

Électrostatique - Corrigés

Ces corrigés accompagnent le chapitre **Électrostatique**. Après lecture d'une solution, reprenez la question sans regarder le corrigé. Repérez si votre difficulté concernait le sens d'une force (attraction ou répulsion, charge positive ou négative), le carré de la distance, le côté où une charge peut être en équilibre, la racine carrée du rapport des charges, ou la différence entre le champ (force par charge) et le potentiel (énergie par charge). On prend $k = 9 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$ et $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

Vérifications flash

F1 — La boule qui perd des électrons

Perdre des électrons, c'est perdre de la charge négative : la boule devient **positive**. $q = 5 \times 10^{10} \times 1,6 \times 10^{-19} = 8 \times 10^{-9} \text{ C}$, soit 8 nC. Une boule à $-3,2 \text{ nC}$ porte $3,2 \times 10^{-9} / 1,6 \times 10^{-19} = 2 \times 10^{10}$ électrons en excès.

F2 — L'électroscope négatif

Les feuilles s'écartent selon leur propre charge. Une baguette négative approchée de la boule repousse les électrons libres vers le bas : la boule, qui en perd, devient **moins négative** ; les feuilles, qui en reçoivent, deviennent **plus négatives** et s'écartent davantage. Une baguette positive attire au contraire les électrons vers la boule : les feuilles, moins chargées, se rapprochent. Dans les deux cas la charge totale de l'électroscope est inchangée : rien ne l'a touché.

F3 — Les facteurs

Charge triplée : $\times 3$; distance doublée : $\div 4$; au total $\frac{3}{4}F_0$. Charges divisées par 2 chacune : $\div 4$; distance divisée par 4 : $\times 16$; au total $4F_0$. Les deux forces sont toujours égales : la petite charge subit exactement la même force que la grande.

F4 — Les deux charges positives

Même signe : l'équilibre est entre les deux, plus près de la plus petite. $d_{+1}/d_{+4} = \sqrt{1/4} = \frac{1}{2}$ et $d_{+1} + d_{+4} = 30 \text{ cm}$: $d_{+1} = 10 \text{ cm}$, $d_{+4} = 20 \text{ cm}$. Vérification : $4/20^2 = 1/10^2$. Le signe de q retourne les deux forces ensemble, la position est la même. Si la charge de $+1 \text{ nC}$ devient -1 nC , les signes sont contraires : l'équilibre est à l'extérieur, du côté de la plus petite (-1 nC), avec $d_{+4} = 2d_{-1}$ et $d_{+4} = d_{-1} + 30$, soit $d_{-1} = 30 \text{ cm}$ au-delà de -1 nC .

F5 — Le triangle équilatéral

Les deux charges de la base sont à la même distance de q : les deux forces ont la même grandeur et sont symétriques par rapport à la médiatrice de la base. Leurs composantes parallèles à la base s'annulent ; la résultante est portée par l'axe de symétrie, vers l'extérieur (répulsion) pour $q > 0$, vers la base pour $q < 0$. Si l'une des charges de la base devient négative, $q > 0$ est repoussée par l'une et attirée par l'autre : les composantes **le long de l'axe** s'annulent cette fois et il reste une résultante **parallèle à la base**, dirigée vers la charge négative.

F6 — Le champ en M

$\vec{F} = q\vec{E}$. Pour -2 nC : $2 \times 10^{-9} \times 500 = 10^{-6} \text{ N}$, vers la **gauche** (charge négative, force opposée au champ). Pour $+4 \text{ nC}$: $2 \times 10^{-6} \text{ N}$ vers la droite. Le champ est créé par d'autres charges, il existe en M que l'on y place ou non une charge d'essai.

F7 — Deux charges égales

Sur la médiatrice, les deux champs ont même grandeur et sont symétriques : leurs composantes le long de AB s'annulent, le champ total est perpendiculaire à AB et fuit le segment (charges positives). Sur la droite (AB), le champ est nul au milieu, où les deux champs opposés sont égaux. Avec $+9Q$ en B : $d_B/d_A = \sqrt{9} = 3$ et $d_A + d_B = AB$, donc $d_A = AB/4$.

