

Interactions fondamentales et notion de champ

COURS • P01 • PREMIÈRE

Spécialité de première, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

Ce que tu dois savoir faire	1
Cours	1
Exemples résolus	7
Méthodes et pièges	8
Vers le PASS	9
Exercices	9
Corrigés	11

Ce que tu dois savoir faire

- Citer les quatre interactions fondamentales et associer à chacune l'échelle à laquelle elle assure la cohésion de la matière.
- Utiliser la loi de Coulomb pour calculer la valeur d'une force électrostatique entre deux charges ponctuelles, et représenter les deux forces.
- Utiliser la loi de la gravitation universelle pour calculer la valeur d'une force gravitationnelle et représenter les deux forces.
- Comparer les deux lois (analogies, différences) et comparer les ordres de grandeur des deux interactions dans une situation donnée.
- Définir le champ électrostatique et le champ de gravitation à partir de la force subie par une charge test ou une masse test.
- Calculer le champ électrostatique créé par une charge ponctuelle et le champ de gravitation créé par un astre à symétrie sphérique.
- Relier le champ de gravitation terrestre au champ de pesanteur et l'exprimer à une altitude donnée.
- Représenter et interpréter une carte de lignes de champ (orientation, densité, champ uniforme).
- Exprimer et calculer le champ électrostatique uniforme entre deux plaques planes et parallèles : $E = U/d$.
- Déterminer le sens de la force subie par une particule chargée placée entre deux plaques.

Cours

1. Les interactions fondamentales et la charge électrique

Toutes les forces observées dans la nature se ramènent à **quatre interactions fondamentales** :

Interaction	Ce qui la subit	Portée	Rôle dans la cohésion
Gravitationnelle	toute masse	infinie (décroît en $1/d^2$)	systèmes astronomiques : planètes, étoiles, galaxies
Électromagnétique	toute charge électrique	infinie (décroît en $1/d^2$ pour deux charges ponctuelles)	atomes, molécules, liquides, solides, êtres vivants
Forte	les nucléons (protons, neutrons)	très courte, environ 10^{-15} m	noyaux atomiques
Faible	toutes les particules de matière	encore plus courte	intervient dans certaines désintégrations radioactives (β)

La **charge électrique** q est une propriété de la matière, exprimée en coulombs (C). Elle peut être positive ou négative. Deux charges de même signe se repoussent, deux charges de signes contraires s'attirent.

La charge est **quantifiée** : toute charge observable est un multiple entier de la **charge élémentaire** $e = 1,60 \times 10^{-19}$ C. Le proton porte la charge $+e$, l'électron la charge $-e$, le neutron est neutre. Un ion Fe^{3+} porte donc $q = 3e = 4,80 \times 10^{-19}$ C ; un ion Cl^- porte $q = -e$.

La charge est **conservée** : dans un système isolé, la somme algébrique des charges ne varie pas. Électriser un objet (par frottement, par contact, par influence) revient à déplacer des électrons d'un corps à un autre, jamais à en créer. Une règle en plastique frottée avec un tissu gagne des électrons et devient négative ; le tissu en perd autant et devient positif.

On distingue les **conducteurs** (métaux, solutions ioniques), dans lesquels des porteurs de charge peuvent se déplacer, et les **isolants** (verre, plastiques, air sec), où les charges restent localisées là où on les a déposées.

La matière est, à grande échelle, électriquement neutre : autant de charges positives que négatives. C'est pour cette raison que la gravitation, pourtant beaucoup plus faible, domine à l'échelle des astres.

2. La loi de Coulomb

Soient deux corps ponctuels A et B, immobiles, portant les charges q_A et q_B et séparés par la distance d . Ils exercent l'un sur l'autre des forces électrostatiques décrites par la **loi de Coulomb** :

$$F(A/B) = F(B/A) = k \times |q_A \times q_B| / d^2$$

- F en newtons (N), q en coulombs (C), d en mètres (m) ;
- k est la constante de Coulomb : $k = 1/(4\pi \epsilon_0) \approx 8,99 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{C}^{-2}$, où $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$ est la permittivité du vide.

Caractéristiques des forces :

- **direction** : la droite (AB) ;
- **sens** : force répulsive si q_A et q_B sont de même signe (produit positif), attractive si les signes sont contraires (produit négatif) ;
- **valeur** : donnée par la formule ci-dessus.

Sous forme vectorielle, en notant $\vec{u}(AB)$ le vecteur unitaire dirigé de A vers B :

$$\vec{F}(A/B) = k \times q_A \times q_B / d^2 \times \vec{u}(AB)$$

Le signe du produit $q_A \times q_B$ fixe automatiquement le sens : produit positif, la force exercée sur B est dirigée de A vers B (B est repoussé) ; produit négatif, elle est dirigée vers A.

Les deux forces $\vec{F}(A/B)$ et $\vec{F}(B/A)$ sont **opposées** (même droite d'action, même valeur, sens contraires) : c'est le principe des actions réciproques, vu en seconde. Une petite charge et une grosse charge subissent donc des forces de même valeur.

Pourquoi en $1/d^2$? Si l'on double la distance, la force est divisée par $2^2 = 4$; si on la triple, elle est divisée par 9. Une manière de le comprendre : l'influence d'une charge se répartit sur une sphère dont la surface $4\pi d^2$ croît comme d^2 . C'est la même géométrie que pour la gravitation, d'où la forme identique des deux lois.

Exemple court : deux charges de +1,0 nC distantes de 3,0 cm. $F = 8,99 \times 10^9 \times (1,0 \times 10^{-9})^2 / (3,0 \times 10^{-2})^2 = 8,99 \times 10^{-9} / 9,0 \times 10^{-4} \approx 1,0 \times 10^{-5}$ N, force répulsive.

