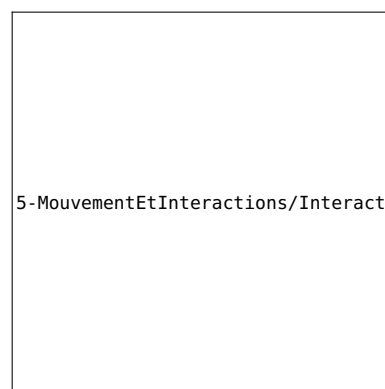


# Physique 5 : Interactions fondamentales et champs

Un axe de recherche majeur en physique sonde la matière jusque dans ses particules élémentaires. Cette course à l'infiniment petit a mené à la découverte des molécules, elles-mêmes constituées d'atomes, à leur tour constitués d'un cortège d'électrons et d'un noyau, qui contient des nucléons, qui sont constitués de quarks. Un véritable jeu de poupées russes!

Mais qu'est-ce qui donne sa cohésion à la matière, de l'infiniment petit (les molécules, les cristaux) à l'infiniment grand (les planètes, les étoiles ...)? Les progrès de la physique au XX<sup>e</sup> siècle ont apporté des réponses très élégantes à cette interrogation. Les théories modernes tendent à unifier notre compréhension du monde selon autour de quatre interactions fondamentales : l'interaction gravitationnelle, l'interaction électrique, l'interaction forte, et l'interaction faible.

Dans ce chapitre, nous étudions l'interaction électrostatique et l'interaction gravitationnelle. Dans la section 1 nous présentons l'interaction électrostatique, dans la section 2 nous présentons l'interaction gravitationnelle. Enfin, dans la section 3, nous développons le concept de champ, qui unifie la description des actions à distance en physique.



5-MouvementEtInteractions/InteractionsFondaChamps/

FIGURE 1.1: Quatre interactions fondamentales

## 1 L'interaction électrostatique

### 1.1 Présentation

#### Définition 1.1: Charge électrique

La charge électrique est une propriété intrinsèque de la matière. Elle se mesure en Coulombs, notés C.

Intrinsèque : c'est-à-dire caractéristique, inaliénable; tous les électrons de l'univers ont la même charge, sinon ce ne seraient pas des électrons.

Les charges électriques interagissent à travers l'une des quatre interactions fondamentales : l'interaction électrostatique, modélisée par la loi de Coulomb.

#### Propriété 1.1: Loi de Coulomb

La loi de Coulomb exprime la force entre deux charges électriques ponctuelles situées en  $M_1$  et  $M_2$  :

$$\vec{F}_{1/2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 M_1 M_2^2} \vec{u}_{12}$$

où  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9.00 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$  et  $\vec{u}_{12} = \frac{\overrightarrow{M_1 M_2}}{M_1 M_2}$  est un vecteur unitaire, dirigé de  $M_1$  vers  $M_2$ .

INTERPRÉTATION :

1. Deux charges électriques de même signe ont tendance à se repousser. Lorsqu'elles sont de signe opposé, elles s'attirent.
2. Cette attraction est inversement proportionnelle au carré de la distance : si la distance double, la norme de la force de Coulomb est divisée par quatre.

### 1.2 Influence électrostatique

(VOIR TP ET MACHINE DE WIMSHURST)

Il existe différents moyens d'obtenir des corps chargés électriquement, en voici quelques uns : (+ Rappels Isolant/conducteur)

L'influence entre différents isolants / conducteurs par :

- Frottement
- Influence
- Contact

EXEMPLES :

- Un électron est caractérisé par sa charge  $q_e = -e = -1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ .
- Un proton est caractérisé par sa charge  $q_p = +e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ .

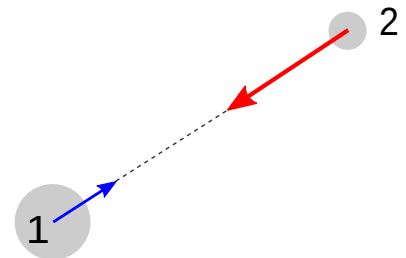


FIGURE 1.2: Interaction coulombienne entre deux corps.

## 2 L'attraction gravitationnelle

### Définition 1.2: La masse

La masse est une propriété intrinsèque de certaines particules élémentaires, on la note usuellement  $m$ . Son unité de mesure dans le système international est le kilogramme, noté kg.

Intrinsèque : c'est-à-dire caractéristique, inaliénable; tous les électrons de l'univers ont la même masse, sinon ce ne seraient pas des électrons

Les charges électriques interagissent à travers l'une des quatre interactions fondamentales : l'interaction gravitationnelle, modélisée par la loi de la gravitation universelle (de Newton).

