# CH 4 LE CHAMP ÉLECTRIQUE

## CONSTANTES UTILES

$e = 1{,}602 \times 10^{-19}$ C

$k = 8{,}988 \times 10^{9} \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{C^2}}$

$\varepsilon_0 = 8{,}854 \times 10^{-12} \frac{\mathrm{C^2}}{\mathrm{N \cdot m^2}}$

## ÉQUATIONS LIÉES AU CHAPITRE :

$$\boxed{\vec{F}_e = q\vec{E} = m\vec{a}}$$

$$\boxed{E = \frac{k|q|}{r^2}} \qquad \boxed{E = \frac{2k|\lambda|}{R}}$$

$$\boxed{\lambda = \frac{q}{l}} \qquad \boxed{\sigma = \frac{q}{A}}$$

$$\boxed{x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2} \qquad \boxed{v = v_0 + at}$$

$$\boxed{v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)}$$

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

## 4.1 LE CHAMP ÉLECTRIQUE

**4.1** Exercice : La charge sur l'axe solution ▶

Une charge seule de +3,75 µC est située à l'origine.

a) Quelle est l'intensité du champ électrique sur l'axe $x$ à $x$ = 4 cm?
b) Dans quelle direction le champ électrique est-il dirigé?

**4.2** Exercice : La charge dans l'espace solution ▶

Une particule chargée de –0,25 mC se trouve à la position $(3\vec{\imath} - 2\vec{\jmath})$ cm.

a) Quelle est l'intensité du champ électrique à l'origine?
b) Quelle est l'orientation du champ électrique à l'origine?
c) Quelle est l'intensité du champ électrique à au point P défini par $\vec{r}_P = (4\vec{\imath} + 1\vec{\jmath})$ cm?
d) Quelle est l'orientation du champ électrique au point P?
e) Exprimez le vecteur champ électrique au point P en coordonnées cartésiennes. $(E_x\vec{\imath}+E_y\vec{\jmath})$
f) Quel serait le vecteur force sur une charge de –0,10 mC placé au point P?

**4.3** Exercice : Le champ diminue solution ▶

Démontrez qu'en doublant la distance d'éloignement à la charge ponctuelle, l'intensité du champ électrique décroît d'un facteur 4.

**4.4** Question : La direction du champ solution ▶

Déterminez l'orientation du champ électrique qui produirait les effets suivants :

a) Un électron immobile se met en mouvement vers le haut;
b) Un proton en mouvement vers l'est se déplace de plus en plus vite;
c) Noyau d'hélium en mouvement vers l'axe $x^+$ ralentit et finit par s'immobiliser;
d) Un électron se déplace à vitesse constante vers l'axe $y^+$.

**4.5** Question : L'uniformité solution ▶

Vrai ou Faux : le champ électrique généré par un ensemble de trois charges ponctuelles peut être uniforme pour certaines zones autour des charges (autre qu'à l'infini). Expérimentez avec ce simulateur (clic droit pour ajouter une charge).

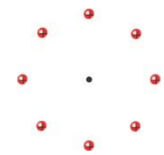
**4.6** Exercice : Équilibre à l'origine solution ▶

Dans un espace à deux dimensions, une charge de 1,00 µC se trouve en $(1\vec{\imath} + 4\vec{\jmath})$ cm et une charge de –3,50 µC en $3\vec{\imath}$ cm.

a) Déterminez l'intensité du champ électrique en vigueur à l'origine?
b) Quelle est l'orientation du champ à l'origine?
c) À quel endroit faudrait-il placer une charge de +3,00 µC pour que le champ à l'origine soit nul? (Donner en coordonnées cartésiennes).

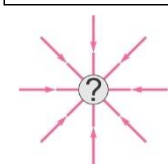
**4.7** Exercice : Le champ centre solution ▶

Autour d'un point donné, on place 8 charges positives identiques de 1,50 µC, également réparties sur un cercle de 5 cm de rayon. Quel est l'intensité du champ électrique au point central?



## 4.2 LES LIGNES DE CHAMP

**4.8** Exercice : Le signe de la charge solution ▶

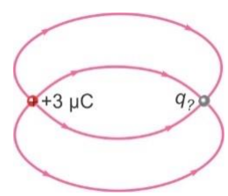



Déterminez le signe de la charge produisant les lignes de champ illustrées

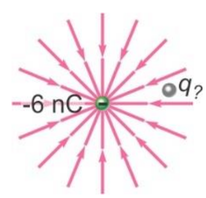
**4.9** Question : La charge inconnue solution ▶

Déterminez la charge inconnue de la particule $q_?$ dans chacun des cas suivants, à partir de la valeur de la charge connue.

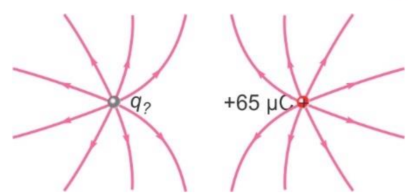
a)



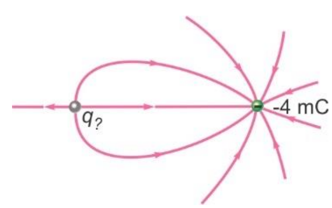

b)



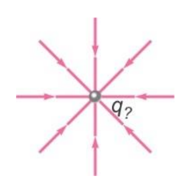

c)



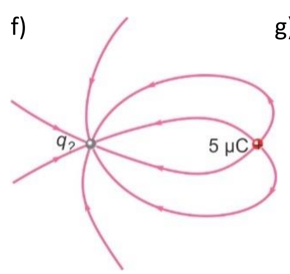

d)



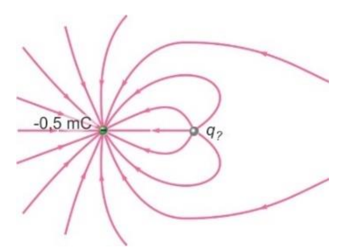

e)




f)

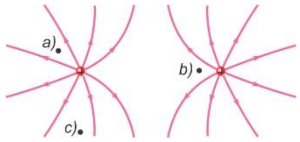



g)

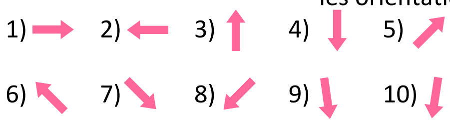



**4.1** - a) $2{,}11\times10^7\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$ — b) Vers $x^+$ — **4.2** - a) $1{,}73\times10^9\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$ — b) –33,7° — c) $2{,}25\times10^9\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$ — d) 252° — e) $(-0{,}711\vec{\imath} - 2{,}13\vec{\jmath})\times10^9\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$ — f) $(0{,}711\vec{\imath} + 2{,}13\vec{\jmath})\times10^5$ N
**4.3** - $E_2/E_1 = 1/4$ — **4.4** - a) Vers le bas — b) Vers l'est — c) Vers $x^-$ — d) ∅ — **4.5** - Faux — **4.6** - a) $3{,}41\times10^7\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$ — b) –8,66° — c) $(27{,}8\vec{\imath} - 4{,}24\vec{\jmath})$ mm
**4.7** - $E = 0$ — **4.8** - $q < 0$ — **4.9** - a) –3 µC — b) $q = 0$ — c) +65 µC — d) +1,78 mC — e) $q < 0$ — f) –10 µC — g) +0,156 mC

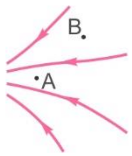
**4.10** Exercice : Entre les lignes solution ►




Sur la figure ci-contre, déterminez l'orientation du champ électrique aux points a), b) et c) à partir des lignes de champs avoisinantes, parmi les orientations suivantes :




**4.11** Question : Le plus gros champ solution ►




Sur la figure ci-contre illustrant un champ électrique non uniforme produit par une source inconnue, déterminez auquel des points A ou B le module champ est le plus élevé.

**4.12** Question : Uniforme ou pas solution ►

Vrai ou Faux : Si on s'éloigne suffisamment d'une charge ponctuelle, le champ observé sera pratiquement uniforme.

## 4.3 LE CHAMP ÉLECTRIQUE GÉNÉRÉ PAR UNE DISTRIBUTION CONTINUE DE CHARGE

**4.13** Exercice : La charge linéique inconnue solution ►

À 13,5 cm d'une tige rectiligne infinie uniformément chargée prévaut un champ électrique de $1{,}40 \times 10^5\ \frac{N}{C}$ dirigé vers la tige. Quelle est la charge linéique de cette tige?

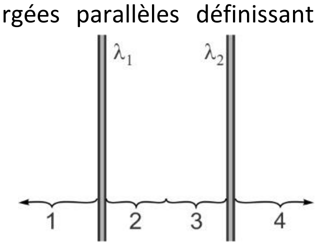
**4.14** Exercice : Les deux tiges solution ►

Deux tiges rectilignes infinies uniformément chargées sont placées verticalement à 25 cm l'une de l'autre. Celle de gauche a une charge linéique $\lambda_1 = 15$ µC/m et celle de droite, $\lambda_2 = -10$ µC/m. En considérant négatif un champ dirigé vers la gauche, déterminez le champ électrique :

a) 10 cm à gauche de la tige 1;
b) à mi-chemin entre les deux tiges;
c) 10 cm à droite de la tige 2.

**4.15** Question : Les quatre zones solution ►

Soit deux longues tiges chargées parallèles définissant quatre zones dans le plan qu'elles forment. Déterminez dans quelle zone trouvera-t-on un endroit où le champ électrique est nul dans les conditions suivantes :




a) $0 < \lambda_2 < \lambda_1$
b) $\lambda_2 < 0 < \lambda_1$ et $|\lambda_2| < |\lambda_1|$
c) $\lambda_2 < \lambda_1 < 0$

**4.16** Exercice : La force des tiges solution ►

Deux très longues tiges chargées sont placées respectivement sur l'axe des $x$ et sur l'axe des $y$, avec $\lambda_x = 50$ nC/m et $\lambda_y = -75$ nC/m. Déterminez la force (le vecteur) que subirait une particule chargée de 10 µC se trouvant à la position $(40\vec{\imath} + 50\vec{\jmath})$ cm.

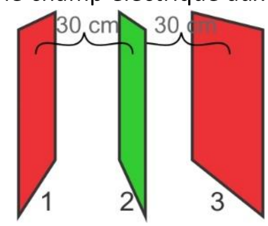
**4.17** Exercice : La plaque inconnue solution ►

Une plaque plane infinie porte une charge inconnue qu'on souhaite déterminer. On constate qu'à 20 cm de cette plaque règne un champ électrique de 150 N/C, dirigé vers la plaque.

a) Quelle est la charge surfacique de cette plaque?
b) Quel est alors le module du champ électrique à 10 cm de la même plaque?

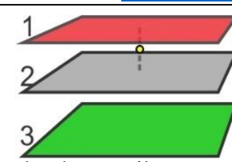
**4.18** Exercice : Les trois plaques solution ►

Soit 3 plaques planes infinies uniformément chargées et placées parallèlement côte à côte à 30 cm de distance, comme sur la figure ci-contre. Leurs charges surfaciques sont $\sigma_1 = 300$ µC/m², $\sigma_2 = -250$ µC/m² et $\sigma_3 = 180$ µC/m². En considérant positif un champ vers la droite et négatif un champ vers la gauche, déterminez le champ électrique aux endroits suivants :



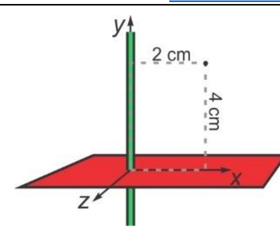

a) à gauche de la plaque 1;
b) entre les plaques 1 et 2;
c) entre les plaques 2 et 3;
d) à droite de la plaque 3.
e) Si on place entre les plaques 1 et 2 une particule chargée négativement, dans quelle direction accélèrera-t-elle?

**4.19** Exercice : La troisième plaque solution ►




Trois PPIUC sont disposées parallèlement comme sur la figure ci-contre. Pour deux d'entre elles, la charge surfacique est connue : $\sigma_1 = 100$ nC/m² et $\sigma_3 = -150$ nC/m². Déterminez la charge surfacique de la plaque 2 pouvant faire en sorte que le champ électrique sera nul entre les plaques 1 et 2 (voir le point identifié sur la figure).

**4.20** Exercice : Plaque et tige solution ►

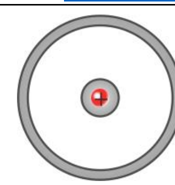



Une PPIUC ($\sigma = 12{,}0$ µC/m²) se trouve dans le plan $xz$ et une TRIUC ($\lambda = -350$ nC/m) se trouve sur l'axe $y$.

a) Déterminez le vecteur champ électrique en un point situé en $(2\vec{\imath}+4\vec{\jmath})$ cm.
b) Déterminez le module de ce champ résultant.
c) Déterminez l'orientation de cette force dans le plan $xy$.

## 4.4 CHAMP ÉLECTRIQUE ET CONDUCTEURS

**4.21** Exercice : La bille Physique solution ►



Une bille métallique portant une charge de 60 nC se trouve au centre d'une sphère métallique creuse ne portant aucune charge nette. Le rayon extérieur de la coquille est de 25 cm.

a) Déterminez la charge qui s'accumulera sur la surface intérieure de la coquille.
b) Déterminez la charge qui s'accumulera sur la surface extérieure de la coquille.
c) Le champ à l'intérieur de la sphère creuse (et autour de la bille) est-il uniforme?
d) Déterminez le champ électrique à 30 cm du centre du système (donnez une valeur négative si le champ est dirigé vers le centre).

