

Thème 2 : Mouvement et interactions

Chapitre 10 : Interactions, forces et champs



De la danse des planètes à la cohésion de la matière, notre univers est régi par des interactions fondamentales. Découvrons les règles communes qui se cachent derrière deux d'entre elles.



Deux Forces Fondamentales, Une Seule Règle du Jeu

L'Interaction Gravitationnelle



L'attraction universelle entre les objets due à leur masse. C'est la force qui nous maintient au sol et sculpte les galaxies. Elle est toujours attractive.

L'Interaction Électrostatique



L'interaction entre les objets due à leur charge électrique. Elle est responsable de la chimie, de l'électricité, et peut être soit attractive, soit répulsive.

Bien qu'elles opèrent à des échelles et avec des 'ingrédients' différents, nous allons voir que ces deux forces partagent une structure mathématique quasi identique.

I. Forces dans l'Univers

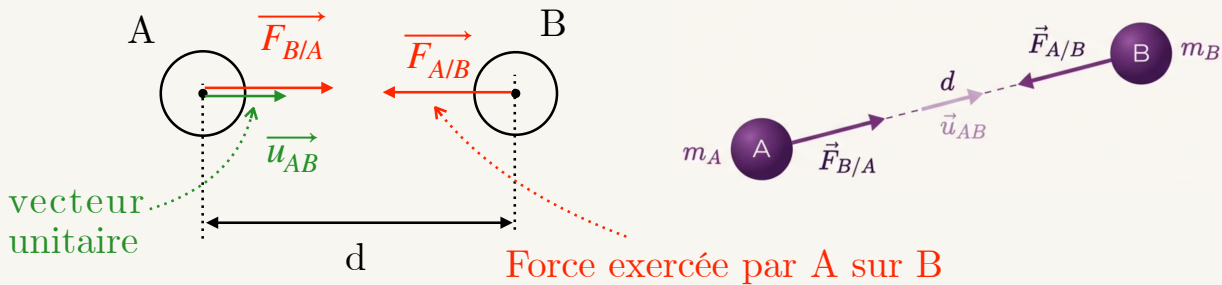
1. Force de gravitation

- ▶ Deux corps sont en interaction attractive sous l'effet de leurs masses.
- ▶ Soit deux corps A et B, de masses respectives m_A et m_B , séparés par une distance d . Alors A exerce sur B une force $\vec{F}_{A/B}$ dite **force de gravitation** et on a:

$$\vec{F}_{A/B} = -G \frac{m_A m_B}{d^2} \vec{u}_{AB}$$

avec $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$
 G : constante de gravitation

Annotations: $\vec{F}_{A/B}$ (N), G ($\text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$), m_A (kg), m_B (kg), d^2 (m^2), \vec{u}_{AB} (m)



- ▶ Un vecteur unitaire est un vecteur qui a une norme de 1. Il permet d'imposer une direction et un sens à une situation. C'est une sorte de référence.
- ▶ Principe des actions réciproque, ou Troisième loi de Newton (action réaction):

$$\vec{F}_{B/A} = -\vec{F}_{A/B}$$

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

$$\vec{F}_{B/A} = G \frac{m_A m_B}{d^2} \vec{u}_{AB}$$

- ▶ Attention ! Un vecteur n'est jamais égal à une valeur.

