Exemple 2.1

Bof

Par temps clair, on observe à la surface de la Terre un champ électrique de 100 N/C environ, vertical et orienté vers le bas. Comparer les modules et les orientations des forces électrique et gravitationnelle agissant sur un électron situé à cet endroit.

2.1

F

$q = -1{,}6 \times 10^{-19}$ C

$\vec{E} = -100\ \text{N/C}\ \vec{j}$

$\vec{F}_e = q\vec{E} = -1{,}6 \times 10^{-19}\ \text{C} \cdot -100\ \frac{\text{N}}{\text{C}}\ \vec{j}$

$\vec{F}_e = +1{,}6 \times 10^{-17}\ \text{N}\ \vec{j}$

$\vec{F}_g = -9{,}81\ \text{N/kg} \cdot 9{,}109 \times 10^{-31}\ \text{kg}\ \vec{j} = -8{,}94 \times 10^{-30}\ \text{N}\ \vec{j}$

La force électrique $1{,}8 \times 10^{12}$ fois plus grande que la force gravitationnelle.

Exemple 2.2

On place une charge ponctuelle $q = 2\ \mu$C en un point P et on observe qu'elle subit une force électrique de module $F_E = 10$ mN orientée vers la droite. (a) Quel est le champ électrique (module et orientation) au point P ? (b) Quel est le champ électrique au point P si on remplace la charge q par une charge de 1 μC ? Quelle force subit cette nouvelle charge ? (c) Si on remplace plutôt la charge q par une charge de −2 μC, quelle est la force électrique qui s'exerce sur elle (module et orientation) ? Quel est alors le champ électrique au point P ?

2.2 a) $\vec{F}_E = q\vec{E}_E$

$+2\mu C$ 10mN

$10 \times 10^{-3}\ \text{N} = q E_E$

$\frac{10 \times 10^{-3}\ \text{N}}{q} = E_E$

$\frac{10 \times 10^{-3}\ \text{N}}{2 \times 10^{-6}\ \text{C}} = E_E$

a) $\boxed{5000\ \frac{\text{N}}{\text{C}} = E_E}$ dans le même sens car q est ⊕

b) E ne change pas si $q \div 2$ ⇒ $E_E = 5000$ N/C

Force sera deux fois moins forte $F = 5 \times 10^{-3}$ N

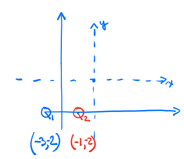
c) $F_E = 10 \times 10^{-3}$ mais dans le sens contraire

$\vec{E}$ reste le même $5000\ \frac{\text{N}}{\text{C}}\ \vec{i}$

Exemple 2.3

Soit deux charges ponctuelles, $Q_1 = 20\ \mu$C en $(-d, 0)$ et $Q_2 = -10\ \mu$C en $(+d, 0)$. Déterminer le champ électrique résultant au point P de coordonnées (x, y). On donne $d = 1{,}0$ m et $x = y = 2$ m.

2,3 →



$Q_1 = 20 \times 10^{-6}$ C

$Q_2 = -10 \times 10^{-6}$ C

$3{,}6 = r_1 = \sqrt{(-3)^2 + (-2)^2}$

$2{,}236 = r_2 = \sqrt{(-1)^2 + (-2)^2}$

$E_{1x} = \frac{kQ_1}{r_1^3}(\overset{0}{x_P} - \overset{-3}{x_{Q_1}}) = 11\ 561$ N/C

$E_{1y} = \frac{kQ_1}{r_1^3}(\overset{0}{y_P} - \overset{-2}{y_Q}) = \boxed{7\ 707\ \text{N/C}}$

$E_{2x} = \frac{kQ_2}{r_2^3}(\overset{0}{x_P} - \overset{-1}{x_{Q_2}}) = -8\ 042$ N/C

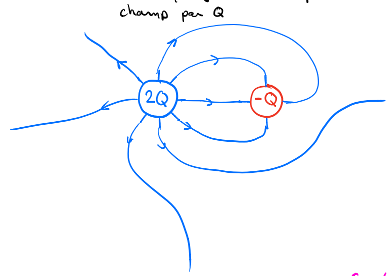
$E_{2y} = \frac{kQ_2}{r_2^3}(\overset{0}{y_P} - \overset{-2}{y_{Q_2}}) = \boxed{-16\ 083\ \text{N/C}}$

$\vec{E}_{TOT} = 3519\ \text{N/C}\ \vec{i} - 8376\ \text{N/C}\ \vec{j}$

Exemple 2.4

Dessiner les lignes du champ électrique créé par deux charges ponctuelles $2Q$ et $-Q$. On suppose que $Q > 0$.

