Chapitre 4

Le potentiel électrique

Objectif particulier 1.4

Connaître la notion de potentiel électrique, puis l'employer en présence de distributions de charges ponctuelles et de distributions de charges continues.

Le potentiel

Le potentiel électrique, appelé simplement potentiel, permet de calculer la quantité d'énergie à fournir à une particule test chargée pour la déplacer dans un champ électrique. La quantité d'énergie à fournir est transférée par le travail extérieur effectué sur la particule test. Si la vitesse est constante, la quantité d'énergie fournie à la particule test chargée se calcule par

$$W_{EXT} = q_0 \, \Delta V = q_0 \, (V_f - V_i)$$

où W_{EXT} est le travail extérieur en joules,
q_0 est la charge de la particule test en coulombs,
ΔV est la variation de potentiel en volts
et V_i , V_f sont les potentiels initial et final en volts.

Chaque point de l'espace est à un certain potentiel électrique comme une particule chargée possède une certaine énergie potentielle électrique en chaque point de l'espace. Pour une particule chargée en mouvement, la variation de potentiel électrique correspond à une variation de l'énergie potentielle électrique donnée par

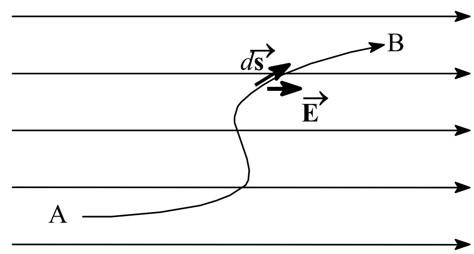
$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q_0}$$

où ΔV est la variation de potentiel en volts,
ΔU est la variation de l'énergie potentielle en joules
et q_0 est la charge de la particule test en coulombs.

D'après cette relation, un volt est équivalent à un joule par coulomb.

$$1 \text{ V} = 1 \text{ volt} = \frac{1 \text{ joule}}{1 \text{ coulomb}} = 1 \; \frac{\text{J}}{\text{C}}$$

Le travail effectué sur la particule test se calcule à partir de la trajectoire par



$$W_{EXT} = - \int_A^B \vec{\mathbf{F}} \bullet d\vec{\mathbf{s}} = - q_0 \int_{\text{A}}^{B} \vec{\mathbf{E}} \bullet d\vec{\mathbf{s}}$$

où W_{EXT} est le travail extérieur en joules,
$\vec{\mathbf{F}}$ est le vecteur force électrique en newtons,

	$d\vec{\mathbf{s}}$	est le vecteur déplacement infinitésimal en mètres,
	q_0	est la charge de la particule test en coulombs
et	$\vec{\mathbf{E}}$	est le vecteur champ électrique en newtons par coulomb.

Si la vitesse est constante, le travail extérieur est égal à la variation d'énergie potentielle, alors la variation de potentiel électrique est donnée par

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q_0} = \frac{W_{EXT}}{q_0} = -\int_A^B \vec{\mathbf{E}} \bullet d\vec{\mathbf{s}}$$

où	ΔV	est la variation de potentiel en volts,
	ΔU	est la variation de l'énergie potentielle en joules,
	q_0	est la charge de la particule test en coulombs,
	W_{EXT}	est le travail extérieur en joules,
	$\vec{\mathbf{E}}$	est le vecteur champ électrique en newtons par coulomb
et	$d\vec{\mathbf{s}}$	est le vecteur déplacement infinitésimal en mètres.

La variation de potentiel électrique entre les points A et B est donc

$$V_B - V_A = \Delta V = -\int_A^B \vec{\mathbf{E}} \bullet d\vec{\mathbf{s}}$$

où	V_A, V_B	sont les potentiels aux points A et B en volts,
	ΔV	est la variation de potentiel en volts,
	$\vec{\mathbf{E}}$	est le vecteur champ électrique en newtons par coulomb
et	$d\vec{\mathbf{s}}$	est le vecteur déplacement infinitésimal en mètres.