~~$$\vec{F}_{B/A} = 50 \text{ N}$$~~ mais $F_{B/A} = 50 \text{ N}$

- ▶ On a donc : $F_{B/A} = F_{A/B}$

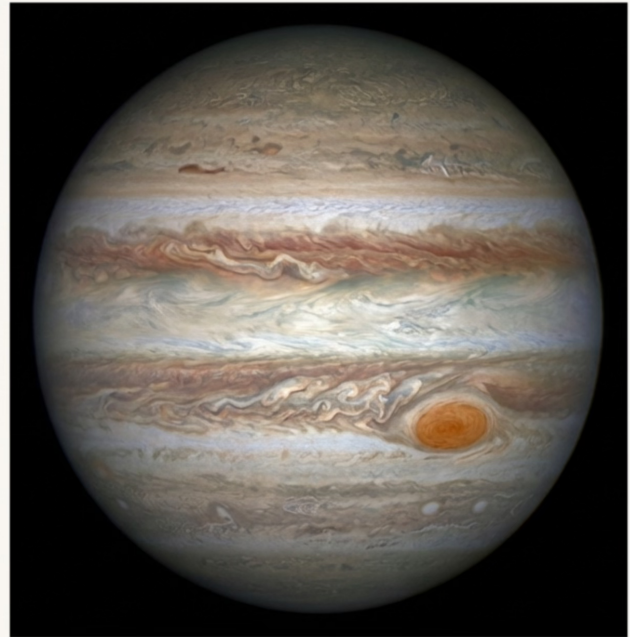
Application : La Force du Soleil sur Jupiter

Problème

Exprimer la force exercée par le Soleil sur Jupiter puis calculer sa valeur.

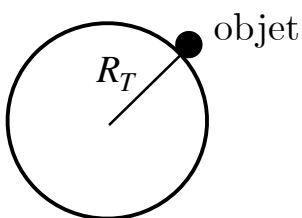
Données Clés

- Masse de Jupiter : $M_J = 1,90 \times 10^{27} \text{ kg}$
- Masse du Soleil : $M_S = 1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$
- Distance Soleil-Jupiter : $d_{JS} = 7,79 \times 10^8 \text{ km}$
- Constante : $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2}$



Exercice référence :

Exprimer la valeur de la force de gravitation exercée par la Terre, de masse M_T sur un objet de masse m posé sur son sol.



Données :

$$M_T = 6,0 \times 10^{24} \text{ kg}$$

$$R_T = 6400 \text{ km}$$

$$G = 6,7 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$$

Le poids est la force de gravitation entre la Terre et les objets en sa périphérie.

$$F_{\text{Terreobjet}} = G \frac{M_T m}{R_T^2}$$

$$F_{\text{Terreobjet}} = G \frac{M_T}{R_T^2} \times m$$

$$F_{\text{Terreobjet}} = 9,8 \times m$$

$$F_{\text{Terreobjet}} = g \times m$$

$$P = mg$$

g : intensité de pesanteur $\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$
 $g = 9,81 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1} \approx 10 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$

De manière plus générale, le Poids d'un objet est le résultat de l'attraction exercée par l'astre sur lequel l'objet se trouve.

$$\vec{P} = \vec{F}_{astre/objet} = -G \frac{M_{astre} m}{(R_{astre})^2} \vec{u}_{astreObjet}$$

$$\vec{g}_{astre} = -G \frac{M_{astre}}{R_{astre}^2} \vec{u}_{astreObjet}$$

L'intensité de pesanteur d'un astre dépend de sa masse et de sa taille.

\vec{g} est toujours vertical (direction) et vers le bas (sens).

Comme $\vec{P} = m\vec{g}$, ces 2 vecteurs ont la même direction et le même sens.

2. Force électrostatique

- ▶ Deux corps chargés électriquement sont en interaction **électrostatique**.
- ▶ Cette interaction peut être **attractive** ou **répulsive**.
- ▶ Un corps A, de charge q_A , exerce sur un corps B, de charge q_B , situé à une distance d une force électrostatique $\vec{F}_{A/B}$ donnée par la loi de Coulomb :

$$\vec{F}_{A/B} = k \frac{q_A q_B}{d^2} \vec{u}_{AB}$$

N → N · m² · C⁻²

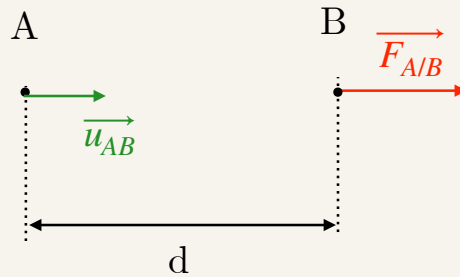
avec $k = 9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$
 k : constante de Coulomb

► Le signe du produit $q_A \times q_B$ détermine la nature de la force :

● Si $q_A \times q_B > 0$ (mêmes signes) : Répulsion.

