2. Champ électrostatique

Exercice 5 * — Champ électrique créé par deux charges ponctuelles

On considère deux charges ponctuelles *q*' et –*q*' placées sur l'axe des x, respectivement à l'origine O(0,0) et au point *A* de cordonnées (4,0) m (voir la figure E5).

1. Déterminer le champ électrique au point *M* de coordonnées (0,3) m.

2. Déterminer la force électrostatique exercée sur une charge *q* placée en *M*.

On suppose $q > 0$, $q' > 0$ et $q >> q'$ de façon à négliger l'interaction entre les charges *q*'.

***Applications numériques* : $q' = 10^{-8}$ C; $q = 10^{-6}$ C.**

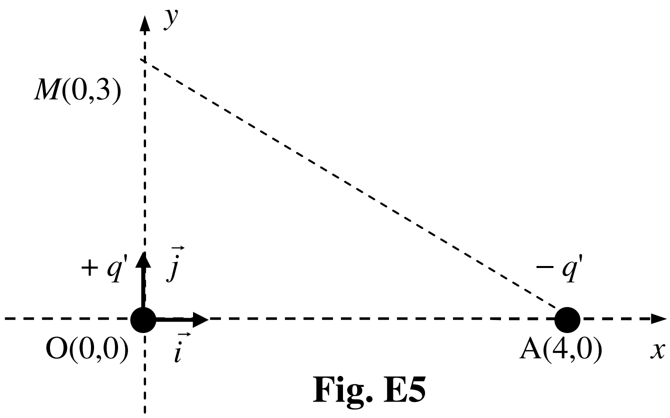

Fig. E5

Réponses :

1. $\vec{E}_M = \left(2,88\,\vec{i} + 7,84\,\vec{j}\right)\ \left[V \cdot m^{-1}\right]$; on en déduit que le champ électrique $\vec{E}_M$ a :

   a. une grandeur $\left\|\vec{E}_M\right\| = \sqrt{(2,88)^2 + (7,84)^2} = 8,35\ \left[V .m^{-1}\right]$

   b. et fait un angle $\phi = arctg\left(\dfrac{7,84}{2,88}\right) = 69,83°$ avec la partie positive de l'axe des *x*.

2. $F_M = q\,\vec{E}_M = \left(2,88\,\vec{i} + 7,84\,\vec{j}\right)\ \left[\mu N\right]$ dans la même direction que $\vec{E}$.

Exercice 6 * — Champ électrique créé par un système de charges quadratiques

On dispose des charges ponctuelles $Q_1 = Q_2 = Q$, et $Q_3 = Q_4 = -2Q$, aux sommets d'un carré de côté a.

Déterminer le champ électrique au centre O du carré.

Application numérique : **$Q = 1{,}6.10^{-9}$ C;** $a = 4\sqrt{2}$ **m.**

Solution :

La figure E6 montre les vecteurs champs électrostatiques créés par chacune des quatre charges.

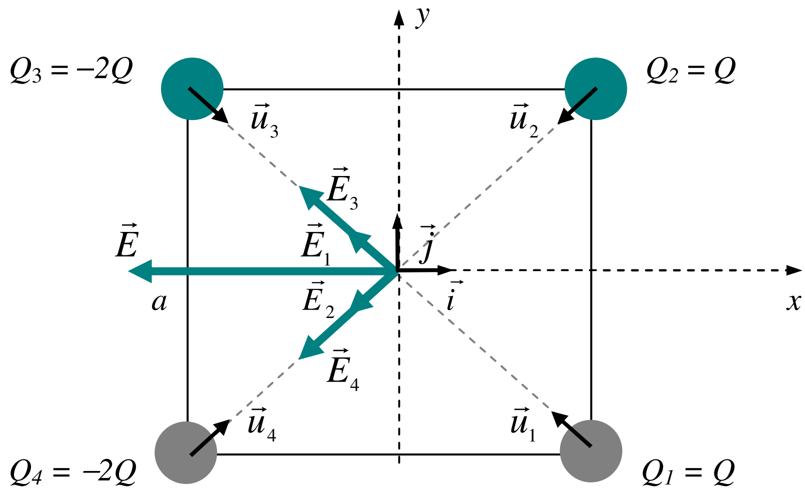

Fig. E6

On applique le principe de superposition pour le champ électrostatique:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^{4} \vec{E}_i$$