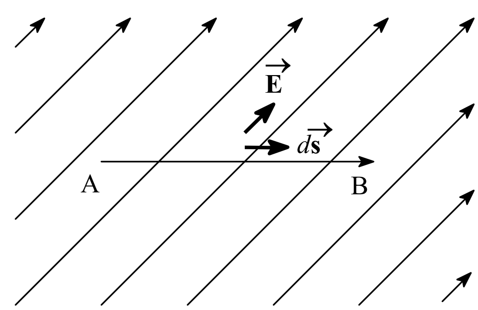
Si le champ électrique est uniforme, la variation de potentiel électrique, entre les points A et B, est

$$V_B - V_A = -\int_A^B \vec{\mathbf{E}} \bullet d\vec{\mathbf{s}} = -\vec{\mathbf{E}} \bullet \left(\int_A^B d\vec{\mathbf{s}} \right) = -\vec{\mathbf{E}} \bullet \Delta \vec{\mathbf{s}}$$

où	V_A, V_B	sont les potentiels aux points A et B en volts,
	$\vec{\mathbf{E}}$	est le vecteur champ électrique en newtons par coulomb,
	$d\vec{\mathbf{s}}$	est le vecteur déplacement infinitésimal en mètres
et	$\Delta\vec{\mathbf{s}}$	est le vecteur déplacement du point A au point B en mètres.

Par exemple, si le déplacement est parallèle à l'axe des *x*, la variation de potentiel électrique, entre les points A et B, est

$$V_B - V_A = -E_x \Delta x$$



où	V_A, V_B	sont les potentiels aux points A et B en volts,

	E_x	est la composante *x* du champ électrique en newtons par coulomb
et	Δx	est le déplacement (selon *x*) en mètres.

D'après la relation précédente, on voit que le champ électrique peut aussi s'exprimer en volts par mètre; ce seront les unités employées par la suite.

$$1\,\frac{\text{newton}}{\text{coulomb}} = 1\,\frac{\text{N}}{\text{C}} = 1\,\frac{\text{volt}}{\text{mètre}} = 1\,\frac{\text{V}}{\text{m}}$$

1. Un travail de 5 μJ est nécessaire pour déplacer de 60 cm une particule portant une charge de 60 μC. Le champ électrique est uniforme et parallèle au déplacement. La vitesse de la charge est constante.

a) Quelle est la variation d'énergie potentielle électrique de la particule entre la position de départ et d'arrivée ?

b) Quelle la variation de potentiel électrique entre la position de départ et d'arrivée ?

c) Quelle est la grandeur du champ électrique ?

2. Une particule portant une charge de 45 μC est déplacée de 15 cm dans la direction des x positifs. Un champ électrique uniforme de 300 V/m dirigé à 210° est présent dans l'entourage de la particule.

a) Quelle est la variation de potentiel électrique entre la position de départ et d'arrivée ?

b) Quelle est la variation d'énergie potentielle électrique de la particule entre la position de départ et d'arrivée ?

c) Si la vitesse est constante, quel est le travail effectué sur la particule pour la déplacée de 15 cm dans la direction des x positifs ?

Les équipotentielles

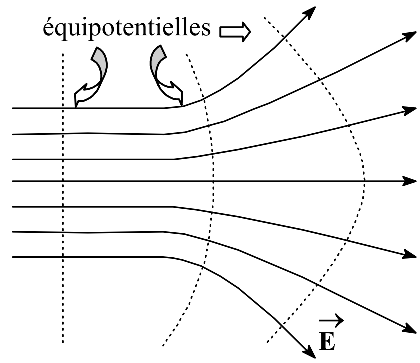
À chaque point de l'espace, correspond un potentiel électrique. Ce potentiel électrique est visualisé par les équipotentielles. Une équipotentielle est une ligne (dans un espace 2-D) ou une surface (dans un espace 3-D) sur laquelle le potentiel électrique est constant. Les équipotentielles sont équivalentes aux lignes de niveau sur les cartes topographiques. Il n'y a pas de variation d'altitude pour une personne se déplaçant sur une ligne de niveau. De même, la variation de potentiel est nulle pour une particule test chargée se déplaçant sur une équipotentielle; ainsi

$$\Delta V = -\int_A^B \vec{\mathbf{E}} \bullet d\vec{\mathbf{s}} = 0$$

où	ΔV	est la variation de potentiel en volts,
	$\vec{\mathbf{E}}$	est le vecteur champ électrique en volts par mètre
et	$d\vec{\mathbf{s}}$	est le vecteur déplacement infinitésimal en mètres.