3. La loi de la gravitation universelle

Deux corps ponctuels A et B de masses m_A et m_B , séparés de la distance d, s'attirent selon la **loi de la gravitation universelle** (Newton) :

$$F(A/B) = F(B/A) = G \times m_A \times m_B / d^2$$

- $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2}$ est la constante de gravitation universelle ;
- m en kilogrammes (kg), d en mètres (m), F en newtons (N).

Caractéristiques : direction (AB), force **toujours attractive**, valeur donnée par la formule. Sous forme vectorielle :

$$\vec{F}(A/B) = - G \times m_A \times m_B / d^2 \times \vec{u}(AB)$$

Le signe « moins » traduit que la force exercée sur B est dirigée vers A.

Corps à symétrie sphérique. Un astre dont la masse est répartie de façon à symétrie sphérique (couches homogènes concentriques) agit, à l'extérieur, comme si toute sa masse était concentrée en son centre. On prend alors pour d la distance entre les centres. C'est ce qui permet d'appliquer la loi à la Terre, à la Lune ou au Soleil.

Comparaison des deux lois.

	Loi de Coulomb	Loi de la gravitation
Grandeur source	charge q (positive ou négative)	masse m (toujours positive)
Constante	$k \approx 8,99 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{C}^{-2}$	$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2}$
Dépendance en distance	$1/d^2$	$1/d^2$
Sens	attractive ou répulsive	toujours attractive
Écran possible	oui (les charges se compensent)	non

Les deux lois ont la même forme mathématique, mais les ordres de grandeur sont sans commune mesure : à l'échelle des particules, la force électrostatique l'emporte d'un facteur de l'ordre de 10^{39} (voir l'exemple résolu 1).

4. La notion de champ

Une charge ou une masse modifie les propriétés de l'espace qui l'entoure : toute autre charge ou masse placée en un point de cet espace subit une force. On décrit cette propriété de l'espace par un **champ** : une grandeur définie en chaque point. Un champ est **vectoriel** s'il associe un vecteur à chaque point (champ électrostatique, champ de gravitation), **scalaire** s'il associe un nombre (champ de température, champ de pression).

L'intérêt du champ : il sépare la cause (la source) de l'effet (la force sur l'objet test). On calcule une fois le champ créé par la source, puis la force sur n'importe quel objet s'obtient par une simple multiplication.

Champ électrostatique. Une charge test q placée en un point M subit la force $\vec{F}$. Le champ électrostatique en M est :

$$\vec{E}(M) = \vec{F} / q, \text{ soit } \vec{F} = q \times \vec{E}$$

- E en newtons par coulomb ($\text{N}\cdot\text{C}^{-1}$), unité équivalente au volt par mètre ($\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$), plus utilisée.
- Si $q > 0$, la force a le **même sens** que le champ ; si $q < 0$, la force est de **sens opposé** au champ.
- Le champ ne dépend pas de la charge test : il ne dépend que des charges sources et du point M .

Champ créé par une charge ponctuelle Q . En combinant la loi de Coulomb et la définition :

$$\vec{E}(M) = k \times |Q| / r^2, \text{ avec } r = OM \text{ la distance entre la charge source } O \text{ et le point } M.$$

$$\vec{E}(M) = k \times Q / r^2 \times \vec{u}(OM) : \text{ le champ est } \textbf{radial}, \text{ dirigé vers l'extérieur (« fuyant » la charge) si } Q > 0, \text{ dirigé vers la charge si } Q < 0.$$

Champ de gravitation. Une masse test m placée en M subit la force $\vec{F}$. Le champ de gravitation en M est :

$$\vec{g}(M) = \vec{F} / m, \text{ soit } \vec{F} = m \times \vec{g}$$

- g en newtons par kilogramme ($\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$), unité équivalente au $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$.
- Comme $m > 0$, la force a toujours le sens du champ.

Champ créé par un astre de masse M à symétrie sphérique, à la distance r de son centre O (r supérieur ou égal au rayon R de l'astre) :

$$\vec{g}(r) = G \times M / r^2, \text{ dirigé vers le centre de l'astre.}$$

$$\text{À la surface de la Terre } (M = 5,97 \times 10^{24} \text{ kg}, R = 6,37 \times 10^6 \text{ m}) : g_0 = G \times M / R^2 \approx 9,81 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}. \text{ À l'altitude } h, r = R + h \text{ et } g(h) = G \times M / (R + h)^2 = g_0 \times R^2 / (R + h)^2.$$

Champ de pesanteur. Le poids $\vec{P} = m \times \vec{g}$ d'un objet au voisinage de la Terre est essentiellement la force gravitationnelle exercée par la Terre ; le champ de pesanteur $\vec{g}$ se confond donc, en première approximation, avec le champ de gravitation terrestre (la rotation de la Terre introduit une petite correction, négligée en Première). Sur une zone de quelques kilomètres, ce champ est **uniforme** : même direction (la verticale du lieu), même sens (vers le bas), même valeur.

Superposition. Lorsque plusieurs sources sont présentes, le champ total en un point est la **somme vectorielle** des champs créés par chacune d'elles. C'est ce qui permet de trouver, entre la Terre et la

Lune, le point où les deux champs de gravitation se compensent (exercice 8).

5. Les lignes de champ

Une **ligne de champ** est une courbe tangente en chacun de ses points au vecteur champ, orientée dans le sens du champ. Une carte de lignes de champ visualise un champ vectoriel d'un seul coup d'œil.