**4.10** - a) #6 — b) #2 — c) #10 — **4.11** - $E_A > E_B$ — **4.12** - Vrai — **4.13** - −1,05 µC/m — **4.14** - a) −2,18×10⁶ N/C — b) 3,60×10⁶ N/C — c) −1,03×10⁶ N/C

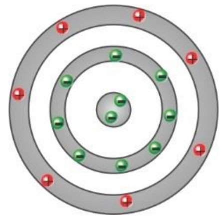
**4.15** - a) 3 — b) 4 — c) 2 — **4.16** - $(-33{,}7\vec{\imath}+18{,}0\vec{\jmath})\times10^{-3}$ N — **4.17** - a) $2{,}66\times10^{-9}$ C/m² — b) 150 N/C

**4.18** - a) $-1{,}30\times10^{7}$ N/C — b) $2{,}09\times10^{7}$ N/C — c) $-7{,}34\times10^{6}$ N/C — d) $1{,}30\times10^{7}$ N/C — e) Vers la gauche — **4.19** -250 nC/m²

**4.20** - a) $(-315\vec{\imath}+678\vec{\jmath})$ kN/C — b) 747 kN/C — c) 115° — **4.21** - a) −60,0 nC — b) +60,0 nC — c) Non uniforme — d) 5 992 N/C

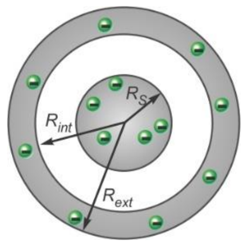
**4.22** Exercice : La coquille double Physique solution ▶

Deux coquilles conductrices concentriques englobent une bille métallique portant –1 µC. La coquille intermédiaire porte une charge de –2 µC, et la coquille extérieure +3 µC. Déterminez la charge de la face extérieure de la coquille extérieure



**4.23** Exercice : La coquille chargée Physique solution ▶

Dans la configuration illustrée ci-contre, la sphère centrale ($R_S$ = 2,5 cm) porte une charge nette de –5 µC et la coquille ($R_{int}$ = 6 cm, $R_{ext}$ = 7,5 cm) porte une charge nette de –8 µC. Après déplacement des charges vers un état d'équilibre :

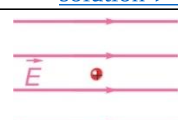



a) déterminez la charge surfacique de la sphère;
b) déterminez la charge qui s'accumulera sur la surface intérieure de la coquille;
c) déterminez le champ électrique à 4,5 cm du centre du système (donnez une valeur négative si le champ est dirigé vers le centre);
d) déterminez la charge surfacique de la face interne de la coquille;
e) déterminez la charge qui s'accumulera sur la surface extérieure de la coquille.
f) Le champ à l'extérieur de la coquille est-il dirigé vers le centre ou vers l'extérieur?
g) Déterminez la charge surfacique de la face externe de la coquille.
h) Déterminez le champ électrique à 7 cm du centre du système.
i) Déterminez le champ électrique à 3 cm de la face extérieure de la coquille.

## 4.5 MOUVEMENT D'UNE PARTICULE CHARGÉE DANS UN CHAMP ÉLECTRIQUE UNIFORME

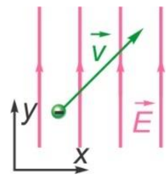
**4.24** Exercice : La poussière accélérée solution ▶

Une particule chargée de 50 mg et portant +2 nC est placée immobile dans un champ uniforme de 150 N/C.

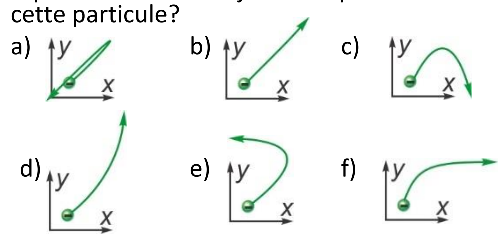



a) Quel est le module de la force agissant sur la particule?
b) Quelle sera le module de son accélération?
c) Après quelle distance aura-t-elle atteint la vitesse de 1 km/h?

**4.25** Exercice : La trajectoire solution ▶

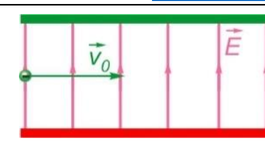



Une particule chargée négativement est projetée à 45° dans le plan *xy* dans un espace où règne un champ électrique orienté vers *y* positif. Quelle illustration représente une trajectoire possible de cette particule?




**4.26** Exercice : La déviation Physique solution ▶

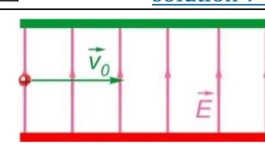
Deux plaques portant des charges de signes contraires et disposées horizontalement créent entre elles un champ électrique uniforme de 1 250 N/C orienté vers le haut (voir figure ci-contre), dans un dispositif où l'air est entièrement retiré. Les plaques sont distantes de 1 cm et longues de 5 cm. Un électron ($m_e$ = 9,109×10$^{-31}$ kg) est projeté horizontalement à mi-chemin entre les plaques à la vitesse de 4,50×10$^6$ m/s.




a) Déterminez le module de la force que l'électron subira dans ce champ.
b) Cette force sera-t-elle dirigée vers le haut ou vers le bas?
c) Quel est le vecteur accélération de l'électron durant son déplacement entre les plaques?
d) Combien de temps après son entrée entre les plaques l'électron touchera-t-il l'une des plaques?
e) Quelle distance horizontale parcourra-t-il avant de toucher à l'une des plaques?
f) Quelle sera l'orientation de sa vitesse au moment où il touchera une plaque?

**4.27** Exercice : La déviation II Physique solution ▶

Dans le montage ci-contre, le champ entre les deux plaques chargées est de 5 kN/C et est orienté vers le haut. La distance entre les plaques est de 5 mm et elles sont longues de 2 cm. On projette horizontalement une particule $\alpha$ (un noyau d'hélium) à mi-chemin entre les deux plaques ($m_\alpha$ = 6,644×10$^{-27}$ kg). Déterminez la vitesse minimale permettant à la particule $\alpha$ d'émerger de l'espace entre les plaques sans en toucher une.




$\boxed{4.22}$- $q$ = 0 — $\boxed{4.23}$- a) –637 µC/m² — b) 5,00 µC — c) –2,22×10$^7$ N/C — d) 111 µC/m² — e) –13,0 µC — f) Vers le centre — g) –184 µC/m² — h) 0 — i) –1,06×10$^7$ N/C

$\boxed{4.24}$- a) 300 nN — b) 6,00×10$^{-3}$ m/s² — c) 6,43 m — $\boxed{4.25}$- c)

$\boxed{4.26}$- a) 2,00×10$^{-16}$ N — b) Vers le bas — c) –2,20×10$^{-14}$ m/s² — d) 6,74 ns — e) 3,04 cm — f) θ = –18,2° — $\boxed{4.27}$- 1,39×10$^5$ m/s

Équations Sect 4.1, #1 à 7 Sect 4.2, #8 à 12 Sect 4.3, #13 à 20 Sect 4.4, #21 à 23 Sect 4.5, #24 à 27

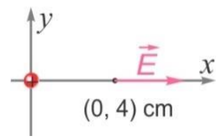
# CH 4 LE CHAMP ÉLECTRIQUE

## 4.1 LE CHAMP ÉLECTRIQUE

**4.1** Solution : La charge sur l'axe retour à la question ▲

a) $E$ = 2,11×10$^7$ N/C

Le point étudié se trouve à 4 cm de la charge ponctuelle. À partir de l'équation du module du champ électrique produit par une charge ponctuelle est :




$$E = \frac{k|q|}{r^2} = \frac{\left(8{,}988\times10^9\,\frac{\mathrm{N\cdot m^2}}{\mathrm{C^2}}\right)\times|3{,}75\times10^{-6}\ \mathrm{C}|}{(0{,}04\ \mathrm{m})^2} = \mathbf{2{,}11\times10^7\ \frac{N}{C}}$$

b) Vers $x^+$

Puisque la charge à l'origine est positive, le champ qu'elle produit dans la zone à sa droite fuit cette charge, et est donc dirigé vers la direction positive de l'axe $x$.

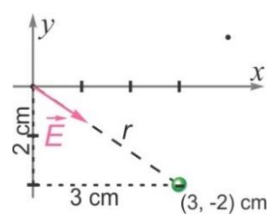
retour à la question ▲

**4.2** Solution : La charge dans l'espace retour à la question ▲

a) $E$ = 1,73×10$^9$ N/C

La charge considérée étant négative, le champ électrique qu'elle produit autour est dirigé vers elle (voir figure ci-contre).

Pour déterminer l'intensité du champ à l'origine, on devra d'abord déterminer la distance entre la charge et l'origine :




$$r = \sqrt{(3\ \mathrm{cm})^2 + (2\ \mathrm{cm})^2} = \sqrt{13}\ \mathrm{cm}$$

Le champ électrique est donc :

$$E = \frac{k|q|}{r^2} = \frac{\left(8{,}988\times10^9\,\frac{\mathrm{N\cdot m^2}}{\mathrm{C^2}}\right)\times|-0{,}25\times10^{-3}\ \mathrm{C}|}{\left(\sqrt{13}\times10^{-2}\ \mathrm{m}\right)^2} = \mathbf{1{,}73\times10^9\ \frac{N}{C}}$$

b) θ = –33,7°

L'orientation du champ électrique n'est pas une orientation pure du plan cartésien. L'illustration du vecteur champ électrique en a) montre une orientation dans le 4$^e$ cadran. À partir simplement de la position de la charge négative, on peut calculer l'orientation du champ :

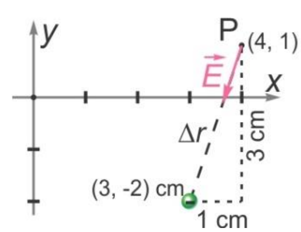
$$\theta = \tan^{-1}\frac{y}{x} = \; = \tan^{-1}\frac{-2\ \mathrm{cm}}{3\ \mathrm{cm}} = \mathbf{-\,33{,}7°}$$

*C'est bien un angle dans le 4$^e$ cadran, mais on peut aussi l'exprimer comme un angle positif : $-33{,}7° + 360° = 326°$.

c) $E$ = 2,25×10$^9$ N/C

La charge considérée étant négative, le champ électrique qu'elle produit au point P est dirigé vers elle (voir figure ci-contre).

On doit d'abord déterminer la distance entre la charge et le point P :




$$r = \sqrt{(1\ \mathrm{cm})^2 + (3\ \mathrm{cm})^2} = \sqrt{10}\ \mathrm{cm}$$

Le champ électrique est donc :

$$E = \frac{k|q|}{r^2} = \frac{\left(8{,}988\times10^9\,\frac{\mathrm{N\cdot m^2}}{\mathrm{C^2}}\right)\times|-0{,}25\times10^{-3}\ \mathrm{C}|}{\left(\sqrt{10}\times10^{-2}\ \mathrm{m}\right)^2} = \mathbf{2{,}25\times10^9\ \frac{N}{C}}$$

d) $\theta_P = 252°$

L'illustration du vecteur champ électrique en c) montre une orientation dans le 3$^e$ cadran, à partir du point P. Le vecteur $\Delta r$ a pour coordonnées $(-1\vec{\imath} - 3\vec{\jmath})$ cm. À partir de ces coordonnées, on peut calculer l'orientation du champ :

$$\theta_P = \tan^{-1}\frac{y}{x} = \; = \tan^{-1}\frac{-3\ \mathrm{cm}}{-1\ \mathrm{cm}} = 71{,}6°$$

Cette orientation trouvée est située dans le premier cadran. On doit donc appliquer une correction en ajoutant 180° à cet angle : $71{,}6° + 180° = \mathbf{252°}$.

retour à la question ▲
retour à la question ▲
retour à la question ▲

retour à la question ▲

e) $\vec{E}_P = (-0{,}711\vec{\imath} - 2{,}13\vec{\jmath}) \times 10^9\ \frac{\text{N}}{\text{C}}$

Pour exprimer le champ magnétiques en coordonnées cartésiennes, on doit calculer tour à tour ses composantes, à partir des module et orientation calculés en c) et d) :

$$E_{Px} = E_P \times \cos\theta_P = \left(2{,}25 \times 10^9\ \tfrac{\text{N}}{\text{C}}\right) \times \cos 252° = -0{,}711 \times 10^9\ \tfrac{\text{N}}{\text{C}}\ ^{***}$$

$$E_{Py} = E_P \times \sin\theta_P = \left(2{,}25 \times 10^9\ \tfrac{\text{N}}{\text{C}}\right) \times \sin 252° = -2{,}13 \times 10^9\ \tfrac{\text{N}}{\text{C}}$$

*** Les chiffres significatifs 0,711 exigent un calcul précis avec les valeurs exactes de champ et d'angle (2,247…×$10^9$ et 251,565…°)

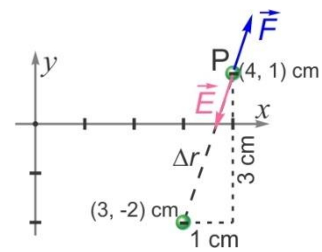
Le vecteur champ électrique est donc :

$$\vec{E}_P = (\mathbf{-0{,}711}\vec{\imath} - \mathbf{2{,}13}\vec{\jmath}) \times \mathbf{10^9}\ \tfrac{\text{N}}{\text{C}}$$

f) $\vec{F} = (0{,}711\vec{\imath} + 2{,}13\vec{\jmath}) \times 10^5\ \text{N}$

La force sur une particule chargée soumise à un champ est donnée par :

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




Puisque la seconde charge est également négative, les deux se repousseront. On devrait donc trouver une force sur la nouvelle charge à l'encontre de la première charge. Vu autrement, le signe négatif dans la valeur de la charge fera en sorte que la force sera en direction opposée au champ.

