République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ibn Khaldoun - Tiaret

Faculté des mathématiques et de l'informatique

Électricité générale

Cours
&
Exercices corrigés

Réalisé par

Dr. Bendaoud MEBAREK

Destiné aux étudiants de première année LMD-MI

Année Universitaire : 2020/2021

Chapitre II

Conducteurs électriques

1. Introduction

Les conducteurs sont des milieux dans lesquels existent des charges libres (positives ou négatives) pouvant être mises en mouvement sous l'action d'un champ électrique. Parmi les conducteurs, on peut citer les métaux, les semiconducteurs, les électrolytes ou encore les gaz ionisés.

À l'intérieur d'un système isolé constitué par plusieurs conducteurs, des déplacements de charges peuvent s'opérer :

– par frottement de corps non chargés préalablement,

– par contact de deux corps, si l'un des deux corps ou les deux sont chargés initialement,

– par l'influence de corps chargés sur un corps isolé placé en leur voisinage.

1. Conducteurs en équilibre électrostatique

1.1 Définition

L'équilibre électrostatique est atteint lorsqu'aucune charge électrique ne se déplace à l'intérieur du conducteur, c'est-a dire que les charges intérieurs ne sont soumises a aucune force.

1.2 Propriétés des conducteurs en équilibre électrostatique

a-Le champ électrostatique

Le champ électrostatique est nul en tout point à l'intérieur d'un conducteur en équilibre électrostatique.

$$\vec{E}_{int} = \vec{0}$$

En effet, la présence d'un champ entraînerait l'existence d'une force $\vec{F} = q.\vec{E}$, qui mettrait les charges en mouvement et le conducteur ne serait plus en équilibre.

On à l'équation de Poisson $div\,\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$ donne la densité volumique de charges :

$$\rho_{int} = 0$$

Il y a, à l'intérieur d'un conducteur, une compensation exacte entre les charges positives (noyaux) et négatives (électron). Les charges excédentaires ne peuvent être qu'a la surface du conducteur avec une densité surfaciqueσ. En réalité, ces charges excédentaires sont distribuées en moyenne dans une couche de très faible épaisseur (quelques Angstrom) près de la surface.

Le champ électrique sur la surface du conducteur est perpendiculaire à la surface. En effet, pour les mêmes raisons que précédemment, une composante du champ parallèle à la surface agirait sur les charges libres et entraînerait leur déplacement. Or, de tels déplacements n'existent pas dans les conditions d'équilibre électrostatique, le champ est normal à la surface d'un conducteur en équilibre.

b-Le conducteur en équilibre constitue un volume équipotentiel

En effet, la différence de potentiel (d-d-p) entre deux points quelconques M et M'est définie par $dV = -\vec{E}.\overrightarrow{MM'}$, or pour le champ électrique $\vec{E}=\vec{0}$ pour un conducteur en équilibre => V = cte.

Comme le potentiel est le même en tous les points du conducteur, la surface externe est une surface équipotentielle. On retrouve bien que le champ est normal à cette surface.

$$V_{int} = V_s = C^{te}$$

c-La charge est nulle en toute région interne au conducteur. la charge est localisée en surface

Le champ $\vec{E}$ est nul en tout point M intérieur au conducteur, le flux $\Phi = \int\int \vec{E}.\overrightarrow{dS}$ est donc nul a travers toute surface fermée intérieure au conducteur et entourant M.

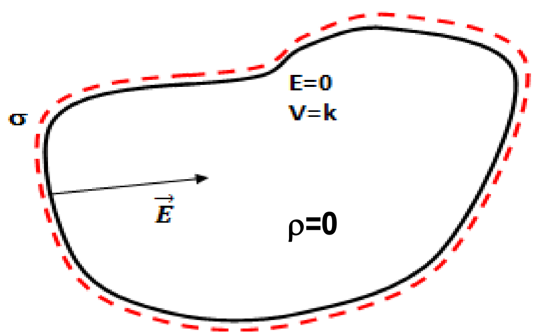
D'après le théorème de Gauss, la charge intérieure à cette surface est nulle.

Les charges se répartissent donc uniquement sur la surface du conducteur (En réalité une surface occupant une épaisseur de quelques couches d'atomes).

Remarque

Les mêmes résultats sont encore valables pour un conducteur creux. le champ est nul dans le conducteur et la cavité qui constitue un même volume équipotentiel.