Propriétés :

- en chaque point, le vecteur champ est tangent à la ligne qui y passe et de même sens qu'elle ;
- deux lignes de champ ne se coupent jamais (sinon le champ aurait deux directions au même point) ;
- les lignes sont **plus serrées** là où le champ est **plus intense** ;
- pour le champ électrostatique, les lignes **partent** des charges positives et **aboutissent** aux charges négatives ;
- pour le champ de gravitation, les lignes convergent vers les masses (le champ est toujours attractif).

Lignes de champ : les cas à reconnaître

charge positive isolée : droites radiales sortantes

charge négative isolée : droites radiales entrantes

deux charges opposées : lignes courbes allant de + vers -

deux charges de même signe : lignes qui s'écartent, champ nul au milieu

plaques parallèles : droites parallèles et équidistantes, champ uniforme

astre : droites radiales dirigées vers le centre

Repères complémentaires, sans séquence causale

Un champ est **uniforme** dans une région si le vecteur champ y est le même en tout point (même direction, même sens, même valeur). Ses lignes de champ sont alors des droites parallèles, également espacées. Le champ de pesanteur à l'échelle d'une salle et le champ entre deux plaques chargées sont les deux exemples au programme.

On peut matérialiser les lignes de champ électrostatique avec des grains de semoule flottant dans de l'huile entre deux électrodes reliées à une haute tension : les grains, polarisés, s'alignent selon le champ.

6. Le champ électrostatique entre deux plaques parallèles

Deux plaques métalliques planes et parallèles, distantes de d , sont reliées aux bornes d'un générateur qui impose entre elles une tension U (on note $U = V_+ - V_- > 0$, la plaque reliée à la borne positive portant des charges positives, l'autre des charges négatives). Ce dispositif est un **condensateur plan**.

Entre les plaques, loin des bords, le champ électrostatique est **uniforme** :

- **direction** : perpendiculaire aux plaques ;
- **sens** : de la plaque positive vers la plaque négative (le champ « descend » les potentiels) ;
- **valeur** : $E = U / d$, avec E en $V \cdot m^{-1}$, U en volts (V) et d en mètres (m).

Cette relation justifie l'unité $V \cdot m^{-1}$: le champ mesure la variation de tension par mètre de déplacement. À tension fixée, rapprocher les plaques augmente le champ.

Force sur une particule chargée. Une particule de charge q placée entre les plaques subit $\vec{F} = q \times \vec{E}$, force constante (même valeur et même sens partout entre les plaques) :

- un proton ou un ion positif est poussé vers la plaque négative ;
- un électron ou un ion négatif est poussé vers la plaque positive.

Particule chargée entre deux plaques

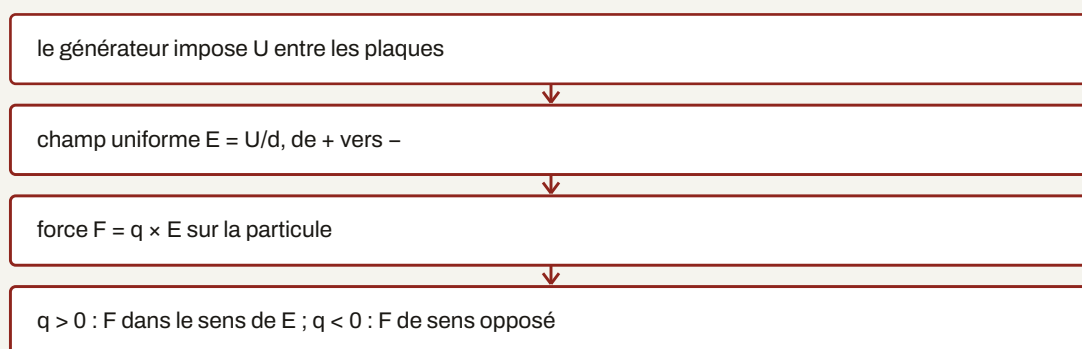


Schéma de principe original • lire les conditions et limites dans le texte

Pour une particule élémentaire, le poids est presque toujours négligeable devant la force électrique (exemple résolu 3). C'est le principe des accélérateurs de particules, de l'électrophorèse (séparation de molécules chargées dans un gel soumis à un champ) et des anciens écrans cathodiques.

Ordre de grandeur utile : l'air sec devient conducteur (étincelle, claquage) pour un champ d'environ $3 \times 10^6 V \cdot m^{-1}$. C'est ce qui limite la tension que l'on peut appliquer entre deux plaques dans l'air.

7. Cohésion de la matière : qui l'emporte, et à quelle échelle

La question « quelle interaction maintient cet édifice ? » se règle par une comparaison d'ordres de grandeur.

- **Noyau atomique** (environ $10^{-15} m$). Les protons, tous positifs, se repoussent fortement (plusieurs dizaines de newtons entre deux protons voisins, exercice 6). Ni la gravitation (de l'ordre de $10^{-35} N$) ni l'électrostatique ne peuvent expliquer la cohésion : c'est l'**interaction forte**, attractive entre nucléons et de très courte portée, qui l'assure. Au-delà de quelques $10^{-15} m$, elle devient négligeable, ce qui limite la taille des noyaux stables.
- **Atome et molécule** (environ $10^{-10} m$). L'attraction électrostatique entre le noyau et les électrons maintient l'atome ; les liaisons chimiques, les interactions entre molécules (liaisons hydrogène, interactions de van der Waals) et la cohésion des solides ioniques sont toutes d'origine **électromagnétique**.
- **Échelle humaine et géologique**. La cohésion d'un objet, le frottement, la tension d'un fil, la réaction d'un support sont des manifestations macroscopiques de l'interaction électromagnétique entre

atomes. La gravitation, elle, se manifeste par le poids.

