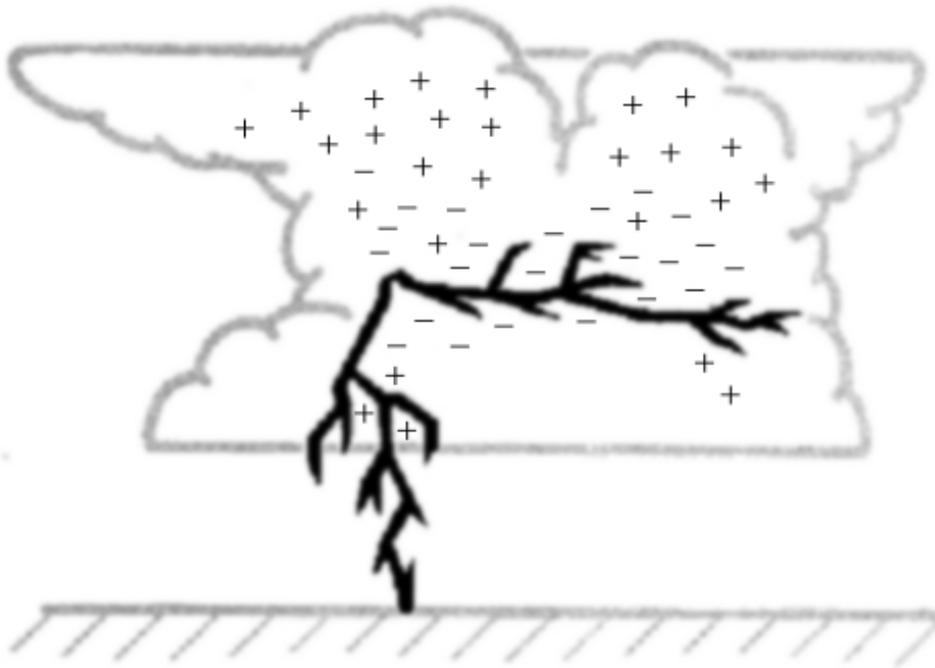


SIMULATIONS D'ÉLECTROSTATIQUE



Alexandre Kaspar

2006 - 2007

Professeur accompagnant : **Dr. Lionel Barlatey**
Collège de la Royale Abbaye de Saint-Maurice

Résumé du travail

Le travail de maturité qui suit se veut être une conception particulièrement abstraite du monde, fort incomplète mais proprement scientifique. Cette conception est celle d'une réalité dont la complexité et l'incompréhensibilité nous sont nécessaires.

La vision que nous avons du monde n'est qu'une infime partie de son immensité. Nous ne voyons que quelques insignifiants débris rejetés par la matière : les photons. Nous sentons quelques odeurs. Nous entendons quelques bruits. Nous ressentons quelques vagues sensations tactiles. Malgré tout, nous ne le comprenons ni ne le connaissons véritablement.

Ce travail n'a pas l'ambition d'expliquer notre univers. Il se veut simplement être un regard particulier porté sur la complexité intrinsèque de l'être, au travers d'une visite succincte du domaine de l'électrostatique.

Les difficultés qui surviennent lorsque l'on tente de représenter le monde abstrait de l'électricité ont conduit à l'élaboration d'un outil informatique. Il ne s'agira pas de parler de sa conception mais des produits qui en résultent. Nous traiterons pour cela de plusieurs domaines tels que le bioélectromagnétisme, le concept de matière conductrice ou encore de phénomènes météorologiques comme les orages électriques.

Le résultat indirectement proposé est donc la conception d'un monde composé de particules chargées libres de se mouvoir.

"*Panta rei*"¹ affirmait Héraclite. Si notre monde est en continuel changement à travers les particules qui le composent, comment expliquer l'ordre miraculeux régissant notre univers ?

D'où vient-il et quels en sont les principes ? Voilà ce vers quoi le présent travail s'efforcera d'amener le lecteur, invité à s'étonner devant le nouveau monde qui s'ouvre à lui.

1 "*Tout s'écoule.*"

Table des matières

Résumé du travail.....	2
0. Introduction au travail.....	5
A. Principes d'électrostatique.....	6
1. Introduction.....	6
1.1 - Force électrique.....	6
1.2 - Champ électrique.....	6
2. Loi de Coulomb.....	6
3. Principe de superposition.....	7
4. Notion de tension.....	7
4.1 - Travail du champ électrique produit par une charge ponctuelle.....	7
4.2 - Tension dans un champ électrique.....	7
5. Notion de potentiel.....	8
5.1 - Potentiel électrique dans le champ d'une charge ponctuelle.....	8
B. Représentation du champ électrostatique.....	9
1. Champ vectoriel.....	9
1.1 - Représentation du champ.....	9
1.2 - Méthode de normalisation.....	9
2. Lignes de champ et équipotentiellles.....	10
2.1 - Notion de champ vectoriel.....	10
2.2 - Notion de ligne de champ et d'équipotentielle.....	10
2.3 - Affichage des lignes de champ.....	10
2.4 - Représentation des équipotentiellles.....	11
C. Applications au champ électrostatique.....	13
1. Distributions de charges.....	13
1.1 - Charge isolée.....	13
1.2 - Deux charges discrètes.....	13
1.3 - Distribution linéaire continue de charges.....	14
2. Condensateurs plans et théorème de Gauss.....	15
2.1 - Théorème de Gauss.....	15
2.2 - Champ d'une charge linéique.....	15
2.3 - Plan uniformément chargé.....	15
2.4 - Deux plans uniformément chargés.....	16
2.5 - Condensateur plan.....	16
3. Charge ponctuelle dans le voisinage de plans conducteurs électriques parfaits.....	20
3.1 - Champ à l'intérieur d'un conducteur parfait.....	20
3.2 - Disposition des charges dans un conducteur.....	20
3.3 - Principe du blindage.....	20
3.4 - Méthode des images.....	21
4. Champ électrique à l'interface entre deux milieux.....	23
4.1 - Milieux diélectriques.....	23
4.2 - Conditions aux limites.....	23
4.3 - Champ produit par une charge ponctuelle.....	23

5. Modèle électrostatique des orages.....	26
5.1 - Electricité atmosphérique.....	26
5.2 - Formation des nuages d'orage.....	26
5.3 - Séparation des charges.....	27
5.4 - Modèles électrostatiques.....	27
5.5 - Phénomène de la foudre.....	28
5.6 - Le tonnerre.....	29
5.7 - Le paratonnerre.....	29
D. Conclusion.....	30
E. Bilan personnel.....	31
F. Bibliographie.....	32
1. Ouvrages complets ou partiels consultés.....	32
2. Pages internet.....	32
2.1 - Wikipédia.....	32
2.2 - Site sur la programmation.....	33
2.3 - Site sur les programmes concurrents.....	33
2.4 - Contenu scientifique en ligne.....	33
G. Annexes.....	35
1. Conditions d'utilisation.....	35
1.1 - Plateforme Adobe Flex / Adobe Flash.....	35
1.2 - Structure des données du programme.....	35
1.3 - Considérations matérielles.....	36
2. Manuel d'utilisation.....	36
2.1 - Environnement de base.....	36
2.2 - Environnement paramétrable.....	39
2.3 - Variables.....	41
2.4 - Types de projets.....	41
2.5 - Syntaxe des fichiers de projets.....	42
3. Programmes concurrents ou similaires.....	45
3.1 - Mathematica.....	45
3.2 - CUPS.....	45
3.3 - QuickField.....	46
3.4 - Visualis Physics.....	46
4. Source du programme.....	46
4.1 - Algorithmes principaux.....	46
4.2 - Extensibilité.....	48

0. Introduction au travail

Avant de pouvoir même imaginer une représentation des phénomènes de l'électrostatique appliquée à des cas concrets, il est nécessaire de présenter les fondements, les règles qui permettent une explication - aussi incomplète soit-elle - des dits-phénomènes.

Ainsi, la première partie présente les principes fondamentaux de l'électrostatique tels que les notions de force et champ électrique, les lois s'appliquant entre éléments chargés ainsi que les notions fortes abstraites de tension et potentiel.

La seconde partie élabore la méthode de représentation du champ électrique qui sera utilisée dans la suite du travail. Elle permettra une certaine visualisation de ce dernier grâce au logiciel informatique développé en parallèle. A noter que cet outil ne sera présenté que partiellement. Libre au lecteur avide de connaissance de se reporter aux annexes dans lesquelles figurent de plus amples informations à propos du programme et de son utilisation.

La troisième partie sera la concrétisation des concepts et méthodes préalablement acquises à travers cinq applications présentées selon leur ordre de complexité.

- Tout d'abord, une présentation de plusieurs distributions basiques de charges exposera les cas traités par la suite.
- Suivront le théorème de Gauss et le cas plus concret du condensateur plan dont l'approche sera théorique et pratique via une série d'approximations numériques.
- Les conducteurs électriques parfaits introduiront une méthode particulière de représentation appelée "Méthode des images" faisant référence au domaine physique de l'optique tout en présentant des principes tels que le blindage.
- Une extension aux milieux diélectriques de permittivités différentes se rapportant au bioélectromagnétisme évoquera la complexité de la réalité qui ne se résoud pas selon les cas idéaux précédemment établis.
- Finalement, la concrétisation des applications se fera dans le domaine de la météorologie à travers une explication des orages, leur formation et les phénomènes tels que la foudre et le tonnerre.

La conclusion établira les conséquences d'une telle représentation du monde ainsi que des approches supplémentaires possibles et un élargissement rappelant au lecteur l'inexhaustivité du domaine présenté.

A. Principes d'électrostatique

1. Introduction

Tout corps est composé d'assemblages de molécules, molécules formées elles-mêmes d'atomes, formés eux-mêmes d'un noyau composé de protons et de neutrons, autour duquel gravitent des électrons.

A chaque élément correspond une charge électrique – positive, négative ou nulle – le caractérisant. Les charges électriques de même signe se repoussent tandis que les charges de signes opposés s'attirent.

1.1 - Force électrique

La **force électrique** \vec{F} est responsable de l'attraction ainsi que de la répulsion des corps chargés qui correspondent, par analogie, aux corps massifs attirés entre eux par la force de gravitation (cette dernière n'est par contre jamais répulsive).

1.2 - Champ électrique

Le **champ électrique** \vec{E} est une grandeur physique qui permet de définir et mesurer en tout point de l'espace l'influence exercée à distance par des corps chargés électriquement. Ce champ a une direction, un sens, et une grandeur – exprimée en volt par mètre ou en Newton par Coulomb – telle qu'en présence d'une charge de test d'intensité q [C], la force électrique exercée sur la charge de test vaut :

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

2. Loi de Coulomb

La loi de Coulomb définit la force exercée par une charge q_1 sur une charge q_2 . L'intensité de cette force est directement proportionnelle au produit des charges et inversement proportionnelle au carré de leur distance r .

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r_{1 \rightarrow 2}^2} \cdot \frac{\vec{r}_{1 \rightarrow 2}}{r_{1 \rightarrow 2}}$$

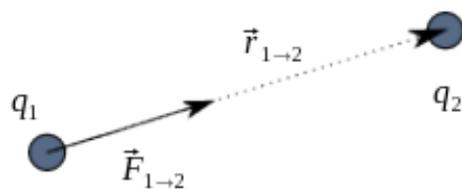


Fig. 1: Illustration de la loi de Coulomb pour deux charges de signes opposés

ϵ est la permittivité du milieu ou constante diélectrique du milieu. La permittivité de référence est celle du vide, notée ϵ_0 . Celle de l'air lui est souvent assimilée car elle lui est seulement 0,5 % supérieure. [Wikipédia]

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \left[\frac{F}{m^{-1}} \right]$$

De plus, à titre de simplification, on pose souvent :

$$k = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} = 10^{-7} \cdot c^2 \approx 9.0 \cdot 10^9 \left[\frac{Nm^2}{C^2} \right]$$

3. Principe de superposition

En présence de plusieurs charges, le principe de superposition définit la force exercée sur une charge quelconque q comme étant la somme vectorielle des forces exercées par chacune des autres charges en présence :

$$\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = q \cdot \sum_i \vec{E}_i$$

4. Notion de tension

4.1 - Travail du champ électrique produit par une charge ponctuelle

Soit une charge Q placée à l'origine ainsi qu'une charge de test q déplacée le long d'un chemin quelconque entre 1 et 2.

Le travail est le produit d'une force (dans ce cas, la force électrique) par un déplacement (le trajet de 1 à 2) :

$$A_{12}(\vec{F}) = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{r} = q \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\frac{qQ}{4\pi\epsilon} \int_1^2 \frac{x dx + y dy}{\sqrt{(x^2 + y^2)^3}}$$

$$A_{12}(\vec{F}) = -\frac{qQ}{4\pi\epsilon} \int_1^2 d(x^2 + y^2)^{-\frac{1}{2}} = -\frac{qQ}{4\pi\epsilon} \left[\frac{1}{r} \right]_{r_1}^{r_2}$$

Finalement :

$$A_{12}(\vec{F}) = -\frac{qQ}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

On en conclue que le travail $A_{12}(\vec{F})$ est indépendant du chemin parcouru entre ses extrémités.

On dit que le champ électrique produit par une charge ponctuelle est conservatif.

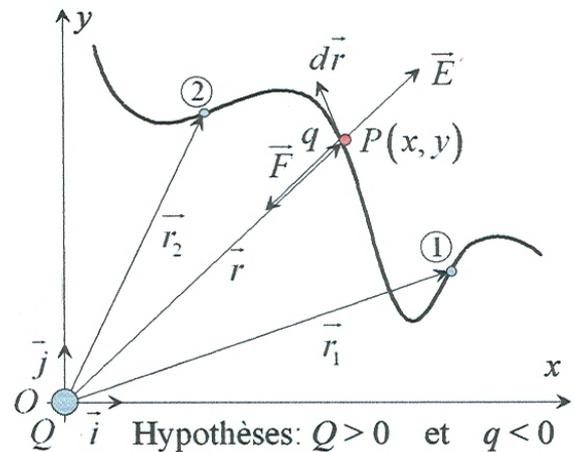


Fig. 2: Déplacement d'une charge de test q dans le champ d'une charge ponctuelle Q [Barlately, 2007]

4.2 - Tension dans un champ électrique

La définition de la tension est très proche de celle du travail. Elle se définit entre deux points d'un champ électrique, pris dans un certain ordre, et est relative à un chemin joignant ces points.

La tension est le produit du champ électrique par le déplacement, soit le travail de la force électrique divisé par la charge déplacée, ce qui correspond au travail du champ électrique entre deux points.

$$U_{AB} = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r} = \int_A^B \frac{\vec{F}}{q} \cdot d\vec{r}$$

Quant au cas du champ d'une charge ponctuelle, la tension vaut alors :

$$U_{AB} = \int_A^B \frac{\vec{F}}{q} \cdot d\vec{r} = \frac{A_{AB}(\vec{F})}{q} = \frac{Q}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \Leftrightarrow A_{AB}(\vec{F}) = qU_{AB}$$

5. Notion de potentiel

Observons le courant d'eau d'une rivière. Son existence est due à la différence d'altitude entre deux points du lit de la rivière. On dit de l'altitude z qu'elle est un "potentiel gravitationnel". [Wikipédia]

$$G(a,b) = G_{AB} = z(a) - z(b) = z_A - z_B$$

A la dénivellation géographique correspond la différence de **potentiel électrique** qu'on appelle **tension** U et dont l'unité est le volt.

$$U(a,b) = U_{AB} = V(a) - V(b) = V_A - V_B$$

Notons que le potentiel est défini à une constante près : on use généralement d'un potentiel de référence appelé la **terre** et servant de référence zéro.

$$V_A = U_{AO} = V_A - V_O \quad \text{où } V_O \text{ est la référence zéro.}$$

5.1 - Potentiel électrique dans le champ d'une charge ponctuelle

Soit une charge ponctuelle Q ainsi qu'une charge de test q . Le point de référence O est rejeté à l'infini, où l'intensité du champ électrique produit par Q s'annule ($\vec{E} = \vec{0}$).

Le potentiel en un point P est la tension entre ce point et le point de référence O , équivalant au travail du champ électrique entre ces deux points.

$$V_P = U_{PO} = \int_P^O \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

Le champ électrique est tangent aux lignes de champ de Q .

$$\vec{E} \parallel d\vec{r} \Rightarrow \int_P^O \vec{E} \cdot d\vec{r} = \int_P^O E \cdot dr$$

Finalement le potentiel vaut :

$$V_P = \int_{r_P}^{\infty} \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2} dr = \frac{Q}{4\pi\epsilon r_P}$$

Cette expression est aussi valable lorsque $Q < 0$.

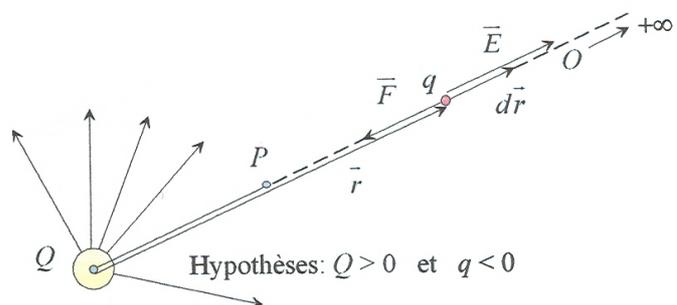


Fig. 3: Charge ponctuelle Q et charge de test q sur une ligne de champ de Q (radiale) [Barlately, 2007]

B. Représentation du champ électrostatique

Deux méthodes de visualisation et d'interprétation du champ électrique ont été mises en oeuvre. La première consiste en l'affichage du champ vectoriel établi à travers une grille² indépendante des éléments chargés électriquement. La seconde, à contrario, part des différents éléments chargés pour établir le champ à leurs alentours selon des *lignes de champ* et *équipotentiell*es.