Les champs électrostatiques s'écrivent respectivement:

$$\vec{E}_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2Q}{a^2}\vec{u}_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2Q}{a^2}\left(-\cos\theta\,\vec{i} + \sin\theta\,\vec{j}\right)$$

$$\vec{E}_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2Q}{a^2}\vec{u}_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2Q}{a^2}\left(-\cos\theta\,\vec{i} - \sin\theta\,\vec{j}\right)$$

$$\vec{E}_3 = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{4Q}{a^2}\vec{u}_3 = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{4Q}{a^2}\left(\cos\theta\,\vec{i} - \sin\theta\,\vec{j}\right)$$

$$\vec{E}_4 = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{4Q}{a^2}\vec{u}_4 = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{4Q}{a^2}\left(\cos\theta\,\vec{i} + \sin\theta\,\vec{j}\right)$$

Le champ électrostatique total au centre O est donc:

$$\vec{E}(O) = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \vec{E}_4 = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{12Q}{a^2}\cos\theta\,\vec{i}$$

Où $\qquad \theta = \dfrac{\pi}{4} \quad \Rightarrow \quad \cos\,\theta = \cos\left(\dfrac{\pi}{4}\right) = \dfrac{\sqrt{2}}{2}$

Finalement, on obtient: $\boxed{\vec{E}(\mathrm{O}) = -\frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\frac{3\sqrt{2}\,Q}{a^2}\,\vec{i}}$

Application numérique : $Q = +1{,}6\ .\ 10^{-9}$ C ; $a = 4\sqrt{2}\,m$.

$$\vec{E}(O) = -\frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\frac{3\sqrt{2}\cdot 1{,}6\cdot 10^{-9}}{32}\,\vec{i} \Rightarrow \boxed{\vec{E}\,(O) = -3{,}82\,\vec{i}\quad \left[V\cdot m^{-1}\right]}$$

L'analyse des symétries permet de trouver l'orientation du champ électrique. En effet, l'axe O*y* étant un axe d'antisymétrie, le champ électrique total est perpendiculaire à l'axe O*y*.

Exercice 7 *** — Champ électrique créé par une tige chargée uniformément

Une tige métallique de longueur *l* porte une charge Q répartie uniformément avec la densité de charges λ.

1. Déterminer le champ électrostatique en un point O situé sur l'axe de la tige à une distance *r* d'une des extrémités (Fig. E7).

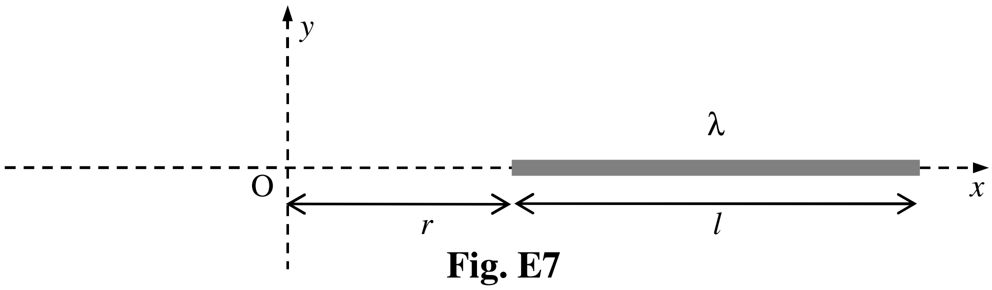

Fig. E7

2. Un électron se déplaçant d'une distance *d* le long d'une ligne de champ d'un point *A* à un point *B* verra sa vitesse changer de v_A à v_B. On considèrera que le point O se trouve loin du fil.

Déterminer la densité linéique de charges du fil.

Application numérique : **l = 10 cm ; r_A = 100 cm ; r_B = 104 cm ; $v_A = 2.10^5$ m.s^{-1}; $v_B = 3.10^6$ m.s^{-1}; $e = 1{,}6.10^{-19}$ C; $m_p = 9{,}1.10^{-31}$ kg.**

Solution :

1. On divise la tige de longueur *l* et de charge *Q*, en éléments de longueur *dl* et de charge *dQ* (Fig. E7.1). Chaque élément *dl* de la tige porte une charge $dQ = \lambda\, dl = \lambda\, dx$.

