REPUBLIQUE TUNISIENNE
MINISTERE DE L'EDUCATION

3 PHYSIQUE

3ème année de l'enseignement secondaire
Sciences Expérimentales

223 333

Centre National Pédagogique

REPUBLIQUE TUNISIENNE
MINISTERE DE L'EDUCATION

PHYSIQUE

Proétudes.blogspot.com
PROÉTUDES
Surfer en toute confiance

3ème année de l'enseignement secondaire
Sciences expérimentales

LES AUTEURS

ABDELHAFIDH GHARBI
Professeur à la faculté des sciences de Tunis

MOHAMED BITRI
Inspecteur Principal des collèges et des lycées

ABDELLATIF MEDDAH
Professeur Principal hors classe

MONCEF TORKHANI
Professeur Principal

HATEM DISSEM
Professeur d'enseignement secondaire

LES ÉVALUATEURS

NOUREDDINE MESKINI
Professeur à la faculté des sciences de Tunis

ABDELHAMID BEN HENDA
Inspecteur Principal des collèges et des lycées

ABDELHAMID BAATOUT
Inspecteur Général de l'éducation

ÉDITION MISE A JOUR ET ADAPTÉE PAR

ARDHAOUI KOUAS
Inspecteur des collèges et des lycées

M'HAMED EL GHADHAB
Inspecteur des collèges et des lycées

MAHMOUD GAZZAH
Professeur principal hors classe

ÉVALUATEURS DE L'ADAPTATION

MOHAMED ARBI BEN DAAMAR
Inspecteur des collèges et des lycées

RIDHA HAMZA
Inspecteur des collèges et des lycées

Centre National Pédagogique

© Tous droits réservés au Centre National Pédagogique

Avant-propos

Le présent ouvrage de physique est destiné aux élèves de la 3ème année sciences expérimentales. Il est conforme au programme officiel et répond aux nouvelles orientations du système éducatif.

Il est conçu de façon à :
– faire acquérir aux élèves des connaissances structurées et des savoir-faire rigoureux pouvant servir de base pour l'apprentissage scientifique ultérieur,
– les motiver en leur proposant des démarches qui s'appuient sur leur environnement.

Visant à la fois la construction du savoir et le développement de la dextérité manuelle chez les apprenants, la plupart des activités proposées sont expérimentales et peuvent être traitées sous forme de travaux pratiques ou cours.

À la fin de chaque leçon, les élèves trouveront de un à trois exercices corrigés destinés à les aider à mieux maîtriser la matière étudiée.

Le manuel propose une rubrique “Pour en savoir plus” comportant des documents permettant d’exciter la curiosité des élèves et d’enrichir leurs connaissances.

À propos de l'évaluation, on distinguera deux niveaux de difficultés :
– la simple restitution du cours, dans la rubrique " je vérifie mes connaissances"
– l'aptitude à appliquer le cours et raisonner, dans la rubrique " j’applique mes connaissances et je raisonne”.

Nous espérons qu'ainsi conçu ce manuel de physique, ou les intentions scientifiques et pédagogiques se soutiennent mutuellement, rendra un service efficace aux élèves et à leurs enseignants.

Les auteurs

LES INTERACTIONS DANS L'UNIVERS (20 - 23 heures)

CONTENUS	OBJECTIFS
I. Interaction électrique I-1. Loi de Coulomb I-2. Champ électrique -Champ électrique créé par une charge ponctuelle ●Mise en évidence ●Vecteur champ électrique $\vec{E}$ ●Force électrique $\vec{F}=q\vec{E}$ ●Spectre et lignes de champ. -Cas de deux charges ponctuelles -Champ électrique uniforme.	●Appliquer la loi de Coulomb. ●Mettre en évidence expérimentalement l'existence d'un champ électrique créé par une charge ponctuelle. ●Déterminer les caractéristiques d'un vecteur champ électrique. ●Représenter une force électrique. ●Appliquer la relation vectorielle $\vec{F} = q\ \vec{E}$ ●Reconnaître, d'après la forme du spectre électrique, le champ électrique créé par une charge ponctuelle, le champ électrique créé par deux charges ponctuelles et le champ électrique uniforme.
II. Interaction magnétique II-1. Les différents types d'interaction magnétique -Interactions entre aimants -Interaction aimant - courant -Interaction courant - courant -Application : la lévitation magnétique II-2. Champ magnétique -Notion de champ magnétique : ●Mise en évidence ●Spectre et lignes de champ ●Vecteur champ magnétique -Champ magnétique uniforme -Champ magnétique terrestre -Champ magnétique créé par un courant continu : cas d'un courant circulaire II-3. Force de Laplace -Mise en évidence -Caractéristiques -Application : le moteur électrique à courant continu.	●Mettre en évidence expérimentalement une interaction magnétique. ●Mettre en évidence expérimentalement l'existence d'un champ magnétique. ●Reconnaître un champ magnétique uniforme à partir de la forme de son spectre. ●Déterminer les caractéristiques d'un vecteur champ magnétique. ●Utiliser un teslamètre. ●Mettre en évidence expérimentalement la force de Laplace. ●Déterminer les caractéristiques de la force de Laplace. ●Expliquer le fonctionnement d'un moteur à courant continu.

III. Interaction gravitationnelle

-Loi de gravitation universelle.
-Champ de gravitation :
●Mise en évidence
●Vecteur champ de gravitation, ses caractéristiques
-Cas particulier : Champ de pesanteur
●Vecteur champ de pesanteur, ses caractéristiques
●Lignes de champ
●Champ uniforme
- Applications : phénomènes des marées, ceintures d'astéroïdes (Kuiper).

●Appliquer la loi de gravitation universelle.
●Caractériser le vecteur champ de gravitation $\vec{G}$ en un point de l'espace.
●Représenter les lignes du champ de gravitation.
●Caractériser le vecteur champ de pesanteur $\vec{g}$ en un point de l'espace.
●Reconnaître les facteurs dont dépend le poids $\vec{P}$.
●Expliquer certains phénomènes naturels observables dus à l'interaction gravitationnelle.
●Faire une analogie formelle entre les interactions newtonienne et coulombienne.

IV. Interaction forte

●Expliquer la cohésion du noyau atomique.
●Interpréter la cohésion de la matière :
- à l'échelle du noyau
- à l'échelle des atomes, des molécules et à notre échelle
- à l'échelle astronomique.

MOUVEMENTS DE TRANSLATION (16,5 - 20 heures)

CONTENUS

I. Etude cinématique

-Généralités : repérage d'un mobile (vecteur position, coordonnées cartésiennes, abscisse curviligne), vecteur vitesse, vecteur accélération (accélération normale, accélération tangentielle), lois horaires.
-Mouvement rectiligne uniforme.
-Mouvement rectiligne uniformément varié.

-Mouvement rectiligne sinusoïdal : définition, équation horaire, vitesse, accélération, amplitude, période, fréquence, pulsation et phase.

OBJECTIFS

●Reconnaître un solide en mouvement de translation.
●Représenter les vecteurs position, vitesse et accélération d'un mobile.
●A l'aide de l'expérience, reconnaître chacun des mouvements suivants et être capable d'en écrire l'équation horaire :
- mouvement rectiligne uniforme
- mouvement rectiligne uniformément varié (accéléré ou retardé)
- mouvement rectiligne sinusoïdal.

●Connaissant l'expression d'une grandeur cinématique (x, v ou a) en fonction du temps ainsi que les conditions initiales, retrouver les expressions des deux autres.
●Etablir, pour un mouvement rectiligne uniformément varié, la relation

$$v_2^2 - v_1^2 = 2a(x_2 - x_1).$$

●Caractériser un mouvement rectiligne sinusoïdal par son amplitude X_m et sa période T.
●Etablir la relation entre l'accélération et l'élongation d'un mobile en mouvement rectiligne sinusoïdal.

II. Etude dynamique

-Loi fondamentale de la dynamique (2ème loi de Newton).
-Théorème du centre d'inertie.
Applications :
- Glissement d'un solide sur un plan incliné ;
- Solide isolé ou pseudo isolé.

- Distinguer entre la deuxième loi de Newton et le théorème du centre d'inertie.
- Reconnaître un référentiel galiléen.
- Appliquer la deuxième loi de Newton.
- Appliquer le théorème du centre d'inertie.
- Reconnaître un solide isolé et un solide pseudo-isolé.

III. Energie cinétique

III-1. Energie cinétique d'un solide en translation.
III-2. Variation de l'énergie cinétique : Théorème de l'énergie cinétique.
Application :Détermination d'une force de liaison.

- Calculer l'énergie cinétique d'un solide en mouvement de translation.
- Appliquer le théorème de l'énergie cinétique pour déterminer entre autres la valeur d'une grandeur inaccessible à la mesure (force de frottement, réaction d'un support …).

IV. Mouvements dans les champs

IV-1.Mouvement dans un champ gravitationnel : mouvement d'un projectile.
IV -2. Mouvement dans un champ électrique
-Travail d'une force électrique dans un champ électrique uniforme : notion de différence de potentiel (d.d.p.) électrique
-Accélération d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme.
Application : canon à électrons.
- Déviation d'une particule chargée par un champ électrique uniforme.
Application : déflexion d'un faisceau d'électrons (oscilloscope).
IV-3. Mouvement dans un champ magnétique uniforme
-Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme : force de Lorentz
-Application : spectrographe de masse.

- Appliquer la relation fondamentale de la dynamique au mouvement d'un projectile.
- Calculer le travail d'une force électrique.
- Appliquer l'expression du travail d'une force électrique
- Appliquer la relation fondamentale de la dynamique au mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme.
- Déterminer les caractéristiques de la force de Lorentz.
- Appliquer la relation fondamentale de la dynamique au mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme.

SYSTEMES OPTIQUES ET IMAGES (10 - 11 heures)

OBJECTIFS	CONTENUS
Les lentilles minces 1. Classification (divergentes, convergentes) 2. Définitions : centre optique, axes optiques, foyers, plans focaux, distance focale et vergence 3. Images données par une lentille convergente et une lentille divergente : nature et position, relation de conjugaison, grandissement. 4. Focométrie Applications : œil et microscope.	• Classer les lentilles en lentilles convergentes et lentilles divergentes. • Déterminer graphiquement la position de l'image d'un point objet, donnée par une lentille convergente. • Appliquer la relation de conjugaison des lentilles minces convergentes. • Réaliser des montages permettant de mesurer la distance focale d'une lentille. • Utiliser le modèle réduit de l'œil pour expliquer les défauts de vision. • Expliquer le principe de fonctionnement du microscope.

LES INTERACTIONS DANS L'UNIVERS

Chapitre 1- INTERACTION ELECTRIQUE

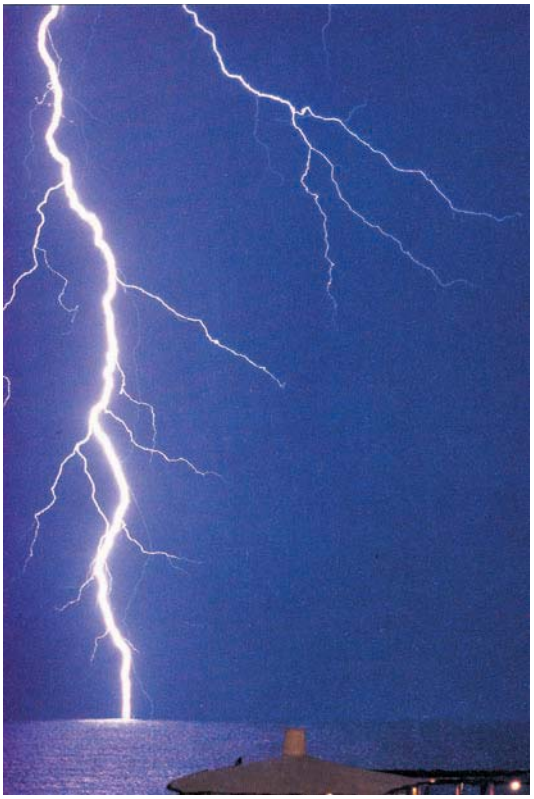
Chapitre 2- INTERACTION MAGNETIQUE

Chapitre 3- INTERACTION GRAVITATIONNELLE

Chapitre 4- INTERACTION FORTE

1 INTERACTION ELECTRIQUE

*En **1660,** le physicien anglais **William Gilbert** retrouve dans certains corps tels que le verre, le copal, le diamant... les propriétés électriques de l'ambre jaune frotté connues depuis **600 ans** avant **J.C**, et propose alors le terme **électricité** (du grec **élektra** qui signifie **ambre**).*



Comment un éclair peut-il se produire entre les nuages et le sol ?

OBJECTIFS

- Appliquer la loi de Coulomb.
- Mettre en évidence expérimentalement l'existence d'un champ électrique créé par une charge ponctuelle.
- Déterminer les caractéristiques d'un vecteur champ électrique.
- Représenter une force électrique.
- Appliquer la relation vectorielle

$$\vec{F} = q\,\vec{E}$$

- Reconnaître, d'après la forme du spectre électrique, le champ électrique créé par une charge ponctuelle, le champ électrique créé par deux charges ponctuelles et le champ électrique uniforme.

INTERACTION ELECTRIQUE

1. Loi de Coulomb

1.1. Charges et interactions électriques

Depuis la haute antiquité, (**600 ans avant Jésus - Christ**) le mathématicien **Thalès**, découvre les phénomènes électriques d'attraction et de répulsion en frottant de l'ambre avec une peau de chat.

On sait aujourd'hui que le frottement entre deux corps s'accompagne d'un transfert d'élecrons faisant apparaître un excès de charges négatives sur l'un (corps électrisé négativement) et un défaut de charges négatives sur l'autre (corps électrisé positivement), et que les deux espèces de charges intéragissent.

Charles Augustin de Coulomb
(1736 - 1806)

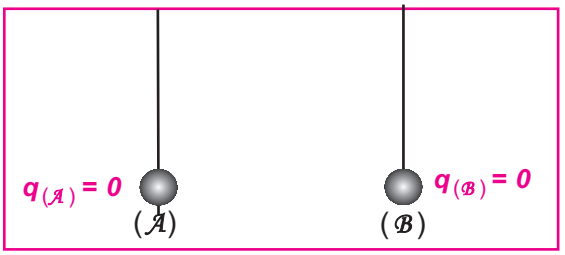
Ingénieur et physicien français.
En **1773**, il est admis à l'académie des sciences.
Son mémoire " **Recherche sur la meilleure manière de fabriquer les aiguilles aimantées** " (**1777**) et l'élaboration d'une théorie des frottements (**1781**) lui valurent les premiers prix de l'académie des sciences.
Il entreprit également des recherches sur la torsion mais il reste surtout connu pour ses travaux sur l'électricité et sur le magnétisme.
Dans sa célèbre série de sept mémoires (**1785 - 1791**), **Coulomb** détermine les lois quantitatives d'attractions électrostatiques et magnétiques.

1.1.1. Etude qualitative de l'interaction électrique

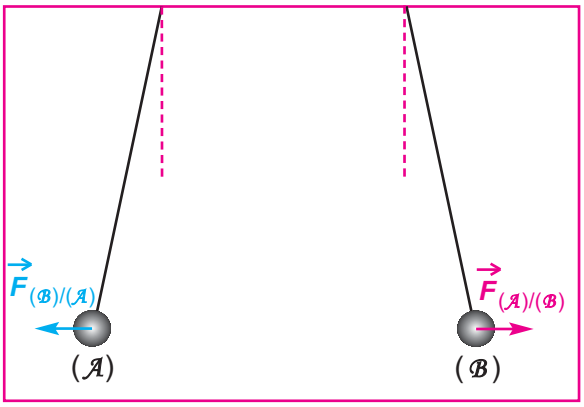
ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE

Electrisons deux sphères métalliques ($\mathcal{A}$) et ($\mathcal{B}$) à l'aide d'un bâton d'ébonite; on observe une répulsion (***Doc.1***).

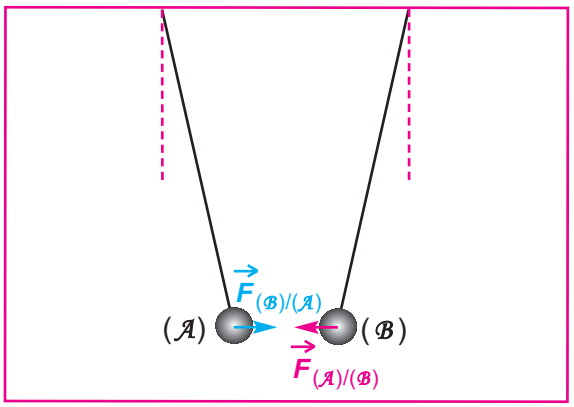
On répète la même opération en utilisant pour ($\mathcal{A}$) un bâton d'ébonite et pour ($\mathcal{B}$) un bâton en verre; on observe une attraction (***Doc.2***).



Les deux boules ne portent pas des charges électriques; les fils restent verticaux.



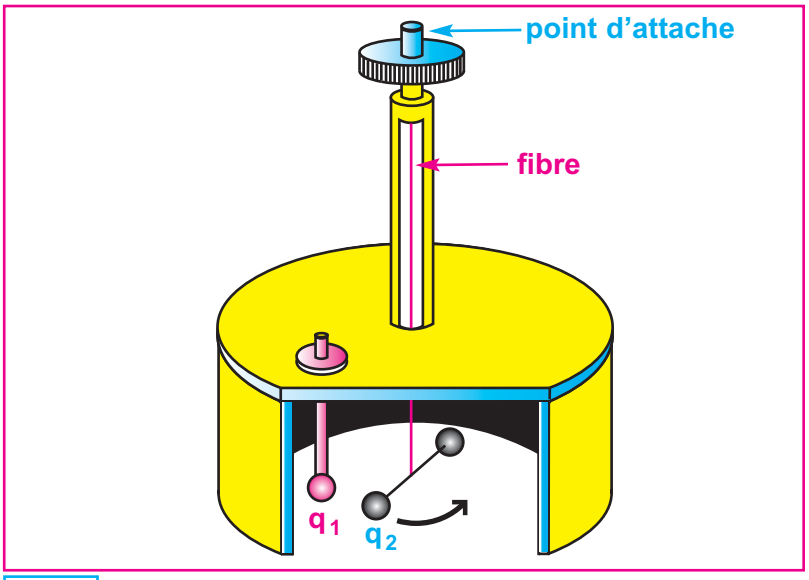
Doc.1 : Les deux boules portent des charges électriques de mêmes signes; l'interaction est répulsive.



Doc.2 : Les deux boules portent des charges électriques de signes contraires ; l'interaction est attractive.

1.1.2. Etude quantitative de l'interaction électrique

Vers **1780**, **Charles de Coulomb** se consacre à l'étude de l'interaction entre deux charges électriques ponctuelles et mesure la valeur de l'intensité commune aux deux forces qui constituent l'interaction électrique avec une balance de torsion; cet outil de travail est le fruit de sa propre conception (***Doc.3***).



Doc.3

Balance de Coulomb

Une sphère fixe de charge q_1 fait face à une sphère de charge q_2 fixée sur une tige mobile attachée en son milieu à une fibre.

La force exercée par la charge q_1 sur la charge q_2 fait pivoter la tige et fait subir une torsion à la fibre.

En mesurant l'angle formé par les deux positions de la tige, on peut déduire l'intensité de la force électrostatique.

Ceci permet à Coulomb de déduire que la valeur de l'intensité commune aux deux forces qui constituent l'interaction électrique est :

- inversement proportionnelle au carré de la distance séparant les deux charges
- proportionnelle au produit des valeurs absolues des deux charges électriques.

1.2 . Enoncé de la loi de Coulomb

Entre deux objets ponctuels ($\mathcal{A}$) et ($\mathcal{B}$), immobiles, portant respectivement les charges électriques $q_{(\mathcal{A})}$ et $q_{(\mathcal{B})}$ et placés respectivement en A et B, s'établit une interaction électrique répulsive si les deux charges sont de même signes (***Doc.1***) et attractive si les deux charges sont de signes contraires (***Doc.2***).

Les éléments de l'interaction sont :

$\vec{F}_{(\mathcal{A})/(\mathcal{B})}$ force exercée par la charge $q_{(\mathcal{A})}$ sur la charge $q_{(\mathcal{B})}$

$\vec{F}_{(\mathcal{B})/(\mathcal{A})}$ force exercée par la charge $q_{(\mathcal{B})}$ sur la charge $q_{(\mathcal{A})}$

Ces deux forces sont portées par la droite (**AB**).