On notera avant toute chose que les situations considérées sont à deux dimensions alors que les lois de l'électromagnétisme sont considérées dans l'espace à trois dimensions : certaines hypothèses seront nécessaires³.

1. Champ vectoriel

1.1 - Représentation du champ

La première méthode consiste en l'affichage du champ vectoriel en divers points de l'environnement. L'interprétation du champ est alors possible grâce aux vecteurs affichés en chaque point. Ceux-ci possèdent une direction, un sens ainsi qu'une intensité rendus visibles par une flèche de taille et d'opacité variables.

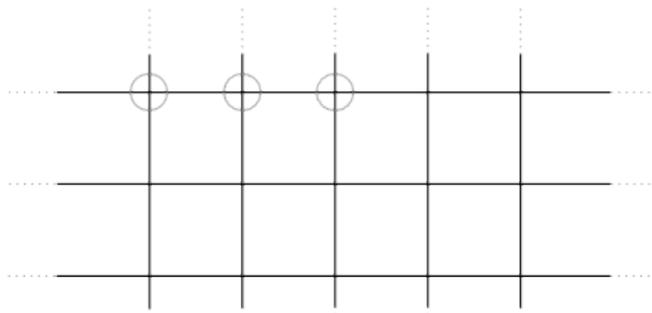
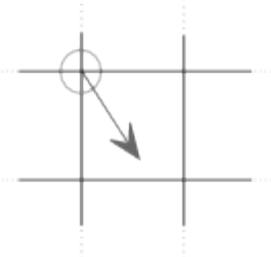


Fig. 4: Grille et noeuds (entourés d'un cercle) identifiant les points de calcul et de représentation du champ électrique

De manière à représenter l'environnement entier, une grille paramétrable⁴ y définit les points auxquels le champ sera par la suite visualisé - appelés **noeuds**.

Fig. 5: Flèche représentant le champ électrique en un noeud de la grille



1.2 - Méthode de normalisation

La normalisation du champ définit la relation entre la taille et l'opacité des vecteurs graphique, et l'intensité réelle du champ correspondant. Elle est composée de deux processus de réduction appliqués à l'intensité du champ.

Le premier consiste en la définition de la taille maximale des vecteurs affichés :

$$E_{\text{réd}} = E_{\text{réel}} \cdot \frac{\text{Pas de la grille} \pm \text{bordure}}{E_{\text{max}}}$$

E_{max} est l'intensité maximale du champ électrique affiché.

Le second (processus de normalisation) consiste en l'établissement d'une échelle à partir d'une fonction. Trois échelles ont été définies :

1. L'échelle réelle dont la fonction de réduction est la fonction identité : $E_{\text{final}} = E_{\text{réd}}$;

² Le repère se trouve en bas à gauche de la zone cadrillée par la grille, il est indiqué par deux flèches et les lettres x et y

³ c.f. Application 2 à propos de la conclusion

⁴ c.f. Annexe - Environnement paramétrable

2. L'échelle constante dont la fonction de réduction est une fonction constante : $E_{final} = Constante = Pas\ de\ Grille$;

3. L'échelle logarithmique dont la fonction de réduction est :

$$E_{final} = \frac{1}{|\log_{10}(E_{red})| + 1} .$$

2. Lignes de champ et équipotentielles

2.1 - Notion de champ vectoriel

Un champ est un outil mathématique faisant correspondre à tout point de l'espace une valeur. Cette valeur peut être un vecteur - on parle alors de champ vectoriel et c'est le cas du champ électrique - ou un scalaire - on parle alors de champ scalaire tel que celui de la température.

2.2 - Notion de ligne de champ et d'équipotentielle

Une ligne de champ est une abstraction géométrique permettant la représentation d'un champ vectoriel. Elle correspond à une courbe en tout point tangente au champ électrique.

Dans le champ électrostatique, ces lignes de champ partent des charges positives vers les charges négatives. Elles ne croisent jamais d'autres lignes et ne se referment pas sur elles-mêmes. Elles ont de plus la particularité d'être perpendiculaires à la surfaces des conducteurs parfaits⁵.

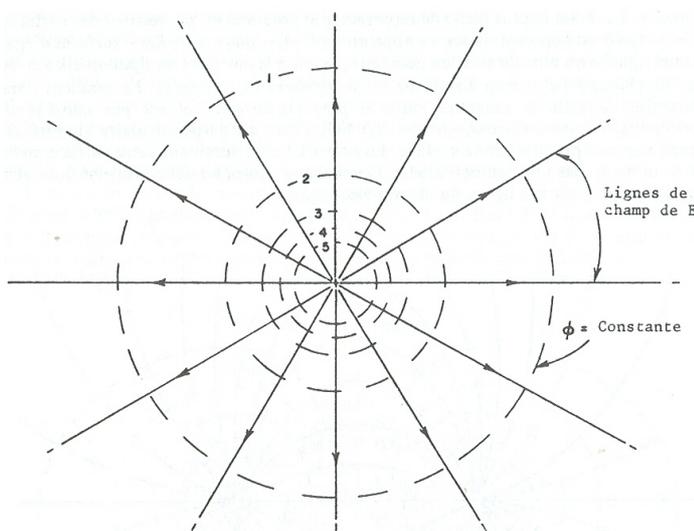


Fig. 6: Charge ponctuelle, lignes de champ et équipotentielles [Feynman, 1999]

Une équipotentielle est quant à elle un lieu de l'espace - de manière générale - ou du plan - dans notre cas - où le potentiel est constant.

De ce fait, le champ électrique est toujours perpendiculaire à la surface d'une équipotentielle sans quoi le travail effectué le long de la surface par le champ ne serait pas nul et donc il y aurait une différence de potentiel.

Plus les lignes de champ sont proches les unes des autres, plus le champ est intense. Quant à la proximité des équipotentielle, elle témoigne de la l'intensité de la variation de potentiel (tension).

2.3 - Affichage des lignes de champ

L'affichage nécessite une définition préalable des origines des lignes de champ. Cette définition est spécifique à chaque élément chargé du milieu mais, de manière générale, les lignes de champ partent toutes de la surface des éléments chargés positivement.

Ensuite, partant d'une charge et procédant par récurrence, le tracé est dessiné jusqu'à ce que la ligne de champ atteigne un autre élément chargé du

⁵ c.f. Application 2 des condensateurs plans

milieu ou les bords de l'environnement visible. On obtient une chaîne de segments – le champ électrique leur étant à tous tangent – suffisamment petits⁶ pour simuler une courbe correspondant à la ligne de champ.

Le procédé est simple mais il nécessite quelques corrections en raison de l'imprécision de départ – la taille des segments – car plusieurs problèmes font leur apparition dès que le tracé entre dans une zone limite – zone dans laquelle la direction du champ varie fortement ou dans laquelle le champ tend à être nul.

Les cas limites nécessitant une correction sont :

1. Forte déviation d'angle : si la taille des segments est trop grande, les fortes déviations d'angles résultent en des courbes brisées.

2. Traversée d'interface : cas principal de forte déviation d'angle.

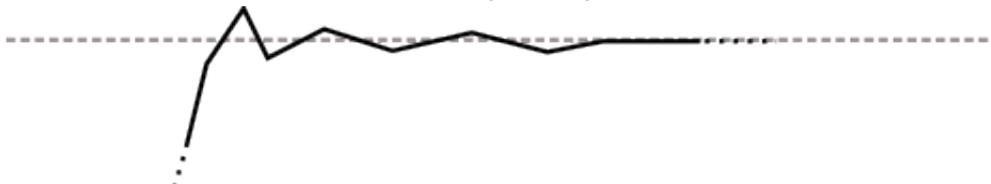


Fig. 7: Tracé (en noir) dévié par le croisement d'une interface (en gris)

3. Point nul aspirant : le tracé d'un segment traversant une zone critique peut résulter en une boucle infinie si le champ de part et d'autre du point critique a un sens opposé.



Fig. 8: Etapes d'aspiration du tracé : approche d'un point nul (croix), traversée du point nul, rebroussement de direction

Une augmentation de la précision du tracé résoud généralement le problème mais cette augmentation a une limite car le tracé est fait selon des coordonnées entières par rapport aux pixels de l'écran : le pas ne peut pas être plus petit qu'un pixel.

Quant aux points nuls, ces derniers sont représentés par une croix mais ne sont affichés que si le tracé tombe par hasard sur une zone limite.

2.4 - Représentation des équipotentiellles

L'affichage des équipotentiellles aurait pu fonctionner par le même système de segments tout en rendant les segments perpendiculaires au champ électrique. Malheureusement cette solution n'est pas envisageable pour des raisons d'imprécision.

Si pour les lignes de champ, l'imprécision due à la taille des segments composants ne pose aucun problème, elle a un impact direct sur les équipotentiellles car ces dernières peuvent former des boucles se refermant sur elles-mêmes (ce qui est impossible pour une ligne de champ dans les cas d'électrostatique dont il est question). Les imprécision auraient pour effet que les équipotentiellles ne pourraient pas se refermer sur elles-mêmes et donc la majorité des cas serait mal affichée.

L'utilisation de lignes n'étant pas probante (Fig. 9), les équipotentiellles sont simulées à travers des ensembles de points déterminés sur les lignes de champ.

Lors du tracé des lignes de champ, des points sont indexés selon la valeur du champ électrique.

⁶ c.f. Annexe A - Paramétrage du tracé des lignes de champ

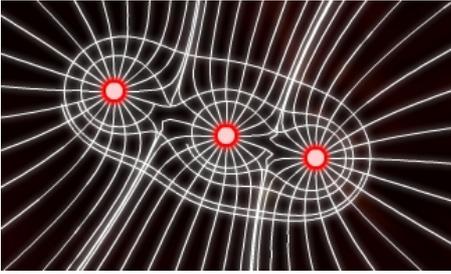


Fig. 9: Equipotentiels selon la méthode de tracé des lignes de champ

Une alternance de couleur est effectuée pour que l'on puisse déterminer des groupes de points correspondant à un même potentiel.

Le résultat dépend du nombre de lignes de champ mais permet une représentation suffisante des surfaces équipotentiels et de l'évolution du potentiel dans l'environnement.

C. Applications au champ électrostatique

1. Distributions de charges

L'outil informatique développé permet d'afficher le champ électrique suivant les éléments que contient l'environnement de travail. Les distributions de charges peuvent être quelconques mais certaines sont incontournables pour mieux comprendre l'évolution du champ électrique.

Qu'il faille calculer le champ produit par une ou plusieurs charges ponctuelles, une ligne continue droite ou à méandres (courbe) de charges, la méthode qu'utilise le programme est la même dans tous les cas possibles.

Chaque élément est indexé et doit posséder une méthode propre de calcul renvoyant le champ produit en un point passé en argument.

Le calcul général se fait selon le principe de superposition.

1.1 - Charge isolée

La charge isolée permet de mettre en évidence les bases de l'outil de représentation du champ ainsi que l'utilité de paramètres comme l'échelle utilisée (Fig. 10 et 11).

Elle est représentée par un rond pouvant être de trois couleurs selon le signe de la charge :

- Charge positive : rouge
- Charge négative : bleue
- Charge nulle⁷ : blanche

Le calcul du champ produit par la charge isolée est effectué simplement à partir de la loi de Coulomb.

Ainsi le champ produit en (x,y) par une charge Q positionnée en (x_0,y_0) vaut :

$$\vec{E}_{(x_0,y_0)}(x,y) = \frac{kQ}{\sqrt{((x-x_0)^2+(y-y_0)^2)^3}} \cdot \begin{pmatrix} x-x_0 \\ y-y_0 \end{pmatrix}$$

1.2 - Deux charges discrètes

Que ce soient deux charges de même signe ou de signes opposés, ce second cas permet l'affichage de quelques exemples de points nuls.

Les points nuls ne sont pas affichés de manière systématique. Cela dépend uniquement de la chance et du traitement des cas limites.

Lors d'un affichage vectoriel, les points nuls ne sont affichés que s'ils se trouvent exactement sur un noeud du grillage tandis que lors du tracé des lignes de champ, les points affichés correspondent à des approximations étant donné la nature du tracé - composition de segments.

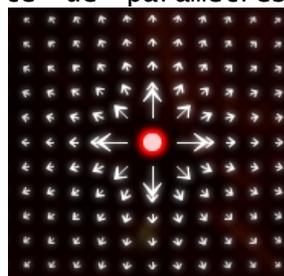


Fig. 10: Charge isolée selon l'échelle logarithmique

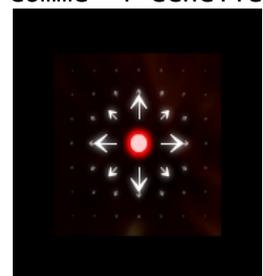


Fig. 11: Charge isolée selon l'échelle réelle

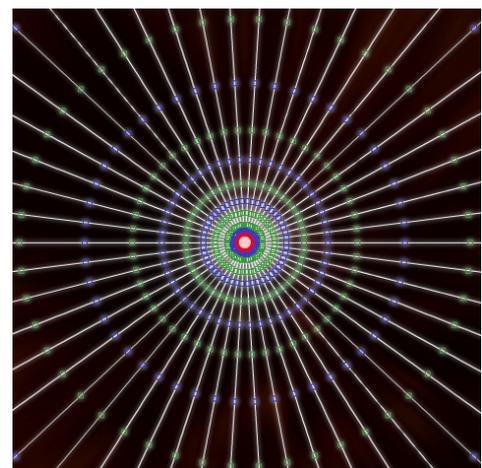


Fig. 12: Lignes de champ radiales et équipotentielle en forme de cercles centrés sur la charge isolée.

⁷ Ces charges ne sont pas prises en compte car elles n'interviennent pas dans les divers calculs.

Le cas de deux charges de signes opposés a la particularité de correspondre à un cas traité par la méthode des images dans le projet des plans conducteurs⁸. Il permet aussi une mise en évidence du caractère global de toute variation dans le champ électrique.

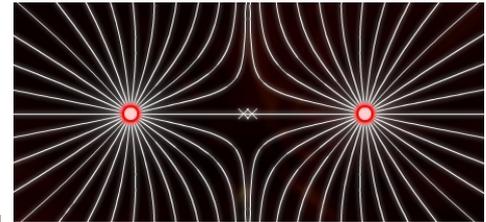


Fig. 13: Deux charges de même signe et l'approximation d'un point nul par la gauche et par la droite.

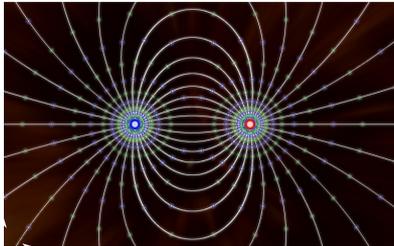


Fig. 14: Deux charges de signes opposés mais de même intensité.

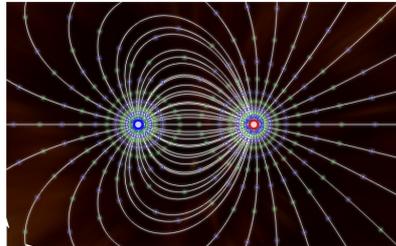


Fig. 15: Deux charges de signes opposés et la charge positive (droite) d'intensité double.

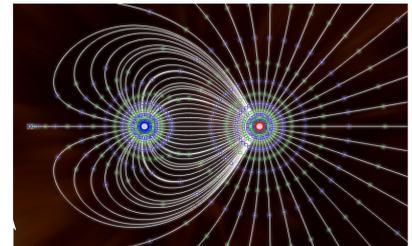


Fig. 16: Deux charges de signes opposés et la charge positive (droite) d'intensité quadruple. La partie droite ressemble en de nombreux points au cas d'une charge isolée.



Fig. 17: Champ vectoriel entre deux charges de signes opposés, selon l'échelle logarithmique.

1.3 - Distribution linéaire continue de charges

Une distribution linéique continue de charges est un cas idéal de répartition constante de charges. Ce cas représente un matériau isolant parfait alors que dans le cadre de conducteurs électriques parfaits, la répartition des charges ne serait pas constante.

De plus, c'est une fausse transcription d'un problème 3D en 2D car s'il représente généralement une plaque 3D - c'est le cas dans la plupart des ouvrages traitant de l'électrostatique - les calculs sont effectués comme s'il s'agissait d'une fine ligne continue de charges dans l'espace, ce qui est tout à fait différent d'une surface plane telle qu'une plaque d'un condensateur.

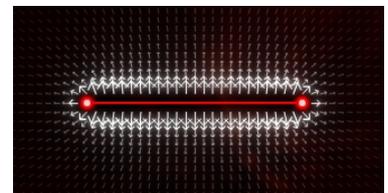


Fig. 18: Distribution linéique continue de charge, horizontale.

La distribution est représentée par deux ronds formant les extrémités ainsi qu'un segment reliant les deux extrémités. Sa densité linéique de charges est constante mais paramétrable.