Le vecteur champ est celui trouvé en e) et la charge est une charge négative de –0,10×$10^{-3}$ C, donc :

$$\vec{F} = q\vec{E}_P = (-0{,}10 \times^{-3}\ \text{C}) \times (-0{,}711\vec{\imath} - 2{,}13\vec{\jmath}) \times 10^9\ \tfrac{\text{N}}{\text{C}} = (\mathbf{0{,}711}\vec{\imath} + \mathbf{2{,}13}\vec{\jmath}) \times \mathbf{10^5\ N}$$

retour à la question ▲

## 4.3 Solution : Le champ diminue

retour à la question ▲

retour à la question ▲

$E_2/E_1 = 1/4$

On veut comparer l'intensité du champ électrique à deux distances (posons $r_1$ et $r_2$) d'une charge ponctuelle telles que $r_2 = 2r_1$. Si on écrit d'abord l'équation du module du champ électrique pour ces deux distances :

$$E_1 = \frac{k|q|}{r_1^2} \qquad \text{et} \qquad E_2 = \frac{k|q|}{r_2^2}$$

Le facteur de variation du champ électrique entre les deux distances s'obtient en faisant le rapport des deux champs électriques :

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\left(\frac{k|q|}{r_2^2}\right)}{\left(\frac{k|q|}{r_1^2}\right)}$$

En simplifiant et en substituant $r_2$ par $2r_1$ :

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{k|q| \cdot r_1^2}{k|q| \cdot r_2^2} = \frac{r_1^2}{r_2^2} = \frac{r_1^2}{(2r_1)^2} = \frac{r_1^2}{4r_1^2} = \mathbf{\frac{1}{4}}$$

On constate donc que le module du champ électrique diminuera d'un facteur 4 si on s'éloigne de la charge d'un facteur 2.

retour à la question ▲

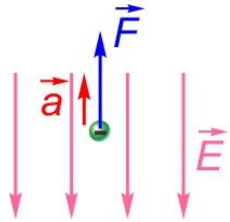
## 4.4 Solution : La direction du champ

retour à la question ▲

a) Vers le bas

Si l'électron est d'abord immobile et se met à se déplacer vers le haut, il accélère donc vers le haut, et donc subit une force vers le haut. À partir de l'équation qui établit un lien entre le champ électrique et la force, on constate qu'une charge négative subira une force en sens opposé à celui du champ électrique :

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



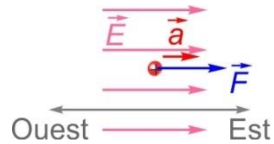

Vu autrement, on peut isoler $\vec{E}$ dans l'équation précédente pour obtenir :

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

Une charge négative ($q < 0$) inversera le signe des composantes du champ par rapport à celui des composantes de la force.

En l'occurrence, une force dirigée vers le haut signifie donc un champ dirigé vers le bas.

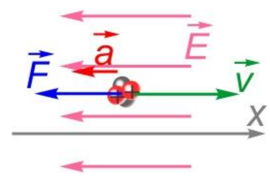
b) Vers l'est




Le proton, chargé positivement, accélère nécessairement (vers l'est), s'il s'y dirige de plus en plus vite.

Les charges positives subissent une force dans la même direction que le champ électrique. Le champ doit donc être dirigé dans la même direction que l'accélération, donc vers l'est, si le proton accélère dans cette direction.

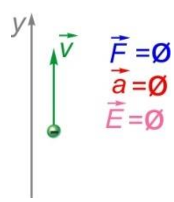
c) Vers l'axe *x* négatif




Un noyau d'hélium est formé de deux protons et deux neutrons, donc chargé positivement. S'il ralentit dans son mouvement vers l'axe $x^+$, c'est qu'il subit une force en direction inverse à sa vitesse, donc vers $x^-$ (voir figure ci-contre).

Puisque les charges positives subissent une force dirigée dans la même direction que le champ électrique, on déduit que le champ électrique est dirigé lui aussi vers l'axe $x^-$.

d) Aucun champ électrique




Si la vitesse d'une particule est constante, son accélération est nulle et elle ne subit donc aucune force. Et comme l'électron est électriquement chargé, tout champ électrique appliquerait sur lui une force électrique. Il ne doit donc y avoir aucun champ électrique à son emplacement pour que sa vitesse soit constante.

retour à la question ▲

## 4.5 Solution : L'uniformité

retour à la question ▲

Faux : le champ ne peut être uniforme en aucun point

À partir de tout point dans l'environnement des trois charges, tout déplacement dans n'importe quelle direction implique une variation de distance avec chacune des trois charges, donc des variations du module de chaque champ, et donc du champ résultant.

Aussi, l'orientation des champs individuels varie et l'orientation du champ résultant ne peut pas non plus être constante sur une zone étendue.

La variations des module et orientation du champ d'un point à un autre définit un champ électrique non uniforme.

retour à la question ▲

retour à la question ▲

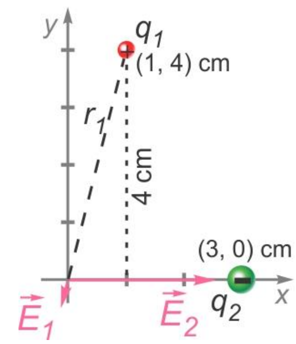
retour à la question ▲

**4.6** Solution : Équilibre à l'origine retour à la question ▲

retour à la question ▲

a) $E$ = 3,41×10$^7$ N/C

Le champ en vigueur à l'origine est formé par la contribution des deux charges. Pour en calculer le module, on doit nécessairement calculer ses composantes, ce qui nécessite qu'on connaisse les composantes de chacun des deux champs. On va donc commencer par les calculer séparément (voir figure ci-contre).




Pour la charge $q_1$ = +1,00 µC, on calcule d'abord la distance $r_1$ qui permettra de calculer le champ :

$$r_1 = \sqrt{(1\text{ cm})^2 + (4\text{ cm})^2} \quad = \quad \sqrt{17}\text{ cm}$$

$$E_1 = \frac{k|q_1|}{r_1^2} \quad = \quad \frac{\left(8{,}988\times10^9\,\frac{\text{N}\cdot\text{m}^2}{\text{C}^2}\right)\times|1{,}00\times10^{-6}\text{ C}|}{\left(\sqrt{17}\times10^{-2}\text{ m}\right)^2} \quad = \quad 5{,}29\times10^6\,\frac{\text{N}}{\text{C}}$$

On aura besoin des composantes cartésiennes de ce champ pour calculer le champ résultant. Pour calculer ses composantes, on doit connaître son orientation. À partir des coordonnées de la charge $q_1$ :

$$\theta_1 = \tan^{-1}\frac{y}{x} \quad = \quad = \tan^{-1}\frac{4\text{ cm}}{1\text{ cm}} \quad = \quad 76{,}0°$$

Cette orientation trouvée est située dans le premier cadran alors que la charge $q_1$, positive, crée à l'origine un champ dirigé logiquement dans le 3$^e$ cadran (pour fuir la charge). On doit donc appliquer une correction en ajoutant 180° à cet angle :

$$76{,}0° + 180° = 256°$$

On peut alors calculer les composantes du champ $\vec{E}_1$ :

$$E_{1x} = E_1 \times \cos\theta_P \quad = \quad 5{,}29\times10^6\,\frac{\text{N}}{\text{C}} \times \cos 256° \quad = \quad -1{,}28\times10^6\,\frac{\text{N}}{\text{C}}$$

$$E_{1y} = E_1 \times \sin\theta_P \quad = \quad 5{,}29\times10^6\,\frac{\text{N}}{\text{C}} \times \sin 256° \quad = \quad -5{,}13\times10^6\,\frac{\text{N}}{\text{C}}$$

retour à la question ▲

Effectuons les mêmes calculs pour le champ produit par la charge $q_2$ de –3,50 µC. Les calculs sont plus simples puisque la distance correspond à la coordonnée $x$ de la charge, et l'orientation du champ est parallèle à l'axe $x$, dirigé vers la charge $q_2$ ($\theta_2$ = 0°). Le module du champ est donc équivalent à sa composante $x$ :

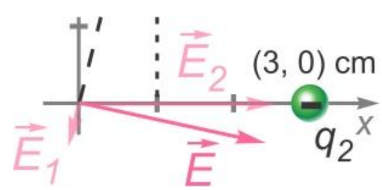
$$E_{2x} = E_2 = \frac{k|q_2|}{r_2^2} \quad = \quad \frac{\left(8{,}988\times10^9\,\frac{\text{N}\cdot\text{m}^2}{\text{C}^2}\right)\times|-3{,}50\times10^{-6}\text{ C}|}{(3\times10^{-2}\text{ m})^2} \quad = \quad 3{,}50\times10^7\,\frac{\text{N}}{\text{C}}$$

$$E_{2y} = 0$$

On peut alors calculer les composantes $x$ et $y$ du champ résultant :

$$E_x = E_{1x} + E_{2x} \quad = \quad -1{,}28\times10^6\,\frac{\text{N}}{\text{C}} + 3{,}50\times10^7\,\frac{\text{N}}{\text{C}} \quad = \quad 3{,}37\times10^7\,\frac{\text{N}}{\text{C}}$$

$$E_y = E_{1y} + E_{2y} \quad = \quad -5{,}13\times10^6\,\frac{\text{N}}{\text{C}} + 0 \quad = \quad -5{,}13\times10^6\,\frac{\text{N}}{\text{C}}$$



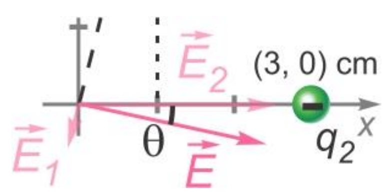

Le module du champ électrique peut maintenant être calculé :

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad = \quad \sqrt{\left(3{,}37\times10^7\,\frac{\text{N}}{\text{C}}\right)^2 + \left(-5{,}13\times10^6\,\frac{\text{N}}{\text{C}}\right)^2} \quad = \quad \mathbf{3{,}41\times10^7\,\frac{N}{C}}$$

retour à la question ▲

b) $\theta_E$ = –8,66°

L'orientation du champ résultant peut être obtenue à partir de ses composantes calculées en a) :



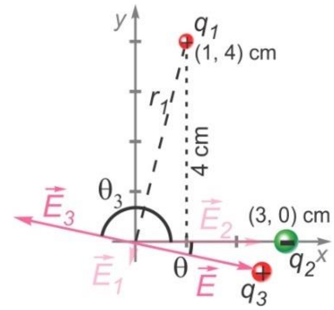

$$\theta_E = \tan^{-1}\frac{E_y}{E_x} \quad = \quad = \tan^{-1}\frac{-5{,}13\times10^6\,\frac{\text{N}}{\text{C}}}{3{,}37\times10^7\,\frac{\text{N}}{\text{C}}} \quad = \quad \mathbf{-8{,}66°}$$

Cette orientation est cohérente avec celle attendue, on n'a donc pas besoin de chercher la deuxième solution de la tangente inverse.

retour à la question ▲

c) $\vec{r}_3 = (27{,}8\vec{\imath} - 4{,}24\vec{\jmath})$ mm

On veut utiliser une charge positive (+3,00 µC) pour annuler à l'origine le champ produit par les deux premières charges. Par l'orientation du champ résultant traité en a) et b), on peut déterminer dans quelle direction la nouvelle charge doit être placée.




Le champ des charges $q_1$ et $q_2$ à l'origine est orienté à –8,66° (réponse en b) ). Pour annuler ce champ, on doit donc produire un champ en direction inverse, c'est-à-dire ayant une orientation de « $\theta_3$ = –8,66° + 180° = 171° ». Aussi, le champ à l'origine a un module de $3{,}41\times10^7$ N/C. On doit donc produire un champ de même module.

Puisque la charge à ajouter est positive et qu'elle produit un champ qui la fuit, pour qu'elle produise à l'origine un champ électrique orienté à 171°, cette charge devra être placée dans le 4e cadran comme sur la figure ci-contre, à –8,66°, sous l'axe des $x$. Voir sur la figure ci-contre le positionnement de la troisième charge et de son champ.