- **Échelle astronomique.** Les astres sont globalement neutres : les forces électriques entre eux se compensent. Il ne reste que la gravitation, toujours attractive et sans écran possible, qui s'additionne pour des masses gigantesques. Elle gouverne le mouvement des planètes, la forme sphérique des astres, la cohésion des galaxies.

Échelle et interaction dominante

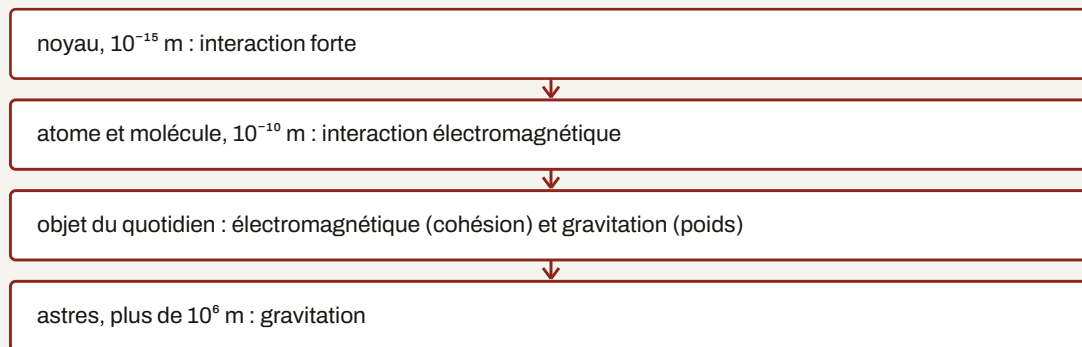


Schéma de principe original • lire les conditions et limites dans le texte

Retenir la logique : la force électrostatique est de loin la plus intense entre deux particules, mais la neutralité de la matière l'annule à grande échelle ; la gravitation, infiniment plus faible, gagne par accumulation.

Exemples résolus

Exemple 1 : comparer les deux interactions dans l'atome d'hydrogène

Énoncé. Dans le modèle simple de l'atome d'hydrogène, l'électron se trouve à la distance $d = 5,3 \times 10^{-11}$ m du proton. Données : $e = 1,60 \times 10^{-19}$ C ; $m_e = 9,11 \times 10^{-31}$ kg ; $m_p = 1,67 \times 10^{-27}$ kg ; $k = 8,99 \times 10^9$ N·m²·C⁻² ; $G = 6,67 \times 10^{-11}$ N·m²·kg⁻². a) Calculer la valeur F_e de la force électrostatique entre le proton et l'électron. Est-elle attractive ou répulsive ? b) Calculer la valeur F_g de la force gravitationnelle entre ces deux particules. c) Calculer le rapport F_e/F_g et conclure.

Résolution. a) Les charges sont +e et -e, de signes contraires : la force est **attractive**. $F_e = k \times e^2 / d^2 = 8,99 \times 10^9 \times (1,60 \times 10^{-19})^2 / (5,3 \times 10^{-11})^2$. Numérateur : $(1,60 \times 10^{-19})^2 = 2,56 \times 10^{-38}$, puis $8,99 \times 10^9 \times 2,56 \times 10^{-38} = 2,30 \times 10^{-28}$. Dénominateur : $(5,3 \times 10^{-11})^2 = 2,81 \times 10^{-21}$. $F_e = 2,30 \times 10^{-28} / 2,81 \times 10^{-21} = 8,2 \times 10^{-8}$ N. b) $F_g = G \times m_e \times m_p / d^2 = 6,67 \times 10^{-11} \times 9,11 \times 10^{-31} \times 1,67 \times 10^{-27} / 2,81 \times 10^{-21}$. Numérateur : $9,11 \times 1,67 = 15,2$, donc $m_e \times m_p = 1,52 \times 10^{-57}$ kg² ; $6,67 \times 10^{-11}$ donne $1,01 \times 10^{-67}$. $F_g = 1,01 \times 10^{-67} / 2,81 \times 10^{-21} = 3,6 \times 10^{-47}$ N. c) $F_e / F_g = 8,2 \times 10^{-8} / 3,6 \times 10^{-47} \approx 2 \times 10^{39}$. La distance ne joue aucun rôle dans ce rapport (elle se simplifie). À l'échelle atomique, l'interaction gravitationnelle est totalement négligeable : la cohésion de l'atome est d'origine électromagnétique.

Exemple 2 : champ de gravitation terrestre au sol et en orbite

Énoncé. Données : masse de la Terre $M = 5,97 \times 10^{24} \text{ kg}$; rayon terrestre $R = 6,37 \times 10^6 \text{ m}$; $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2}$. a) Calculer la valeur g_0 du champ de gravitation à la surface de la Terre. b) La Station spatiale internationale orbite à l'altitude $h = 400 \text{ km}$. Calculer la valeur du champ de gravitation à cette altitude. c) Un astronaute de masse $m = 75 \text{ kg}$ y subit-il une force gravitationnelle nulle ? Calculer sa valeur.

Résolution. a) $g_0 = G \times M / R^2$. $G \times M = 6,67 \times 10^{-11} \times 5,97 \times 10^{24} = 3,98 \times 10^{14} \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$; $R^2 = (6,37 \times 10^6)^2 = 4,06 \times 10^{13} \text{ m}^2$. $g_0 = 3,98 \times 10^{14} / 4,06 \times 10^{13} = 9,81 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$. b) Attention : la distance au centre est $r = R + h = 6,37 \times 10^6 + 0,40 \times 10^6 = 6,77 \times 10^6 \text{ m}$ (on convertit $h = 400 \text{ km} = 4,00 \times 10^5 \text{ m}$). $r^2 = 4,58 \times 10^{13} \text{ m}^2$, donc $g = 3,98 \times 10^{14} / 4,58 \times 10^{13} = 8,69 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$. c) Non : $F = m \times g = 75 \times 8,69 = 6,5 \times 10^2 \text{ N}$, soit environ 89 % de son poids au sol. L'impression d'apesanteur dans la station ne vient pas d'une absence de gravitation, mais du fait que la station et l'astronaute « tombent » ensemble autour de la Terre (ce point sera traité en Terminale).