Le calcul du champ produit par une telle distribution mettant en jeu une intégrale au moins, le cas le plus simple est pris en compte : soit une distribution horizontale. Si la distribution n'est pas horizontale initialement, une rotation du repère est effectuée de manière à établir un tel cas plus favorable au calcul. Le champ vaut alors :

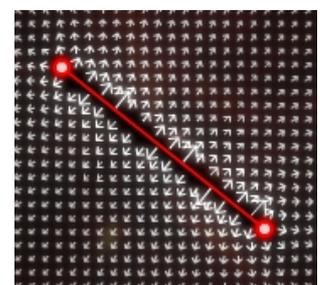


Fig. 19: Distribution continue, en diagonale. Utilisation d'un changement de base préalable au calcul.

$$\vec{E}(x_0, y_0) = k \cdot \rho_L \cdot \int_a^b \frac{\vec{r}}{r^3} dx, \quad \rho_L: \text{la densité linéique de charges}$$

$$Q = \int_a^b \rho_L dx = \rho_L(b-a), \quad dx: \text{l'élément infinitésimal de longueur}$$

⁸ c.f. Application 4.3

2. Condensateurs plans et théorème de Gauss

2.1 - Théorème de Gauss⁹

Le théorème définit le flux total du champ électrique sortant d'une surface fermée comme étant égal à la charge totale intérieure, divisée par ϵ ¹⁰.

$$\int_{\text{surface fermée } S} \vec{E} \cdot \vec{n} da = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon}$$

2.2 - Champ d'une charge linéique

Soit une tige très longue et uniformément chargée. La charge par unité de longueur vaut λ .

On cherche à déterminer le champ électrique selon la distance à la tige. Pour cela, on suppose le champ radial et dirigé vers l'extérieur - $\lambda > 0$.

On imagine une surface ayant la forme d'un cylindre coaxial à la distribution linéique. Le champ étant supposé normal à la surface, sa composante normale est égale à l'intensité du champ. Le flux sortant des deux faces perpendiculaires à la distribution est nul car le champ électrique leur est tangent.

En appliquant le théorème de Gauss :

$$E \cdot 2\pi r h = \frac{\lambda h}{\epsilon} \Leftrightarrow E = \frac{\lambda}{2\pi \epsilon r}$$

2.3 - Plan uniformément chargé

Soit un plan infini, infiniment mince et uniformément chargé. La charge par unité de surface est σ . On suppose à partir de la symétrie du système que le champ est partout normal au plan et de même intensité selon qu'on se trouve à une distance fixe de part et d'autre du plan.

On applique le théorème de Gauss à une boîte rectangulaire traversant le plan. Les deux surfaces de part et d'autre ont la même aire A et sont à la même distance du plan. Le champ est normal à ces deux faces et parallèle aux quatre autres.

$$EA + EA = \frac{\sigma A}{\epsilon} \Leftrightarrow E = \frac{\sigma}{2\epsilon}$$

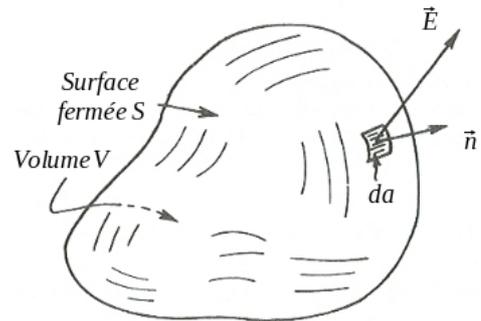


Fig. 20: La surface fermée S définit le volume V . Le vecteur unitaire \vec{n} est la normale extérieure à l'élément de surface da et \vec{E} est le vecteur flux du champ électrique sur l'élément de surface da . [Feynman, 1999]

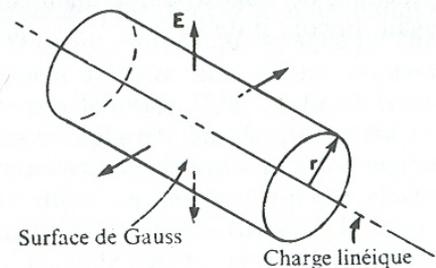


Fig. 21: Surface cylindrique de Gauss – de rayon r et de hauteur h – coaxiale avec une charge linéique positive. [Feynman, 1999]

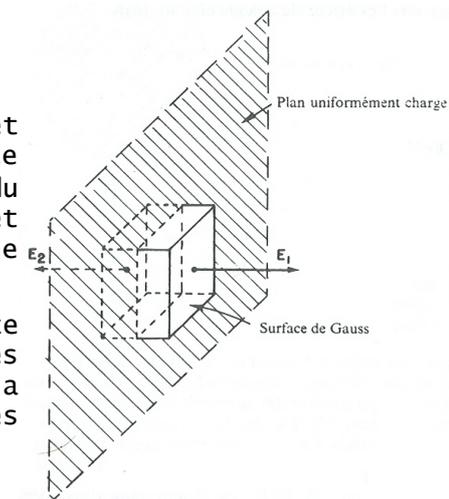


Fig. 22: Plan et boîte rectangulaire coupant le plan. [Feynman]

⁹ Johann Carl Friedrich Gauss (30 avril 1777 – 23 février 1855) était un mathématicien, astronome et physicien allemand.

¹⁰ ϵ sans indice correspond à la permittivité du milieu contextuel.

2.4 - Deux plans uniformément chargés

On place désormais deux plans infinis, parallèles et de densités surfaciques opposées $+\sigma$ et $-\sigma$.

En considérant une boîte contenant les deux plans, on observe que le champ à l'extérieur est nul puisque le bilan de la charge totale intérieure est nul.

En considérant ensuite une boîte qui contient seulement l'un ou l'autre des plans, on conclut que le champ entre les deux plans est le double de celui produit par un seul plan.

$$E(\text{entre les plans}) = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

$$E(\text{hors des plans}) = 0$$

2.5 - Condensateur plan

Soit deux plaques conductrices finies de charges opposées $+\sigma$ et $-\sigma$. Les charges sur chacune des plaques étant attirées par celles de l'autre plaque, elle se répartissent librement sur la surface intérieure.

a) Considérations à propos des hypothèses

Le cas est quasiment le même que celui de deux plans chargés dans une situation idéale où les plaques seraient infinies. Cependant, le cas est idéal car une telle structure n'existe pas. Les plaques doivent avoir une taille définie. Ainsi on notera que :

1. la répartition des charges n'est en réalité pas uniforme - des méthodes de calculs existent et nous apprennent que la densité de charges augmente un peu au voisinage du bord des plaques, mais ces méthodes ne seront pas développées dans le cadre de ce travail étant donné leur complexité;
2. le champ n'est pas uniforme partout et on peut observer des effets de bord aux extrémités des plaques;
3. le champ à l'extérieur des plaques n'est pas nul;

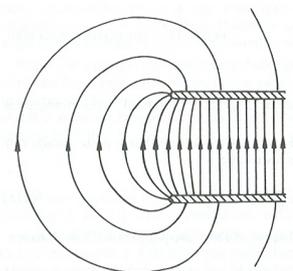


Fig. 24: Effets de bord [Feynman, 1999]

b) Série d'approximations numériques

En utilisant l'environnement présenté précédemment, une série d'approximations a été effectuée pour rendre compte des possibilités et limites de ce dernier.

Ainsi, des plaques parallèles - réduites au plan 2D de l'environnement - ont été simulées par une succession de charges ponctuelles et finalement par une distribution linéique finie. Les tests ont été effectués sur deux séries de 4 charges, 7 charges, 13 charges ainsi que 25 charges ponctuelles puis sur deux distributions linéiques continues.

L'espacement entre les rangées de charges est de 64 pixels verticalement tandis que la largeur considérée était de 192 pixels. Les charges sont chaque fois disposées en plaçant une charge à chaque extrémités et les autres entre les extrémités à un intervalle identique variant selon le nombre de charges de la série considérée. La base de la structure se trouve à l'ordonnée 256 [px]

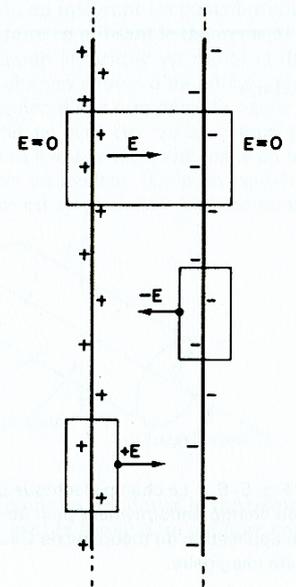


Fig. 23: Deux plans chargés. [Feynman]

pour permettre un affichage de chaque projet plus ou moins centré. La charge totale de chaque rangée, est - au signe près - de 1 [C].

c) Résultats

Les résultats ont été affichés selon un système de graphiques en balayant l'intérieur des plaques horizontalement avec un pas régulier. On notera que pour chaque graphe d'intensité, on ne perçoit généralement que 4 tracés. De par la symétrie du système, les tracés opposés se superposent.

Les divers graphes sont présentés à la suite, chaque fois possédant un axe (Ox) présentant les abscisses et un axe (Oy) présentant la valeur spécifique du champ à l'abscisse correspondante. Les courbes présentent quand à elles une ordonnée spécifique tout le long d'une rangée. Une visualisation du projet permet chaque fois une représentation des données.

Le graphe du haut correspond aux intensités du champ et celui du bas aux angles en radian.

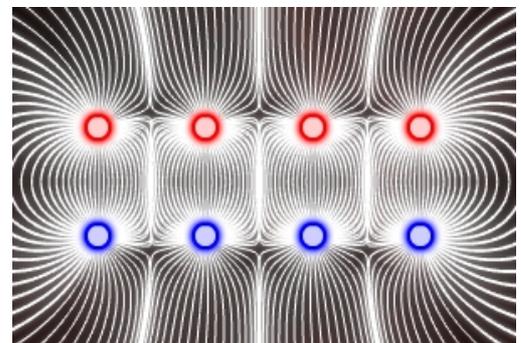
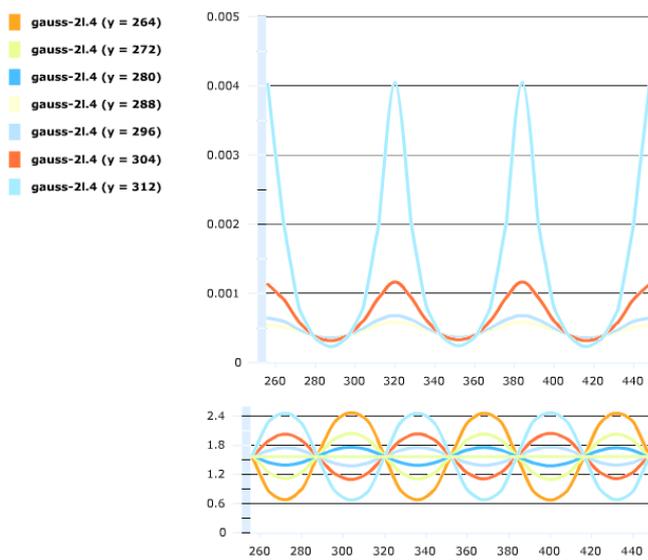


Fig. 25: Effets de bords importants et apparition de cellules relatives à des couples de charges de signes opposés.

Fig. 26: Le cas de départ composé de deux séries de 4 charges de 1/4 Coulomb. Les variations sont très importantes pour l'intensité et pour l'angle.

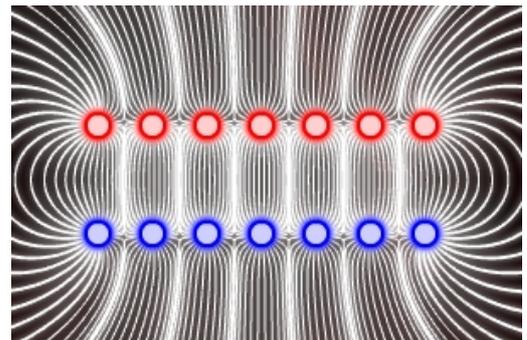
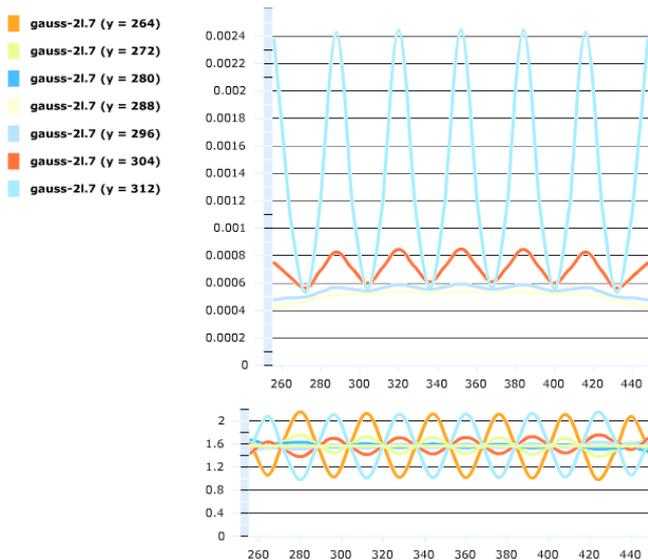


Fig. 27: Diminution de la taille des cellules.

Fig. 28: Deux séries de 7 charges de 1/7 Coulomb. La variation d'intensité et d'angle diminue.

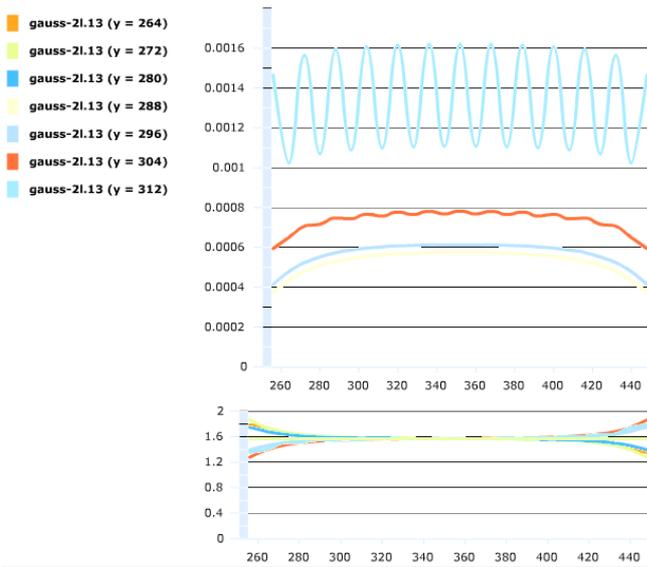


Fig. 29: Deux séries de 13 charges de 1/13 Coulomb. L'intensité se stabilise au centre tandis que l'angle est presque le même partout si ce n'est aux bords.

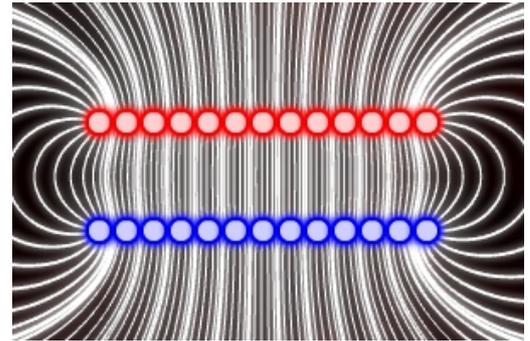


Fig. 30: Les cellules commencent à disparaître.

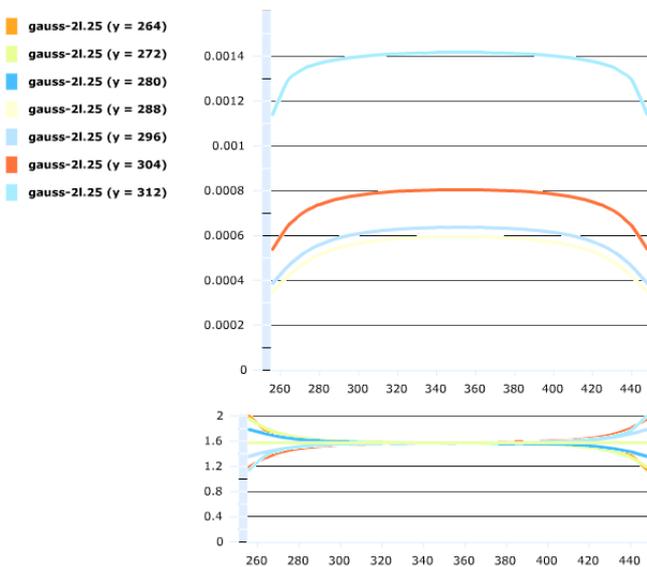


Fig. 31: Série de 25 charges de 1/25 Coulomb. La variation selon l'ordonnée est faible et continue. Les effets de bords sont quant à eux plus distincts de la zone interne stable.

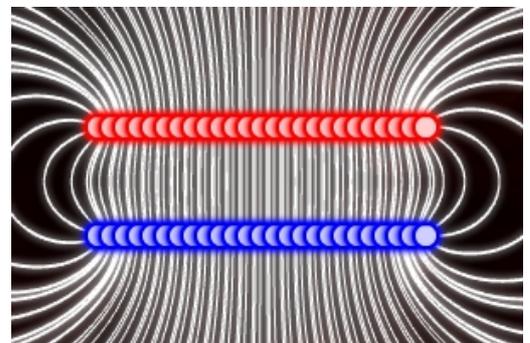


Fig. 32: Les cellules ont disparu pour laisser place à un champ presque uniforme au centre. Les effets de bord perdurent.