À partir du module du champ à produire, d'abord, on peut déterminer à quelle distance de l'origine doit se trouver la charge $q_3$ :

$$E_3 = \frac{k|q_3|}{r_3^2}$$

retour à la question ▲

$$r_3 = \sqrt{\frac{k|q_3|}{E_3}} = \sqrt{\frac{\left(8{,}988\times10^9\,\frac{\mathrm{N\cdot m^2}}{\mathrm{C^2}}\right)\times|-3{,}00\times10^{-6}\ \mathrm{C}|}{3{,}41\times10^7\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}}} = 0{,}0281\ \mathrm{m}$$

On sait maintenant que la charge $q_3$ doit se trouver à 2,81 cm de l'origine, dans une orientation de –8,66° par rapport à l'origine. On peut alors calculer les coordonnées de la position recherchée :

$$x_3 = r_3 \times \cos\theta_3 = 0{,}0281\ \mathrm{m} \times \cos -8{,}66° = 0{,}0278\ \mathrm{m}$$

$$y_3 = r_3 \times \sin\theta_3 = 0{,}0281\ \mathrm{m} \times \sin -8{,}66° = -0{,}00424\ \mathrm{m}$$

La position de la 3e charge de –3,00µC doit donc être $\vec{r}_3 = \mathbf{(27,8\vec{\imath} - 4,24\vec{\jmath})\ mm}$

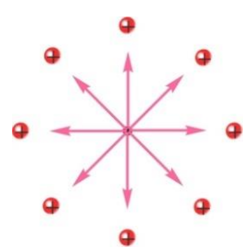
retour à la question ▲

**4.7** Solution : Le champ centre retour à la question ▲

retour à la question ▲

$E$ = 0

Par le principe de symétrie, on peut réaliser que chaque champ produit par l'une des charges est annulé par le champ produit par la charge opposée de l'autre côté du centre, puisqu'elle est à la même distance que la première. Deux charges opposées produisent nécessairement des champs de même grandeur et de sens opposés.



Le champ résultant au point central est donc parfaitement nul.

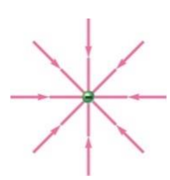
retour à la question ▲

## 4.2 LES LIGNES DE CHAMP

**4.8** Solution : Le signe de la charge retour à la question ▲

La charge est négative

Puisque les lignes de champ sont émises par des charges positives et rejoignent des charges négatives, on déduit nécessairement que la charge au centre de la figure est négative, puisque les lignes de champ illustrées s'y dirigent.



retour à la question ▲

**4.9** Solution :La charge inconnue retour à la question ▲

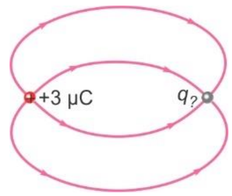
retour à la question ▲

a) $q_?$ = –3 µC

La charge $q_?$ absorbe les lignes de champs, c'est par conséquent une charge négative.

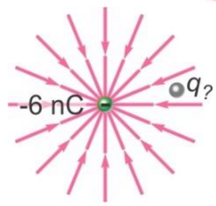
Les deux charges étant connectées au même nombre de lignes de champs, ce sont donc aussi deux charges de même grandeur.

Donc : $q_? = -(+3\ \mu\text{C}) \quad = \quad \mathbf{-\,3\ \mu C}$




b) $q_?$ = 0

La charge $q_?$ n'est connectée à aucune ligne de champ et ne fait pas du tout dévier celles qui passent près d'elle. Sa charge est donc nécessairement nulle (peu importe donc la valeur des charges environnantes).

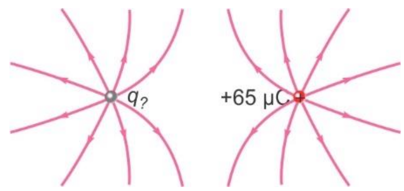



retour à la question ▲

c) $q_?$ = +65 µC

La charge $q_?$ émet les lignes de champs, c'est par conséquent une charge positive.

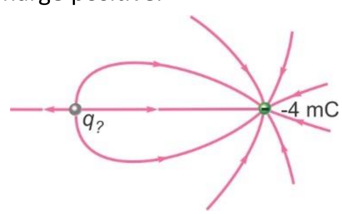
Comme la charge connue en est une de +65 µC et que les deux charges émettent la même quantité de lignes de champ, ce sont donc deux charges de même valeur : $q_?$ = **+65 µC**.




d) $q_?$ = +1,78 mC

La charge $q_?$ émet les lignes de champs, c'est par conséquent une charge positive.

$q_?$ émet 4 lignes de champ sur l'illustration, alors que la charge de –4 mC en absorbe 9. Le rapport des valeurs de $q_?$ sur celle de –4 mC est donc le même :




$$\left|\frac{q_?}{-4\ \text{mC}}\right| = \frac{4}{9}$$

Sachant que $q_? > 0$, on a :

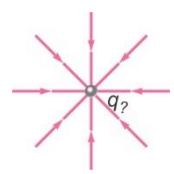
$$q_? = \frac{4}{9} \times (-4\ \text{mC}) \quad = \quad \mathbf{1,\overline{77}\ mC}$$

retour à la question ▲

e) $q_? < 0$

La charge $q_?$ absorbe les lignes de champs, c'est par conséquent une charge négative.

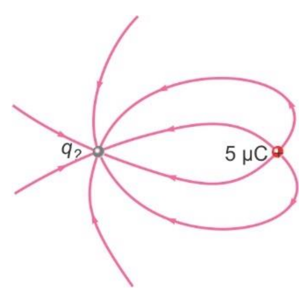
Cependant, puisque cette charge est seule sur l'illustration, on n'a aucun indice pour quantifier sa valeur. On ne peut absolument pas utiliser le fait qu'on aperçoive 8 lignes de champ pour déduire une valeur quelconque. On sait seulement que c'est une valeur négative.




f) $q_?$ = –10,0 µC

La charge $q_?$ absorbe les lignes de champs, c'est par conséquent une charge négative.

$q_?$ absorbe 8 lignes de champ sur l'illustration, alors que la charge de 5 µC en émet 4. Le rapport des valeurs de $q_?$ sur celle de 5 µC est donc le même :




$$\left|\frac{q_?}{5\ \mu\text{C}}\right| = \frac{8}{4} \quad = \quad 2$$

Sachant que $q_? < 0$, on a :

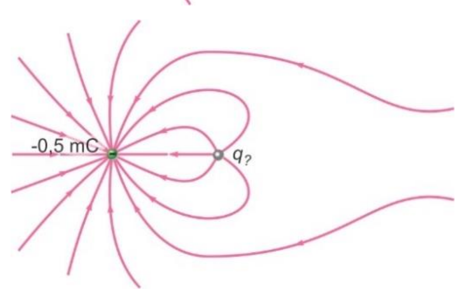
$$q_? = -2 \times (5\ \mu\text{C}) \quad = \quad \mathbf{-\,10,0\ \mu C}$$

retour à la question ▲

g) $q_?$ = 0,156 mC

La charge $q_?$ émet les lignes de champs, c'est par conséquent une charge positive.

$q_?$ émet 5 lignes de champ sur l'illustration, alors que la charge de –0,5 mC en absorbe 16. Le rapport des valeurs de $q_?$ sur celle de –0,5 mC est donc le même :




$$\left|\frac{q_?}{-0,5\ \text{mC}}\right| = \frac{5}{16} \quad = \quad 0,3125$$

Sachant que $q_? > 0$, on a :

$$q_? = 0,3125 \times |-0,5\ \text{mC}| \quad = \quad \mathbf{0,156\ mC}$$

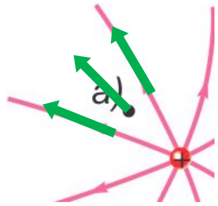
retour à la question ▲

**4.10** Solution : Entre les lignes retour à la question ▲

retour à la question ▲

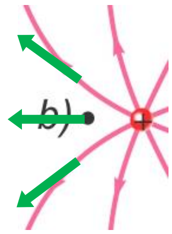
a) #6

À partir de l'orientation des lignes de champ qui passent près du point a), on comprend que le champ est dirigé vers le haut et vers la gauche, comme le vecteur du choix #6.



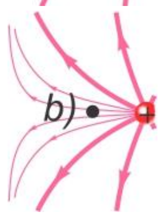

b) #2

Au point b), puisqu'on est encore beaucoup plus près de la charge de droite, son effet est dominant et le champ est dirigé vers la gauche.




Le fait que la charge de gauche entraîne une déviation des lignes de champ émises vers elle n'empêche pas le champ d'être horizontal vers la gauche au point b).

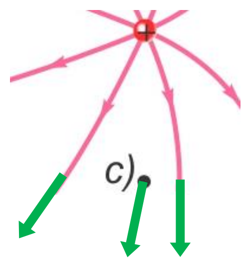
Un traçage plus détaillé (voir figure ci-contre) montrerait davantage de lignes de champ et on validerait plus clairement que le champ est horizontal et non nul jusqu'à la mi-chemin entre les deux charges, où un seul point présente un champ parfaitement nul. Seule l'intensité du champ diminue en se rapprochant du point central.




retour à la question ▲

c) #10

Au point c), les lignes de champ avoisinantes sont dirigées principalement vers le bas, avec une composante horizontale qui varie avec l'emplacement entre les deux lignes voisines.




Puisque la ligne à droite du point c) est dirigée parfaitement vers le bas, la composante horizontale (vers la gauche) ne peut être que de plus en plus grande à mesure qu'on déplace vers la gauche notre analyse du champ. Au point c), il devrait donc y avoir une légère composante de champ vers la gauche, comme le suggère le choix #10.

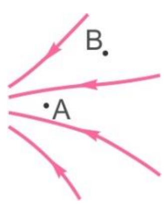
retour à la question ▲

**4.11** Solution : Le plus gros champ retour à la question ▲

retour à la question ▲

$E_A > E_B$

D'une part, on pourrait suspecter la présence d'une charge non illustrée, à gauche de la portion visible du champ. Dans ce scénario, le point A en serait plus proche et observerait un champ plus prononcé.




Mais la constatation la plus fiable pour déterminer l'endroit où le champ est le plus fort est la proximité des lignes de champs, leur densité, ou entassement. Les lignes de champs illustrées de part et d'autre du point A sont moins distantes que celles dans le voisinage du point B. Cette seule mesure est une indication de l'intensité du champ électrique en un point, et alors que le champ est plus intense au point A (module plus élevé).

retour à la question ▲

retour à la question ▲

**4.12** Solution : Uniforme ou pas retour à la question ▲

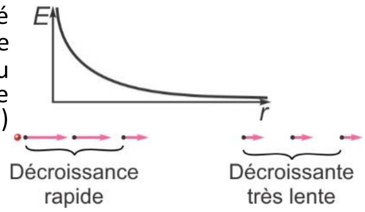
Vrai

Autour d'une charge ponctuelle, le champ est orienté radialement, donc divergent (ou convergent pour une charge négative), tel que sur l'image ci-contre.

Plus on s'éloigne, moins la divergence des lignes de champ sera prononcée (ou même perceptible).

À une distance qui tend vers l'infini, les lignes de champ tendent même à être parallèles.

Par ailleurs, l'intensité du champ décroît avec le carré de la distance, selon l'équation $E = \frac{k|q|}{r^2}$. Le graphique ci-contre montre l'évolution du champ en fonction du rayon. On constate qu'à grande distance de la charge ponctuelle, le champ diminue très peu (en proportion) avec l'éloignement. On peut parler de décroissance rapide près de la charge et décroissance très lente, très loin de la charge.




retour à la question ▲

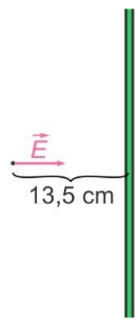
## 4.3 LE CHAMP ÉLECTRIQUE GÉNÉRÉ PAR UNE DISTRIBUTION CONTINUE DE CHARGE

retour à la question ▲

**4.13** Solution : La charge linéique inconnue retour à la question ▲

$\lambda$ = −1,05 µC/m

D'une part, puisque le champ électrique est dirigé vers la tige chargée, elle est nécessairement de charge négative; donc λ < 0). Ensuite, pour calculer la grandeur de cette charge, on utilise l'équation du champ produit par une TRIUC, où on isolera la charge linéique λ :




$$E = \frac{2k|\lambda|}{R}$$

$$|\lambda| = \frac{ER}{2k} = \frac{1{,}40\times10^5\,\frac{\text{N}}{\text{C}}\times0{,}135\text{ m}}{2\times\left(8{,}988\times10^9\,\frac{\text{N}\cdot\text{m}^2}{\text{C}^2}\right)} = 1{,}05\times10^{-6}\,\frac{\text{C}}{\text{m}}$$

Puisqu'on a conclu que cette charge linéique devait être négative, on trouve finalement $\mathbf{-1,05}\,\frac{\mu C}{m}$.

retour à la question ▲

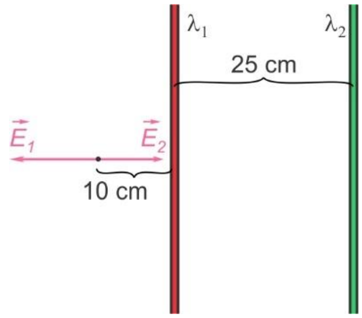
**4.14** Solution : Les deux tiges retour à la question ▲

retour à la question ▲

En chaque point étudié, le champ électrique est la somme des champs électriques de chacune des deux tiges. Chaque champ doit tenir compte de la convention de signes suggérée :

$$E = E_1 + E_2 \quad = \quad \pm\frac{2k|\lambda_1|}{R_1} \quad \pm\frac{2k|\lambda_2|}{R_2} \quad = \quad 2k\left(\pm\frac{|\lambda_1|}{R_1} \pm \frac{|\lambda_2|}{R_2}\right)$$

a) $E = -2{,}18{\times}10^6\ \frac{\text{N}}{\text{C}}$




Pour un point à gauche des deux tiges, la tige 1 chargée positivement produira un champ la fuyant ($\vec{E}_1$ sur la figure ci-contre), donc vers la gauche et négatif, alors que la tige 2 négative produira un champ dirigé vers elle ($\vec{E}_2$), donc vers la droite et positif.