Les charges sont localisées à la surface externe du conducteur

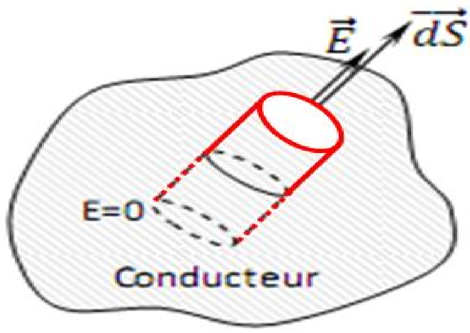


d-Relation entre le champ au voisinage immédiat d'un conducteur et la charge électrique superficielle

Considérons un conducteur de forme quelconque. On se propose de calculer le champ électrique en un point au voisinage immédiat de la surface externe du conducteur. Construisons, pour cela, une surface de Gauss cylindrique aplatie, dont une base se trouve à l'extérieur de la surface et l'autre base à une profondeur telle que la charge superficielle soit totalement à l'intérieur du cylindre (figure), en appliquant le théorème de Gauss sur cette surface fermée, le flux électrique se compose de trois termes :

- Flux à travers la surface latérale (nul) ($\vec{E}\perp\overrightarrow{dS}$)
- Flux à travers la base intérieure (nul) ($\vec{E}=\vec{0}$)
- Seule subsiste le flux à travers la base extérieure :

$$d\Phi = E.dS$$



Par ailleurs, si σ est la densité superficielle de charge, la charge contenue dans le cylindre est :

$$dq = \sigma dS$$

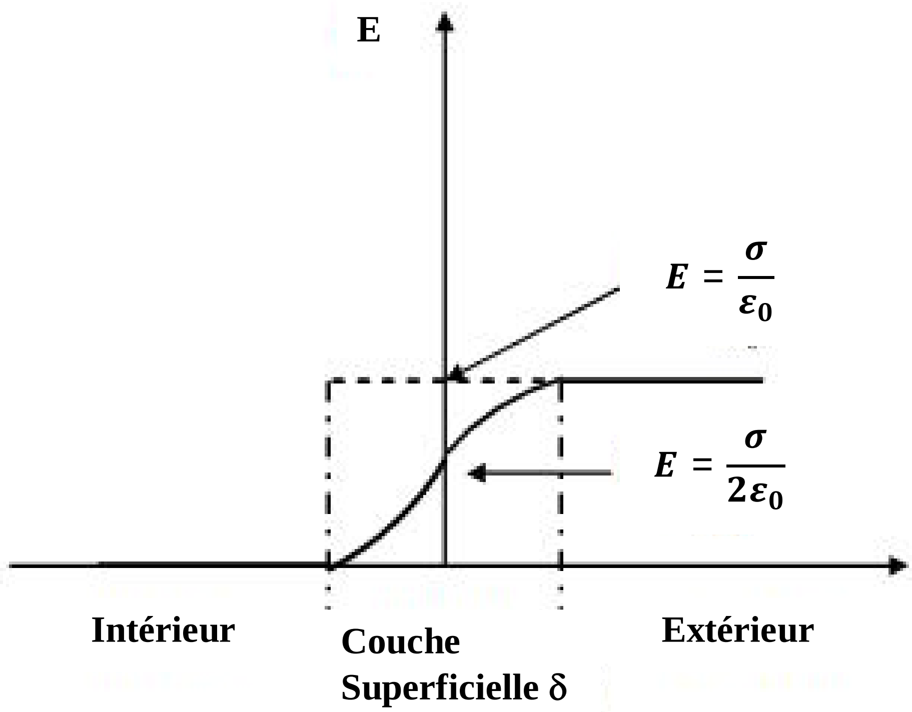
En appliquant le théorème de gauss :

$$\vec{E}\overrightarrow{dS} = \frac{\sigma dS}{\varepsilon_0}$$

On obtient alors :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

C'est l'expression du champ électrostatique, au voisinage immédiat d'une surface conductrice chargée.



e-Pression électrostatique

Les charges à la surface d'un conducteur sont soumises à des forces répulsives de la part des autres charges. La force exercée par unité de surface, ou pression électrostatique, peut se calculer en multipliant le champ électrique moyen sur la surface du conducteur par la charge par unité de surface.

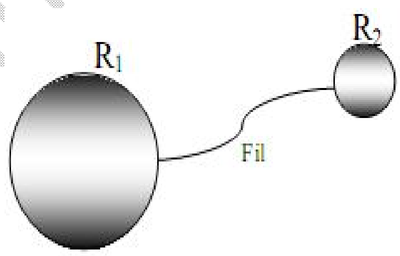
Le champ électrique moyen est d'après ce qui précède :

$$E_m = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

La pression électrostatique vaut :

$$p = \sigma E_m = \frac{\sigma^2}{2\varepsilon_0}$$

f- Pouvoir des pointes



A proximité d'une pointe, le champ électrostatique est très intense. Cela résulte du fait que la densité surfacique de charges est très élevée au voisinage d'une pointe.