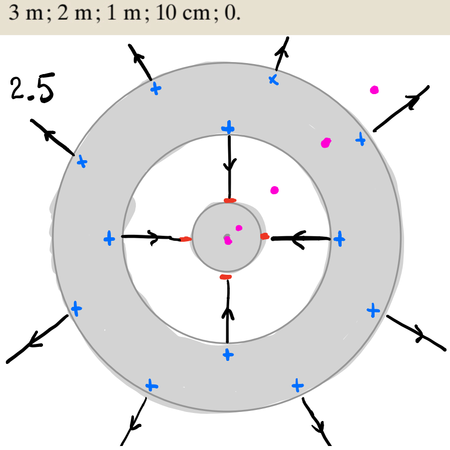
2.4 Posons que je trace 4 lignes de champ par Q



Exemple 2.5

Une sphère conductrice de rayon 50 cm porte une charge de −4 μC. On la place au centre d'une sphère creuse conductrice de 2,5 m de rayon externe, dont la cavité a un rayon de 1,5 m. La charge totale de la sphère creuse est de +12 μC. (a) Représenter schématiquement la distribution des charges ainsi que les lignes de champ. (b) Calculer le module du champ électrique aux distances r suivantes du centre commun aux deux sphères : 3 m ; 2 m ; 1 m ; 10 cm ; 0.

2.5



b) à 3 m $E = \frac{kQ}{r^2} = \frac{8{,}99 \times 10^9 \cdot (-4 \times 10^{-6}\ \text{C} + 12 \times 10^{-6}\ \text{C})}{3^2} = 7991\ \text{N/C}$

à 2 m $E = 0$

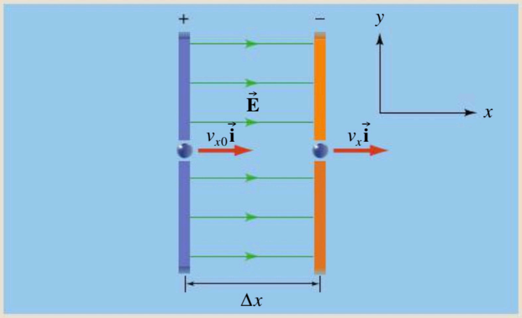
à 1 m $E = \frac{kQ}{r^2} = \frac{8{,}99 \times 10^9 (-4 \times 10^{-6})}{1^2} = -35\ 950\ \text{N/C}$

à 10 cm $E = 0$

à 0 cm $E = 0$

Exemple 2.6

Un proton parcourt une distance de 4 cm parallèlement à un champ électrique uniforme $\vec{\mathbf{E}} = 10^3\,\vec{\mathbf{i}}$ N/C, comme le montre la figure 2.20. Trouver sa vitesse finale si sa vitesse initiale est égale à 10^5 m/s.



▲ **Figure 2.20**

2,6 Comme $\vec{F} = q\vec{E}$ et $q = +1{,}602\times10^{-19}$ C

$\vec{E} = 10^3\,\vec{i}$ N/C

$\vec{F} = 1{,}602\times10^{-19} \cdot 10^3\,\vec{i} = 1{,}602\times10^{-16}\text{ N}\,\vec{i}$

Comme $W = \Delta K$

$$F\cdot\Delta s = \frac{1}{2}m(v_f^2 - v_i^2)$$

$$1{,}602\times10^{-16}\text{ N}\cdot 0{,}04\text{ m} = \frac{1}{2}m\left(v_f^2 - (10^5)^2\right)$$

