

LP 16 – Mouvements, interactions et notion de champ

Manon LECONTE - ENS de Lyon

Dernière mise à jour : 7 juin 2020

Merci à Théodore Olla, Karine Braganti et Joachim Galiana pour leur précieuse aide.

Mots-clé : interaction, force, attraction, répulsion, champ, mouvement, vecteur variation de vitesse.

Niveau : 1^{re} enseignement de spécialité

Pré-requis :

- Notion de force [2^{de}]
- Repère, référentiel [2^{de}]
- Principe d'inertie [2^{de}]
- Expressions du poids et de la force gravitationnelle [2^{de}]
- Définitions de scalaire et de vecteur, addition et soustraction de vecteurs [2^{de}]
- Electrostatique et charge électrique [1^{re}]

Bibliographie :

- Taillet, *Dictionnaire de physique* [Niveau : **]
- *Physique-Chimie 1^{re}* , Lelivrescolaire [Niveau : *]
- *2019 Physique-Chimie 1^{re}* , Belin [Niveau : *]
- *Physique-Chimie 1^{re} 2019*, Hachette éducation [Niveau : *]

Plan proposé

I - De l'interaction à la force	2
A/ Force de gravitation	2
B/ Force électrostatique	3
II - Notion de champ	3
A/ Cartes de champ	3
B/ Champs gravitationnel et électrostatique	4
III - Mouvement d'un système	6
A/ Vecteur variation de vitesse	6
B/ Description approchée du mouvement	7

Introduction pédagogique

Ce cours est une première approche de la dynamique en mécanique pour les élèves. Pour cela, on réinvestira les outils de cinématique vus en 1^{de}.

Notions et contenus	Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i>
1. Interactions fondamentales et introduction à la notion de champ	
Charge électrique, interaction électrostatique, influence électrostatique. Loi de Coulomb. Force de gravitation et champ de gravitation. Force électrostatique et champ électrostatique.	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. <i>Illustrer l'interaction électrostatique. Cartographier un champ électrostatique.</i>
3. Mouvement d'un système	
Vecteur variation de vitesse. Lien entre la variation du vecteur vitesse d'un système modélisé par un point matériel entre deux instants voisins et la somme des forces appliquées sur celui-ci. Rôle de la masse.	Utiliser la relation approchée entre la variation du vecteur vitesse d'un système modélisé par un point matériel entre deux instants voisins et la somme des forces appliquées sur celui-ci : - pour en déduire une estimation de la variation de vitesse entre deux instants voisins, les forces appliquées au système étant connues ; - pour en déduire une estimation des forces appliquées au système, le comportement cinématique étant connu. <i>Réaliser et/ou exploiter une vidéo ou une chronophotographie d'un système modélisé par un point matériel en mouvement pour construire les vecteurs variation de vitesse. Tester la relation approchée entre la variation du vecteur vitesse entre deux instants voisins et la somme des forces appliquées au système.</i> Capacité numérique : Utiliser un langage de programmation pour étudier la relation approchée entre la variation du vecteur vitesse d'un système modélisé par un point matériel entre deux instants voisins et la somme des forces appliquées sur celui-ci. Capacité mathématique : Sommer et soustraire des vecteurs.

Figure 1 – Extrait du programme officiel de physique-chimie de première générale.

Difficultés :

- différence entre force et interaction ;
- signe associé aux forces gravitationnelle et électrostatique dépendant de la définition de \vec{e}_r ;
- tracé d'une carte de champ à partir de l'expression mathématique ;
- opérations entre vecteurs.

Exemples de TD : déterminer l'ensemble des forces s'exerçant sur un système et les dessiner sur un schéma.

Exemples de TP : construire les vecteurs variation de vitesse sur une chronophotographie.

Introduction

Définition – Mécanique : domaine de la physique qui s'intéresse au mouvement ou à l'équilibre des systèmes matériels.