Ce phénomène peut être expliqué en considérant deux sphères conductrices de rayons R_1 et R_2 ($R_2<R_1$), reliées par un long fil conducteur mince (Figure). De ce fait, les deux sphères sont portées au même potentiel; et comme elles sont très éloignées l'une de l'autre, on peut écrire :

$$V_1 = V_2 \;\; \Rightarrow \;\; \frac{K}{R_1}\iint \sigma_1 ds \frac{K}{R_2}\iint \sigma_2 ds$$

Pour des raisons de symétrie, les charges sont réparties uniformément à la surface de chaque sphère (σ_1 et σ_2 sont constantes). Il s'en suit que :

$$\frac{\sigma_1}{R_1} = \frac{\sigma_2}{R_2}$$

Cette dernière équation montre que la sphère ayant le plus petit rayon porte la plus grande densité de charges. Ce résultat se généralise à un conducteur de forme quelconque et explique le pouvoir ionisant d'une pointe.

2.3. Capacité d'un conducteur

Considérons un conducteur isolé en équilibre électrostatique, placé en un point O de l'espace et portant une charge Q, répartie sur sa surface externe avec une densité surfacique σ telle que :

$$Q = \iint \sigma dS$$

Si la charge Q augmente, la densité surfacique σ augmente proportionnellement :

$$\sigma = a\,Q$$

Cela, en raison de la linéarité des équations qui régissent le problème de l'équilibre des conducteurs.

Le potentiel créé par Q, en un point M de l'espace tel que OM = r, s'écrit

$$V = K \iint \frac{\sigma\, dS}{r} \quad \text{soit} \quad V = KQ \iint \frac{a\, dS}{r}$$

Ce résultat reste valable pour tout point de la surface du conducteur. L'intégrale dépend uniquement de la géométrie et des dimensions du conducteur On en déduit que le rapport, entre la charge et le potentiel auquel est porté le conducteur.

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q'}{V'}$$

La constante de proportionnalité C est appelée propre du conducteur isolé, ne dépend que de la géométrie du conducteur, on l'appelle capacité propre du conducteur. Celle-ci est donnée par l'expression :

$$Q = C.V$$

C'est une grandeur positive, dont l'unité est appelée le farad (F) en hommage à Michael Faraday (1791-1867), le farad est une unité très grande, on utilise des sous multiples :

- le microfarad : 10^{-6} F (µF)
- le nanofarad : 10^{-9} F (nF)
- le picofarad : 10^{-12} F (pF)

Exemple

Calcul de la capacité propre d'un conducteur sphérique.

Soit une sphère de rayon R. En un point quelconque situé à une distance r du centre, le potentiel est donnée par : $V = K\frac{Q}{r}$

Sur la surface de la sphère (r=R), $V = K\frac{Q}{R} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{R}$ d'où $C = \frac{Q}{V} = 4\pi\varepsilon_0 R$

Ordre de grandeur

- La capacité de la terre (R=6400Km) est c=710 µF
- Une sphère de 10 cm de rayon, portée à un potentiel de 1000 V par rapport au sol, emmagasine une charge de 10 nC (sa capacité étant de 10 pF)

2.4. Energie interne d'un conducteur chargé seul dans l'espace

Soit C la capacité propre du conducteur, Q sa charge et V son potentiel dans un état d'équilibre donné.

- L'énergie interne est mesurée par le travail qu'il faut fournir pour charger le conducteur
- Ou bien par le travail des forces électrostatiques mis en jeu au cours de la décharge du conducteur
- Ou encore, elle représente la somme des variations d'énergie potentielle subies par tou tes les charges au cours de la charge du conducteur.

