Electrostatique

Extrait du programme

La partie **1** présente les lois quantitatives qui régissent le champ électrostatique. Les notions abordées sont centrées sur les distributions de charges, le champ et le potentiel. Pour le champ électrique et le potentiel, on se limite aux expressions explicites dans le cas de charges ponctuelles et sous forme intégrale dans le cas de distributions continues.

L'accent est mis sur les propriétés intégrales du champ et sur le théorème de Gauss (admis) pour des situations présentant un haut degré de symétrie. Une antisymétrie est la composée d'une symétrie plane et d'une opération de conjugaison de charge.

Des capacités sur la lecture des lignes de champ et des surfaces équipotentielles sont développées.

Le condensateur plan est introduit mais l'étude des conducteurs en équilibre électrostatique ne relève pas du programme.

Une approche énergétique est conduite dans un cas simple : une charge ponctuelle placée dans un champ électrique extérieur.

Les analogies avec la gravitation sont centrées sur l'application du théorème de Gauss.

Notions et contenus	Capacités exigibles
1. **Électrostatique**	
Loi de Coulomb. Champ électrostatique. Champ électrostatique créé par un ensemble de charges ponctuelles. Principe de superposition.	Exprimer le champ électrostatique créé par une distribution discrète de charges. Citer quelques ordres de grandeur de champs électrostatiques.
Distributions continues de charges : volumique, surfacique, linéique.	Décomposer une distribution en des distributions plus simples dans le but de calculer un champ électrostatique par superposition. Choisir un type de distribution continue adaptée à la situation modélisée. Évaluer la charge totale d'une distribution continue dans des situations à géométries simples.
Symétries et invariances du champ électrostatique.	Identifier les plans de symétrie et d'antisymétrie d'une distribution de charges. Identifier les invariances d'une distribution de charges. Exploiter les symétries et les invariances d'une distribution de charges pour caractériser le champ électrostatique créé.
Circulation du champ électrostatique. Notion de potentiel électrostatique. Opérateur gradient.	Relier le champ électrostatique au potentiel. Exprimer le potentiel créé par une distribution discrète de charges. Connaître l'expression de l'opérateur gradient en coordonnées cartésiennes. Calculer un champ électrostatique à partir du potentiel, l'expression de l'opérateur gradient étant fournie dans le cas des coordonnées sphériques et cylindriques. Calculer une différence de potentiel par circulation du champ électrostatique dans les cas simples.
Flux du champ électrostatique. Théorème de Gauss.	Reconnaître les situations pour lesquelles le champ électrostatique peut être calculé à l'aide du théorème de Gauss. Utiliser le théorème de Gauss pour déterminer le champ électrostatique créé par une distribution présentant un

	haut degré de symétrie.
Cas de la sphère, du cylindre « infini » et du plan « infini ».	Établir les expressions des champs électrostatiques créés en tout point de l'espace par une sphère uniformément chargée en volume, par un cylindre « infini » uniformément chargé en volume et par un plan « infini » uniformément chargé en surface. Établir et exploiter le fait qu'à l'extérieur d'une distribution à symétrie sphérique, le champ électrostatique créé est le même que celui d'une charge ponctuelle concentrant la charge totale et placée au centre de la distribution.
Étude du condensateur plan comme la superposition de deux distributions surfaciques, de charges opposées.	Établir l'expression de la capacité d'un condensateur plan dans le vide en négligeant les effets de bords.
Lignes de champ, tubes de champ, surfaces équipotentielles.	Orienter les lignes de champ électrostatique créées par une distribution de charges. Représenter les surfaces équipotentielles connaissant les lignes de champ et inversement. Relier les variations de l'intensité du champ électrostatique à la position relative des lignes de champ. Vérifier qu'une carte de lignes de champ est compatible avec les symétries et les invariances d'une distribution. **Approche numérique :** représenter des cartes de lignes de champ et d'équipotentielles.
Énergie potentielle électrostatique d'une charge placée dans un champ électrostatique extérieur.	Établir et exploiter l'expression de l'énergie potentielle d'une charge ponctuelle placée dans un champ électrostatique extérieur.
Analogies avec la gravitation.	Transposer le théorème de Gauss au cas de la gravitation.

Sommaire

1 CHAMP ELECTROSTATIQUE CREE PAR UNE DISTRIBUTION DISCRETE DE CHARGES 5

1.1 CHARGES ELECTRIQUES 5
1.2 LOI DE COULOMB 5
1.3 CHAMP ELECTROSTATIQUE CREE PAR UNE CHARGE PONCTUELLE 7
1.4 CHAMP ELECTROSTATIQUE CREE PAR UN ENSEMBLE DE CHARGES PONCTUELLES 7

2 DISTRIBUTIONS CONTINUES DE CHARGES 8

2.1 DISTRIBUTION VOLUMIQUE DE CHARGES ELECTRIQUES 8
2.2 DISTRIBUTION SURFACIQUE DE CHARGES ELECTRIQUES 9
2.3 DISTRIBUTION LINEIQUE DE CHARGES ELECTRIQUES 9
2.4 CALCUL DU CHAMP ELECTROSTATIQUE 10

3 SYMETRIES ET INVARIANCES DU CHAMP ELECTROSTATIQUE 11

3.1 PRINCIPE DE CURIE 11
3.2 SYMETRIES DE LA DISTRIBUTION DE CHARGES 11
3.3 INVARIANCES DE LA DISTRIBUTION DE CHARGES 13
3.4 TOPOGRAPHIE DU CHAMP ELECTROSTATIQUE 13

4 THEOREME DE GAUSS 14

4.1 FLUX DU CHAMP ELECTROSTATIQUE 14
4.2 CAS D'UNE CHARGE PONCTUELLE 14
4.3 THEOREME DE GAUSS 15
4.4 TOPOGRAPHIE DU CHAMP ELECTROSTATIQUE 16
4.5 THEOREME DE GAUSS POUR LA GRAVITATION 16

5 DISTRIBUTIONS A HAUT DEGRE DE SYMETRIE 17

5.1 METHODE DE RESOLUTION 17
5.2 SPHERE UNIFORMEMENT CHARGEE EN VOLUME 17
5.3 CYLINDRE « INFINI » UNIFORMEMENT CHARGE EN VOLUME 19
5.4 PLAN « INFINI » UNIFORMEMENT CHARGE EN SURFACE 21

6 POTENTIEL ELECTROSTATIQUE 23

6.1 RELATIONS INTEGRALES 23
6.2 RELATIONS LOCALES 24
6.3 TOPOGRAPHIE DU CHAMP ELECTROSTATIQUE 25

7 ÉTUDE DU CONDENSATEUR PLAN 26

7.1 DESCRIPTION 26
7.2 CHAMP ELECTRIQUE ENTRE LES ARMATURES 26
7.3 CAPACITE DU CONDENSATEUR 28
7.4 ASPECT ENERGETIQUE 28

8 QUESTIONS DE COURS 29

9 QUESTIONS A CHOIX MULTIPLES 29

10 EXERCICES D'APPLICATION DIRECTE DU COURS 30

10.1 DISTRIBUTIONS CONTINUES DE CHARGES 30
10.2 SYMETRIES DE LA DISTRIBUTION DE CHARGES 30
10.3 INVARIANCE DE LA DISTRIBUTION DE CHARGES 30
10.4 GEOMETRIE DES LIGNES DE CHAMP ET SURFACES EQUIPOTENTIELLES 30

10.5 Relation potentiel-champ 31
10.6 Cas d'une masse ponctuelle 31
11 EXERCICES TYPE ORAL 32
11.1 Vitesse d'un electron en orbite circulaire 32
11.2 Carre de 4 charges 32
11.3 Champ cree par un segment et un disque uniformement charges 32
11.4 Etude d'un canon a electrons d'un oscilloscope cathodique (CCP TSI 2014) 32
11.5 Differents types de condensateurs 33
11.6 Lignes de champ 33
12 EXERCICES TYPE ECRIT (A RENDRE EN DM POUR LE 17/01/2022) 34
12.1 Champ de pesanteur Martien (Centrale TSI 2019) 34
12.2 Microphone electrostatique (Centrale TSI 2018) 35

1 Champ électrostatique créé par une distribution discrète de charges

1.1 Charges électriques

1.1.1 Charges électriques

Au niveau microscopique, on retrouve des particules chargées, aussi appelées **porteurs de charges**.

Exemple :

Propriété :

Remarque :

1.1.2 Expériences d'électrisation

Les expériences d'électrisation d'objets divers par frottements, mettent en évidence deux sortes de charges électriques : charges électriques positives ou négatives, dépendant de la nature de l'objet frotté et de l'objet frottant. Ces charges rapprochées les unes des autres, font apparaître des forces entre elles, qui peuvent être attractives (si les charges sont de signes contraire) ou répulsives (si elles sont de même signe).