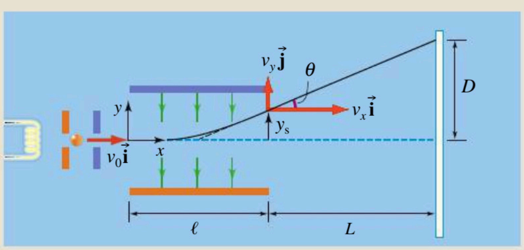
$$\frac{2\cdot 1{,}602\times10^{-16}\cdot 0{,}04}{m} + (10^5)^2 = v_f^2$$

où $m_{proton} = 1{,}6726\times10^{-27}$ Kg

$$\boxed{132\,902 \text{ m/s} = v_f}$$

Exemple 2.7 Bof

Dans un type de tube à rayons cathodiques, un mince filament chauffé émet des électrons qu'on fait passer par des ouvertures percées dans deux disques (figure 2.21), de manière à obtenir un faisceau. Leur vitesse est alors $v_0\vec{\mathbf{i}}$. Ils se déplacent ensuite entre deux plaques de longueur ℓ qui produisent un champ électrique uniforme $\vec{\mathbf{E}} = -E\vec{\mathbf{j}}$. Dans le champ, leur accélération est constante et leur trajectoire est donc parabolique, comme ce serait le cas pour un projectile soumis plutôt à la force gravitationnelle. Après avoir quitté la région comprise entre les deux plaques, ils se dirigent en ligne droite vers un écran recouvert d'une substance fluorescente, du ZnS par exemple. Un petit éclair lumineux est produit chaque fois qu'un électron frappe l'écran. Déterminer: (a) la position verticale de l'électron à sa sortie des plaques; (b) à quel angle il émerge des plaques; (c) sa position verticale finale sur l'écran, qui se trouve à une distance L de l'extrémité des plaques.



▲ **Figure 2.21**

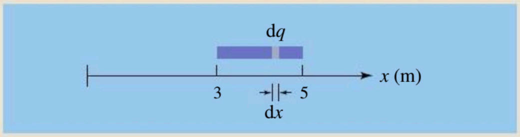
Dans un tube à rayons cathodiques, des électrons émis par un filament chauffé sont accélérés par un champ créé entre deux disques chargés (percés de trous) puis déviés par le champ électrique existant entre deux plaques. Lorsque l'électron frappe l'écran (le rectangle blanc à droite de la figure), un éclair lumineux se produit.

C'est de la cinématique 2D ! → Cours de mécanique
Les tubes à rayons cathodiques sont beaucoup moins présents dans nos objets technologiques.

Il s'agit d'une technologie qui tombe à l'abandon. Désolé !

Exemple 2.8 Bof

Un fil rectiligne de 2 m de long est situé sur l'axe des x, entre $x = 3$ m et $x = 5$ m (figure 2.31). Sa densité linéique de charge est donnée par la fonction $\lambda = 3 \times 10^{-6}\, x^2$, où x est en mètres et λ est en coulombs par mètre. Que vaut la charge totale du fil ?



▲ **Figure 2.31**

$$dQ = \lambda\, dx$$

$$dQ = 3\times10^{-6}\, x^2\, dx$$

$$Q = \int_3^5 3\times10^{-6}\, x^2\, dx$$

$$Q = 3\times10^{-6}\left(\frac{5^3}{3} - \frac{3^3}{3}\right) = 9{,}8\times10^{-5}\ \text{C}$$

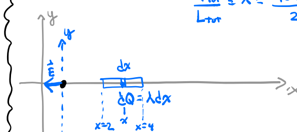
$$\boxed{Q = 98\ \mu\text{C}}$$

Exemple 2.9

Un fil rectiligne *uniformément chargé* de 2 m de long est situé sur l'axe des x, entre $x = 3$ m et $x = 5$ m. Sa charge totale est de 40 µC. Calculer le champ électrique $\vec{E}$ au point $x = 1$ m.

2.9

$$\frac{Q_{tot}}{L_{tot}} = \lambda = \frac{40\times10^{-6}\ \text{C}}{2\ \text{m}} = 20\times10^{-6}\ \frac{\text{C}}{\text{m}}$$



$$dE_x = \frac{K\, dQ}{r^3}(x_P - x_{dQ}) \quad \text{où } r = x$$

$$dE_x = \frac{K\lambda\, dx}{x^3}(-x)$$

$$dE_x = -K\lambda \frac{dx}{x^2}$$

$$E_x = -K\lambda \int_{x=2}^{x=4} \frac{dx}{x^2}$$

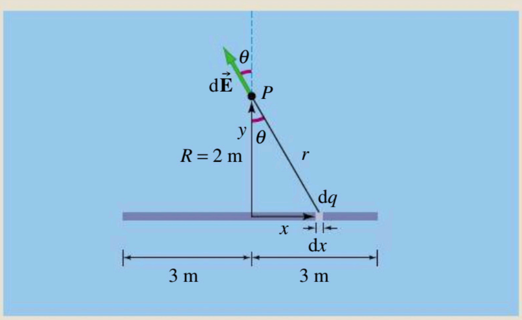
$$E_x = -K\lambda\left((-1)\frac{1}{4} - (-1)\frac{1}{2}\right)$$