Portant de l'énergie potentielle élémentaire donnée :

$dE_p = vdq$ Or $q = Cv$ ➔ $\begin{cases} E_p = \int_0^Q vdq \\ v = \frac{q}{C} \end{cases}$ ➔ $E_p = \int_0^Q \frac{q}{C} dq = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}$

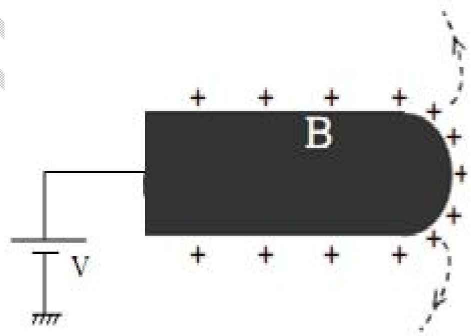
Il s'ensuit donc que :

$$E_p = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2}Cv^2 = \frac{1}{2}Qv$$ (Cette énergie est positive >0)

3. Condensateurs

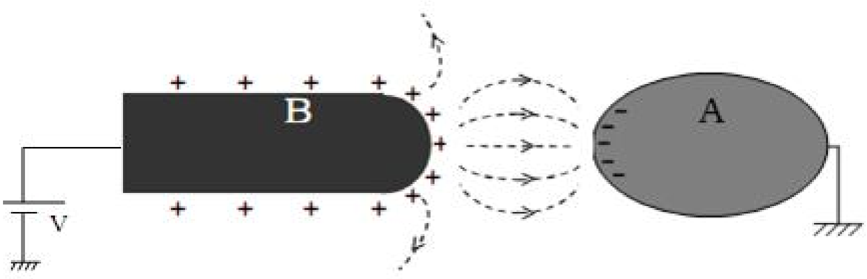
Un conducteur B de capacité C est maintenu à un potentiel constant V (V>0 par exemple).

Il porte, donc, une charge Q, telle que Q=C v

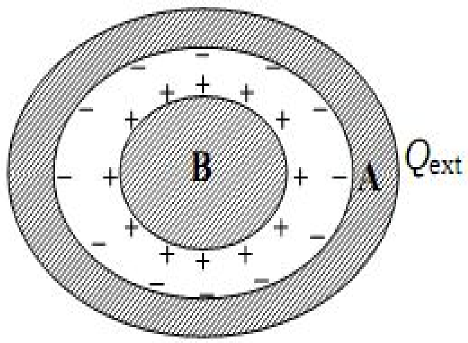


Approchons de B un conducteur A maintenu à un potentiel constant (0 par exemple).

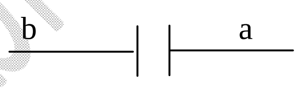
B influence A sur le quel apparaissent des charges négatives. Ces charges <0 influencent à leurs tour le conducteur B sur lequel de nouvelles charges >0 apparaissent.



Dans ces exemples, l'influence est dite partielle, car toutes les lignes de champ issues du conducteur B n'aboutissent pas sur A. Nous pouvons créer des conditions d'influence totale en plaçant tout simplement le conducteur B à l'intérieur d'un conducteur creux A .



Il y a eu condensation de l'électricité sur B et sa capacité a augmenté. On obtient donc un condensateur (formé des conducteurs A et B), représenté schématiquement par :



Un condensateur est un système constitué de deux conducteurs électriques en influence totale. On réalise un tel système en utilisant deux conducteurs dont l'un est creux et entoure complètement l'autre (Figure). L'espace compris entre les deux conducteurs, appelées 'armatures',est vide ou rempli d'un milieu isolant (diélectrique). Q_A et Q_B sont égales et de signe contraire, $|Q_a|=|Q_b|=Q$, charge du condensateur

Si V est la différence de potentiel entre A et B, on peut montrer que $Q = C.V$

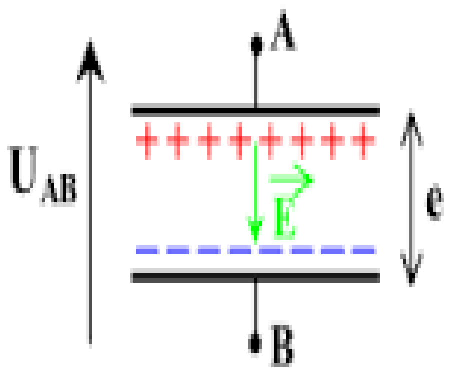
$$\frac{Q}{V} = Constante = C$$ (Capacité du condensateur)

3. 1. Méthode de calcul de la capacité d'un condensateur

- Calculer le champ en tout point intérieur au condensateur
- Déduire, par circulation du champ, la différence de potentiel entre les condensateurs
- Effectuer le rapport $\frac{Q}{V} = C$.

a. Condensateur plan

Un condensateur plan est formé de deux conducteurs plans, parallèles, distants de e. L'espace e est très petit par rapport aux dimensions des armatures afin que celles-ci soient en influence totale.