Liens :

https://www.youtube.com/watch?v=KncNcRZrNgY
https://www.youtube.com/watch?v=bTZ3r1MmIRc&list=PLWfc4QDrcvkOIhyFkUlZXRNt8yV7uIidm&index=138
https://www.youtube.com/watch?v=TZQGstTysYQ
https://www.youtube.com/watch?v=amANIY-Pl_g&list=PLWfc4QDrcvkOIhyFkUlZXRNt8yV7uIidm&index=38
https://www.youtube.com/watch?v=IK6YJsawp1M&list=PLWfc4QDrcvkOIhyFkUlZXRNt8yV7uIidm&index=99

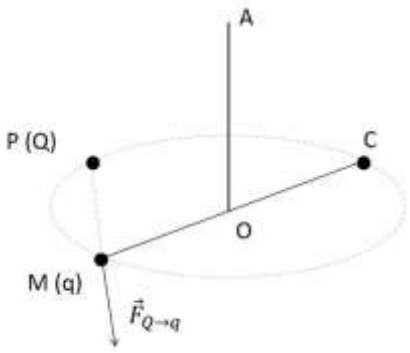
1.2 Loi de Coulomb

1.2.1 Expérience de Coulomb

Le dispositif met en œuvre un pendule de torsion. Un fil de torsion OA, fixé en A, est relié en O à un axe horizontal MC susceptible de tourner autour de l'axe vertical.

Une charge q est fixée en M. En C, on place un contre-poids qui assure l'horizontalité de la tige MC. On place alors une charge Q en P dans le plan horizontal. Si le signe de q est identique à celui de Q, la force électrique est répulsive.

La mesure de l'angle α que fait la tige horizontale par rapport à sa position au repos permet de connaître le couple exercé sur le fil de torsion, dû à la force électrique exercée sur q par Q.

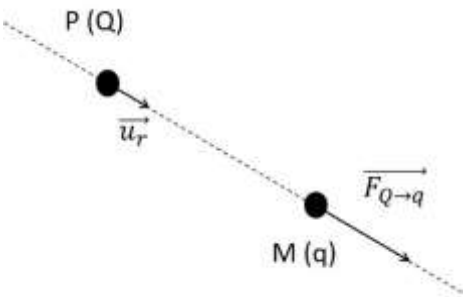


https://www.youtube.com/watch?v=omobCEi20ng

Conclusions :

1.2.2 Enoncé

Définition :
Soit une particule chargée en P de charge Q, respectivement M de charge q. On note r la distance entre ces deux points et $\overrightarrow{u_r}$ le vecteur unitaire de direction P vers M, soit : $\overrightarrow{u_r} = \frac{\overrightarrow{PM}}{PM}$.
La force exercée par la charge Q sur la charge q, appelée **force électrostatique (ou de Coulomb)**, s'écrit dans le vide :

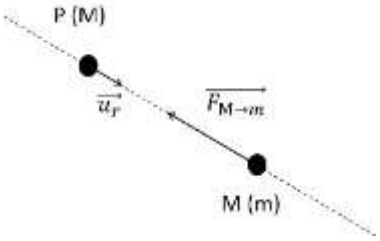


si Q et q de même signe

Remarques :
$\varepsilon_0 = 8{,}85.10^{-12} F.m^{-1}$ permittivité du vide
Dans un milieu diélectrique, on aura : $\overrightarrow{F_{Q\to q}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}\frac{Qq}{r^2}\overrightarrow{u_r}$ avec ε_r permittivité relative (sans unité).
Dans l'air, $\varepsilon_r \approx 1$, dans l'eau : $\varepsilon_r \approx 80$.
D'après le principe des actions réciproques, on aura : $\overrightarrow{F_{Q\to q}} = -\overrightarrow{F_{q\to Q}}$
On retrouve bien que deux charges de même signe se repoussent et deux charges de signes opposés s'attirent.

1.2.3 Analogie avec la force gravitationnelle

Définition :
Soit une masse M en P et une masse m en M. On note r la distance entre ces deux points et $\overrightarrow{u_r} = \frac{\overrightarrow{PM}}{PM}$. La force exercée par la masse M sur la masse m, appelée force gravitationnelle, s'écrit :



Remarque :
Les masses étant toujours positives, cette force est une force d'attraction.
Ordre de grandeur :
Entre un proton (charge e, masse $m_p = 1{,}7.10^{-27} kg$) et un électron (charge $-e$, masse $m_e = 9{,}1.10^{-31} kg$) distants de $r = 1m$, comparons la force gravitationnelle à celle électrostatique :

1.3 Champ électrostatique créé par une charge ponctuelle

A partir de la force électrostatique, on peut introduire la notion de champ électrostatique $\overrightarrow{E_Q}$ créé par la charge Q au point M, $\overrightarrow{E_Q}(M)$, et qui exerce donc une force au point M de :

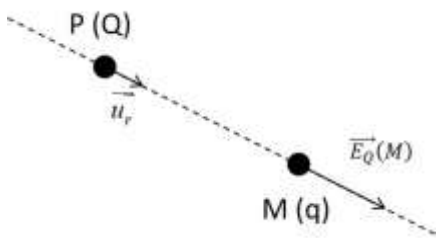
Remarques :

L'unité du champ électrostatique est donc en $N.C^{-1}$ ou encore plus communément en $V.m^{-1}$

Le champ électrique ne se révèle que par ses effets. Ainsi, pour mesurer un champ électrique en un point, il faut y placer une charge afin de mesurer la force qu'elle subit (expérience de Coulomb).

Définition :

Soit une charge ponctuelle Q située au point P et $\overrightarrow{u_r} = \frac{\overrightarrow{PM}}{PM}$. Si on place une charge q en un point M quelconque de l'espace. Le champ électrique créé par Q en M est :



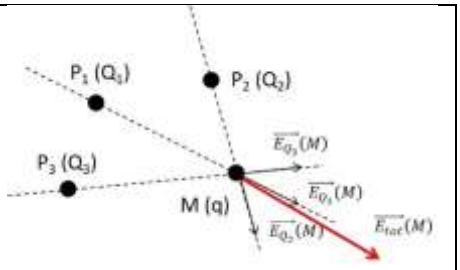
Remarques :

Le champ électrostatique est radial et varie comme l'inverse de la distance au carré.

Il n'est pas défini au point P cependant.

1.4 Champ électrostatique créé par un ensemble de charges ponctuelles

Dans le cas d'une distribution de plusieurs charges ponctuelles, où l'on note Q_i la valeur de la charge portée par la particule P_i et $\overrightarrow{u_{r_i}} = \frac{\overrightarrow{P_iM}}{(P_iM)^3}$, le champ électrostatique total $\overrightarrow{E_{tot}}(M)$ créé au point M est égal à la superposition des champs électrostatiques créés par chacune des charges ponctuelles Q_i au point M :



Remarque :

C'est ce qu'on appelle le **principe de superposition**.

Ordres de grandeur de champs électriques :

Surface de la Terre	
Orage	
Charge ponctuelle de $q = 1C$ située à une distance de $d = 1m$	

2 Distributions continues de charges

2.1 Distribution volumique de charges électriques

Les charges ponctuelles présentées précédemment sont animées au niveau microscopique d'un mouvement permanent d'agitation.

Pour pouvoir donc les considérer comme statiques et rester dans le cadre de ce cours, il nous faut changer d'échelle et passer à **l'échelle mésoscopique**.

Exemple :

Dans un circuit électronique, on considère une couche de cuivre d'épaisseur $h = 1\mu m$, de largeur $l = 0{,}1mm$ et de longueur $L = 1mm$. Chaque atome de métal cède en moyenne un électron, devenant ainsi un ion, que l'on écrit Cu^+ pour simplifier.

Données : $N_a = 6{,}022.10^{23} mol^{-1}$, $\mu = 8{,}94.10^3 kg.m^{-3}$, $M = 63{,}5 g/mol$

Ordre de grandeur du rayon atomique :

Nombre d'ions dans le volume :

Densité volumique d'ions (ou électrons) :

On va donc considérer une distribution volumique continue de charge de volume total V. On peut décomposer ce volume en volumes élémentaires dV contenant un nombre de particules dN suffisamment grand. On peut alors supposer que le nombre de particules dans ce volume reste quasiment constant et porte la charge élémentaire dq.