$$E_x = -8{,}99\times10^{9}\cdot 20\times10^{-6}\left(-\frac{1}{4} + \frac{1}{2}\right)$$

$$\boxed{E_x = -44\ 950\ \text{N/C}}$$

Exemple 2.10

Un fil uniformément chargé a une longueur $L = 6$ m et une charge $Q = 360$ µC (figure 2.39). Calculer le module du champ en un point P situé vis-à-vis du centre du fil, à $R = 2$ m de distance.



▲ **Figure 2.39**

2.10

$$\lambda = \frac{Q_{tot}}{L_{tot}} = \frac{360\times10^{-6}\ \text{C}}{6\ \text{m}} = 6\times10^{-5}\ \text{C/m}$$

$$dQ = \lambda\, dx$$

$$r = \sqrt{x^2+R^2} = (x^2+R^2)^{1/2}$$

$$r^3 = (x^2+R^2)^{3/2}$$

$$R = 2\ \text{m}$$

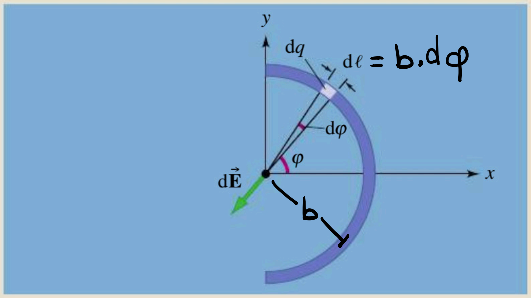
Je ne calculerai pas E_x car $E_x = 0$ par symétrie.

$$E_y = \int dE_y = \int_{-3}^{3} \frac{K(\lambda dx)(\overset{0}{y_P} - \overset{-R}{y_{dQ}})}{r^3} = \int_{-3}^{3} \frac{K\lambda R\, dx}{(x^2+R^2)^{3/2}} = K\lambda R \int_{-3}^{3} \frac{dx}{(x^2+R^2)^{3/2}}$$

$$E_y = 8{,}99\times10^{9}\cdot 6\times10^{-5}\cdot 2\cdot 0{,}416 = 448\ 808\ \text{N/C} \approx \boxed{4{,}49\times10^{5}\ \text{N/C}}$$

Exemple 2.11

Un fil uniformément chargé en forme de demi-cercle de rayon $b = 2$ m porte une charge totale $Q = 31{,}4\ \mu C$ (figure 2.41). Calculer le module du champ produit au centre de courbure du demi-cercle.



▲ **Figure 2.41**

2.11 ici je ne calculerai pas E_y car E_y est aussi nul par symétrie

$$dE_x = \frac{K\, dQ}{r^3}(x_p - x_{dQ}) \quad \text{où } x_p = 0,\ x_{dQ} = b\cdot\cos\varphi$$

$$r^3 = b^3 \qquad dQ = d\ell \cdot \boxed{\overset{\lambda}{\frac{Q}{\ell}}}$$

$$dE_x = \frac{K\, \boxed{\cancel{b}\, d\varphi \cdot \boxed{\frac{Q}{\cancel{b}\pi}}}}{b^{\cancel{3}\,2}}(0 - \cancel{b}\cdot\cos\varphi) \quad \text{où } \ell = r\cdot\pi,\ \ell = b\cdot\pi,\ d\ell = b\cdot d\varphi$$

$$dE_x = \frac{-K\, Q\, d\varphi \cos\varphi}{\pi b^2}$$

$$E_x = \int_{-90°}^{90°} -\frac{KQ}{\pi b^2}\cos\varphi\, d\varphi = -\frac{KQ}{\pi b^2}\int_{-90}^{90°}\cos\varphi\, d\varphi$$

$$E_x = -\frac{8{,}99\times10^9 \cdot 31{,}4\times10^{-6}}{\pi \cdot 2^2}\cdot \underbrace{(\sin 90 - \sin -90°)}_{2}$$

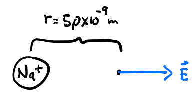
$$\boxed{E_x = 44{,}9\times10^3\ N/C}$$

Exemple 2.12 Bof !!