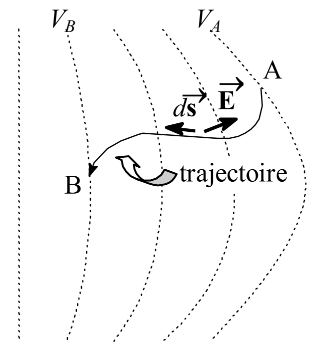
Alors, le champ électrique doit traverser l'équipotentielle perpendiculairement afin que le produit scalaire $\vec{\mathbf{E}} \bullet d\vec{\mathbf{s}}$ soit nul partout le long du parcours.

Ainsi, les lignes de champ électrique et les équipotentielles sont partout perpendiculaires entre elles.



Une particule test chargée qui se déplace dans l'espace subira une variation d'énergie potentielle si la position de départ et d'arrivée ne se trouvent pas sur la même équipotentielle. De plus, la diminution d'énergie potentielle sera égale à l'augmentation d'énergie cinétique.

Note : La variation de potentiel ne dépend que de la position des points A et B; elle est indépendante du parcours.



Par conservation de l'énergie, on a

$$\Delta K = -\Delta U = -q_0 \Delta V$$

où ΔK est la variation d'énergie cinétique en joules,
ΔU est la variation de l'énergie potentielle en joules,
ΔV est la variation de potentiel en volts
et q_0 est la charge de la particule test en coulombs.

3. Une particule chargée se déplace du point A ayant un potentiel électrique de 22 V vers le point B ayant un potentiel électrique de 35 V. La particule possède une charge de -225 μC et une masse de 75 g. La vitesse initiale de la particule est de 25 cm/s.

a) Quelle est la variation d'énergie potentielle de la particule ?

b) Quelle est la variation d'énergie cinétique de la particule ?

c) Quelle est l'énergie cinétique finale de la particule ?

d) Quelle est la vitesse finale de la particule ?

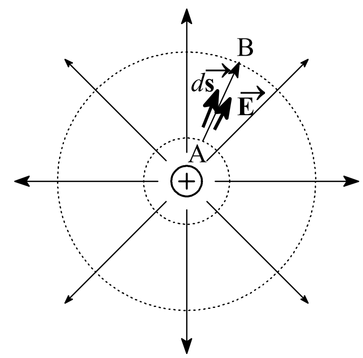
Distributions de charges ponctuelles

Le champ électrique au voisinage d'une charge ponctuelle est

$$\vec{\mathbf{E}} = \frac{k\,q}{r^2}\,\vec{\mathbf{u}}_{\mathbf{r}}$$

où	$\vec{\mathbf{E}}$	est le vecteur champ électrique en volts par mètre,
	q	est la charge ponctuelle en coulombs,
	k	est la constante de la loi de Coulomb ($8{,}99 \cdot 10^9$ N·m^2/C^2),
	r	est le rayon de l'équipotentielle en mètres
et	$\vec{\mathbf{u}}_{\mathbf{r}}$	est le vecteur unitaire s'éloignant de la charge q.

Le champ électrique produit par une charge ponctuelle étant radial au voisinage de celle-ci, les équipotentielles seront sphériques. La variation de potentiel électrique s'obtient le plus simplement par l'intégration du champ électrique en suivant un chemin parallèle à un rayon (entre deux surfaces sphériques).



Ainsi

$$V_B - V_A = -\int_A^B \vec{\mathbf{E}} \bullet d\vec{\mathbf{s}} = -\int_{\mathrm{A}}^{B} E\,ds = -\int_{\mathrm{A}}^{B} \frac{k\,q\,dr}{r^2}$$

$$= -\left[-\frac{k\,q}{r}\right]_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} = k\,q\left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A}\right)$$

où	V_A, V_B	sont les potentiels aux points A et B en volts,
	$\vec{\mathbf{E}}$	est le vecteur champ électrique en volts par mètre,
	$d\vec{\mathbf{s}}$	est le vecteur déplacement infinitésimal en mètres,
	E	est le champ électrique en volts par mètre,
	ds	est le déplacement infinitésimal en mètres,
	k	est la constante de la loi de Coulomb ($8{,}99 \cdot 10^9$ N·m^2/C^2),
	q	est la charge ponctuelle en coulombs,
	dr	est la variation infinitésimale du rayon de l'équipotentielle en mètres,
	r	est le rayon de l'équipotentielle en mètres
et	r_A, r_B	sont les rayons des équipotentielles aux points A et B en mètres.

