a conductor in electrostatic equilibrium, and to the formula giving the electric field E near a point of a conductor of charge density σ : $E = \sigma/\epsilon_0 n$ (n is the unit vector perpendicular to the surface at this point and directed outwards).

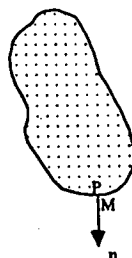
" S_4 " stands for students who, in addition to S_3 , have been introduced to dielectrics and Maxwell's equations.

A. "Neapolitan ice cream"

In this question, a comparison is proposed between areas where identical electric fields have different effects due to

Consider a conducting body C and a point charge q placed outside the conductor, (see the drawing below). At a point P on the surface of the conductor, the surface charge density is σ and n is defined as the normal unit vector to the surface at P , pointing outwards. We want to calculate, at electrostatic equilibrium, the electric field $E(M)$ at a point M , outside the conductor, very near P .

A student suggests the expression $E(M) = \sigma/\epsilon_0 n + E_q$, where E_q is the field due to q at M .



What do you think? Is the expression.....

right yes ☐ no ☐ Could you explain why?

wrong yes ☐ no ☐ Could you justify why and give the correct expression?

ambiguous yes ☐ no ☐ Explain why and give an unambiguous formula.

Fig. 3. Another version of the question presented in Fig. 2 (NC').

the different values of the conductivity in each zone. This is a way of checking to what extent the field only if mobility obstacle hinders correct reasoning in students. The three zones to be examined are situated between the plates of a capacitor (Fig. 1).

The correct answer is that the fields are equal (edge effects neglected). The only correct argument available for the S_1 students is the relationship $E = U/d$, where the voltage U and the distance d between the plates are the same for the two materials. At S_2, S_3, S_4 levels, the student can argue that the equipotential surfaces are the same, that the relationship $E = -\text{grad } V$ is not dependent on the material. The more advanced students, S_4 , may know and use in their arguments the fact that the tangential (vertical) component of E (at the boundary between conductor and insulator) is continuous. Table II shows the rates of the answers "same" and "different" fields to the "Neapolitan ice cream" question.

There is a relatively small number of correct answers (less than 30% for S_1, S_3 , and S_4) with the exception of sample S_2 (around 50%). Nearly all these answers are justified by the students, arguing that $E = U/d$ and since U and d are the same, the electric fields are equal. Concerning the answer $E_{\text{ins}} \neq E_{\text{cond}}$, the arguments can be put into five different groups.

(1) $E_{\text{cond}} = 0$: Some students said that the field is zero in a conductor, with or without mentioning equilibrium, e.g., "for

Table III. Neapolitan ice cream, answer $E_{\text{ins}} \neq E_{\text{cond}}$: types of arguments and corresponding rates.

Sample	Number	$E_{\text{ins}} \neq E_{\text{cond}}$	$E_{\text{cond}} = 0$	Insulator	Current	Material	I/C/M	Nothing
S_1	185	57%	3%	25%	13%	10%	43%	12%
S_2	80	44%	1%	16%	4%	15%	34%	9%
S_3	77	60%	18%	17%	5%	16%	31%	13%
S_4	78	68%	19%	3%	9%	29%	41%	8%

Table IV. Item 1: The electric field is due to ...

Sample	Number	Universe (correct)	Conductor	Vicinity	I do not know
S_3	194	30%	44%	24%	2%
S_4	58	9%	60%	29%	2%

the conductor the field which is created inside is inevitably zero. The field, which is created inside the conductor is zero, because the potential is a constant." (S_3)

(2) *Insulator*: This argument is based on the idea of "insulator," "insulating," "to isolate," with or without mentioning charge mobility, e.g., "the electric field is only present in the conducting zones. The role of the insulator is to isolate, as suggested by its name, and then it would dampen or suppress the electric field." (S_2), or "if an insulator does not conduct electricity, then no field can pass." (S_1)

(3) *Current*: Arguments where there is an allusion to the current, which passes through a conductor but not through an insulator, e.g., "In the insulator, $j=0$. In the conductor $j=\rho v=\gamma E$, and so the electric fields are different," or "As the electric field is responsible for the electric current and as the currents are different in the conductor and in the insulator, then the fields are different." (S_2)

(4) *Material*: Answers where the students mention "relative permittivity" or "different conductivities" or just say "because the materials are different."