### Propriété 1.2: Loi de la gravitation universelle

$$\vec{F}_{1/2} = -\mathcal{G} \frac{m_1 m_2}{M_1 M_2} \vec{u}_{12}$$

(voir fig 1.3). où

- $\mathcal{G} = 6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$  est une constante universelle (c'est la même partout dans l'univers, en particulier elle ne dépend pas des différents corps).
- $m_1$  et  $m_2$  sont les masses des corps 1 et 2
- $d$  est la distance qui sépare leurs centres de gravité.
- $\vec{u}_{12} = \frac{\vec{M}_1 \vec{M}_2}{M_1 M_2}$  est un vecteur unitaire (*i.e.* de norme égale à 1) dirigé du centre de gravité du corps 1 vers celui du corps 2.

INTERPRÉTATION :

1. L'attraction gravitationnelle est toujours attractive : toutes les corps massifs sont attirés les uns par les autres.
2. Cette attraction est inversement proportionnelle au carré de la distance : si la distance double, la norme de la force gravitationnelle est divisée par quatre. Cela est très comparable à la loi de Coulomb!

## 3 La notion de champ

Dans cette section nous introduisons la notion de champ. On introduit cet outil sous une forme mathématique en 3.1. En 3.2, nous revisitons la notion de poids pour montrer que le champ de pesanteur  $\vec{g}$  peut être vu comme le champ médiateur de l'action gravitationnelle de la Terre sur les objets à sa surface. Enfin, en nous exploitons les similitudes entre gravité et électrostatique pour généraliser la démarche : on exhibe alors le champ

EXEMPLES :

- Un électron est caractérisé par sa masse  $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ .
- Les nucléons sont caractérisés par leur masse  $m_{\text{nucléon}} = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ .
- Il en résulte que tout échantillon de matière possède une masse car les atomes sont composés de protons, de neutrons et d'électrons.

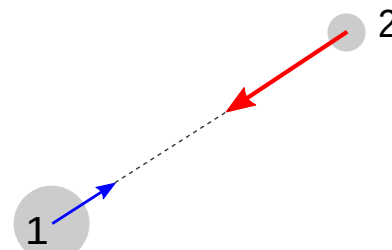


FIGURE 1.3: Attraction gravitationnelle entre deux corps.

électrique  $\vec{E}$ , médiateur de l'interaction électrique.

Le champ, qui semblait n'être qu'une astuce mathématique, apparaît alors comme un concept fécond car unificateur .

### 3.1 Présentation

#### Définition 1.3: Champ

Un champ est un objet mathématique (par exemple un nombre réel ou un vecteur) défini en tout point de l'espace.

EXEMPLES :

- Il existe des champs scalaires : lorsque l'objet est un nombre réel : exemple la pression  $P(M)$  et la température  $T(M)$  au point  $M$  qui varient d'un point à un l'autre de l'espace sur une carte météo.
- Il existe des champs vectoriels : l'objet mathématique est un vecteur : exemple le champ de pesanteur  $\vec{g}$ , partout dirigé vers le centre de la Terre.

COMMENT REPRÉSENTER UN CHAMP DE VECTEURS ? Pour représenter un champ de vecteurs, il existe deux possibilités : on peut tracer quelques unes des flèches représentatives du champ, disséminées dans l'espace. On peut aussi tracer des lignes de champ qui donnent souvent des figures plus lisibles ! Voir figure .

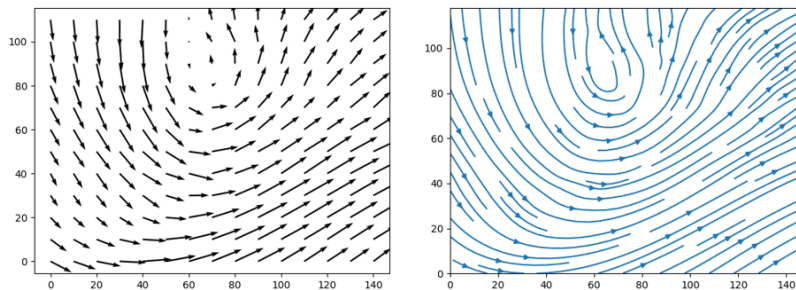


FIGURE 1.4: À gauche, un champ de vecteur représenté sur quelques points, à droite les lignes de champ correspondantes. Les lignes de champ se construisent de proche en proche : en partant d'un point, on suit la direction des flèches que l'on rencontre sur le chemin.

### 3.2 Le poids revisité

À la surface de la Terre, tous les corps massifs sont attirés par la Terre, de masse  $m_T = 6 \times 10^{24}$  kg. Ils subissent l'attraction gravitationnelle, qui est notée  $\vec{P}$  et appelée poids dans ce contexte :

$$\vec{P} = -g \frac{m_T m}{R_T^2} \vec{u}_z$$

où  $R_T \approx 6400$  km est le rayon de la terre,  $\vec{u}_z$  est un vecteur qui indique la verticale locale <sup>1</sup>.

