

Les interactions qui gouvernent l'Univers

Chap. 08,01

1 La matière à différentes échelles

L'ordre de grandeur d'une grandeur physique est une représentation simplifiée et approximative du résultat de la mesure de cette grandeur : c'est la puissance de 10 la plus proche de ce résultat.

Les ordres de grandeurs de différentes grandeurs de même nature permettent de les comparer rapidement.

Quelques ordres de grandeur :

- Rayon moyen d'un noyau : 10^{-15} m ;
- Rayon moyen d'un atome : 10^{-10} m ;
- Longueur moyenne d'une bactérie : 10^{-6} m ;
- Taille d'un être humain : 1 m ;
- Rayon de la Terre : 10^7 m ;
- Diamètre de la Voie Lactée : 10^{21} m.

Détermination d'un ordre de grandeur :

1. Écriture de la valeur en notation scientifique :

$$a \times 10^n \quad \text{avec} \quad 1 \leq a < 10$$

2. Détermination de la puissance de 10 :

$$\begin{cases} a < 5 & \text{l'ordre de grandeur est } 10^n \\ a \geq 5 & \text{l'ordre de grandeur est } 10^{n+1} \end{cases}$$

Exemples :

- Rayon de l'atome d'hydrogène : $r = 53 \text{ pm} = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m} \approx 10^{-10} \text{ m}$;
- Diamètre d'une molécule d'ADN : $d = 2 \text{ nm} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ m} \approx 10^{-9} \text{ m}$;
- Longueur d'une molécule d'ADN dépliée : $l = 2 \text{ m} \approx 1 \text{ m}$.

2 Charge élémentaire

- La **charge élémentaire** est la charge électrique d'un proton.
- Elle est notée e et s'exprime en coulomb :

$$e = 1,602176565(35) \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

À retenir.

Depuis sa première mesure par Robert Millikan en 1909, la charge élémentaire est considérée comme indivisible. Toute charge électrique Q peut donc s'écrire :

$$Q = n e$$

où n est un nombre entier relatif.

Remarque. Les quarks possèdent une charge électrique fractionnaire (des multiples de $e/3$) mais ils sont confinés à l'intérieur d'hadrons (protons, neutrons, etc.), particules dont la charge est un multiple de la charge élémentaire, et n'ont pour l'instant jamais été détectés libres.

3 Interactions fondamentales

Quatre interactions fondamentales sont responsables de tous les phénomènes physiques observés dans l'Univers :

- l'interaction *nucléaire forte* ;
- l'interaction *nucléaire faible* ;
- l'interaction *gravitationnelle* ;
- l'interaction *électromagnétique*.

3.1 Interaction gravitationnelle

- L'interaction gravitationnelle concerne les **masses**, immobiles et/ou en mouvement. Elle fait intervenir un *champ gravitationnel* (cf. section 3).

- L'interaction gravitationnelle est *toujours attractive*.
- La loi de Newton modélise l'interaction gravitationnelle sous forme d'une force : la force de Newton.

La loi de Newton.

L'interaction gravitationnelle entre deux corps *ponctuels* A et B, de masses respectives m_A et m_B , séparés d'une distance d , est modélisée par des forces $\vec{F}_{A/B}$ et $\vec{F}_{B/A}$ dont les caractéristiques sont les suivantes :

- *Point d'application* : A pour $\vec{F}_{B/A}$ et B pour $\vec{F}_{A/B}$
- *Direction* : la direction de la droite (A B)
- *Sens* : vers le centre attracteur (A pour $\vec{F}_{A/B}$ et B pour $\vec{F}_{B/A}$)
- *Valeur* :

$$F_{A/B} = F_{B/A} = G \frac{m_A \cdot m_B}{d^2}$$

où m_A et m_B sont exprimées en kilogramme (kg), d en mètre (m) et $F_{A/B}$ et $F_{B/A}$ en newton (N).