Some answers fall into more than one of the *insulator*, *current*, or *material* categories, e.g., the one quoted above in the *current* arguments. This is why we have added an *insulator and/or current and/or material-column* (I/C/M).

Table III shows the corresponding rates. The most striking result is the large I/C/M rates. The critical question hinted at by many of these answers seems to be "how does 'it' pass through?" In some comments "it" is the current, in others, the field, and sometimes something else not clearly defined, e.g., "electricity." Sometimes, this seems to raise an unspecified blockage, as shown by this comment: "it troubles me to say that it is the same because there ought to be a difference between insulators and conductors." (S_3). More often, the arguments have the following structure: "no current $\rightarrow$ no field," or: "no effect in terms of motion $\rightarrow$ no cause" as a clear illustration to *cause only if motion*.

The following facts concerning the differences according to the levels, are worth noting. S_3 and S_4 students often give the " $E=0$ inside a conductor" argument (around 20% compared to 3% for S_1 students). This can probably be explained by the fact that S_3 students study conductors in equilibrium but are not well prepared to consider a nonequilibrium situation. Another difference is the increasing number of "material" argument (29%) in the S_4 sample, compared to S_1 (10%), S_2 (15%), and S_3 (16%). This corresponds to a more frequent mentioning of "permittivity" in their answers, which has been introduced, at this level, together with dielec-

Table VI. Item 2b: Is the field the same in A and B?

Sample	Number	No (correct)	Yes	I do not know
S_3	194	78%	18%	4%
S_4	58	78%	15%	7%

trics. Correspondingly, these students no longer interpret insulators as barriers to electric fields (3% compared to 16% for S_2 students).

Our conclusion for this test is that students, including those who have had a complete course in electrostatics and electric circuits (and Maxwell's equations for the S_4 sample), tend not to have a unified perspective capable of explaining diverse situations. Students' arguments reflect, to some extent, their last course. An overall feature in their comments to wrong answers, is a strong link between the idea of "passing through," or (more specified) of "current," and the existence and value of an electric field.

B. "Near a conductor" (or "NC")

The points to be examined in these questions are the following. (i) Is the formula $E=\sigma/\epsilon_0 n$ an obstacle to a correct understanding of the superposition principle as is the formula $\Phi=q_{\text{int}}/\epsilon_0$ in the question about Gauss' theorem (P_2)? (ii) To what extent do students simultaneously consider the *direct* and the *indirect effects* of a charge near a conducting material? More precisely, putting a charge in the vicinity of a conductor has two effects. The surface charge density on this body is modified, and the contribution of the surface charge to the field must be added to the externally imposed field. In the final state of equilibrium, all the charges should be taken into account, wherever they are and whatever their preceding movements have been. Is this superposition of effects well understood?

Two questions, "NC" (Fig. 2) and NC' (Fig. 3), were used. The second was designed in order to test the hypothesis suggested by the results obtained in the first one. Both questions concern the electric field very near a conducting material, with and without an external charge added.

1. NC

To correctly answer the question (NC), students need to know that the electric field very near a conducting material is due to all the charges of the universe (item 1), that the formula $E=\sigma/\epsilon_0 n$ is still applicable when an external charge is added (item 2a), and that E and σ are changed in this case ($E_A \neq E_B$; item 2b; $\sigma_A \neq \sigma_B$, item 2c).

Tables IV–VII give the rates of answers to the four items of this question.

There is massive correct response to item 2b (E will be different when the charge is added), however rates of wrong answers to other items are high and totally correct answers are quite rare (8%). A third of the students did not consider an influence phenomenon (item 2c, "Yes, σ is the same in A

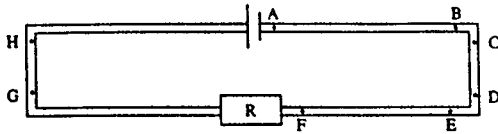
Table V. Item 2a: In B, is the formula $E=\sigma/\epsilon_0 n$ still true?