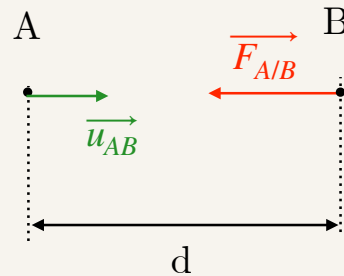
$\vec{F}_{A/B}$ est dans le même sens que \vec{u}_{AB} .

$$\vec{F}_{A/B} = k \frac{q_A q_B}{d^2} \vec{u}_{AB}$$



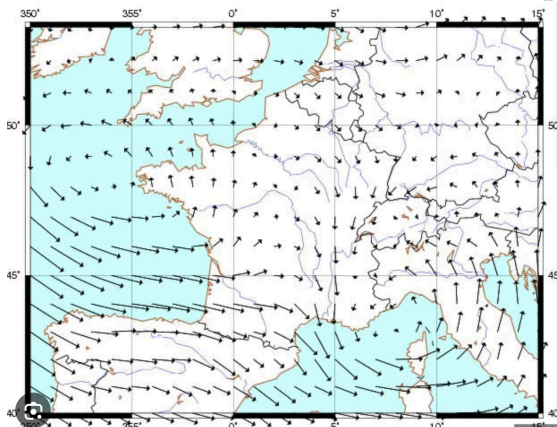
● Si $q_A \times q_B < 0$ (signes opposés) : Attraction.

$\vec{F}_{A/B}$ est de sens opposé à \vec{u}_{AB} .



II. Notion de champs

► Un champ vectoriel, c'est une manière de représenter une force ou un mouvement dans un espace, comme une carte où, à chaque point, on associe une flèche (vecteur). Cette flèche peut avoir une direction et une intensité différentes selon le point où elle se trouve.



Ici, à chaque endroit, le vent a une direction et une force spécifique. La longueur de la flèche représente la force du vent, et la direction de la flèche indique la direction dans laquelle il souffle.

► Un objet, de par ses propriétés physiques (masse ou charge), modifie les propriétés de l'espace autour de lui et créer un **champ vectoriel**.

► Si un objet avec des propriétés physiques appropriées se trouve dans le champ, alors il subira la force associé à ce champ.

- ▶ Cartographier un champ : déterminer les caractéristiques du champ en plusieurs points.
- ▶ **Ligne de champ** : ligne imaginaire tangente en chacun des points du vecteur champ orientée dans le sens du vecteur. (C'est un tracé qui montre comment le champ "se déplace" ou "agit" dans l'espace).

1. Champ de pesanteur \vec{G}

- ▶ Un corps A de masse m_A attire à lui des objets ayant une masse : il crée autour de lui un champ de pesanteur.
- ▶ Si un objet B possède une masse m_B , il subira la force :

$$\vec{F}_{A/B} = -G \frac{m_A m_B}{d^2} \vec{u}_{AB}$$

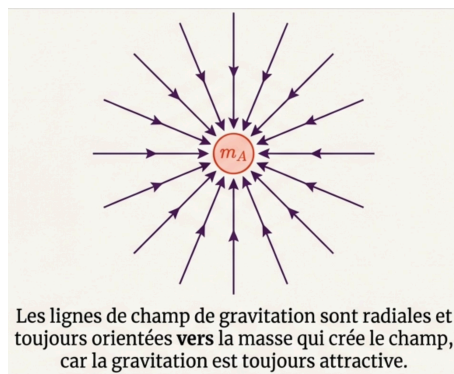
$$\vec{F}_{A/B} = -G \frac{m_A m_B}{d^2} \vec{u}_{AB}$$