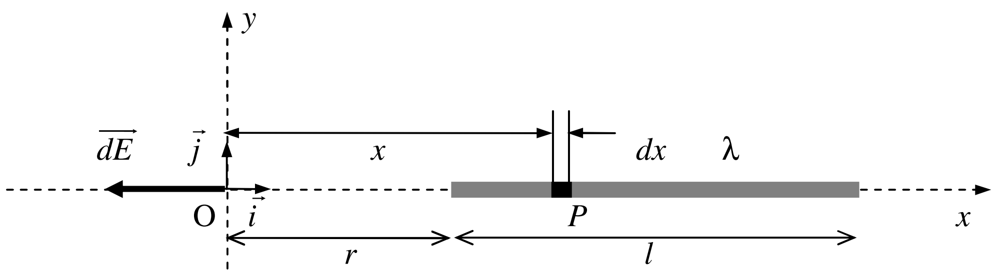

Fig. E7.1

Le champ électrostatique $\overrightarrow{dE}$ créé par la charge élémentaire $dQ = \lambda\, dx$ s'exprime:

$$\overrightarrow{dE} = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda\, dx}{(PO)^2}\vec{i} = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda}{(x)^2}dx\,\vec{i}$$

Pour déterminer le champ électrique total créé par la tige chargée, on applique le principe de superposition qui consiste à faire la sommation (intégration de $x = r$ à $x = r+l$) de tous les champs électriques élémentaires créés par les charges élémentaires dQ réparties sur la longueur l de la tige.

Le champ électrique résultant créé par tous les éléments de la tige qui sont à des distances différentes de O, s'obtient par intégration de $x = r$ à $x = r+l$ de l'expression:

$$\vec{E} = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\lambda\int_r^{l+r}\frac{dx}{(x)^2}\vec{i} = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\lambda\left[-\frac{1}{x}\right]_r^{l+r}\vec{i} \Rightarrow \vec{E} = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\lambda\left[\frac{1}{r}-\frac{1}{l+r}\right]\vec{i}$$

Donc: $$\boxed{\vec{E} = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda\, l}{r(l+r)}\vec{i}}$$

2. Lorsque la tige est loin du point O ($r >> l$), le champ électrique qu'elle crée au point O est donné par:

$$\boxed{\vec{E} = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda\, l}{r^2}\vec{i} = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r^2}\vec{i}}$$

- Quand r est très grand devant l, la tige électrisée est équivalente à une charge ponctuelle $Q = \lambda\, l$.

Si l'électron se trouve en A où règne le champ électrique $\vec{E}$, il va être soumis à la force électrostatique :

$$\vec{F} = -e\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e\lambda l}{r^2}\vec{i}$$

Au cours d'un déplacement élémentaire $\overrightarrow{dr}$ du proton, la force électrostatique effectue un travail élémentaire dW donné par:

$$dW = \vec{F}.\overrightarrow{dr} = -e\vec{E}.\overrightarrow{dr} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e\lambda l}{r^2}\vec{i}.(dr\,\vec{i}) = +\frac{e\lambda l}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dr}{r^2}$$

Au cours du déplacement du proton de A vers B, le travail effectué est donné par:

$$W_{A\to B} = \int_A^B dW = +\int_{r_A}^{r_B}\frac{e\lambda l}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dr}{r^2} = \frac{e\lambda l}{4\pi\varepsilon_0}\left[-\frac{1}{r}\right]_{r_A}^{r_B} = \frac{e\lambda l}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{1}{r_A}-\frac{1}{r_B}\right]$$

On trouve : $W_{A\to B} = \dfrac{e\lambda l}{4\pi\varepsilon_0}\left(\dfrac{r_B - r_A}{r_A r_B}\right)$

D'après le théorème de l'énergie cinétique, on a:

Travail de la force électrostatique = variation de l'énergie cinétique

Donc: $$W_{A\to B} = \frac{e\lambda l}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{r_B - r_A}{r_A r_B}\right) = \frac{1}{2}m_e\left(v_B^2 - v_A^2\right)$$

On en déduit la densité linéique de charges λ :

$$\boxed{\lambda = \frac{2\pi\varepsilon_0\, m_e\left(v_B^2 - v_A^2\right)}{e\,l}\left(\frac{r_A\, r_B}{r_B - r_A}\right)}$$

Application numérique: l = 10 cm; r_A = 100 cm; r_B = 104 cm; v_A = 2.10^5 m.s^{-1}; v_B = 3.10^6 m.s^{-1}; e=$1,6.10^{-19}$ C; m_e=$9,1.10^{-31}$ kg.