Sample	Number	Yes (correct)	No	I do not know
S_3	194	51%	44%	5%
S_4	58	29%	57%	14%

Table VII. Item 2c: Is σ the same in A and B?

Sample	Number	No (correct)	Yes	I do not know
S_3	194	65%	32%	3%
S_4	58	52%	40%	8%

We consider a circuit, represented by the following diagram, where the conducting wires have been deliberately shown large (the cross section is constant, the material is the same with conductivity γ).



(The rectangular box on the drawing is, in France, the symbol of a resistor)

- E_1 is the electric field inside the wire in part AB
 E_2 is the electric field inside the wire in part CD
 E_3 is the electric field inside the wire in part EF
 E_4 is the electric field inside the wire in part GH

1) Draw the vectors E_1, E_2, E_3, E_4 . Justify your drawing (direction and magnitude)

2a) What are the sources of these fields?

2b) How can you explain the possible variations of the field's direction from one part to the other?

2c) Have you ever thought about this issue?

Fig. 4. The E in the wires question.

and B"). It is quite remarkable to find so few correct answers to the first question ($E = \sigma/\epsilon_0 \mathbf{n}$ is due to all the charges in the universe). Some students seem to think that the surface charge density, σ , "creates" a field $\sigma/\epsilon_0 \mathbf{n}$ near P :

"All charges on the conductor will contribute. All charges of the universe do not enter into the formula $\sigma/\epsilon_0 \mathbf{n}$." (S_4).
 "All the charges ought to contribute to the field outside the conductor. Since the charge density σ appears in the formula $\sigma/\epsilon_0 \mathbf{n}$, the origin of the field is the conductor." (S_4).

There are also many wrong or uncertain answers concerning the validity of the formula $E = \sigma/\epsilon_0 \mathbf{n}$ when an external charge is added (Table V).

The question is posed whether explicit comments such as " $E = \sigma/\epsilon_0 \mathbf{n} + E_q$ " (S_3) would not provide a way to interpret, at least in part, these findings. In the students' view, $\sigma/\epsilon_0 \mathbf{n}$ holds for the field due to the conductor, given the cause in the formula obstacle. Then students add the direct contribution of the charge q , because of the superposition principle. In this way a correct idea of superposition is combined with an incorrect interpretation of " $\sigma/\epsilon_0 \mathbf{n}$."

2. NC'

The second version of this question (NC') was written in order to test this interpretation. The students were asked to

Table VIII. The expression $E(M) = \sigma/\epsilon_0 \mathbf{n} + E_q$ is wrong/right/ambiguous: rates of answers.

Sample	Number	Wrong (correct)	Right	Ambiguous	No answer
S_3	74	27%	39%	34%	0%
S_4	67	45%	28%	21%	6%

Table IX. " $E||$ ": drawings with E parallel to the wires.

Sample	Number	$E $
S_2+	206	79%
S_3		
S_4	126	82%

criticize the expression $E(M) = \sigma/\epsilon_0 \mathbf{n} + E_q$ which concerns the electric field very near a conducting material in the presence of an external charge (Fig. 3).

The correct answer is that the expression is wrong. The expression $E(M) = \sigma/\epsilon_0 \mathbf{n}$ holds whatever the external distribution of charge (at a point very near the conducting material).

Table VIII gives the rates of answers to this question.

Quite a large proportion (around 1/3) of the students think that the formula is right, thereby confirming the hypothesis being made to interpret the preceding test. Moreover, numerous incorrect arguments supporting the correct answer can be found, for instance: "Since σ changes, the formula ought to have been written $\sigma'/\epsilon_0 \mathbf{n} + E_q$." A quarter of the number of students who say that the proposed formula is ambiguous give comments of the same type. At least 75% in both samples clearly show that they do not understand the situation.

This seems to confirm our hypothesis since many students are of the opinion that the source of $\sigma/\epsilon_0 \mathbf{n}$ is the conductor and that the total field is " $\sigma/\epsilon_0 \mathbf{n} + E_{\text{created by } q}$."