On définit alors une **densité de particules chargées** (m^{-3}), n, que l'on peut supposer uniforme telle que :

Définition :

On définit la **densité volumique de charges** ρ ($C.m^{-3}$) par :

Remarques :

On retrouve la charge totale Q de la distribution volumique en intégrant la charge élémentaire sur le volume V par :

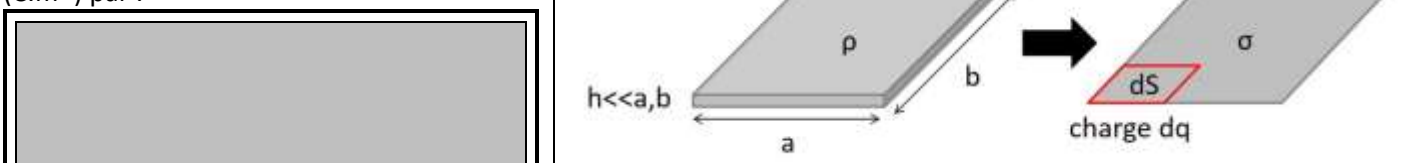
Si les porteurs de charges sont tous identiques portant une charge q, alors :

S'il y a plusieurs types de porteurs différents :

2.2 Distribution surfacique de charges électriques

Lorsque les charges de la distribution sont localisées dans un volume de faible épaisseur h (très inférieure aux dimensions latérales), on peut modéliser la distribution comme une distribution continue surfacique de charges de surface S, décomposable en surfaces élémentaires dS .

Définition :
On définit la densité surfacique de charges σ (C.m^{-2}) par :



Remarques :
On retrouve la charge totale Q de la distribution surfacique en intégrant la charge élémentaire sur la surface S par :

On peut repasser à la distribution volumique par :

Une distribution surfacique n'est qu'un modèle.

2.3 Distribution linéique de charges électriques

Lorsque les charges de la distribution sont localisées dans un volume de longueur L très grande devant les dimensions latérales r, on peut modéliser la distribution comme une distribution continue linéique de charges de longueur L, décomposable en surfaces élémentaires dl .

Définition :
On définit la densité linéique de charges λ (C.m^{-1}) par :

Remarques :
On retrouve la charge totale Q de la distribution linéique en intégrant la charge élémentaire sur la longueur L par :

On peut repasser à la distribution volumique par :

Une distribution linéique n'est qu'un modèle.

2.4 Calcul du champ électrostatique

La charge élémentaire dq située au point P est à l'origine d'un champ électrostatique élémentaire au point M :

Remarques :

Pour une distribution volumique :

Pour obtenir le champ électrostatique total résultant de la distribution de charge, il suffit alors d'intégrer sur le volume V (théorème de superposition) :

Pour une distribution surfacique :

Pour obtenir le champ électrostatique total résultant de la distribution de charge, il suffit alors d'intégrer sur la surface S (théorème de superposition) :

Pour une distribution linéique :

Pour obtenir le champ électrostatique total résultant de la distribution de charge, il suffit alors d'intégrer sur la longueur L (théorème de superposition) :

Remarques :

Le champ électrostatique n'est pas défini sur la distribution surfacique de charges.

Le champ électrostatique n'est pas défini sur la distribution linéique de charges.

3 Symétries et invariances du champ électrostatique

De manière générale, le calcul de champ électrostatique n'est pas simple. Calculer un champ vectoriel c'est en effet trouver sa direction, son sens et sa norme en tout point de l'espace. En étudiant les symétries de la distribution de charges, on peut heureusement en déduire dans certains cas la direction et le sens du champ électrostatique.

3.1 Principe de Curie

Principe énoncé par Pierre Curie au début du XXème siècle.

Principe de Curie :
Lorsque des causes produisent des effets, les symétries des causes doivent se retrouver dans celles des effets.

Remarque :

Réciproque fausse

Conséquence :

Dans notre cas, la distribution de charges est à l'origine du champ électrostatique, donc le champ aura les mêmes symétries que la distribution.

3.2 Symétries de la distribution de charges

3.2.1 Plan de symétrie

Une distribution de charge possède un plan de symétrie Π si Π est un plan de symétrie géométrique de la distribution et que les charges sont identiques de chaque côté du plan Π. Alors le plan Π sera aussi un plan de symétrie pour le champ électrostatique.	
Si le plan Π est un plan de symétrie de la distribution de charge, alors en deux points M et M' symétrique par rapport au même plan Π, les champs électrostatiques seront symétriques par rapport à Π.	
Le champ électrostatique est inclus dans le plan de symétrie Π : $\vec{E}(M) \in \Pi$	

3.2.2 Plan d'anti-symétrie

Une distribution de charge possède un plan d'anti-symétrie Π^* si Π^* est un plan de symétrie géométrique de la distribution et que les charges sont opposées de chaque côté du plan Π^*. Alors le plan Π^* sera aussi un plan d'anti-symétrie pour le champ électrostatique.	
Si le plan Π^* est un plan de symétrie de la distribution de charge, alors en deux points M et M' symétrique par rapport au même plan Π^*, les champs électrostatiques seront anti-symétriques par rapport à Π^*.	
Le champ électrostatique est perpendiculaire au plan d'anti-symétrie Π^* : $\vec{E}(M) \perp \Pi^*$	

3.2.3 Symétrie du champ électrostatique

Propriété :
Le champ électrostatique a les mêmes propriétés de symétrie que la distribution de charges.

Remarque :
On dit que c'est un vecteur polaire.

Conséquence :
Pour trouver la direction du champ électrostatique en un point M, on cherchera donc les plans de symétrie et d'anti-symétrie de la distribution de charge contenant le point M.

Propriété :
On dit qu'une distribution de charges présente un haut degré de symétrie si l'étude des propriétés de symétries de la distribution permet de connaître la direction du champ électrostatique en tout point de l'espace.

3.3 Invariances de la distribution de charges

3.3.1 Invariance par translation

Une distribution de charges est invariante par translation suivant un axe, si pout tout point P et son translaté P' sa densité de charge vérifie : $\rho(P) = \rho(P')$.

Alors le champ électrostatique sera indépendant de la coordonnée de P selon l'axe de translation.

3.3.2 Invariance par rotation

Une distribution de charges est invariante par rotation autour d'un axe, si la densité de charge est la même en tout point P' obtenu par rotation de P autour de l'axe.

Alors le champ électrostatique sera indépendant de la coordonnée angulaire de P par rapport à l'axe de rotation.

3.3.3 Invariances du champ électrostatique

Propriété :
Le champ électrostatique a les mêmes propriétés d'invariances que la distribution de charges.

Conséquence :
Pour trouver la dépendance aux coordonnées du champ électrostatique, on cherchera donc les invariances de la distribution de charge.

3.4 Topographie du champ électrostatique

Définitions :
Le champ électrique est tangent à des courbes appelées **lignes de champ** qui sont orientées dans le sens du champ.
Un **tube de champ** est formé par un ensemble de lignes de champ qui s'appuyant sur un contour fermé.

4 Théorème de Gauss

4.1 Flux du champ électrostatique

Définition :
Le flux du champ électrostatique à travers une surface Σ est égal à l'intégrale du champ électrostatique à travers cette surface :

Remarques :
Le flux du champ à travers une surface élémentaire dépend de l'intensité du champ et de l'angle entre la normale à la surface et le champ. Le signe peut être positif ou négatif selon l'orientation.
Déjà vu en première année : flux du champ magnétique

Déjà vu en deuxième année : flux thermique

On s'intéressera ici à des surfaces Σ fermées, c'est-à-dire des surfaces délimitant des volumes.
Exemples :
La sphère et le cube sont des surfaces fermées.
Le cylindre n'en est une que si on le prend d'une hauteur finie et qu'on le ferme par deux disques terminaux.

Propriété :
Lorsqu'une surface Σ est fermée et orientée vers l'extérieur, le flux du champ à travers Σ est qualifié de flux sortant et on le note :

4.2 Cas d'une charge ponctuelle

On considère une charge ponctuelle Q placée en P, qui crée le champ électrostatique en M :

On prend comme surface fermée une sphère de rayon r et de centre P, qui passe donc par le point M.

Calculons le flux du champ à travers cette surface fermée :

Remarque :

On admettra que ce résultat reste valable si la charge n'est plus au centre de la sphère, mais à l'intérieur de celle-ci ; si la surface n'est plus une sphère mais une surface fermée entourant la charge qui crée le champ.

Si la charge se trouve à l'extérieur de la surface fermée, le flux du champ électrostatique sortant sera nul.

4.3 Théorème de Gauss

Théorème de Gauss :

Remarques :

On appelle **surface de Gauss** la surface fermée choisie pour appliquer le théorème de Gauss.

La charge intérieure Q_{int} comprend toutes les charges se trouvant dans la surface de Gauss.

Le théorème de Gauss s'utilisera quand la distribution de charge présente un haut degré de symétrie.