Aussi, un point situé à 10 cm ($R_1$ = 10 cm) à gauche de la tige 1 se trouve à 35 cm de la tige 2 ($R_2$ = 35 cm). Donc :

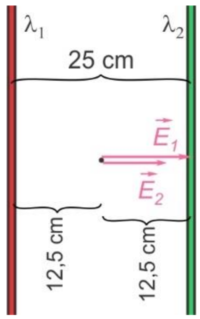
$$E = 2k\left(-\frac{|\lambda_1|}{R_1} + \frac{|\lambda_2|}{R_2}\right)$$

$$E = 2 \times \left(8{,}988 \times 10^9\ \frac{\text{N}\cdot\text{m}^2}{\text{C}^2}\right) \times \left(-\frac{\left|15{\times}10^{-6}\ \frac{\text{C}}{\text{m}}\right|}{0{,}10\ \text{m}} + \frac{\left|-10{\times}10^{-6}\ \frac{\text{C}}{\text{m}}\right|}{0{,}35\ \text{m}}\right)$$

$$E = \mathbf{-2{,}18 \times 10^6\ \frac{N}{C}}$$

retour à la question ▲

b) $E = 3{,}60{\times}10^6\ \frac{\text{N}}{\text{C}}$




Pour un point à mi-chemin entre les deux tiges, la tige 1 chargée positivement produira un champ la fuyant ($\vec{E}_1$), donc vers la droit et positif, alors que la tige 2 négative produira un champ dirigé vers elle ($\vec{E}_2$), donc également vers la droite et positif.

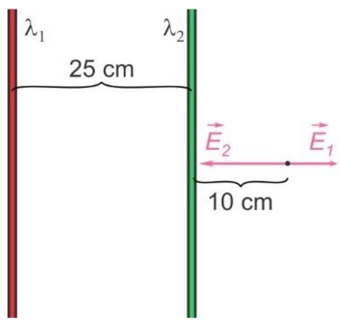
Un point situé à mi-chemin entre les deux tiges se trouve à 12,5 cm de chacune d'elles, d'où $R_1 = R_2$ = 12,5 cm) :

$$E = 2k\left(\frac{|\lambda_1|}{R_1} + \frac{|\lambda_2|}{R_2}\right)$$

$$E = 2 \times \left(8{,}988 \times 10^9\ \frac{\text{N}\cdot\text{m}^2}{\text{C}^2}\right) \times \left(+\frac{\left|15{\times}10^{-6}\ \frac{\text{C}}{\text{m}}\right|}{0{,}125\ \text{m}} + \frac{\left|-10{\times}10^{-6}\ \frac{\text{C}}{\text{m}}\right|}{0{,}125\ \text{m}}\right) \quad = \quad \mathbf{3{,}60 \times 10^6\ \frac{N}{C}}$$

retour à la question ▲

c) $E = -1{,}03{\times}10^6\ \frac{\text{N}}{\text{C}}$




Pour un point à droite des deux tiges, la tige 1 chargée positivement produira un champ la fuyant ($\vec{E}_1$), donc vers la droite et positif, alors que la tige 2 négative produira un champ dirigé vers elle ($\vec{E}_2$), donc vers la gauche et négatif.

Un point situé à 10 cm ($R_2$ = 10 cm) à gauche de la tige 2 se trouve à 35 cm de la tige 2 ($R_1$ = 35 cm). Donc :

$$E = 2k\left(+\frac{|\lambda_1|}{R_1} - \frac{|\lambda_2|}{R_2}\right)$$

$$E = 2 \times \left(8{,}988 \times 10^9\ \frac{\text{N}\cdot\text{m}^2}{\text{C}^2}\right) \times \left(+\frac{\left|15{\times}10^{-6}\ \frac{\text{C}}{\text{m}}\right|}{0{,}35\ \text{m}} - \frac{\left|-10{\times}10^{-6}\ \frac{\text{C}}{\text{m}}\right|}{0{,}10\ \text{m}}\right)$$

$$E = \mathbf{-1{,}03 \times 10^6\ \frac{N}{C}}$$

retour à la question ▲

**4.15** Solution : Les quatre zones retour à la question ▲

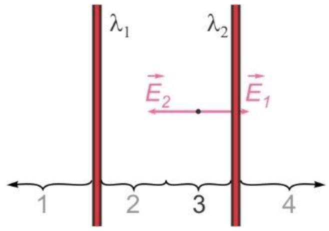
▲ retour à la question

Dans chacun des cas, le champ résultant est la somme de deux vecteurs champ. Ces deux champs doivent donc être de mêmes modules mais de sens contraires.

Qualitativement, on peut déterminer la zone où les champs produits par les deux tiges seront en sens contraires, sachant qu'une tige chargée positivement produit un champ fuyant et qu'une tige chargée négativement produit un champ vers elle.

Finalement, sans calcul, on peut aussi déterminer que si l'une des tiges a une charge linéique plus faible (en valeur absolue), le point choisi devra en être plus rapproché pour que son effet puisse être de même grandeur que celui de l'autre tige.

a) La zone 3

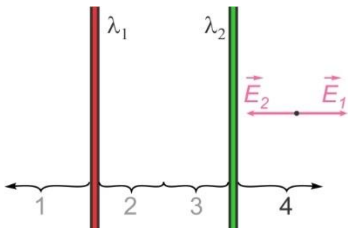



Les deux charges linéiques sont positives, avec une valeur plus grande pour la tige 1.

Les deux tiges portant des charges de mêmes signes, c'est entre elles uniquement que les deux champs produits pourront être en sens contraires (ce qui écarte les zones 1 et 4).

La charge linéique de la tige 2 étant plus faible, le point choisi devra être plus rapproché de celle-ci pour que le module $E_2$ soit égal à celui de $E_1$, ce qui identifie la zone 3 pour l'emplacement recherché.

b) La zone 4




Les deux charges linéiques sont de signes opposés, avec une valeur plus grande pour la tige 1.

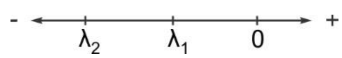
Les deux tiges portant des charges de signes opposés, ça ne peut être entre elles que les deux champs produits pourront être en sens contraires (ce qui écarte les zones 2 et 3).

La valeur (absolue) de la charge linéique de la tige 2 étant plus faible, le point choisi devra être plus rapproché de celle-ci pour que le module $E_2$ soit égal à celui de $E_1$, ce qui identifie la zone 4 pour l'emplacement recherché.

▲ retour à la question

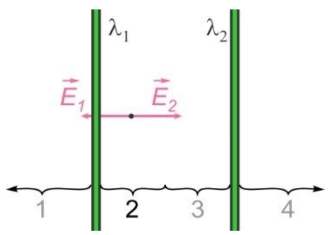
c) La zone 2

Les deux charges linéiques sont négatives, <u>avec une valeur (absolue) plus grande pour la tige 2</u>. La figure ci-contre illustre la position relative des deux valeurs sur la droite des nombres, les deux étant négatives, et $\lambda_2$ étant plus négative que $\lambda_1$.




Les deux tiges portant des charges de mêmes signes, c'est entre elles uniquement que les deux champs produits pourront être en sens contraires (ce qui écarte les zones 1 et 4).

Finalement, la valeur (absolue) de la charge linéique de la tige 1 étant plus faible, le point choisi devra être plus rapproché de celle-ci pour que le module $E_1$ soit égal à celui de $E_2$, ce qui identifie la zone 2 pour l'emplacement recherché.



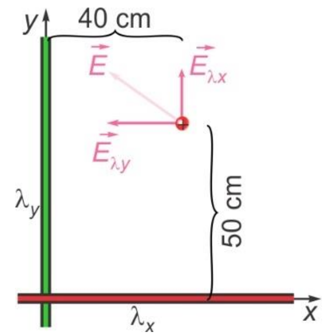

retour à la question ▲

**4.16** Solution : La force des tiges retour à la question ▲

retour à la question ▲

$\vec{F} = (-33{,}7\vec{\imath} + 18{,}0\vec{\jmath}) \times 10^{-3}$ N

Illustrons d'abord la situation. La figure ci-contre montre les deux tiges placées le long des axes ainsi que les champs électriques qu'elles produisent à l'endroit où se trouve la particule chargée. On note que la tige horizontale crée au-dessus d'elle un champ la fuyant vers le haut ($E_{\lambda x}$) et que la tige verticale crée à sa droite un champ dirigé vers elle ($E_{\lambda y}$).




On doit calculer ces champs électriques pour calculer ensuite les forces que créent ces champs sur la particule chargée.

Pour le champ produit par la tige horizontale (chargée positivement) :

$$E_{\lambda x} = \frac{2k|\lambda|}{R} = \frac{2\times\left(8{,}988\times10^{9}\,\frac{\mathrm{N\cdot m^2}}{\mathrm{C^2}}\right)\times\left|50\times10^{-9}\,\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{m}}\right|}{0{,}50\ \mathrm{m}} = 1798\ \tfrac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

Ce champ fuit la tige horizontale et est donc orienté vers le haut, donc $\vec{E}_{\lambda x} = 1798\vec{\jmath}\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$.

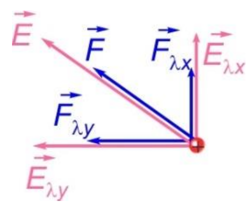
Pour le champ produit par la tige verticale (chargée négativement) :

$$E_{\lambda y} = \frac{2k|\lambda|}{R} = \frac{2\times\left(8{,}988\times10^{9}\,\frac{\mathrm{N\cdot m^2}}{\mathrm{C^2}}\right)\times\left|-75\times10^{-9}\,\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{m}}\right|}{0{,}40\ \mathrm{m}} = 3371\ \tfrac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

retour à la question ▲

Ce champ est dirigé vers la tige verticale et est donc orienté vers la gauche, donc $\vec{E}_{\lambda y} = -3371\vec{\imath}\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$.

Le champ électrique résultant à l'endroit de la charge est donc $(-3371\vec{\imath} + 1798\vec{\jmath})\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$, et la force agissant sur la charge découle directement de ce champ :




$$\vec{F} = q\vec{E} = (10\times10^{-6}\ \mathrm{C}) \times (-3371\vec{\imath} + 1798\vec{\jmath})\,\tfrac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}} = \mathbf{(-33{,}7\vec{\imath} + 18{,}0\vec{\jmath}) \times 10^{-3}\ N}$$

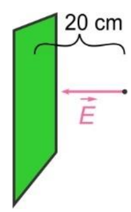
retour à la question ▲

**4.17** Solution : La plaque inconnue retour à la question ▲

retour à la question ▲

a) $\sigma = -2{,}66\times10^{-9}$ C/m²

Illustrons d'abord la situation (voir figure suivante); en un point situé à 20 cm de la plaque inconnue prévaut un champ électrique dirigé vers elle, avec une valeur connue.




Dans un premier temps, on peut déduire que la plaque est chargée négativement car un champ dirigé vers la plaque est conséquence d'une charge négative.

Ensuite on aura besoin de l'équation du champ électrique produit par une PPIUC :

$$E = \frac{|\sigma|}{2\varepsilon_0}$$

Dans cette équation, la seule inconnue est la charge surfacique $\sigma$. En l'isolant, on trouve :

$$|\sigma| = 2\varepsilon_0 E = 2 \times \left(8{,}854\times10^{-12}\,\frac{\mathrm{C^2}}{\mathrm{N\cdot m^2}}\right) \times 150\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}} = 2{,}66\times10^{-9}\,\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{m^2}}$$

retour à la question ▲

Puisqu'on a déterminé plus tôt que la charge surfacique devait être négative pour engendrer un champ dirigé vers la plaque, on sait donc que la charge surfacique est de **$-2{,}66\times10^{-9}$ C/m²**.

b) $E$ = 150 N/C

À partir de l'équation du module du champ électrique généré par une PPIUC, on vérifie forcément que la distance à la plaque n'est pas un facteur dans le calcul de la valeur :

$$E = \frac{|\sigma|}{2\varepsilon_0}$$

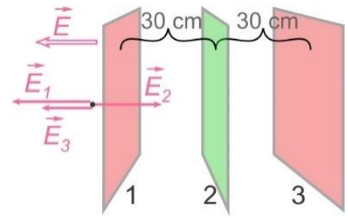
Ainsi, modifier la distance à la plaque n'a aucune influence sur la valeur du module du champ. Puisqu'il est indiqué dans l'énoncé que le champ à 20 cm de la plaque a un module de 150 N/C, on sait qu'à 10 cm le champ aura la même valeur.

retour à la question ▲

**4.18** Solution : Les trois plaques retour à la question ▲

retour à la question ▲

a) $E$ = –1,30×10⁷ N/C




Le point étudié étant à gauche des trois plaques, on peut déterminer la direction du champ électrique produit par chacune des plaques. Les plaques 1 et 3 étant chargées positivement, elles produiront à leur gauche des champs électriques les fuyant, donc vers la gauche. La plaque 2 négative produira quant à elle un champ électrique dirigé vers elle, vers la droite.