$$\lambda = \frac{2\cdot 9{,}1\cdot 10^{-31}\left(\left(3\cdot 10^6\right)^2 - \left(2\cdot 10^5\right)^2\right)}{9\cdot 10^9\cdot 1{,}6\cdot 10^{-19}\cdot 0{,}1}\left(\frac{1\cdot 1{,}04}{1{,}04-1}\right)$$

Finalement, on trouve : $\boxed{\lambda = 2{,}44\cdot 10^{-6}\quad \left[C.m^{-1}\right]\quad \cong\quad 3\quad \left[\mu C.m^{-1}\right]}$

Exercice 8 ** — Champ électrique créé par un fil uniformément chargé infiniment long

Un fil métallique infiniment long est chargé uniformément avec la densité de charges λ.

1. Déterminer le champ électrostatique en un point *A* situé sur la médiatrice du fil à une distance *r* de son milieu O (Fig. E8).

2. Une charge électrique positive *q* se trouve au point *A*. Sous l'action du champ électrique créé par le fil métallique chargé, elle se déplace d'une distance *d* = *AB* (Fig. E8); un travail *W* s'effectue au cours de ce déplacement.

Déterminer la densité linéique de charges du fil.

Application numérique : **$q = 3.10^{-9}$ C; $OA = r_A = 2$ cm; $OB = r_B = 6$ cm ; $W = 10^{-5}$ J.**

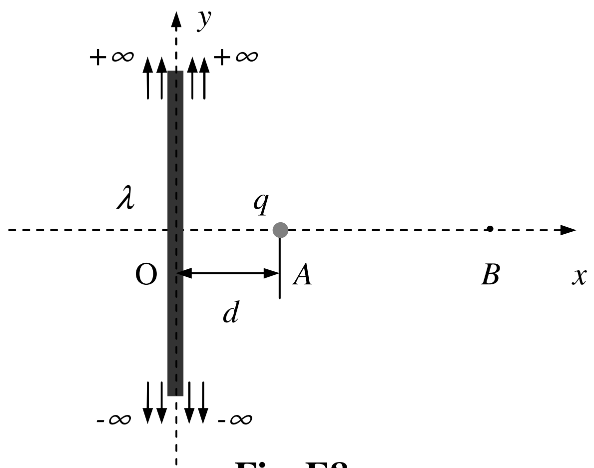

Fig. E8

Solution :

1. On se propose de trouver le champ électrostatique créé en un point *M* par un filament rectiligne infiniment long, portant une charge λ par unité de longueur (Fig. E8.1).

Pour cela, on divise le filament en petits segments de longueur dz portant chacun une charge $dq = \lambda dz$.

On exprime le champ électrostatique $\overrightarrow{dE_1}$ créé par la charge élémentaire $dq_1 = \lambda dz$, située en P_1, en un point M tel que $\overrightarrow{OM} = \vec{r}$,

$$\overrightarrow{dE_1} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda dz}{r^2+z^2}\vec{u}_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda dz}{r^2+z^2}\left(\cos\theta\,\vec{u}_r + \sin\theta\,\vec{k}\right)$$

Le champ électrostatique $\overrightarrow{dE_2}$ créé en M par la charge élémentaire $dq_2 = \lambda dz$, située en P_2 (symétrique de P_1 par rapport à O), s'obtient de la même façon:

$$\overrightarrow{dE_2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda dz}{r^2+z^2}\vec{u}_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda dz}{r^2+z^2}\left(\cos\theta\,\vec{u}_r - \sin\theta\,\vec{k}\right)$$

Le champ électrostatique $\overrightarrow{dE}$ créé en M par la paire de charges élémentaires (dq_1, dq_2) a pour expression:

$$\overrightarrow{dE} = \overrightarrow{dE_1} + \overrightarrow{dE_2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2\lambda dz}{r^2+z^2}\left(\cos\theta\,\vec{u}_r\right) = dE_r\,\vec{u}_r$$