Leur valeur commune est donnée par la formule de Coulomb :

$$\left\|\vec{F}_{(\mathcal{A})/(\mathcal{B})}\right\| = \left\|\vec{F}_{(\mathcal{B})/(\mathcal{A})}\right\| = K\,\frac{|q_{(\mathcal{A})}|\cdot|q_{(\mathcal{B})}|}{AB^2}$$

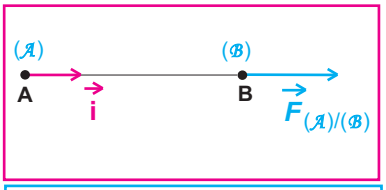
Lorsque les charges sont placées dans le vide, la constante **K** est égale à $\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ où ε_0 est une constante universelle qui porte le nom de **permittivité** (ou **constante diélectrique du vide**).

Sa valeur est : $K = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9.10^9$ **SI**

Dans l'air, **K** a pratiquement la même valeur que dans le vide.

Milieu diélectrique

Quand les charges se trouvent dans un milieu isolant, appelé milieu diélectrique, autre que l'air ou le vide, on remplace ε_0 par $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ où ε est la permittivité (ou constante diélectrique) de l'isolant et ε_r est la permittivité (ou constante diélectrique) relative de l'isolant.



Doc.4 : $q_{(\mathcal{A})}\cdot q_{(\mathcal{B})} > 0$

La force $\vec{F}_{(\mathcal{A})/(\mathcal{B})}$ a même sens que $\vec{i}$

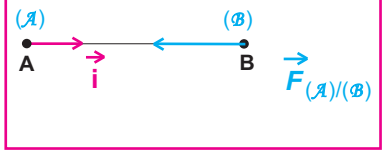
L'interaction est bien répulsive.

1.3 . Expression vectorielle de la loi de Coulomb

Les caractéristiques de la force exercée par l'objet ($\mathcal{A}$) sur l'objet ($\mathcal{B}$) sont décrites par l'expression vectorielle de la loi de Coulomb.

$$\vec{F}_{(\mathcal{A})/(\mathcal{B})} = K\,\frac{q_{(\mathcal{A})}\cdot q_{(\mathcal{B})}}{AB^2}\,\vec{i}$$

où le vecteur unitaire $\vec{i}$, de même direction que la droite (**AB**), est dirigé de **A** vers **B** (***Doc-4** et **5**).*



Doc.5 : $q_{(\mathcal{A})}\cdot q_{(\mathcal{B})} < 0$

La force $\vec{F}_{(\mathcal{A})/(\mathcal{B})}$ a le sens contraire de $\vec{i}$

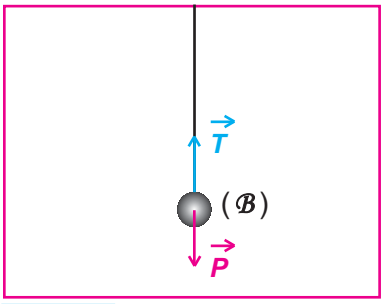
L'interaction est bien attractive.

2. Notion de champ électrique

2.1 . Mise en évidence

Activité Expérimentale

Plaçons dans une région (**R**) de l'espace dépourvue de charges électriques, un pendule électrique dont la boule ($\mathcal{B}$) porte une charge électrique **q** négative. Le fil reste vertical et la boule est en équilibre sous l'action de son poids $\vec{P}$ et de la tension $\vec{T}$ du fil (***Doc-6**).*

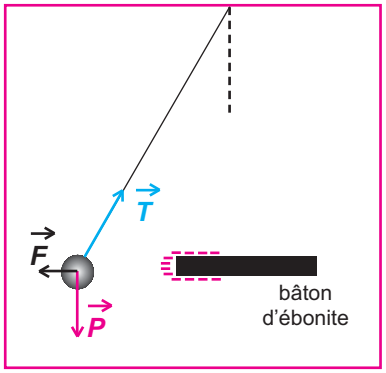


Doc.6

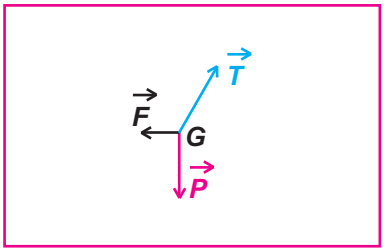
Approchons de ($\mathcal{B}$), l'extrémité frottée d'une baguette en ébonite chargée négativement; on observe une déviation du fil (***Doc-7-a***).

Ceci met en évidence l'existence d'une troisième force $\vec{F}$ d'origine électrique qui agit sur la boule.

Dans le document ***7-b*** on représente les trois forces reportées à partir du centre d'inertie **G** de la boule.



Doc.7-a-



Doc.7-b-

La présence de la charge portée par le bâton d'ébonite a modifié les propriétés électriques de l'espace environnant.

Pour traduire ce changement, on dit que dans la région (**R**) règne un champ électrique.

DÉFINITION

Un champ électrique règne dans une région de l'espace si, dans cette région, un corps électrisé subit une force électrique.

2.2 . Vecteur champ électrique

ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE

Dans l'expérience du document **7**, remplaçons la charge **q** portée par la boule ($\mathcal{B}$) successivement par des charges, toutes négatives : q_1, q_2, q_3 . . . telles que $|q_1| > |q_2| > |q_3|$ . . . ;

on constate que la déviation du fil est de plus en plus importante.

On en déduit que : $\|\vec{F}_1\| > \|\vec{F}_2\| > \|\vec{F}_3\|$

Etude quantitative

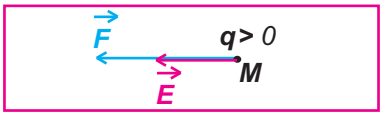
Une étude quantitative appropriée montre que : en un point **M** de la région où règne le champ électrique, le rapport $\frac{\vec{F}}{q}$ est constant

Définition

Le rapport $\frac{\vec{F}}{q}$ noté $\vec{E}(M)$ est le vecteur champ électrique au point **M** ; il est indépendant de la charge placée au point **M**

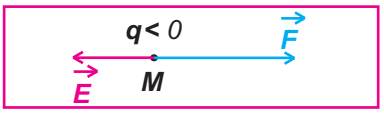
Un point **M** du champ électrique est caractérisé par le vecteur champ électrique $\vec{E}(M)$ tel que :
une charge ponctuelle **q** placée en ce point , subit l'action d'une force électrique $\vec{F} = q \cdot \vec{E}(M)$.

- si **q** est positive, $\vec{F}$ a le même sens que $\vec{E}$ (***Doc-8***).
- si **q** est négative, $\vec{F}$ a le sens contraire de celui de $\vec{E}$ (***Doc-9***).



Doc.8

Dans ces deux documents, $\vec{E}(M)$ est un exemple de champ électrique créé dans la région où se trouve le point **M**. Le sens et la direction ont été choisis de manière arbitraire; mais on verra dans le paragraphe suivant qu'ils sont définis selon les conditions expérimentales où ce champ électrique a été créé.



Doc.9

2.3 . Ligne de champ et spectre électrique

Activité Expérimentale

Dans un liquide isolant (huile de paraffine par exemple) contenu dans un petit cristallisoir, on plonge l'extrémité d'une tige conductrice reliée à l'un des pôles d'une machine électrostatique.

Saupoudrons avec des grains légers (graines de ricin par exemple) la surface libre du liquide et faisons fonctionner la machine .

Les grains s'orientent en se disposant suivant des lignes radiales (***Photo-1***).

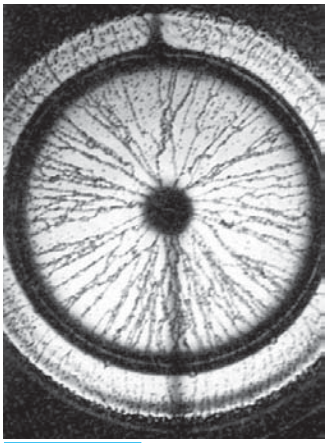


Photo.1

INTERPRÉTATION

Les graines de ricin sont oblongues (de forme ovale) ; lorsqu'on les place dans un champ électrique $\vec{E}$, chacune d'elles acquiert à ses extrémités deux charges **q** = +|**q**| et **q'** = –|**q**| (***Doc-10-a***).

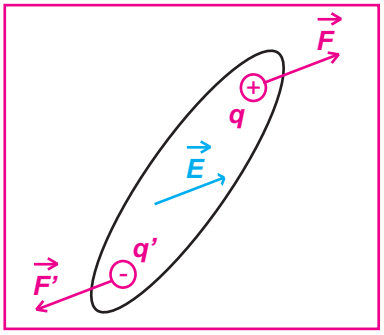
L'action de ce champ électrique sur ces charges se traduit par deux forces électriques $\vec{F}$ et $\vec{F'}$ constituant un couple de forces.

Sous l'effet de ce couple, l'axe du grain s'aligne dans la direction de $\vec{E}$ (***Doc-10-b***).

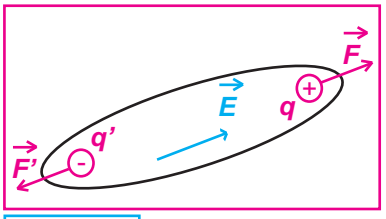
L'ensemble des grains forment des lignes radiales car elles concourent en un même point correspondant à l'extrémité de la tige conductrice (***Doc-10-c***).

Le vecteur champ électrique est tangent à ces lignes en chacun de leurs points.

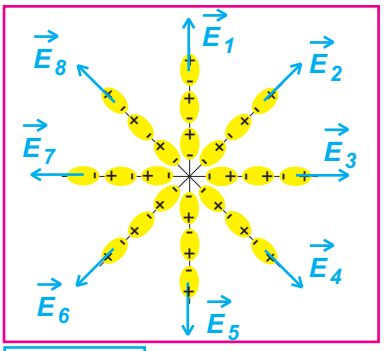
On les appelle des **lignes de champ**.



Doc.10-a



Doc.10-b



Doc.10-c

DÉFINITION

Une ligne qui, en chacun de ses points, est tangente au vecteur champ électrique $\vec{E}$ en ce point, s'appelle **une ligne de champ.**

Elle est orientée dans le sens de $\vec{E}$.

L'ensemble des lignes de champ forme **le spectre électrique.**

3. Champ électrique créé par une charge ponctuelle

3.1 . Vecteur champ électrique

Une charge électrique **Q,** placée en un point **A** d'un espace (***R***), crée un champ électrique caractérisé en chaque point **M** de cet espace par un vecteur champ électrique $\vec{E}(M)$ tel que, une charge électrique témoin **q**, placée en **M**, subit une force

$$\vec{F}_{Q/q} = q.\vec{E}(M)$$

D'après la loi de Coulomb, on peut écrire :

$$\vec{F}_{Q/q} = K \frac{Q \cdot q}{AM^2} \cdot \vec{u}$$

En identifiant les deux expressions précédentes de la force, on déduit l'expression vectorielle du vecteur champ électrique $\vec{E}(M)$ créé par la charge **Q** au point **M** de l'espace champ électrique.

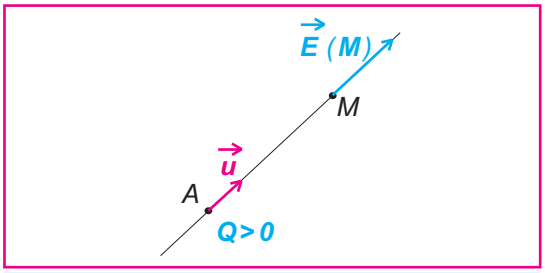
$$\vec{E}(M) = K \frac{Q}{AM^2} \cdot \vec{u}$$

où le vecteur unitaire $\vec{u}$ est porté par la droite (**AM**) et dirigé de **A** vers **M** (***Doc-11-a*** et ***Doc-11-b***).

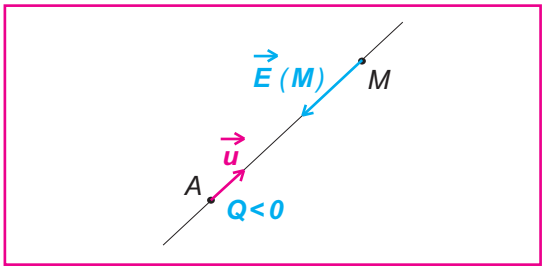
UNITÉS **Q** en coulomb (**C**)

AM en mètre (**m**)

$\|\vec{E}(M)\|$ en $N.C^{-1}$ ou $V.m^{-1}$



Doc.11-a : vecteur champ électrique créé au point **M** par une charge électrique positive **Q**, placée au point **A**; il est centrifuge.



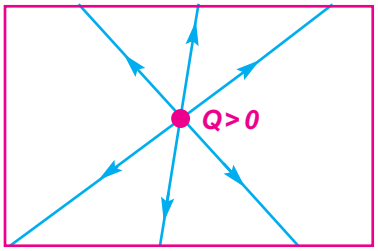
Doc.11-b : vecteur champ électrique créé au point **M** par une charge électrique négative **Q**, placée au point **A**; il est centripète.

3.2 . Spectre électrique

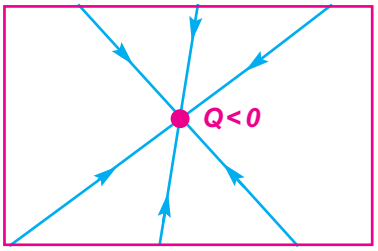
L'expérience permettant la visualisation du spectre électrique d'une charge ponctuelle dans un plan est décrite dans le paragraphe **2.3**.

Retenons que les lignes de champ associées au champ électrique créé par une charge ponctuelle **Q** sont des droites issues de point **O**, emplacement de **Q**, et dirigées dans toutes les directions de l'espace. Elles sont orientées vers :

- **l'extérieur** (champ **centrifuge**) si **Q** est positive (***Doc-12-a***)
- **l'intérieur** (champ **centripète**) si **Q** est négative (***Doc-12-b***).



Doc.12-a



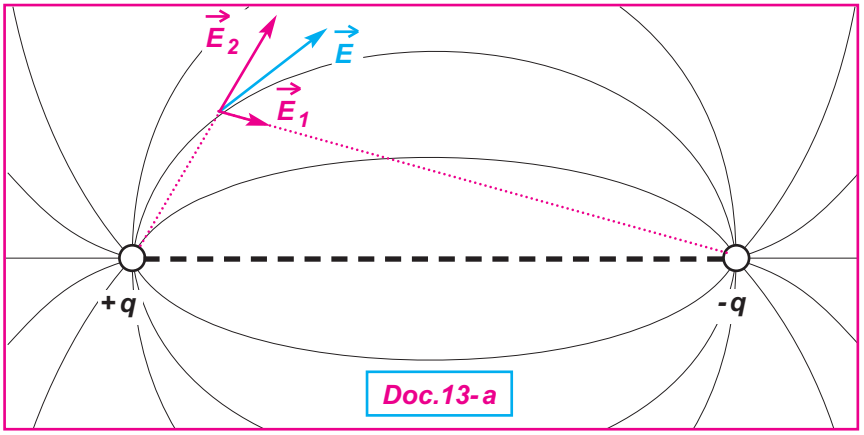
Doc.12-b

4. Champ électrique créé par deux charges ponctuelles

4.1 . Spectre électrique

Le spectre électrique de deux charges ponctuelles est visualisé à l'aide de grains légers saupoudrés à la surface d'un liquide isolant où plongent deux pointes métalliques reliées à une machine électrostatique.

Lorsque les deux pointes sont reliées aux deux bornes de la machine électrostatique, on obtient le spectre électrique de la photo ***2*** qui est schématisé dans le document ***13-a***.



Doc.13-a

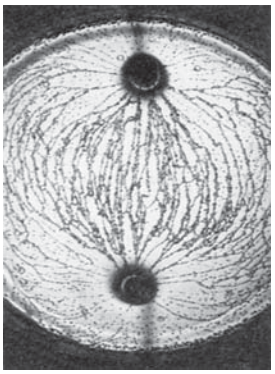
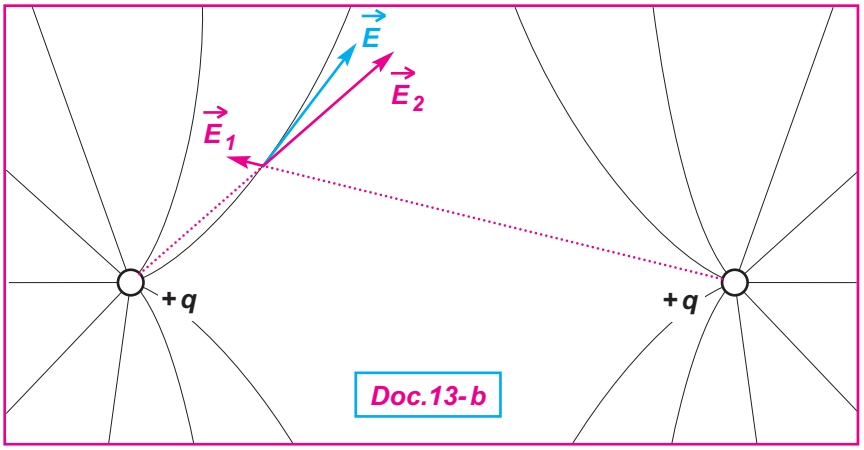


Photo.2

Par contre si les deux pointes sont toutes deux reliées à une même borne, on obtient le spectre électrique de la photo ***3*** qui est schématisé dans le document ***13-b***.



Doc.13-b

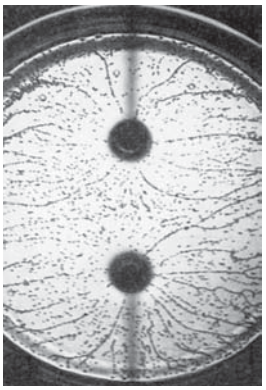


Photo.3

4.2 . Vecteur champ électrique

Deux charges ponctuelles Q_A et Q_B sont placées respectivement en deux points **A** et **B**.

En un point **P**, autre que **A** et **B**, existent simultanément le champ $\vec{E}_1$ créé par Q_A , et le champ $\vec{E}_2$ créé par Q_B.

Placée en **P**, une charge témoin **q** est soumise simultanément à deux forces $\vec{F}_1 = q\,\vec{E}_1$ et $\vec{F}_2 = q\,\vec{E}_2$, soit à une force résultante $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = q\,(\vec{E}_1 + \vec{E}_2) = q\,\vec{E}$

La superposition en **P** de deux champs $\vec{E}_1$ et $\vec{E}_2$ conduit à un champ résultant $\vec{E}$ tel que $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$

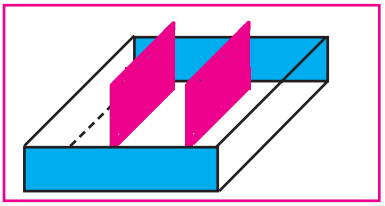
EXEMPLE : documents ***13-a*** *et* ***13-b***.

5. Champ électrique uniforme

Activité expérimentale

Matériel

- une cuve à fond transparent
- deux plaques rectangulaires en cuivre disposées dans la cuve, l'une face à l'autre, et distantes de **3cm.**
- un générateur de tension continue réglable et permettant d'obtenir quelques **kilovolts** (compte tenu du danger qu'il présente, ce matériel doit être manipulé uniquement par le professeur).
- 4 fils électrique de connexion
- 2 pinces crocodiles
- huile de paraffine
- de la semoule.



Doc.14

Protocole expérimental

On relie les deux plaques de cuivre, préalablement placées dans la cuve contenant de l'huile de paraffine, aux pôles (**+**) et (**–**) du générateur entre lesquels on maintient une tension de quelques **kilovolts** (***Doc-14***).

On saupoudre la surface de l'huile de paraffine avec les grains de semoule, ces derniers s'orientent en se disposant suivant des droites perpendiculaires aux plaques (***Photo-4***).

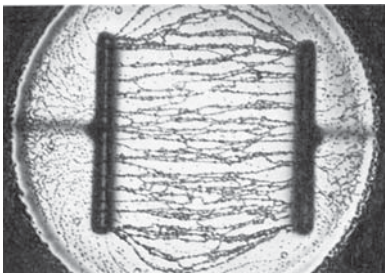
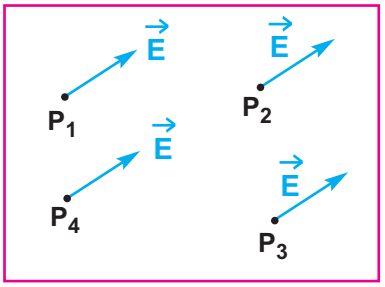


Photo.4

Conclusion

- On constate qu'entre les deux plaques règne un champ électrique uniforme $\vec{E}$.
- Les droites dessinées par les grains de semoule matérialisent les lignes de champ électrique associées à $\vec{E}$; elles correspondent à des droites parallèles.



Doc.15 : le vecteur champ électrique uniforme $\vec{E}$ a une direction, un sens et une valeur inchangées d'un point à l'autre de la région dans laquelle il règne.