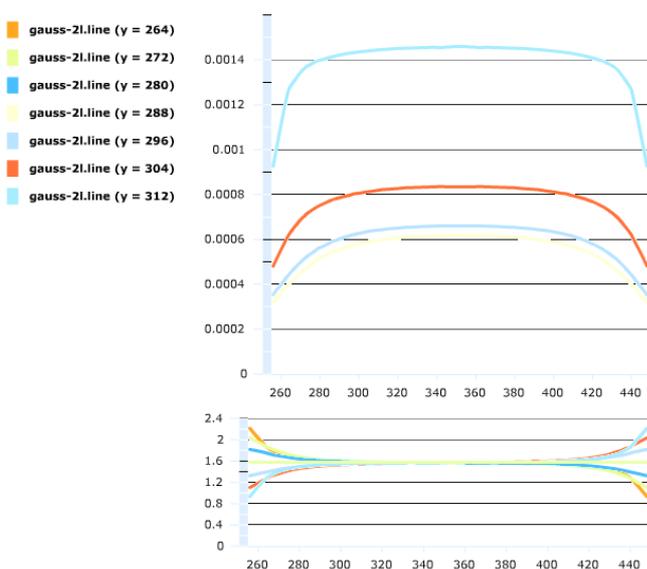


Fig. 33: Deux lignes continues de charges. L'angle n'a pas beaucoup évolué. La variation d'intensité selon la distance des plaques est finalement toujours importante.

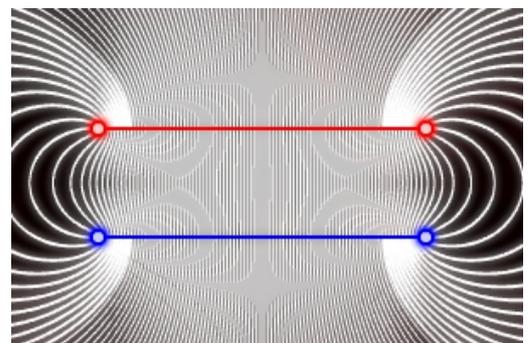


Fig. 34: Une grande partie de la zone centrale se rapproche des cas idéaux présentés auparavant. Les effets de bords sont toujours présents et finalement très distincts de la zone stable.

d) Conclusion

Un facteur de normalisation k simplifiant la loi de coulomb est utilisé par l'environnement. Il est donc nécessaire de définir la valeur de la permittivité correspondante de manière à pouvoir comparer les résultats avec les valeurs théoriques.

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon} = 1 \Rightarrow \epsilon = \frac{1}{4\pi}$$

On remarque d'abord que la suite d'approximations a fait :

- diminuer les variations d'intensité;
- diminuer les variations de l'angle, ce dernier étant presque uniforme au final et sa valeur correspondant au cas théorique d'un condensateur plan (le champ est perpendiculaire aux plaques);
- réduire les cellules formées entre les charges;

En comparant la version de deux séries de 25 charges avec celle de deux lignes de charges continues, on observe :

- une bonne correspondance entre les deux cas;
- des effets de bords plus importants dans la version des lignes continues, à la fois pour l'intensité et pour les angles aux bords;

Malgré l'évolution favorable des approximations, la distance à laquelle on se trouve entre les plaques a toujours une importance significative sur l'intensité du champ. L'évolution ne semble pas tendre vers une valeur indépendante de la distance entre les plaques.

Comparons maintenant les résultats finaux avec les valeurs que l'on aurait obtenues dans les cas idéaux (distribution linéique et condensateur plan).

Distribution linéique infinie (théorie)

$$E(\text{centre}) = 2 \cdot \frac{4\pi}{192 \cdot 2\pi 32} \simeq 0,000651$$

$$E(\text{proche}) = \frac{4\pi}{192 \cdot 2\pi 8} + \frac{4\pi}{192 \cdot 2\pi 56} \simeq 0,001488$$

La valeur théorique obtenue est proche de la valeur approchée par la distribution finie à la seule exception des bords - ce qui est logique étant donné qu'il n'y a pas de bords dans le cas théorique infini.

Deux plans conducteurs (théorie)

La valeur théorique est environ 45 fois plus grande que la valeur obtenue et de fortes variations à l'intérieur des plaques existent selon la distance à laquelle on se trouve.

$$E(\text{entre les plaques}) = \frac{1}{192} \cdot 4\pi = \frac{\pi}{48} \simeq 0,0655$$

Ces divergences s'expliquent simplement par le fait que le cas théorique du condensateur plan prend place dans l'espace à trois dimensions or la représentation et les calculs effectués s'opèrent dans un plan à deux dimensions.

En conclusion, la série d'approximations valide les calculs exécutés par l'outil informatique étant donné la correspondance fort précise entre le cas théorique de deux distributions linéiques infinies et la simulation de deux distributions linéiques finies calculée par le programme. On remarquera juste que si on peut visuellement simuler le comportement d'objets dans l'espace (les angles correspondent plus ou moins au cas théorique du condensateur plan), les intensités obtenues divergent fortement.

3. Charge ponctuelle dans le voisinage de plans conducteurs électriques parfaits

3.1 - Champ à l'intérieur d'un conducteur parfait

Un conducteur électrique est un solide contenant des électrons libres de se déplacer à l'intérieur de la matière dont ils ne peuvent quitter la surface.

S'il y a un champ électrique non-nul, il y a forcément un courant d'électrons en mouvement - ceux-ci subissant une force. Les électrons se déplacent alors jusqu'à être disposés de façon à produire un champ électrique nul partout à l'intérieur du conducteur.

Le champ intérieur du conducteur étant nul, la variation du potentiel entre n'importe quel point du conducteur doit être nulle. Ainsi tout conducteur est une *région* équipotentielle dont la surface est une *surface* équipotentielle. [Feynman, 1999]

3.2 - Disposition des charges dans un conducteur

Le théorème de Gauss permet d'affirmer que la charge totale intérieure du conducteur est nulle étant donné que le champ est nul. S'il ne peut y avoir de charges à l'intérieur, c'est que celles-ci s'accumulent à la surface.

Le champ électrique extérieur proche de la surface lui est normal étant donné que l'existence d'une composante tangentielle impliquerait un déplacement des électrons le long de la dite surface. De manière équivalente, les lignes de champ électrique doivent toujours être normales aux surfaces équipotentielles.

Si nous ne pouvons déterminer précisément la position de chaque charge, nous pouvons déterminer l'intensité du champ produit à la surface d'un conducteur, relativement à la densité locale σ de charges, à partir du théorème de Gauss en choisissant une boîte cylindrique à la surface du conducteur.

$$E_1 = 0$$

$$E_2 = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

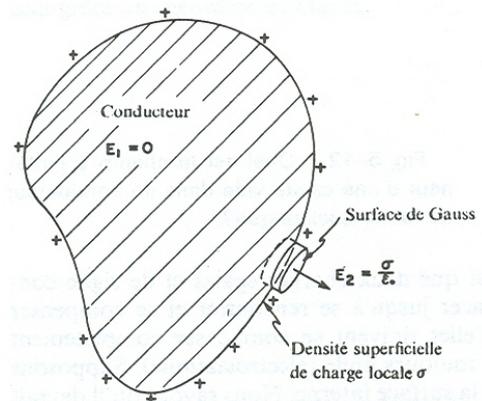


Fig. 35: "Le champ électrique à l'extérieur immédiat de la surface d'un conducteur est proportionnel à la densité superficielle de charge locale." [Feynman, 1999]

3.3 - Principe du blindage

Soit un conducteur avec une cavité. Il n'y a pas de champ dans le conducteur. Si la cavité est vide, il n'y en a pas non plus dans la cavité, quelle qu'en soit la forme.

Considérons une surface de Gauss S (voir Fig. 36), entourant la cavité. Partout sur S , le champ est nul, donc il n'y a pas de flux à travers S et la charge totale intérieure à S est nulle.

On pourrait affirmer qu'il y a une certaine charge superficielle positive sur une partie, et une charge négative sur une autre (voir Fig. 36). Cela revient à affirmer que des lignes de champ partent de certaines charges de la surface et se terminent sur d'autres.

Etablissons une courbe Γ traversant la cavité le long d'une ligne de champ puis revenant à son point de départ à travers le conducteur (voir Fig. 36). Le

bilan du travail le long d'une telle courbe est forcément non-nul, ce qui n'a pas de sens. Ainsi, il n'y a ni champ dans la cavité ni charges sur la surface interne tant que la cavité est vide.

Un raisonnement inverse peut être appliqué pour amener à la conclusion de Feynman [1999] :

"Les champs, de part et d'autre d'une couche conductrice fermée, sont [...] indépendants."

Ainsi, aucun champ de l'extérieur ne peut avoir une influence à l'intérieur de la cavité du conducteur. C'est le principe de "blindage" des équipements électriques. Il suffit de placer un matériel dans une boîte métallique pour qu'aucune interaction électrique ne puisse y être appliquée de l'extérieur.

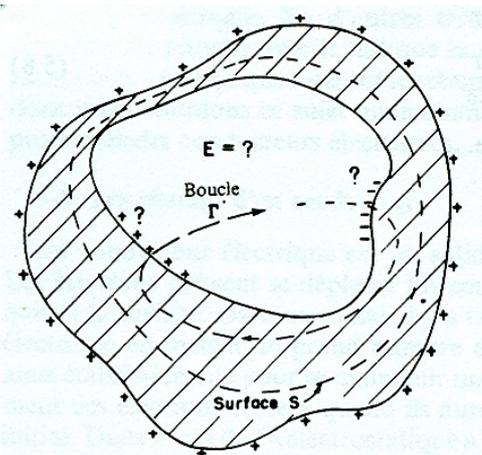


Fig. 36: Y a-t-il un champ à l'intérieur d'une cavité vide dans un conducteur de forme quelconque ? Y a-t-il des charges placées à la surface de la cavité ? [Feynman, 1999]

3.4 - Méthode des images

La complexité de disposition des charges dans un conducteur peut être surmontée par des méthodes de simulation numérique. De manière théorique, il suffit de placer les charges dans le conducteur, puis de les laisser se déplacer jusqu'à ce qu'elles s'équilibrent. La nature fait cela en une fraction de seconde.

Il y a des cas où nous pouvons utiliser des méthodes plus pratiques faisant abstraction de la disposition réelle des charges. C'est le cas de la **méthode des images** qui consiste à reproduire les conducteurs chargés selon leur état de surface équipotentielle. Il suffit de trouver une configuration de charges qui produise une surface équipotentielle équivalente au conducteur, puis de doser cette configuration. [Feynman, 1999]

Soit le cas simple de deux charges ponctuelles de signes contraires. La figure ci-présente (Fig. 37) permet de visualiser plusieurs équipotentielles produite par ce cas.

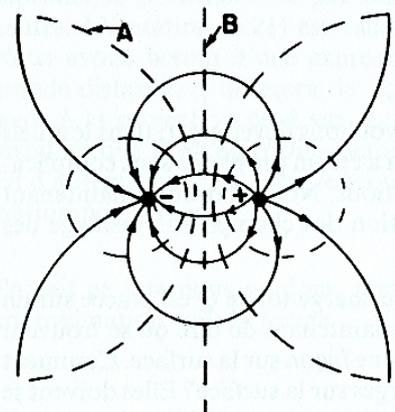


Fig. 37: Lignes de champ et équipotentielles de deux charges ponctuelles. [Feynman, 1999]

Si on place une feuille de métal le long de la surface équipotentielle A ou un conducteur fermé épousant toute cette surface (Fig. 38), qu'on ajuste le potentiel, le champ n'aura pas été modifié.

Ainsi on a trouvé une solution permettant l'expression du champ pour plusieurs éléments conducteurs. Par la même occasion, on peut traiter le cas d'une charge ponctuelle au voisinage d'un plan conducteur. Utilisons la surface équipotentielle B (Fig. 37). De cette manière, on résoud le problème d'une charge positive placée au voisinage d'un plan conducteur relié à la terre.

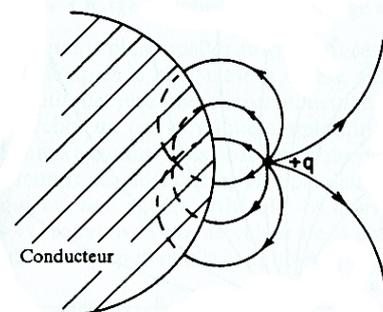


Fig. 38: Le champ à l'extérieur d'un conducteur ayant la forme de l'équipotentielle A de la Fig. 37 [Feynman, 1999]

Voici une série d'illustrations représentant la méthode des images appliquée au cas présenté ainsi qu'à celui d'un conducteur anguleux. Pour ce dernier, il a été nécessaire d'utiliser deux charges images, de signe opposé à celui de la charge réelle, placées symétriquement vis à vis des deux parois, ainsi qu'une dernière charge image de même signe que la charge réelle, placée

en reproduisant une symétrie des charges images relativement aux prolongements des parois.

On remarquera une similitude avec le domaine de l'optique et précisément celui des miroirs, où la trajectoire des rayons lumineux peut être représentée par le même procédé d'images virtuelles.

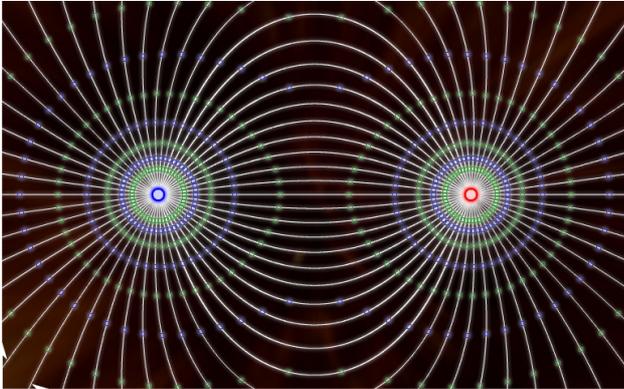


Fig. 40: Deux charges réelles de signes opposés, leurs lignes de champ ainsi que des équipotentielles.

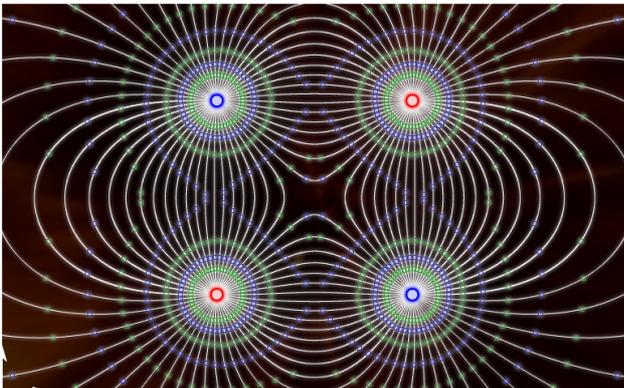


Fig. 41: Quatre charges réelles de signes alternés, leurs lignes de champ ainsi que des équipotentielles.

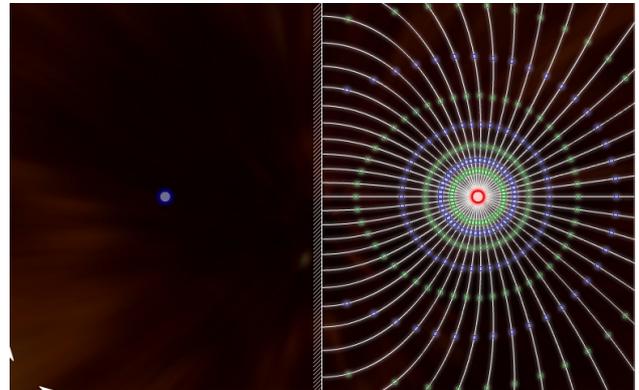


Fig. 39: Une charge réelle et une image de signes opposés. La charge image est représentée en transparence, le conducteur est la zone en noir. Ce cas pourrait représenter celui d'une charge ponctuelle au-dessus de la terre – moyennant une disposition verticale des charges.

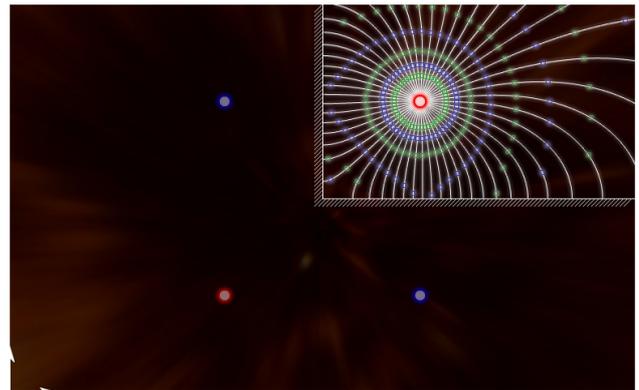


Fig. 42: Une charge réelle est trois images de signes alternés.

4. Champ électrique à l'interface entre deux milieux

4.1 - Milieux diélectriques

"Un matériau est diélectrique s'il ne contient pas de charges électriques susceptibles de se déplacer de façon macroscopique. Autrement dit, c'est un milieu qui ne peut pas conduire le courant électrique." [Wikipédia]

Dans le cadre des simulations d'électrostatiques présentées, le milieu considéré était toujours, par défaut, le vide, caractérisé par une permittivité de référence $\epsilon_0 = 8,854187 \cdot 10^{-12} [Fm^{-1}]$ dont l'unité est le Farad par mètre.

La permittivité décrit la manière dont un champ électrique est produit relativement à un milieu donné. Dans un milieu autre que le vide, on définit la permittivité relative ϵ_r - quantité adimensionnelle - normalisée par rapport à la permittivité du vide : $\epsilon_{milieu} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$. [Wikipédia]

4.2 - Conditions aux limites

Soit deux milieux diélectriques homogènes de permittivités diélectriques différentes ϵ_1 et ϵ_2 .

Tout champ produit dans un de ces deux milieux est modifié du fait de l'existence du second milieu. L'influence du milieu secondaire est caractérisée par des conditions aux limites à l'interface entre les deux milieux.