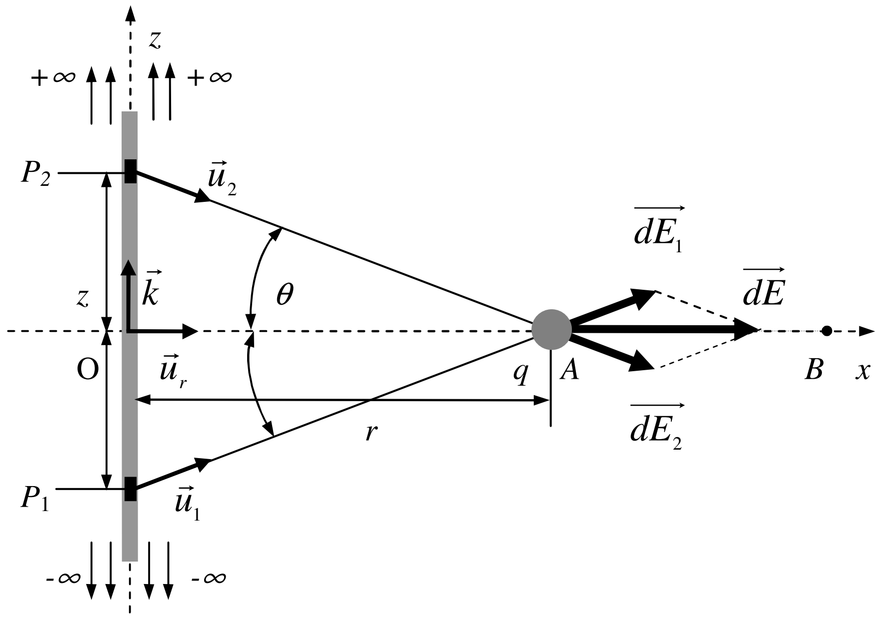

Fig. E8.1

avec: $$dE_r = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\frac{dz}{r^2+z^2}\cos\theta$$

En appliquant le principe de superposition, le champ électrostatique résultant au point M, s'obtient en intégrant cette expression de $\theta = 0$ à $\theta = \pi/2$.

$$E_r = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\int_0^{\frac{\pi}{2}}\frac{dz}{r^2+z^2}\cos\theta$$

Comme: $$\cos\theta = \sqrt{\frac{r^2}{r^2+z^2}}$$

alors: $$r^2+z^2=\frac{r^2}{\cos^2\theta}$$

Par ailleurs:

$$tg\theta=\frac{z}{r},\ \ et\ \ dz=\frac{r\,d\theta}{\cos^2\theta}$$

En substituant r^2+z^2 et dz par leurs expressions respectives dans celle de E_r, on obtient:

$$E_r=\frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r}\int_0^{\frac{\pi}{2}}\cos\theta\ \ d\theta=\frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r}\left[\sin\theta\right]_0^{\frac{\pi}{2}}=\frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r}$$

D'où: $$\boxed{\vec{E}=E_r\,\vec{u}_r=\frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r}\ \vec{u}_r}$$

2. La charge électrique q placée en A où règne le champ électrique $\vec{E}$, va être soumise à la force électrostatique:

$$\vec{F}=q\vec{E}=\frac{\lambda q}{2\pi\varepsilon_0 r}\ \vec{u}_r$$

Au cours d'un déplacement élémentaire $\overrightarrow{dr}$ de la charge électrique q, la force électrostatique effectue un travail élémentaire dW donné par:

$$dW=\vec{F}.\overrightarrow{dr}=q\vec{E}.\overrightarrow{dr}=\frac{\lambda q}{2\pi\varepsilon_0 r}\ \vec{u}_r.\overrightarrow{dr}\ u_r=\frac{\lambda q}{2\pi\varepsilon_0}\frac{dr}{r}$$

Au cours du déplacement de la charge q de A vers B, le travail effectué est donné par:

$$W_{A\to B}=\int_A^B dW=\int_{r_A}^{r_B}\frac{\lambda q}{2\pi\varepsilon_0}\frac{dr}{r}=\frac{\lambda q}{2\pi\varepsilon_0}\left[\ln r\right]_{r_A}^{r_B}=\frac{\lambda q}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{r_B}{r_A}$$

On en déduit la densité linéique de charges λ:

$$\boxed{\lambda=\frac{2\pi\varepsilon_0 W}{q\ln\frac{r_B}{r_A}}}$$

Application numérique : $q=3.10^{-9}$ C; $OA=r_A=2$ cm; $OB=r_B=6$ cm; $W=10^{-5}$ J.

$$\lambda=\frac{2}{9\cdot10^9\cdot3\cdot10^{-9}}\cdot\frac{1}{\ln 3}\cdot10^{-5}$$

$$\boxed{\lambda=6,74\cdot10^{-7}\ \left[C\cdot m^{-1}\right]}$$

Exercice 9 *** — Champ électrique créé par des distributions surfaciques de charges non uniformes

A. On électrise par frottement un disque circulaire en ébonite qui tourne à une vitesse constante dans un plan horizontal. De cette façon, la densité surfacique de charges devient proportionnelle à la distance *r* du centre du disque ($\sigma=A\,r$, où *A* est une constante négative).