Définition

Dans un espace règne un champ électrique uniforme si, en tout point de cet espace, le vecteur champ électrique est constant (***Doc-15***).

EXERCICE RÉSOLU N°1

ENONCÉ :

On considère une région de l'espace où règne un champ électrique créé par deux charges ponctuelles $q_1 = -3\ \mu C$ et $q_2 = 1\ \mu C$, placées respectivement aux sommets **A** et **C** d'un triangle **ABC**, rectangle en **C**.

On donne : **AB = 10 cm**, **BC = 5 cm** et $\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9.10^9$ **SI**

1 - Représenter, à l'échelle, les vecteurs $\vec{E}_1$ et $\vec{E}_2$ associés aux champs électriques créés respectivement par les charges q_1 et q_2 au point **B** après avoir déterminé leurs valeurs.

2 - Déterminer les caractéristiques du vecteur champ électrique $\vec{E}$ résultant en **B**.

SOLUTION

1 - Représentation des vecteurs champ électrique

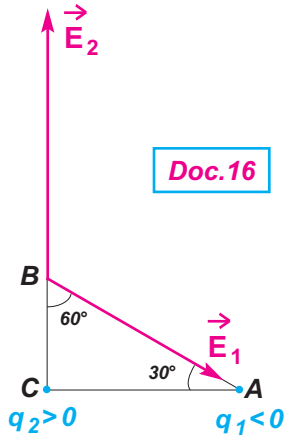
L'expression de la valeur de chacun des deux vecteurs champ électrique est donnée par la loi de Coulomb :

$$\|\vec{E}_1\| = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{|q_1|}{AB^2} \qquad \boxed{\|\vec{E}_1\| = 2,7.10^6\ V.m^{-1}}$$

$$\|\vec{E}_2\| = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{|q_2|}{BC^2} \qquad \boxed{\|\vec{E}_2\| = 3,6\ 10^6\ V.m^{-1}}$$

La représentation des vecteurs champ électrique est effectuée dans le document **16**.

Echelle :
1 cm pour 10^6 **V.m^{-1}**



2 - Caractéristiques du vecteur résultant

Le vecteur champ électrique $\vec{E}$ au point **B** est égal à la somme vectorielle des deux vecteurs champs électriques (***Doc-17***)

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

Dans le répère (**Bx**, **By**), on peut écrire :

$$E_x = E_{1x} + E_{2x} = \|\vec{E}_1\| \cos\alpha$$

$$(\overrightarrow{BC}, \overrightarrow{BA}) = \frac{\pi}{2} - \alpha$$

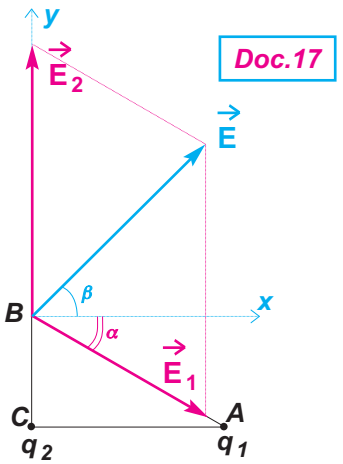
$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = \frac{BC}{AB} = \frac{5}{10} = 0,5 \Longrightarrow \text{d'où } 90° - \alpha = 60° \Longrightarrow \boxed{\alpha = 30°}$$

d'où $E_x = \|\vec{E}_1\| \cos(30°)$ $\qquad \boxed{E_x = 2,32.10^6\ V.m^{-1}}$

$$E_y = E_{1y} + E_{2y} = -\|\vec{E}_1\| \sin\alpha + \|\vec{E}_2\|$$

$$E_y = -2,7.10^6.\sin(30°) + 3,6.10^6 \Longrightarrow \boxed{E_y = 2,25.10^6\ V.m^{-1}}$$

Les vecteurs ne sont pas colinéaires, leur somme nécessite l'utilisation de coordonnées dans le repère (**Bx**, **By**).



Les caractéristiques du vecteur champ électrique $\vec{E}$ sont :

direction : $\vec{E}$ fait un angle β avec $\overrightarrow{Bx}$ tel que **tgβ** = $\dfrac{\|\vec{E}_y\|}{\|\vec{E}_x\|}$

sens : pointé vers le haut

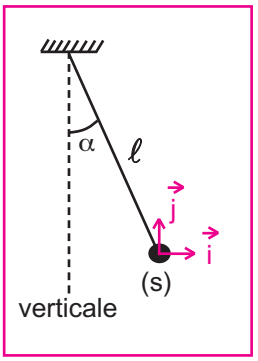
valeur : $\|\vec{E}\| = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$

Application numérique : $\beta = 44°$; $\|\vec{E}\| = 3{,}23.10^6\ V.m^{-1}$

EXERCICE RÉSOLU N°2

ENONCÉ :

Une sphère (**S**) assimilable à un corps ponctuel est attachée à un fil de longueur ℓ inextensible et de masse négligeable.
La sphère de masse **m** porte une charge **q** négative.
L'ensemble {**fil** , (**S**)} constitue un pendule électrique.
Placé dans une région ou régne un champ électrique uniforme $\vec{E}$ horizontal, le fil occupe une position d'équilibre inclinée d'un angle α par rapport à la verticale et la sphère occupe la position **O origine** du repère d'espace (**O**, $\vec{i}$, $\vec{j}$) (**Doc.18**).



Doc.18

1 -a- Préciser toutes les forces qui s'exercent sur (**S**) et représenter les vecteurs force associés à partir de l'origine **O**.

-b- Déterminer le sens du vecteur champ électrique uniforme $\vec{E}$.

2 -a- Appliquer la condition d'équilibre au système {(**S**)} et écrire la relation entre les vecteurs force.
Effectuer les projections de cette relation sur les axes (**O**, $\vec{i}$) et (**O**, $\vec{j}$).

-b- En déduire l'expression littérale de $\|\vec{E}\|$ puis celle de la norme de la tension $\vec{T}$ du fil.
Calculerla valeur de $\vec{E}$ et celle de $\vec{T}$

Données : **m = 2,5 g**; **q = - 0,5 µC**; α = **10°** et $\|\vec{g}\|$ = **9,8 N.kg^{-1}**.

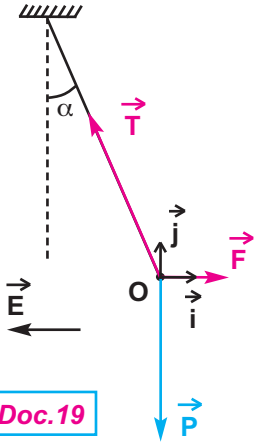
SOLUTION

1 -a- Forces s'exerçant sur la sphère (S)

$\vec{P} = m.\vec{g}$: poids de (**S**)

$\vec{T}$: tension du fil

$\vec{F} = q.\vec{E}$: force électrique (**Doc.19**).



Doc.19

-b- Sens du champ électrique uniforme $\vec{E}$

$\vec{F} = q.\vec{E}$; comme **q < 0** , $\vec{E}$ est de sens contraire à $\vec{F}$.

2 -a- Application de la condition d'équilibre

Système : {(**S**)}.
Référentiel terrestre.
La condition d'équilibre permet d'écrire :

$\vec{P} + \vec{F} + \vec{T} = \vec{0}$

Projection sur (**O**,$\vec{i}$) :

$-\|\vec{T}\| \sin\alpha + \|\vec{F}\| = 0$ (**1**)

Projection sur (**O**, $\vec{j}$) :

$-m\|\vec{g}\| + \|\vec{T}\| \cos\alpha = 0$ (**2**)

- b - Détermination des expressions littérales de $\|\vec{T}\|$ et $\|\vec{E}\|$

(**1**) et (**2**) permettent d'ècrire :

$\|\vec{F}\| = \|\vec{T}\| \sin\alpha$ (**1'**)

$m\|\vec{g}\| = \|\vec{T}\| \cos\alpha$ (**2'**)

$$\frac{(1')}{(2')} \Longrightarrow \quad tg\,\alpha = \frac{\|\vec{F}\|}{m\,\|\vec{g}\|}$$

$$\|\vec{F}\| = m\,\|\vec{g}\|\,tg\,\alpha$$

$$|q|\,\|\vec{E}\| = m\,\|\vec{g}\|\,tg\,\alpha$$

d'où $$\boxed{\|\vec{E}\| = \frac{m\,\|\vec{g}\|\,tg\,\alpha}{|q|}}$$

$$(2') \Longrightarrow \quad \boxed{\|\vec{T}\| = \frac{m\,\|\vec{g}\|}{\cos\alpha}}$$

A.N :

$$\|\vec{E}\| = \frac{2{,}5.10^{-3}\,.\,9{,}8\,.\,tg(10^\circ)}{0{,}5.10^{-6}} \qquad \boxed{\|\vec{E}\| = 8640\ N.C^{-1}}$$

$$\|\vec{T}\| = \frac{2{,}5.10^{-3}\,.\,9{,}8}{\cos(10^\circ)} \qquad \boxed{\|\vec{T}\| = 0{,}025\ N}$$

L'ESSENTIEL

Loi de Coulomb

Entre deux objets ponctuels ($\mathcal{A}$) et ($\mathcal{B}$), immobiles, portant respectivement les charges électriques $q_{(\mathcal{A})}$ et $q_{(\mathcal{B})}$ et placés respectivement en A et B , s'établit une interaction électrique répulsive si les deux charges sont de même signes et attractive si les deux charges sont de signes contraires.

La valeur commune aux deux forces qui constituent l'interaction est donnée par la formule de Coulomb :

$$\left\|\vec{F}_{(\mathcal{A})/(\mathcal{B})}\right\| = \left\|\vec{F}_{(\mathcal{B})/(\mathcal{A})}\right\| = K\,\frac{|q_{(\mathcal{A})}|\cdot|q_{(\mathcal{B})}|}{AB^2}$$

Dans le vide : $K = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9.10^9$ SI

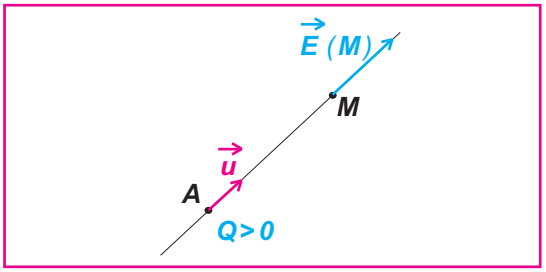
Champ électrique

Dans une zone de l'espace où règne un champ électrique, chaque point est caractérisé par un vecteur champ électrique.

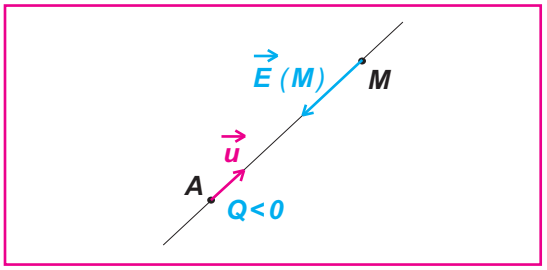
Une charge **q**, placée en un point **M** du champ électrique où le vecteur champ électrique est $\vec{E}(M)$, subit une force électrique $\vec{F} = q\,\vec{E}(M)$.

Champ électrique créé par une charge ponctuelle Q placée en un point A

$$\vec{E}(M) = K\,\frac{Q}{AM^2}\cdot\vec{u}$$



Vecteur champ électrique créé au point **M** par une charge électrique positive **Q,** placée au point **A** ; il est centrifuge.



Vecteur champ électrique créé au point **M** par une charge électrique négative **Q,** placée au point **A** ; il est centripète.

Spectre électrique et lignes de champ

- **Une ligne de champ** est une ligne en tout point de laquelle, le vecteur champ électrique lui est tangent ; elle est orientée dans le même sens que le vecteur champ électrique.
- L'ensemble des lignes de champ forme **le spectre électrique** .

Champ électrique uniforme

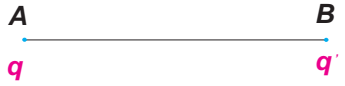
Un champ électrique est dit **uniforme** si le vecteur champ $\vec{E}$ est constant en tout point où règne ce champ.

EXERCICES

Je vérifie mes connaissances

Choisir la (oules) proposition(s) correcte(s)

1- Deux charges ponctuelles **q** et **q'** placées en deux points **A** et **B**, sont soumises uniquement à l'effet de l'interaction électrique qui règne entre elles.



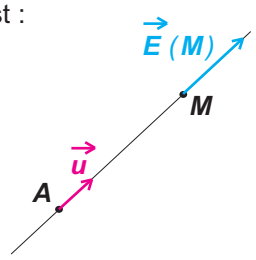
a - La force électrique qui s'exerce sur **q** et le vecteur champ électrique créé par **q'** en **A** ont toujours la même direction.

b - La force électrique qui s'exerce sur **q** et le vecteur champ électrique créé par **q'** en **A** ont toujours le même sens.

c - Les deux forces qui constituent l'interaction électrique sont de même valeur si **q** et **q'** ont même signe.

2- Le champ électrique créé par la charge électrique **Q** en ***M*** est :

$$\vec{E}(M) = K\,\frac{Q}{AM^2}\,\vec{u}$$



Dans cette expression :

a - **Q** est la charge électrique placée en **A**.

b - Il faut placer un signe (**-**) devant **K** si **Q** est négative.

c - Le vecteur unitaire change de sens si **Q** change de signe.

d - Le champ électrique peut être centripète.

3- La valeur du vecteur champ électrique s'exprime en :

a - $N\,.\,kg^{-1}$

b - $N\,.\,C$

c - $V\,.\,m^{-1}$

4- Deux charges électriques opposées **q** et **- q** sont placées respectivement en **A** et **B** symétriques par rapport à **O**. Le champ résultant en **O** :

a - est nul.

b - a la direction de (**AB**) et se dirige de **A** vers **B**.

c - a une valeur absolue double de celle du champ électrique créé par **q** en **O**.

5- Dans la région limitée par deux plaques conductrices planes et parallèles reliées aux bornes d'un générateur

a - les lignes de champ sont parallèles aux plaques.

b - la valeur du vecteur champ électrique est constante.

c - la valeur du vecteur champ électrique est plus grande au voisinage des plaques.

J'applique mes connaissances et je raisonne

Ex-1- Deux charges ponctuelles $q_1 = 10\ nC$ et $q_2 = 40\ nC$ sont placées respectivement en deux points **A** et **B** distants de **a** = **30 cm**.

1 - Déterminer les caractéristiques du vecteur champ électrique au milieu **O** du segment **AB**.

2 - Il existe sur la ligne joignant les deux points **A** et **B** , un point **M** où les deux champs électriques se compensent.

a - Indiquer, sur la droite (**AB**) , s'il est plus proche de **A** ou de **B**.

b - Calculer la distance **AM**.

Ex-2- Deux charges électriques ponctuelles de valeurs respectives $q_A = +5\ \mu C$ et $q_B = -7\ \mu C$ sont placées dans le vide, respectivement en deux points **A** et **B**, distants de **10 cm**.

1 - Déterminer les caractéristiques :

a - de la force électrique exercée par la charge q_B sur la charge q_A.

b - de la force électrique exercée par la charge q_A sur la charge q_B.

2 - Comparer ces deux forces électriques.

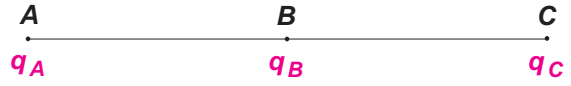
Ex-3- Dans le vide, trois charges ponctuelles q_A, q_B et q_C, sont placées respectivement en trois points **A**, **B** et **C** tels que **B** est le milieu de **AC** de longueur **20 cm**
Les charges ont pour valeur : q_A = **10 µC**, q_B = - **6 µC** et q_C = **24 µC** .

1 - Déterminer les caractéristiques :

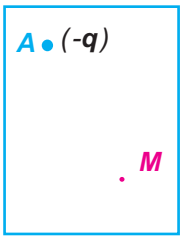
a - de la force électrique exercée par la charge q_B sur la charge q_A.

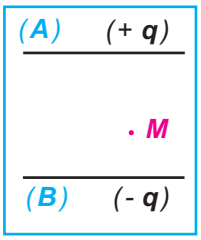
b - de la force électrique exercée par la charge q_C sur la charge q_A.

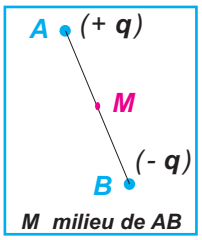
2 - Déterminer les caractéristiques de la force électrique résultante s'exercant sur q_A.

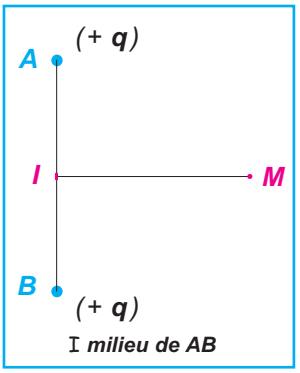


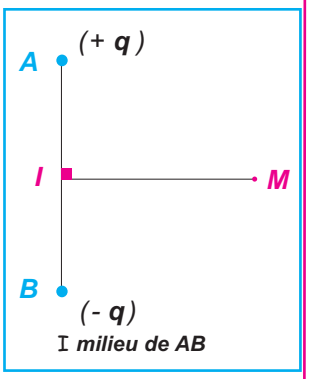
Ex-4- Dans les schémas suivants, représenter le vecteur champ électrique total en M sachant que toutes les charges ont même valeur absolue.











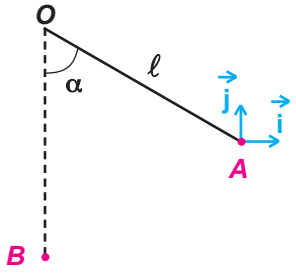
EX-5- On considère un pendule électrique formé d'un fil isolant inextensible de longueur ℓ = **0,2 m** et de masse négligeable, et d'un corps ponctuel (**A**) de masse **m** = **1 g** et portant une charge q_A.
Le pendule électrique étant à l'équilibre dans la position verticale, on approche un objet ponctuel (**B**) portant une charge q_B; le pendule électrique se maintient dans une nouvelle position d'équilibre faisant un angle α = **60°** avec la verticale lorsque (**B**) prend la position initialement occupée par (**A**).

1 - Les charges q_A et q_B sont-elles de mêmes signes ou de signes contraires ?

2 - Déterminer les caractéristiques de la force électrique $\vec{F}$ qui s'exerce sur (**A**) dans sa position finale.
on prendra $\|\vec{g}\|$ = **9,8 N.kg^{-1}**

3 - Sachant que q_B = **+ 2µC** , donner les caractéristiques du vecteur champ électrique $\vec{E}_A$ créé par la charge q_B au point où se trouve (**A**) dans sa position finale.

4 - En déduire la valeur absolue de la charge q_A.

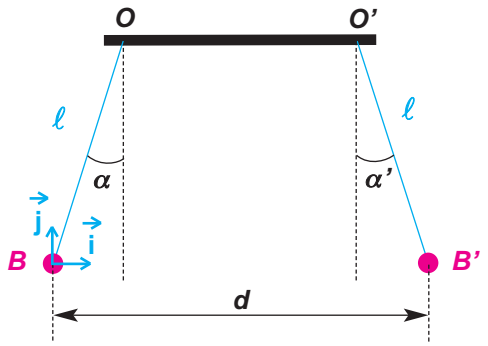


Ex-6- Le schéma ci-dessous correspond à deux pendules électriques.
Les deux boules (**B**) et (**B'**) de même masse **m** = **0**,**3 g** et supposées être deux corps ponctuels, portent respectivement une charge **q** = + **100 nC** et une charge **q'** de valeur absolue égale à **20 nC**.
A l'équilibre, les deux pendules font les angle α et α' avec la verticale tels que les deux boules soient distantes de **d** = **10 cm** .

1 - Quel est le signe de la charge **q'** ?

2 - La boule (**B'**) présente-t-elle un excès ou un défaut d'électrons ? En déterminer le nombre.

3 - Comparer, en le justifiant, α et α'.