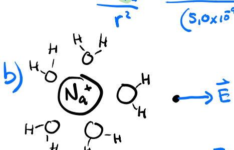
Si N atomes identiques sont liés à un atome central différent, comment doivent-ils se placer pour que la molécule soit non polaire si : (a) $N = 2$; (b) $N = 3$; (c) $N = 4$?

Exemple 2.13 Bof mais ♡ Bio !

Dans l'eau, tous les ions s'entourent de plusieurs molécules d'eau qui réduisent les interactions entre eux. (a) Calculer le champ produit par un ion Na^+ à 5,0 nm de lui dans le vide. (b) Répéter la question dans le cas où il se trouve dans l'eau pure, considérée comme homogène, pour laquelle $\kappa = 80$. (c) Quel effet la présence de l'eau a-t-elle sur l'interaction entre un ion Na^+ et une protéine portant la charge $-e$ qui passe à 5,0 nm ?

a) 

$$E = \frac{K\, Q_{Na^+}}{r^2} = \frac{8{,}99\times10^9 \cdot 1{,}602\times10^{-19}}{(5{,}0\times10^{-9})^2} = 57{,}6\times10^6\ \frac{N}{C}$$

b) 

$$\vec{E} \quad \text{mais } E = \frac{57{,}6\times10^6\ \frac{N}{C}}{80}$$

$$E = 0{,}72\times10^6\ \frac{N}{C}$$

c) L'eau entre un ion et une protéine a pour effet de diminer l'influence électrique de l'ion sur la protéine et par conséquent l'ion ne brise pas la protéine ou ne la retiendra pas suffisamment pour l'empêcher de fonctionner dans le système biologique.

RÉVISION

R1. Quel rôle joue le champ électrique entre les particules chargées ?

rôle de Transmission de l'influence électrique

R2. Comparez les définitions et les unités du champ gravitationnel et du champ électrique.

champ gravitationnel : N/kg (influence gravitationnelle)
champ électrique : N/C (influence électrique)

R3. Énoncez la règle qui permet de déterminer le sens du vecteur champ électrique produit par une charge Q en un point quelconque.

R4. Vrai ou faux ? Si on double la valeur de la charge d'une particule, le champ électrique à l'endroit où elle se trouve double.

ouf ! FAUX, E ne double pas à l'endroit de la charge mais plutôt autour d'elle.

R5. Quel physicien du XIX[e] siècle considérait les lignes de champ comme des entités matérielles ?

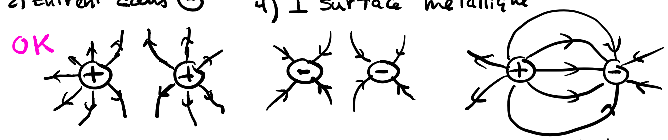
Michael Faraday (mort en 1867)

R6. Dressez une liste des propriétés des lignes de champ.

1) Sortent des ⊕
2) Entrent dans ⊖
3) Jamais ne se croissent
4) ⊥ surface métallique

R7. Tracez les lignes de champ électrique produites par une paire de charges identiques séparées par une certaine distance (a) si elles sont positives ; (b) si elles sont négatives ; (c) si elles sont de signes opposés.

OK

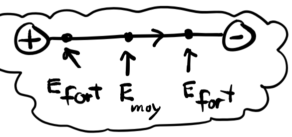


R8. Pourquoi les lignes de champ ne se croisent-elles jamais ?

En un point, E n'a qu'une seule orientation.

R9. Vrai ou faux ? Le module du champ est constant le long d'une ligne de champ.

♡ FAUX



R10. On place une charge d'essai dans le champ électrique créé par deux charges ponctuelles. Les lignes de champ indiquent-elles les trajets possibles pour la charge d'essai ?

Parfois oui mais pas Toujours

R11. Expliquez pourquoi le champ électrique à l'intérieur d'un conducteur est nul à l'équilibre électrostatique.

♡ Parce que si le E n'était pas nul, les électrons du conducteur se mettraient en mouvement et l'équilibre statique ne serait pas possible.

R12. Expliquez pourquoi le champ électrique est perpendiculaire à la surface d'un conducteur à l'équilibre électrostatique.

Parce la composante du E parallèle à la surface serait non nulle et entrainerait un mouvement des électrons.