1. Exprimer la charge totale Q de la couronne en fonction de A, R_1 et R_2. Donner les dimensions de la constante A.
2. Utiliser les symétries pour déterminer l'orientation du champ électrostatique au centre O.
3. Exprimer le champ électrostatique $\vec{E}$ en un point M situé sur l'axe de la couronne à une distance z de O.

B. Une couronne découpée dans un carreau de verre (rayons intérieur R_1 et extérieur R_2) porte une charge Q distribuée avec la densité surfacique de charges $\sigma = \sigma_0 \sin^2 \varphi$ (σ_0 est une constante positive) (Fig. E9).

1. **Exprimer la charge totale Q de la couronne en fonction de σ_0, R_1 et R_2.**
2. **Utiliser les symétries pour déterminer l'orientation du champ électrostatique au centre O.**
3. **Exprimer le champ électrostatique $\vec{E}$ en un point M situé sur l'axe de la couronne à une distance z de O.**

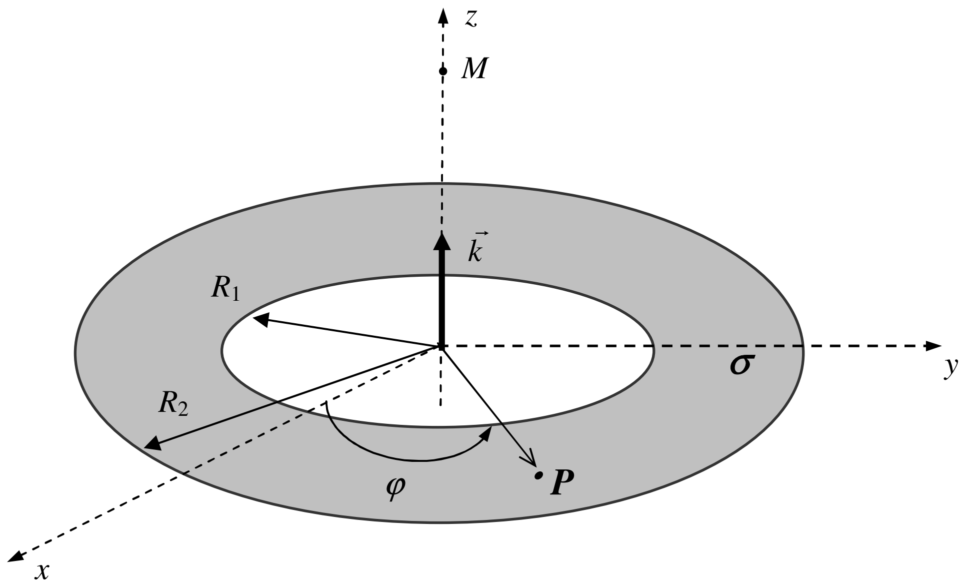

Fig. E9

Solution :

A.1.On divise le disque de rayon R, en anneaux élémentaires de rayon intérieur r et d'épaisseur dr. Chaque anneau porte une charge élémentaire :

$$dq = \sigma dS = \sigma 2\pi r\, dr$$

Pour déterminer la charge totale Q portée par le disque, on fait la sommation (intégration de $r = 0$ à $r = R$) de toutes les charges élémentaires réparties sur la surface du disque.

La charge totale Q portée par le disque en ébonite s'obtient par intégration de $r = 0$ à $r = R$ de l'expression suivante, avec la valeur appropriée de σ.

$$Q = \iint_S \sigma \, dS = \int_0^R \int_0^{2\pi} \sigma \; r \, dr \, d\varphi$$

avec: $\sigma = A\, r$

Donc: $Q = \iint_S \sigma \, dS = \int_0^R A\, r^2 \, dr \int_0^{2\pi} d\varphi$

Par conséquent :

$$Q = \iint_S \sigma \, dS = \int_0^R A\, r^2 \, dr \int_0^{2\pi} d\varphi \;\Rightarrow\; = A\left[\frac{r^3}{3}\right]_0^R [\varphi]_0^{2\pi}$$

Finalement, on obtient: $\boxed{Q = \frac{2}{3} A \pi R^3}$

En utilisant l'équation aux dimensions, on obtient**:** $[A] = \dfrac{[Q]}{\left[\frac{3}{2}\pi R^3\right]} = \dfrac{[Charge]}{[Longueur]^3}$

Dans le Système International, les dimensions de la constante *A* sont:

$$\boxed{[A] = \frac{Coulomb}{mètre^3} = \frac{C}{m^3}}.$$

A.2. La distribution est invariante dans toute rotation θ autour de l'axe z (Fig. E9.1): c'est une symétrie axiale.