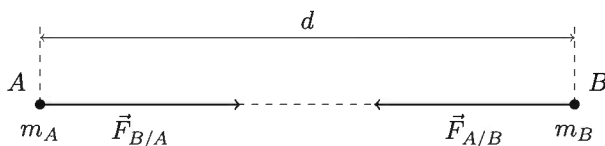
G est appelée **constante de gravitation universelle**, sa valeur est :

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

- Si l'on ne prend pas en compte les points d'application des deux vecteurs, on constate que :

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

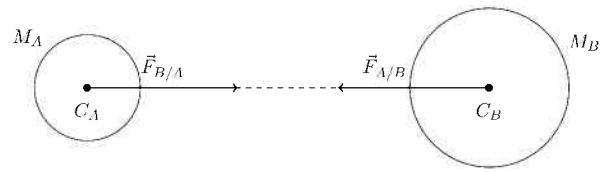
Représentation des forces.



- Si l'on ne prend pas en compte les points d'application des deux vecteurs, on constate que :

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

- La loi de Newton se généralise telle quelle à des corps à répartition de masse sphérique :



À retenir.

L'interaction gravitationnelle est **toujours attractive** et de **portée infinie**.

L'interaction gravitationnelle possède la plus faible intensité parmi toutes les interactions : 10^{38} fois plus petite que celle l'interaction nucléaire forte.

3.2 Interaction électromagnétique

- L'interaction électromagnétique concerne les **charges électriques**, *immobiles et/ou en mouvement*. Elle fait intervenir des *champ électrique* et *magnétique* (cf. section 3).
- L'interaction électromagnétique peut être *attractive ou répulsive* selon les cas.
- La loi de Coulomb modélise la seule interaction électrique sous forme d'une force : la force électrique.

La loi de Coulomb.

L'interaction électrique entre deux corps *ponctuels* A et B, portant les charges respectives q_A et q_B , séparés d'une distance d , est modélisée par des forces $\vec{F}_{A/B}$ et $\vec{F}_{B/A}$ dont les caractéristiques sont les suivantes :

- *Point d'application* : A pour $\vec{F}_{B/A}$ et B pour $\vec{F}_{A/B}$
- *Direction* : la droite (A B)
- *Sens* : dépend du signe des deux charges électriques
- *Valeur* :

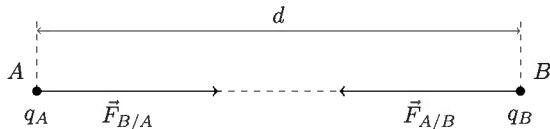
$$F_{A/B} = F_{B/A} = k \frac{|q_A| \cdot |q_B|}{d^2}$$

où q_A et q_B sont exprimées en **coulomb** (C), d en mètre (m) et $F_{A/B}$ et $F_{B/A}$ en newton (N).

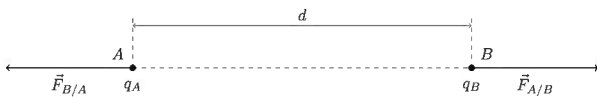
$$k = 9,0 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$$

Représentation des forces.

- Charges de signes opposés : l'interaction est attractive :



- Charges de mêmes signes, l'interaction est répulsive :



- Si l'on ne prend pas en compte les points d'application des deux vecteurs, on constate que :

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

- La loi de Coulomb se généralise telle quelle à des corps à répartition de masse sphérique (cf. section 3.1).

À retenir.

L'interaction électrique entre deux corps est de **portée infinie**. Si les charges électriques sont de même signe, elle est **répulsive**, si les charges électriques sont de signes opposés, elle est **attractive**.

L'intensité de l'interaction électrique est environ 10^2 fois plus petite que celle de l'interaction forte.

3.3 Interaction forte

L'interaction forte possède les propriétés suivantes :

- Elle est *attractive* ;
- Elle est responsable de la *cohésion des nucléons* (en fait de toutes les particules de la famille des **hadrons**)¹ ;

1. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Hadron>

- Elle est donc responsable, indirectement, de la *cohésion des noyaux atomiques* ;
- Elle possède une portée de l'ordre de 10^{-15} m ;
- Elle est la plus puissante de toutes les interactions connues.

3.4 Interaction faible

L'interaction faible possède les caractéristiques suivantes :

- Elle est responsable d'un des types de radioactivité, la radioactivité β . Elle joue aussi un rôle important dans la fusion nucléaire (comme au centre du Soleil) ;
- Elle possède une portée de l'ordre de 10^{-17} m ;
- Elle est 10^{-5} fois moins intense que l'interaction forte.