R13. Puisque des objets chargés infinis n'existent pas, dans quelles conditions peut-on utiliser l'équation valable pour le fil infini (équation 2.13) ? Celle valable pour la plaque infinie (équation 2.18) ?

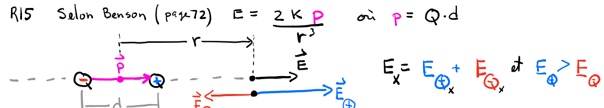
♡ Il faut que le point étudié soit relativement proche du fil ou de la plaque.

R14. Comment le module du champ électrique varie-t-il en fonction de la distance dans le cas (a) d'une charge ponctuelle ; (b) d'un fil infini uniformément chargé ; (c) d'une plaque infinie uniformément chargée ?

♡ a) $E \propto \frac{1}{r^2}$ b) $E \propto \frac{1}{r}$ (r = distance)
c) E est indépendant de la distance

R15. Le champ électrique produit par un dipôle est proportionnel à son moment dipolaire électrique, lequel est proportionnel à la distance qui sépare les charges. Expliquez en quoi la séparation des charges affecte la valeur du champ.

R15 Selon Benson (page 72) $E = \frac{2Kp}{r^3}$ où $p = Q \cdot d$



La meilleure façon de répondre à R15 est d'imaginer que d diminue et devienne presque zéro. Dans cette situation, le champ E deviendra nul car les contributions de ⊖ et ⊕ seront de mêmes grandeurs mais de sens contraires.

R16. Expliquez pourquoi le moment dipolaire électrique de la molécule d'eau en fait un solvant très puissant. Quelle importance cela a-t-il pour l'existence de la vie ?

← voir p.69

R17. Pourquoi des molécules amphiphiles peuvent-elles spontanément se regrouper pour former une membrane cellulaire ? Expliquez le rôle de l'eau.

← voir p.70

QUESTIONS

Q1. Soit un champ électrique créé par un ensemble de charges immobiles. Lorsqu'on introduit une nouvelle charge dans la région, les lignes de champ sont modifiées. Devrait-on utiliser les lignes initiales ou les nouvelles lignes pour déterminer la direction de la force agissant sur la nouvelle charge ?

→ Q créent le champ

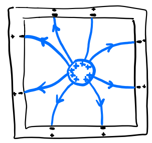
Rép. : lignes initiales

→ q subit le champ des Q

Q2. Les lignes de champ électrique partent des charges positives et se dirigent vers les charges négatives. Que deviennent les lignes créées par une charge isolée ?

Elle s'en vont vers l'infini dans tous les sens. "Vers l'infini et plus loin encore!" Buzz lightyear

Q3. On place une charge ponctuelle au centre d'un cube métallique creux non chargé. Dessinez les lignes de champ à l'intérieur du cube dans un plan parallèle à une face et passant par la charge.



Q4. Expliquez qualitativement pourquoi le champ électrique créé par une plaque infinie chargée est uniforme.

P proche < GRANDE INTensité de la région centrale / FAIBLE Efficatité de la région periphérique

$\vec{E}$ est le mien

P loin < Plus Faible Intensité de la région centrale / Grande Efficatite de la région périphérique

Q5. Quatre charges électriques ponctuelles et identiques sont situées aux sommets d'un carré. Où, ailleurs qu'à l'infini et au centre du carré, le champ électrique résultant est-il nul ?

nulle part ailleurs

Q6. En quoi la loi de Coulomb et la loi de la gravitation universelle de Newton se ressemblent-elles ? En quoi sont-elles différentes ? Considérez les lois proprement dites et leurs modes d'application.

$K \frac{Q_1 Q_2}{r_{12}^2}$ // $G \frac{M_1 M_2}{r_{12}^2}$

K → Extremement élevée

G → Extremement faible

Q7. Le champ gravitationnel a-t-il parfois la configuration d'un dipôle ? Si oui, donnez un exemple en indiquant comment cela peut se produire.

non (Et j'espère ne pas me tromper!)

Q8. Citez deux champs observés dans la vie quotidienne qui sont (a) scalaires ; (b) vectoriels.

BoF!