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

$$\vec{F}_{A/B} = \vec{G} \times m_B$$

Champ
gravitationnel
créé par A à la
distance d

Lignes de champ radiales :



2. Champ électrostatique

- ▶ Un corps A de charge q_A crée autour de lui un champ électrostatique.
- ▶ Si un corps B de charge q_B se trouve dans le champ, il subira la force :

$$\vec{F}_{A/B} = k \frac{q_A q_B}{d^2} \vec{u}_{AB}$$

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

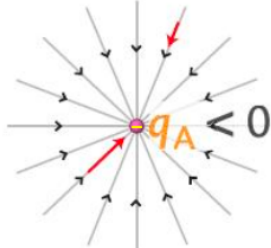
$$\vec{F}_{A/B} = \vec{E} \times q_B$$

Champ
électrostatique créé
par A à la distance d

$$q_A < 0$$

\vec{E} dans le sens inverse de \vec{u}_{AB}

Lignes de champ :



$$q_A > 0$$

\vec{E} dans le même sens de \vec{u}_{AB}

Lignes de champ :



3 CORRIGÉ Exprimer la force de gravitation

| Effectuer des calculs.

Jupiter est la plus grosse et la plus massive des planètes du système solaire.

Sa masse est :

$$M_J = 1,90 \times 10^{27} \text{ kg}$$

- Exprimer la force exercée par le Soleil sur Jupiter puis calculer sa valeur.



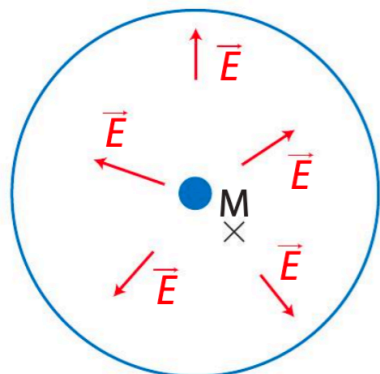
Utiliser le réflexe 1

Données

- $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$.
- $M_S = 1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$.
- $d_{JS} = 7,79 \times 10^8 \text{ km}$.

11 CORRIGÉ Étudier un champ

| Interpréter des observations.



Le schéma ci-dessus représente le champ électrostatique en quelques points d'un condensateur cylindrique.

1. Quel est le signe de la charge portée par l'armature centrale de ce condensateur ?
2. Représenter le vecteur champ au point M.

4 Représenter une force de gravitation

| Faire un schéma adapté.

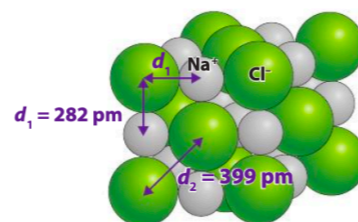
La planète Mars possède une orbite autour du Soleil dont le rayon moyen est $d = 2,28 \times 10^8 \text{ km}$. Elle subit de la part du Soleil une force de gravitation dont la valeur est $F_g = 1,64 \times 10^{21} \text{ N}$.

- Représenter sur un schéma les centres des deux astres ainsi que la force exercée par Mars sur le Soleil.
- Échelles : $1 \text{ cm} \leftrightarrow 2,0 \times 10^7 \text{ km}$;
 $1 \text{ cm} \leftrightarrow 0,50 \times 10^{21} \text{ N}$.

19 Le sel de table

| Extraire et organiser l'information ; formuler une hypothèse.

Le sel de table ou chlorure de sodium est un arrangement ordonné (cristal) d'ions chlorure et d'ions sodium.



1. Calculer la valeur des forces électrostatiques s'exerçant entre :

- a. un ion sodium et un ion chlorure voisins ;
- b. deux ions sodium les plus proches ;
- c. deux ions chlorure les plus proches.