Ex-7- Etude d'un texte scientifique : Une balance pour l'électricité

En juin 1785 , Coulomb lit son Mémoire devant ses collègues académiciens……
"Je mets aujourd'hui sous les yeux de l'Académie une balance électrique […]. Elle mesure avec la plus grande exactitude l'état et la force électrique d'un corps, quelque faible que soit le degré d'électricité"

Pour trouver la loi sur les interactions électriques, Coulomb utilisa une balance particulière appelée balance de torsion qu'il décrivit dans un mémoire publié en 1785 sous le titre *Construction et usage d'une balance électrique, fondée sur la propriété qu'ont les fils de métal d'avoir une force de réaction de torsion proportionnelle à l'angle de torsion*. Le sous-titre était : *Détermination expérimentale de la loi suivant laquelle les éléments des corps électrisés du même genre d'électricité se repoussent mutuellement.*

La balance est constituée d'un fil d'argent très mince et très fragile suspendu à son extrémité supérieure à une vis micrométrique. À l'extrémité inférieure du fil est attachée en son milieu une tige suffisamment légère pour ne pas le rompre et suffisamment lourde pour le tendre. A un bout de la tige, une boule de sureau ; à l'autre, un disque de papier faisant contrepoids et amortissant les oscillations. Au repos, la première boule est au contact d'une seconde, fixe. On charge cette dernière.
Aussitôt, la boule est repoussée, tordant le fil. On peut alors mesurer un angle. De l'angle à la force, le passage se fait par les lois de la torsion, que Coulomb lui-même vient d'établir.

Les Cahiers de Science et Vie (Hors série N° 26 Avril 95).

1- Faire un schéma de la balance utilisée par Coulomb.
2- La force est-elle mesurée directement ?
3- Que peut-on dire des charges électriques des deux boules ? Pour quel type d'interaction électrique Coulomb a-t-il établi sa loi ?
4-Dans une des remarques faites suite à cette expérience, Coulomb note que la distance des deux balles n'est pas précisément mesurée par l'angle mais par la corde de l'arc joignant leurs centres. Toutefois, les angles étant petits, il tient pour légitime d'évaluer les distances à partir des seules données angulaires.
Compléter alors l'énoncé de Coulomb : " *La force répulsive de deux petits globes électrisés de la même nature d'électricité est en raison inverse……du centre des deux globes.* "

POUR EN SAVOIR PLUS

LA FOUDRE

Depuis des temps immémoriaux, l'homme est fasciné et même terrorisé par la foudre, souvent associée à la colère divine. Nous commençons à en comprendre aujourd'hui le mécanisme qui fait l'objet de nombreuses recherches dans les laboratoires industriels.

La foudre, qui frappe en moyenne trente fois par seconde de par le monde, consiste en une série de décharges électriques entre un nuage et le sol (***Photo.5***).

Photo.5 *: coup de foudre descendant*

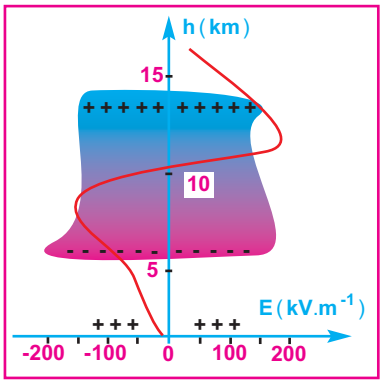
. *Les nuages orageux*

Les nuages orageux sont en général du type cumulo-nimbus. Ils ont la forme d'une enclume dont la hauteur peut atteindre **10 000 m** et dont la base se situe à une altitude de quelques kilomètres.

Ils sont constitués de gouttes d'eau dans la partie inférieure et de particules de glace dans la partie supérieure.

La partie haute du nuage est chargée positivement et la partie basse négativement (avec parfois un petit îlot de charges positives).

Le sol en regard se trouve alors chargé positivemen (***Doc.20***).



Doc.20 *:* Variation, en fonction de l'altitude de la composante verticale, du champ électrique, enregistrée par un ballon sonde.

. *Coup de foudre descendant négatif*

(***Photo.5*** et ***Doc.21-a, b*** *et* ***c***)

C'est le cas le plus fréquent. Lorsque le champ électrique au voisinage de la base du nuage, chargée négativement, atteint **30 kV.cm^{-1}**, l'air est ionisé et devient conducteur.

La première phase du coup de foudre est toujours la formation d'une prédécharge peu lumineuse, appelée traceur (ou pré-curseur). Elle a pour origine la base du nuage; elle progresse ensuite vers le sol par bonds successifs de quelques dizaines de mètres, avec des temps d'arrêt entre chaque bond de **40 µs** à **100 µs**. Elle comporte de nombreuses ramifications (***Doc.21-a***).

Le traceur descendant transporte des charges négatives et son extrémité se trouve au même potentiel électrique que la base du nuage dont il est issu.

Il naît alors un traceur ascendant partant du sol (en général d'un point proéminent) et transportant des charges positives (***Doc.21-b***)

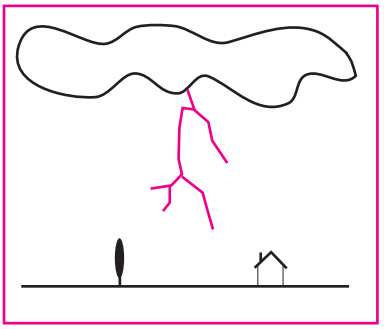
Lorsque le traceur ascendant rencontre le traceur descendant, les charges se neutralisent.

Nous observons alors un trait lumineux intense qui progresse du sol vers le nuage (arc en retour). La chaleur produite par cet éclair provoque une dilatation brusque de l'air, à l'origine du tonnerre (***Doc.21-c***).

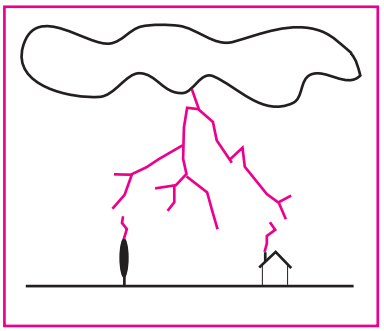
Le courant dans le canal ionisé de quelques centimètres de diamètre, peut atteindre des valeurs de **10 000 A** et transporter une quantité d'électricité de **20 C**.

Après quelques centièmes de seconde, quand l'arc en retour a disparu, un autre traceur descend du nuage empruntant le même canal.

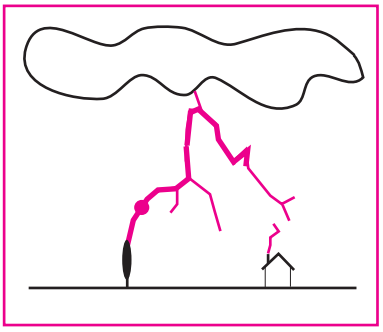
En général, un coup de foudre complet dure de **0,2 s** à **2 s** et comporte en moyenne **4 arcs** en retour par le même chemin.



Doc.21-a *:* descente du traceur par bonds.



Doc.21-b *:* initiation des traceurs ascendants.



Doc.21-c *:* rencontre entre un traceur ascendant et un traceur descendant par bonds, puis écoulement du courant d'arc en retour.

▪ *Coup de foudre ascendant* (***Photo.6***)

Lorsque le sol comporte des points très élevés (tours, sommets montagneux), il se produit parfois une décharge ascendante : un traceur part du sol, transporte des charges positives et atteint le nuage. Il en résulte une impulsion de courant d'amplitude excédant parfois **20 000 A**.

Cette valeur de crête étant atteinte en un temps de l'ordre de la microseconde, l'intensité décroît ensuite plus lentement avec une durée de l'ordre de la centaine de microsecondes.

Les coups de foudre ascendants, dont la puissance est plus grande que celle des coups de foudre descendants, peuvent provoquer des dégâts plus importants.

Pour éviter d'être foudroyé

Il faut :

- se tenir à distance des structures métalliques (poteaux, lignes électriques, rails...)
- lorsque l'on est en groupe, se tenir au moins à **10 m** les uns des autres
- s'éloigner des espaces plats et dégagés et des arbres hauts ou isolés
- se réfugier, si on peut, dans une voiture qui, si elle est en métal constitue une "cage de Faraday", assurant une protection efficace
- en rase campagne s'accroupir ou se rouler en boule pour offrir le moins de surface possible
- en montagne, quitter les sommets et les cols; s'éloigner des failles et s'abriter sous un ressaut convenable
- dans une maison, éviter pendant un orage de téléphoner, toucher des conduites d'eau, de prendre un bain, d'utiliser des appareils électrodomestiques.

Extrait de : ***Vigilance, n °104, magazine du Service de Prévention Sécurité de EDF-GDF.***

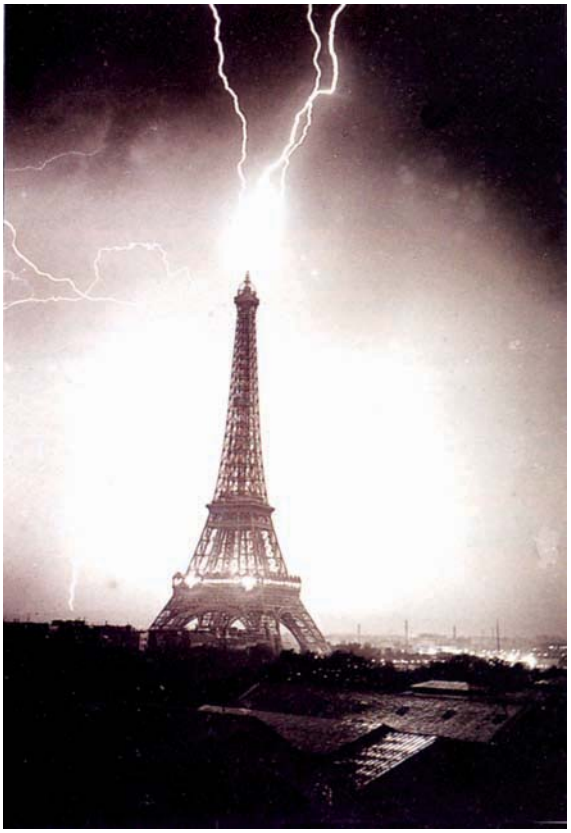


Photo.6 *:* coup de foudre ascendant issu de la Tour Eiffel au cours de l'orage du 3 Juin 1902.

http://www-physique.u-strasbg.fr/~udp/articles/wimshurst/wimshurst.htm#experiences
http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/electri/menuelec.html
http://sys12.cs.jmu.edu/wwwhomes/gaoyx/ChargeAction1.htm
http://www.bibliotheque.polytechnique.fr/bibliotheque/BioCoulomb.html
http://www.uel.education.fr/consultation/reference/physique/elecstat/observer/coulomb/coulomb.htm
http://www.edumedia-sciences.com/fr/a120-loi-de-coulomb

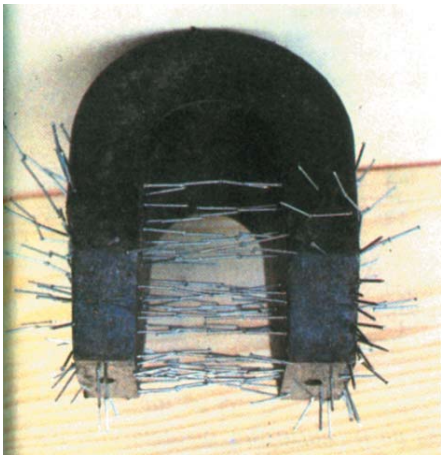
2 INTERACTION MAGNÉTIQUE

*Les aimants sont connus depuis l''Antiquité sous le nom de "**magnétite**", pierre trouvée à proximité de la ville de **Magnesia** (Turquie).*

*C'est du nom de cette pierre que provient le nom actuel de **champ magnétique**.*

Les chinois furent les premiers à utiliser les propriétés des aimants, il y a plus de 1000 ans, pour faire des boussoles.

Elles étaient constituées d'une aiguille de magnétite posée sur de la paille flottant sur de l'eau contenue dans un récipient gradué.

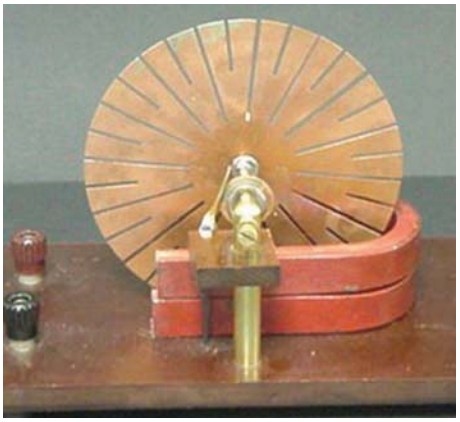


Champ magnétique créé par un aimant en U; les lignes de champ sont matérialisées par les clous.

OBJECTIFS

- Mettre en évidence expérimentalement une interaction magnétique.
- Mettre en évidence expérimentalement l'existence d'un champ magnétique.
- Reconnaître un champ magnétique uniforme à partir de la forme de son spectre.
- Déterminer les caractéristiques d'un vecteur champ magnétique.
- Utiliser un teslamètre.
- Mettre en évidence expérimentalement la force de Laplace.
- Déterminer les caractéristiques de la force de Laplace.
- Expliquer le fonctionnement d'un moteur à courant continu.

L'aurore boréale.



La roue de Barlow est l'ancêtre des moteurs électriques.

INTERACTION MAGNÉTIQUE - CHAMP MAGNÉTIQUE

1.Les différents types d'interaction magnétique

1.1. Interactions entre aimants

Propriété des aimants

Les aimants naturels sont connus depuis l'antiquité. Ils proviennent d'un minerai de fer appelé magnétite (**Fe_3O_4**). Ils ont la propriété d'attirer la limaille de fer en certaines zones appelées **pôles** (***Photo.1***).

Cette propriété se manifeste également avec les aimants artificiels : aimant droit et aimant en **U** (***Photo.2***).

Un aimant attire la limaille de fer au voisinage des pôles

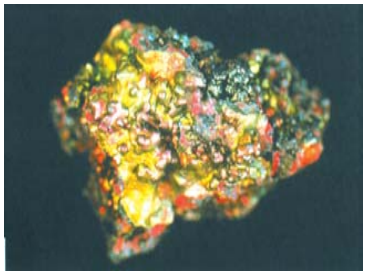


Photo.1 : magnétite

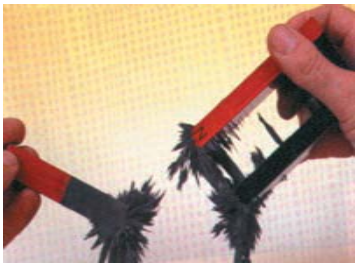


Photo.2 : limaille de fer attirée par les deux pôles d'un aimant en **U** et d'un barreau aimanté.

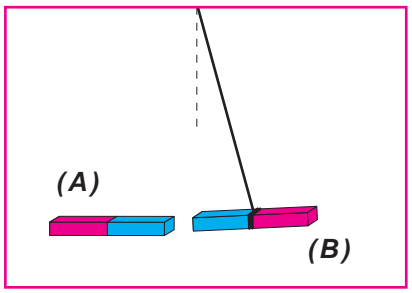
Pôles d'un aimant

Activité Expérimentale

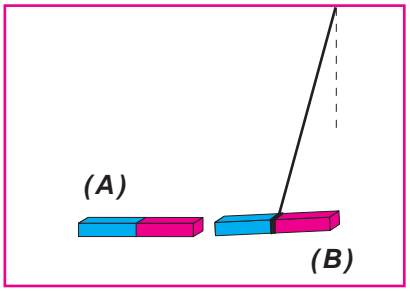
Approchons successivement du même pôle d'un aimant droit (**B**) suspendu à un fil sans torsion :

a- l'un des pôles d'un aimant droit (**A**) ; on observe une répulsion (***Doc.1-a***).

b- l'autre pôle de l'aimant droit (**A**) ; on observe une attraction (***Doc.1-b***).



Doc.1-a : les deux pôles de mêmes couleurs se repoussent



Doc.1-b : les deux pôles de couleurs différentes s'attirent

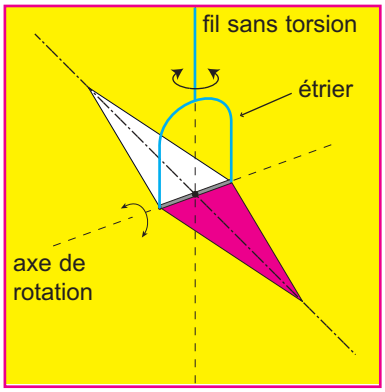
Conclusions

- Les deux pôles d'un aimant sont différents.
- Un aimant posséde un pôle nord et un pôle sud peints de couleurs différentes.
- Deux pôles de même nom se repoussent; et deux pôles de noms différents s'attirent.

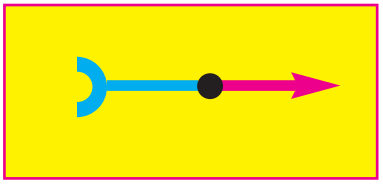
Aiguille aimantée

Définition

Une aiguille aimantée est un aimant trés léger, ayant la forme d'un losange mince (***Doc.2-a***) ou d'une flèche (***Doc.2-b***). Lorsqu'elle peut s'orienter librement, elle permet de déterminer l'existence d'une interaction magnétique au point où elle se trouve.



Doc.2-a



Doc.2-b

1.2. Interaction aimant - courant

Activité expérimentale

Approchons le pôle sud d'un aimant droit de la face (**A**) d'une bobine parcourue par un courant électrique continu ; on observe une attraction (***Photo.3-a***).

L'effet devient une répulsion si on effectue l'une des deux opérations suivantes :

- on change le sens du courant dans la bobine
- on approche le pôle nord de l'aimant de la face (**A**) de la bobine.

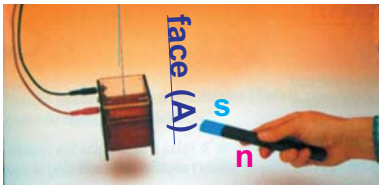


Photo.3-a : *interaction attractive*

Conclusion

La bobine parcourue par un courant électrique continu se comporte comme un aimant droit et possède une face nord et une face sud.

1.3. Interaction courant - courant

Deux bobines sont suspendues par des fils afin de leur permettre de se mouvoir librement. La photo ***3-b*** montre une interaction attractive établie entre ces deux bobines parcourues par des courants électriques continus.

On change le sens du courant dans l'une des deux bobines, l'interaction devient répulsive.

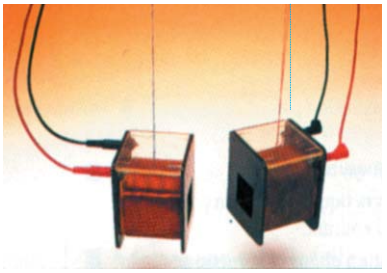


Photo.3-b : *interaction attractive*

Conclusion

Lorsque les deux bobines,parcourues par des courants électriques continus, présentent deux faces de même nature, elles se repoussent ; par contre si les deux faces sont différentes, l'une nord et l'autre sud, elles s'attirent.

Application : la lévitation magnétique

DÉFINITION

La lévitation est une technique permettant de soustraire un objet à l'action de la pesanteur par l'intermédiaire de différents procédés (électrostatique, électrodynamique..) et également par magnétisme.

APPLICATION DE LA TECHNOLOGIE MAGNETIQUE

Le Maglev (Magnetic Levitation Train) actuellement en service d'essais depuis environ 30 ans au japon peut atteindre **550 km.h^{-1}** (record de vitesse) en se déplaçant à quelques centimètres au dessus de rails spéciaux.

PRINCIPE:

La technologie du train à lévitation magnétique repose sur le principe que deux électroaimants s'attirent ou se repoussent suivant le sens du courant.
Le train est équipé d'électroaimants supraconducteurs n'offrant aucune résistance au passage du courant.

2.Champ magnétique

2.1.Notion de champ magnétique

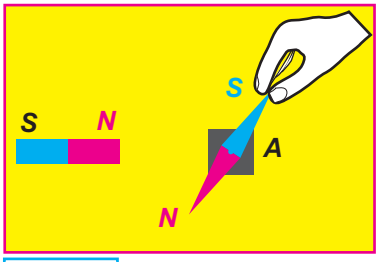
2.1.1. Mise en évidence

ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE

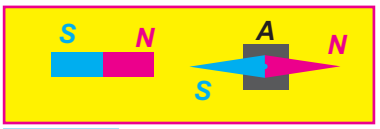
Une aiguille aimantée, pouvant s'orienter librement dans toutes les directions, est placée en un point **A** de l'espace ; on attend qu'elle se stabilise dans une direction privilégée, on l'y immobilise en la tenant à la main puis on place un aimant droit à proximité du point **A** (***Doc.3-a***).

Libérée, l'aiguille aimantée s'oriente suivant une nouvelle direction imposée par l'aimant et correspondant approximativement à une ligne droite contenant l'aimant et passant par **A** (***Doc.3-b***).

Le changement de direction imposée à l'aiguille aimantée prouve que l'aimant droit a exercé sur cette dernière une action mécanique. On dit que l'aimant droit a créé dans l'espace environnant **un champ magnétique**.