La première condition est la continuité de la composante normale du champ de déplacement électrique : $D_{n1} = \epsilon_1 E_{n1} = \epsilon_2 E_{n2} = D_{n2}$, E_{ni} étant la composante normale du champ du milieu i aux limites de l'interface. Le champ de déplacement défini par $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ a pour unité le Coulomb par mètre au carré [Cm^{-2}].

La seconde condition est la continuité de la composante tangentielle du champ électrique à l'interface : $E_{t1} = E_{t2}$. [Waits, 1985]

4.3 - Champ produit par une charge ponctuelle

De même que pour l'étude du champ en présence de conducteurs, la méthode des images peut être appliquée dans des situations simples faisant intervenir les conditions aux limites.

On considère le cas où une charge ponctuelle de charge q positive est placée au-dessus d'une interface plan séparant deux milieux homogènes semi-infinis. La charge image est placée symétriquement par rapport à l'interface.

Contrairement au cas des conducteurs pour lesquels il suffit de vérifier la condition portant sur la composante tangentielle nulle du champ électrique à l'interface, des milieux différents impliquent deux conditions. L'application de la méthode est plus compliquée et se fait en deux parties.

a) Demi plan supérieur (milieu contenant la charge initiale)

On détermine le champ produit dans le demi-plan supérieur en considérant une charge image d'intensité $K \cdot q$, en plus de la charge initiale et un seul milieu de permittivité ϵ_1 . [Waits, 1985]

b) Demi plan inférieur (milieu secondaire)

Dans le second milieu, on obtient le champ en ne considérant que la charge initiale dont l'intensité est modifiée ($q'=T \cdot q$), et le milieu secondaire de permittivité ϵ_2 .

c) Principe de superposition

Finalement, le principe de superposition permet de joindre les deux étapes et de produire le cas réel.

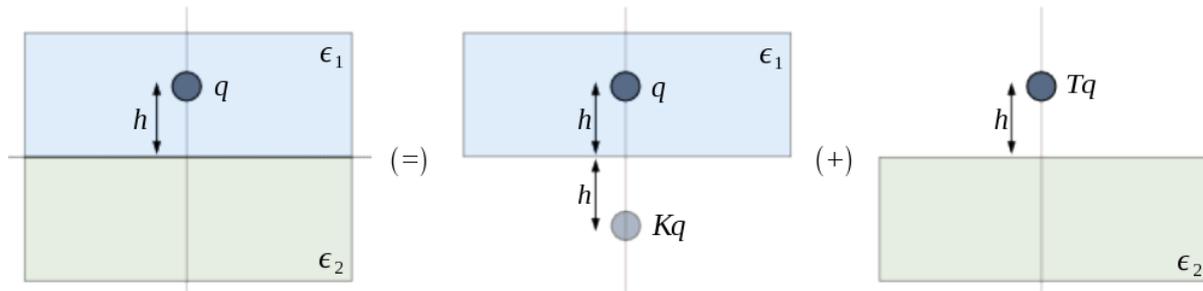


Fig. 43: Superposition des deux régions traitées séparément.

d) Valeur de K et T

La détermination des valeurs¹¹ de K et T se fait à partir des équations des conditions aux limites.

La condition de continuité de la composante tangentielle du champ électrique à l'interface permet l'établissement de la première équation selon K et T :

$$E_{t1} = E_{t2} \Leftrightarrow \frac{q r_x (1+K)}{4 \pi r^3 \epsilon_1} = \frac{q r_x T}{4 \pi r^3 \epsilon_2} \Leftrightarrow \frac{1+K}{\epsilon_1} = \frac{T}{\epsilon_2}$$

Ensuite, la condition de continuité de la composante normale du champ de déplacement à l'interface établit la seconde relation entre K et T :

$$D_{n1} = D_{n2} \Leftrightarrow \epsilon_1 \cdot \frac{q r_y}{4 \pi \epsilon_1 r^3} (1-K) = \epsilon_2 \cdot \frac{q r_y}{4 \pi \epsilon_2 r^3} \cdot T \Leftrightarrow 1-K=T$$

Ainsi, on obtient le système d'équations suivant :

$$\begin{matrix} \epsilon_2 \cdot (1+K) = \epsilon_1 \cdot T \\ 1-K=T \end{matrix} \quad \text{duquel on tire } K = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \quad \text{et } T = \frac{2\epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}$$

¹¹ Les valeurs calculées par l'environnement sont différentes
c.f. Annexes 2.3 - Variables

e) Résultats

En faisant varier la permittivité du milieu secondaire, on obtient une suite de cas particuliers illustrés ci-après.

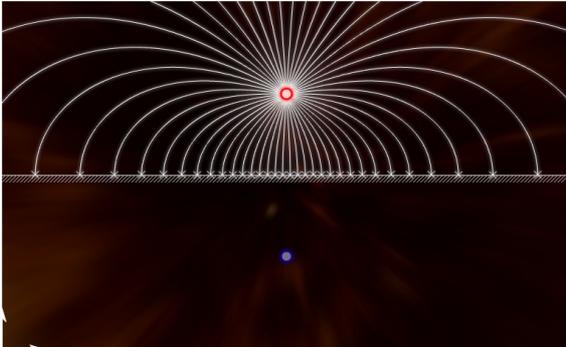


Fig. 45: Milieu secondaire se comportant comme un conducteur électrique parfait. Sa permittivité tend vers l'infini.

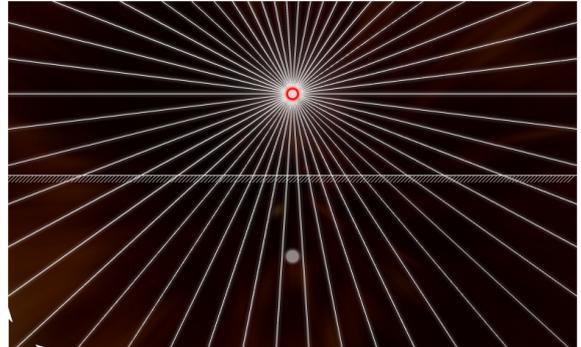


Fig. 44: Les deux milieux ne forment qu'un milieu homogène. La permittivité du second milieu est la même que celle du premier.

Ces deux premiers cas représentent des cas déjà résolus sans la méthode des images appliquée à deux milieux, vérifiant dans ces cas simples le principe de la méthode.

Les deux cas suivant présentent quant à eux des milieux différents mettant en avant les vrais effets de l'existence d'un milieu secondaire.

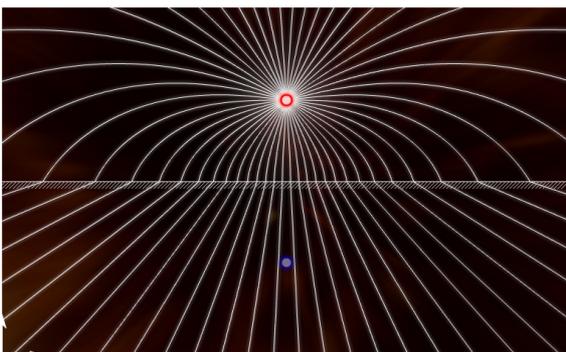


Fig. 47: Milieu secondaire de permittivité plus grande que celle du premier (vide). Les lignes de champs tendent à arriver perpendiculairement sur l'interface, ce qui correspond à la limite lorsque la permittivité tend vers l'infini.

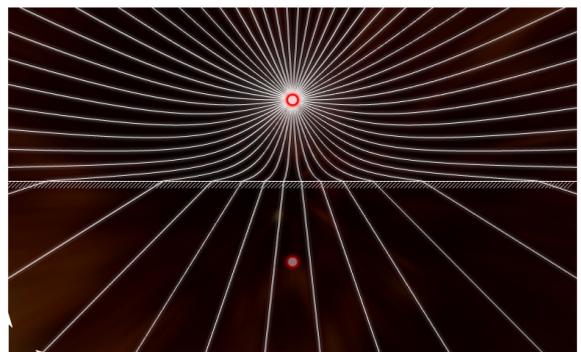


Fig. 46: Milieu secondaire de permittivité plus petite que celle du premier (vide). Les lignes de champs tendent à ne pas atteindre l'interface. Le cas extrême correspondrait à celui d'un milieu parfaitement résistant.

On remarquera pour ces derniers cas la similitude avec le domaine de l'optique et plus précisément le phénomène de réfraction de la lumière.

L'indice de réfraction du milieu secondaire, différent de celui du milieu initial, est responsable de la réfraction de la lumière au même titre que la différence de permittivité induit la déviation des lignes de champ.

5. Modèle électrostatique des orages

5.1 - Electricité atmosphérique

Par beau temps, le champ électrique à la surface de la terre est d'environ 100 V/m, dirigé vers le bas, du sol jusqu'à une altitude de 50 km qui correspond à la limite inférieure d'une région appelée ionosphère [Benson, 1991]. Selon le théorème de Gauss et étant donné le champ électrique approximativement uniforme, on peut déterminer la densité superficielle de charges se trouvant au sol :

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \Leftrightarrow \sigma = E \cdot \epsilon_0 \simeq -10^{-9} \left[\frac{C}{m^2} \right]$$

Un tel champ électrique n'est pas dangereux pour les êtres vivants, car, ceux-ci étant de bons conducteurs, leur contact avec la terre fait qu'ils sont au potentiel de la terre et déforment ainsi le champ électrique à leurs alentours.

L'existence continue¹² d'un champ électrique implique un circuit atmosphérique et électrique global sans lequel les diverses charges seraient neutralisées¹³.

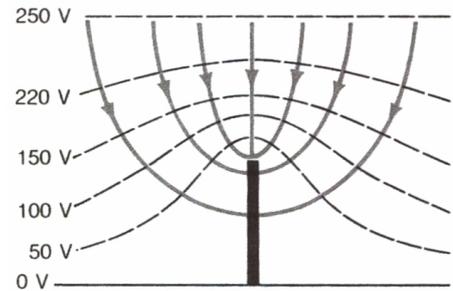
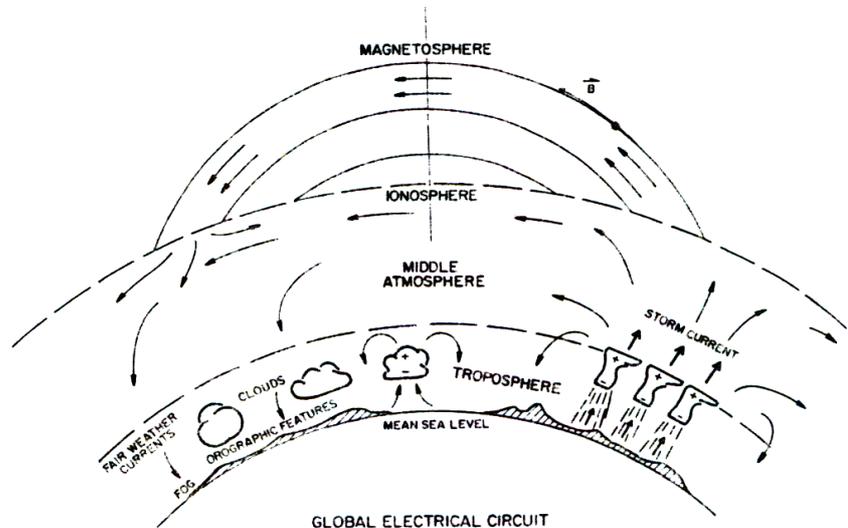


Fig. 48: Une tige conductrice plantée au contact du sol est au potentiel de la terre. Ainsi les équipotentielles horizontales sont déformées et la tension est sans danger [Benson, 1991].

Fig. 49: Schéma de divers processus électriques dans le circuit électrique global. Les orages y ont un rôle important à travers leur méthode de formation ainsi que les divers phénomènes électriques tels que la foudre et la séparation des charges à l'intérieur des nuages. [R.G. Roble et Israel Tzur, 1986]



5.2 - Formation des nuages d'orage

"Un nuage est formé d'un ensemble de gouttelettes d'eau (ou de cristaux de glace) en suspension dans l'air. L'aspect du nuage dépend de la lumière qu'il reçoit, de la nature, de la dimension, du nombre et de la répartition des particules qui le constituent.[...]" [Wikipédia]

La formation de nuages correspond à la condensation - transformation de la matière d'un état gazeux à un état liquide - d'une partie de la vapeur d'eau contenue dans un volume d'air.

¹² Le champ électrique varie tout au long de la journée selon un horaire particulier. Il est maximum à 19 UT (Universal Time) et minimum à 04 UT et cela partout sur la Terre.

¹³ L'atmosphère laisse circuler le courant à cause des ions d'oxygène et d'azote. Divers agents interviennent dans leur production dont les rayons cosmiques et solaires ainsi que la radioactivité naturelle.

Le nuage d'orage ou *cumulonimbus* se forme à partir d'un nuage plus petit via des courants ascendants d'air chaud et humide. La pression diminuant avec l'altitude, la température de l'air humide baisse, provoquant la condensation de la vapeur d'eau. Ce même phénomène libère de la chaleur permettant au courant d'air humide de continuer de monter.

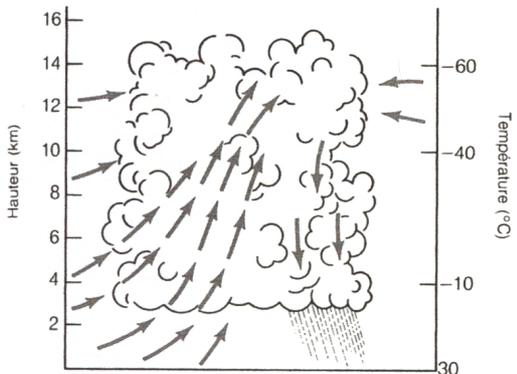


Fig. 50: Schéma des courants d'air ascendants et descendants dans un nuage. [Benson, 1991]

Au sommet du nuage, les gouttes d'eau créées forment des cristaux de glace qui grossissent en rentrant en collision avec d'autres gouttes jusqu'à devenir trop lourds. Ils chutent alors et provoquent un courant descendant. Si les cristaux fondent avant d'arriver au sol, on parle de pluie, dans le cas contraire, on parle de neige ou de grêle selon les cas.

Les divers courants d'air transportent la vapeur d'eau qui produit le nuage ainsi que divers ions qui assurent le transfert de charges électriques dans le nuage.

5.3 - Séparation des charges

Les nuages classiques transportent les ions de l'atmosphère, soit des charges positives. Dans le cas du nuage d'orage, plusieurs zones de charges différentes apparaissent dont une zone supérieure positive et une inférieure négative.

Le mécanisme de séparation des charges, mal connu, est probablement¹⁴ lié aux courants d'air ascendants et descendants.

Premièrement, les grands cristaux chutant sont polarisés par le champ électrique régnant par beau temps. Si une goutte d'eau ou un petit cristal entre en collision avec un grand cristal polarisé, la petite particule acquiert une charge positive et est entraînée par le courant ascendant.

En second lieu intervient le processus de congélation qui sépare naturellement les charges dans les cristaux de glace étant donnée la plus forte mobilité des ions H^+ relativement aux ions OH^- . Les premiers se trouvent ainsi à la surface des goutelettes, sur la zone de glace tandis que la goutelette emprisonnée est chargée négativement. Une collision peut provoquer une séparation de la pellicule brisée de la goutelette et les éclats de glace résultants étant plus légers, ces derniers sont entraînés par les courants ascendants. Quant à la goutte chargée négativement, plus lourde, elle continue de chuter dans son courant descendant.

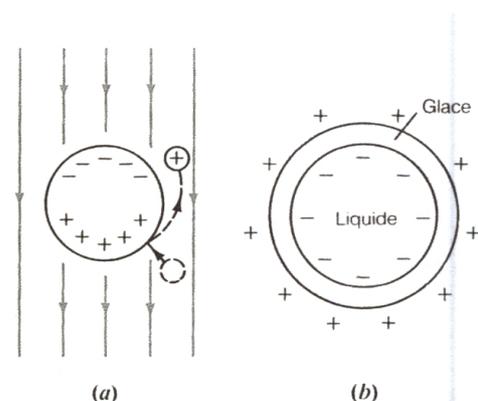


Fig. 51: Les deux processus hypothétiques de séparation des charges dans les nuages d'orage liés à la gravité et aux processus de convection dans le nuage. (a) Polarisation des cristaux chutant et transfert de charge par contact. (b) Séparation naturelle par effet thermoélectrique. [Benson, 1991]

5.4 - Modèles électrostatiques

Divers modèles permettent la représentation électrostatique d'un nuage d'orage au-dessus de la terre (représentée comme un conducteur parfait).

¹⁴ Aucun mécanisme n'est actuellement accepté universellement.

Parmi ces modèles, le plus simple est celui d'un dipôle chargé négativement au bas du nuage et positivement en haut (Fig. 52¹⁵ et Fig. 53).

Fig. 52: Représentation simplifiée d'un nuage d'orage sous la forme d'un dipôle chargé positivement au sommet et négativement à sa base face au sol.

La terre est simulée en tant que conducteur parfait via la méthode des images (voir Application 3.4) en opposant la zone supérieure à une configuration opposée symétrique vis à vis du sol. Cela crée une équipotentielle épousant la droite horizontale correspondant à la terre.