2. Proposer une explication sur la cohésion du sel de table.

Données

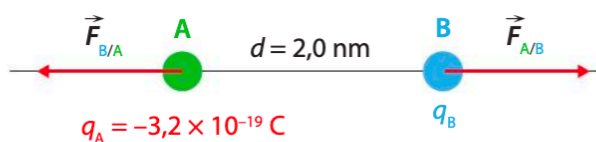
- $k = 9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$.
- $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

6 Calculer une charge

| Extraire et organiser l'information.

Les forces d'interaction électrostatique entre les particules schématisées ci-dessous ont pour valeur :

$$F_{A/B} = F_{B/A} = 4,60 \times 10^{-10} \text{ N}$$



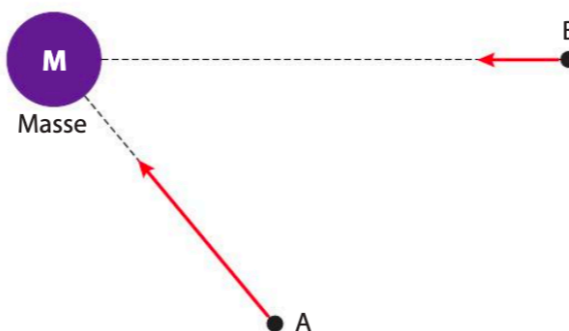
1. Quel est le signe de la charge placée en B ?
2. Calculer cette charge.

Donnée

- $k = 9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$.

12 Trouver le bon champ

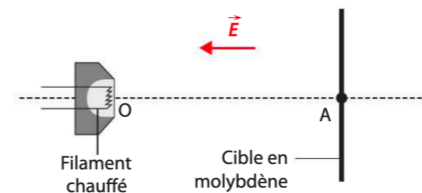
| Utiliser un modèle pour expliquer.



1. Identifier le champ représenté sur le schéma ci-dessus.
2. Expliquer pourquoi le vecteur représentant le champ en A est plus long que le vecteur représenté en B.

31 CORRIGÉ 30 min Produire des rayons X à l'aide d'électrons

| Faire un schéma adapté ; effectuer des calculs ; prendre conscience des limites d'un modèle.



Les rayons X peuvent être produits dans des dispositifs appelés tubes de Coolidge (William David COOLIDGE, physicien américain, 1873-1975).

Dans ce dispositif, des électrons émis par un filament chauffé sont accélérés, entre les points O et A, sous l'effet d'un champ électrique uniforme \vec{E} dont la valeur est $E = 5,0 \times 10^3 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$. Ce champ est obtenu grâce à une tension électrique U .

Les électrons se dirigent vers une cible de molybdène, avec laquelle ils interagissent pour produire les rayons X.

1. Donner l'expression vectorielle de la force électrique \vec{F}_e subie par un électron en fonction du champ électrique \vec{E} . En déduire pourquoi on parle d'accélération des électrons.

2.a. Tracer selon l'axe OA une ligne du champ électrostatique. Utiliser le réflexe 3

b. Calculer la valeur de la force électrostatique exercée sur un électron dans ce champ. Utiliser le réflexe 1

3. La valeur de la vitesse de l'électron en A se calcule, dans le cadre de la mécanique classique, par la relation $v = \sqrt{\frac{2e \times U}{m_e}}$.

a. Calculer la valeur de la vitesse de l'électron lorsqu'il arrive en A dans le cas où la tension électrique U appliquée entre le filament et la cible est 100 kV.

b. La mécanique relativiste remplace la mécanique classique pour l'étude de mouvements lorsque la valeur de la vitesse du système atteint 10 % ou plus de la célérité de la lumière dans le vide.

Commenter le résultat précédent.

Données

- Charge électrique élémentaire : $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$.
- Masse de l'électron : $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

Faire un schéma adapté

Question 2.a. réussie ?

☹️ S'entraîner encore → ex. 13

☺️ Relever un autre défi → ex. 26

17 Champ de pesanteur en haut de l'Everest

| Effectuer des calculs ; comparer à une valeur de référence.