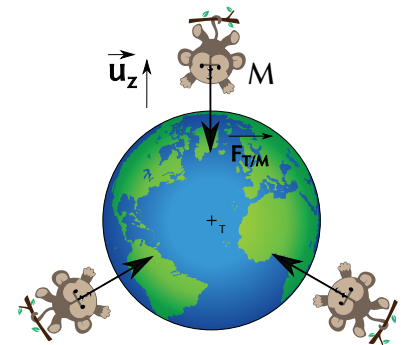


FIGURE 1.5: Le poids résulte de l'effet du champ de gravité  $\vec{g}$  sur les corps.

1. Attention, comme la Terre est ronde, le vecteur  $\vec{u}_z$  « vers le haut » dépend du point sur Terre : c'est un vecteur dirigé du centre de la Terre vers le point  $M$  (voir fig. 1.5)

On peut réécrire

$$\vec{P} = m\vec{g}$$

où  $\vec{g} = -\frac{g m_T}{R_T^2} \vec{u}_z$ , soit numériquement  $\vec{g} = -g\vec{u}_z$ ,  $g = 9.8 \text{ Nkg}^{-1}$ .

On dit que  $\vec{g}$  est le champ de pesanteur de la Terre.

La formule  $\vec{P} = m\vec{g}$  est d'une grande utilité pratique car elle exprime qu'il faut fournir une force proportionnelle à la masse d'un objet pour vaincre l'attraction terrestre et le soulever.

INTERPRÉTATION :

- Cette expression, plus qu'un tour de passe-passe mathématique, apporte une nouvelle vision de l'interaction gravitationnelle : toute particule de masse  $M$  crée autour d'elle un champ gravitationnel  $\vec{g} = -\frac{g m_T}{R_T^2} \vec{u}_z$ .
- Le champ gravitationnel  $\vec{G}$  est médiateur de l'interaction gravitationnelle : toute masse  $m$  subit une force  $\vec{P} = m\vec{g}$ .

### 3.3 Le champ électrique

La loi de Coulomb et la loi de l'interaction gravitationnelle partagent de nombreuses similitudes, nous pouvons donc construire le champ électrique  $\vec{E}$  par analogie avec le champ de pesanteur  $\vec{g}$  comme l'illustre le tableau quivant (table 1.1).

	GRAVITÉ	ÉLECTROSTATIQUE
SOURCE	La masse $M$	La charge électrique $Q$
CONSTANTE FONDAMENTALE	$g = 6.67 \times 10^{-11} \text{ SI}$	$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9.00 \times 10^9 \text{ SI}$
CHAMP	Champ de pesanteur $\vec{g} = -\frac{gM}{r^2} \vec{u}$	Champ électrique $\vec{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{u}$
FORCE	Une masse $m$ ressent $\vec{F} = m\vec{g}$	Une charge $q$ ressent $\vec{F} = q\vec{E}$

TABLE 1.1: Comparaison entre l'action gravitationnelle et l'action électrostatique

Pour se représenter ces interactions, on représente les lignes des champs correspondants (voir figure 1.6). On voit ainsi, d'un seul coup d'œil que l'action gravitationnelle est toujours attractive, mais que l'action électrostatique est tantôt attractive, tantôt répulsive.

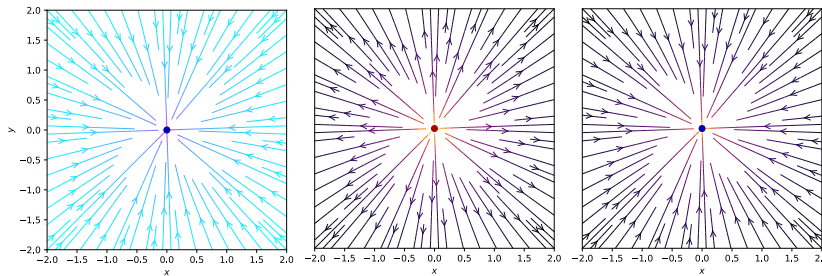


FIGURE 1.6: Lignes de champ, dans l'ordre : champ gravitationnel créé par une masse  $M$ , champ électrique créé par une charge  $Q > 0$  et champ électrique créé par une charge  $Q < 0$ .

REMARQUE :

En pratique, on retiendra que la notion de champ est très féconde car :

- Elle permet de décrire la force ressentie par une particule sans avoir à considérer individuellement les charges qui sont la source du champ : il est ainsi plus simple de décrire un effet collectif (voir exercice sur la plaque chargée).
- Elle permet de comprendre que l'action à distance est véhiculée par l'intermédiaire du champ, c'est une avancée sur la plan conceptuel.

À la fin de ce chapitre, je sais (extrait du B.O.) :

- Interpréter des expériences mettant en jeu l'interaction électrostatique.
- Utiliser la loi de Coulomb.
- Citer les analogies entre la loi de Coulomb et la loi d'interaction gravitationnelle.
- Utiliser les expressions vectorielles :
  - de la force de gravitation et du champ de gravitation.
  - de la force électrostatique et du champ électrostatique.
- Caractériser localement une ligne de champ électrostatique ou de champ de gravitation.
- SAVOIR-FAIRE EXPÉRIMENTAL : Illustrer l'interaction électrostatique. Cartographier un champ électrostatique.