3.5 Domaines de prédominance des différentes interactions

À l'échelle astronomique.

À l'échelle astronomique, la matière est globalement neutre alors que les masses sont gigantesques :

- L'interaction gravitationnelle prédomine à l'échelle astronomique.

De l'échelle microscopique à l'échelle humaine.

De l'échelle microscopique à l'échelle humaine, les masses sont trop petites pour que l'interaction gravitationnelle soit importante. De plus, *localement*, les charges électriques ne se compensent pas :

- L'interaction électromagnétique prédomine de l'échelle microscopique à l'échelle humaine.

À l'échelle du noyau.

Dans le noyau, les interactions forte, faible et électromagnétique sont présentes. L'interaction électromagnétique tend à rendre les noyaux instables alors que l'interaction forte, 100 fois plus intense, tend à les stabiliser.

- Les interactions forte et faible prédominent à l'échelle des noyaux (pas trop gros).

- La stabilité d'un noyau est le résultat de la compétition qui existe entre l'interaction forte et l'interaction électromagnétique.

4 Notion de champ

4.1 Champ en physique

En physique, un *champ* est la donnée, pour chaque point de l'espace, de la valeur d'une grandeur physique.

Cette grandeur physique peut être **scalaire**, c'est à dire un nombre, (température, pression, etc.) ou **vectorielle** (vitesse des particules d'un fluide, champ électrique, etc.)².

Exemple. Un exemple de champ scalaire est donné par la *carte des températures* d'un bulletin météorologique : la *température atmosphérique* prend, en chaque point, une *valeur particulière*.

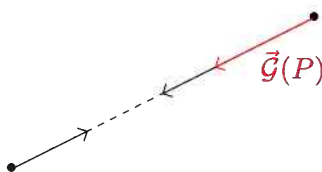
Exemple. Un exemple de champ vectoriel est donné par la *carte des vents* d'un bulletin météorologique : les particules de fluides possèdent, en chaque point, un vecteur vitesse caractérisé par une direction, un sens et une valeur.

On peut définir un champ pour toutes les interactions fondamentales.

Une **ligne de champ vectoriel** est une *ligne tangente en chacun de ses points au vecteur champ*. Elle est *orientée par une flèche dans le même sens que celui du champ*.

Un **champ uniforme** est un champ dont les caractéristiques (*direction, sens et valeur*) ne dépendent pas du point de l'espace considéré.

4.2 Champ gravitationnel \vec{g}



Considérons, en un point O de l'espace, un objet ponctuel de masse M et, en un point P , un objet ponctuel de masse m . La force gravitationnelle exercée par la masse M sur la masse m s'écrit :

$$\vec{F}_{M/m} = -G \frac{Mm}{r^2} \vec{u}_{OP} = m \left(-G \frac{M}{r^2} \vec{u}_{OP} \right)$$

donc

$$\frac{\vec{F}_{M/m}}{m} = \vec{g}(P) = -G \frac{M}{r^2} \vec{u}_{OP}$$

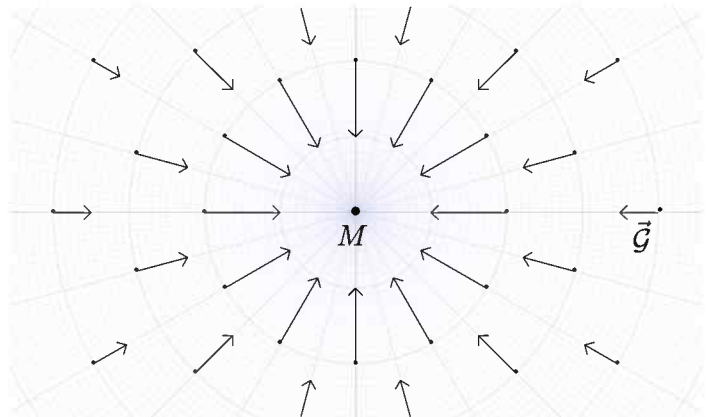
Le vecteur $\vec{g}(P)$ est appelé **vecteur champ de gravitation** créé par la masse M en tout point P de l'espace. Il caractérise une propriété de l'espace due à la présence de l'objet ponctuel de masse M situé en O ; il ne dépend pas de la masse placée en P .