- En tout point de l'axe Oz, le champ électrostatique $\vec{E}$ est porté par l'axe; il ne dépend que de z.

Les plans (xOz) et (yOz) sont des plans de symétrie; de même, tout plan contenant l'axe Oz est un plan de symétrie; le plan (xOy) est également un plan de symétrie. Le point O appartient à des plans de symétries orthogonaux: c'est un centre de symétrie.

- Le champ électrostatique $\vec{E}$ est nul au point O.

A.3. On calcule le champ électrostatique élémentaire créé par un élément de surface uniformément chargé dS.

Cet élément de surface porte une charge élémentaire:

$$dQ = \sigma\, r \, dr \, d\varphi$$

La charge élémentaire dQ crée un champ électrostatique élémentaire $\overrightarrow{dE}$ (Fig. E9.2):

$$\overrightarrow{dE} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{dQ}{r^2 + z^2} \vec{u} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{A\; r^2 \, dr \; d\varphi}{r^2 + z^2} \vec{u}$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{A\, r^2 \, dr \; d\varphi}{r^2 + z^2} \left(\cos\theta \vec{k} - \sin\theta \vec{v}\right)$$

Finalement, on obtient:

$$\overrightarrow{dE} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{A\; r^2 \, dr \, d\varphi}{r^2 + z^2} \left(\frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} \vec{k} - \frac{r}{\sqrt{r^2 + z^2}} \vec{v} \right)$$

avec $\vec{u} = \cos\theta\ \vec{k} - \sin\theta\ \vec{v}$; $\cos\theta = \dfrac{z}{\sqrt{r^2+z^2}}$; $\sin\theta = \dfrac{r}{\sqrt{r^2+z^2}}$.

et $\vec{v} = \cos\varphi\ \vec{i} + \sin\varphi\ \vec{j}$

Par conséquent:

$$\overrightarrow{dE} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{A\,r^2\,dr\ d\varphi}{r^2+z^2}\left(\frac{z}{\sqrt{r^2+z^2}}\vec{k} - \frac{r}{\sqrt{r^2+z^2}}\left(\cos\varphi\ \vec{i} + \sin\varphi\,\vec{j}\right)\right)$$

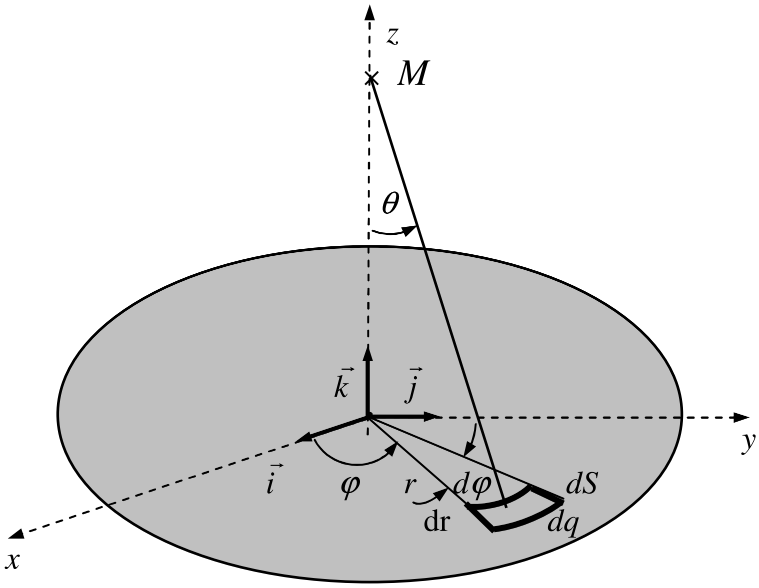

Fig. E9.1

Les composantes radiales E_x et E_y s'annulent à cause de la symétrie de révolution autour de l'axe des z. Le champ électrostatique résultant $\vec{E}$ a pour direction Oz.
Donc, la composante utile du champ électrostatique résultant est donnée par :

$$\vec{E} = \frac{A}{4\pi\,\varepsilon_0}\left[\int_{R_1}^{R_2}\frac{z}{\left(r^2+z^2\right)^{\frac{3}{2}}}\,r^2\,dr\int_0^{2\pi}d\varphi\right]\vec{k}$$