F8 — Proton et électron

Même valeur absolue de charge, même champ : forces de même grandeur eE , de sens opposés. L'accélération F/m est environ 1800 fois plus grande pour l'électron, qui est d'autant plus léger. Le proton est poussé dans le sens du champ, vers la plaque négative ; l'électron à l'opposé, vers la plaque positive.

F9 — Le quadrillage

Axe du champ : (Ox) . De $A(0;2)$ à $B(2;3)$: $x_B - x_A = 2 \text{ m}$, $W = (-3) \times 2 \times 2 = -12 \text{ J}$, résistant (la charge négative est poussée vers la gauche et elle va vers la droite). De $B(2;3)$ à $C(2;0)$: $x_C - x_B = 0$, le déplacement est perpendiculaire au champ, $W = 0$. Aucun tronçon n'est moteur.

F10 — Les plaques sous 400 V

$E = U/d = 400/0,04 = 10^4 \text{ Vm}^{-1}$. Le proton, poussé de $\oplus$ vers $\ominus$, gagne $eU = 1,6 \times 10^{-19} \times 400 = 6,4 \times 10^{-17} \text{ J}$. L'électron, poussé de $\ominus$ vers $\oplus$, gagne la même énergie : même charge en valeur absolue, même tension traversée dans le sens de sa force.

Exercices d'apprentissage

E1 — Deux boules et un électroscope

1. Deux boules identiques se partagent la charge à égalité : $+4 \text{ nC}$ chacune. La boule A attire des électrons de B : 4 nC de charge, soit $4 \times 10^{-9}/1,6 \times 10^{-19} = 2,5 \times 10^{10}$ électrons, passés de B vers A .
2. B ($+4 \text{ nC}$) et C (neutre) se partagent : $+2 \text{ nC}$ chacune. Bilan : $A = +4 \text{ nC}$, $B = +2 \text{ nC}$, $C = +2 \text{ nC}$, total $+8 \text{ nC}$, la charge initiale.
3. La boule A , positive, attire les électrons libres de l'électroscope vers sa boule : celle-ci devient **plus négative**, les feuilles, qui perdent des électrons, **moins négatives** ; leur écart **diminue**. La charge totale de l'électroscope ne change pas.
4. Par influence, la face de la sphère proche de A devient négative, la face éloignée positive ; la face proche est plus attirée que la face éloignée n'est repoussée : la sphère est **attirée**. Avec A négative, les signes s'échangent et la sphère est encore attirée : un corps chargé attire toujours un conducteur neutre.

E2 — Raisonner avec la loi de Coulomb

1. $F = 9 \times 10^9 \times (2 \times 10^{-6})^2/0,1^2 = 9 \times 10^9 \times 4 \times 10^{-12}/10^{-2} = 3,6 \text{ N}$, répulsive (même signe).

- Distance triplée : force divisée par 9, soit 0,4 N.
- Une charge triplée ($\times 3$) et distance doublée ($\div 4$) : $3,6 \times \frac{3}{4} = 2,7$ N. Les deux charges subissent la **même** force, actions réciproques.
- Diviser la force par 4 exige de doubler la distance : 20 cm.

E3 — La charge d'équilibre, trois inconnues

- Même signe : entre A et B , plus près de A . $d_B/d_A = \sqrt{4} = 2$ et $d_A + d_B = 30$ cm : $d_A = 10$ cm, $d_B = 20$ cm. Le signe de q ne change rien : les deux forces se retournent ensemble.
- Signes contraires : à l'extérieur, du côté de la plus petite charge, A . $d_B/d_A = \sqrt{8/2} = 2$ et $d_B = d_A + 10$: $d_A = 10$ cm, à gauche de A (et 20 cm de B). Vérification : $2/10^2 = 8/20^2$.
- La charge de -12 nC repousse celle de -3 nC vers Q . Pour l'équilibre, Q doit la repousser vers -12 nC : Q est **négative**. Grandeur : $|Q|/4^2 = 12/8^2$, donc $|Q| = 12 \times 16/64 = 3$ nC, et $Q = -3$ nC.