L'Everest est la plus haute montagne du monde avec une altitude $h = 8\,848 \text{ m}$. Son sommet se situe à une distance $d = 6,382 \times 10^6 \text{ m}$ du centre de la Terre.

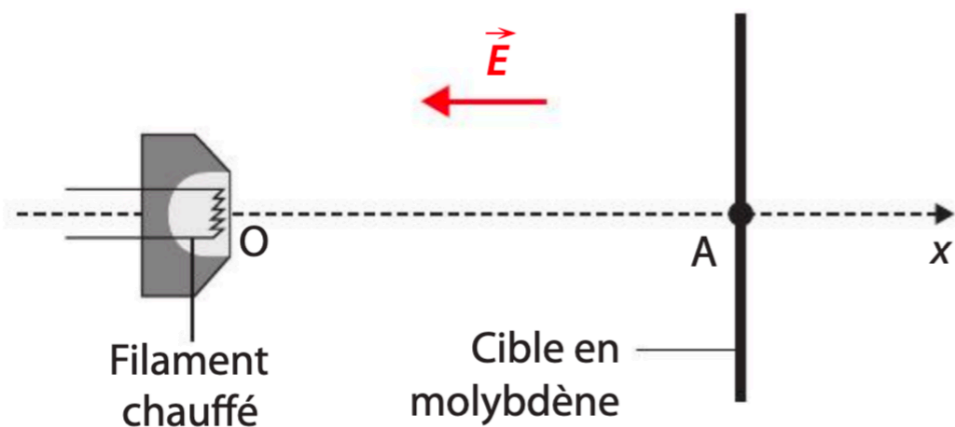
1. Exprimer la valeur de la force de gravitation subie, au sommet de l'Everest, par un alpiniste de masse m en fonction de G , d , m et M_T la masse de la Terre.
2. Exprimer la valeur du poids de l'alpiniste en fonction de l'intensité de la pesanteur au sommet de l'Everest g_E .
3. En assimilant le poids à la force de gravitation, déterminer l'expression de la valeur du champ de pesanteur en haut de l'Everest.
4. Calculer cette valeur puis la comparer à celle de ce champ au niveau de la mer g_T .

Données

- $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{kg}^2 \cdot \text{m}^{-2}$.
- $M_T = 5,97 \times 10^{24} \text{ kg}$.
- $g_T = 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.
- $m = 80 \text{ kg}$.

Produire des rayons X à l'aide d'électrons

Faire un schéma adapté ; effectuer des calculs ; prendre conscience des limites d'un modèle.



Les rayons X peuvent être produits dans des dispositifs appelés tubes de Coolidge (William David COOLIDGE, physicien américain, 1873-1975).

Dans ce dispositif, des électrons émis par un filament chauffé sont accélérés, entre les points O et A, sous l'effet d'un champ électrique uniforme \vec{E} dont la valeur est $E = 5,0 \times 10^3 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$. Ce champ est obtenu grâce à une tension électrique U .

Les électrons se dirigent vers une cible de molybdène, avec laquelle ils interagissent pour produire les rayons X.

1. Donner l'expression vectorielle de la force électrique \vec{F}_e subie par un électron en fonction du champ électrique \vec{E} . En déduire pourquoi on parle d'accélération des électrons.

2.a. Tracer selon l'axe OA une ligne du champ électrostatique. Utiliser le réflexe 3

b. Calculer la valeur de la force électrostatique exercée sur un électron dans ce champ. Utiliser le réflexe 1

3. La valeur de la vitesse de l'électron en A se calcule, dans le cadre de la mécanique classique, par la relation $v = \sqrt{\frac{2e \times U}{m_e}}$.

a. Calculer la valeur de la vitesse de l'électron lorsqu'il arrive en A dans le cas où la tension électrique U appliquée entre le filament et la cible est 100 kV.

b. La mécanique relativiste remplace la mécanique classique pour l'étude de mouvements lorsque la valeur de la vitesse du système atteint 10 % ou plus de la célérité de la lumière dans le vide.