Le potentiel électrique est défini à une constante près. Un potentiel de référence nul est pris en un point situé à l'infini. Ce choix de potentiel de référence permet d'adopter une expression simple pour le potentiel électrique autour d'une charge ponctuelle, soit

$$V_p = \frac{k\,q}{r_p}$$

où	V_p	est le potentiel au point P autour d'une charge ponctuelle en volts,
	k	est la constante de la loi de Coulomb ($8{,}99 \cdot 10^9$ N·m^2/C^2),
	q	est la charge ponctuelle en coulombs

et r_p est le rayon de l'équipotentielle au point *P* en mètres.

Le principe de superposition s'applique, pour calculer le potentiel en un point P dans le cas où il y a plusieurs charges ponctuelles aux alentours, soit

$$V_P = \sum_{i=1}^{N} \frac{k\, q_i}{r_i}$$

où V_P est le potentiel au point *P* produit par les charges ponctuelles en volts,
k est la constante de la loi de Coulomb ($8{,}99 \cdot 10^9$ N·m²/C²),
q_i est la charge portée par la i^e particule en coulombs
et r_i est la distance du point P par rapport à la i^e particule en mètres.

Lorsqu'une 2^e charge ponctuelle se déplace du point A au point B autour d'une 1^{re} charge ponctuelle, la paire de charges ponctuelles subit une variation d'énergie potentielle donnée par

$$U_B - U_A = q_2 (V_B - V_A) = q_2 \left(\frac{k\, q_1}{r_{1B}} - \frac{k\, q_1}{r_{1A}} \right)$$

où U_A , U_B sont les énergies potentielles électriques aux points A et B en joules,
V_A , V_B sont les potentiels aux points A et B en volts,
k est la constante de la loi de Coulomb ($8{,}99 \cdot 10^9$ N·m²/C²),
q_1 , q_2 sont les charges portées par la 1^{re} et la 2^e particule en coulombs
et r_{1A} , r_{1B} sont les rayons des équipotentielles autour de la 1^{re} charge aux points A et B en mètres.

L'énergie potentielle électrique est également définie à une constante près. Une énergie potentielle de référence nulle est également prise en un point situé à l'infini. L'expression de l'énergie potentielle électrique d'une paire de charges q_1 et q_2, avec cette référence, est

$$U_{12} = \frac{k\, q_1 q_2}{r_{12}}$$

où U_{12} est l'énergie potentielle électrique de la paire de charges q_1 et q_2 en joules,
k est la constante de la loi de Coulomb ($8{,}99 \cdot 10^9$ N·m²/C²),
q_1 , q_2 sont les charges portées par la 1^{re} et la 2^e particule en coulombs
et r_{12} est la distance entre les charges q_1 et q_2 en mètres.

Dans le cas où il y a plusieurs paires de charges ponctuelles, l'énergie potentielle électrique de la distribution de charge est la somme de l'énergie potentielle pour chaque paire de charges ponctuelles. Ainsi, pour une distribution de trois charges ponctuelles, l'énergie potentielle électrique est

$$\begin{aligned} U_{123} &= U_{12} + U_{23} + U_{31} \\ &= \frac{k\, q_1 q_2}{r_{12}} + \frac{k\, q_2 q_3}{r_{23}} + \frac{k\, q_3 q_1}{r_{31}} \end{aligned}$$

où U_{123} est l'énergie potentielle électrique des charges q_1 , q_2 , q_3 en joules,
U_{12} est l'énergie potentielle électrique de la paire de charges q_1 et q_2 en joules,

	U_{23}	est l'énergie potentielle électrique de la paire de charges q_2 et q_3 en joules,
	U_{31}	est l'énergie potentielle électrique de la paire de charges q_3 et q_1 en joules,
	k	est la constante de la loi de Coulomb ($8{,}99{\cdot}10^9$ N·m²/C²),
	q_1, q_2, q_3	sont les charges portées par la 1re, la 2e et la 3e particule en coulombs,
	r_{12}	est la distance entre les charges q_1 et q_2 en mètres,
	r_{23}	est la distance entre les charges q_2 et q_3 en mètres
et	r_{31}	est la distance entre les charges q_3 et q_1 en mètres.