Le théorème de Gauss découle de l'équation de Maxwell-Gauss, qui nous montre sa validité même en régime variable : $div\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad \Rightarrow \quad \iiint_V div(\vec{E}) d\tau = \iiint_V \frac{\rho}{\varepsilon_0} d\tau \quad \Rightarrow \quad \oiint_\Sigma \vec{E} \cdot \overrightarrow{dS} = \frac{Q_{int}}{\varepsilon_0}$

4.4 Topographie du champ électrostatique

On considère un tube de champ délimité par les sections S_1, S_2 et la surface latéraleS_{lat}. On suppose que le champ électrostatique est uniforme sur les sections S_1 et S_2. Aucune charge ne se trouve dans cette zone de l'espace.

Flux du champ :

Si les lignes de champ se resserrent alors :

Remarque :
Même raisonnement en mécanique des fluides avec le débit volumique

4.5 Théorème de Gauss pour la gravitation

Les analogies jusqu'à présent répertoriées entre le champ de gravitation et le champ électrostatique sont :
- charges et masses
- constantes $\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ et $-G$

Théorème de Gauss pour la gravitation :
Le flux du champ de gravité sortant d'une surface fermée Σ est égal au rapport de la masse intérieure par la constante $-4\pi G$:

On peut répertorier les analogies entre champ électrostatique et champ de gravitation dans le tableau suivant :

Champ électrique	**Champ de gravitation**
Force de Coulomb : $\overrightarrow{F_{Q\to q}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qQ}{r^2}\overrightarrow{u_r}$	Force gravitationnelle : $\overrightarrow{F_{M\to m}} = -G\frac{Mm}{r^2}\overrightarrow{u_r}$
Charge : q	Masse : m
Constante : $\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$	Constante : $-G$
Champ électrique : $\vec{E}(M) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r^2}\overrightarrow{u_r}$	Champ de gravitation : $\vec{G}(M) = -G\frac{M}{r^2}\overrightarrow{u_r}$
Théorème de Gauss : $\oiint_\Sigma \vec{E}\cdot\overrightarrow{dS} = \frac{Q_{int}}{\varepsilon_0}$	Théorème de Gauss : $\oiint_\Sigma \vec{G}\cdot\overrightarrow{dS} = -4\pi G M_{int}$
Equation de Maxwell-Gauss : $div\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$	$div\overrightarrow{g} = -4\pi G\mu$

5 Distributions à haut degré de symétrie

5.1 Méthode de résolution

Méthode de résolution (en utilisant le théorème de Gauss) :

1- Rechercher les symétries et invariances.

2- Choisir la surface fermée de Gauss

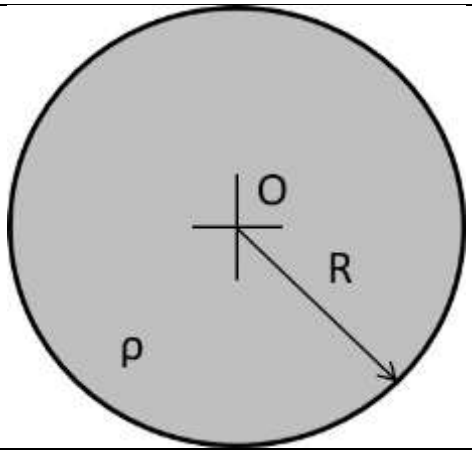
3- Calcul du champ électrostatique

5.2 Sphère uniformément chargée en volume

On considère une sphère de centre O et de rayon R contenant une densité volumique de charge uniforme ρ. On désire établir l'expression du champ électrostatique créé en tout point de l'espace.

On se place dans une base sphérique.

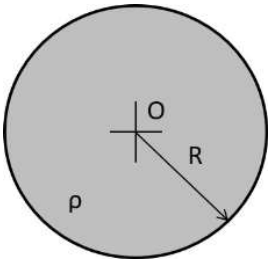
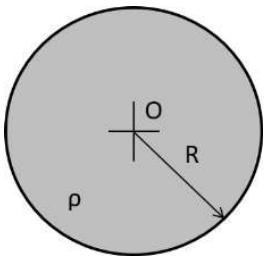
5.2.1 Symétries et invariances



Symétries :

Invariances :

5.2.2 Surface de Gauss

	
r > R	r < R

5.2.3 Théorème de Gauss

Calcul du flux :

Calcul de la charge intérieure :

Soit pour le champ électrostatique :

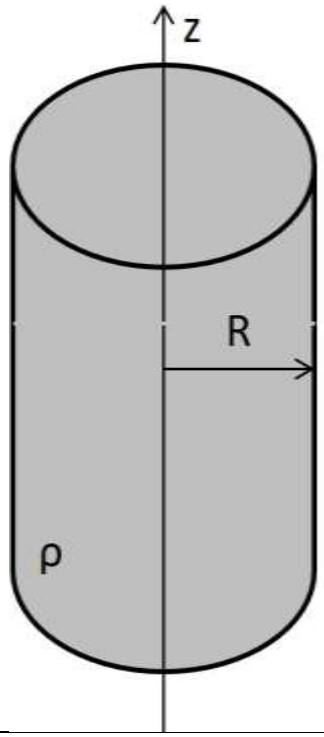
5.2.4 Graphe du champ électrostatique

Remarque :

5.3 Cylindre « infini » uniformément chargé en volume

On considère un cylindre infini d'axe Oz et de rayon R contenant une densité volumique de charge uniforme ρ. On désire établir l'expression du champ électrostatique créé en tout point de l'espace.
On se place dans une base cylindrique.

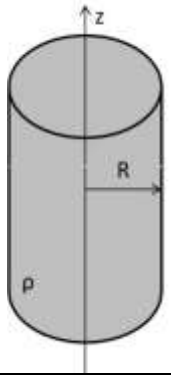
5.3.1 Symétries et invariances



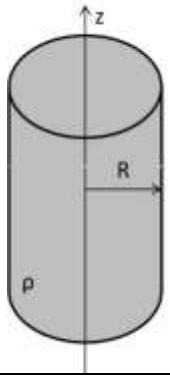
Symétries :

Invariances :

5.3.2 Surface de Gauss



r > R



r < R

5.3.3 Théorème de Gauss

Calcul du flux :

Calcul de la charge intérieure :

Soit pour le champ électrostatique :

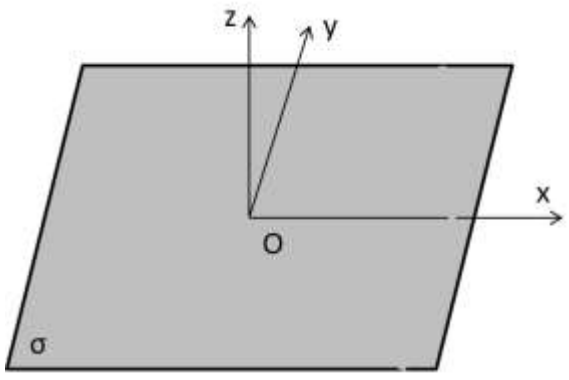
5.3.4 Graphe du champ électrostatique

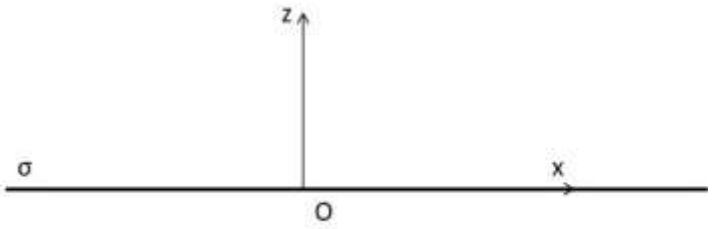
5.4 Plan « infini » uniformément chargé en surface

On considère un plan infini assimilé à xOy contenant une densité surfacique de charge uniforme σ. On désire établir l'expression du champ électrostatique créé en tout point de l'espace.

On se place dans une base cartésienne.