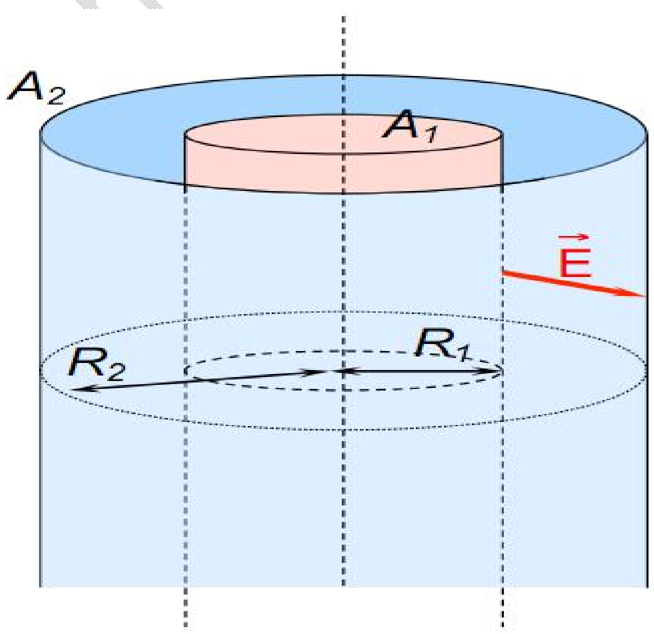


- $E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = cste$ (théorème de Gauss, surface $\sum$)
- $dv = -\vec{E}\,\overrightarrow{dl} = -E\,dx \Rightarrow v = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}e \;\; (\sigma = \frac{Q}{S})$
- $C = \frac{Q}{V} = \frac{\varepsilon_0 S}{e}$

b. Condensateur cylindrique

Il est composé de deux cylindres coaxiaux, de rayons R_1 et R_2 avec $R_2>R_1$.

$\sum$ est la surface de gauss, $\sum$ est un cylindre de rayon r avec $R_1<r<R_2$.



Théorème de gauss :

$$\Phi = \iint \vec{E}.\overrightarrow{dS} = \frac{Q}{\varepsilon_0}$$

$\Phi = \Phi_{SB} + \Phi_{SL'}$, Φ_{SB} : flux dans la surface de base .

Φ_{SL} : flux dans la surface latérale .

$$\Phi = \Phi_{SL} = \iint_S \vec{E}\,\overrightarrow{dS_L} = ES_L = 2\pi r\,L = \frac{Q}{\varepsilon_0}$$

$$\Rightarrow \quad E = \frac{Q}{2\pi r L\varepsilon_0} \quad ,$$

$$\Rightarrow \quad \vec{E} = \overrightarrow{grad}\,V \Rightarrow \vec{E} = \frac{-dv}{dr} \Rightarrow 0 - \vec{E}\,\overrightarrow{dr} = -Edr$$

$$\int_1^2 -dV = \int_{R_1}^{R_2} Edr \Rightarrow V_1 - V_2 = \int_{R_1}^{R_2} \frac{Q}{2\pi L\varepsilon_0}$$

$$\Rightarrow \quad V_1 - V_2 = \frac{Q}{2\pi L\varepsilon_0}\,log\frac{R_2}{R_1}$$

la capacité est donnée par C = Q/V

$$\Rightarrow \quad V = V_1 - V_2 \Rightarrow C = \frac{Q}{V_1 - V_2} = \frac{2\pi L\varepsilon_0}{log\frac{R_2}{R_1}}$$

D’autre part, on sait que R_2-R_1= e, puisque e est très faible, on peut admettre que $R_2 \approx R_1 = R$.

Il vient :

$$\log\frac{R_2}{R_1} = \log\frac{R + e}{R} = \log\left(1 + \frac{e}{R}\right)$$

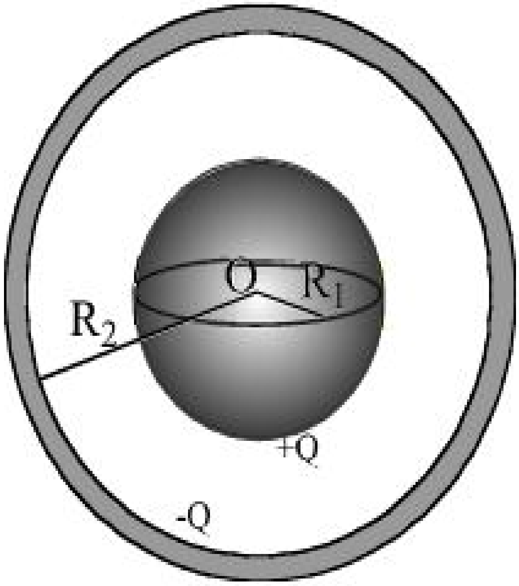
$$etant\ donnée\ que\ \log(1+\epsilon) \quad et\ \epsilon \cong \frac{e}{R} \quad alors$$

$$\log\left(1 + \frac{e}{R}\right) \cong \frac{e}{R} \quad \Rightarrow C = \frac{2\pi LR\varepsilon_0}{e}$$