Commenter le résultat précédent.

Données

- Charge électrique élémentaire : $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$.
- Masse de l'électron : $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

Faire un schéma adapté

Question 2.a. réussie ?



S'entraîner encore

→ ex. 13



Relever un autre défi

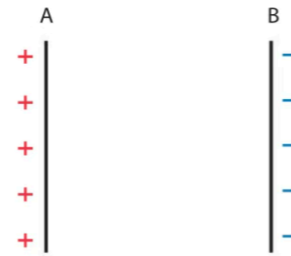
→ ex. 26

2 Exercice résolu

Champ électrostatique créé par un condensateur plan

Mobiliser ses connaissances ; faire un schéma adapté ; effectuer des calculs.

Entre les plaques A et B d'un condensateur chargé, il existe un champ électrostatique uniforme, c'est-à-dire un champ dont la direction, le sens et la valeur sont constants en tous points de l'espace entre les plaques. Ce champ \vec{E} est perpendiculaire aux plaques, il est orienté de la plaque positive vers la plaque négative. Dans la situation étudiée, sa valeur est $E = 1,0 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{C}^{-1}$.



- Reproduire le schéma du condensateur et représenter le vecteur champ électrostatique en un point situé entre les plaques et à l'échelle $1 \text{ cm pour } 5,0 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{C}^{-1}$.
- Représenter des lignes de champ électrostatique entre les plaques.
- Calculer la valeur de la force électrostatique qui s'exerce sur un électron ($q = -1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$) situé entre les plaques. Dans quel sens cet électron se déplace-t-il sous l'effet de cette force ?

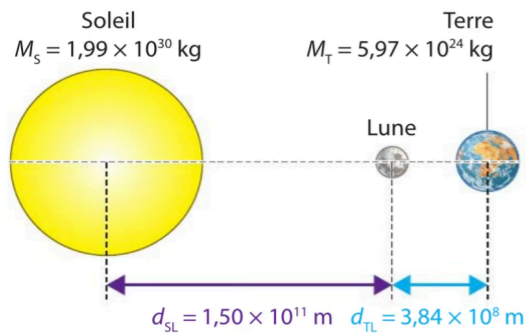
32

30 min

Champ résultant au niveau de la Lune lors d'une éclipse de Soleil

Tracer des vecteurs ; exploiter un schéma.

Lors d'une éclipse solaire, la Lune se retrouve entre la Terre et le Soleil.



- Exprimer la force exercée par la Terre sur la Lune $\vec{F}_{T/L}$ en fonction de M_L , M_T et d_{TL} .
- Exprimer également cette force en fonction du champ de gravitation de la Terre \vec{G}_T et de la masse de la Lune M_L .

- En déduire l'expression du champ de gravitation \vec{G}_T .
- Indiquer alors ses caractéristiques. **Utiliser le réflexe 1**
- Faire de même pour le champ de gravitation \vec{G}_S dû au Soleil. **Utiliser le réflexe 1**
- Reproduire le schéma. Le compléter en représentant à l'échelle les deux champs \vec{G}_S et \vec{G}_T au niveau de la Lune. **Utiliser le réflexe 2**
- Déterminer les caractéristiques du champ résultant $\vec{G} = \vec{G}_S + \vec{G}_T$.

Donnée

- $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$.

Exploiter un schéma

Question 1 réussie ?



S'entraîner encore

→ ex. 9



Relever un autre défi

→ ex. 20

Exercice Ions

Un ion He^{2+} exerce une force électrostatique sur un ion fer de charge électrique inconnue. Cette force est répulsive ; sa norme est $F = 9,46 \times 10^{-20} \text{ N}$ si les ions sont distants de $d = 121 \mu\text{m}$ l'un de l'autre.

- Quel est le signe de la charge électrique q portée par l'ion fer ? Justifiez.
- Calculer q . L'ion fer est-il Fe^{2+} ou Fe^{3+} ? Justifier.