C. Electrostatics and electric circuits: A unified view?

In order to investigate to which extent the obstacles, mentioned earlier, hinder an integrated understanding of electric phenomena, the last question: " E in the wires" (Fig. 4) was given to the students.

The direction and the sources of the electric field in a series circuit are asked, as well as an explanation for the variations of the field's direction. The correct answer is that the direction of the electric field in a wire is the same as the current ($E = \eta \mathbf{j}$ and $\eta > 0$, $E_1 = E_2 = E_3 = E_4 = \eta j$ where j is the current density and $\eta = 1/\gamma$ is the resistivity). The sources of the field are all the charges on the wire. The surface charges in particular are responsible for the variation of the field direction.

Nearly all students drew the field along the wires (in the right or wrong sense: for this study, we are only interested in testing for the orientation of the field along the direction of the wire and not in its particular sense, clockwise or counterclockwise. See Table IX).

The question about field sources gave rise to answers of the following types (Table X):

Table X. E in the wires: the field's sources.

Sample	Number	Voltage	Battery	Current, electrons	Other answers	No answer
S_2+	206	15%	23%	17%	15%	35%
S_3						
S_4	126	10%	52%	18%	13%	17%

Table XI. How can you explain the possible variation of the field's direction?

Sample	Number	No variation exists	Dir. of current, moving electrons	Shape of wire	Other answers	No answer
S_2+	206	2%	13%	22%	15%	48%
S_3						
S_4	126	10%	17%	27%	8%	40%

- "The battery," or "the voltage of the battery," or "the terminals of the battery."
- "The voltage," without any mention of the battery, or " U ," or " $E=U/d$," or " $E=-\text{grad } V$."
- "The current," or "the electrons" in the wires.
- "The charges," without any additional specification, are mentioned among "other answers."

Table XI indicates the cause of the changes of the field direction, suggested by students. Finally the numbers of students claiming that they have thought about this issue before, is given in Table XII. In all these tables, we group the samples S_2 and S_3 together because there was no noticeable difference in their results and in this subject they had a similar background.

These findings lead to the conclusion that, for these students, electrostatics and electric circuits are two unconnected subjects. Sometimes, as when the currents are said to be the cause of the field (Table X column 5, Table XI column 4), it seems to be an inversion between cause and effect. Often, their analysis of the cause of current is extremely poor. A global cause, the battery, or a cause in the formula $E=U/d$, or the voltage are seen as being sufficient. No spontaneous questioning about the changes of the field's direction is observed. This lack of questioning is probably the most striking result of this test. It is probably to be ascribed to a view of an electric field strongly determined by the particular phenomenology: the electric field is not the same concept when charges are moving (in wires) and when they are static (see Figs. 5 and 6).

IV. CONCLUSION

This research was designed to investigate students' difficulties with a very basic principle of physics, the superposition of electric fields. A preliminary investigation suggested that two kinds of obstacle might hinder their understanding of this principle. One is a need for a salient effect (in fact a motion) in order to accept the existence of a field. This effect is referred to as *field if mobility*. The other is called *cause in the formula* and consists of an erroneous interpretation of a mathematical relationship. The quantities on the right side

Table XII. Have you ever thought about this issue?

Sample	Number	Yes
S_2+	206	6%
S_3		
S_4	126	6%

A point charge is outside an insulating body. Does this charge create an electric field at a point M inside this insulating body (see diagram below)?



• q YES ☐ NO ☐
WHY?

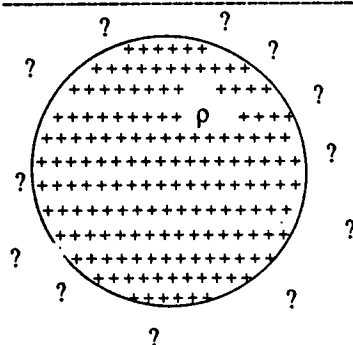
Fig. 5. A question about the electric field in an insulator (P_1).

are seen as the cause for the quantities on the left. The results of this inquiry strongly confirm these preliminary hypotheses.