4. Deux particules portent des charges ponctuelles de +30 μC et -30 μC. La distance entre les particules est de 10 cm.

a) Quel est le potentiel électrique à 2,5 cm de la charge positive dans l'espace entre les deux particules ?

b) Quel est le potentiel électrique à 2,5 cm de la charge négative dans l'espace entre les deux particules ?

c) Quelle est l'énergie potentielle électrique de la paire de particules ?

5. Soit une paire de charges ponctuelles comprenant une charge de -50 μC et une charge de 100 μC.

a) Quelle est l'énergie potentielle de la paire de charges ponctuelles lorsque la distance entre elles est de 5 cm ?

b) Quelle est l'énergie potentielle de la paire de charges ponctuelles lorsque la distance entre elles est de 10 cm ?

c) Quel est le travail fourni afin d'éloigner les charges de 5 cm à 10 cm ?

6. Une charge ponctuelle de 4 μC se rapproche d'une charge ponctuelle de 10 μC. La distance initiale entre les charges entre de 12 cm. La distance finale entre les charges est de 8 cm.

a) Quelle est la variation de potentiel électrique entre la position à 12 cm et la position à 8 cm autour de la charge ponctuelle de 10 μC lorsqu'elle est seule ?

b) Quelle est la variation d'énergie potentielle électrique de la charge de 4 μC lorsqu'elle se déplace d'une distance de 12 cm à 8 cm par rapport à la charge de 10 μC ?

c) Si les charges ont été rapprochées à vitesse constante, quel travail a-t-il fallu fournir ?

Distributions de charges continues

Si on calcule le potentiel électrique au point *P* produit par une charge infinitésimale, on obtient un potentiel électrique infinitésimal en un point donné par

$$dV_P = \frac{k\,dq}{r_P}$$

où dV_p est la variation de potentiel infinitésimale au point *P* en volts,

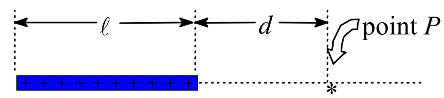
	k	est la constante de la loi de Coulomb ($8{,}99 \cdot 10^9$ N·m²/C²),
	dq	est un élément de charge infinitésimal en coulombs
et	r_p	est le rayon de l'équipotentielle au point *P* en mètres.

Par le principe de superposition, le potentiel électrique résultant, en un point donné, se calcule par

$$V_P = k \int \frac{dq}{r_P}$$

où	V_P	est le potentiel au point *P* produit par les charges ponctuelles en volts,
	k	est la constante de la loi de Coulomb ($8{,}99 \cdot 10^9$ N·m²/C²),
	dq	est un élément de charge infinitésimal en coulombs
et	r_p	est le rayon de l'équipotentielle au point *P* en mètres.

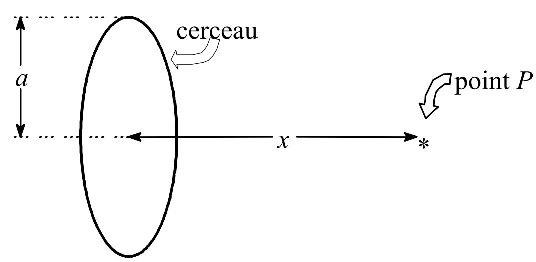
7. Soit une tige ayant une longueur de 20 cm et portant une distribution de charge linéaire de 400 μC/m.



a) Quelle est l'expression du potentiel électrique en un point situé le long de l'axe de la tige (à une distance *d* du bout de la tige) ?

b) Quelle est la grandeur du potentiel électrique en un point situé à 5 cm de l'extrémité le long de l'axe de la tige ?