Doc.3-a

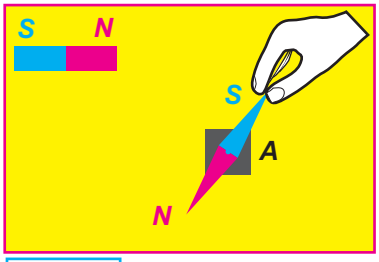


Doc.3-b

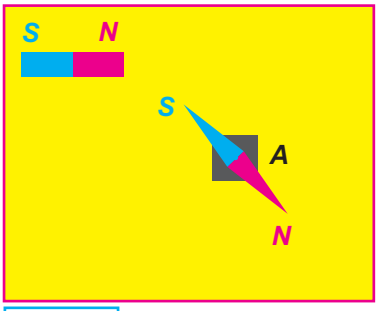
2.1.2. Vecteur champ magnétique

Si nous changeons la position **A** où est immobilisée l'aiguille aimantée, nous constatons que cette dernière subit une nouvelle orientation différente de la première (***Doc.4-a*** *et* ***4-b***).

Le champ magnétique créé par l'aimant est caractérisé par un vecteur champ magnétique $\vec{B}$ dont les caractéristiques diffèrent d'une position à l'autre.



Doc.4-a



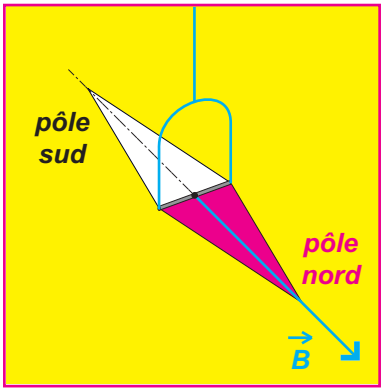
Doc.4-b

Caractéristiques du vecteur champ magnétique $\vec{B}$

Direction : est approximativement celle de l'axe d'une aiguille aimantée placée en **A** et pouvant s'orienter librement (***Doc.5***).

Sens : est dirigé du pôle sud vers le pôle nord de cette même aiguille aimantée (***Doc.5***).

Valeur : dans le système international, la valeur s'exprime en tesla (**T**) et elle est mesurée à l'aide d'un telamètre (***Photo.5***).



Doc.5

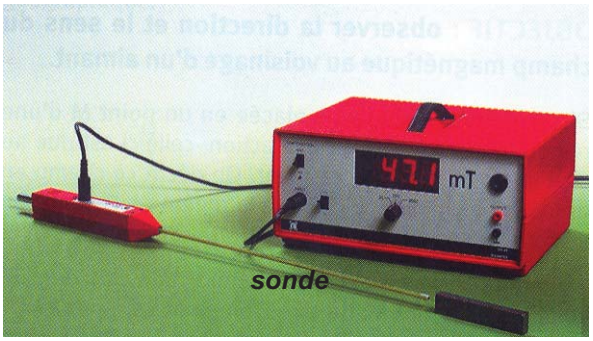


Photo.5

2.1.3. Lignes de champ et spectre magnétique

Activité Expérimentale

Posons une plaque en plexiglas (ou en verre) sur un aimant droit et saupoudrons la limaille de fer. En tapotant sur la plaque, les grains de limaille de fer s'orientent et dessinent des lignes appelées **lignes de champ**.

L'ensemble de ces lignes forme **le spectre magnétique** de l'aimant droit (***Photo.6***).

Des aiguilles aimantées, chacune mobile autour d'un axe vertical, sont placées sur la plaque au voisinage de l'aimant (***Doc.6***); chacune d'elles se stabilise en s'orientant suivant une direction tangentielle à la ligne de champ.

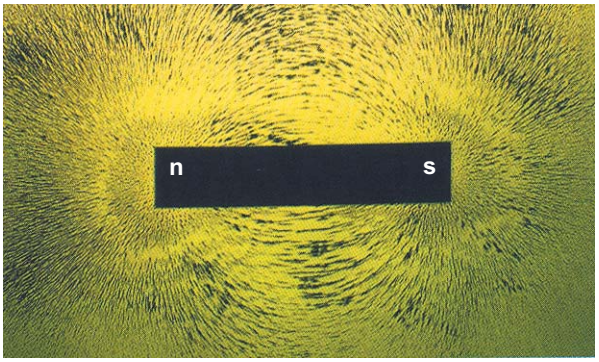
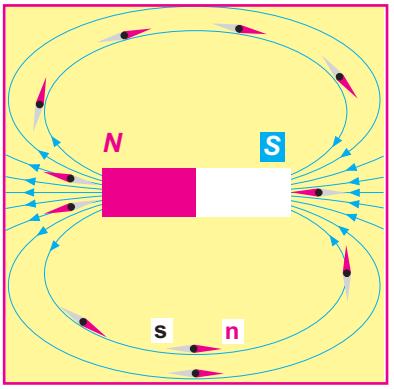


Photo.6



Doc.6

La même expérience est reproduite mais en remplaçant l'aimant droit par un aimant en **U** ; le spectre magnétique se présente autrement (***Photo.7*** *et* ***Doc.7***).

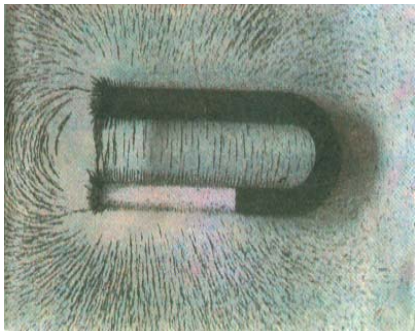
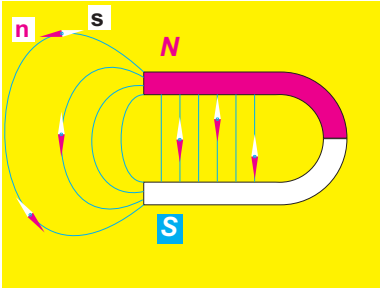


Photo.7



Doc.7

DÉFINITIONS

Une ligne de champ est une courbe qui est tangente aux vecteurs champ magnétique en chacun de ses points.

Elle est orientée dans le sens des vecteurs champ magnétique.

Les lignes de champ se referment sur elles-même à l'intérieur de l'aimant ; elles y pénètrent par le pôle sud et en sortent par le pôle nord.

COMMENT OBTENIR EXPÉRIMENTALEMENT UN SPECTRE MAGNÉTIQUE ?

Saupoudrer la région, où règne un champ magnétique, avec de la limaille de fer d'une manière assez intense pour permettre à chaque grain de fer de s'aimanter.

Chaque grain se comporte alors comme une petite aiguille aimantée dont les pôles attirent les pôles opposées des grains voisins.

Cet alignement de grains de fer matérialise ainsi les lignes de champ magnétique.

Le sens de ces lignes de champ est obtenu en plaçant, sur le spectre magnétique, des aiguilles aimantées de pôles connus.

2.1.4. Champ magnétique uniforme

Un champ magnétique est uniforme dans un domaine de l'espace si, en tout point de ce domaine, le vecteur champ magnétique $\vec{B}$ conserve la même direction, le même sens et la même valeur.

Le champ magnétique est uniforme entre les deux branches d'un aimant en **U** (***Photo.7***) et (***Doc.7***).

2.2. Champ magnétique terrestre

2.2.1. Mise en évidence

Dans une région de l'espace peu étendue, loin de tout aimant, de tout circuit parcouru par un courant électrique et de toute masse importante de matériau qui interagit avec les aimants, plaçons quelques aiguilles aimantées libres de s'orienter dans toutes les directions.

Après quelques oscillations, elles s'immobilisent toutes dans une même direction.

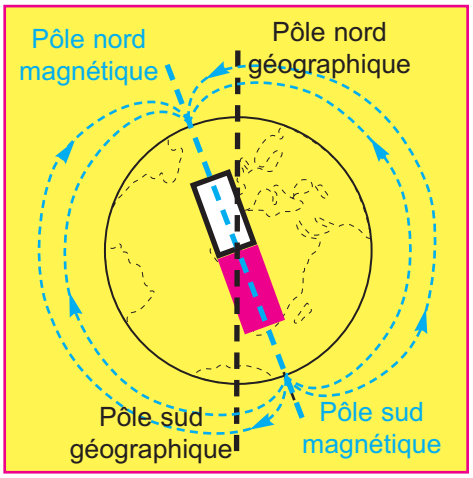
Cette action subie par les aiguilles aimantées décèle l'existence d'un champ magnétique à la surface de la Terre : **le champ magnétique terrestre**.

Dans cette région précédemment définie, le champ magnétique terrestre est uniforme.

Les effets de ce champ sont assimilables à ceux créés par un aimant droit (***Doc.8***).

ORDRES DE GRANDEUR

- valeur du champ magnétique créé par un aimant : **0,01 à 0,1 T**
- valeur du champ magnétique terrestre : **6.10^{-5} T**
- valeur du champ magnétique créé par une bobine parcourue par un courant continu : **quelques mT**
- valeur du champ magnétique solaire : **6.10^{6} T**



Doc.8

2.2.2. Méridien magnétique

DÉFINITION

On appelle **méridien magnétique** en un point **M** du globe terrestre, le plan vertical passant par ce point et contenant la direction du vecteur champ magnétique terrestre en ce point.

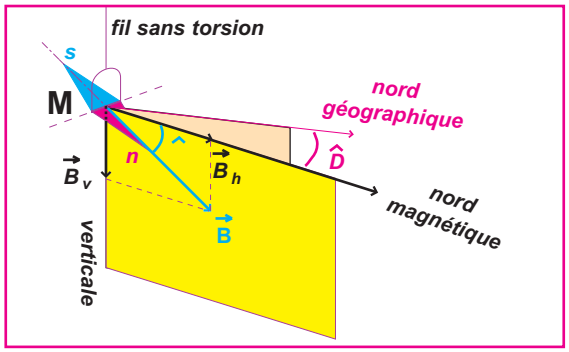
Le champ magnétique terrestre en un point **M** du globe terrestre est caractérisé par un vecteur champ magnétique $\vec{B}(M)$ contenu dans le plan méridien magnétique.

La direction et le sens de ce vecteur sont indiqués par une aiguille aimantée placée en ce point et libre de s'orienter (***Doc.9-a***).

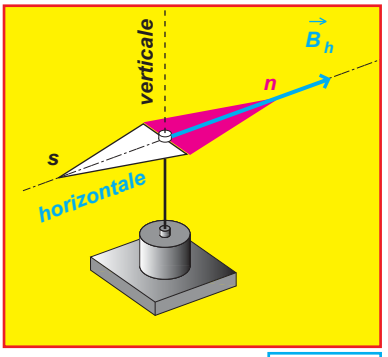
$$\vec{B}(M) = \vec{B}_h(M) + \vec{B}_v(M)$$

$\vec{B}_h(M)$: composante horizontale du vecteur champ magnétique, dirigée vers le nord magnétique ; a direction et le sens sont indiqués par une aiguille aimantée mobile autour d'un axe vertical (***Doc.9-b***).

$\vec{B}_v(M)$: composante verticale du vecteur champ magnétique.



Doc.9-a



Doc.9-b

2.2.3. Inclinaison et déclinaison magnétiques

L'angle $\hat{D}$ que fait le méridien magnétique avec le méridien géographique en un lieu est appelé **déclinaison magnétique** de ce lieu. La déclinaison est dite occidentale ou orientale suivant que le méridien magnétique est à l'ouest ou à l'est du méridien géographique (***Photo 8-a et 8-b***).

MÉRIDIEN GÉOGRAPHIQUE

plan défini par la verticale du lieu et l'axe de rotation de la Terre

L'inclinaison magnétique d'un lieu est l'angle $\hat{I}$ que fait le vecteur champ magnétique terrestre $\vec{B}$ avec sa composante horizontale. Elle est comptée positive quand le pôle nord de l'aiguille aimantée pointe vers le sol, c'est le cas dans l'hémisphère Nord, elle est comptée négative dans le cas contraire.

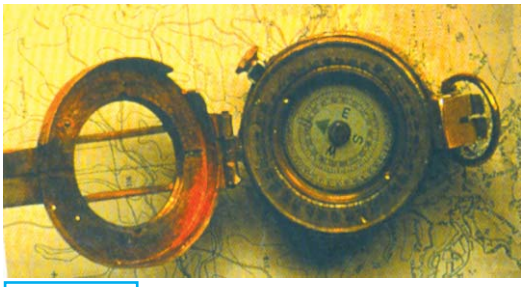


Photo.8-

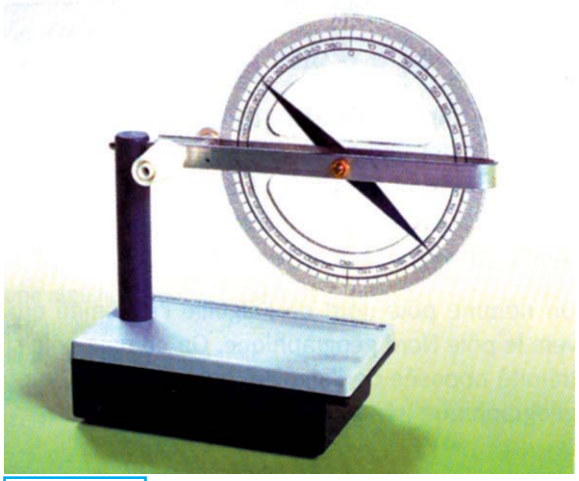


Photo.8-b

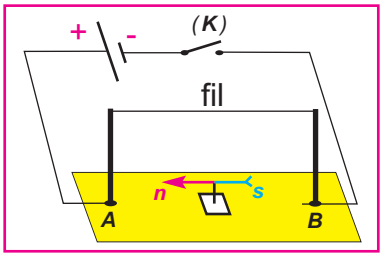
2.3. Champ magnétique créé par un courant électrique continu

2.3.1. Cas d'un fil conducteur rectiligne

EXPÉRIENCE D'OERSTED

DISPOSITIF

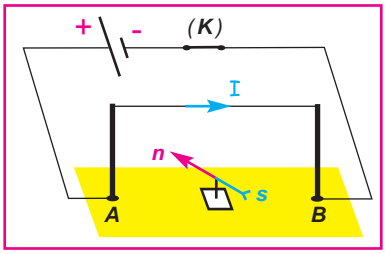
Une aiguille aimantée, mobile autour d'un axe vertical, est placée au voisinage immédiat d'un fil rectiligne et horizontal. L'ensemble est disposé de sorte que lorsque le fil n'est parcouru par aucun courant, le fil est parallèle à l'axe de l'aiguille (***Doc.10-a***).



Doc.10-a

Observations

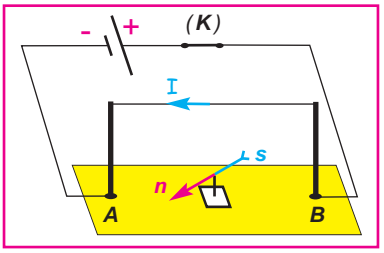
Quand on fait passer un courant dans le fil, l'aiguille aimantée dévie dans un sens (***Doc.10-b***). Si on inverse le sens du courant dans le fil, la même aiguille dévie dans l'autre sens (***Doc.10-c***).



Doc.10-b

Interprétation

Interrupteur ouvert : en l'absence de courant électrique, l'aiguille aimantée est soumise uniquement à l'action de la composante horizontale du champ magnétique terrestre, son axe $\overrightarrow{sn}$ s'aligne suivant la composante $\overrightarrow{B_h}$ du champ magnétique terrestre.



Doc.10-c

Interrupteur fermé : le fil parcouru par un courant électrique continu crée dans son voisinage un champ magnétique qui se manifeste par des actions mécaniques supplémentaires qui contribuent à la nouvelle orientation imposée à l'aiguille aimantée ; le sens du vecteur champ magnétique, associé à ce nouveau champ à l'endroit où se trouve l'aiguille aimantée, dépend du sens du courant électrique dans le fil.

Spectre magnétique

Activité expérimentale

Un fil de cuivre vertical, parcouru par un courant électrique continu d'intensité **I**, traverse une plaque de plexiglas horizontale.

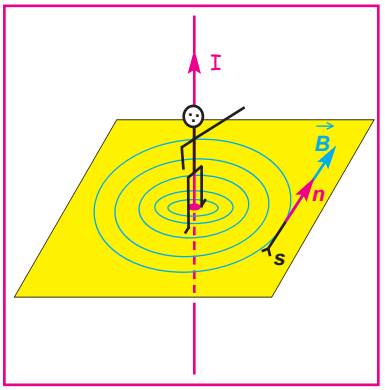
On saupoudre la plaque de plexiglas avec de la limaille de fer puis on la tapote ; on obtient le spectre magnétique correspondant au document (***Photo.9***).

Photo.9

Les lignes de champ sont des cercles centrés sur le fil.

Orientation des lignes de champ

Le sens du vecteur champ en un point **M** est celui de l'axe $\overrightarrow{sn}$ d'une aiguille aimantée placée en ce point (***Doc.11***).
Il correspond au sens indiqué par la main gauche de l'observateur d'Ampère placé sur le fil, regardant le point **M**, le courant le traversant des pieds vers la tête.



Doc.11

Les lignes de champ restent des lignes circulaires concentriques quel que soit le sens du courant électrique dans le fil conducteur.

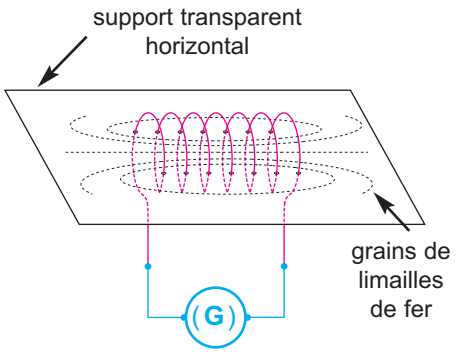
Par contre l'orientation de ces lignes associée au sens du vecteur champ magnétique en un point d'une ligne de champ, dépend du sens du courant électrique dans le fil.

2.3.2. Cas d'un solénoïde

Spectre magnétique

Expérience

Un solénoïde, réalisé avec un fil de cuivre enroulé et enfilé dans une plaque de plexiglas comme l'indique le document ***12-a***, est parcouru par un courant électrique continu d'intensité **I**.



Doc.12-a

On saupoudre la plaque de plexiglas avec de la limaille de fer puis on la tapote, on obtient le spectre magnétique correspondant au document **12-b** et à la ***Photo.10***

Des aiguilles aimantées disposées sur la plaque de plexiglas en différents endroits, s'orientent différemment d'un point à l'autre. Si on inverse le sens du courant électrique, l'orientation de chacune d'entre elles est inversée.

Spire et solénoïde

Une spire circulaire désigne l'enroulement d'un fil conducteur sur un cercle.

L'axe d'une spire est la droite perpendiculaire au plan contenant la spire, passant par le centre de la spire.

Un solénoïde est une bobine constituée de l'enroulement cylindrique d'un fil conducteur. Il est donc formé de plusieurs spires circulaires de même diamètre et de même axe. Ces spires peuvent être jointes ou non.

Un solénoïde est caractérisé par :
- sa longueur **L** qui représente la distance entre ses deux extrémités ;
- son diamètre **D** qui est égal au diamètre de ses spires;
- son nombre de spires **N**.

Si la longueur d'un solénoïde est supérieure à deux fois son diamètre, il est dit long ; sinon, il est dit court.

L'axe d'un solénoïde est la droite confondue avec l'axe commun aux spires .

Le centre d'un solénoïde est le point de son axe situé à égale distance de ses extrémités.

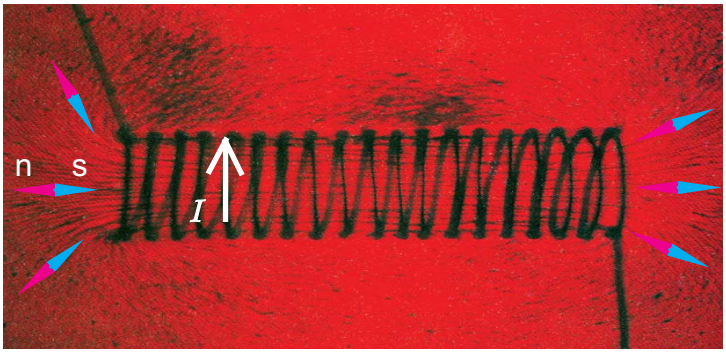
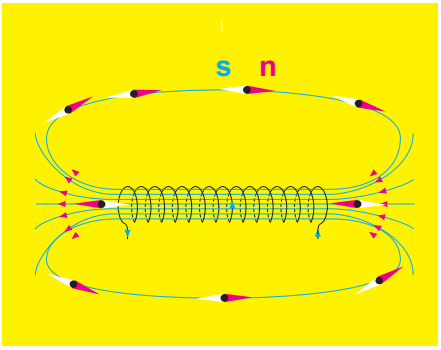


Photo.10



Doc.12-b

Observations

À l'intérieur du solénoïde, les lignes de champ sont des droites parallèles à l'axe du solénoïde et sont toutes orientées dans le même sens.