E4 — Le carré

- Les quatre sommets sont à la même distance de O et les charges ont la même valeur absolue : les quatre champs ont la même grandeur, chacun porté par une diagonale. Celui de A ($+q$) fuit A , donc pointe vers C (en bas à droite); celui de B fuit B , vers D (en bas à gauche); celui de C ($-q$) pointe vers C (en bas à droite); celui de D pointe vers D (en bas à gauche). Les composantes horizontales se compensent deux à deux, les composantes verticales sont toutes vers le bas : champ **vertical, vers le bas**, de la rangée positive vers la rangée négative.
- $\vec{F} = q\vec{E}$: $+Q$ est poussée **vers le bas**, $-Q$ **vers le haut**.
- Quatre charges égales et de même signe, à égale distance : les champs se compensent deux à deux, le champ en O est **nul**.
- Les champs de A (vers C) et de C , maintenant positif (fuyant C , donc vers A), sont opposés et de même grandeur : ils s'annulent. Il reste le champ de B (vers D) et celui de D (négatif, vers D) : champ **suivant la diagonale BD , vers D** .

E5 — Entre deux plaques

- $E = U/d = 500/0,05 = 10^4$ V m $^{-1}$, de la plaque positive vers la plaque négative.
- $F = eE = 1,6 \times 10^{-19} \times 10^4 = 1,6 \times 10^{-15}$ N, dans le sens du champ : le proton est attiré vers la plaque **négative**. L'électron subit une force de même valeur, opposée au champ : vers la plaque **positive**.
- Axe dans le sens du champ, $x_B - x_A = d$. Proton : $W = eEd = eU$, soit $1,6 \times 10^{-19} \times 500 = 8 \times 10^{-17}$ J, moteur. Électron : $W = -eU = -8 \times 10^{-17}$ J, résistant.
- De la plaque négative à la plaque positive, l'électron va dans le sens de sa force : $W = +eU = 8 \times 10^{-17}$ J. Théorème de l'énergie cinétique : $E_c = 10^{-16} + 0,8 \times 10^{-16} = 1,8 \times 10^{-16}$ J.
- $\frac{1}{2}mv^2 = eU = 8 \times 10^{-17}$ J : $v^2 = 2 \times 8 \times 10^{-17} / 1,6 \times 10^{-27} = 10^{11}$, donc $v = \sqrt{10} \times 10^5 \simeq 3,2 \times 10^5$ m s $^{-1}$.

E6 — Le quadrillage

- Axe du champ vers le bas : la montée de 2 m compte pour $x_B - x_A = -2$ m. $W = 2 \times 5 \times (-2) = -20$ J, résistant : la charge positive est poussée vers le bas et elle monte.
- $W = (-2) \times 5 \times (-2) = +20$ J, moteur : la charge négative est poussée vers le haut.

3. $A \rightarrow C$: déplacement perpendiculaire au champ, $W = 0$. $C \rightarrow B$: montée de 2 m, $W = -20$ J. Total -20 J, comme par le chemin direct : la force est conservative.
4. $U_{AB} = W_{AB}/q = -20/2 = -10$ V : $V_B = V_A + 10$ V, le point B est au potentiel le plus élevé. Le potentiel décroît dans le sens du champ, donc croît quand on monte.
5. A et C sont à la même hauteur le long du champ : même potentiel. B est 2 m plus haut : $V_A = V_C < V_B$.

QCM d'automatismes

A1 — Réponse A

Des charges de même signe se repoussent. Des signes contraires donneraient une attraction (B) ; une charge nulle ne subit aucune force (C) ; l'égalité des valeurs absolues (D) ne dit rien du sens.