8. Soit un cerceau ayant un rayon de 10 cm et portant une distribution de charge linéaire de 600 μC/m.



a) Quelle est l'expression de la grandeur du potentiel électrique produit par le cerceau en un point situé le long d'un axe perpendiculaire passant parle centre du cerceau ?

b) Quelle est la grandeur du potentiel électrique produit par le cerceau en un point situé à 25 cm du centre le long d'un axe perpendiculaire passant parle centre du cerceau ?

Détermination du champ à partir du potentiel

La variation de potentiel électrique infinitésimale correspondant à un déplacement infinitésimal est

$$dV_P = -\vec{\mathbf{E}}_P \bullet \mathbf{d\vec{s}} = -\left(E_x\ dx + E_y\ dy + E_z\ dz \right)$$

où	dV_P	est la variation de potentiel infinitésimale au point *P* en volts,
	$\vec{\mathbf{E}}_P$	est le vecteur champ électrique au point *P* en volts par mètre,
	$d\vec{\mathbf{s}}$	est le vecteur déplacement infinitésimal en mètres,

E_x, E_y, E_z sont les composantes *x,y,z* du champ électrique en volts par mètre
et dx, dy, dz sont les composantes *x,y,z* du déplacement infinitésimal en mètres.

Pour un déplacement parallèle à l'axe des *x*, la composante *x* du champ électrique est

$$E_x = -\left(\frac{dV}{dx}\right)_{y,z\ constants}$$

où E_x est la composante *x* du champ électrique en volts par mètre,
dV est la variation de potentiel infinitésimale en volts
et dx est la composante *x* du déplacement infinitésimal en mètres.

Pour un déplacement parallèle à l'axe des *y*, la composante *y* du champ électrique est

$$E_y = -\left(\frac{dV}{dy}\right)_{x,z\ constants}$$

où E_y est la composante *y* du champ électrique en volts par mètre,
dV est la variation de potentiel infinitésimale en volts
et dy est la composante *y* du déplacement infinitésimal en mètres.

Pour un déplacement parallèle à l'axe des *z*, la composante *z* du champ électrique est

$$E_z = -\left(\frac{dV}{dz}\right)_{x,y\ constants}$$

où E_z est la composante *z* du champ électrique en volts par mètre,
dV est la variation de potentiel infinitésimale en volts
et dz est la composante *z* du déplacement infinitésimal en mètres.

Le champ électrique exprimé à l'aide de ses composantes devient

$$\begin{aligned}\vec{\mathbf{E}}_P &= E_x\,\vec{\mathbf{i}} + E_y\,\vec{\mathbf{j}} + E_z\,\vec{\mathbf{k}}\\ &= -\left(\frac{dV}{dx}\right)_{y,z\ constants}\vec{\mathbf{i}} - \left(\frac{dV}{dy}\right)_{x,z\ constants}\vec{\mathbf{j}} - \left(\frac{dV}{dz}\right)_{x,y\ constants}\vec{\mathbf{k}}\end{aligned}$$

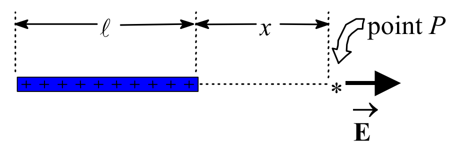
où $\vec{\mathbf{E}}_P$ est le vecteur champ électrique au point *P* en volts par mètre,
E_x, E_y, E_z sont les composantes *x,y,z* du champ électrique en volts par mètre,
$\vec{\mathbf{i}}, \vec{\mathbf{j}}, \vec{\mathbf{k}}$ sont les vecteurs unitaires pour les axes *x,y,z*,
dV est la variation de potentiel infinitésimale en volts
et dx, dy, dz sont les composantes *x,y,z* du vecteur déplacement infinitésimal en mètres.