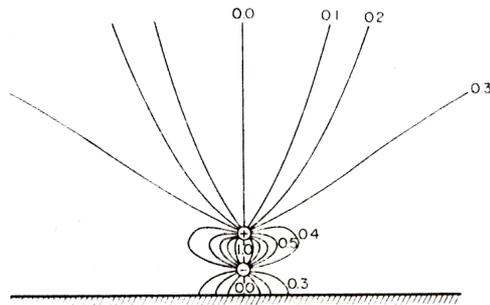
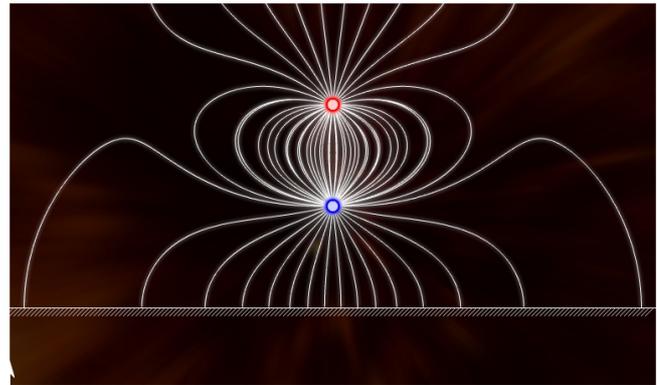


Fig. 53: Modèle de Kasemir [1959] prenant en compte les divers paramètres tels que la terre, la ionosphère et la permittivité atmosphérique variant selon l'altitude. La figure 52 en est une tentative de représentation.

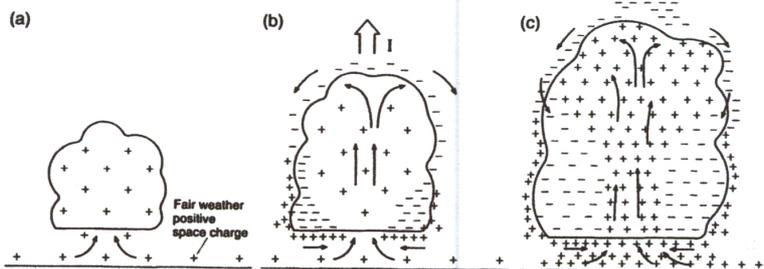


Fig. 54: Mécanisme de formation des nuages incluant la couche négative aux limites extérieures du nuage. [D.R.MacGorman, W.D. Rust, 1998]

Il se trouve qu'on a pu déterminer une faible charge positive subsistant au bas du nuage ce qui a amené un second modèle de tripôle.

Finalement, ces deux modèles ne prenant pas en compte les phénomènes de transfert de charges, un modèle plus complet est finalement apparu basé sur les trois zones précédemment évoquées et incluant une couche négative aux limites supérieures et latérales du nuage (voir Fig. 54).

5.5 - Phénomène de la foudre

"La foudre est un phénomène naturel de décharge électrostatique disruptive." [Wikipédia]

Autrement dit, la foudre résulte d'une accumulation de charges dans un nuage. Le bas du nuage est chargé négativement et induit une charge positive au sol. Lorsque la tension entre le nuage et le sol dépasse la résistance de l'air, le nuage transfère ses charges négatives excédentaires jusqu'à la terre, de nature conductrice, en se frayant un chemin à travers les ions atmosphériques.

Le phénomène se décompose en plusieurs phases dont un premier parcours du nuage à la terre (ou toute autre région permettant une décharge) par un "traceur par bond"¹⁶ ou "précurseur". Ce traceur crée un canal ionisé en traversant l'air. Arrivé au sol, le canal permet

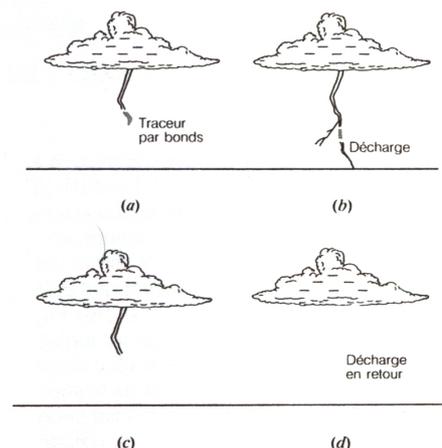


Fig. 55: Les différentes phases d'évolution d'un éclair. (a) Le traceur par bond crée un canal jusqu'à la terre. (b) La décharge a lieu, les charges négatives du nuage vont à la terre. (c) Lueur produite par la décharge. (d) Décharge en retour. [Benson, 1991]

¹⁵ En réalité, la représentation introduit une troisième charge négative pour correspondre au modèle de Kasemir qui prend en compte divers autres facteurs. (voir Fig. 53)

¹⁶ Le traceur est appelé ainsi du fait de son parcours généralement effectué par bonds.

l'écoulement des charges négatives directement à la terre. Peuvent alors suivre des *décharges en retour* compensant en partie le transfert de charges.

On notera finalement que le phénomène peut se diviser en catégories selon qu'il se produit dans un nuage, entre deux nuages, du nuage à la terre ou inversement.

5.6 - Le tonnerre

Lors du phénomène de la foudre, la décharge à travers un canal ionisé s'accompagne d'une émission de chaleur très forte allant jusqu'à 30'000°C. Ce changement brusque de température produit une dilatation de l'air générant le bruit nommé tonnerre.

Il est possible d'estimer la distance à laquelle a eu lieu l'éclair en tenant compte des vitesses respectives de la lumière (300'000 km/s) et du son (330 m/s ce qui est plus ou moins équivalent à $\frac{1}{3}$ km/s).

On calcule le temps entre la vision de l'éclair et l'écoute du tonnerre. En supposant que l'éclair a eu lieu au même moment que la vision qu'on en a eu, la distance en kilomètres équivaut environ au tiers du temps en secondes :

$$distance = vitesse_{son} \cdot temps \Rightarrow distance [km] = 0.33 \left[\frac{km}{s} \right] \cdot temps [s] \simeq \frac{temps [s]}{3}$$

5.7 - Le paratonnerre

Le paratonnerre est un dispositif permettant l'écoulement volontairement dirigé des charges lors d'un orage. Il repose sur la prédominance des éclairs à se décharger sur des éléments pointus.

Pour expliquer ce phénomène physique, prenons deux boules conductrices de rayons r et $R = 2r$ au même potentiel V . [Palais de la découverte¹⁷]

A partir du potentiel¹⁸, nous pouvons déterminer la valeur du champ électrique relativement à la distance du centre de la boule :

$$V(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} = E(r) \cdot r \Rightarrow E(r) = \frac{V}{r}$$

Ainsi, le champ à la surface de la petite boule sera deux fois plus intense que celui à la surface de la grande boule.

$$E(r) = \frac{V}{r} = 2 \frac{V}{R} = 2 \cdot E(R)$$

Finalement, si on compare l'extrémité d'un objet pointu à une boule dont le rayon est très petit, le champ électrique à la surface de l'objet tend à être infini plus le rayon de l'objet est petit. Cela a pour effet de ioniser l'air proche de l'objet, augmentant la probabilité qu'un traceur par bond y termine son chemin et ainsi qu'une décharge s'y produise.

¹⁷ Voir la question des pointes sur <http://www.palais-decouverte.fr/index.php?id=1374>

¹⁸ Voir A. Principes d'électrostatique, 5.1 - Potentiel électrique dans le champ d'une charge ponctuelle. Le champ produit par une charge ponctuelle est équivalent au champ extérieur à une boule conductrice chargée produite par cette même boule.

D. Conclusion

"*Panta rei*" [Héraclite] et pourtant l'ordre de la nature perdure. Ce monde est-il donc inexplicable ? Peut-être faut-il qu'il le soit...

L'étude des cas présentés n'aura certainement pas donné de réponse précise au lecteur. Qu'il n'en soit pas déçu s'il a pu redécouvrir son monde car la redécouverte est une découverte nouvelle, elle entretient notre pensée et figure notre progrès.

La réalité est fort complexe, telle est la conception résultant de ce travail. On le conçoit d'avantage lorsqu'on prend en compte l'idéalisation des cas présentés.

Tout d'abord, il fut question de distributions de charges. Qu'en est-il dans la réalité ? De telles distributions isolées et parfaites n'existent généralement pas. L'univers est composé de distributions extraordinairement compliquées.

La seconde application a mis en évidence les difficultés de la représentation selon trois dimensions ainsi que la nature simplificatrice des hypothèses appliquées aux distributions continues de charges.

Dans la réalité, les lois régissant la composition du monde sont probablement très simples mais, du fait de la complexité de toute chose, elles restent actuellement impossibles à exploiter complètement. Par exemple, l'hypothèse par laquelle les charges de même signe se repoussent et celles de signes contraires s'attirent est peut-être complète mais que peut-on réellement en faire alors que ces charges sont microscopiques ? Ainsi on explore une part de la complexité d'un monde à la fois gigantesque et microscopique.

Les deux applications suivantes complètent ces considérations en évoquant la relation étroite entre chaque particule et la totalité de l'univers. "*Tout est dans tout.*" [Anaxagore de Clazomènes]

Si après cela, le lecteur demeure sur sa faim, la dernière application peut lui fournir au moins quelques explications concrètes bien que toutes relatives car, s'il existe des modèles simplifiés des orages, ces derniers sont en réalité bien plus complexes.

Finalement, notre ignorance est bien heureuse car un monde dont les lois seraient complètement déterminées supprimerait toute raison d'exister. L'homme se pose constamment des questions et trouve l'objet de sa quête essentiellement dans son travail de recherche et non dans les résultats de ce travail.

E. Bilan personnel

On est obligé de constater l'apport d'un travail de recherche approfondi tel que le travail de maturité.

Certes, ce travail aura soulevé des questions, des conflits mais ce sont là les éléments essentiels qui alimentent la raison et nous font avancer.

Le domaine de l'électrostatique étant étudié dans les cours de physique au collège, ce travail aura été un bon complément principalement du fait qu'il ne s'est pas focalisé sur les simples cas généralement traités. Il m'a apporté une vision particulière du monde et m'a ouvert à des horizons inconnus vers lesquels je ne me serais certainement pas porté auparavant.

Bien qu'étant fort utile, il n'est qu'une pierre dans l'édifice qui forme un être de raison. Il en est un fondement et je remercie pour cela mon professeur accompagnant, le Dr. Lionel Barlatey, qui a ouvert des voies fort intéressantes dans ce travail et m'a apporté une aide précieuse autant au niveau des idées proposées que du soucis de correction apporté.

F. Bibliographie

1. Ouvrages complets ou partiels consultés

Balanis C.A., 1989, "Integral Equations and the moment method" tiré de "Advanced Engineering Electromagnetics", Wiley [ISBN 0471621943]

Barlately L., 2007, "Cours de physique: notes personnelles", Collège de l'Abbaye de Saint-Maurice

Benson H., 1993, "Physique II : Électricité et magnétisme", Editions du Renouveau Pédagogique Inc. [ISBN 2-7613-0778-x]

Durney C.H., Christensen D.A., 2000, "Basic Introduction to Bioelectromagnetics", CRC Press [ISBN 0-8993-1198-5]

Feynman/Leighton/Sands, 1999, "Le cours de physique de Feynman", Dunod, Paris [ISBN 2 10 004861 9]

Harrington G.F., 1993, "Field Computation by Moment Methods", IEEE Press [ISBN 0780310144]

Hays P.B. et Roble R.G., 1979, "A quasi-static model of global atmospheric electricity, 1. The Lower Atmosphere", Journal of Geophysical Research 84

Kasemir H.W., 1959, "The Thunderstorm as a generator in the global electric circuit (in German)", Z. Geophys 25

MacGorman D.R., Rust W.D., 1998, "The electrical Nature of Storms", Oxford University Press US [ISBN 0195073371]

Monard J.-A., 1995, "Tome I Mécanique", J.-A. Monard, Allée de la Champagne 35, 2502 Bienne

Monard J.-A., 1982, "Tome II Électricité", Centrale d'achats de la ville de Bienne, Rennweg 62, 2501 Bienne

Raymond G.R. et Tzur I., 1986, "The Global Atmospheric-Electrical Circuit" tiré de "The Earth's Electrical Environment", National Center for Atmospheric Research, édité par National Academy Press [ISBN 0309036801]

Roble R.G. et Hays P.B., 1979, "A quasi-static model of global atmospheric electricity, 2. Electrical Coupling between the upper and the lower atmosphere", Journal of Geophysical Research 84

Wait J.R., 1985, "Electromagnetic Wave Theory", Harper & Row [ISBN 0060468777]

2. Pages internet

Tous les sites utilisés étaient accessibles et ont été vérifiés le samedi 3 novembre 2007.

2.1 - Wikipédia

L'encyclopédie libre Wikipédia.fr a été fort utilisée. Les pages suivantes ont été utilisées relativement au contenu du travail :

http://fr.wikipedia.org/wiki/Anaxagore_de_Clazom%C3%A8nes

http://fr.wikipedia.org/wiki/Champ_%C3%A9lectrique

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Condensation>

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Convection>
http://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_de_pointe
<http://fr.wikipedia.org/wiki/Electromagn%C3%A9tisme>
<http://fr.wikipedia.org/wiki/Electrostatique>
http://fr.wikipedia.org/wiki/Extensible_Markup_Language
<http://fr.wikipedia.org/wiki/Foudre>
http://fr.wikipedia.org/wiki/H%C3%A9raclite_d%27%C3%89ph%C3%A8se
http://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Coulomb_%28%C3%A9lectrostatique%29
<http://fr.wikipedia.org/wiki/Mathematica>
<http://fr.wikipedia.org/wiki/Nuage>
<http://fr.wikipedia.org/wiki/Orage>
<http://fr.wikipedia.org/wiki/Paratonnerre>
<http://fr.wikipedia.org/wiki/Permittivit%C3%A9>
<http://fr.wikipedia.org/wiki/Polymorphisme>
http://fr.wikipedia.org/wiki/Polymorphisme_%28informatique%29
http://fr.wikipedia.org/wiki/Potentiel_%C3%A9lectrique
http://fr.wikipedia.org/wiki/Tension_%C3%A9lectrique
<http://fr.wikipedia.org/wiki/Tonnerre>

2.2 - Site sur la programmation

<http://labs.adobe.com/> - site de développement des outils adobe dont flex
<http://livedocs.adobe.com/flex/2/langref/> - documentation pour flex
<http://www.adobe.com/> - le site en général pour flex et flash
<http://www.commentcamarche.net/poo/polymorp.php3>
<http://www.commentcamarche.net/xml/xmlintro.php3>
<http://www.commentcamarche.net/xml/xmlstruc.php3>
<http://www.mediabox.fr/> - forum et wiki pour flash et flex
<http://www.tuteurs.ens.fr/faq/utf8.html#utf8>

2.3 - Site sur les programmes concurrents

<http://astro.ensc-rennes.fr/index.php?pw=cupsem> - présentation de CUPS
<http://physics.gmu.edu/~cups/>
<http://www.visualis-physics.com/fr/>
<http://www.wolfram.com/products/mathematica/index.html>
<http://www.quickfield.com/fr>

2.4 - Contenu scientifique en ligne

<http://books.google.ch> - site de recherche permettant un accès à une grande quantité d'oeuvres scientifiques et non-scientifiques dont certaines publications mentionnées précédemment

<http://dspt.club.fr/Foudre.htm>

http://lepa.epfl.ch/ICP3_lecture_notes/Electrochemistry/Echem_2_2005.pdf

<http://www.eng.tau.ac.il/~jerby/index.html>

http://www.esa.int/esaCP/SEM6GR67ESD_France_2.html

<http://www.ffme.fr/technique/meteorologie/le-temps/foudre/foudre.htm>

<http://www.futura-sciences.com/> - le site en général ainsi que ses forums

<http://www.nap.edu/> - accès à certaines publications sur les orages

<http://www.palais-decouverte.fr/index.php?id=1374>

http://www.palais-decouverte.fr/fileadmin/fichiers/infos_sciences/matiere_energie/textes/faq/effet_pointe.pdf

<http://www.physicsontheweb.com/>

http://www.sciences-reunion.net/index2.asp?rub=3&sous_rub=47&niv1=139&page=312&type=3

<http://www.sur-la-toile.com/> - les forums pour des questions sur la foudre

<http://tony.sum.free.fr/foudre.htm>

<http://www.univ-ubs.fr/ecologie/foudre.html>

G. Annexes¹⁹

1. Conditions d'utilisation

1.1 - Plateforme Adobe Flex / Adobe Flash

Selon le site du producteur de Flex™ et Flash® : "Adobe® Flex™ 2 est un environnement RIA²⁰ basé sur Adobe Flash® qui vous permettra de créer de manière productive de remarquables applications évolutives exploitables par tous sur la quasi-totalité des plates-formes. Il comprend un puissant outil de développement basé sur Eclipse™, une bibliothèque étendue de composants graphiques et des services de données hautes performances adaptés aux exigences applicatives les plus pointues." [<http://www.adobe.com/fr/products/flex>, mercredi 31 octobre 2007]

Flex est, plus simplement dit, un outil de développement d'applications connectées à internet alors que Flash est la plateforme faisant fonctionner les programmes développés avec Flex. La plateforme étant en constante évolution, les informations la concernant ne seront pas évoquées ici. Le site internet d'Adobe contient diverses pages à propos de ces produits :

<http://www.adobe.com/fr/products/>

Le lecteur d'animation Flash est gratuit au téléchargement et libre d'utilisation ainsi que la plateforme Flex. Il existe cependant diverses licences liées à ces produits que l'on peut consulter depuis la page suivante :

<http://www.adobe.com/licensing/>

1.2 - Structure des données du programme

a) Démarrer le programme

Le programme est utilisable en ouvrant (*en cliquant ou double-cliquant sur*) le fichier nommé "Main.exe" sur le système d'exploitation Microsoft® Windows.