Comme tout vecteur, le vecteur champ de gravitation \vec{g} possède une direction, un sens et une valeur.

Le champ de gravitation s'exprime en mètre par seconde-carré ($\text{m/s}^2 = \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$).

Champ gravitationnel en quelques points de l'espace.

$\vec{g}(P)$ et \vec{u}_{OP} sont deux vecteurs colinéaires de sens opposés puisque $-G \frac{M}{r^2} < 0$:

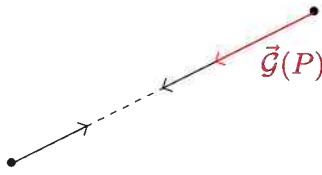


À retenir.

Le champ de gravitation, créé en un point P par un objet de masse M , n'est pas un objet mathématique ; il **existe même en l'absence de masse en P** .

C'est seulement en plaçant en P une masse témoin m que l'on peut le détecter ; on mesure alors une force et on en déduit la valeur du champ.

4.3 Champ électrique \vec{E}



Considérons, en un point O de l'espace, un objet ponctuel immobile de charge électrique Q et, en un point P , un objet ponctuel immobile de charge électrique q . La force électrique exercée par la charge Q sur la charge q s'écrit :

$$\vec{F}_{Q/q} = k \frac{Qq}{r^2} \vec{u}_{OP} = q \left(k \frac{Q}{r^2} \vec{u}_{OP} \right)$$

donc

$$\boxed{\frac{\vec{F}_{Q/q}}{q} = \vec{E}(P) = k \frac{Q}{r^2} \vec{u}_{OP}}$$

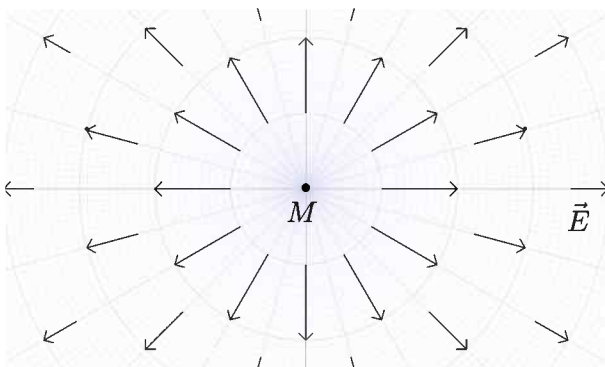
Le vecteur $\vec{E}(P)$ est appelé **vecteur champ électrique** créé par la charge Q en tout point P de l'espace. Il caractérise une propriété de l'espace due à la présence de l'objet ponctuel de charge Q situé en O ; il ne dépend pas de la charge placée en P .

Comme tout vecteur, le vecteur champ électrique \vec{E} possède une direction, un sens et une valeur.

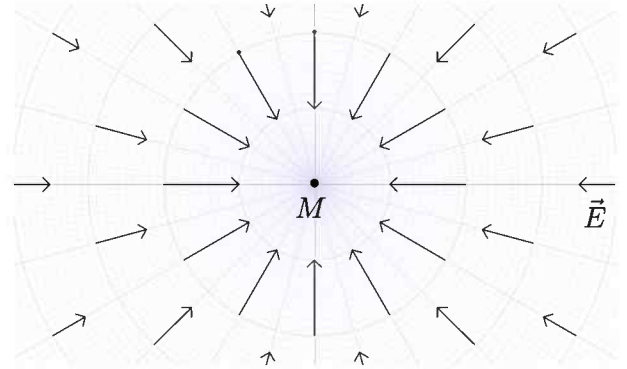
Le champ électrique s'exprime en volt par mètre ($V/m = V \cdot m^{-1}$).

Champ électrique en quelques points de l'espace.