Q9. Quel est le travail effectué pour faire tourner un dipôle électrique de 180° dans un champ électrique uniforme, dans chacun des cas suivants : (a) de 0° à 180° ; (b) de −90° à +90° ? Les angles sont mesurés par rapport à $\vec{E}$.

non convert par le cours

Q10. Les molécules CO_2 et H_2O contiennent toutes deux des atomes identiques liés à un atome central. Pourtant, la première est non polaire alors que la seconde est polaire. Que cela vous indique-t-il quant à leurs géométries ? Laquelle peut traverser le plus facilement une membrane cellulaire ?

non convert par le cours

Q11. Si on place des molécules amphiphiles dans un solvant non polaire et qu'on agite, vont-elles former des bicouches similaires à une membrane cellulaire, comme elles le font dans l'eau ? Sinon, quelles seront les différences ?

non convert par le cours

Méthode de résolution

Le champ électrique

Voici les étapes à suivre pour calculer en un point P le champ électrique résultant créé par plusieurs charges sources *ponctuelles* :

1. Identifier les charges sources. Pour chacune d'elles, tracer le vecteur champ qu'elle crée au point P (on peut trouver l'orientation de ce vecteur en imaginant la force que subirait une charge d'essai positive si elle était située en ce point).
2. Déterminer le module du champ dû à chacune des charges sources à l'aide de l'équation 2.2 :
$$E = \frac{k|Q|}{r^2}$$
3. Placer l'origine au point P où on cherche $\vec{\mathbf{E}}$. Calculer et additionner les composantes selon chaque axe pour obtenir les composantes du champ résultant $\vec{\mathbf{E}}$. Les valeurs et les signes de ces composantes dépendront du choix des axes.

Méthode de résolution

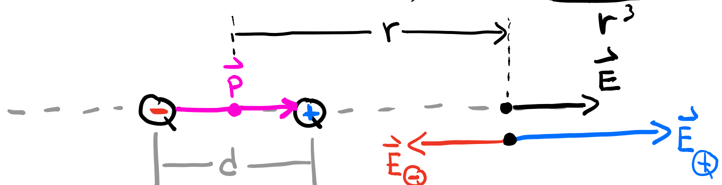
Champ produit par une charge non ponctuelle

Voici les étapes recommandées pour calculer le champ électrique produit par une distribution de charge continue :

1. Tracer un schéma de la situation et dessiner un élément de charge dq *quelconque* :
   - Si la charge est distribuée sur un fil, écrire $dq = \lambda\, d\ell$.
   - Si la charge est distribuée sur une plaque, écrire $dq = \sigma\, dA$.

   Choisir un système d'axes qui permettra, si besoin est, d'exprimer $d\ell$ en fonction d'une seule coordonnée ou d'exprimer dA simplement.
2. Illustrer le vecteur champ $d\vec{\mathbf{E}}$ produit par dq. Calculer son module dE. Par exemple, pour un dq ponctuel, écrire $dE = k|dq|/r^2$, puis exprimer dq et r en fonction de *variables*. (L'expression obtenue doit être valable où que soit placé l'élément de charge et non correspondre à un élément de charge en particulier.)
3. Calculer les composantes de $d\vec{\mathbf{E}}$. Même si $d\vec{\mathbf{E}}$ est parallèle à un axe x, il faut distinguer dE et dE_x, qui peuvent avoir un signe différent.
4. Afin de réduire le nombre d'intégrales à résoudre, utiliser la symétrie de la situation pour déduire si le champ selon un ou deux des trois axes est nul. Écrire l'intégrale selon chaque composante où le champ est non nul. Par exemple, $E_x = \int dE_x$.
5. Souvent, l'intégrale obtenue contient trois variables : dq, r et un angle utilisé pour calculer la composante de dE. Utiliser la géométrie de la situation pour exprimer toutes ces variables en fonction d'une même variable d'intégration (qui est souvent une des coordonnées du système d'axes ou encore une coordonnée angulaire). Ce faisant, il faut s'assurer que $d\ell$ demeure positif, car il s'agit d'une longueur et non d'une composante vectorielle.
6. Déterminer les bornes d'intégration qui correspondent aux valeurs extrêmes de la variable d'intégration, puis intégrer afin d'obtenir chaque composante du champ résultant.

R15 Selon Benson (page 72) $E = \frac{2Kp}{r^3}$ où $p = Q \cdot d$



$E_x = E_{\oplus x} + E_{\ominus x}$ et $E_{\oplus} > E_{\ominus}$

La meilleure façon de répondre à R15 est d'imaginer que d diminue et devienne presque zéro. Dans cette situation, le champ E deviendra nulle car la contribution de ⊖ et ⊕ seront de mêmes grandeurs mais de sens contraires.