Ce résultat est généralement exprimé dans une notation différente, soit

$$\vec{\mathbf{E}}_P = -\frac{\partial V}{\partial x}\,\vec{\mathbf{i}} - \frac{\partial V}{\partial y}\,\vec{\mathbf{j}} - \frac{\partial V}{\partial z}\,\vec{\mathbf{k}} = -\vec{\nabla} V$$

où $\vec{\mathbf{E}}_P$ est le vecteur champ électrique au point *P* en volts par mètre,
$\frac{\partial V}{\partial x}, \frac{\partial V}{\partial y}, \frac{\partial V}{\partial z}$ sont les dérivées partielles du potentiel par rapport aux variables *x,y,z* en volts par mètre,
$\vec{\mathbf{i}}, \vec{\mathbf{j}}, \vec{\mathbf{k}}$ sont les vecteurs unitaires pour les axes *x,y,z*
et $\vec{\nabla} V$ est le (vecteur) gradient du potentiel électrique en volts par mètre.

Par exemple, le potentiel électrique au bout d'une tige rectiligne est donné par



$$V(x) = \frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0}\ln\left(\frac{x+\ell}{x}\right)$$

Ainsi, le champ électrique au bout de la tige est donnée par

$$E(x) = -\frac{d}{dx}\big(V(x)\big) = -\frac{d}{dx}\left\{\frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0}\ln\left(\frac{x+\ell}{x}\right)\right\}$$

Avec un changement de variable, on a

$$u = \frac{x+\ell}{x} \quad \Rightarrow \quad E(x) = -\frac{d}{dx}\left\{\frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0}\ln u\right\} = -\frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0}\left\{\frac{1}{u}\right\}\frac{du}{dx}$$

$$\frac{du}{dx} = \frac{d}{dx}\left(\frac{x+\ell}{x}\right) = -\frac{\ell}{x^2} \quad \Rightarrow \quad E(x) = -\frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0}\left\{\frac{x}{x+\ell}\right\}\left(-\frac{\ell}{x^2}\right) = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{x\,(x+\ell)}\right)$$

9. Le potentiel électrique dans une région de l'espace est décrit par l'expression

$$V(x,y,z) \;=\; 100\,x \;+\; 125\,y$$

où *V(x,y,z)* **s'exprime en volts**
et *x,y* **s'expriment en mètres.**

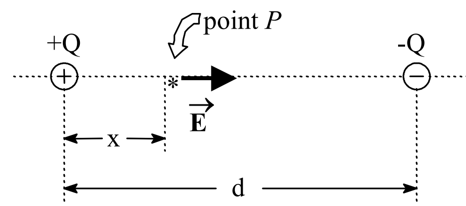
a) Quelle est la composante x du champ électrique ?

b) Quelle est la composante y du champ électrique ?

c) Quelle est la composante z du champ électrique ?

10. Soit un potentiel électrique sur la droite joignant deux particules portant des charges +*Q* et -*Q* est décrit par l'expression

$$V = k\,|\,Q\,|\left(\frac{1}{x} - \frac{1}{d - x}\right)$$



où la charge positive est placée à l'origine et où la position *x* est telle que 0 < *x* < *d*.

a) Quelle est l'expression de la composante x du champ électrique sur la droite joignant les deux particules ?

b) Quelle est l'expression de la composante y du champ électrique sur la droite joignant les deux particules ?

c) Quelle est l'expression de la composante z du champ électrique sur la droite joignant les deux particules ?

Réponses

1. a) +5 μJ b) +0,083 V c) 0,139 V/m
2. a) 39,0 V b) +1,75 mJ c) 1,75 mJ
3. a) -2,925 mJ b) +2,925 mJ c) 5,269 mJ d) 37,5 cm/s
4. a) $+7{,}2\cdot 10^{6}$ V b) $-7{,}2\cdot 10^{6}$ V c) -81 J
5. a) -900 J b) -450 J c) +450 J
6. a) +375 kV b) 1,50 J c) 1,50 J
7. a) $V = \dfrac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0}\ \ln\left(\dfrac{d+\ell}{d}\right)$ b) 5,788 MV
8. a) $V = \dfrac{\lambda\ a}{2\varepsilon_0\sqrt{x^2 + a^2}}$ b)$12{,}59\cdot 10^{6}$ V
9. a) -100 V/m b) -125 V/m c) 0 V/m
10. a) $E_x = k\,|Q|\left(\dfrac{1}{x^2} + \dfrac{1}{(d - x)^2}\right)$ b) $E_y = 0$ c) $E_z = 0$