Les outils de la mécanique permettent de décrire les mouvements d'objets, et de comprendre comment ils interagissent entre-eux. Ils permettent par exemple d'expliquer

pourquoi la Terre tourne autour du Soleil ou encore comment on peut faire léviter une assiette en carton.

| **Vidéo** – Expériences d'électrostatique (regarder jusqu'à 33').

| **Objectifs** – Déterminer si une force est attractive ou répulsive.
Exprimer des forces à partir des champs correspondants.
Relier mouvement et résultante des forces s'appliquant sur un système.

I - De l'interaction à la force

| **Définition – Interaction** : on dit que deux systèmes interagissent s'ils exercent une influence l'un sur l'autre.

Les interactions entre objets sont décrites par des **forces**, objets mathématiques représentés par des vecteurs.

A/ Force de gravitation

Deux objets massiques, c'est-à-dire possédant une masse, s'attirent mutuellement. C'est ce qu'on appelle la **gravitation**.

| **Définition – Force gravitationnelle** : force qui s'exerce sur un corps A de masse m_A par un corps B de masse m_B :

$$\vec{F}_{B/A} = G \frac{m_A m_B}{d_{AB}^2} \vec{e}_r \quad (1)$$

où G est la constante universelle de gravitation, d la distance entre A et B et \vec{e}_r le vecteur unitaire orienté de A vers B .

On peut représenter la force gravitationnelle qu'exerce B sur A ainsi que celle qu'exerce A sur B comme sur le schéma suivant :

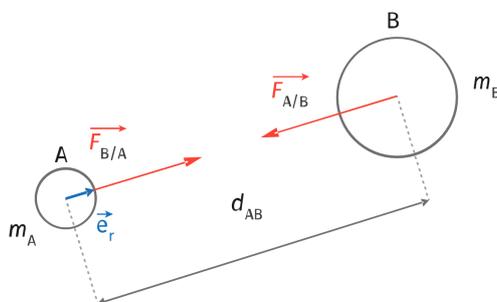


Figure 2 – Forces gravitationnelles exercées par B sur A et par A sur B (Source : Lelivrescolaire (p. 221)).

B/ Force électrostatique

Il existe une autre interaction fondamentale entre deux espèces chargées, dont la force associée est donnée par la loi de Coulomb.

Définition – Loi de Coulomb : l'expression de la force électrostatique subie par A de charge q_A et exercée par B de charge q_B s'exprime :

$$\vec{F}_{B/A} = -k \frac{q_A q_B}{d_{AB}^2} \vec{e}_r \quad (2)$$

où $k = 8,99 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$ dans l'air et \vec{e}_r le vecteur unitaire orienté de A vers B .

On remarque alors que la force n'est pas dirigée dans le même sens si le produit $q_A q_B$ est positif ou négatif, c'est-à-dire si q_A et q_B sont de même signe ou non.

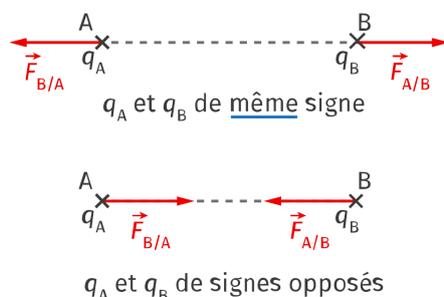


Figure 3 – Visualisation des forces électrostatiques exercées par B sur A et par A sur B en fonction du signe de q_A et q_B (Source : Lelivrescolaire (p. 221)).

On dit que la force électrostatique est **attractive** si q_A et q_B ont des signes opposés, et **répulsive** si q_A et q_B ont le même signe. Si on revient à la vidéo de l'introduction, on peut dire que le fait de frotter les assiettes en carton contre de la laine les ont chargées positivement (en leur arrachant des électrons). L'assiette du haut subit donc une force répulsive c'est pourquoi on a l'impression qu'elle lévite.