Le champ électrique net au point étudié sera la somme des 3 champs électriques, deux étants négatifs (si vers la gauche) et un étant positif (voir figure ci-contre). Aussi, le champ électrique produit par une plaque plane infinie étant indépendant de la distance à la plaque, on peut rédiger tout de suite une équation unique qui comptabilise les 3 contributions :

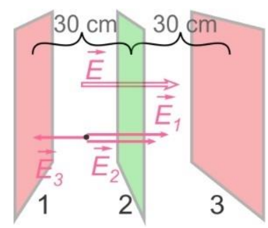
$$E = E_1 + E_2 + E_3 \quad = \quad -\frac{|\sigma_1|}{2\varepsilon_0} + \frac{|\sigma_2|}{2\varepsilon_0} - \frac{|\sigma_3|}{2\varepsilon_0} \quad = \quad \frac{-|\sigma_1|+|\sigma_2|-|\sigma_3|}{2\varepsilon_0}$$

$$E = \frac{-\left|300\times10^{-6}\,\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{m}^2}\right| + \left|-250\times10^{-6}\,\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{m}^2}\right| - \left|180\times10^{-6}\,\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{m}^2}\right|}{2\times\left(8{,}854\times10^{-12}\,\frac{\mathrm{C}^2}{\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}^2}\right)} \quad = \quad \mathbf{-1{,}30\times10^{7}\,\frac{N}{C}}$$

Le champ électrique résultant est dirigé vers la gauche et est illustré également sur la figure précédente.

retour à la question ▲

b) $E$ = 2,09×10⁷ N/C




On doit d'abord déterminer la direction du champ électrique produit par chacune des plaques.

La plaque 1 est chargée positivement et se trouve à gauche du point étudié. Elle y produira donc un champ dirigé vers la droite.

La plaque 2 est chargée négativement et produira un champ dirigé vers elle, donc vers la droite également.

Finalement, la plaque 3 est positive et produira un champ dirigé vers la gauche.

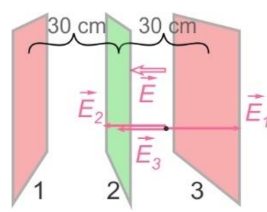
Le champ électrique net au point étudié sera la somme des 3 champs électriques, deux étant positifs (vers la droite) et un étant négatif. Aussi, le champ électrique produit par une plaque plane infinie étant indépendant de la distance à la plaque, on rédigera tout de suite une équation unique qui comptabilise les 3 contributions :

$$E = E_1 + E_2 + E_3 \quad = \quad \frac{|\sigma_1|}{2\varepsilon_0} + \frac{|\sigma_2|}{2\varepsilon_0} - \frac{|\sigma_3|}{2\varepsilon_0} \quad = \quad \frac{|\sigma_1|+|\sigma_2|-|\sigma_3|}{2\varepsilon_0}$$

$$E = \frac{\left|300\times10^{-6}\,\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{m}^2}\right| + \left|-250\times10^{-6}\,\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{m}^2}\right| - \left|180\times10^{-6}\,\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{m}^2}\right|}{2\times\left(8{,}854\times10^{-12}\,\frac{\mathrm{C}^2}{\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}^2}\right)} \quad = \quad \mathbf{2{,}09\times10^{7}\,\frac{N}{C}}$$

retour à la question ▲

c) $E$ = –7,34×10⁶ N/C




On détermine d'abord la direction du champ électrique produit par chacune des plaques.

La plaque 1 est chargée positivement et se trouve à gauche du point étudié. Elle y produira donc un champ dirigé vers la droite.

La plaque 2 est chargée négativement et produira un champ dirigé vers elle, donc vers la gauche.

Finalement, la plaque 3 est positive et produira un champ dirigé vers la gauche.

Le champ électrique net au point étudié sera la somme des 3 champs électriques, l'un étant positif (vers la droite) et deux étant négatifs.

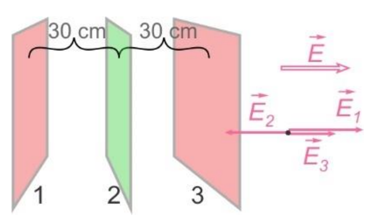
Le champ électrique produit par une plaque plane infinie étant indépendant de la distance à la plaque, l'équation unique qui comptabilise les 3 contributions est :

$$E = E_1 + E_2 + E_3 \quad = \quad \frac{|\sigma_1|}{2\varepsilon_0} - \frac{|\sigma_2|}{2\varepsilon_0} - \frac{|\sigma_3|}{2\varepsilon_0} \quad = \quad \frac{|\sigma_1|-|\sigma_2|-|\sigma_3|}{2\varepsilon_0}$$

$$E = \frac{\left|300\times10^{-6}\,\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{m}^2}\right| - \left|-250\times10^{-6}\,\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{m}^2}\right| - \left|180\times10^{-6}\,\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{m}^2}\right|}{2\times\left(8{,}854\times10^{-12}\,\frac{\mathrm{C}^2}{\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}^2}\right)} \quad = \quad \mathbf{-7{,}34\times10^{6}\,\frac{N}{C}}$$

retour à la question ▲

d) $E$ = 1,30×10⁷ N/C




On détermine d'abord la direction du champ électrique produit par chacune des plaques.

La plaque 1 est chargée positivement et se trouve à gauche du point étudié. Elle y produira donc un champ dirigé vers la droite.

La plaque 2 est chargée négativement et produira un champ dirigé vers elle, donc vers la gauche.

Finalement, la plaque 3 est positive et produira un champ dirigé vers la droite.

retour à la question ▲

Le champ électrique net au point étudié sera la somme des 3 champs électriques, deux étant positifs (vers la droite) et un étant négatif.

Le champ électrique produit par une plaque plane infinie étant indépendant de la distance à la plaque, l'équation unique qui comptabilise les 3 contributions est :

$$E = E_1 + E_2 + E_3 \quad = \quad \frac{|\sigma_1|}{2\varepsilon_0} - \frac{|\sigma_2|}{2\varepsilon_0} + \frac{|\sigma_3|}{2\varepsilon_0} \quad = \quad \frac{|\sigma_1| - |\sigma_2| + |\sigma_3|}{2\varepsilon_0}$$

$$E = \frac{\left|300\times10^{-6}\,\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{m}^2}\right| - \left|-250\times10^{-6}\,\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{m}^2}\right| + \left|180\times10^{-6}\,\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{m}^2}\right|}{2\times\left(8{,}854\times10^{-12}\,\frac{\mathrm{C}^2}{\mathrm{N\cdot m}^2}\right)} \quad = \quad \mathbf{1{,}30 \times 10^{7}}\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

C'est la même quantité qu'à la réponse a), mais en direction opposée.

e) Accélération vers la gauche

Une particule chargée dans un champ électrique subit une force en accord avec l'équation

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

Selon cette équation vectorielle, une charge négative subira une force en sens contraire du champ électrique.

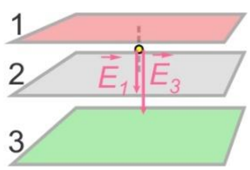
On a déterminé en c) que le champ électrique résultant (résultat des 3 plaques chargées) était dirigé vers la droite. Une charge négative subira donc là une force vers la gauche.

retour à la question ▲

**4.19** Solution : La troisième plaque retour à la question ▲

retour à la question ▲

$\sigma_2$ = 250 nC/m²




À partir du champ électrique que produisent les deux plaques dont la charge surfacique est connue, au point étudié, on pourra calculer le champ électrique opposé qui produirait un champ résultant nul, et de là la charge surfacique recherchée.

D'abord, mentionnons que la distance aux plaques n'intervient pas dans le calcul. On n'a qu'à considérer que le point étudié se trouve sous la plaque 1 et au-dessus des plaques 2 et 3.

Calculons d'abord le champ produit par les deux plaques connues. La plaque 1 au-dessus, positive, créera un champ qui la fuit, donc vers le bas. Considérons-le négatif si vers le bas :

$$E_1 = -\left(\frac{|\sigma_1|}{2\varepsilon_0}\right) = -\left(\frac{\left|100\times10^{-9}\,\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{m}^2}\right|}{2\times\left(8{,}854\times10^{-12}\,\frac{\mathrm{C}^2}{\mathrm{N\cdot m}^2}\right)}\right) \quad = \quad -\,5647\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

Le champ de la plaque 3, située sous le point, est également dirigé vers le bas, car sa charge est négative :

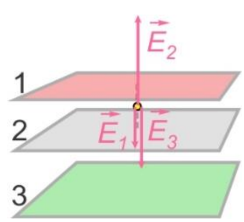
$$E_3 = -\left(\frac{|\sigma_3|}{2\varepsilon_0}\right) = -\left(\frac{\left|-150\times10^{-9}\,\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{m}^2}\right|}{2\times\left(8{,}854\times10^{-12}\,\frac{\mathrm{C}^2}{\mathrm{N\cdot m}^2}\right)}\right) \quad = \quad -\,8471\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

retour à la question ▲

Si on désire obtenir un champ résultant nul, on peut mettre en équation la relation entre les trois champs :

$$E_{rés} = \sum E_i = 0 = E_1 + E_2 + E_3$$

$$E_2 = -(E_1 + E_3) = -\left(-5647\,\tfrac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}} - 8471\,\tfrac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}\right) = 1{,}41 \times 10^4\,\tfrac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$




Ce champ positif représente un champ électrique vers le haut. La plaque 2 étant située sous le point étudié, on devine qu'elle doit porter une charge positive pour produire un champ la fuyant vers le haut (voir figure ci-contre). On peut finalement calculer la charge surfacique qui produira ce champ en un point au-dessus d'elle :

$$E_2 = \frac{|\sigma_2|}{2\varepsilon_0}$$

On isole alors $\sigma$ :

$$|\sigma_2| = 2\varepsilon_0 E_2 \quad = \quad 2 \times \left(8{,}854 \times 10^{-12}\,\frac{\mathrm{C}^2}{\mathrm{N\cdot m}^2}\right) \times 1{,}41 \times 10^4\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}} \quad = \quad 2{,}50 \times 10^{-7}\,\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{m}^2} \quad = \quad 250\,\frac{\mathrm{nC}}{\mathrm{m}^2}$$

Cette charge surfacique devant être positive, on peut affirmer $\sigma_2 = \mathbf{250}\,\frac{\mathrm{nC}}{\mathrm{m}^2}$

retour à la question ▲

**4.20** Solution : Plaque et tige retour à la question ▲

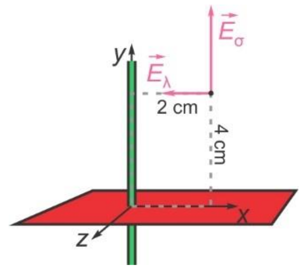
retour à la question ▲

a) $\vec{E} = (-315\vec{\imath} + 678\vec{\jmath})\,\frac{\text{kN}}{\text{C}}$

On doit calculer séparer les champs électriques produits par la tige et la plaque, pour ensuite les additionner vectoriellement.

Pour la tige, la charge linéique négative produit un champ dirigé vers elle, donc vers l'axe *x* négatif. Son module est :

$$E_\lambda = \frac{2k|\lambda|}{R} = \frac{2\times\left(8{,}988\times10^{9}\,\frac{\text{N}\cdot\text{m}^2}{\text{C}^2}\right)\times\left|-350\times10^{-9}\,\frac{\text{C}}{\text{m}}\right|}{0{,}02\text{ m}} = 315\,\frac{\text{kN}}{\text{C}}$$




Donc $\vec{E}_\lambda = -315\vec{\imath}\,\frac{\text{kN}}{\text{C}}$

Pour la plaque, la charge surfacique positive produit un champ dirigé vers le haut, donc vers l'axe *y* positif. Son module est :

$$E_\sigma = \frac{|\sigma|}{2\varepsilon_0} = \frac{\left|12{,}0\times10^{-6}\,\frac{\text{C}}{\text{m}^2}\right|}{2\times\left(8{,}854\times10^{-12}\,\frac{\text{C}^2}{\text{N}\cdot\text{m}^2}\right)} = 678\,\frac{\text{kN}}{\text{C}}$$

Donc $\vec{E}_\sigma = 678\vec{\jmath}\,\frac{\text{kN}}{\text{C}}$

Le champ électrique résultant est donc :

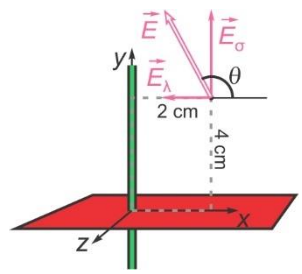
$$\vec{E} = \vec{E}_\lambda + \vec{E}_\sigma = \left(-315\vec{\imath}\,\frac{\text{kN}}{\text{C}}\right) + \left(678\vec{\jmath}\,\frac{\text{kN}}{\text{C}}\right) = \mathbf{(-315\vec{\imath} + 678\vec{\jmath})}\,\frac{\text{kN}}{\text{C}}$$

retour à la question ▲

b) $E$ = 747 kN/C

Le module du vecteur champ électrique est donné par :

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = \sqrt{\left(-315\,\frac{\text{kN}}{\text{C}}\right)^2 + \left(678\,\frac{\text{kN}}{\text{C}}\right)^2} = \mathbf{747}\,\frac{\text{kN}}{\text{C}}$$




c) $\theta_E$ = 115°

L'orientation du vecteur dont on connait les composantes *x* et *y* est :

$$\theta_E = \tan^{-1}\left(\frac{E_y}{E_x}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{678\,\frac{\text{kN}}{\text{C}}}{-315\,\frac{\text{kN}}{\text{C}}}\right) = -65{,}1°$$

Cette orientation correspond au 4e cadran alors que le champ résultant se trouve dans le 2e cadran. On ajoute 180° à l'angle trouvé pour corriger le résultat :

$$\theta_E = -65{,}1° + 180° = \mathbf{115°}$$

retour à la question ▲

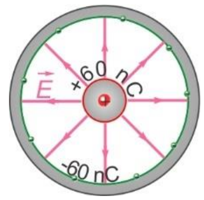
## 4.4 CHAMP ÉLECTRIQUE ET CONDUCTEURS

retour à la question ▲

**4.21** Solution : La bille retour à la question ▲

a) $q_{int}$ = –60,0 nC

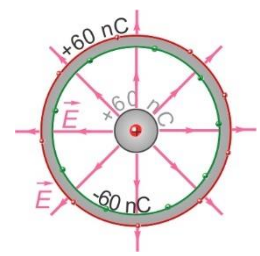
La charge positive de la bille génère un champ électrique qui affecte les charges sur la face intérieure de la sphère creuse. Ce champ attire sur cette face une charge négative de même grandeur que la charge de la bille, donc une charge de **–60,0 nC**.




b) $q_{ext}$ = +60,0 nC

On indique dans l'énoncé que la charge nette de la sphère creuse est nulle. Puisqu'une charge négative s'installe sur sa face intérieure, la charge sur la face extérieure doit être celle qui fait en sorte que la charge nette demeure nulle.