Exemple 3 : un électron entre deux plaques

Énoncé. Deux plaques parallèles distantes de $d = 2,0 \text{ cm}$ sont soumises à une tension $U = 1,0 \times 10^3 \text{ V}$. Un électron est placé entre les plaques, loin des bords. Données : $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$; $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$; $g = 9,81 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$. a) Donner les caractéristiques du champ électrostatique entre les plaques. b) Donner les caractéristiques de la force électrique subie par l'électron. c) Comparer cette force au poids de l'électron.

Résolution. a) Le champ est uniforme, perpendiculaire aux plaques, orienté de la plaque positive vers la plaque négative. Sa valeur : $E = U / d = 1,0 \times 10^3 / 2,0 \times 10^{-2} = 5,0 \times 10^4 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$. b) $F \rightarrow = q \times E \rightarrow$ avec $q = -e < 0$: la force est perpendiculaire aux plaques, de sens opposé au champ, donc dirigée vers la plaque positive. Valeur : $F = e \times E = 1,60 \times 10^{-19} \times 5,0 \times 10^4 = 8,0 \times 10^{-15} \text{ N}$. c) $P = m_e \times g = 9,11 \times 10^{-31} \times 9,81 = 8,94 \times 10^{-30} \text{ N}$. Rapport $F / P = 8,0 \times 10^{-15} / 8,94 \times 10^{-30} \approx 9 \times 10^{14}$. Le poids de l'électron est négligeable : seule la force électrique compte.

Méthodes et pièges

- **Méthode type pour une force** : identifie les deux corps, convertis toutes les grandeurs en unités SI (nC en C, cm en m, km en m), écris la formule littérale, remplace, calcule, puis donne direction, sens et valeur.
- **Conversions de préfixes** : $\mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$, $\text{nC} = 10^{-9} \text{ C}$, $\text{pC} = 10^{-12} \text{ C}$. Une erreur de préfixe sur une distance au carré se paie au carré : $1 \text{ cm} = 10^{-2} \text{ m}$ donc $1 \text{ cm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2$.
- **Distance entre centres** : pour un astre, d (ou r) se mesure depuis le centre. À l'altitude h , utilise $R + h$, jamais h seul.
- **Valeur absolue dans Coulomb** : la valeur d'une force est positive. Le signe des charges sert seulement à trouver le sens (attraction ou répulsion).
- **Sens de $F = qE$** : pour un électron ou un anion, la force est opposée au champ. C'est l'erreur la plus fréquente sur les plaques.
- **Sens du champ entre les plaques** : de la plaque + vers la plaque -, comme les lignes de champ qui partent des charges positives.
- **Ne confonds pas champ et force** : le champ ($\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ ou $\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$) existe sans objet test ; la force (N) n'existe que s'il y a un objet sur lequel elle s'exerce.

- **Raisonnement proportionnel** : en $1/d^2$, doubler la distance divise la force par 4 ; doubler une seule charge double la force. Utilise ces rapports pour vérifier un calcul ou répondre sans calculatrice.
- **Lignes de champ** : elles ne se croisent jamais et leur densité indique l'intensité. Un tracé où deux lignes se coupent est faux.

Vers le PASS

En PASS, l'électrostatique est reprise avec plus d'outils. Le champ créé par plusieurs charges se calcule par superposition vectorielle, puis on introduit le **potentiel électrique** V , lié au champ (dans un champ uniforme, $E = U/d$ en est le cas le plus simple), et l'**énergie potentielle électrique** $q \times V$. On étudie le **dipôle électrique** (deux charges opposées proches), modèle des molécules polaires comme l'eau, et l'on applique ces notions au vivant : la membrane d'une cellule se comporte comme un condensateur plan, avec une différence de potentiel de repos de l'ordre de -70 mV sur une épaisseur d'environ 7 nm, soit un champ de l'ordre de 10^7 V·m⁻¹. L'électrophorèse des protéines et de l'ADN repose directement sur $F = q \times E$.

La gravitation sert surtout à manier le poids et le champ de pesanteur dans les bilans de forces et d'énergie (biomécanique, pression hydrostatique dans les vaisseaux sanguins).

Suite en PASS : Électrostatique : charges, champ, potentiel et dipôles

Exercices

Niveau 1 : s'entraîner

1. Deux petites sphères ponctuelles portent les charges $q_1 = +2,0$ μC et $q_2 = -3,0$ μC. Elles sont distantes de $d = 10$ cm. Calcule la valeur de la force électrostatique entre elles et précise si elle est attractive ou répulsive. Donnée : $k = 8,99 \times 10^9$ N·m²·C⁻².
2. Calcule la valeur de la force gravitationnelle exercée par la Terre sur la Lune. Données : $M(\text{Terre}) = 5,97 \times 10^{24}$ kg ; $M(\text{Lune}) = 7,35 \times 10^{22}$ kg ; distance entre les centres $D = 3,84 \times 10^8$ m ; $G = 6,67 \times 10^{-11}$ N·m²·kg⁻².
3. Une charge ponctuelle $Q = +5,0$ nC est placée en O.
 - a) Calcule la valeur du champ électrostatique en un point M situé à 30 cm de O et précise son sens. b) On place en M une charge $q = -2,0$ nC. Donne les caractéristiques de la force qu'elle subit.
4. Deux plaques parallèles distantes de 4,0 mm sont reliées aux bornes d'une pile de 12 V.
 - a) Calcule la valeur du champ électrostatique entre les plaques. b) Fais un schéma représentant les plaques, leur signe et trois lignes de champ orientées.
5. Données pour Mars : masse $M = 6,42 \times 10^{23}$ kg ; rayon $R = 3,39 \times 10^6$ m ; $G = 6,67 \times 10^{-11}$ N·m²·kg⁻².
 - a) Calcule la valeur du champ de gravitation à la surface de Mars. b) Calcule le poids, sur Mars, d'un astronaute de masse 70 kg équipement compris. Compare à son poids sur Terre ($g = 9,81$ N·kg⁻¹).