$S = 2\pi LR$: La surface de l’armature, il vient $C = \frac{S\varepsilon_0}{e}$

c. Condensateur sphérique

Soit un condensateur constitué de deux armatures sphériques de même centre O, de rayons respectifs R_1 et R_2, séparées par un vide ($R_2 > R_1$). D’après le théorème de Gauss, le champ électrostatique en un point M situé à un rayon r entre les deux armatures vaut



$$\vec{E}(r) = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\overrightarrow{u_r}$$

En coordonnées sphériques, ce qui donne une tension

$$U = V_1 - V_2 = \iint_{R_1}^{R_2} \vec{E}\overrightarrow{dr} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$$

Et fournit donc une capacité totale

$$C = \frac{Q}{U} = 4\pi\varepsilon_0 \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1}$$

3.3. Energie électrique d'un condensateur

Elle se calcule de la même manière que dans le cas des conducteurs

$$w = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}QV = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}$$

3.4. Associations de condensateurs

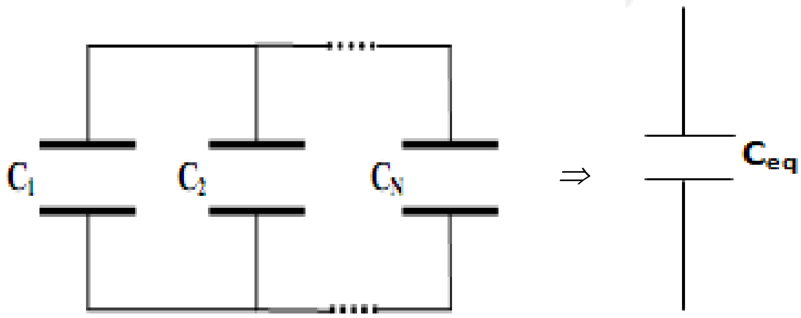
Pour des raisons pratiques, on utilise des associations de plusieurs condensateurs afin d'emmagasiner le plus d'énergie possible. On distingue deux types de groupements de condensateurs : le groupement en série et le groupement en parallèle. La capacité équivalente des systèmes qui en résultent dépend du groupement choisi.

3.4.1. Association en parallèle

Tous les condensateurs sont soumis à la même d.d.p : V, ils portent alors les charges :

$$Q_1 = C_1 V, \dots\dots\dots.., Q_n = C_n V$$

$\sum Q_i = \sum C_i V$ tout se passe comme si on avait un seul condensateur de capacité $C_{éq} = \sum C_i$ et qui emmagasinerait une charge $Q = \sum Q_i$

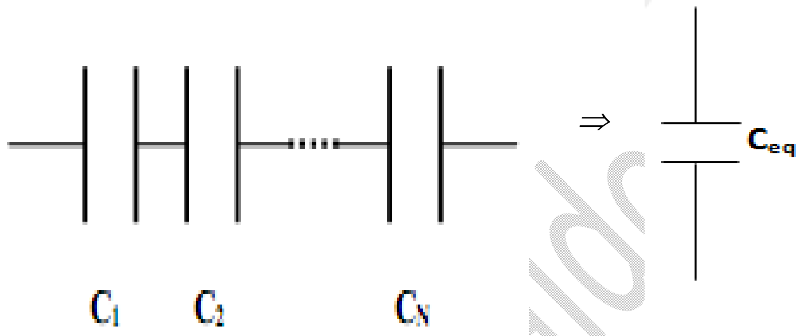


$C_{éq} = \sum C_i$

$$\boxed{C_{éq} = \sum C_i}$$

3.4.2. Association en série

Il apparait sur chaque condensateur une charge Q et par suite, on peut écrire



$1/C_{éq} = \sum 1/C_i$

$$Q = C_1V_1 \Rightarrow V_1 = \frac{Q}{C_1}$$

$$Q = C_2V_2 \Rightarrow V_2 = \frac{Q}{C_2}$$

.