Puisque les charges ne se répartissent qu'en surface, la somme des charges des deux faces doit égaler 0 (charge nette nulle) :

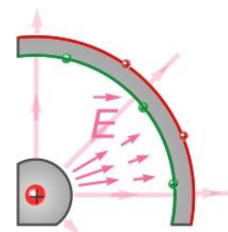



$$q_{int} + q_{ext} = 0$$

$$q_{ext} = -q_{int} \quad = \quad -(-60\text{ nC}) \quad = \quad \mathbf{+60,0\ nC}$$

c) Le champ est non uniforme

retour à la question ▲




Dans l'espace vide à l'intérieur de la coquille, le champ respecte les critères habituels de production d'un champ électrique : il est émis par les charges positives et est dirigé vers des charges négatives. Il est donc orienté de façon radiale partout autour de la bille centrale, dirigé vers l'extérieur de la structure. Il n'a donc pas la même orientation partout dans cet espace, ce qui en fait déjà un champ non uniforme. La figure ci-contre montre l'orientation variable du champ dans une portion de l'espace intérieur.

Par ailleurs, son intensité n'est pas uniforme non plus. Établir la valeur du champ pourrait paraître plus complexe, mais dans les faits, il se calculerait de la même manière qu'autour d'une charge ponctuelle seule. Mais sans calcul, le fait que les lignes de champ qui représentent le champ ne soient pas parallèles est en soi une conséquence du fait que le champ n'est pas uniforme : il décroît avec l'éloignement du centre. L'illustration ci-haut montre des vecteurs champ plus faibles loin du centre que près du centre.

d) $E$ = 5 992 N/C

On a déterminé en b) que la charge sur la face extérieure de la coquille est de 60 nC. Le champ à l'extérieur de cette coquille est le même que celui d'une charge ponctuelle située au centre du système. Pour un point situé à 30 cm du centre :

$$E = \frac{kq_{ext}}{r^2} \quad = \quad \frac{\left(8{,}988\times10^9\,\frac{\text{N}\cdot\text{m}^2}{\text{C}^2}\right)\times(60\times10^{-9}\text{ C})}{(0{,}30\text{ m})^2} \quad = \quad \mathbf{5\,992\ \tfrac{N}{C}}$$

La charge de 60 nC en surface étant positive, ce champ est dirigé vers l'extérieur, et est donc positif selon la convention suggérée dans l'énoncé.

retour à la question ▲

**4.22** Solution : La coquille double retour à la question ▲

retour à la question ▲

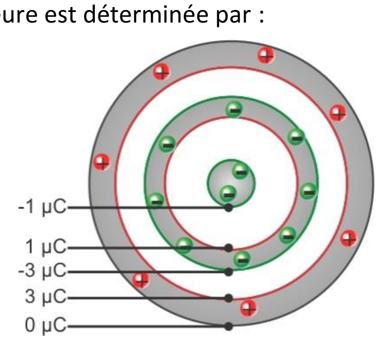
a) $q$ = 0

La charge de la bille centrale induit sur la face interne de la première coquille (coquille #1) une charge de signe opposée, donc une charge de +1 µC.

La charge nette de cette coquille étant fixe à –2 µC, la charge de sa face extérieure est déterminée par :

$$q_{1int} + q_{1ext} = -2\ \mu\text{C}$$

$$q_{1ext} = -2\ \mu\text{C} - q_{1int} \quad = \quad -2\ \mu\text{C} - 1\ \mu\text{C} \quad = \quad -3\ \mu\text{C}$$




À nouveau, cette charge de –3 µC induit sur la face interne de la seconde coquille (coquille #2) une charge de même grandeur et de signe opposé, donc $q_{2int}$ = +3 µC.

Finalement, la charge nette de la seconde coquille étant constante, on pourra déterminer la charge de sa face externe par :

$$q_{2int} + q_{2ext} = 3\ \mu\text{C}$$

$$q_{2ext} = 3\ \mu\text{C} - q_{2int} \quad = \quad 3\ \mu\text{C} - 3\ \mu\text{C} \quad = \quad 0$$

retour à la question ▲

**4.23** Solution : La coquille chargée retour à la question ▲

a) $\sigma_S$ = –637 µC/m²

La charge surfacique (pour une sphère ou n'importe quelle surface) est donnée par :

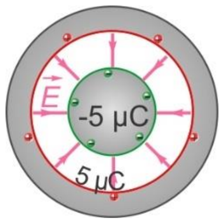
$$\sigma = \frac{q}{A}$$

La charge de la sphère est connue ($q_{sph}$ = –5 µC), et sa surface se calcule à partir de son rayon, d'où :

$$\sigma_S = \frac{q_{sph}}{A_{sph}} = \frac{q_{sph}}{4\pi r_{sph}^2} = \frac{-5\times10^{-6}\ \mathrm{C}}{4\pi\times(0{,}025\ \mathrm{m})^2} = \mathbf{-6{,}37\times10^{-4}\ \frac{C}{m^2}}$$

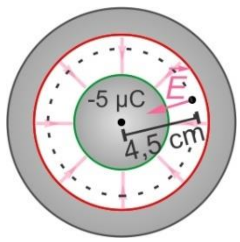
b) $q_{int}$ = +5,00 µC

La charge de la face interne de la coquille ne dépend que de la charge sur la face qui lui fait face, celle de la sphère centrale. Le champ produit par la charge centrale de –5 µC oblige précisément une charge de +5 µC à couvrir la face de la coquille (sans égard au fait que la coquille porte une charge nette de –8 µC).




c) $E$ = –2,22×10⁷ N/C

Pour déterminer le champ à 4,5 cm du centre, on doit ne considérer que la charge comprise à l'intérieur d'un cercle d'un rayon de 4,5 cm centré sur le système (le cercle pointillé sur la figure ci-contre. En d'autres mots, ça signifie qu'on utilisera la charge contenue en surface de la sphère centrale. Il s'agit de la charge $q_{sph}$ = –5 µC telle que donnée dans l'énoncé.




Aussi, le champ est le même que si la charge de –5 µC était concentrée en un point à la distance $r$ du point étudié, donc :

$$E = \frac{kq_{sph}}{r^2} = \frac{\left(8{,}988\times10^9\ \frac{\mathrm{N\cdot m^2}}{\mathrm{C^2}}\right)\times(-5\times10^{-6}\ \mathrm{C})}{(0{,}045\ \mathrm{m})^2} = \mathbf{-2{,}22\times10^7\ \frac{N}{C}}$$

Ce champ électrique est dirigé vers le centre (généré par une charge négative), on doit donc l'exprimer avec un signe « – », en accord avec la convention indiquée dans la question.

d) $\sigma_{int}$ = 111 µC/m²

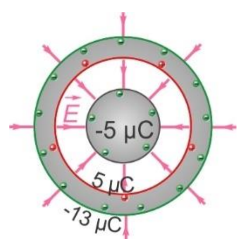
La charge de la face interne de la coquille a été déterminée en b) ($q_{int}$ = 5 µC), et sa surface se calcule à partir de son rayon, d'où :

$$\sigma_{int} = \frac{q_{int}}{A_{int}} = \frac{q_{int}}{4\pi r_{int}^2} = \frac{5\times10^{-6}\ \mathrm{C}}{4\pi\times(0{,}06\ \mathrm{m})^2} = \mathbf{1{,}11\times10^{-4}\ \frac{C}{m^2}}$$

e) $q_{ext}$ = –13,0 µC

On indique dans l'énoncé que la charge nette de la coquille est de –8 µC. Puisqu'une charge positive s'installe sur sa face intérieure, la charge sur la face extérieure doit être celle qui fait en sorte que la charge nette conserve la même valeur.

La somme des charges des deux faces doit toujours égaler –8 µC :



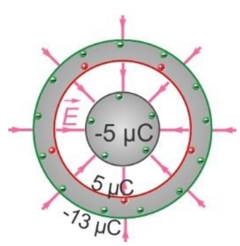

$$q_{int} + q_{ext} = -8\ \mu\mathrm{C}$$

Ayant déterminé en b) que $q_{int}$ = +5 µC :

$$q_{ext} = -8\ \mu\mathrm{C} - q_{int} = -8\ \mu\mathrm{C} - 5\ \mu\mathrm{C} = \mathbf{-13{,}0\ \mu C}$$

f) Vers le centre

Pour déterminer l'orientation du champ autour de la structure creuse, on ne doit considérer que la charge sur la face extérieure. Celle-ci étant négative, elle produit un champ dirigé vers elle. Le champ est donc dirigé vers le centre du système.




retour à la question ▲
retour à la question ▲
retour à la question ▲
retour à la question ▲

retour à la question ▲

g) $\sigma_{ext}$ = –184 µC/m²

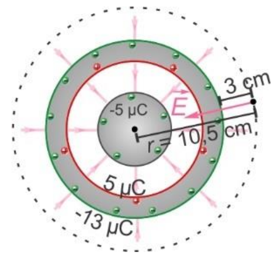
La charge de la face externe de la coquille a été déterminée en f) ($q_{ext}$ = –13 µC), et sa surface se calcule à partir de son rayon, d'où :

$$\sigma_{ext} = \frac{q_{ext}}{A_{ext}} = \frac{q_{ext}}{4\pi r_{ext}^2} = \frac{-13{,}0\times10^{-6}\ \mathrm{C}}{4\pi\times(0{,}075\ \mathrm{m})^2} = \mathbf{-1{,}84\times10^{-4}\ \frac{C}{m^2}}$$

h) $E$ = 0

L'emplacement décrit, à 7 cm du centre du système, se trouve à l'intérieur de l'épaisseur de la coquille conductrice (puisque la coquille s'étend de 6 cm à 7,5 cm du centre). C'est donc un point à l'intérieur du conducteur. On sait qu'à l'équilibre électrostatique, le champ à l'intérieur d'un conducteur est nul, donc $E$ = 0.

i) $E$ = –1,06×10⁷ N/C




Un point à 3 cm de la surface de la coquille extérieure se trouve donc à 10,5 cm du centre du système. C'est la distance à utiliser pour le calcul du champ.

Le champ à 10,5 cm du centre se calcule à partir de la charge nette comprise à l'intérieur d'un cercle de 10,5 cm centré sur le système (le cercle pointillé sur la figure ci-contre). À l'équilibre électrostatique, cela correspond précisément à la charge de la dernière surface de la coquille à l'intérieur de cette sphère imaginaire de 10,5 cm. C'est donc une charge de –13,0 µC qui sera utilisée (déterminée en g).