À l'extérieur du solénoïde, le spectre magnétique est analogue à celui créé par un aimant droit de mêmes dimensions.

Interprétation

Comme le fil parcouru par un courant électrique continu, un solénoïde crée un champ magnétique qui se manifeste par des actions mécaniques qui imposent aux différentes aiguilles aimantées disposées en différentes endroits de son voisinage une orientation spécifique à chacune d'entr'elles.

Le spectre magnétique n'a plus le même aspect que celui obtenu avec le fil rectiligne. Le changement de géométrie du fil a entraîné une modification du champ magnétique qu'il génère.

Le sens du vecteur champ magnétique, associé à ce champ à l'endroit où se trouve une aiguille aimantée, dépend du sens du courant électrique dans le fil.

Un solénoïde parcouru par un courant électrique continu se comporte comme un aimant droit de mêmes dimensions.

Par analogie avec les pôles de l'aimant, il possède une face nord et une face sud.

On désigne par face nord la face par laquelle sortent les lignes de champ, et par face sud celle par laquelle elles entrent.

Les deux faces sud et nord du solénoïde changent de nom lorsque le courant électrique change de sens.

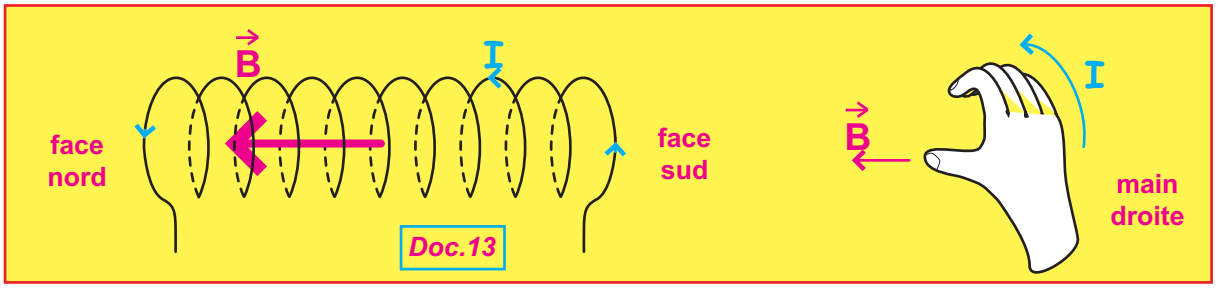
Détermination des deux faces d'un solénoïde parcour par un courant électrique continu

Règle de la main droite

Le pouce de la main droite sort par la face nord du solénoïde lorsque, la paume de la main étant dirigée vers l'intérieur du solénoïde, les autres doigts indiquent le sens du courant (***Doc.13***).

Règle de l'observateur d'Ampère

Le sens du vecteur champ magnétique créé par un solénoïde est donné aussi par le bras gauche tendu d'un observateur d'Ampère, couché sur une des spires de sorte que le courant électrique lui pénètre par les pieds et lui sort par la tête tout en regardant l'intérieur du solénoïde.



Doc.13

Valeur du vecteur champ nagnétique (voir fiche TP)

À l'intérieur d'un solénoïde parcouru par un courant électrique continu d'intensité **I**, le champ magnétique est uniforme.

Dans le vide, la valeur du vecteur champ magnétique est donnée par la relation :

$$\|\vec{B}\| = \mu_0 \frac{N}{L} I = \mu_0 n I$$

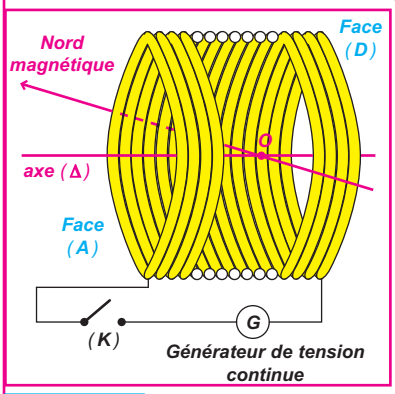
μ_0 : perméabilité du vide et de l'air ($4\pi.10^{-7}$ S.I)
N : nombre total de spires
L : longueur du solénoïde (en **m**)
n : nombre de spires par unité de longueur.

Remarque : la perméabilité de l'air est très proche de celle du vide.

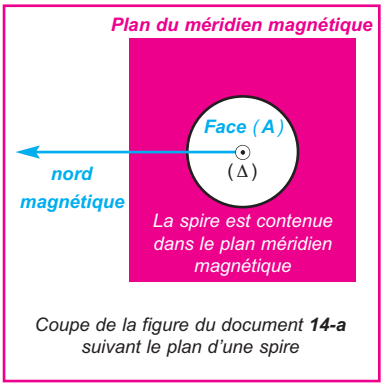
EXERCICE RÉSOLU

ENONCÉ :

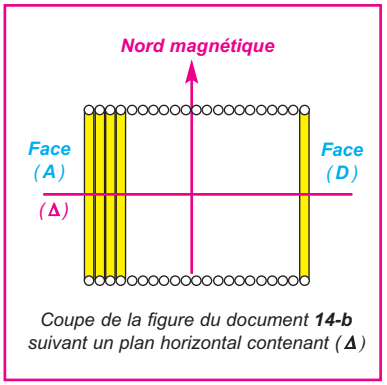
Un solénoïde comporte **2000** spires par mètre et renferme dans sa région centrale une aiguille aimantée, placée sur pivot vertical. L' axe horizontal (Δ) du solénoïde est placé perpendiculairement au plan du méridien magnétique terrestre. On donne la valeur de la composante horizontale du champ magnétique terrestre $\|\vec{B}_h\| = 2.10^{-5}$ T.



Doc.14-a



Doc.14-b



Doc.14-c

1- Recopier les documents **14-b** et **14-c** et indiquer sur le vecteur $\vec{B}_h$. Représenter, dans les mêmes documents, la position initiale de l'aiguille aimantée lorsque (**K**) est ouvert.

2- (**K**) est fermé: un courant d'intensité I = **5 mA** circule dans le fil conducteur du solénoïde et de sens tel que la face (**A**) est une face sud ; l'aiguille dévie d'un angle α.

-a- Calculer la valeur du champ magnétique $\vec{B}_s$ créé par la bobine en son centre.

-b- Représenter dans le document **14-c** les vecteurs $\vec{B}_s$ et $\vec{B}_h$, et le vecteur somme $\vec{B}_t = \vec{B}_s + \vec{B}_h$; on prendra comme échelle **1 cm** pour 10^{-5} T.
Calculer la valeur de l'angle α .

3- On désire maintenant annuler le champ horizontal total à l'intérieur du solénoïde.
Faire un schéma indiquant la position à donner au solénoïde et le sens du courant qui le parcourt.
Déterminer l'intensité I_0 de ce courant.
La position de l'aiguille aimantée est alors indifférente. Préciser pourquoi.

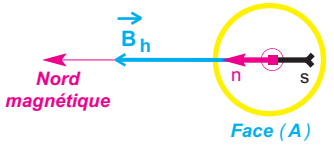
4- On double la valeur du courant $I = 2\,I_0$ tout en gardant le dispositif de la question **3**.
Préciser la position d'équilibre de l'aiguille aimantée.

SOLUTION

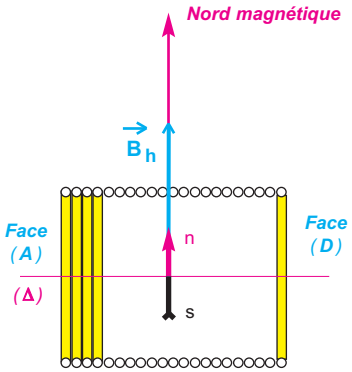
1- Représentation de la position initiale de l'aiguille aimantée lorsqu'aucun courant ne traverse le solénoïde

Le méridien magnétique d'un lieu est le plan vertical formé par le centre de la Terre et la direction de l'aiguille aimantée en ce lieu.

La composante horizontale $\vec{B}_h$ du champ magnétique terrestre est dirigée vers le Nord magnétique.
En l'absence de courant dans le solénoïde, l'aiguille aimantée sur pivot vertical, s'oriente suivant $\vec{B}_h$ (**Doc 14-d**) et (**Doc 14-e**).



Doc.14-d



Doc.14-e

2 -a- Champ magnétique $\vec{B}_s$

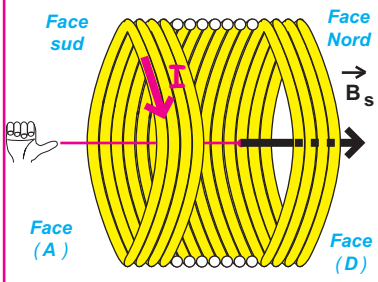
Le champ magnétique $\vec{B}_S$ créé par la bobine parcourue par un courant d'intensité I = **5 mA** a pour valeur :

$$\|\vec{B}_s\| = 4\pi.10^{-7}\frac{N}{L}\,I$$

Application numérique:

$$\|\vec{B}_s\| = 4\pi.10^{-7}.2000.5.10^{-3}$$

$$\boxed{\|\vec{B}_s\| = 1{,}26.10^{-5}\ T}$$



Doc.14-f

-b- Représentation des vecteurs $\vec{B}_s$, $\vec{B}_h$ et $\vec{B}_t = \vec{B}_s + \vec{B}_h$

Le sens de $\vec{B}_s$ est déterminé grâce à la règle de la main droite (**Doc 14-f**).

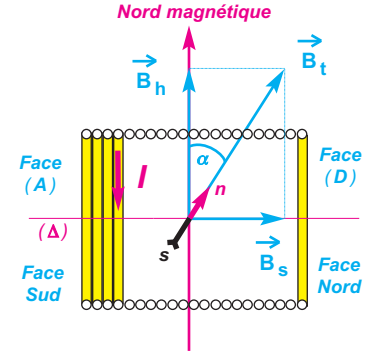
Les vecteurs $\vec{B}_s$, $\vec{B}_h$ et $\vec{B}_t = \vec{B}_s + \vec{B}_h$ sont représentés sur (**Doc 14-g**).

L'aiguille aimantée a tourné d'un angle α tel que :

$$\tan\alpha = \frac{\|\vec{B}_s\|}{\|\vec{B}_h\|}$$

Application numérique : $\tan\alpha = \dfrac{1{,}26.10^{-5}}{2.10^{-5}} = 0{,}63$

$$\boxed{\alpha = 32{,}2°}$$



Doc.14-g

3- Nouvelle disposition du solénoïde

Pour que le champ magnétique horizontal total dans le solénoïde soit nul, il faut que $\vec{B}_s$ et $\vec{B}_h$ soient directement opposés (même direction, même valeur et de sens opposés)(**Doc 14-h**).
On procéde à une rotation du solénoïde d'un angle de 90° dans le plan horizontal de sorte que la face (**A**) soit du coté de $\vec{B}_h$ tout en gardant le même sens pour le courant électrique.

$$\|\vec{B}_s\| = \|\vec{B}_h\| \qquad 4\pi.10^{-7}\frac{N}{L}I_0 = \|\vec{B}_h\|$$

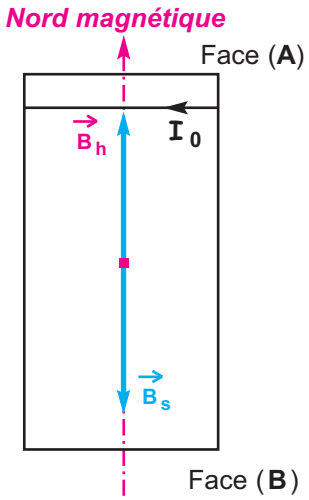
$$I_0 = \frac{\|\vec{B}_h\|}{4\pi.10^{-7}\left(\frac{N}{L}\right)}$$

Application numérique:

$$I_0 = \frac{2.\,10^{-5}}{4\pi.10^{-7}.2000} \qquad \boxed{I_0 = 7,96.10^{-3}\,A}$$

La direction de l'aiguille est indifférente car le champ magnétique total est nul :

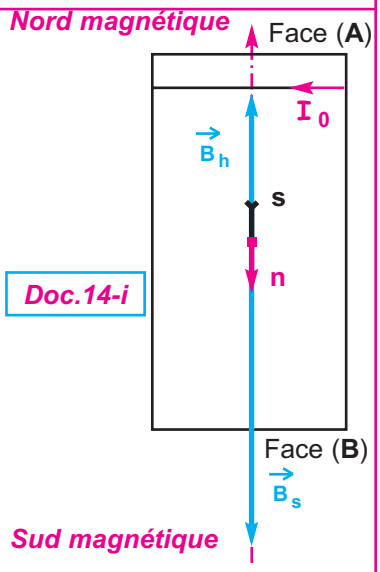
$$\vec{B}_t = \vec{B}_s + \vec{B}_h = \vec{0}$$



Doc.14-h

4- Nouvelle position d'équilibre de l'aiguille

Si on double l'intensité du courant, le vecteur champ magnétique $\vec{B}_S$ voit sa valeur doubler et reste opposé à la composante horizontale $\vec{B}_h$.
Le champ magnétique horizontal total est dirigé vers le Sud magnétique terrestre. L'aiguille voit donc son pôle Nord se diriger, non pas vers le Nord, mais vers le Sud magnétique terrestre (**Doc 14-i**).



Doc.14-i

L'ESSENTIEL

VECTEUR CHAMP MAGNÉTIQUE

La direction et le sens du vecteur champ magnétique $\vec{B}(M)$ sont indiqués par la direction orientée **pôle sud - pôle nord** que prend une aiguille aimantée libre de s'orienter et placée au point **M**. Sa valeur s'exprime en Tesla (**T**).

SPECTRE MAGNÉTIQUE

Un spectre magnétique matérialise les lignes de champ.
Une ligne de champ sort du pôle nord et entre par le pôle sud de l'aimant qui la génére ;
Pour un courant circulaire, les lignes de champ sortent de la face nord et rentrent par la face sud.

CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE

Le vecteur champ magnétique terrestre $\vec{B}(M)$ en un point **M** admet une composante horizontale $\vec{B}_h$ dirigée vers le nord magnétique et une composante verticale $\vec{B}_v$ dirigée vers le centre de la Terre.

- L'angle que fait $\vec{B}_h$ avec $\vec{B}(M)$ s'appelle **inclinaison magnétique** .
- L'angle que fait la direction du nord magétique (celle de $\vec{B}_h$) avec la direction du nord géographique s'appelle la **déclinaison magnétique** .
- Le plan vertical contenant $\vec{B}(M)$ s'appelle le **méridien magnétique**.
- L'axe orienté $\vec{sn}$ d'une aiguille aimantée sur pivot vertical, indique la direction et le sens de $\vec{B}_h$ loin de toutes autres sources de champs magnétiques.

CHAMP MAGNÉTIQUE UNIFORME

Un champ magnétique est uniforme s'il a les mêmes caractéristiques en chaque point de l'espace champ.

EXEMPLES DE CHAMPS MAGNÉTIQUES UNIFORMES

- champ magnétique qui régne entre les deux branches d'un aimant en **U**
- champ magnétique terrestre dans un domaine restreint à proximité de la surface terrestre.
- champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde parcouru par un courant continu.

CHAMP MAGNÉTIQUE CRÉÉ PAR UN SOLÉNOÏDE

Un solénoïde parcouru par un courant électrique continu se comporte comme un aimant droit.

Par analogie avec les pôles d'un aimant, un solénoïde possède une face nord et une face sud déterminées à l'aide de la règle de la main droite.

On désigne par face nord la face par laquelle sortent les lignes de champ, et par face sud celle par laquelle elles entrent.

Les deux faces sud et nord du solénoïde changent de nom lorsque le courant électrique change de sens.

À l'intérieur d'un solénoïde parcouru par un courant électrique continu d'intensité **I**, le champ magnétique est uniforme.

Dans le vide, la valeur du vecteur champ magnétique est donnée par la relation :

$$\|\vec{B}\| = \mu_0 \frac{N}{L} I = \mu_0 n I$$

TRAVAUX PRATIQUES

BUT

- Dégager la relation $\|\vec{B}\| = \mu_0 \, n \, I$
- Détermination de la perméabilité μ de l'air.

MATÉRIEL

- un solénoïde à quatre enroulements comportant chacun 200 spires bobinées sur un support cylindrique de longueur **L = 0,405 m**.
- un générateur de tension continue **0 V - 30 V**.
- un rhéostat de **23 Ω - 7 A**.
- un ampèremètre.
- un teslamètre.
- des fils de connexion.

EXPÉRIENCE N°1

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Le nombre de spires est **N = 200 spires**. La longueur du solénoïde est **L = 0,405 m**.

On maintient la tête de la sonde au centre **O** du solénoïde. On varie **I** et on mesure $\|\vec{B}\|$.

TABLEAU DE MESURES

I (A)	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
$\|\vec{B}\|$ (mT)						

EXPLOITATION DES RÉSULTATS DE MESURES

Compléter le tableau de mesures

Tracer la courbe $\|\vec{B}\| = f(I)$.

En déduire la proportionnalité entre $\|\vec{B}\|$ et **I**

EXPÉRIENCE N°2

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

On fait varier le nombre **N** de spires sur le support de longueur **L = 0,405 m**.

On maintient la tête de la sonde au centre **O** du solénoïde. On fixe **I = 1 A**.

TABLEAU DE MESURES

N	L (m)	n (spires/m)	$\|\vec{B}\|$ (mT)
200	0,405	493,8	
400	0,405	987,6	
600	0,405	1481,14	
800	0,405	1975,2	

Compléter le tableau de mesures

Tracer la courbe $\|\vec{B}\| = f(n)$.

En déduire la proportionnalité entre $\|\vec{B}\|$ et **n**

DÉTERMINATION DE LA PERMÉABILITÉ DE L'AIR

La valeur de la perméabilité du vide μ_0 peut être déduite a partir du tracé $\|\vec{B}\| = f(I)$ ou $\|\vec{B}\| = f(n)$.

EXERCICES

Je vérifie mes connaissances

Choisir la (ou les) proposition(s) correcte(s)

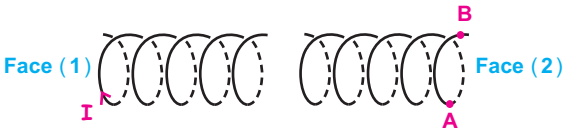
1- le vecteur champ magnétique créé par un aimant droit en un point **M**

a - sort du pôle nord de cet aimant.

b - se dirige du pôle sud vers le pôle nord d'une aiguille aimantée placée en **M**.

c - a une direction perpendiculaire à l'axe de l'aimant.

2-



Les deux solénoïdes s'attirent car :

a - le courant électrique d'intensité **I'** circule de **A** vers **B** .

b - la face (**1**) est une face nord.

c - la face (**2**) est une face sud.

d - le vecteur champ magnétique créé par **I'** à l'intérieur du solénoïde à travers lequel il circule, rentre par la face (**2**).

3- Un solénoïde de longueur **L**, comportant **N** spires, est parcouru par un courant électrique. La valeur du vecteur champ magnétique créé à l'intérieur du solénoïde augmente si :

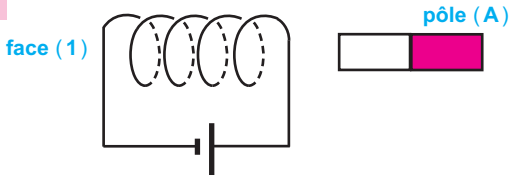
a - on augmente **N** en gardant **L** inchangée.

b - on augmente **L** en gardant **N** inchangée.

c - on augmente le rapport $\frac{N}{L}$

d - on change le sens du courant électrique en gardant son intensité inchangée.

4-



On observe une répulsion car :

a - la face (**1**) est une face sud.

b - le pôle (**A**) est un pôle nord.

c - le vecteur champ magnétique créé par le courant à l'intérieur du solénoïde entre par la face (**1**).

J'applique mes connaissances et je raisonne

Ex-1- Un solénoïde, long de **80 cm**, comporte **800 spires .**

1 - On place une aiguille aimantée, mobile autour d'un axe vertical, au centre du solénoïde.
Lorsque le solénoïde n'est parcouru par aucun courant électrique, cette aiguille est perpendiculaire à l'axe du solénoïde.
Quelle est la direction prise par cette aiguille aimantée ? Faire un schéma de ce dispositif, vu de dessus, en indiquant le nom des pôles de l'aiguille aimantée.