.

$$Q = C_nV_n \Rightarrow V_n = Q/C_n$$

$V=V_1+V_2+ \ldots\ldots\ldots\ldots V_n = (1/C_1+1/C_2+\ldots\ldots+1/C_n)$

$= Q/C_{eq}$

Et par suit : $\frac{1}{C_{éq}} = (\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots + \frac{1}{C_n})$

$$\boxed{C_{éq} = \frac{1}{(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots + \frac{1}{C_n})}}$$

Exercices corrigés

Exercice 01

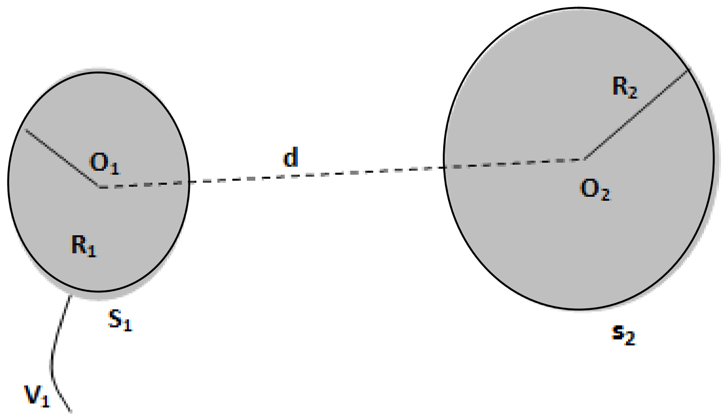
Considérons un conducteur sphérique S_1, de centre O_1 et de rayon R_1 maintenu à un potentiel constant V_1. On approche de ce conducteur un autre conducteur sphérique S_2 de centre O_2 et de rayon $R_2>R_1$, isolée portant une charge Q_2. On désigne par d la distance O_1O_2 telle que $d>R_1+R_2$.

Calculer la charge Q_1 de S_1 et le potentiel V_2 de S_2 en fonction des données du problème.

Pour cela, on supposera que chaque sphère est équivalente à sa charge placée en son centre.

Solution

- A l'équilibre, la sphère S_1 portera la charge Q_1 , les charges Q_1 et Q_2 créent deux champs électrostatiques , qui, par superposition , donnent un champ nul à l'intérieur de chaque conducteur .



- Le potentiel électrostatique étant constant en tout point d'un conducteur en équilibre électrostatique, nous le calculerons au centre de chaque sphère.

  1- Pour S_1, son potentiel, maintenu à la valeur V_1, est égal à celui crée par les charges Q_1 et Q_2. Le potentiel au centre d'un conducteur sphérique de charge Q_1 est :

$$Q_1/4\pi\varepsilon_0 R_1$$

  Le potentiel crée par S_2 à la distance d de O_2 est :

$$Q_2/4\pi\varepsilon_0 d$$

  Le potentiel V_1 s'écrit alors :

$$V_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{Q_2}{d} + \frac{Q_1}{R_1}\right)$$

  2- Pour S_2, son potentiel, que nous calculons en O_2, est :

$$V_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{Q_1}{d} + \frac{Q_2}{R_2}\right)$$

On en déduit :

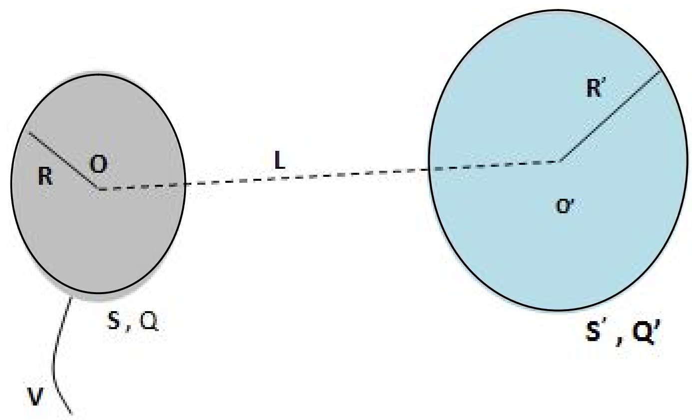
$$Q_1 = R_1(4\pi\varepsilon_0 V_1 - Q_2/d)$$

et

$$V_2 = \frac{Q_2}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{R_2} + \frac{R_1}{d^2}\right) + \frac{R_1 V_1}{d}$$

Exercice 02

Une sphère conductrice S de rayon R et de centre O
est reliée à un générateur qui maintient son potentiel à une valeur V constante. Au voisinage de S, se trouve une autre sphère S' isolée, de rayon R', de centre O' et portant une charge Q'. Les centres des deux sphères sont distants de L (OO'=L).



I. En fonction de V, Q', R, R' et L calculer (on supposera R et R' très petits devant L)

1. La charge Q portée par S ; on établira d'abord à laide du principe de superposition l'expression de V en fonction de Q, Q', R et L.
2. Le potentiel V' de S'.
3. La force $\vec{F}$ exercée par S sur S'.