On remarque également que la force gravitationnelle est **toujours attractive**, les masses ne pouvant être négatives.

II - Notion de champ

A/ Cartes de champ

Définition – Champ : désigne une quantité qui prend une valeur donnée en tout point de l'espace.

On distingue deux types de champs :

- les champs **scalaires** : la valeur prise par la quantité en question est un scalaire. C'est le cas des champs de pression et de température que l'on peut voir sur une carte météorologique.

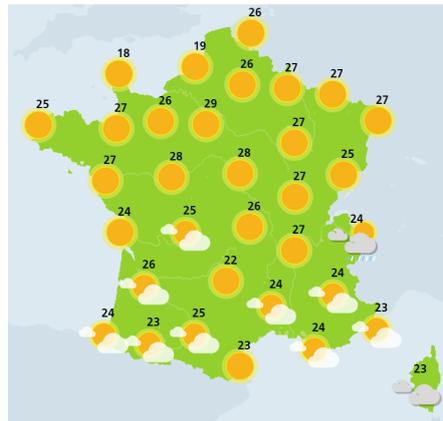


Figure 4 – Carte météorologique des températures du mardi 2 juin 2020 (Source : Météo France).

- les champs **vectoriels** : la valeur prise par la quantité en question est un vecteur. C'est le cas des champs de vitesse des vents que l'on peut voir sur une carte météorologique, mais également des champs de forces, que l'on va détailler dans la sous-partie suivante. Pour mieux visualiser les champs vectoriels, on peut tracer

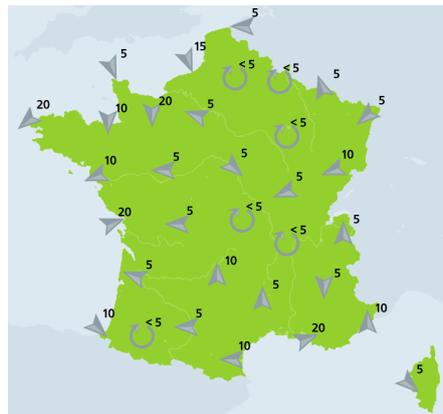


Figure 5 – Carte météorologique des vents du mardi 2 juin 2020 (Source : Météo France).

des **lignes de champ** (courbes tangentes en tout point aux vecteurs du champ).

B/ Champs gravitationnel et électrostatique

Définition – **Champ gravitationnel** : champ créé par un corps de masse m , appelé source :

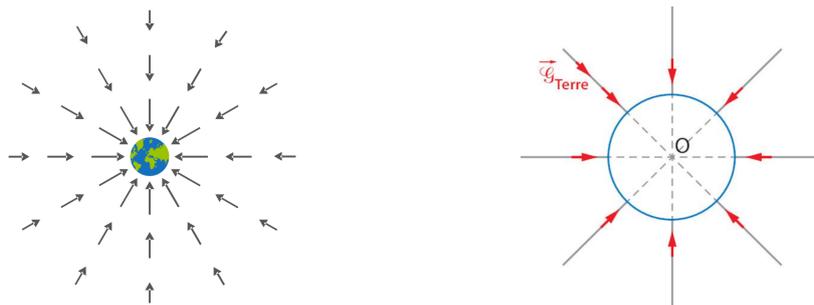
$$\vec{G} = -G \frac{m}{r^2} \vec{e}_r \quad (3)$$

où r est la distance entre le point où l'on se trouve et la source et \vec{e}_r le vecteur unitaire orienté de la source vers le point où l'on se trouve. \vec{G} s'exprime en N/kg.

Le champ gravitationnel créé par la Terre est appelé **champ de pesanteur terrestre** et on le note \vec{g} .

Remarque – g peut être déterminé expérimentalement à l'aide d'un pendule simple (voir Lelivrescolaire (p. 219)).

On peut ensuite tracer la carte du champ de pesanteur terrestre :



(a) Carte du champ de pesanteur (Source : Lelivrescolaire (p. 220)). (b) Lignes de champ (Source : Belin (p. 199)).