Pour tout autre système d'exploitation (Mac, Linux ou Solaris), il faut utiliser le fichier nommé "Main.swf" nécessitant le lecteur d'animation Flash. Ce dernier est disponible en deux versions : une version "*plugin*" s'intégrant à un navigateur internet ou une version "*standalone*" permettant une utilisation indépendante. Les diverses versions sont téléchargeable à l'adresse suivante :

<http://www.adobe.com/support/flashplayer/downloads.html>

b) LocalContentUpdater.exe

Ce fichier n'a aucune utilité pour l'utilisateur simple du programme, il sert à modifier les droits d'accès au réseau du fichier Main.swf et n'est utile qu'à un développeur qui voudrait modifier le code du programme. Pour plus d'informations :

<http://www.adobe.com/support/flashplayer/downloads.html#lcu>

¹⁹ Les diverses pages internet ressensées dans les annexes étaient toutes accessibles le mercredi 31 octobre 2007

²⁰ Rich Internet Application – Application Internet Riche, comprendre une application développée pour Internet et pouvant accéder à diverses technologies telles que la vidéo, le son, les pages internet ...

c) Le dossier "module"

Ce dossier contient les fichiers nécessaires à l'environnement d'affichage du programme. Actuellement, il contient uniquement un fichier nommé "frame.swf".

d) Le dossier "projects"

Ce dossier contient les fichiers des projets utilisables dans le programme. La structure et syntaxe de ces divers fichiers sera détaillé par la suite dans les annexes.

e) Le dossier "style"

Ce dossier contient les images spécifiques utilisées par le programme. Ces fichiers sont utilisés dynamiquement et peuvent ainsi être remplacés par d'autres si cela est voulu par l'utilisateur. Ainsi, si l'on veut changer l'image affichée en arrière-fond, il suffit de remplacer le fichier *background.jpg* par un autre fichier (en gardant le même nom).

1.3 - Considérations matérielles

Le programme développé à travers ce travail de maturité est utilisable par tout ordinateur possédant le lecteur d'animations Flash 9 (Adobe® Flash® Player). Les considérations techniques sont détaillées à l'adresse suivante :

<http://www.adobe.com/fr/products/flex/productinfo/systemreqs/>

2. Manuel d'utilisation

2.1 - Environnement de base

Le programme est composée visuellement de trois parties : la zone supérieure proposant une série de menus, la zone centrale présentant l'environnement de travail et la zone inférieur proposant des outils supplémentaires.

a) Les menus supérieurs

Premier menu : Ajouter un élément

Le premier menu contient la liste des éléments que l'on peut ajouter à l'environnement : une charge simple ou une distribution linéique de charges.



Fig. 56: Menu "Ajouter un élément" et type de visualisation.

En sélectionnant un des éléments, une représentation de cet élément doit apparaître et vous pouvez la positionner à l'écran dans l'environnement de travail. Une fois la position appropriée choisie, il suffit de cliquer avec la souris pour déposer l'objet.

Dans le cas de la distribution linéique de charges, le premier clic positionne la première extrémité de la distribution et le clic suivant la seconde extrémité²¹.

²¹ Il est possible de créer plus de deux extrémités (noeuds). Pour cela, il faut tenir soit la touche <Ctrl> soit la touche <Shift> enfoncée lorsque l'on clique pour positionner une extrémité. Cependant, cela est possible à titre expérimental et les résultats produits par des distributions de plus de deux noeuds ne sont pas fiables. Voir le point 2.5 a) à propos de la distribution linéique.

Second menu : le type de visualisation

Le second menu (*Fig. 56*) ne contient pas de nom car le titre qu'il indique correspond au type de représentation actuel du champ électrique. On peut actuellement choisir entre une représentation vectorielle ou une représentation des lignes de champ.

A noter que le choix d'un type de représentation ne démarre pas automatiquement un nouveau rendu visuel de la scène.

Premier bouton : Rendu visuel

Le premier bouton permet d'exécuter un rendu visuel de la scène actuelle. Il vaut mieux ne pas appuyer sur ce bouton pendant l'exécution d'une tâche par le programme.



Fig. 57: Les divers boutons de la zone supérieure.

Second bouton : Paramétrage

Le second bouton (*Fig. 57*) ouvre la fenêtre de paramétrage permettant de configurer l'environnement (voir *d) Les fenêtres*).

Groupe de boutons : Grille, Guide ou Libre

Chaque bouton du groupe (*Fig. 57*) définit un type d'utilisation de positionnement. L'état actuel est grisé.

- Grille : utilisation de la grille visuelle. Cette dernière est représentée et lorsqu'on place des objets sur la scène, ces derniers sont placés aux intersections de la grille.
- Guide : utilisation de la grille abstraite. Cela correspond à utiliser la grille lors du placement des objets, sans qu'elle ne soit visible. C'est l'état par défaut.
- Libre : positionnement absolu sans grille. Aucune grille n'est affichée et lors du placement des objets, ceux-ci sont placés à l'endroit-même où l'on clique. Aucun ajustement n'est effectué.

A noter que l'affichage de la grille est indépendant du rendu de la scène et est donc mis à jour automatiquement.

Dernier bouton : Aligner

Si vous aviez utilisé le mode de placement libre et avez changé pour un mode utilisation de la grille, ou que vous avez changé la taille de la grille, les objets sur la scène ne sont pas repositionnés automatiquement. Pour cela, il suffit de cliquer sur le bouton "Aligner" (*Fig. 57*) qui dispose tous les objets à l'intersection la plus proche.

b) La zone de travail centrale

La zone de travail, au centre de l'écran, appelée "environnement" ou "scène" et la zone où sont disposés les divers éléments électriques.

Elle présente les éléments de l'environnement, le repère fictif, l'état d'exécution du programme, le titre du projet ouvert actuellement, le texte "Projet ?" qui, s'il est survolé, affiche la description du projet.

On notera l'existence d'autres composants possibles mais dépendant des

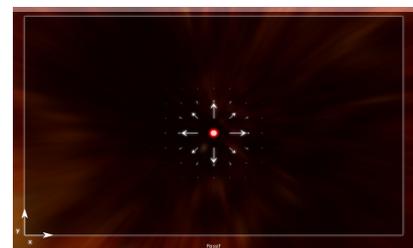


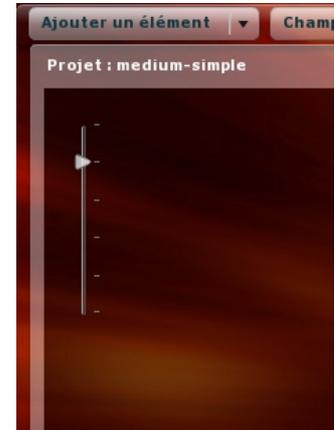
Fig. 58: La zone de travail centrale, le repère en bas à gauche, l'état d'exécution du programme en bas au centre ainsi qu'une charge et la représentation du champ produit au milieu.

projets affichés. Actuellement, le seul composant faisant intervenir l'utilisateur est utilisé dans le projet de l'application d'une charge à l'interface entre deux milieux : un curseur est affiché et permet de modifier la permittivité du milieu secondaire.



Fig. 59: La description présentée après passage de la souris sur le texte "Projet ?".

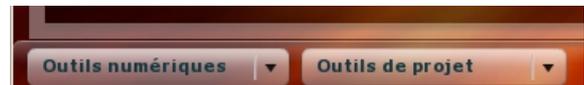
Fig. 60: Le titre du projet ainsi que le composant spécial permettant de faire varier la permittivité du milieu secondaire.



c) Les menus inférieurs

Les menus inférieurs présentent plusieurs outils tels que : l'outil numérique de calcul du champ électrique ainsi que le chargement de projets et de tests comparatifs.

Fig. 61: Les outils se trouvant dans la zone inférieure.



d) Les fenêtres

Il existe plusieurs fenêtres qui s'ouvrent en cliquant sur les divers boutons précédemment présentés telles que la fenêtre de paramétrage, l'outil de calcul.

Fenêtre de paramétrage

La fenêtre de paramétrage possède trois onglets : Global, Champ vectoriel et Lignes de champ. Chaque onglet contient une série de paramètres permettant de configurer le comportement du programme.

Outil de calcul

L'outil de calcul est accessible depuis le premier menu inférieur ("Outils numériques").

Il indique la position du curseur en pixels, les composantes du champ électrique à la position du curseur, l'intensité du champ électrique, l'opposé du \log_{10} de cette valeur ainsi que l'angle du champ électrique en radians et en degrés.

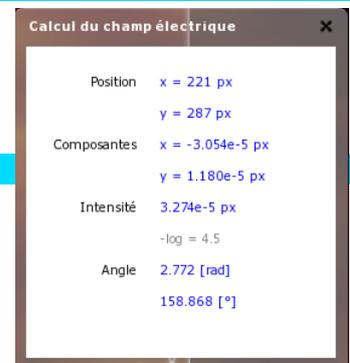


Fig. 62: Outil de calcul du champ électrique.

Dès que l'outil est affiché, on peut déplacer la souris dans l'environnement et les valeurs sont mises automatiquement à jour.

Interaction avec les charges



Fig. 63: Menu ouvert après avoir cliqué sur une charge.

En plus de ces fenêtre, on peut avoir accès à des informations spécifiques aux objets de la scène en cliquant sur ces derniers, ce qui ouvre un menu relatif à l'objet et à partir duquel on peut obtenir des informations sur l'objet ("Propriétés"), le déplacer ou le supprimer.

Propriétés d'un objet

Les informations que l'on obtient à propos des éléments chargés sont décrites dans cette fenêtre après avoir cliqué sur une charge (ou une extrémité d'une distribution linéique).

Ainsi on sait de quel objet il s'agit, de sa position ainsi que de son intensité en Coulomb (ou *Coulomb par pixel*), valeur que l'on peut modifier.

Fig. 64: Fenêtre des propriétés d'un objet chargé

2.2 - Environnement paramétrable

a) Paramètres globaux

Les paramètres globaux sont au nombre de trois.

Pas de grille

Le pas de grille détermine la finesse de la grille et la distance entre chaque intersection de cette dernière. Plus la valeur du paramètre est petite, plus la grille est grossière contrairement à ce que son nom pourrait faire penser.

En réalité, le vrai pas de grille est obtenu selon la formule :

$$\text{Pas de grille}_{\text{réel}} = \frac{64}{2^{\text{Pas de grille}}} [\text{px}]$$

La valeur par défaut est de 2, soit un pas de grille réel de 16 pixels.

Queue vectorielle

La queue vectorielle détermine la taille minimum de la queue des vecteurs affichés à l'écran. Ce paramètre entre en jeu lorsqu'on veut rendre compte de la direction du champ alors que l'intensité est très faible. La réduction appliquée au vecteur prendra compte de cette valeur minimale.

Rayon de non-calcul

Ce rayon particulier exprime la distance relative à chaque objet chargé jusqu'à laquelle aucun vecteur ne doit être affichée.

La distance relative s'exprime en pourcent par rapport à la distance entre deux intersections de la grille.

Ce paramètre permet d'éviter l'affichage de certains vecteurs dont l'intensité serait si énorme qu'elle rendrait invisibles tous les autres vecteurs. Ce cas se produit généralement lorsqu'on utilise des charges sur une grille libre, où les charges peuvent être à quelques pixels d'une intersection de la grille.

En utilisant la grille, on évite une grande partie des problèmes de ce type car si une se trouve à une intersection, aucun vecteur n'y sera représenté.

b) Paramètres de la représentation vectorielle

Le champ vectoriel est paramétrable selon un seul paramètre : la fonction de réduction déterminant l'échelle de visualisation des vecteurs.

Fig. 65: Paramètres de l'onglet Global : pas de grille, queue des vecteurs, rayon visuel.

Mode de réduction

Ce paramètre ayant déjà été présenté dans le projet principal²², il ne sera pas expliqué ici.

De manière générale, il correspond à la fonction utilisée pour la normalisation des vecteurs.



Fig. 66: Paramètre unique du champ vectoriel : le mode de réduction.

c) Paramètres de la représentation des lignes de champ

Ces paramètres forment deux groupes : les deux premiers permettent une configuration des lignes de champ tandis que les 4 suivants définissent l'affichage des équipotentielles.

Par défaut, les équipotentielles ne sont pas affichées. De ce fait, les trois derniers paramètres ne sont pas accessibles car ils n'interviennent que dans le cas où des équipotentielles sont affichées.



Fig. 67: Paramètres relatifs aux lignes de champ.

Pas d'échantillonnage

Le pas d'échantillonnage correspond au pas utilisé lors de l'affichage des lignes de champ. Ces dernières ne sont pas des courbes parfaites mais des approximations déterminées par une suite de segments de petite taille²³.

La taille spécifique de ces segments correspond au pas d'échantillonnage en pixels.

Le pas angulaire

Ce pas détermine l'angle de départ entre chaque ligne de champ. La valeur correspond plus précisément au nombre de lignes de champ produites à partir de chaque objet.

Affichage des équipotentielles

Par défaut, les équipotentielles ne sont pas affichées. En cliquant sur ce paramètre, on peut les afficher ou non. A noter que les paramètres suivants ne sont disponibles que si les équipotentielles sont affichées.

L'intervalle équipotentiel

Cette valeur détermine l'intervalle entre les équipotentielles affichées relativement à l'intensité du champ électrique. Il ne correspond pas à une intensité directe mais au logarithme en base 10 de l'intensité²⁴.

Le départ équipotentiel

Cette valeur détermine à partir de quelle intensité du champ électrique (selon le logarithme en base 10) les équipotentielles sont affichées. En réduisant la valeur, les équipotentielles sont rapprochées des charges. En augmentant la valeur, les équipotentielles sont éloignées des charges.

Pas d'échantillonnage

Le nombre de couche détermine le type d'alternance de couleurs lors de l'affichage des équipotentielles.

Par défaut, l'alternance est binaire mais elle peut être ternaire ou quaternaire.

²² Voir B.Représentation du champ électrostatique, 1.2 – Méthode de normalisation

²³ Voir B.Représentation du champ électrostatique, 2.2 – Affichage des lignes de champ

²⁴ Voir Annexes 2.1 d) Les fenêtres – A propos de l'outil de calcul qui indique le \log_{10}

2.3 - Variables

Le programme utilise des mesures différentes de la réalité pour représenter le champ électrique. Ainsi plusieurs variables spécifiques ont été introduites et il est nécessaire d'en prendre compte si on veut vérifier les résultats obtenus par calculs avec ceux obtenus par le logiciel.

a) La permittivité du milieu

Pour simplifier la loi de Coulomb, un facteur k spécifique est utilisé.

$$\text{Loi de Coulomb: } \vec{F}_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{\vec{r}_{1 \rightarrow 2}}{r^3} = k \cdot \frac{\vec{r}_{1 \rightarrow 2}}{r^3}$$

Le facteur k utilisé étant une constante relative au milieu, il a été simplifié et prend par défaut la valeur de 1.

Ainsi, on détermine la valeur de la permittivité du milieu :

$$\text{Permittivité: } \frac{1}{4\pi\epsilon} = k \Leftrightarrow \epsilon = \frac{1}{4\pi k}$$

b) Valeurs K et T

Dans la troisième application (*C.Applications, 4.3 d) Valeurs de K et T*), des valeurs générales avaient été trouvées pour deux variables K et T.

$$K = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \quad \text{et} \quad T = \frac{2\epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}$$

Les véritables valeurs utilisées par l'environnement prennent en compte l'utilisation du facteur k à la place de la permittivité ainsi que la valeur simplificatrice de $k_1 = 1$.

$$K = \frac{\frac{1}{4\pi k_1} - \frac{1}{4\pi k_2}}{\frac{1}{4\pi k_1} + \frac{1}{4\pi k_2}} = \frac{k_2 - k_1}{k_2 + k_1} = \frac{k_2 - 1}{k_2 + 1} \quad \text{et} \quad T = \frac{2 \frac{1}{4\pi k_2}}{\frac{1}{4\pi k_1} + \frac{1}{4\pi k_2}} = 2 \frac{k_1}{k_1 + k_2} = \frac{2}{1 + k_2}$$

c) Les distances

Finalement, on notera que l'unité de distance utilisée par le programme est le pixel et non le mètre. Aucune transformation n'a été effectuée, le pixel a été utilisé comme s'il s'agissait du mètre.

2.4 - Types de projets

a) Projet libre

Le projet libre est le projet par défaut, soit un environnement dans lequel on peut placer librement de nouvelles charges électriques, modifier leur intensité, leur place ou les supprimer.

b) Projet externe

Un projet externe est un projet décrit selon une syntaxe XML²⁵ particulière dans un fichier d'extension ".phyx" ou ".xml". En ouvrant un tel projet, on accède à un environnement déjà configuré.

Pour charger un tel projet, il suffit de cliquer sur le bouton "Outils de projet" et de sélectionner "Charger un projet".

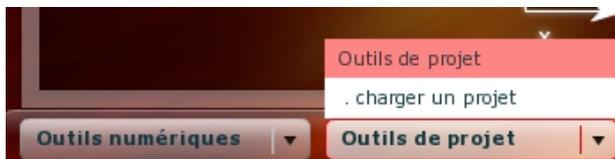


Fig. 68: Bouton "Outils de projet" et sous-bouton "charger un projet" sur lequel cliquer pour charger un projet externe d'extension .phyx ou .xml

c) Projet de test

Un projet de test est un projet externe particulier. Il produit un comparatif sous la forme de graphiques selon divers projets externes. Les graphiques présentés pour le théorème de Gauss et son application ont été créé grâce à un tel projet.

2.5 - Syntaxe des fichiers de projets

La syntaxe des projets utilise le langage XML pour décrire l'environnement et ses paramètres. Cette syntaxe introduit plusieurs notions basiques.