II. On éloigne S' de sa position initiale L=1m jusqu'à l'infini.

1. Calculer le travail W de la force $\vec{F}$ au cours de ce déplacement.
2. Calculer la variation ΔE_{el} de l'énergie électrique interne du système formé par les deux sphères.
3. Comparer W et ΔE_{el} , interpréter votre résultat.

Solution

I. (Partie I)

1. Soit V_1 le potentiel crée par Q sur S, et V_2 celui crée par Q' sur S. D'après le principe de superposition, nous aurons : $V=V_1+V_2$,

$$V_1 = k.\frac{Q}{R} \quad , V_2 = k.\frac{Q'}{L}$$

$$d'ou$$

$$V = k.\frac{Q}{R} + k.\frac{Q'}{L}$$

D'où l'on tire :

$$Q = R.(\frac{V}{k} - k.\frac{Q'}{L})$$

2. De même, le potentiel V' est la somme des potentiels V'_1 et V'_2 ou : V'_1 est le potentiel crée par Q' sur S', et V'_2 celui crée par Q sur S'.

D'où : $V'=k\frac{Q'}{R'} + k\frac{Q}{L} = k\frac{Q'}{R'} + \frac{K}{L}.R.(\frac{V}{k} - k.\frac{Q'}{L})$

$V'=kQ'\left(\frac{1}{R'} - \frac{R}{L^2}\right) + \frac{R}{L}V$

3. La force $\vec{F}$ exercée par S sur S' est une force attractive, elle a pour module :

$$|F| = k.\frac{|QQ'|}{L^2} = |\frac{k}{L^2}Q'.R.(\frac{V}{k} - k.\frac{Q'}{L})|$$

$$|F| = |\frac{RQ'}{L^2}(V - \frac{kQ'}{L})|$$

II. (Partie II)

1. Le travail de la force $\vec{F}$ au cours du deplacement est :

$$w = \int_L^{\infty} \vec{F}.\vec{dl} = -\int_L^{\infty} |F|.dl = -R|Q'|\int_L^{\infty} |\frac{V}{L^2} - \frac{KQ'}{L^3}|\,dl$$

$$w = -RQ'\left(\frac{V}{L} - \frac{KQ'}{2L^2}\right)|_L^{\infty}$$

$$w = RQ'(V - K\frac{Q'}{2})$$

2. La variation de l'énergie électrique du système formé par s et S' est :

$\Delta E_{el} = E_{elf} - E_{eli}$ Ou E_{elf} et E_{eli} sont les énergies finales et initiales pour l'état initial, nous avons :

$$E_{eli} = \frac{1}{2}(QV + Q'V') = \frac{1}{2}(R.\frac{V^2}{k} + k.\frac{Q'^2}{R'} - kR\frac{Q'^2}{L^2})$$

L'énergie électrique finale se déduit de la précédente en faisant tendre L vers l'infini, d'où :

$$E_{elf} = \frac{1}{2}(R.\frac{V^2}{k} + k.\frac{Q'^2}{R'})$$

D'où :

$$\Delta E_{el} = \frac{1}{2}\frac{KR\,Q'^2}{L^2}$$

3. Le travail de la force électrique est différent de la variation d'énergie électrique du système formé par les deux sphères.
Au cours de cette opération, la charge de la sphère S a diminué, le générateur a donc reçu l'énergie E_g=-V.ΔQ , ou ΔQ=Q_f-Q_i est la variation de la charge de S.
La charge finale est donnée par Q_f =RV/k , et la charge initiale est Q_i =Q , d'où :

$$E_g = -V(\frac{RV}{K} - Q)$$

Nous avons donc :

$$|w| = |\Delta E_{el}| + |\Delta E_g|$$

Le travail de la force électrique est donc égal à la variation d'énergie électrique du système formé par les deux sphères et le générateur.

Exercice 03

Soit le groupement de condensateurs suivant :

Déterminez la capacité équivalente du circuit.

Solution :

$C_1 = 2 + 3 + 4 = 9\mu F$, $\frac{1}{C_2} = \frac{1}{18} + \frac{1}{C_1} = \frac{1}{6}$

$\Rightarrow C_2 = 6\mu F$

$C_3 = 2 + 4 = 6\mu F$,$\frac{1}{C_4} = \frac{1}{6} + \frac{1}{12} = \frac{1}{4}$

$\Rightarrow C_4 = 4\mu F$

D'où $C_{éq} = C_2 + C_4 = 10\mu F$