5.4.1 Symétries et invariances



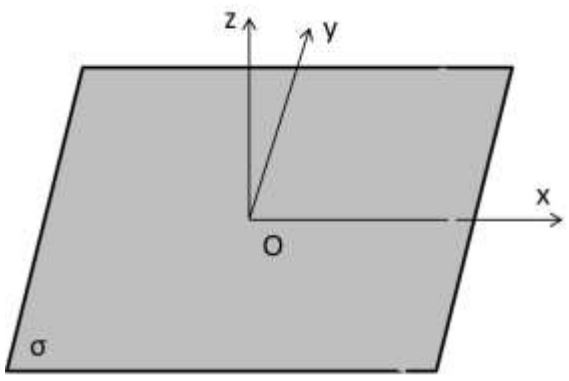


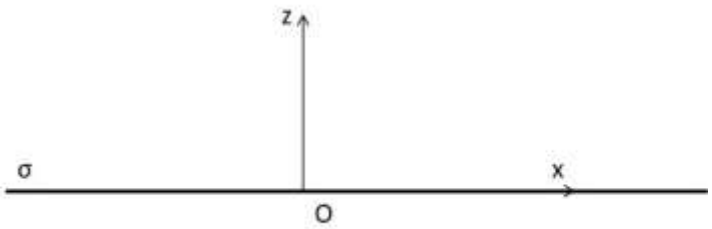
Symétries :

Invariances :

Parité :

5.4.2 Surface de Gauss





5.4.3 Théorème de Gauss

Calcul du flux :

Calcul de la charge intérieure :

Soit pour le champ électrostatique :

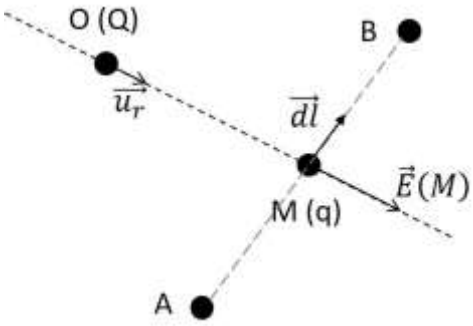
5.4.4 Graphe du champ électrostatique

6 Potentiel électrostatique

La force de Coulomb est une force centrale, elle est donc conservative et dérive d'une énergie potentielle.

Soit une charge ponctuelle Q placée en O, agissant sur une particule de charge q en M.

Si ce point se déplace, sa variation d'énergie potentielle élémentaire est égale à :



On définit alors la variation élémentaire du potentiel comme :

6.1 Relations intégrales

Si ce point se déplace entre les points A et B, sa variation d'énergie potentielle est égale à :

Définition :

On appelle **circulation** du champ électrostatique entre les points A et B, l'intégrale :

6.1.1 Entre champ électrostatique et potentiel électrostatique

Propriété :

On retrouve la **différence de potentiel** entre deux points A et B en calculant la circulation du champ électrostatique entre ces mêmes points.

Remarque :

Le potentiel électrostatique possède les mêmes propriétés d'invariance que le champ électrostatique et donc que la distribution de charges. Il obéit au principe de superposition.

La circulation du champ électrostatique ne dépend pas du chemin suivi.

Si l'on calcule la circulation du champ électrostatique sur un chemin fermé partant du point A , on s'aperçoit que :

$\oint_C \vec{E} \cdot \overrightarrow{dl} = V(A) - V(A) = 0$

Propriété :

Le champ électrostatique est dit à **circulation conservative** :

6.1.2 Entre énergie potentielle électrostatique et champ électrostatique

Propriété :
L'énergie potentielle de la force de Coulomb, dans le cas d'une charge ponctuelle Q, agissant sur une particule de charge q en M, s'écrit :

6.1.3 Entre énergie potentielle électrostatique et potentiel électrostatique

On peut donc relier énergie potentielle électrostatique et potentiel électrostatique par :

Le potentiel électrostatique créé par Q en M est alors :

Remarque :
Le potentiel électrostatique est défini à une constante près.

6.2 Relations locales

On se place dans une base cartésienne.
Le potentiel électrostatique est une fonction de plusieurs variables. On peut donc exprimer la différentielle de cette fonction $V(x,y,z)$sous la forme :

On introduit l'opérateur différentiel **gradient** en coordonnées cartésiennes :

Puisque : $\overrightarrow{dl} = dx\overrightarrow{u_x} + dy\overrightarrow{u_y} + dz\overrightarrow{u_z}$, on peut écrire le potentiel élémentaire sous la forme :

En identifiant les deux expressions, on trouve que champ et potentiel électrostatique sont liés par la relation :

Propriété :
On peut retrouver le champ électrostatique à partir du potentiel électrostatique par :

Remarque :
On retrouve l'unité du champ électrostatique ($V.m^{-1}$) à partir de cette équation.

6.3 Topographie du champ électrostatique

Définition :
Une **surface équipotentielle** est une surface formée d'un ensemble de points au même potentiel.

Propriété :
La relation entre champ et potentiel électrostatique $\vec{E} = -\overrightarrow{grad}V$ montre que :

Conséquence :
Si une ligne de champ relie un point A à un point B et est orienté de A vers B alors :

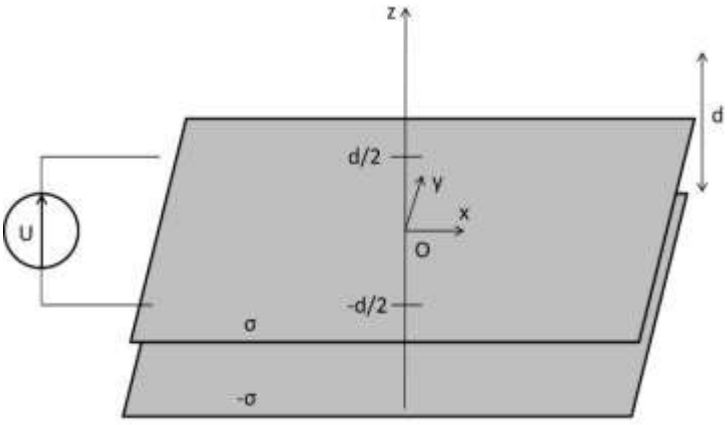
Une ligne de champ électrostatique ne peut donc pas être fermée sur elle-même.
Les lignes de champ sont perpendiculaires aux surfaces équipotentielles.
A écart de potentiel constant entre deux surfaces équipotentielles successives, un resserrement des surfaces équipotentielles s'interprète comme une intensification du champ électrique.

Remarque :
Même raisonnement qu'en conduction thermique
L'intersection de 2 lignes de champ correspond à deux cas singuliers :
- point où se trouve une charge ponctuelle, puisque le potentiel y est extrémal
- point où le champ est nul, seul vecteur à pouvoir avoir plusieurs directions

7 Étude du condensateur plan

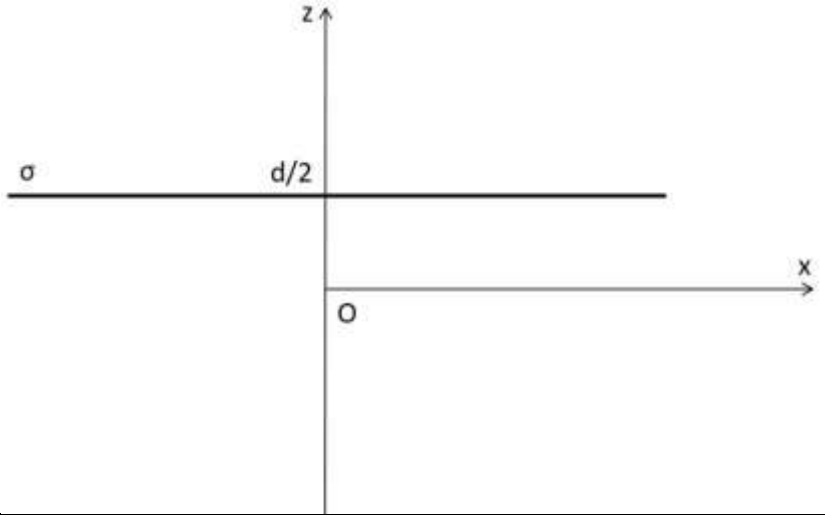
7.1 Description

Un condensateur plan est constitué de deux armatures conductrices qui se font face. Ici, on supposera que ce sont des carrés d'axe Oz et d'aire S séparés par une distance d, appelée écartement. L'écartement est très faible devant les dimensions latérales, ce qui revient à supposer deux plans infinis chargés en surface. L'armature en $z = \frac{d}{2}$ est chargée positivement de densité de charge surfacique σ et l'armature en $z = -\frac{d}{2}$ est chargée négativement de densité de charge surfacique $-\sigma$.
Lorsque ce composant est branché sur un générateur, qui impose une différence de potentiel U entre les deux armatures, un champ électrique apparait dans l'espace inter-armatures.