L'en-tête

```
<?xml version='1.0' encoding='utf-8'?>
```

L'en-tête renseigne la version du format xml utilisé ainsi que l'encodage utilisé.

La balise

Elle contient des attributs - des couples clé-valeur - et doit toujours être refermée. On en trouve 3 formes^{26 27} : la balise ouvrante (qui doit donc être fermée), la balise fermante et la balise fermée.

```
<balise attribut="valeur" [...]>contenu</balise>
```

```
</balise>
```

```
<balise attribut="valeur" [...] />
```

Le commentaire

```
<!-- mon commentaire -->
```

Ce dernier est exclu lors de l'analyse des balises du document.

Le contenu des balises

Chaque balise peut contenir une liste de balises, du texte, des commentaires et/ou des entités plus complexes telles que l'objet CDATA qui peut contenir des objets dans un format indépendant :

```
<![CDATA[...]]>
```

Tous document xml devrait normalement comporter un en-tête et une balise unique de base. Cette balise est appelée "racine" du document. On peut comparer la suite du document à un arbre composé de noeuds - les balises - qui peuvent comporter des enfants (d'autres balises, du texte, des commentaires ...) et des

²⁵ Extensible Markup Language - "Langage de balisage extensible", voir http://fr.wikipedia.org/wiki/Extensible_Markup_Language ou <http://www.w3.org/TR/xml/>

²⁶ Pour une explication plus complète sur la structure d'un document xml, voir <http://www.commentcamarche.net/xml/xmlstruc.php3>

²⁷ [...] signifie que l'on peut ajouter un nombre indéterminé d'attributs espacés au minimum d'un espace

attributs.

Finalement, il est nécessaire, dans le cadre de ce travail, d'encoder selon l'encodage UTF-8²⁸ pour permettre une lecture correcte des données par le programme.

a) *Projet .phyx*

Le fichier d'un tel projet est composé d'une balise racine <physix-project> contenant diverses balises représentant les composants à placer dans l'environnement. Les divers composants sont :

La description du projet

```
<description><![CDATA[description du projet]]></description>
```

L'en-tête renseigne la version du format xml utilisé ainsi que l'encodage utilisé.

La charge ponctuelle²⁹

```
<charge [x='entier' y='entier' intensity='expression mathématique'30 type='valeur spécifique'] />
```

Les attributs permettent de définir la charge qui, par défaut, est positionnée à la position (0,0) et est d'intensité 1 [C].

Le type de charge peut prendre plusieurs valeurs, mais par défaut il a une valeur nulle, soit un type quelconque non-spécifique. Les autres valeurs sont :

- "fixed" - la charge ne peut pas être déplacée
- "hidden" - la charge est rendue invisible
- "virtual" - la charge est affichée comme charge image, ne peut pas être déplacée et n'est pas prise en compte pour le départ des lignes de champ
- "virtual+" - la charge est affichée comme charge image, ne peut pas être déplacée et les lignes de champ qui y sont relatives seront affichées

On notera deux variantes³¹ de la charge ponctuelle : la charge relative à un milieu (nom de balise *medcharge*) et la charge image relative à un milieu (nom de balise *medimage*) dont les attributs sont les mêmes.

La distribution linéique de charges

```
<line intensity='expression mathématique'>
  <node1 x='x1' y='y1' /><node2 x='x2' y='y2' />[...<noden x='xn' y='yn' />]
</line>
```

L'intensité de la distribution linéique est cette fois-ci exprimée en Coulomb par pixel.

Le nom de chaque noeud enfant n'importe pas. Il est par contre nécessaire qu'il y ait au minimum 2 enfants et préférable que les segments formés par les nodes ne se croisent pas. Dans tous les cas, le système permet de disposer de plus de deux nodes, mais une telle disposition est expérimentale. Les valeurs obtenues ne sont pas fiables et le comportement de l'environnement pourrait être défaillant.

²⁸ Voir <http://www.tuteurs.ens.fr/faq/utf8.html#utf8>

²⁹ Les éléments entre crochets sont facultatifs

³⁰ Une expression mathématique peut correspondre soit à un nombre entier, un nombre à virgule, un nombre en notation scientifique ou une division de deux nombres

³¹ Ces variantes sont spécifiques à l'application du champ électrique à l'interface entre deux milieux diélectriques et plus spécifiquement au cas d'une charge isolée.

Le cadre-masque

```
<aframe x='x1,x2...xn' y='y1,y2...yn' [visible='true ou false'] />
```

Le cadre masque une zone polygonale dont les sommets sont les diverses coordonnées (x_i, y_i) . Le paramètre de visibilité permet de rendre cette zone opaque ou non. Par défaut, la zone est opaque (*visible='true'*).

Quelque soit la visibilité de la zone, le champ électrique n'y est pas représenté.

L'interface entre deux milieux

```
<planborder x='x1,x2...xn' y='y1,y2...yn' dx='nombre réel' dy='nombre réel'
step='entier' size='nombre réel' />
```

La représentation d'une interface est faite selon divers paramètres dont les coordonnées de ces extrémités (x_i, y_i) (chaque noeud), la direction (*dx* et *dy*) des tirets affichés le long de chaque segment selon un pas (*step*) et une taille (*size*).

Le milieu

```
<medium x='entier' y='entier' width='entier' height='entier' permittivity='nombre réel' />
```

Le milieu³² est délimité par un rectangle dont on détermine le sommet principal puis la largeur et la hauteur (valeurs positives).

L'intensité par défaut

```
<set-default-int value='expression mathématique' />
```

La valeur d'intensité par défaut est appliquée à tous les objets suivant la balise qui n'indiquent pas de valeur d'intensité spécifique.

Le changement de repère

```
<set-repere x='entier' y='entier' />
```

Le changement de repère n'est valable que pour les charges ponctuelles, il ne s'applique pas aux divers autres objets. Si un deuxième changement de repère est effectué, il est fait à partir du repère global et non relativement au précédent repère local.

Les projets de démonstration utilisant les divers objets, la manière la plus simple de comprendre et utiliser ces fichiers est de passer par les fichiers fournis, de les copier puis de les modifier.

b) *Projet .phyx-test*

Le fichier d'un projet de test possède une balise racine `<physics-project>` contenant la liste des projets comparés. Cette balise racine contient entre autre un paramétrage du test réalisé selon les paramètres suivants :

- **sx** et **sy** : l'abscisse et l'ordonnée de départ des tests
- **ex** et **ey** : l'abscisse et l'ordonnée de fin des tests
- **d** : le pas de déplacement à partir de *sx* / *sy* jusqu'à *ex* / *ey*
- **form** : la forme particulière de lissage des courbes du graphique³³

³² Le fait de définir un milieu n'induit aucun calcul, c'est un artifice permettant le calcul de cas prédéfinis dont celui traité dans l'application d'une charge ponctuelle à l'interface entre deux milieux.

³³ Les valeurs utilisables sont celles utilisables pour la propriété "form" de l'objet *LineSeries* de la plateforme Flex 2, soit : **curve**, **horizontal**, **vertical**, **segment**, **step** ou **reverseStep**

Pour plus d'informations voir :

<http://livedocs.adobe.com/flex/2/langref/mx/charts/series/LineSeries.html#form>

- **type** : le type de test réalisé, actuellement uniquement "gauss" qui correspond à un test du champ électrique en diverses coordonnées définies selon s_x , s_y , e_x , e_y et d

Vous pouvez entre autre vous référer aux projets de test "*gauss.phyx-test*" et "*gauss-curved.phyx-test*".

3. Programmes concurrents ou similaires

3.1 - Mathematica

"Mathematica est un logiciel propriétaire de calcul formel édité par Wolfram Research [...]. Le système de Mathematica est formé d'un noyau, qui réalise les calculs et peut être exécuté sur une autre machine que celle de l'utilisateur, et d'une interface interactive pour entrer les données. Celle-ci attend des entrées de l'utilisateur exprimées dans le langage de Mathematica, selon une syntaxe définie, et affiche le résultat des calculs sous forme de texte simple, de formules, ou d'images."

[citation tirée de <http://fr.wikipedia.org/wiki/Mathematica>]

Ce logiciel a la particularité de ne pas être spécialisé dans un domaine particulier des sciences. Utilisant un langage propriétaire, il permet de résoudre, d'effectuer ou simplifier divers calculs ou équations et permet aussi une représentation de divers champs et fonctions.

La complexité de l'outil en fait un outil très utilisé mais peu pratique lorsqu'il s'agit de représenter des cas très précis et de les faire varier manuellement car la représentation d'un champ nécessite un paramétrage manuel complet des divers éléments jouant un rôle tels que tous les objets physiques ayant une influence sur ce champ.

Finalement, on notera que Mathematica est payant et son prix, s'il est réduit pour les étudiants, est fort élevé.

Le produit est disponible depuis le site suivant :

<http://www.wolfram.com/products/mathematica>

3.2 - CUPS

"La série de logiciels CUPS couvre un large domaine de la physique, notamment l'électromagnétisme pour lequel le logiciel CUPS dédié permet de faire de très intéressantes simulations [...]."

[d'après <http://astro.ensc-rennes.fr/index.php?pw=cupsem>]

Le site dont est tiré la citation présente diverses applications réalisées grâce à CUPS. On notera que, comme Mathematica, la série de logiciels est payante. De plus, il n'est pas multi-plateforme et nécessite un émulateur DOS.

Malgré ces quelques défauts, il couvre divers domaines de la physique pour lesquels il permet des représentations complexes en 3 dimensions tels que :

- la mécanique classique
- l'électromagnétisme
- l'astrophysique
- la physique moderne
- la physique nucléaire et physique des particules
- la mécanique quantique

- la physique de l'état solide
- la thermophysique
- l'optique et la physique des ondes

Le logiciel est disponible avec une série de livres, depuis le site suivant :

<http://physics.gmu.edu/~cups/>

3.3 - QuickField

"QuickField™ est un logiciel de calculs par éléments finis très efficace pour les problèmes électromagnétiques, thermiques et de contraintes mécaniques."

[d'après <http://www.quickfield.com/fr>, le site de l'éditeur du logiciel]

Le logiciel est payant est uniquement disponible pour le système d'exploitation Microsoft® Windows®.

3.4 - Visualis Physics

VISUALIS PHYSICS est une série de logiciels interactifs pour l'enseignement de la physique, offrant des vues en 3 dimensions et permettant une interactivité remarquable en temps réel grâce à l'utilisation poussée du matériel d'accélération graphique.

Il nécessite une carte graphique de type Nvidia ou ATI compatible OpenGL ou DirectX. De plus, le logiciel est disponible uniquement pour Microsoft® Windows®.

Les domaines de l'électromagnétisme, de la thermodynamique, de la dynamique générale ainsi que de la physique des ondes sont couverts grâce à un système de modules, chaque module couvrant une partie.

Le site de l'éditeur est : <http://www.visualis-physics.com/fr>

4. Source du programme

Les paragraphes suivants s'adressent à un utilisateur expérimenté voulant étendre les fonctionnalités du programme.

4.1 - Algorithmes principaux

a) Délégation temporelle

L'environnement nécessite une écoute des événements produits par l'utilisateur et met ainsi en place un système d'événements. Ce système est plus particulièrement utilisé dans le cadre de l'affichage du champ électrique.

A la place d'afficher le champ dans tout l'environnement en une seule fois, le processus d'affichage est décomposé en parties : soit des lignes de l'écran sur lesquelles sont représentés des vecteurs, soit chacune des lignes de champ produites.

Au lieu d'appeler automatiquement les fonctions affichant ces parties, le programme place en "attente" ces fonctions grâce à un système d'écoute événementielle.

En fait, l'environnement écoute l'événement `Event.ENTER_FRAME` qui correspond à l'entrée dans un nouveau cycle d'affichage. A chaque production de

cet événement, une nouvelle partie de l'affichage est réalisée. Cela permet de déléguer la charge du processeur et principalement de ne pas bloquer l'affichage.

Le blocage de l'affichage est produit par le système de Flash basé sur plusieurs unités d'exécution : une partie s'occupant de l'affichage de la scène et une partie s'occupant de l'exécution du reste du code. Chaque partie doit avoir un certain temps libre pour pouvoir s'exécuter et l'exécution du code étant prioritaire sur l'affichage, si elle prend trop de temps, l'affichage n'est pas possible.

Le fait d'utiliser un système de boucle et de décomposer l'affichage permet d'instaurer des temps de non-exécution du code permettant à la partie propre à l'affichage de se réaliser.

Ce mécanisme est réalisé dans la classe `wx.physix.WorkProject` via la méthode d'écoute `addEventListener` de l'objet `parent`.

b) Interface `Charged` et polymorphisme d'héritage

"En informatique le polymorphisme est l'idée d'autoriser le même code à être utilisé avec différents types, ce qui permet des implémentations plus abstraites et générales."

[tiré de http://fr.wikipedia.org/wiki/Polymorphisme_%28informatique%29]

Etant donné que plusieurs objets différents peuvent être placés dans l'environnement, une interface de base, nommé "`Charged`" a été utilisée pour représenter ces divers éléments. Tout objet de ce type doit implémenter une série de méthodes permettant de travailler avec cet objet :

- `electricFieldAt` : méthode renvoyant un vecteur champ selon un point
- `intensity` : propriété déterminant l'intensité de l'objet
- `display` : objet visuel représentant l'objet
- `distanceFrom` : méthode renvoyant la distance de l'objet par rapport à un point spécifié
- `getOrigins` : méthode renvoyant une liste de points correspondant aux origines des lignes de champ relativement à l'objet chargé

Tout implémentation de cette interface peut être prise en compte dans l'environnement pour définir le champ électrique produit à n'importe quel endroit et ainsi afficher ce dernier ainsi que les lignes de champ et les équipotentielles.

Finalement, le polymorphisme d'héritage³⁴ permet d'étendre les divers éléments déjà créés pour en créer de nouveaux. Par exemple, les objets `MediumRelativeCharge` et `MediumRelativeImage` sont en réalité de simples charges ponctuelles dont le comportement relativement à leur intensité dépend du milieu en cours de considération.

A la place de redéfinir ces objets depuis le départ, ils héritent des propriétés de l'objet `SingleCharge` (charge ponctuelle normale) et redéfinissent les méthodes qui leur sont particulières.

34 Voir <http://www.commentcamarche.net/poo/polymorp.php3>

4.2 - Extensibilité

a) Les limitations

Le domaine de la 3D n'est actuellement pas accessible étant donné que l'outil utilisé n'a pas des fonctionnalités étendues à la 3D ni des capacités d'accélération matérielle.

Ces mêmes défauts rendent impossible une interactivité en temps réel sur le modèle du programme Visualis Physics³⁵. Il incombe à l'utilisateur de placer les objets dans l'environnement puis de demander un rendu de cet environnement. A contrario, si l'outil était plus rapide, on pourrait produire le rendu instantanément lors du déplacement / la création / la suppression de tout élément chargé. Des calculs plus complexes de surfaces ou même de volumes pourraient être effectués.

Finalement, la limitation principale reste la méthode d'extension du programme : pour ajouter des fonctionnalités ou éléments plus particuliers, il est nécessaire de reprendre les sources, de coder ces dites-fonctionnalités, puis de recompiler le programme là où un outil plus général tel que Mathematica permet de générer un grand nombre de cas à travers un langage particulier et un environnement lié avant tout aux mathématiques.

b) Les améliorations possibles

Les premières améliorations possibles sont relatives à l'affichage et la représentation du champ électrique :

- A partir des divers points formant les équipotentielles, on pourrait extrapoler des courbes et ainsi les afficher.
- La représentation de la variation du champ n'est faite qu'à travers l'intensité des vecteurs alors qu'on peut utiliser des variations de couleurs, cela pour les vecteurs de même que pour les lignes de champ.
- De nouvelles échelles peuvent être appliquées. Pour cela, il faut inscrire de nouvelles fonctions dans la classe *Reduction* du package *wx.physics.maths*. Toute nouvelle fonction doit suivre la structure des fonctions présentes, soit être *statique* et posséder un seul argument, de type *Number* - c'est-à-dire l'intensité du champ. Pour rendre ces fonctions accessibles, il faut ajouter le nom de la fonction dans le composant *ComboBox* dont l'attribut *id* est "redBox" dans le fichier *Main.mxml*.
- De même, pour simplifier l'ajout d'échelles, on peut, à la place de définir statiquement une liste de noms dans le fichier *Main.mxml*, définir dynamiquement la liste des méthodes utilisables en créant la liste de *Main.mxml* après inspection des méthodes statiques de la classe *Reduction*.
- On peut ajouter des autres types de représentation du champ vectoriel en créant de nouveaux objets du même type que la classe *VectorDisplay* du package *wx.physics.visual*, puis en ajoutant en paramètre la classe utilisée pour représenter le champ et ainsi permettre une variété de représentation du champ.

Suivent des améliorations de l'ordre de l'utilisation.

- Actuellement, on peut charger un projet; il serait intéressant d'intégrer une gestion de sauvegarde de projet en cours transformant un projet libre en un projet externe. Cela permettrait de sauvegarder des dispositions particulières de charges.

³⁵ Voir Annexes 3.4 - à propos de Visualis Physics

- Des tests différents de celui réalisé pour l'application de Gauss peuvent être défini à travers le fichier source *PhysixTest.xml* du package *wx.components*.

Finalement, seul le domaine de l'électrostatique a été visité, on peut ajouter des fonctions pour afficher le champ magnétostatique et imaginer des représentations partielles d'électrodynamique. Le système pourrait être étendu à n'importe quel type de champ grâce au polymorphisme, en décrivant une interface de plus bas niveau que "*Charged*".