Finalement, le champ est le même que si la charge de –13,0 µC était concentrée en un point à la distance 10,5 cm du point étudié :

$$E = \frac{kq_{ext}}{r^2} = \frac{\left(8{,}988\times10^9\ \frac{\mathrm{N\cdot m^2}}{\mathrm{C^2}}\right)\times(-13{,}0\times10^{-6}\ \mathrm{C})}{(0{,}105\ \mathrm{m})^2} = \mathbf{-1{,}06\times10^{7}\ \frac{N}{C}}$$

Ce champ électrique est dirigé vers le centre (généré par une charge négative), on doit donc l'exprimer avec un signe « – », en accord avec la convention indiquée dans la question.

retour à la question ▲

## 4.5 MOUVEMENT D'UNE PARTICULE CHARGÉE DANS UN CHAMP ÉLECTRIQUE UNIFORME

**4.24** Solution : La poussière accélérée retour à la question ▲

a) $F$ = 300 nN

Le module de la force agissant sur la particule est lié directement aux valeurs de la charge et du champ, selon l'équation :

$$F = qE = (2\times10^{-9}\ \mathrm{C})\times150\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}} = \mathbf{300\times10^{-9}\ N}$$

b) $a$ = 6,00×10⁻³ m/s²

La force étant connue, l'accélération est trouvée via la seconde loi de Newton :

$$F = ma$$

Sans oublier que 50 millièmes de gramme correspond à 50 millionièmes de kilogrammes :

$$a = \frac{F}{m} = \frac{300\times10^{-9}\ \mathrm{N}}{50\times10^{-6}\ \mathrm{kg}} = \mathbf{6{,}00\times10^{-3}\ \frac{m}{s^2}}$$

c) $d$ = 6,43 m

L'une des équations de la cinématique relie directement l'accélération et la distance parcourue :

$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$$

D'une part, la vitesse initiale $v_0$ est nulle et d'autre part on peut appeler $d$ la distance parcourue ($x - x_0$) :

$$v^2 = 0 + 2ad$$

$$d = \frac{v^2}{2a}$$

Si on tient compte des unités, on constate qu'on devra faire une conversion de la vitesse atteinte (1 km/h) en mètres par seconde. Si on fait la conversion dans le calcul de la distance :

$$d = \frac{v^2}{2a} = \frac{\left(1\ \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}\times\frac{1\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{3{,}6\ \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}}\right)^2}{2\times\left(6{,}00\times10^{-3}\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s^2}}\right)} = \mathbf{6{,}43\ m}$$

retour à la question ▲
retour à la question ▲
retour à la question ▲

retour à la question ▲

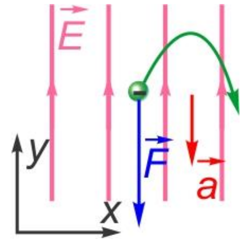
**4.25** Solution : La trajectoire retour à la question ▲

retour à la question ▲

La trajectoire c)

La particule étant chargée négativement, elle subira une force orientée en sens contraire du champ, en accord avec l'équation :

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




Puisque le champ est orienté vers le haut, la force électrique sur la particule (un électron négatif) sera orientée vers le bas. La deuxième loi de Newton implique par ailleurs que l'accélération d'une masse est orientée dans la même direction que la force. Une force vers le bas entraînera donc une accélération vers le bas.

Si la vitesse initiale est orientée à 45° dans le plan *xy* tel que sur la figure fournie, la particule déviera progressivement vers une trajectoire vers *y* négatif. C'est le choix c) qui offre une déviation vers le bas pour la vitesse.

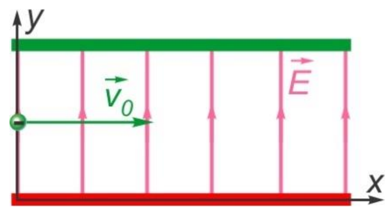
retour à la question ▲

**4.26** Solution : La déviation retour à la question ▲

retour à la question ▲

a) $F = 2{,}00 \times 10^{-16}$ N

À partir du champ électrique connu et de la charge de l'électron, la force se trouve par :




$$\vec{F} = q\vec{E} \quad = \quad -e\vec{E}$$

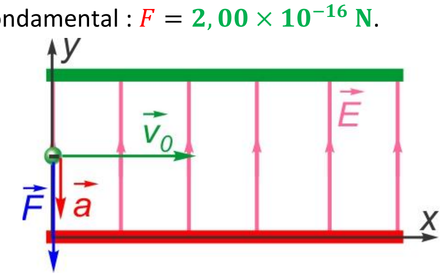
Si on considère l'aspect vectoriel du champ électrique dirigé vers le haut, une charge négative subira une force en direction opposée au champ, donc vers le bas. En apposant des axes *x* et *y* tels que sur la figure ci-contre, le champ électrique correspond au vecteur $\vec{E} = 1250\vec{\jmath}\,\frac{\text{N}}{\text{C}}$. La force est donc :

$$\vec{F} = -(1{,}602 \times 10^{-19}\ \text{C}) \times 1250\vec{\jmath}\,\frac{\text{N}}{\text{C}} \quad = \quad -2{,}00 \times 10^{-16}\vec{\jmath}\ \text{N}$$

Le module de la force est la valeur absolue de cette quantité, sans vecteur fondamental : $F = \mathbf{2{,}00 \times 10^{-16}\ N}$.

retour à la question ▲

b) Vers le bas




On a trouvé en a) le vecteur force sur l'électron, avec $\vec{F} = -2{,}00 \times 10^{-16}\vec{\jmath}$ N. Cette force, négative selon *y*, est donc dirigée vers le bas sur l'illustration fournie.

c) $a = -2{,}20 \times 10^{-14}\vec{\jmath}$ m/s²

Selon la 2e loi de Newton, l'accélération est liée à la force et à la masse par :

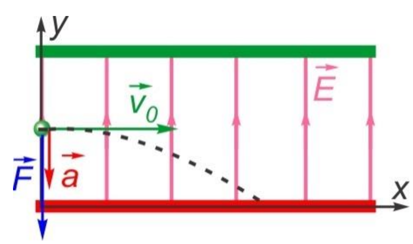
$$\vec{F} = m\vec{a}$$

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \quad = \quad \frac{-2{,}00 \times 10^{-16}\vec{\jmath}\ \text{N}}{9{,}109 \times 10^{-31}\ \text{kg}} \quad = \quad \mathbf{-2{,}20 \times 10^{14}\vec{\jmath}\,\frac{m}{s^2}}$$

retour à la question ▲

d) $t = 6{,}74$ ns

La vitesse de projection de l'électron étant horizontale, la composante verticale de vitesse est nulle. Indépendamment de la vitesse horizontale, le temps pour que l'électron tombe sur la plaque du bas se détermine par cinématique à partir de la hauteur initiale au-dessus de la plaque et l'accélération de l'électron. La trajectoire réelle de l'électron est illustrée sur la figure ci-contre, même si la durée peut se calculer en n'utilisant que les paramètres en *y*.




En considérant une origine à l'extrémité gauche de la plaque du bas, les paramètres du mouvement sont :

$$y_0 = 0{,}005\ \text{m}$$

$$y = 0$$

$$v_{y0} = 0$$

$$v_y = ?$$

retour à la question ▲

$a_y = -2{,}20 \times 10^{14}\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

$t = ?$

L'équation de la position en *y* où on rayera les termes nuls et isolera *t* est :

$$y = y_0 + v_{y0}t + \tfrac{1}{2}a_y t^2$$

$$t = \sqrt{\frac{-2y_0}{a_y}} = \sqrt{\frac{-2 \times 0{,}005\ \text{m}}{-2{,}20 \times 10^{14}\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} = \mathbf{6{,}74\ ns}$$

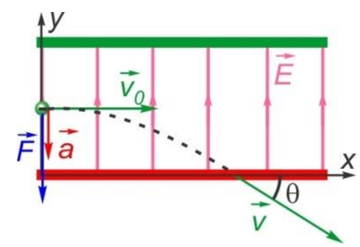
e) *d* = 3,04 cm

On a trouvé en d) que l'électron évoluera durant 6,74 ns entre les deux plaques. À partir de sa vitesse horizontale connue, on peut calculer son déplacement selon *x* durant cet intervalle :

$$x = x_0 + v_{0x}t + \tfrac{1}{2}a_x t^2 = 0 + \left(4{,}50 \times 10^6\ \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \times (6{,}74 \times 10^{-9}\ \text{s}) + 0 = \mathbf{3{,}04\ cm}$$

retour à la question ▲

f) θ = −18,2°

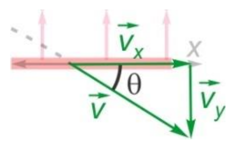



L'orientation de la vitesse finale, visible sur la figure ci-contre, demande que l'on connaisse d'abord les deux composantes de la vitesse. La composante horizontale est donnée directement dans l'énoncé. La composante verticale de vitesse finale se trouve par cinématique :

$$v_y = v_{0y} + a_y t$$

$$v_y = 0 + \left(-2{,}20 \times 10^{14}\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \times (6{,}74 \times 10^{-9}\ \text{s}) = -1{,}48 \times 10^6\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Les deux composantes étant connues ($v_x = 4{,}50 \times 10^6$ m/s), l'orientation de la vitesse réelle se trouve par :




$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{v_y}{v_x}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{-1{,}48 \times 10^6\ \frac{\text{m}}{\text{s}}}{4{,}50 \times 10^6\ \frac{\text{m}}{\text{s}}}\right) = \mathbf{-18{,}2°}$$

retour à la question ▲

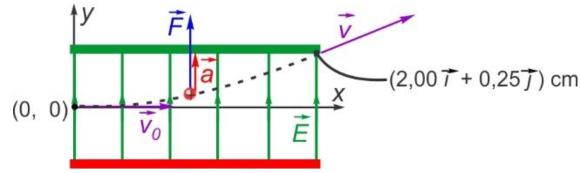
**4.27** Solution : La déviation II retour à la question ▲

retour à la question ▲

$v_0$ = 1,39×10$^5$ m/s

D'abord, une particule $\alpha$ étant un noyau d'hélium (donc sans électron), c'est une particule chargée positivement et formée de 2 protons. Sa charge est donc $q = +2e$.

Pour trouver la vitesse, on doit analyser une trajectoire frôlant tout juste l'extrémité d'une plaque avant que la particule $\alpha$ ne réussisse à quitter l'espace entre les plaques.




D'une part, déterminons le sens de la déviation : puisque le champ est dirigé vers le haut et que la charge est positive, la force électrique sur elle a la même orientation que le champ, et alors l'accélération également. La déviation de la particule alpha se fera donc vers le haut et c'est la plaque négative qu'elle frôlera (voir figure ci-contre).

Toute vitesse inférieure à celle recherchée ferait en sorte que la particule $\alpha$ dévierait plus fortement et tomberait sur la plaque (vers le haut). Toute vitesse supérieure à celle recherchée ferait que la particule émergerait de l'espace des plaques sans en frôler une. Comme on cherche la vitesse minimale, on s'intéresse donc à la trajectoire la faisant passer précisément par l'extrémité de la plaque du haut.

retour à la question ▲

Pour la trajectoire étudiée, établissons les coordonnées des positions initiale et finale; on doit donc d'abord choisir un référentiel (des axes $x$-$y$ et une origine). Le choix qui simplifiera le plus le traitement est une origine située au point d'entrée de la particule $\alpha$ entre les plaques, avec des axes $x$ et $y$ conventionnels (voir figure). Dans ce référentiel, la position finale pour la trajectoire dans le champ électrique est (2,00$\vec{\imath}$ + 0,25$\vec{\jmath}$) cm.

L'analyse de la trajectoire se fait par la cinématique : on pourra alors considérer la vitesse inconnue et l'accélération que le champ produit :

$$x_0 = 0 \qquad y_0 = 0$$
$$x = 0{,}0200 \text{ m} \qquad y = 0{,}0025 \text{ m}$$
$$v_{x0} = ?? \qquad v_{y0} = 0$$
$$v_x = ? \qquad v_y = ?$$
$$a_x = 0 \qquad a_y = ?$$
$$t = ?$$

retour à la question ▲

Dans chacune des deux dimensions, les équations de cinématique s'appliquent (avec les termes nuls qui peuvent disparaître) :

$$x = x_0 + v_{0x}t + \tfrac{1}{2}a_x t^2 \quad (1) \qquad y = y_0 + v_{0y}t + \tfrac{1}{2}a_y t^2 \quad (2)$$
$$v_x = v_{0x} + a_x t \quad (3) \qquad v_y = v_{0y} + a_y t \quad (4)$$

Les deux équations de position contiennent trois inconnue : $v_{0x}$, $a_y$ et $t$.

L'accélération peut être déterminez à l'aide de la 2$^{e}$ loi de Newton, qui demande qu'on évalue d'abord la force sur la particule α :

$$F = qE = ma \quad \rightarrow \quad a_y = \frac{qE_y}{m_\alpha} = \frac{2eE_y}{m_\alpha} \quad (5)$$

Dans les équations (1) et (2), faisons disparaître les termes nuls et dans l'équation (2), substituons l'accélération par son expression de l'équation 5. On obtient alors :

$$(1) \quad x = v_{0x}t \qquad (2) \quad y = \frac{1}{2}\frac{2eE}{m}t^2 = \frac{eEt^2}{m_\alpha}$$

retour à la question ▲

En isolant l'inconnue « $t$ » dans l'équation 1 pour la substituer dans l'équation (2), on trouvera une équation unique où $v_{0x}$ est la seule inconnue :

$$(1) \quad t = \frac{x}{v_{0x}}$$

$$(2) \quad y = \frac{eE_y t^2}{m_\alpha} = \frac{eE_y\left(\frac{x}{v_{0x}}\right)^2}{m_\alpha} = \frac{eE_y x^2}{m_\alpha v_{0x}^2}$$

Dans cette dernière équation, $v_{0x}$ est la seule inconnue et la masse est celle de la particule alpha; on l'isole et la calcule :

$$v_{0x} = \sqrt{\frac{eE_y x^2}{m_\alpha y}} = \sqrt{\frac{eE_y x^2}{m_\alpha y}} = \sqrt{\frac{(1{,}602\times10^{-19}\text{ C})\times\left(5000\,\frac{\text{N}}{\text{C}}\right)\times(0{,}02\text{ m})^2}{(6{,}644\times10^{-27}\text{ kg})\times(0{,}0025\text{ m})}} = \mathbf{1{,}39\times10^{5}\,\frac{m}{s}}$$

retour à la question ▲