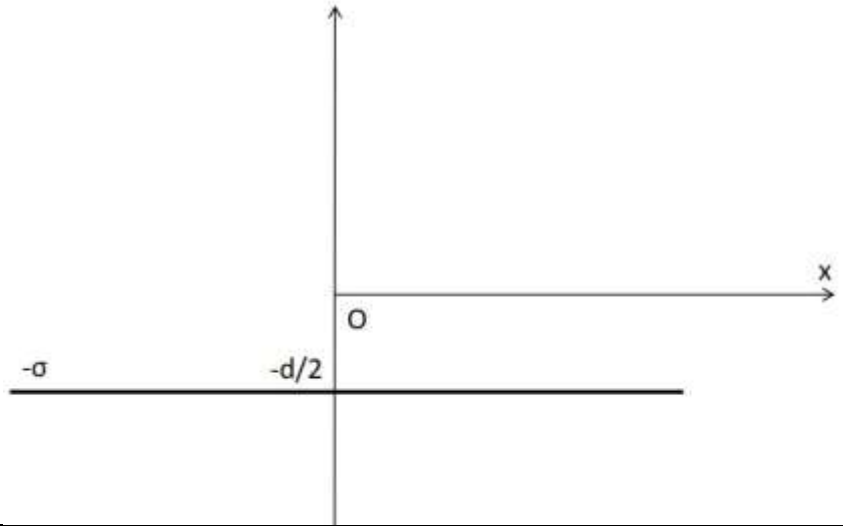


7.2 Champ électrique entre les armatures

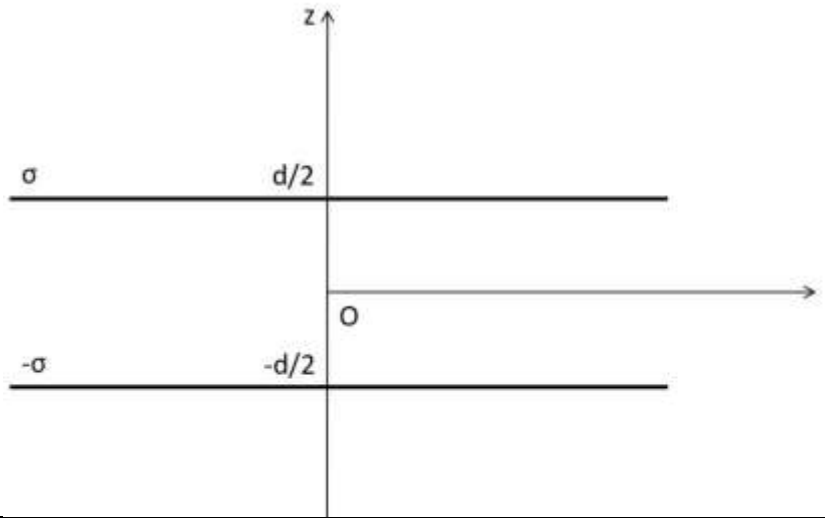
7.2.1 Etude de l'armature supérieure



7.2.2 Etude de l'armature inférieure



7.2.3 Champ électrostatique entre les armatures



7.3 Capacité du condensateur

On peut retrouver la différence de potentiel entre les deux armatures en calculant la circulation du champ électrostatique :

Or, la capacité d'un condensateur est définie par :

avec Q : charge portée par l'armature supérieure telle que

Propriété :
Dans un condensateur plan, la capacité est égale à :

Remarques :
Augmenter la valeur d'une capacité permet, pour une différence de potentiel donnée, d'accroître la valeur de la charge.
Un condensateur dont les armatures ont une surface de l'ordre du cm² et sont écartées d'un dixième de millimètre atteignent dans l'air une capacité inférieure à la dizaine de picofarad.
Il faut donc accroître l'aire des surfaces en regard et diminuer l'épaisseur. Ceci dépendant de l'encombrement. Il faut aussi éviter le court-circuit. Il est possible de jouer sur la forme : enrouler deux conducteurs permet par exemple d'obtenir des surfaces beaucoup plus grandes dans un volume donné.
Il est aussi possible d'utiliser un matériau isolant de permittivité ε plus élevée que celle du vide ou de l'air. Ainsi, on a dans le cas du condensateur plan : $C = \frac{\varepsilon S}{d}$.

7.4 Aspect énergétique

Un condensateur emmagasine une énergie électrique égale à :

Si on remplace par les expressions précédentes :

Dans le cas d'un condensateur plan, la densité volumique d'énergie est donnée par :

Remarque :
On retrouvera cette expression dans la partie aspect énergétique du champ électromagnétique.

8 Questions de cours

1) Donner la loi de Coulomb en expliquant tous les termes entrant dans sa composition. Donner son analogie avec la force gravitationnelle.

2) Donner l'expression du champ électrostatique créé par une charge ponctuelle. Quelle est son unité ? Comment est-elle modifiée dans le cas où la distribution de charges est composée de plusieurs charges ponctuelles ?

3) Donner la définition des densités volumiques, surfaciques et linéiques de charge. Pour chacune de ces distributions, donner l'expression du champ électrostatique.

4) Donner le principe de Curie. Définir les notions de plans de symétrie et d'anti-symétrie pour la distribution de charges. Quelle est la conséquence pour le champ électrostatique ?

5) Citer deux types d'invariances de la distribution de charge et leur conséquence sur le champ électrostatique.

6) Donner deux relations entre champ électrostatique et potentiel électrostatique. L'une utilisera une notation intégrale et l'autre locale.

7) Donner la valeur du potentiel électrostatique créé au point M par une charge ponctuelle.

8) Enoncer le théorème de Gauss. Donner son analogie pour la gravitation.

9) Etablir l'expression du champ électrostatique créé par une sphère de centre O et de rayon R contenant une densité volumique de charge uniforme ρ_0

10) Redémontrer l'expression du champ électrostatique créé par un cylindre infini d'axe Oz et de rayon R contenant une densité volumique de charge uniforme ρ_0

11) Redémontrer l'expression du champ électrostatique créé par un plan infini assimilé à xOy contenant une densité surfacique de charge uniforme σ_0.

12) Établir l'expression de la capacité d'un condensateur plan dans le vide, le condensateur étant composé de deux plan infini chargés surfaciquement, de charges opposées.

13) Définir les notions suivantes : lignes de champ, tubes de champ et surfaces équipotentielles. Donnez-en quelques propriétés.

14) Donner l'expression de l'énergie potentielle électrostatique d'une charge.

9 Questions à choix multiples

En ligne sur la plateforme Moodle accessible via Atrium : section « EM / Electrostatique / Test ».

10 Exercices d'application directe du cours

10.1 Distributions continues de charges

1) Soit un cylindre de rayon r et de hauteur h chargé uniformément en volume de densité volumique de charge ρ. Donner la charge totale contenue dans ce cylindre.

2) Soit une sphère de rayon r chargée uniformément en volume de densité volumique de charge ρ. Donner la charge totale contenue dans cette sphère.

3) Soit une sphère de rayon r chargée uniformément en surface de densité surfacique de charge σ. Donner la charge totale contenue dans cette sphère.

4) Soit deux plans parallèles infini d'équations respectives $z = a/2$ et $z = -a/2$, entre lesquels se trouve une distribution volumique de charge uniforme de valeur ρ. On suppose que la distance entre les deux plans est très faible devant leur dimension latérale. Exprimer la densité surfacique de charge σ en fonction de ρ.

5) Soit un cylindre de rayon r et de hauteur h chargé uniformément en volume de densité volumique de charge ρ. On suppose que le rayon r est très faible devant sa hauteur. Le cylindre peut donc être confondu avec un fil de longueur h et de densité linéique de charge λ. Exprimer la densité linéique de charge λ en fonction de ρ.

10.2 Symétries de la distribution de charges

1) Soit un cylindre de rayon a et de hauteur infinie chargé uniformément en volume de densité volumique de charge ρ. Déterminer les plans de symétrie de la distribution de charges. Que peut-on en déduire sur la direction du champ électrostatique en un point M situé à une distance r de l'axe du cylindre ?

2) Soit une sphère de rayon a chargée uniformément en volume de densité volumique de charge ρ. Déterminer les plans de symétrie de la distribution de charges. Que peut-on en déduire sur la direction du champ électrostatique en un point M situé à une distance r du centre de la sphère ?

3) Soit un plan infini chargé uniformément en surface de densité surfacique de charge σ. Déterminer les plans de symétrie de la distribution de charges. Que peut-on en déduire sur la direction du champ électrostatique en un point M situé à une distance z du plan ?

10.3 Invariance de la distribution de charges

1) Soit un cylindre de rayon a et de hauteur infinie chargé uniformément en volume de densité volumique de charge ρ. De quelles coordonnées dépend le champ électrostatique ?

2) Soit une sphère de rayon a chargée uniformément en volume de densité volumique de charge ρ. De quelles coordonnées dépend le champ électrostatique ?

3) Soit un plan infini chargé uniformément en surface de densité surfacique de charge σ. De quelles coordonnées dépend le champ électrostatique ?

10.4 Géométrie des lignes de champ et surfaces équipotentielles

Sans effectuer de calculs, préciser la nature géométrique des lignes de champ et des surfaces équipotentielles dans les cas étudiés suivants :

1) sphère chargée en volume

2) cylindre infini chargé en volume

3) plan infini chargé en surface

10.5 Relation potentiel-champ

Dans l'espace muni d'un repère cartésien (O, x, y, z) un champ électrique est défini par son potentiel :

$$\begin{cases} V(x,y,z) = -E_0 \frac{x^2}{2a} \ pour \ -a \leq x \leq a \\ V(x,y,z) = -E_0 x + E_0 \frac{a}{2} \ pour \ x > a \\ V(x,y,z) = E_0 x + E_0 \frac{a}{2} \ pour \ x < -a \end{cases}$$ où E_0 est une constante

1) Exprimer le champ dans les différents domaines.