Figure 6 – Champ de pesanteur terrestre.

On dit que le champ gravitationnel est **radial** et **centripète** (dirigé vers la source).

On peut aisément retrouver la force gravitationnelle exercée sur le corps A de masse m_A à partir du champ :

$$F_{grav} = -m_A \vec{g} = G \frac{m_A m}{r^2} \vec{e}_r \quad (4)$$

où r est la distance entre A et la source du champ gravitationnel.

Sur Terre, on reconnaît l'expression du **poinds** :

$$\vec{P} = m_A \vec{g} \quad (5)$$

On définit de même un champ pour la force électrostatique :

Définition – **Champ électrostatique** : champ créé par un corps de charge q :

$$\vec{E} = k \frac{q}{r^2} \vec{e}_r \quad (6)$$

où \vec{e}_r est le vecteur unitaire orienté de la source vers le point où l'on se trouve. \vec{E} s'exprime en N/C.

On dit que le champ électrostatique est **radial** et **centripète** pour une charge négative et **radial** et **centrifuge** pour une charge positive.

Remarque – On peut cartographier le champ électrostatique créé par des objets chargés en TP (voir Belin (p. 195)).

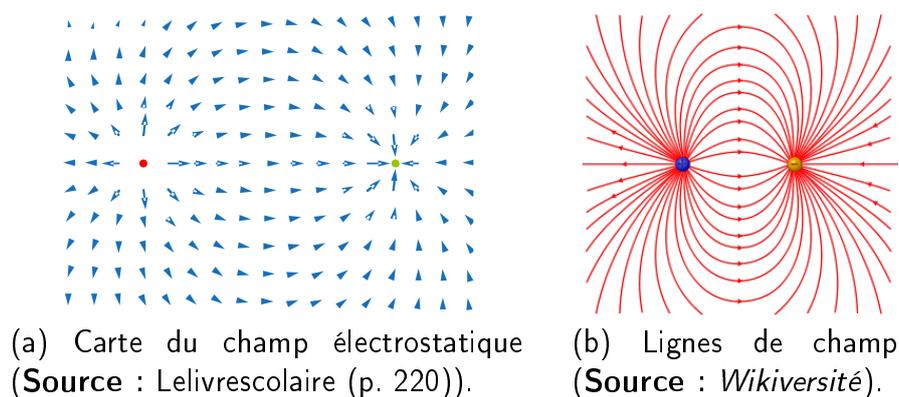


Figure 7 – Champ électrostatique créé par une charge positive (à gauche) et une charge négative (à droite).

On peut aisément retrouver la force électrostatique exercée sur le corps A de charge q_A à partir du champ :

$$\vec{F}_C = q_A \vec{E} = k \frac{q_A q}{r^2} \vec{e}_r \quad (7)$$

III - Mouvement d'un système

A/ Vecteur variation de vitesse

Sur une trajectoire, la vitesse d'un système, représentée par un vecteur en tout point, peut varier. On définit donc le vecteur variation de vitesse entre deux instants t_1 et t_2 :

$$\Delta \vec{v} = \vec{v}(t_2) - \vec{v}(t_1) \quad (8)$$

On peut le représenter sur la courbe d'une trajectoire :