Niveau 2 : type bac

6. Cohésion du noyau. Dans un noyau d'hélium, deux protons sont séparés d'environ $d = 2,0 \times 10^{-15}$ m. Données : $e = 1,60 \times 10^{-19}$ C ; $m_p = 1,67 \times 10^{-27}$ kg ; $k = 8,99 \times 10^9$ N·m²·C⁻² ; $G = 6,67 \times 10^{-11}$ N·m²·kg⁻².
 - a) Calcule la valeur de la force électrostatique entre les deux protons. Est-elle attractive ou répulsive ?
 - b) Calcule la valeur de la force gravitationnelle entre ces deux protons. c) Explique pourquoi ces deux

interactions ne permettent pas d'expliquer la cohésion du noyau, et nomme l'interaction responsable.

7. Pendule électrostatique. Une petite boule de masse $m = 0,50 \text{ g}$, portant la charge $q = +20 \text{ nC}$, est suspendue à un fil isolant entre deux plaques verticales distantes de $d = 8,0 \text{ cm}$. On applique entre les plaques une tension $U = 4,0 \times 10^3 \text{ V}$. À l'équilibre, le fil fait un angle α avec la verticale. Donnée : $g = 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.

a) Calcule la valeur du champ électrostatique entre les plaques. b) Calcule la valeur de la force électrique subie par la boule et celle de son poids. c) À l'équilibre, la somme des trois forces (poids, force électrique horizontale, tension du fil) est nulle. Montre que $\tan \alpha = qE / (mg)$ et calcule α . d) Vers quelle plaque la boule est-elle déviée ?

8. Point d'équilibre entre la Terre et la Lune. Une sonde se trouve sur le segment joignant les centres de la Terre et de la Lune, à la distance x du centre de la Terre. Données : $M(\text{Terre}) = 5,97 \times 10^{24} \text{ kg}$; $M(\text{Lune}) = 7,35 \times 10^{22} \text{ kg}$; $D = 3,84 \times 10^8 \text{ m}$.

a) Exprime les valeurs des champs de gravitation créés en ce point par la Terre et par la Lune. Précise leurs sens. b) Montre que le champ total est nul lorsque $(D - x)/x = \sqrt{M(\text{Lune})/M(\text{Terre})}$. c) Calcule x et exprime-le en pourcentage de D .

9. Champ de gravitation et altitude. Données : $R(\text{Terre}) = 6,37 \times 10^6 \text{ m}$; $g_0 = 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$ au sol.

a) Montre que $g(h) = g_0 \times R^2 / (R + h)^2$. b) À quelle altitude h le champ de gravitation vaut-il la moitié de sa valeur au sol ? c) Calcule g à l'altitude d'un satellite géostationnaire, $h = 3,58 \times 10^7 \text{ m}$.

Niveau 3 : vers le PASS

10. Raisonnement proportionnel, sans calculatrice. Deux charges ponctuelles exercent l'une sur l'autre une force de valeur $F = 36 \text{ mN}$.

a) On double chacune des deux charges sans changer la distance. Que vaut la nouvelle force ? b) Partant de la situation initiale, on triple la distance. Que vaut la force ? c) Partant de la situation initiale, on double chaque charge et on triple la distance. Que vaut la force ? d) De quel facteur faut-il multiplier la distance pour diviser la force par 100 ?

11. Superposition de champs. Une charge $q_A = +1,0 \text{ nC}$ est placée en A, une charge $q_B = -1,0 \text{ nC}$ en B, avec $AB = 20 \text{ cm}$. On note I le milieu de $[AB]$. Donnée : $k = 8,99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$.

a) Calcule la valeur du champ créé en I par chaque charge et précise son sens. b) Déduis-en le champ total en I (direction, sens, valeur). c) Même question si $q_B = +1,0 \text{ nC}$. Relie le résultat à l'allure des lignes de champ.

12. Expérience de Millikan simplifiée. Une gouttelette d'huile de masse $m = 4,9 \times 10^{-15} \text{ kg}$ est immobile entre deux plaques horizontales distantes de $d = 1,0 \text{ cm}$, soumises à la tension $U = 1,5 \times 10^3 \text{ V}$. On admet qu'elle n'est soumise qu'à son poids et à la force électrique. Données : $g = 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$; $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$.

a) Quelle relation lie les valeurs des deux forces à l'équilibre ? b) Calcule la valeur absolue de la charge de la gouttelette et exprime-la en multiple de e . c) La gouttelette est chargée négativement. Quelle plaque, supérieure ou inférieure, est reliée à la borne positive ? Justifie.

13. Vrai ou faux ? Justifie chaque réponse en une ou deux phrases.

a) La force électrostatique exercée par un proton sur un électron est plus grande que celle exercée par l'électron sur le proton. b) Le champ électrostatique en un point dépend de la charge test placée en ce point. c) Entre deux plaques chargées, un ion Cl^- se déplace vers la plaque négative. d) Si la distance

entre deux masses est divisée par 2, la force gravitationnelle est multipliée par 4. e) Le $\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$ et le $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ sont deux unités équivalentes. f) Deux lignes de champ peuvent se croiser en un point où le champ est intense.