$Q > 0$. $\vec{E}(P)$ et \vec{u}_{OP} sont deux vecteurs colinéaires de même sens puisque $k \frac{Q}{r^2} > 0$:



$Q < 0$. $\vec{E}(P)$ et \vec{u}_{OP} sont deux vecteurs colinéaires de sens opposés puisque $k \frac{Q}{r^2} < 0$:



À retenir.

Le champ électrique, créé en un point P par un objet de charge Q , n'est pas un objet mathématique ; il **existe même en l'absence de charge en P** .

C'est seulement en plaçant en P une charge témoin q que l'on peut le détecter ; on mesure alors une force et on en déduit la valeur du champ.

5 Exercices

5.1 Interactions

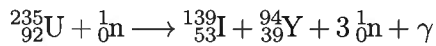
Exercice 1. (Nucléons)

En 1964, les physiciens M. Gell-Mann et G. Zweig ont avancé l'hypothèse que les nucléons étaient constitués de trois quarks. En fait, il en existe plusieurs types dont les quarks u (up) portant une charge $+2/3e$ et d (down) portant une charge $-1/3e$. Le proton contient les quarks u, u, d et le neutron, les quarks u, d, d .

1. Rappeler la valeur de la charge élémentaire.
2. Depuis 1964, peut-on encore parler de e comme étant la charge électrique élémentaire ?
3. Vérifier la valeur des charges portées par le proton et le neutron dans cette théorie.
4. Quel type d'interaction permet de maintenir les quarks à l'intérieur des nucléons ?

Exercice 2. (Fission de l'Uranium)

L'un des modes de fission de l'uranium se produisant dans une centrale nucléaire est le suivant :



On observe l'émission d'un rayonnement γ , l'éjection de trois neutrons et la formation de deux nouveaux éléments chimiques.

1. Pourquoi cette réaction n'est-elle pas une réaction chimique ?
2. Quels sont les deux nouveaux éléments chimiques ?
3. Vérifier la conservation du nombre de nucléons.
4. Quelle est l'interaction concernée par cette fission ?
5. La fission d'un noyau d'uranium libère environ 200 MeV. Calculer l'énergie libérée par la fission d'une mole de noyaux d'uranium.
6. L'énergie libérée par la combustion d'une mole de carbone est égale à 393 kJ.
7. Quelle est l'interaction concernée par cette combustion ?
8. Comparer les valeurs de ces deux énergies. Conclure.

5.2 Interaction gravitationnelle

Exercice 3. (Force d'interaction gravitationnelle entre deux corps)

Le Soleil a une masse $M_S = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$. La Terre a une masse $M_T = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$. Le rayon moyen de l'orbite de la Terre autour du Soleil est $1,49 \cdot 10^{11} \text{ m}$.

1. Pourquoi peut-on appliquer la loi de Newton initialement destinée aux corps ponctuels au cas de l'interaction entre la Terre et le Soleil ?
2. Calculer la valeur de la force $\vec{F}_{S/T}$. Représenter le vecteur sur un schéma en précisant l'échelle.

Exercice 4. (Boules de pétanque)

Une boule de pétanque a une masse de 730 g et un rayon de 4 cm. Le cochonnet a une masse de 12 g et un rayon de 1,5 cm.

1. Ces corps ont-ils une répartition sphérique de masse ?
2. Calculer la valeur de la force d'interaction gravitationnelle s'exerçant entre le cochonnet et la boule, distants de 20 cm.
3. Schématiser la situation et représenter les forces.

Exercice 5. (Champ de gravitation de la Lune)

La Lune est considérée comme un corps à répartition sphérique de masse, de rayon $R_L = 1740 \text{ km}$ et de masse $M_L = 7,34 \cdot 10^{22} \text{ kg}$.

1. Donner l'expression de la valeur du champ gravitationnel \vec{g}_L créé par la Lune à une distance $r \geq R_L$.
2. Calculer la valeur du champ gravitationnel \vec{g}_L créé par la Lune à sa surface.
3. Comparer la valeur de \vec{g}_L à celle de \vec{g}_T , champ gravitationnel créé par la Terre à sa surface.

Données. $R_T = 6380 \text{ km}$ et $M_T = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$.