2) Peut-on parler de champ uniforme ?

10.6 Cas d'une masse ponctuelle

Une masse ponctuelle M est placée à l'origine du repère, on s'intéresse au flux du champ de gravitation qu'elle crée à travers une sphère de centre O et de rayon R .

1) Prévoir le signe du flux sortant.

2) Effectuer le calcul du flux et retrouver le résultat prévu par le théorème de Gauss.

3) Par analogie avec le potentiel électrostatique, retrouver l'expression de l'énergie potentielle de la force gravitationnelle entre une masse M et une masse m. On supposera l'énergie potentielle nulle à l'infini.

11 Exercices type oral

11.1 Vitesse d'un électron en orbite circulaire

En 1913, le physicien danois Niels Bohr imagine un modèle « planétaire » de l'atome afin d'expliquer les raies émises par des atomes d'hydrogène excités. Ce modèle, aujourd'hui obsolète, ne permit pas d'expliquer les spectres des autres atomes.

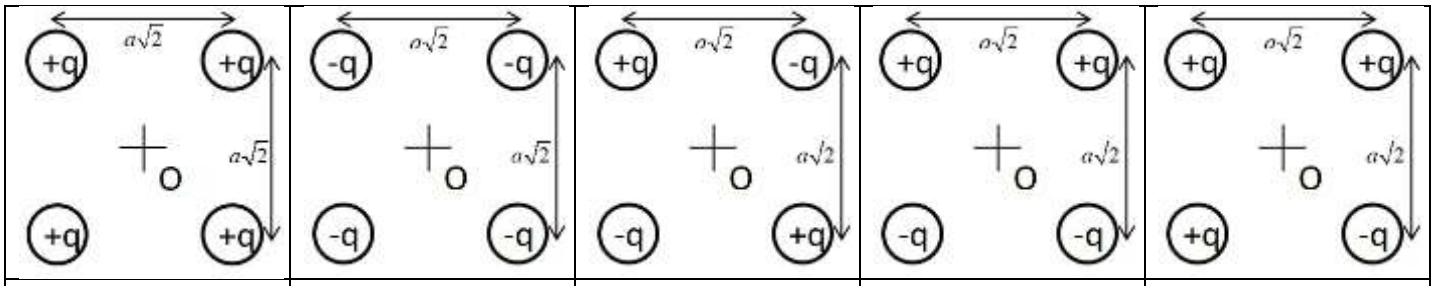
Dans le modèle de Bohr, l'atome d'hydrogène est un système à deux corps ponctuels constitué d'un noyau, le proton de masse m_p et charge électrique $+e$, et d'un électron M, de masse m_e et de charge $-e$. Le proton est considéré comme fixe dans le référentiel d'étude supposé galiléen $\left(O, \overrightarrow{u_x}, \overrightarrow{u_y}, \overrightarrow{u_z}\right)$ où l'origine O correspond au noyau de l'atome.

1) Montrer que le mouvement circulaire de l'électron autour du noyau est uniforme et exprimer sa vitesse v en fonction de r, e, m_e et ε_0.

2) Pourquoi ce modèle est-il qualifié de « planétaire » ? Retrouver alors la vitesse d'un satellite de masse m_s en mouvement circulaire de rayon r autour de la Terre de masse M_T. On introduira G, la constante gravitationnelle.

11.2 Carré de 4 charges

Soit 4 charges disposées à chaque somment d'un carré de côté $a\sqrt{2}$. On étudiera les cas suivants :



a	b	c	d	e

1) Donner la direction du champ créé en O centre du carré, puis calculer le champ électrostatique en O.

2) Vérifier la direction du champ électrique donné à la question 1 par l'examen des symétries.

3) Calculer le potentiel créé en O.

4) Calculer le potentiel sur l'axe dans le cas (a), puis le champ sur l'axe.

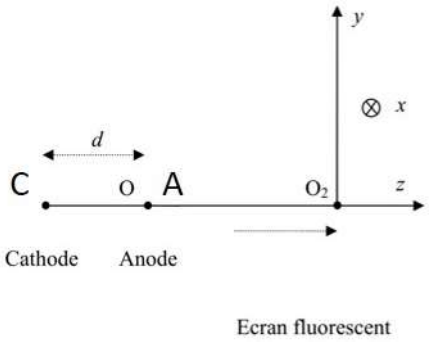
11.3 Champ créé par un segment et un disque uniformément chargés

1) Calculer le champ créé par un segment de charge linéique λ en tout point de son plan médiateur.

2) Calculer le champ créé par un disque de charge surfacique σ en tout point de son axe.

11.4 Etude d'un canon à électrons d'un oscilloscope cathodique (CCP TSI 2014)

Une cathode, notée C, émet des électrons de vitesse initiale négligeable. On établit entre la cathode C et une anode, notée A, une différence de potentiel notée $U_{AC} = V_A - V_C > 0$. Les électrons sont ainsi accélérés lors de leur parcours entre C et A. La distance entre C et A est notée d.



1) Déterminer, en un point de l'axe z situé entre la cathode et l'anode, la direction et le sens du champ électrique $\vec{E}$ crée par la tension U_{AC}. Exprimer $\|\vec{E}\|$ en fonction de U_{AC} et d.

2) Déterminer l'expression de la force électrostatique $\vec{f}$ subie par un électron entre C et A en fonction de U_{AC}, d, e (charge élémentaire) et d'un vecteur unitaire que l'on précisera.

3) La tension U_{AC} appliquée est de l'ordre de 1kV. La distance d est de l'ordre de 0,1m. Le poids des électrons peut-il être négligé devant la force électrostatique précédente ? Justifier quantitativement la réponse apportée.

5) En appliquant le théorème de l'énergie cinétique, déterminer l'expression de la vitesse v_0 avec laquelle les électrons atteignent l'anode. Exprimer v_0 en fonction de U_{AC}, m_e et e. Déterminer l'ordre de grandeur de la valeur numérique de la vitesse v_0.

Données : - Charge élémentaire : $e = 1{,}6.10^{-19}C$

- Masse de l'électron : $m_e = 9{,}1.10^{-31}kg$

11.5 Différents types de condensateurs

Pour les deux types de condensateur suivants, on suppose que la charge est répartie en surface des armatures.

1) Calculer la capacité d'un condensateur sphérique d'armatures concentriques de rayons respectifs R_1 et R_2 avec $R_1 < R_2$. On supposera que la charge Q est portée par l'armature intérieure. Comparer à l'expression de la capacité d'un condensateur plan quand la distance d entre les deux armatures devient très faible devant leur rayon.

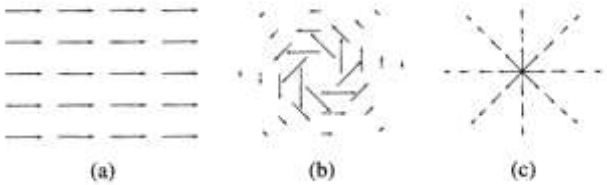
2) Déterminer l'énergie stockée entre les armatures du condensateur sphérique en fonction de la Q.

3) Retrouver l'expression de la capacité à l'aide de la relation $U_E = \frac{Q^2}{2C}$.

4) Calculer la capacité d'un condensateur cylindrique d'armatures coaxiales de rayons respectifs R_1 et R_2 avec $R_1 < R_2$. On supposera que la charge Q est portée par l'armature intérieure. Comparer à l'expression de la capacité d'un condensateur plan quand la distance d entre les deux armatures devient très faible devant leur rayon.

11.6 Lignes de champ

On donne les lignes de champ suivantes :
Préciser celles qui peuvent correspondre aux lignes de champ d'un champ électrostatique.



12 Exercices type écrit (A rendre en DM pour le 17/01/2022)

12.1 Champ de pesanteur Martien (Centrale TSI 2019)

12.1.1 Théorème de Gauss de la gravitation

1) Rappeler l'expression de la force électrostatique $\overrightarrow{F_e}$ exercée par une charge ponctuelle q sur une autre charge ponctuelle q' située en un point M à une distance r. Faire un schéma précisant les notations utilisées. En déduire l'expression du champ électrostatique $\vec{E}(M)$ créé par la charge q en M.

2) Rappeler l'expression de la force gravitationnelle $\overrightarrow{F_g}$ exercée par un point matériel de masse m sur un autre point matériel, de masse m', situé en un point M à une distance r. Faire un schéma précisant les notations utilisées. En déduire l'expression du champ gravitationnel $\vec{G}(M)$ créé par le point matériel de masse m en M.