Corrigés

1. Conversions : $q_1 = 2,0 \times 10^{-6} \text{ C}$, $|q_2| = 3,0 \times 10^{-6} \text{ C}$, $d = 0,10 \text{ m}$.

$F = k \times |q_1 \times q_2| / d^2 = 8,99 \times 10^9 \times (2,0 \times 10^{-6} \times 3,0 \times 10^{-6}) / (0,10)^2 = 8,99 \times 10^9 \times 6,0 \times 10^{-12} / 1,0 \times 10^{-2} = 5,39 \text{ N}$. Les charges sont de signes contraires : la force est attractive. $F \approx 5,4 \text{ N}$, attractive.

2. $F = G \times M(T) \times M(L) / D^2$.

$G \times M(T) = 6,67 \times 10^{-11} \times 5,97 \times 10^{24} = 3,98 \times 10^{14}$; $\times 7,35 \times 10^{22} = 2,93 \times 10^{37}$. $D^2 = (3,84 \times 10^8)^2 = 1,475 \times 10^{17} \text{ m}^2$. $F = 2,93 \times 10^{37} / 1,475 \times 10^{17} = 1,98 \times 10^{20} \text{ N}$. $F \approx 1,98 \times 10^{20} \text{ N}$, force attractive dirigée de la Lune vers le centre de la Terre.

3. a) $Q = 5,0 \times 10^{-9} \text{ C}$, $r = 0,30 \text{ m}$. $E = k \times Q / r^2 = 8,99 \times 10^9 \times 5,0 \times 10^{-9} / 0,090 = 44,95 / 0,090 = 499 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$. $E \approx 5,0 \times 10^2 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$, dirigé de O vers M (vers l'extérieur, car $Q > 0$).

b) $F = |q| \times E = 2,0 \times 10^{-9} \times 499 = 1,0 \times 10^{-6} \text{ N}$. Comme $q < 0$, la force est opposée au champ : elle est dirigée de M vers O. $F \approx 1,0 \times 10^{-6} \text{ N}$, direction (OM), dirigée vers O (attraction).

4. a) $d = 4,0 \times 10^{-3} \text{ m}$. $E = U / d = 12 / 4,0 \times 10^{-3} = 3,0 \times 10^3 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$. $E = 3,0 \times 10^3 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$.

b) Schéma attendu : deux plaques parallèles, celle reliée à la borne + portant des signes +, l'autre des signes - ; entre elles, trois droites parallèles, perpendiculaires aux plaques, également espacées, chacune orientée par une flèche de la plaque + vers la plaque -.

5. a) $g = G \times M / R^2$. $G \times M = 6,67 \times 10^{-11} \times 6,42 \times 10^{23} = 4,28 \times 10^{13}$; $R^2 = (3,39 \times 10^6)^2 = 1,15 \times 10^{13} \text{ m}^2$. $g = 4,28 \times 10^{13} / 1,15 \times 10^{13} = 3,73 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$. $g(\text{Mars}) \approx 3,73 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$.

b) $P(\text{Mars}) = m \times g = 70 \times 3,73 = 261 \text{ N}$. $P(\text{Terre}) = 70 \times 9,81 = 687 \text{ N}$. Rapport $261 / 687 = 0,38$. $P(\text{Mars}) \approx 2,6 \times 10^2 \text{ N}$, soit environ 38 % du poids sur Terre ; la masse, elle, reste 70 kg.

6. a) $F_e = k \times e^2 / d^2 = 8,99 \times 10^9 \times 2,56 \times 10^{-38} / (2,0 \times 10^{-15})^2 = 2,30 \times 10^{-28} / 4,0 \times 10^{-30} = 57,5 \text{ N}$. Deux charges positives : $F_e \approx 58 \text{ N}$, répulsive.

b) $F_g = G \times m_p^2 / d^2 = 6,67 \times 10^{-11} \times (1,67 \times 10^{-27})^2 / 4,0 \times 10^{-30} = 1,86 \times 10^{-64} / 4,0 \times 10^{-30} = 4,7 \times 10^{-35} \text{ N}$, attractive. c) La force électrostatique est répulsive : elle tend à disperser les protons. L'attraction gravitationnelle est environ 10^{36} fois plus faible et ne peut pas la compenser. Il faut une interaction attractive encore plus intense à cette échelle : l'interaction forte, qui s'exerce entre nucléons sur une portée d'environ 10^{-15} m .

7. a) $E = U / d = 4,0 \times 10^3 / 8,0 \times 10^{-2} = 5,0 \times 10^4 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$.

b) $F = q \times E = 20 \times 10^{-9} \times 5,0 \times 10^4 = 1,0 \times 10^{-3} \text{ N}$. Poids : $m = 0,50 \text{ g} = 5,0 \times 10^{-4} \text{ kg}$, $P = 5,0 \times 10^{-4} \times 9,81 = 4,9 \times 10^{-3} \text{ N}$. c) Le poids est vertical, la force électrique horizontale (perpendiculaire aux plaques verticales), la tension dirigée le long du fil. La somme étant nulle, la tension compense la somme $P \rightarrow + F \rightarrow$. Le fil est donc aligné avec cette somme : dans le triangle rectangle formé par P (côté vertical) et F (côté horizontal), l'angle du fil avec la verticale vérifie $\tan \alpha = F / P = qE / (mg)$. $\tan \alpha = 1,0 \times 10^{-3} / 4,9 \times 10^{-3} = 0,204$, d'où $\alpha \approx 11,5^\circ$. d) $q > 0$: la force a le sens du champ, de la plaque + vers la plaque -. La boule est déviée vers la plaque négative.