4. Lors de la dernière mission lunaire (APOLLO XVII), les astronautes ont ramené 117 kg de roches. Quel était le poids de ces roches :

- a. à la surface de la Lune ?
- b. à la surface de la Terre ?

Exercice 6. (Champ gravitationnel d'une étoile à neutrons)

Les étoiles à neutrons sont plus denses que le Soleil. Pour une étoile à neutrons de masse double de la masse du Soleil, on évalue son rayon R_N à 10 km.

Donnée. Masse du Soleil : $M_S = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$.

1. Calculer la valeur \mathcal{G}_N du champ de gravitation à la surface de l'étoile à neutrons.

2. Comparer la valeur précédente à celle du champ gravitationnel que crée le Soleil à sa surface : $\mathcal{G}_S = 270 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.
3. Calculer la valeur de la force exercée sur 1 kg de matière au voisinage de la surface de l'étoile à neutrons.

Exercice 7. (Champ gravitationnel d'un trou noir)

Un trou noir résulte de l'effondrement gravitationnel du cœur d'une étoile massive.

« Le rayon d'un trou noir peut être très petit, et évidemment fonction de sa masse : il est de 3 km pour un trou noir d'une masse solaire ($M_S = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$), et de 10^{-27} m pour un trou noir de 1 kg. »

(Renaud Foy, *Astronomie Larousse*)

1. Calculer la valeur du champ gravitationnel à la surface de chacun des trous noirs décrits dans la citation ci-dessus.
2. À quelle distance du centre de chacun des trous noirs la valeur du champ serait-elle égale au champ solaire à la surface du Soleil, soit $270 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$?

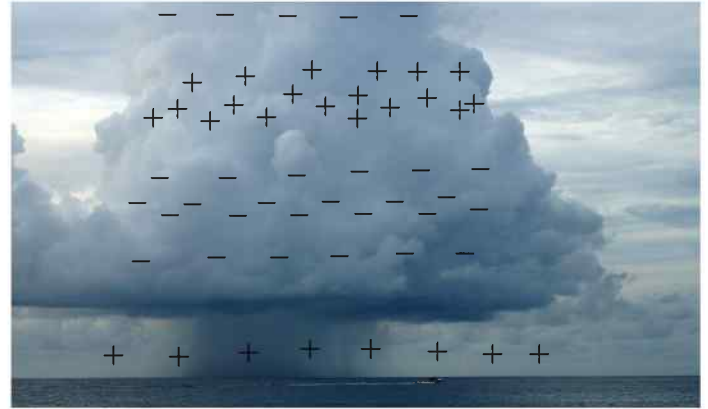
5.3 Interaction électrique

Exercice 8. (Loi de Coulomb)

La molécule de dichlore est constituée de deux atomes de chlore dont les noyaux comportent 17 protons. Ces noyaux, considérés comme ponctuels, sont à une distance $d = 0,198 \text{ nm}$ l'un de l'autre.

1. Calculer la valeur des forces d'interaction électrique entre les noyaux.
2. Donner l'expression vectorielle de ces forces et les représenter avec une échelle à préciser.

Exercice 9. (Orage)



Par beau temps, le champ électrostatique au voisinage de la surface terrestre est quasiment uniforme. Sa valeur est de l'ordre de $150 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ et il est dirigé vers le sol.

Par temps d'orage, on observe la formation de cumulonimbus. Ces nuages ont une base quasiment horizontale, chargée négativement. Au voisinage de cette base, le sol se charge positivement. L'accumulation de charges électriques est telle que la valeur du champ électrostatique peut dépasser $20 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$. Le champ est si intense que l'air est ionisé, ce qui le rend beaucoup plus conducteur qu'habituellement.

Une décharge électrique est donc possible ; c'est l'éclair.

1. Par beau temps, quel est le signe de la charge électrique de la surface du sol ?
2. Expliquer pourquoi la surface du sol se charge positivement sous un cumulonimbus.
3. En considérant un sol horizontal et plan, par quoi peut-on modéliser le système formé par le sol et la partie inférieure du cumulonimbus ?
4. Que peut-on dire du champ électrostatique entre le sol et la base du nuage ?
5. Reproduire le schéma ci-dessus et représenter quelques lignes de champ électrostatique.