A2 — Réponse A

Le coulomb est la charge transportée par un courant d'un ampère en une seconde : $1 \text{ C} = 1 \text{ As}$. B inverse le rapport ; C et D ne sont pas des unités de charge.

A3 — Réponse C

La force varie en $1/d^2$: distance doublée, force divisée par 4. B oublie le carré.

A4 — Réponse C

Actions réciproques : les deux forces ont la même grandeur, $k \times 1 \times 5/d^2$ pour chacune. A et D appliquent la proportionnalité à une seule des deux charges.

A5 — Réponse B

Conservation de la charge et partage à égalité entre corps identiques : $+3 \text{ nC}$ et $+3 \text{ nC}$. C ne conserve pas la charge totale (0 au lieu de $+6 \text{ nC}$) ; A et D supposent qu'aucun partage n'a eu lieu.

A6 — Réponse B

Le champ d'une charge négative pointe vers elle ; il fuit une charge positive (A). Il est radial, jamais perpendiculaire à la droite qui joint la charge au point (C), et non nul (D).

A7 — Réponse B

$\vec{F} = q\vec{E}$ avec $q = -e < 0$: force opposée au champ. La masse n'entre pas dans la force (D), seulement dans l'accélération.

A8 — Réponse A

$U = Ed$ donne E en volts par mètre : $1 \text{ NC}^{-1} = 1 \text{ V m}^{-1}$. C est l'unité du potentiel, le volt ; D est un ohm.

A9 — Réponse B

$W = qE(x_B - x_A)$: seul compte le déplacement le long du champ ; un déplacement perpendiculaire a $x_B - x_A = 0$. Un déplacement opposé au champ (C) donne un travail non nul, de signe opposé à celui de A.

A10 — Réponse A

La différence de potentiel est un travail par unité de charge : $1 \text{ V} = 1 \text{ J C}^{-1}$. Le watt est un joule par seconde (D).

A11 — Réponse A

Un contact transfère de la charge : la baguette positive cède une partie de sa charge, l'électroscope devient plus positif et ses feuilles, plus chargées, s'écartent davantage. C décrit l'approche **sans** contact d'une baguette positive (charge totale inchangée, écart plus grand par influence) ; B et D confondent les deux effets.

A12 — Réponse B

Actions réciproques : forces de même grandeur, $3kq^2/d^2$ chacune. A et C appliquent le facteur 3 à une seule force ; D est faux, les deux forces sont opposées (répulsion, même signe).

A13 — Réponse B

La charge élémentaire vaut $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$. La sphère porte donc $4,8/1,6 = 3$ charges élémentaires négatives : elle possède un excès de trois électrons. Un déficit d'électrons donnerait au contraire une charge positive ; les propositions C et D donnent un mauvais quotient.

QCM de niveau concours**C1 — Réponse C**

Signes contraires : attraction, flèches l'une vers l'autre, ce qui élimine (1). Actions réciproques : même longueur, ce qui élimine (2) et (4). La grosse sphère et la charge de $-5 \mu\text{C}$ ne subissent pas une force plus grande que la charge de $+2 \mu\text{C}$.

C2 — Réponse A

Même signe : entre A et B, plus près de la plus petite, A. $d_B/d_A = \sqrt{9} = 3$ et $d_A + d_B = 40 \text{ cm}$: $d_A = 10 \text{ cm}$, à droite de A. B est la bonne distance du mauvais côté (à 10 cm de B, on a $1/30^2 \neq 9/10^2$) ; C oublie la racine ($d_B/d_A = 9$ donnerait 4 cm) ou prend le rapport $1/2$; D place q hors du segment, impossible pour deux charges de même signe.