3) Dans un tableau, lister les analogies entre les grandeurs électrostatiques (charge électrique, champ électrostatique, permittivité du vide ε_0) et gravitationnelles.

4) Rappeler le théorème de Gauss de l'électrostatique. En déduire l'énoncé du théorème de Gauss de la gravitation universelle.

12.1.2 Champ de pesanteur martien

On modélise la planète Mars par une boule immobile de centre O, de rayon R_M, de masse M_M uniformément répartie en volume. Tout point M de l'espace est repéré grâce à ses coordonnées sphériques (r, θ, φ) dans la base $\left(O, \overrightarrow{u_r}, \overrightarrow{u_\theta}, \overrightarrow{u_\varphi}\right)$ (Figure 10).

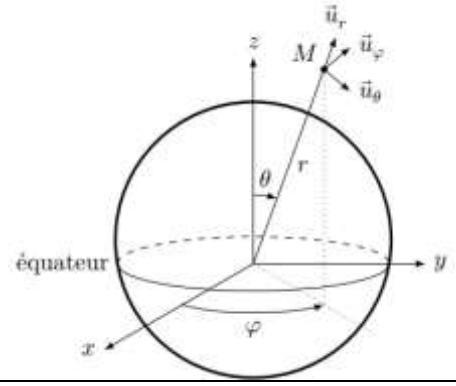


Figure 1. Paramétrage d'un point M de l'espace dans la base sphérique au voisinage de Mars

5) Exprimer la masse volumique ρ_M de la planète Mars en fonction de M_M et de R_M. Faire l'application numérique.

6) Examiner minutieusement les propriétés de symétries et d'invariance de la distribution de masse. Montrer que le champ de gravitation dans la base de coordonnées sphériques est de la forme $\vec{G}(M) = G(r)\overrightarrow{u_r}$.

7) A l'aide du théorème de Gauss de la gravitation, établir l'expression de $\vec{G}(M)$ en tout point intérieur ou extérieur de Mars. Commentez le résultat obtenu.

On désigne par $\vec{g}(M)$ le champ de pesanteur créé par Mars au point M. On note encore $\|\vec{g}(M)\|$ sa norme (intensité du champ de pesanteur en M). On confond les champs de pesanteur $\vec{g}(M)$ et de gravitation $\vec{G}(M)$.

8) En déduire une valeur numérique de l'intensité du champ de pesanteur g_0 à la surface de Mars. Comparer cette valeur à la valeur tabulée et à celle de l'intensité du champ de pesanteur sur Terre.

Données utiles à la partie

Constantes universelles	
Constante de gravitation universelle	$\mathcal{G} = 6{,}673 \times 10^{-11}\ \mathrm{m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}}$
Données sur la planète Mars	
Rayon moyen	$R_M = 3389\ \mathrm{km}$
Masse	$M_M = 6{,}39 \times 10^{23}\ \mathrm{kg}$
Intensité du champ de pesanteur au sol	$g_0 = 3{,}71\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$

12.2 Microphone électrostatique (Centrale TSI 2018)

Le microphone électrostatique est quant à lui constitué d'une membrane P_1 de surface S, extrêmement légère de masse m_e. Celle-ci, réalisée en métal (ou en polyester rendu conducteur par un saupoudrage de métal), est mobile et constitue l'une des armatures d'un condensateur plan. L'espace entre la membrane P_1 et l'armature fixe P_2 est entièrement rempli d'air de permittivité électrique ε_0. Au repos, la distance entre les deux armatures parallèles est notée e. En mouvement, la liaison entre l'isolant et la membrane peut être modélisée par une force de rappel élastique de constante de raideur k_e.

Les variations de pression provoquées par l'onde sonore font varier la distance entre les deux armatures par un déplacement de la membrane parallèlement à l'axe (Ox). Ce déplacement induit une variation de la capacité et cet effet est exploité dans le circuit électrique de la Figure 9 de manière à récupérer le signal $u(t)$ aux bornes de la résistance $R = 10k\Omega$. Les variations de $u(t)$ sont à l'image de celles de la pression acoustique.

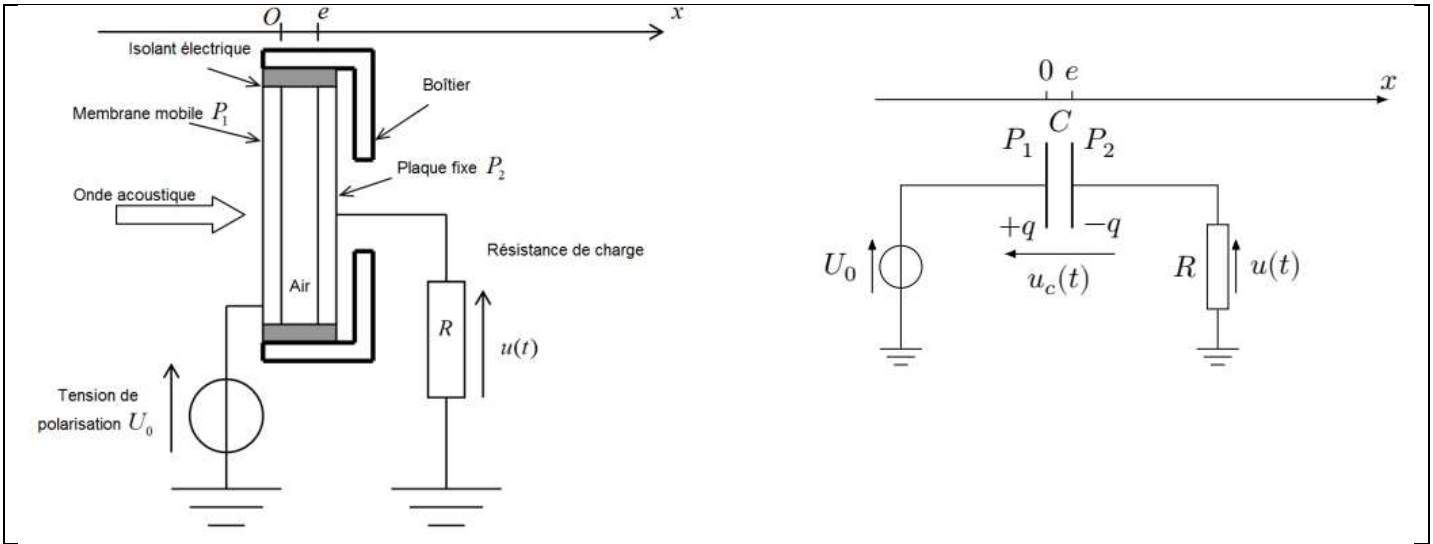


Figure 1. Microphone électrostatique

La membrane P_1 et l'armature fixe P_2 sont chargées uniformément par les charges $+q$ et $-q$. On associe à P_1 et P_2 les densités surfaciques uniformes de charges $+\sigma = {}^{+q}/_{S}$ pour P_1 et $-\sigma = {}^{-q}/_{S}$ pour P_2. De plus, on assimile les deux plaques à des plans infinis afin de négliger par la suite les effets de bord.

1) Donner l'équation locale de Maxwell-Gauss en présence de charges et de courants. En déduire le théorème de Gauss. Ce théorème est-il toujours valable quelque soit le régime considéré ?

2) Montrer, par des considérations de symétrie et d'invariance, que le champ électrique $\overrightarrow{E_1}(M)$ créé par la plaque P_1 en tout point de l'espace est perpendiculaire à ce plan et ne dépend que d'une variable d'espace.

3) Justifier que $\overrightarrow{E_1}(M) = -\overrightarrow{E_1}(M')$ où M et M' sont deux points placés symétriquement par rapport au plan P_1.

4) En appliquant le théorème de Gauss sur une surface clairement indiquée, exprimer le champ électrique $\overrightarrow{E_1}(M)$.

5) Déduire du résultat précédent l'expression du champ électrique total $\vec{E}(M) = \overrightarrow{E_1}(M) + \overrightarrow{E_2}(M)$ créé par les deux plaques P_1 et P_2 en tout point de l'espace.

6) Rappeler l'équation locale liant le champ et le potentiel électrostatique. A partir de l'équation de Poisson, que l'on démontrera, montrer que le potentiel $V(x)$ varie de manière linéaire entre les armatures du condensateur.

7) Montrer que la différence de potentiel entre les deux plaques s'exprime par $u_C = V_{P_1} - V_{P_2} = \frac{q}{C_0}$ avec $C_0 = \frac{\varepsilon_0 S}{e}$, la capacité du condensateur au repos.

8) Expliquer alors comment fonctionne un microphone électrostatique. Cette question doit être détaillée en s'appuyant sur les explications et documents fournis.