Posons $u = r^2 + z^2$, alors $du = 2r\ dr$. L'expression du champ électrostatique peut alors s'écrire:

$$\vec{E} = \frac{A\,z}{4\pi\varepsilon_0}\left[\int_{R_1}^{R_2}\frac{r^2\,dr}{\left(r^2+z^2\right)^{\frac{3}{2}}}\int_0^{2\pi}d\varphi\right]\vec{k}$$

$$= \frac{A\,z}{4\pi\varepsilon_0}\left\{\left[\ln\left(r+\sqrt{r^2+z^2}\right) - \frac{r}{\sqrt{r^2+z^2}}\right]_{0_1}^{R}\left[\varphi\right]_0^{2\pi}\right\}\vec{k}$$

$$\vec{E} = \frac{A\,z}{2\varepsilon_0}\left[\ln\frac{\left(R+\sqrt{R^2+z^2}\right)}{z} - \frac{R}{\sqrt{R^2+z^2}}\right]\vec{k}$$

Sachant que : $\sigma = \dfrac{Q}{S} = \dfrac{\frac{2}{3}A\pi R^3}{\pi R^2} = \dfrac{2}{3}A\,R$, la constante A s'exprime: $A = \dfrac{3}{2}\dfrac{Q}{\pi R^3}$

Le champ électrostatique créé par le disque se met sous la forme:

$$\boxed{\vec{E} = = \frac{3Q\,z}{4\pi\varepsilon_0 R^3}\left[\ln\frac{\left(R+\sqrt{R^2+z^2}\right)}{z} - \frac{R}{\sqrt{R^2+z^2}}\right]\vec{k}}$$

B. Le champ électrostatique créé par une couronne découpée dans un carreau de verre (voir Fig. E9.2) portant une charge Q distribuée avec la densité surfacique de charges $\sigma = \sigma_0 \sin^2\varphi$ (σ_0 est une constante positive) se calcule de la même manière que pour le disque.

Les réponses sont les suivantes:

B.1. $Q = \dfrac{1}{2}\sigma_0\pi\left(R_2^2 - R_1^2\right)$

B.2. voir A.2.

B.3. $\vec{E} = \dfrac{\sigma_0}{4\varepsilon_0}\left[\dfrac{z}{\sqrt{z^2+R_1^2}} - \dfrac{z}{\sqrt{z^2+R_2^2}}\right]\vec{k} \quad = \dfrac{2Q}{4\pi\varepsilon_0\left(R_2^2-R_1^2\right)}\left[\dfrac{z}{\sqrt{z^2+R_1^2}} - \dfrac{z}{\sqrt{z^2+R_2^2}}\right]\vec{k}$

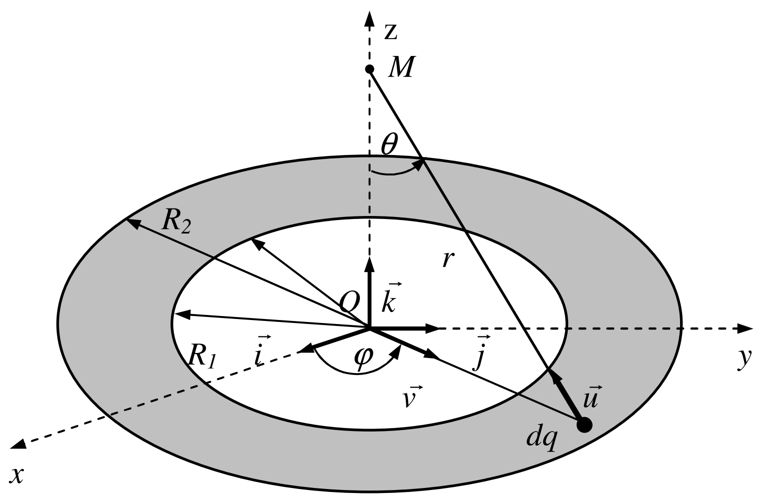

Fig. E9.2