C3 — Réponse B

La charge de -9 nC repousse celle de -1 nC vers Q ; Q doit la repousser en sens inverse : Q négative. Grandeur : $|Q|/2^2 = 9/6^2$, donc $|Q| = 9 \times 4/36 = 1 \text{ nC}$: $Q = -1 \text{ nC}$. A divise par 9 au lieu de multiplier par $4/36$; C prend le rapport des distances sans le carré ($9 \times 2/6$) ; D oublie les distances.

C4 — Réponse A

Signes contraires : équilibre à l'extérieur, du côté de la plus petite charge, A ; cela élimine B (du côté de B), C et D (entre les deux). Grandeur : $d_B/d_A = \sqrt{4} = 2$ et $d_B = d_A + 6$: $d_A = 6$ cm, à gauche de A . Vérification : $1/6^2 = 4/12^2$.

C5 — Réponse A

Les composantes verticales s'annulent deux à deux (une charge du haut contre une charge du bas, de même valeur). Les charges $3Q$ de droite attirent la charge négative trois fois plus fort que les Q de gauche : résultante horizontale, **vers la droite**. B serait la réponse pour une charge positive au centre, repoussée ; C exige quatre charges égales ; D confond avec une disposition où les charges différentes seraient en haut et en bas.

C6 — Réponse B

Signes contraires : le champ ne peut pas s'annuler entre A et B , où les deux champs ont le même sens (A est faux). Le point nul est à l'extérieur, du côté de la plus petite charge, $+Q$ en A : à gauche de A , là où $Q/d_A^2 = 4Q/d_B^2$ avec $d_B = d_A + AB$, soit $d_A = AB$. C est du mauvais côté : près de B , le champ de $-4Q$ l'emporte toujours.

C7 — Réponse D

Toutes les charges sont à la même distance du centre : les grandeurs des champs sont proportionnelles aux charges, chacun porté par une diagonale. Composantes verticales au centre : 4 nC (haut gauche) fuit vers le bas ; 2 nC (haut droit) fuit vers le bas ; -1 nC (bas gauche) attire vers le bas ; $Q > 0$ (bas droit) fuit vers le haut. Champ horizontal si $Q = 4 + 2 + 1 = 7$ nC. Le côté de 8 cm est inutile. B et C oublient une des trois charges ou se trompent sur le sens du champ de la charge négative ; A ne compense qu'une charge.

C8 — Réponse B

Axe du champ : (Ox) . $x_B - x_A = 1 - 3 = -2$ m : $W = 2 \times 4 \times (-2) = -16$ J, résistant, la charge positive remonte le champ. A oublie le signe ; C et D prennent un déplacement de 1 m ou confondent avec la composante y .

C9 — Réponse B

$E = U/d = 300/0,03 = 10^4 \text{ V m}^{-1} = 10^4 \text{ N C}^{-1}$: B est correct, A a divisé par 3 au lieu de $0,03$. Un proton est poussé dans le sens du champ, vers la plaque **négative** (C faux). Un électron allant de la plaque négative à la plaque positive se déplace dans le sens de sa force (opposée au champ) : travail **positif** (D faux).

C10 — Réponse A

Par influence, la face de la sphère proche de la baguette prend une charge de signe contraire à celle-ci, la face éloignée une charge de même signe ; la face proche est plus attirée que la face éloignée n'est repoussée. La sphère est attirée quel que soit le signe de la baguette. C oublie que « neutre » n'interdit pas le déplacement des électrons libres ; D n'est vrai pour aucun signe.

C11 — Réponse D

En prenant l'axe orienté vers la droite, le déplacement vaut $\Delta x = -0,30$ m. Le travail est $W = qE\Delta x = (-2,0 \times 10^{-6}) \times 200 \times (-0,30)$ J, soit $+1,2 \times 10^{-4}$ J, donc $+120 \mu\text{J}$. La charge

négligable subit une force vers la gauche, dans le même sens que son déplacement : son travail est moteur. A oublie l'un des deux signes négatifs, B une puissance de dix et C le fait qu'un déplacement opposé au champ peut fournir un travail non nul.