The influence of charge mobility for the understanding of fields is shown in a first test (Neapolitan ice cream). Indeed, the students often deny that the fields can be the same in zones of different conductivity.

The two tests "Near a conductor, NC and NC'" illustrate the difficulties linked with a causal interpretation of formulas. Two modalities were pointed out. The first one is described above, since " σ " is "in" the formula $E=\sigma/\epsilon_0 n$, the charges on the conductor are seen as the (only) cause of the field. The second might be a need for a plus sign in the formula in order to manifest the superposition principle. These two modalities seem to reinforce each other.

The last test massively demonstrated that the students lack of an integrated understanding of electric fields. Electric circuits are considered as a subject in themselves. It seems as if, for many students, the electric field only had to "know" the shape of the wires in order to get the right direction, no question being posed about which charges could provide such information. Moreover, the importance of an effect to



An insulating sphere of radius R is charged with a uniform density of charge ρ . The distribution of charge outside the sphere is unknown.

One would like to calculate the electrostatic field at a point M located inside the sphere, that is to say at a distance r from the centre such that $r < R$.

Is it possible to make this calculation without knowing the distribution of charge outside the sphere?

If Yes why?, and how?

If No, why?

Explain your answer in detail

Fig. 6. The "Gauss" question (P_2).

accept the existence of a cause is so strong that in some responses the cause of the field is said to be the current: a remarkable inversion!

These four tests gave a large number of wrong answers, after courses at university level in France as well as in Sweden. The question with materials of different conductivity shows that successive courses left pieces of knowledge unconnected in the students' minds. This seems to indicate that each particular set of formulas or phenomena determines a kind of specific understanding of an electric field.

Therefore, it seems clear that a proper understanding of the superposition principle is necessary to reach an integrated comprehension of electric phenomena. Our findings confirm that the correct use of this principle is far from obvious to students. The question posed is whether such a teaching goal should be adopted or not. In our opinion the answer is affirmative. We suggest that the proposal of Sherwood and Chabay^{11,12} to analyze transitory movements of surface charges in electric circuits, or similar attempts, should be taken very seriously. Indeed, in these areas of electrostatics and steady state circuits, field sources are to be sought in charges rather than in complicated ways of interpreting integral formulas. An excessive focus on charge mobility to decide whether a field is present should also be avoided. Questions of the type used in this inquiry might help in this direction.

APPENDIX (for more details, see Ref. 16)

The samples are similar to those described in Sec. III. (See Figs. 5 and 6 and Tables XIII and XIV.)

Table XIII. Question P_1 : rates of answers.

Sample	Number	Yes (correct)	No ^a
S_1	64	42%	42%
S_2	25	36%	48%
S_4	64	64%	23%

^aComments on the answer "No." "The insulator is a barrier." "Charges cannot move in an insulator, therefore there is no field."

Table XIV. Question P_2 : rates of answers.

Sample ^a	Number	No (correct)	Yes ^a
S_3	137	16%	84%

^aComments on the answer "yes" mainly show a misunderstanding of Gauss' theorem: " $\Phi = q_{\text{int}}/\epsilon_0$, then E depends only on the internal charge." In some arguments, the insulator is apparently seen as a barrier between the inside and the outside: "because the sphere is insulating."