2 - le solénoïde est maintenant parcouru par un courant d'intensité **I = 32 mA**. Donner les caractéristiques du vecteur champ magnétique apparaissant à l'intérieur du solénoïde (on fera apparaître sur le schéma précédent le sens du courant et le sens du vecteur champ magnétique.

3 - De quel angle la petite aiguille aimantée va-t-elle tourner ?

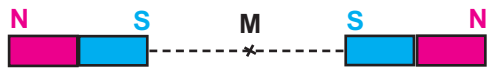
Données : perméabilité du vide $\mu_0 = 4\pi .10^{-7}$ S.I

$\|\vec{B}_h\| = 2.10^{-5}$ T

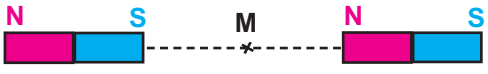
Ex-2- On approche l'un de l'autre deux barreaux aimantés identiques, selon les schémas des **documents 15-a**,**b**,**c** et **d**.

1 - Recopier les différents schémas et représenter, pour les différents cas envisagés, le vecteur champ magnétique au point **M**

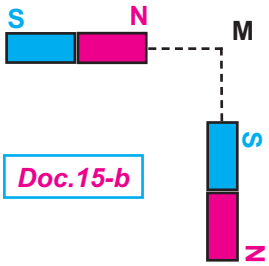
2 - Dans chaque cas, indiquer l'orientation d'une aiguille aimantée centrée au point **M.** Préciser les pôles magnétiques de l'aiguille.



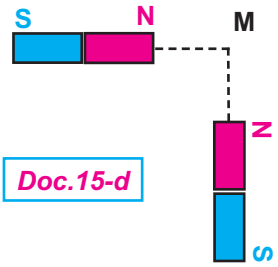
Doc.15-a



Doc.15-c



Doc.15-b



Doc.15-d

Ex-3- Un solénoïde parcouru par un courant continu d'intensité **I**, comportant **N = 400 spires** réparties sur une longueur **L = 50 cm**, est disposé horizontalement de sorte que son axe fait un angle α = **60°** avec le méridien magnétique terrestre. En un point **M** à l'intérieur du solénoïde, on place une aiguille aimantée mobile autour d'un axe vertical. Elle s'oriente perpendiculairement à l'axe du solénoïde comme l'indique le schéma du ***Doc*-16**

1- Représenter la composante horizontale du vecteur champ magnétique terrestre au point **M**. Echelle : **1cm** ⟷ **$0{,}5.10^{-5}$ T**

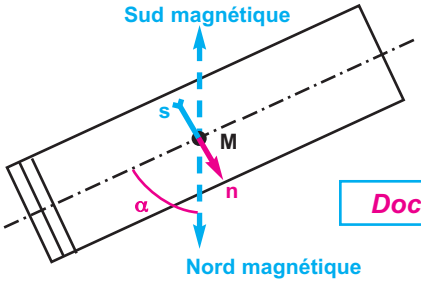
2- Déterminer la valeur du vecteur champ magnétique créé par le solénoïde.

3 - Indiquer sur la figure le sens du courant électrique et calculer la valeur de son intensité.

Données :

perméabilité du vide $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$ **S.I**

composante horizontale du vecteur champ magnétique terrestre : $\|\vec{B}_h\| = 2.10^{-5}$ **T**



Doc.16

Ex-4- Soit un premier solénoïde (S_1) de longueur **L = 50cm** et comprenant **200** spires.

1- a - Donner les caractéristiques du vecteur champ magnétique créé au centre de ce solénoïde lorsqu'il est parcouru par un courant électrique continu d'intensité **I**. Faire un schéma clair en y figurant le sens du vecteur champ magnétique et le sens du courant électrique.

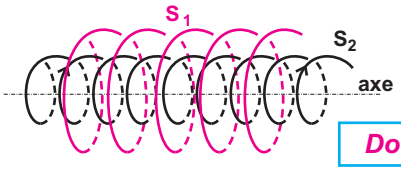
Perméabilité du vide : $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$ **S.I**

b - On place une petite aiguille aimantée à l'intérieur de (S_1), au voisinage de son centre. Son axe est disposé horizontalement et perpendiculairement au plan du méridien magnétique terrestre. Calculer l'intensité **I** du courant qu'il faut faire passer dans (S_1) pour que l'aiguille aimantée dévie de **30°**.

Composante horizontale du champ magnétique terrestre : $B_h = 2.10^{-5}$ **T**

2- Soit un second solénoïde comportant **80** spires par mètre de longueur.
Les deux solénoïdes (S_1) et (S_2) sont disposés de manière à avoir le même axe; cet axe commun étant perpendiculaire au méridien magnétique terrestre (***Doc*-17**).

Les deux solénoïdes sont branchés en série dans un circuit électrique.
On constate que l'aiguille aimantée dévie de **45°**.
Déterminer la valeur de l'intensité **I'** du courant électrique qui les parcourt; on trouvera deux solutions qui devront être interprétées.



Doc.17

Ex-5- On s'intéresse uniquement au champ magnétique créé entre les deux branches d'un aimant en **U**.

1 - Quels sont la direction et le sens du vecteur champ magnétique en un point de cette région ? Comment qualifie-t-on le champ magnétique dans cette région ?

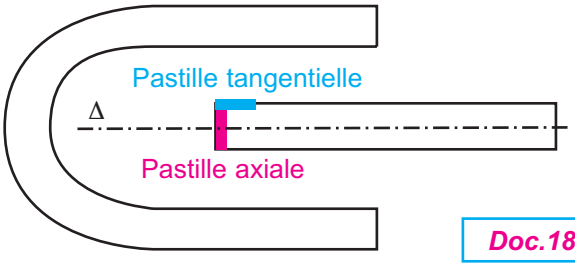
2 - On mesure la valeur du champ magnétique en un point de l'entrefer à l'aide d'une sonde à effet Hall comportant une pastille tangentielle et une pastille axiale.
La sonde est placée selon le schéma du document **18**.

Le champ magnétique mesuré par la pastille tangentielle a une valeur $\|\vec{B}\|$ égale à **65 mT**.

Quelle valeur attend-on de la mesure donnée par la pastille axiale?

3 - On fait tourner la sonde d'un angle α **= 30°**

Quelle est la nouvelle valeur mesurée par chacune des deux pastilles?



Doc.18

Ex-6-Etude d'un texte scientifique : Les débuts de la boussole

"Vers le XIIe siècle, les marins de la Méditerranée, à la suite des marins chinois, utilisaient pour s'orienter une aiguille flottant :aimant naturel ou aiguille de fer touchée par un aimant .
Elle semblait désigner l'étoile Polaire. L'aiguille fut rapidement remplacée par la boussole telle que nous la connaissons. La partie aimantée était posée en équilibre sur pivot, et enfermée dans une petite boîte, " bussola ". Au début du XIVe siècle, la boussole fut complétée par une rose des vents fixe où figuraient les directions cardinales. La rose des vents, également représentée sur les cartes, permettait aux timoniers des navires de conserver facilement leur cap en maintenant constant l'angle entre la direction nord-sud géographique et l'orientation de l'aiguille de la boussole. "

D'après Jean Lefort, *L'aventure cartographique,* Belin-Pour la Science, 2004.

1- Comment peut-on aimanter une aiguille en fer ?
2- Dans l'hémisphère nord, quelle direction indique l'étoile polaire ?
3- Représenter l'hémisphère nord et le plan dans lequel est l'aiguille aimantée d'une boussole utilisée dans les conditions habituelles. S'oriente-t-elle dans la direction du vecteur champ géomagnétique ?
4- Quelles sont les régions du globe où l'utilisation d'une boussole est impossible? Pourquoi ?

Ex-7-Etude d'un texte scientifique : La magnéto-encéphalographie (MEG)

" Comme son nom l'indique, la technique de MEG vise à enregistrer les champs magnétiques produits par le cerveau. [...] Mais les champs magnétiques du cerveau valent de l'ordre du milliardième de gauss (le champs terrestre est de 0,5 gauss). La mise au point des SQUID par James Zimmerman, aux États-Unis, a apporté au domaine une véritable révolution. Un SQUID, acronyme pour Superconducting Quantum Interference Device (dispositif supraconducteur à interférences quantiques), est une petite boucle en métal supraconducteur, interrompue par un isolant en deux endroits. La supraconductivité, phénomène quantique par excellence, confère à ce type de circuit des propriétés remarquables. En particulier, la tension aux bornes du SQUID est une
fonction sinusoïdale du flux magnétique qui traverse la boucle. Ce dispositif est extrêmement sensible et permet de mesurer des champs très faibles.
Un appareil de magnéto-encéphalographie comporte donc une matrice de plusieurs SQUID - parfois plus d'une centaine refroidis à l'hélium liquide (- 269 °C)[...]. Des capteurs regroupés dans un casque, et reliés à des SQUID, sont approchés du crâne pour détecter tes champs magnétiques cérébraux. La MEG permet donc de mesurer l'intensité du champ magnétique au voisinage du cuir chevelu. L'évolution de ces grandeurs au cours du temps est suivie au millième de seconde près. "

Extrait de : *La Recherche, numéro spécial, juillet/août 1996.*

1- Le gauss est une ancienne unité pour le champ magnétique. Donner son équivalent en tesla.
2- Pourquoi le cerveau produit-il un champ magnétique ?
3- Sur quel phénomène se base la détection de ce champ magnétique ?
4- Pourquoi emploie-t-on des supraconducteurs ? Quel est le rôle de L'hélium liquide ?
5- Justifier le grand nombre de capteurs utilisés. Que mesure chaque capteur ?

Ex-8-Etude d'un texte scientifique : L'expérience d'Oersted

La parenté entre électricité et magnétisme n'avait pas manqué de frapper certains physiciens du XVIIIe et du début du XIXe siècle, qui savaient que la foudre pouvait magnétiser le fer [...]. Il allait revenir à un physicien danois, Hans Christian Oersted, professeur à l'université de Copenhague, de la mettre en évidence [...].
En 1819, le dispositif expérimental d'Oersted consiste en une boussole placée sur une table à quelque distance d'une pile voltaïque. [...] D'après les calculs modernes, le potentiel de cette pile aurait été de l'ordre de 15-20 volts. Oersted met en communication les extrémités opposées de sa pile, par un fil de cuivre qu'il baptise " fil conjonctif " [...].Oersted tend alors une portion rectiligne de ce fil au-dessus de l'aiguille aimantée de sa boussole, qui est orientée nord-sud, et il observe que l'aiguille quitte sa position et que le pôle qui se trouve sous la partie du fil conjonctif la plus voisine de l'extrémité négative de la pile dévie vers l'ouest. [...]
À l'issue de ses expériences, Oersted déclare que leur conséquence principale est que " l'aiguille aimantée est déviée de sa position d'équilibre par l'action de l'appareil galvanique [la pile électrique] et que cet effet se produit quand le circuit est fermé (….) et non quand il est ouvert (…..) ; c'est pour avoir laissé le circuit ouvert que de célèbres physiciens n'ont point réussi, il y a quelques années, dans des tentatives de ce genre ".

Extrait de : *Les grandes expériences scientifiques de Michel Rival, collection Point Sciences,* éditions du Seuil, 1996.

1- D'après la description du dispositif expérimental que peut-on prévoir concernant l'intensité du courant dans le fil de cuivre lors de l'expérience d'Oersted ? En quoi cela favorisait-il ses observations ?
2- D'après les indications du texte, représenter schématiquement la pile, le fil conducteur et la boussole . vus du dessus et en supposant le haut du schéma dirigé vers le nord magnétique terrestre.
3- Déterminer le sens du vecteur champ créé par le courant au niveau de la boussole, et l'orientation prise par celle-ci.Envisager les deux sens possibles pour le courant.
4- Est-il exact que : " le pôle qui se trouve sous la partie du fil conjonctif la plus voisine de l'extrémité négative de la pile dévie vers l'ouest. " ?
5- Oersted a-t-il raison d'insister sur le fait que l'effet observé " se produit quand le circuit est fermé et non quand il est ouvert " ? Quel fait important met-il ainsi en évidence ?

POUR EN SAVOIR PLUS

LE CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE

Suivant l'altitude, la nature des particules et leur nombre, on définit dans l'espace plusieurs zones où le champ magnétique terrestre agit différemment.

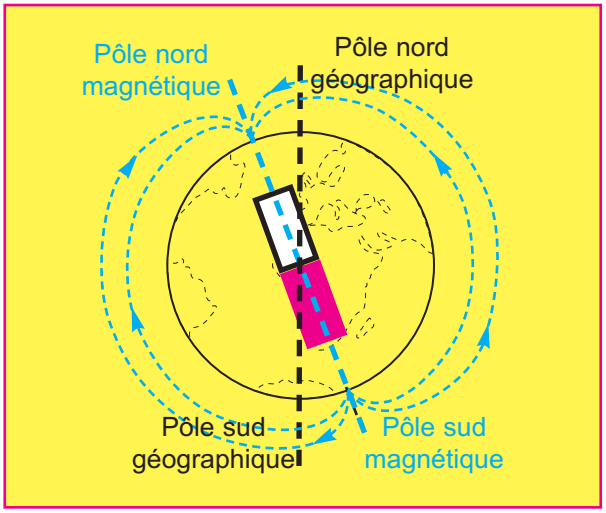
En partant du sol, on a principalement :

- **l'atmosphère** : neutre, ne subit pas d'effet du champ magnétique terrestre.
- **l'ionosphère** : mélange de gaz neutre et de plasma, dense et lourd. Le chauffage de l'ionosphère (jusqu'à **10 000** degrés) et la création du plasma sont principalement dus à l'absorption des rayonnements ultra-violets en provenance du Soleil.
- **la magnétosphère** : milieu très dilué, la magnétosphère est remplie de plasma qui interagit fortement avec le champ magnétique. La magnétosphère est séparée du vent solaire par une frontière de quelques centaines de kilomètres d'épaisseur.
- **la magnétopause** : là où le champ magnétique terrestre s'annule.

plasma
particules électriquement chargées qui ont à la fois les caractéristiques d'un fluide et d'un conducteur d'électricité.

Structure du champ magnétique

- Jusqu'à une distance du centre de la Terre, quatre fois le rayon terrestre, le champ magnétique terrestre est assimilable à celui que créerait un aimant droit placé à l'intérieur du globe incliné d'environ **11°** par rapport à l'axe de rotation de la Terre. ***(Doc.19)***



Doc.19

- Au-delà de **l'ionosphère** , soit au-dessus de **800** à **1000 km** d'altitude, le vent solaire et le champ magnétique qu'il transporte modifient la forme de la **magnétosphère** en la comprimant du côté jour et en créant une longue traînée du côté nuit lui donnant une forme de comète comme le montre les documents (***Photo.11-a***) ***et*** (***Photo.11-b***).

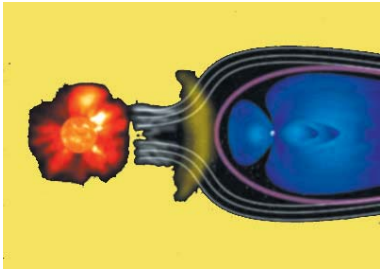


Photo.11-a

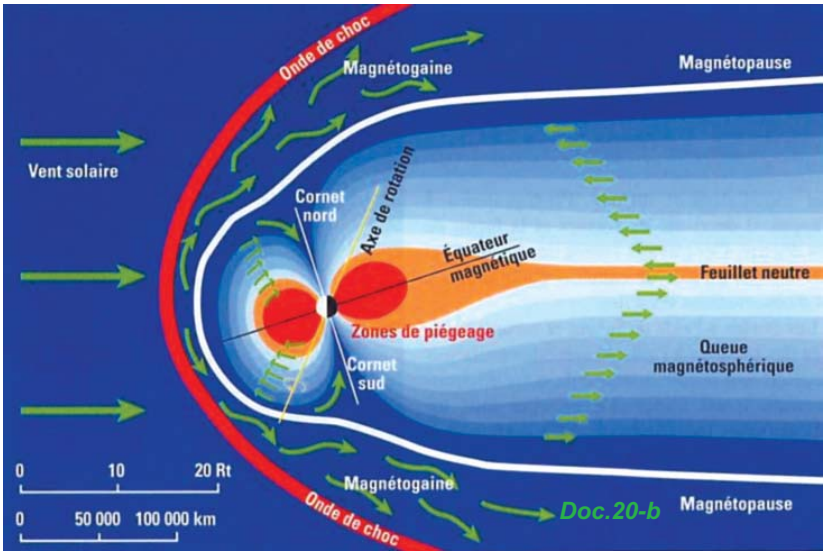


Photo.11-b

La magnétosphère constitue une sorte de **bouclier magnétique** qui protège la Terre contre les particules (électrons, protons, ions) qui forment le vent solaire.

Ces particules électrisées sont guidées par les lignes de champ magnétique ; elles tourbillonnent autour de ces lignes, le plus grand nombre est dévié et la Terre est ainsi protégée.

Certaines particules (environ **10%**) s'engouffrent dans les " **cornets** " polaires nord ou sud, guidées par les lignes de champ du champ magnétique terrestre, entrent dans l'atmsphère et excitent les molécules qui la composent.

Ces dernières se désexcitent en émettant de la lumière, produisant le magnifique spectacle des aurores boréales (***Photo.11-c***).

La lumière verte ou rouge de l'aurore boréale provient des atomes excités de dioxygène, alors que la lumière violette provient des molécules excitées de diazote.

Photo.11-c : cette aurore boréale a été prise en photo février 2003, au cours d'un voyage à Kulusuk (côte est du Groenland).

LE TESLAMÈTRE

Pour mesurer la valeur du vecteur champ magnétique dans une petite région de l'espace assimilable à un point, on utilise un teslamètre muni d'une sonde à effet Hall.

DESCRIPTION

Lorsqu'un matériau appelé semi-conducteur est parcouru par un courant électrique tout en étant soumis à un champ magnétique, une tension électrique apparaît entre ses deux faces : c'est l'effet Hall.

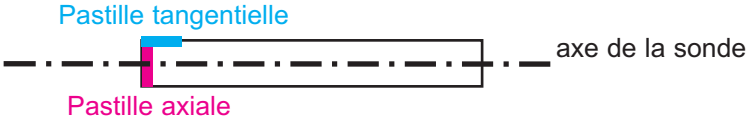
Cette tension de Hall est ici traitée électroniquement par un teslamètre qui l'amplifie et la convertit en unité de champ magnétique.

Une sonde à effet Hall est généralement formée d'une tige graduée en unité de longueur, à l'extrémité de laquelle est fixée une pastille de semi-conducteur : le capteur de Hall.

Si l'axe de la pastille est confondu avec l'axe de la tige, la sonde est dite axiale.

Si l'axe de la pastille est perpendiculaire à l'axe de la tige, la sonde est dite tangentielle.

Certaines sondes comportent deux pastilles : une axiale et l'autre tangentielle.



L'axe de la pastille tangentielle est perpendiculaire à l'axe de la sonde ; par contre l'axe de la pastille axiale est confondu avec celui de la sonde.

Réglage du zéro

Pour ne pas prendre en compte le champ magnétique terrestre, il est nécessaire, avant toute série de mesures, de s'assurer que le teslamètre indique une valeur nulle lorsque la sonde est éloignée de toute source de champ magnétique.

Dans le cas contraire, il faut régler le zéro de l'appareil, en se référant au protocole indiqué dans la notice d'utilisation.

Mesure du champ magnétique

- La mesure indiquée par le teslamètre correspond à la valeur de la composante du champ magnétique suivant l'axe de la pastille à effet Hall, à l'endroit où elle est placée.
- LUne sonde axiale est ainsi sensible à la valeur de la composante du vecteur champ magnétique suivant son axe. Une sonde tangentielle est sensible à la valeur de la composante du vecteur champ magnétique suivant un axe perpendiculaire à l'axe de la tige.

- Si l'axe de la pastille de mesure est orienté d'un angle a par rapport à la direction du champ magnétique au point considéré, la valeur mesurée est :

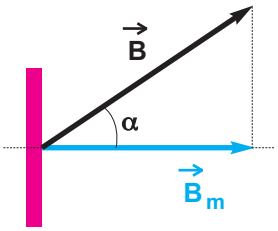
$$\|\vec{B}_m\| = \|\vec{B}\| \cos \alpha$$

- Si l'angle α est supérieur à **90°**, la valeur indiquée par le tesla-mètre est affectée d'un signe moins.

- En pratique, pour placer la sonde dans la direction et le sens du champ magnétique dont on veut mesurer la valeur, il faut chercher l'orientation de la sonde pour laquelle la valeur indiquée est maximale.