8. a) Champ créé par la Terre : $g_T = G \times M(T) / x^2$, dirigé vers la Terre. Champ créé par la Lune : $g_L = G \times M(L) / (D - x)^2$, dirigé vers la Lune. Les deux champs ont la même direction et des sens opposés.

b) Le champ total est nul si $g_T = g_L$, soit $M(T) / x^2 = M(L) / (D - x)^2$, donc $(D - x)^2 / x^2 = M(L) / M(T)$. Les grandeurs étant positives, on prend la racine : $(D - x) / x = \sqrt{M(L) / M(T)}$. c) $M(L) / M(T) = 7,35 \times 10^{22} / 5,97 \times 10^{24} = 1,23 \times 10^{-2}$; $\sqrt{} = 0,111$. Donc $D - x = 0,111 x$, soit $x = D / 1,111 = 3,84 \times 10^8 / 1,111 = 3,46 \times 10^8$ m. **$x \approx 3,46 \times 10^8$ m, soit environ 90 % de D : le point est bien plus proche de la Lune, moins massive.**

9. a) $g(h) = G \times M / (R + h)^2$ et $g_0 = G \times M / R^2$. En divisant : $g(h) / g_0 = R^2 / (R + h)^2$, d'où $g(h) = g_0 \times R^2 / (R + h)^2$.

b) On veut $R^2 / (R + h)^2 = 1/2$, soit $(R + h) / R = \sqrt{2}$, donc $h = R(\sqrt{2} - 1) = 6,37 \times 10^6 \times 0,414 = 2,64 \times 10^6$ m. **$h \approx 2,64 \times 10^3$ km.** c) $R + h = 6,37 \times 10^6 + 3,58 \times 10^7 = 4,22 \times 10^7$ m. $g = 9,81 \times (6,37 \times 10^6)^2 / (4,22 \times 10^7)^2 = 9,81 \times (0,151)^2 = 9,81 \times 0,0228 = 0,224 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$. **$g \approx 0,22 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.**

10. a) F est proportionnelle au produit des charges : $2 \times 2 = 4$. **$F' = 4 \times 36 = 144 \text{ mN}$.**

b) F est inversement proportionnelle à d^2 : $3^2 = 9$. **$F' = 36 / 9 = 4,0 \text{ mN}$.** c) Facteur $4 / 9$: **$F' = 36 \times 4 / 9 = 16 \text{ mN}$.** d) Il faut $d'^2 = 100 d^2$, donc **$d' = 10 d$** : multiplier la distance par 10.

11. a) $AI = BI = 0,10$ m. Chaque charge crée en I un champ de valeur $E = k \times |q| / r^2 = 8,99 \times 10^9 \times 1,0 \times 10^{-9} / (0,10)^2 = 8,99 / 0,010 = 899 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$. Le champ de qA (positive) est dirigé de A vers I, donc vers B. Le champ de qB (négative) est dirigé de I vers B. **Chaque champ vaut environ $9,0 \times 10^2 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$, tous deux dirigés vers B.**

b) Même direction, même sens : les valeurs s'additionnent. **$E(I) \approx 1,8 \times 10^3 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$, direction (AB), dirigé de A vers B.** c) Si $q_B = +1,0 \text{ nC}$, le champ de qB en I est dirigé de B vers I, donc vers A, avec la même valeur. Les deux champs sont opposés : **$E(I) = 0$** . Sur une carte de lignes de champ, deux charges de même signe donnent des lignes qui s'écartent l'une de l'autre et laissent au milieu une zone vide de lignes, où le champ est nul ; avec deux charges opposées, au contraire, les lignes sont serrées entre les charges, signe d'un champ intense.

12. a) La gouttelette est immobile (au repos) : les deux forces se compensent, donc $|q| \times E = m \times g$, la force électrique étant verticale vers le haut.

b) $E = U / d = 1,5 \times 10^3 / 1,0 \times 10^{-2} = 1,5 \times 10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$. $|q| = m \times g / E = 4,9 \times 10^{-15} \times 9,81 / 1,5 \times 10^5 = 4,81 \times 10^{-14} / 1,5 \times 10^5 = 3,2 \times 10^{-19} \text{ C}$. Et $3,2 \times 10^{-19} / 1,60 \times 10^{-19} = 2,0$. **$|q| = 3,2 \times 10^{-19} \text{ C} = 2e$** : la gouttelette porte deux charges élémentaires, ce qui illustre la quantification de la charge. c) La force électrique doit être dirigée vers le haut. Pour une charge négative, la force est opposée au champ : le champ est donc dirigé vers le bas. Le champ allant de la plaque + vers la plaque -, **la plaque supérieure est reliée à la borne positive.**

13. a) **Faux** : d'après le principe des actions réciproques (et la loi de Coulomb), les deux forces ont la même valeur, la même direction et des sens opposés.

b) **Faux** : $E \rightarrow = F \rightarrow / q$; si l'on change q, F change dans la même proportion et le rapport reste le même. Le champ ne dépend que des sources et du point. c) **Faux** : un ion Cl^- est négatif, la force qu'il subit est opposée au champ, donc dirigée vers la plaque positive. d) **Vrai** : F est proportionnelle à $1/d^2$; $(1/2)^2 = 1/4$ au dénominateur, donc F est multipliée par 4. e) **Vrai** : $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$, donc $1 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. f) **Faux** : deux lignes de champ ne se croisent jamais, car le champ n'a qu'une direction en chaque point.