- ¹R. Driver, "Students' conceptions and the learning of science," *Int. J. Sci. Educ.* **11** (5), 481-490 (1989).
- ²L. Viennot, "Analyzing students' reasoning: Tendencies in interpretation," *Am. J. Phys.* **53** (5), 432-436 (1985).
- ³J. L. Closset, "Le raisonnement séquentiel en électrocinétique," Thèse, Université Paris VII, 1983.
- ⁴D. M. Shipstone, C. von Rhöneck, W. Jung, C. Kärrqvist, J. J. Dupin, S. Joshua, and P. A. Licht, "A study of students' understanding of electricity in five European countries," *Int. J. Sci. Educ.* **10** (3), 303-316 (1988).
- ⁵B-S. Eylon and U. Ganiel, "Macro-micro relationships: The missing link between electrostatics and electrodynamics in students' reasoning," *Int. J. Sci. Educ.* **12** (1), 79-94 (1990).
- ⁶W. G. V. Rosser, "What makes can electric current flow," *Am. J. Phys.* **31** (11), 884-885 (1963).
- ⁷W. G. V. Rosser, "Magnitudes of surface charge distributions associated with electric current flow," *Am. J. Phys.* **38** (2), 265-266 (1970).
- ⁸M. A. Heald, "Electric fields and charges in elementary circuits," *Am. J. Phys.* **52** (6), 522-526 (1984).
- ⁹W. R. Moreau, S. G. Ryan, S. J. Beuzenberg, and R. W. G. Syme, "Charge density in circuits," *Am. J. Phys.* **53** (6), 552-554 (1985).
- ¹⁰J. M. Aguirregabiria, A. Hernandez, and M. Rivas, "An example of charge distribution on conductors carrying steady currents," *Am. J. Phys.* **60** (2), 138-141 (1992).
- ¹¹B. A. Sherwood and R. W. Chabay, "Electrical Interactions and the Atomic Structure of Matter," in *Learning Electricity and Electronics with Advanced Educational Technology*, NATO ASI Series F, edited by M. Caillot (Springer, Berlin, 1993), Vol. 115, pp. 23-35.
- ¹²B. A. Sherwood and R. W. Chabay, *Electric and Magnetic Interactions* (Wiley, New York, in press).
- ¹³A. Benseghir, "Transition Electrostatique-Electrocinétique: point de vue historique et analyse des difficultés des élèves," Thèse, Université Paris VII, 1989.
- ¹⁴A. Benseghir and J-L. Closset, "The electrostatics-electrokinetics transition. Historical and educational difficulties," *Int. J. Sci. Educ.* (to be published).
- ¹⁵S. Törnkqvist, K-A. Pettersson, and G. Tranströmer, "Confusion by representation: On student's comprehension of the electric field concept," *Am. J. Phys.* **61** (4), 335-338 (1993).
- ¹⁶L. Viennot and S. Rainson, "Students' reasoning about the superposition of electric fields," *Int. J. Sci. Educ.* **14** (4), 475-487 (1992).
- ¹⁷R. Gutierrez and J. Ogborn, "A causal framework for analyzing alternative conceptions," *Int. J. Sci. Educ.* **14** (2), 201-229 (1992).

Résumé

Cette recherche porte sur :

- l'étude des raisonnements des étudiants à propos de la superposition des champs électriques
- la mise au point et l'évaluation d'une séquence sur ce thème.

Le principe de superposition, qui stipule que toutes les charges électriques présentes dans un système contribuent au champ total selon la loi de Coulomb, est essentiel pour aboutir à une compréhension unifiée de l'électrostatique et de l'électrocinétique. Notre hypothèse est qu'au cours de l'utilisation de ce principe apparaissent des difficultés liées à une conception étroite de la causalité. Cette hypothèse détermine l'étude de raisonnements préalable et certains des leviers de la séquence.

Après une enquête préliminaire, les outils de la recherche ont été principalement des questionnaires papier-crayon. Deux obstacles ont été mis en évidence:

- les étudiants ont souvent des difficultés à envisager l'existence d'un champ électrique dans un milieu où les charges sont immobiles.
- de nombreux étudiants attribuent un contenu causal abusif aux relations littérales entre grandeurs physiques, ils oublient les sources du champ qui ne figurent pas explicitement dans son expression.

Une analyse de manuels scolaires indique que ces difficultés ne sont pas prises en compte habituellement dans l'enseignement.

L'intervention pédagogique construite et affinée progressivement au cours de trois années d'expérimentation est destinée à une classe de Mathématiques Spéciales Technologiques, dont les fortes contraintes ont été respectées. Pour tenter de s'appuyer sur l'aspect causal du raisonnement tout en maîtrisant ses limitations habituelles, l'accent a été mis sur les changements de grandeurs physiques dans des modifications de situations. L'évaluation s'est faite essentiellement à l'aide d'un questionnaire, en comparant des groupes témoins et expérimentaux. Les résultats suggèrent la pertinence de nos leviers d'action pédagogique. La permanence de certaines difficultés est également illustrée.