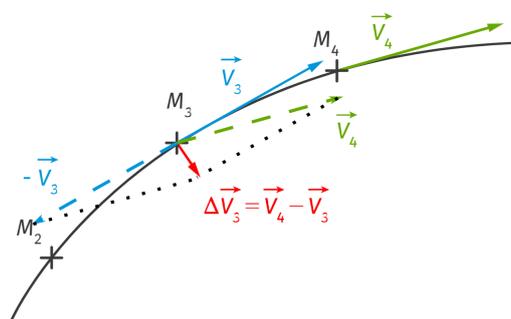
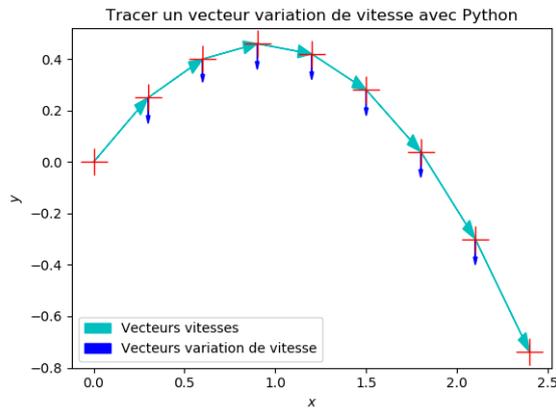


Figure 8 – Représentation du vecteur variation de vitesse sur une trajectoire parabolique (Source : Lelivrescolaire (p. 259)).

Script Python – Tracé des vecteurs vitesses et variation de vitesse sur une trajectoire (d'après Lelivrescolaire (p. 271) et Hachette (p. 230)).



B/ Description approchée du mouvement

On sait que les forces ont une influence sur le mouvement d'un système. On peut utiliser la relation approchée :

$$m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \sum \vec{F}_{ext} \quad (9)$$

avec $\Delta \vec{v}$ le vecteur variation de vitesse pendant le temps Δt et $\sum \vec{F}_{ext}$ la somme de toutes les forces extérieures s'exerçant sur le système, appelée **résultante des forces**.

On remarque que la masse s'oppose à la variation de vitesse : plus elle est grande, plus il faudra appliquer une résultante des forces importantes pour le mettre en mouvement. C'est ce qu'on appelle l'**inertie**.

Si aucune force ne s'exerce sur le système, on retrouve le **principe d'inertie** énoncé en seconde (la vitesse d'un système isolé est constante au cours du temps : $\Delta \vec{v} = \vec{0}$).

Remarque – La vitesse est constante mais pas nécessairement nulle !

Considérons l'exemple d'un système uniquement soumis à son poids. On dit qu'il est en **chute libre**. On a alors :

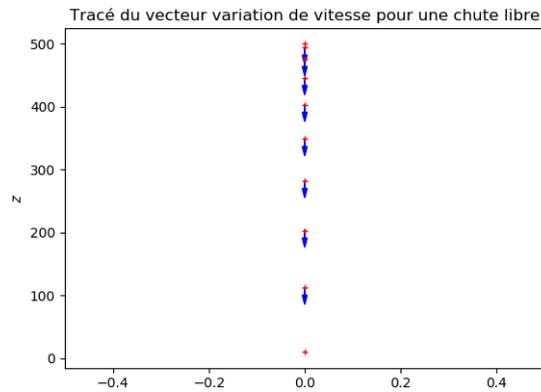
$$m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \sum \vec{F}_{ext} = m \vec{g} \quad (10)$$

On en déduit que $\frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \vec{g}$: le mouvement du système est indépendant de sa masse !

Remarque – On pourrait faire l'expérience d'une chute libre et tracer le vecteur variation de vitesse par pointage vidéo.

Si on trace l'accélération sur la trajectoire du mouvement, on obtient ce qui suit.

Script Python – Tracé du vecteur variation de vitesse sur une trajectoire de chute libre.



Conclusion

On peut étudier l'interaction entre deux systèmes en exprimant la force que l'un exerce sur l'autre. On connaît ainsi les expressions des forces gravitationnelle et électrostatique, auxquelles sont associées des champs vectoriels. Si la force gravitationnelle est toujours attractive, la force électrostatique peut être attractive ou répulsive en fonction du signes des charges interagissant.

Le mouvement d'un système est relié aux forces qui s'exercent sur lui via le vecteur variation de vitesse. On peut ainsi déterminer la trajectoire d'un système en effectuant le bilan des forces s'exerçant sur lui ou inversement.