  On a alors :

  $\alpha = 0°$, $\cos \alpha = 1$ et $\|\vec{B}_m\| = \|\vec{B}\|$



Pastille à effet Hall

La sonde à effet Hall mesure la valeur de la composante $\vec{B}_m$

http://www.ipgp.jussieu.fr/pages/06030302.php
http://www.dinosoria.com/magnetisme.htm
http://www.discip.ac-caen.fr/physapp/lycee/1ie/kawa/tp14/tp14.htm
http://web.ncf.ca/ch865/frenchdescr/Solenoid.html
http://tboivin.free.fr/1s/doc/champsB_1S.doc
http://www.walter-fendt.de/ph11f/mfwire_f.htm

FORCE DE LAPLACE

1. Mise en évidence et caracteristiques

Activité expérimentale - 1 -

Dispositif exprimental

Le circuit du document ***1-a*** comporte :

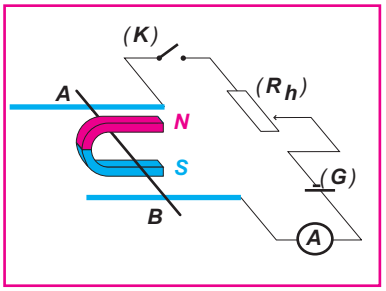
- deux rails horizontaux en cuivre, parallèles, reliés à un générateur de courant continu (**G**) par l'intermédiaire d'un rhéostat et un interrupteur (**K**), un ampèremètre (**A**) permettant de contrôler le passage du courant électrique.
- un barreau cylindrique (**AB**) en cuivre, rectiligne et homogène, reposant perpendiculairement sur les rails.

Un aimant en **U** est disposé tel que le barreau (**AB**) est placée dans l'entrefer ; le champ magnétique uniforme qui règne entre les deux branches de l'aimant est vertical, dirigé vers le bas et perpendiculaire au plan formé par les rails et le barreau.

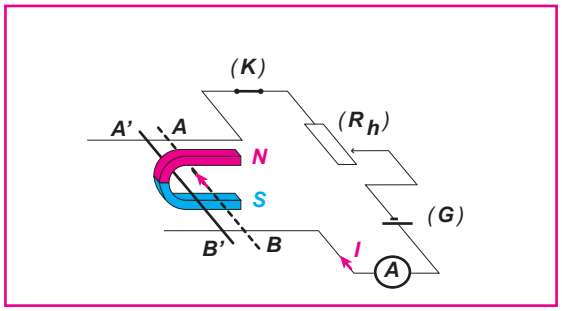
(**K**) ouvert : le barreau est immobile.

(**K**) fermé : le barreau se met en mouvement perpendiculaire aux rails, dans le sens indiqué dans le document ***1-b***.

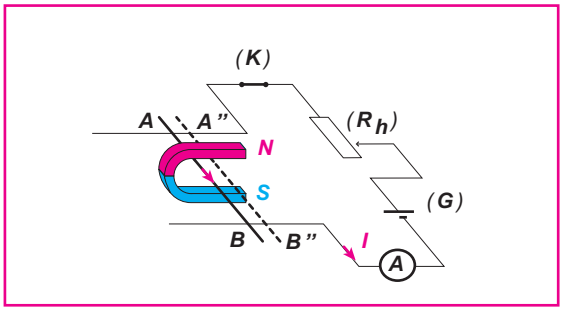
Inversons le sens de circulation du courant électrique en agissant sur les connexions établies aux bornes de (**G**) ; le déplacement du barreau a lieu dans le sens contraire (***Doc.1-b***).



Doc.1-a : le barreau (**AB**) placé dans un champ magnétique et non parcouru par un courant électrique ane se déplace pas.



Doc.1-b : le barreau (**AB**) placé dans un champ magnétique et parcouru par un courant électrique se déplace vers la position (**A'B'**).

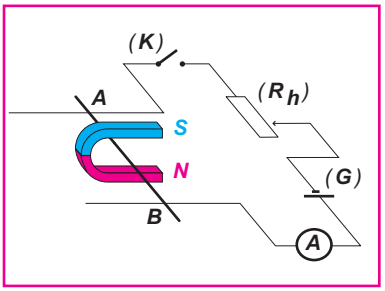


Doc.1-c : le barreau (**AB**) placé dans un champ magnétique et parcouru par un courant électrique se déplace vers la position (**A''B''**).

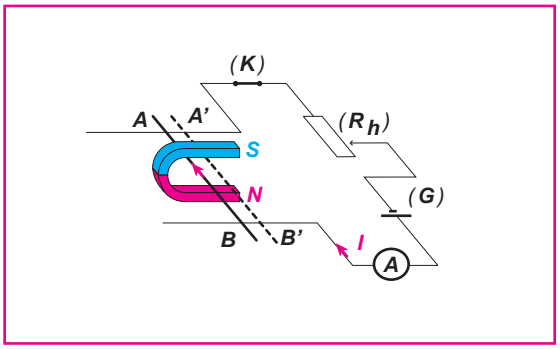
Dans le circuit du document ***1*-a** on change la disposition de l'aimant en **U** de sorte que le champ magnétique uniforme qui règne entre ses deux branches soit vertical et dirigé vers le haut (***Doc.2-a***)

(**K**) fermé : le barreau se met en mouvement perpendiculairement aux rails, dans le sens indiqué dans le document (***Doc.2-b***).

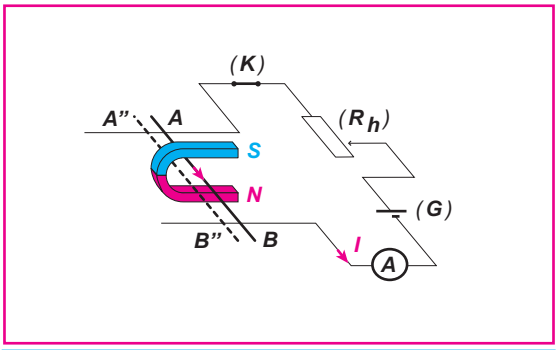
Inversons le sens de circulation du courant électrique en agissant sur les connexions établies aux bornes de (**G**) ; le déplacement du barreau a lieu dans le sens contraire (***Doc.2-c***).



Doc.2-a : le barreau (**AB**) placé dans un champ magnétique et non parcouru par un courant électrique ne se déplace pas.



Doc.2-b : le barreau (**AB**) placé dans un champ magnétique et parcouru par un courant électrique se déplace vers la position (**A'B'**).



Doc.2-c : le barreau (**AB**) placé dans un champ magnétique et parcouru par un courant électrique se déplace vers la position (**A''B''**).

Enfin si nous retirons l'aimant en **U** aussi bien dans le circuit du document ***1*-a** que celui du document ***2*-a**, le barreau (**AB**) reste immobile même si (**K**) est fermé.

Un conducteur parcouru par un courant électrique et placé dans un champ magnétique est soumis à une force magnétique appelée **force de Laplace.**

Point d'application

La force de Laplace est une action répartie : elle agit en chaque point du conducteur.

Dans un champ magnétique uniforme, l'ensemble des actions réparties est équivalent à une force unique représentée représentée par un vecteur $\vec{F}$ dont l'origine est le milieu de la portion de conducteur de longueur ℓ qui baigne dans le champ magnétique $\vec{B}$.

Notation

Un vecteur perpendiculaire au plan de la page et sortant sera représenté par un point dans un cercle.

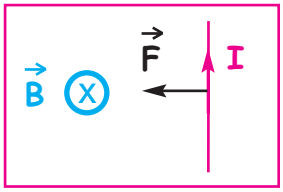
Par contre si le vecteur est rentrant il sera représenté par une croix dans un cercle

Direction

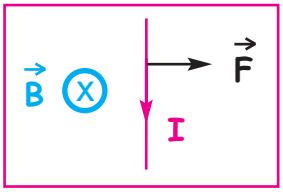
La direction de la force de Laplace est perpendiculaire au plan formé par la portion de conducteur de longueur ℓ parcouru par le courant électrique d'intensité I et la direction du vecteur champ magnétique $\vec{B}$.

Sens

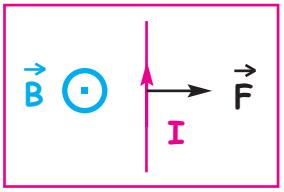
Les documents ***1*-b**, ***1*-c**, ***2*-b** et ***2*-c**, correspondent respectivement aux schémas des documents ***1*-b'**, ***1*-c'**, ***2*-b'** et ***2*-c'**.



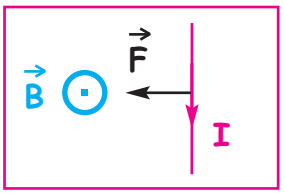
Doc.1-b'



Doc.1-c'



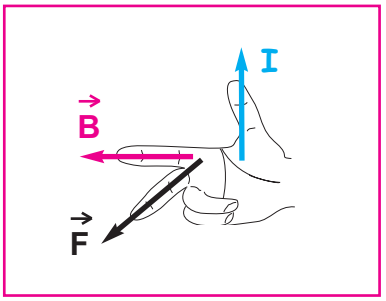
Doc.2-b'



Doc.2-c'

À partir de ces quatres documents, le sens du déplacement du fil conducteur, placé dans un champ magnétique uniforme et parcouru par un courant électrique, change selon le sens du vecteur champ magnétique et celui du courant électrique dans le fil conducteur.

Le sens de la force de Laplace est donné par une règle d'orientation, comme la règle des trois doigts de la main droite. Le pouce, le majeur et l'index sont disposés selon trois axes orthogonaux ; on leur associe respectivement les sens du courant électrique dans le fil conducteur, du vecteur champ magnétique et du vecteur force de Laplace (***Doc.3***).



Doc.3

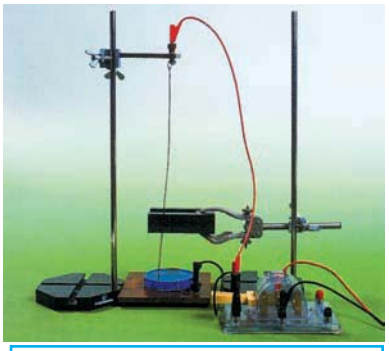
Pierre-Simon de LAPLACE

Il est né le 23 mars 1749 à Beaumont-en-Auge (Calvados). Ses recherches en mathématiques, sa participation à la création du système métrique, ... ses travaux sur l'électromagnétisme lui valurent une place méritée à l'Académie française.
Le 5 mars 1827 : Pierre-Simon de Laplace meurt à Paris, à l'âge de 78 ans.

Activité expérimentale - 2 -

Le circuit du document ***4-a*** comporte :

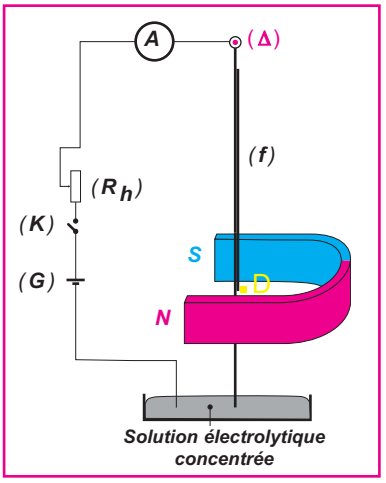
- un générateur de courant continu (**G**), un rhéostat (**Rh**), un interrupteur (**K**) et un ampèremètre (**A**).
- un fil (**f**) en cuivre rectiligne et homogène, suspendu par son extrêmité supérieure à un axe horizontal (Δ) qui lui est perpendiculaire et autour duquel il peut tourner librement ; l'autre extrêmité plonge dans une cuve contenant une solution électrolytique concentrée qui permet le passage du courant électrique tout en minimisant les frottements lors du mouvement de la tige.



Dispositif exprimental

L'un des fils de connexion est mis en contact avec l'extrêmité supérieure du fil (**f**), un autre fil de connexion plonge dans la solution conductrice.

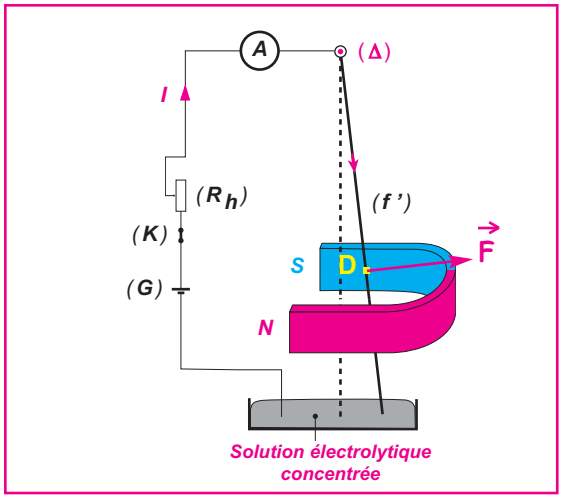
L'aimant en **U** est disposé tel que le fil (**f**) est placé dans l'entrefer ; le vecteur champ magnétique uniforme qui règne entre les deux branches de l'aimant est horizontal, parallèle à (Δ) et rentrant.



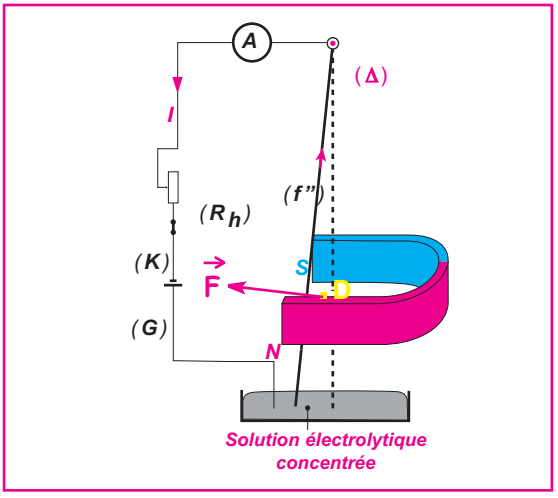
Doc.4-a : le fil conducteur (**f**) placé dans un champ magnétique et non parcouru par un courant électrique ne se déplace pas.

(**K**) ouvert : le fil (**f**) est immobile selon la verticale.

(**K**) fermé : le fil (**f**) s'écarte de la verticale dans le sens indiqué dans le document ***4-b***.
Inversons le sens de circulation du courant électrique en agissant sur les connexions établies aux bornes de (**G**), le déplacement du fil (**f**) a lieu dans le sens contraire (***Doc.4-c***).



Doc.4-b : le fil conducteur placé dans un champ magnétique et parcouru par un courant électrique subit une déviation et occupe la position (**f'**).



Doc.4-c : le fil conducteur placé dans un champ magnétique et parcouru par un courant électrique subit une déviation et occupe la position (**f"**).

Les expériences associées aux documents ***4-b*** et ***4-c*** confirment le sens donné à la force de Laplace en utilisant la règle des trois doigts de la main droite.

Intensité de la force de Laplace

Considérons le circuit du document ***4-b*** et réalisons les expériences suivantes :

Expérience 1 :

Augmentons l'intensité **I** du courant électrique en agissant sur le rhéostat, et vérifions que l'inclinaison du fil (**f**) augmente.

La valeur de la force de Laplace agissant sur le fil (**f**) augmente lorsque l'intensité **I** du courant électrique qui le parcourt augmente.

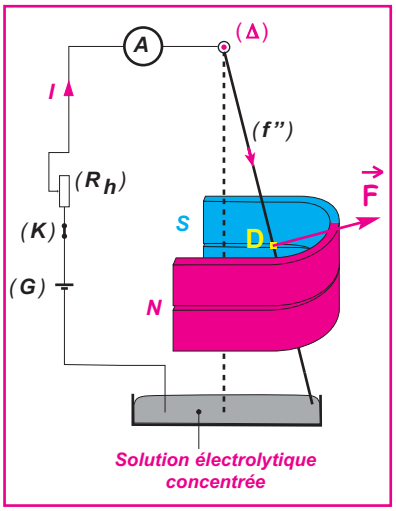
Expérience 2 :

Gardons l'intensité **I** du courant électrique constante et plaçons, au-dessus du premier aimant, un autre aimant identique afin de doubler la longueur ℓ de la portion de fil conducteur qui baigne dans le champ magnétique uniforme.

Les deux aimants seront disposés de telle sorte que le point d'application **D** de la force de Laplace garde la même position par rapport à l'axe de rotation (Δ) (***Doc.5-a***).

Vérifions que l'inclinaison du fil (**f**) augmente.

La valeur de la force de Laplace agissant sur le fil (**f**), augmente lorsque la longueur ℓ de la portion de fil conducteur placée dans le champ magnétique augmente.



Doc.5-a

Expérience 3 :

Gardons l'intensité **I** du courant électrique constante et remplaçons le premier aimant par un autre aimant générant un champ magnétique plus important.

Vérifions que l'inclinaison du fil (**f**) augmente.

La valeur de la force de Laplace agissant sur le fil (**f**), augmente lorsque l'intensité du vecteur champ magnétique, dans lequel il baigne, augmente.

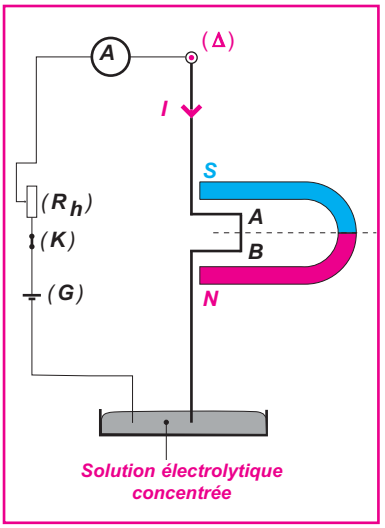
Expérience 4 :

Donnons au fil conducteur la forme indiquée dans le document **5-b**. La portion (**AB**) est disposée de sorte qu'elle baigne totalement dans le champ magnétique uniforme qui règne entre les deux branches de l'aimant en **U**.

Les lignes de champ sont parallèles à (**AB**).

(**K**) ouvert : aucune déviation du fil conducteur par rapport à sa position d'équilibre verticale.

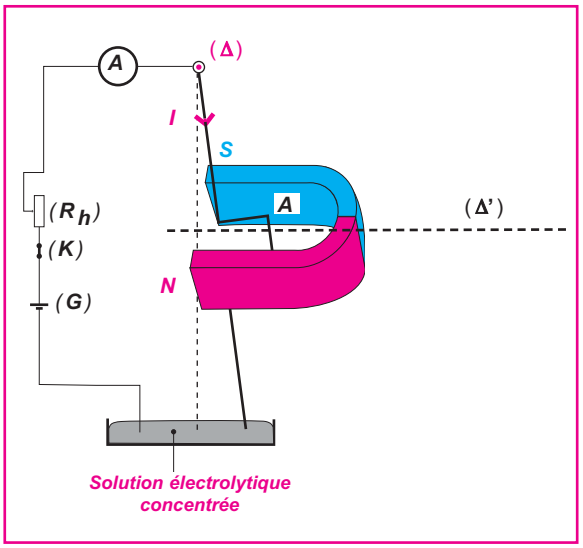
(**K**) fermé : le fil conducteur ne quitte pas cette position d'équilibre.



Doc.5.b

Faisons tourner lentement l'aimant en **U** autour de son axe de symétrie (Δ'). On observe une déviation du fil conducteur par rapport à la verticale qui augmente lorsque l'angle aigu α formé par le vecteur champ magnétique $\vec{B}$ et la portion de fil conducteur (**AB**) augmente de **0** à **90°**.

On vérifie que la valeur de la force de Laplace $\vec{F}$ est proportionnelle à sin α.

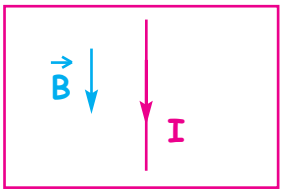


L'intensité de la force de Laplace est donnée par la relation

$$\|\vec{F}\| = I.\ell.\|\vec{B}\|.\sin\alpha$$

Le champ magnétique dans lequel baigne la portion de fil conducteur parcouru par le courant électrique connu, est uniforme.

$\|\vec{F}\|$ en **N** ; **I** en **A** ; ℓ en **m** et $\|\vec{B}\|$ en **T**

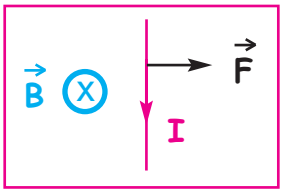


Doc.5-c

Cas particuliers :

* $\alpha = 0$: le vecteur champ magnétique est parallèle au conducteur rectiligne parcouru par le courant électrique (***Doc.5-c***).

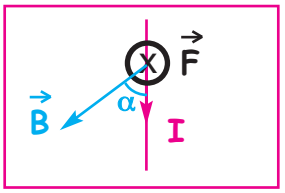
$$\|\vec{F}\| = 0$$



Doc.5-d

* $\alpha = \frac{\pi}{2}$ **rad** : le vecteur champ magnétique est perpendiculaire au conducteur rectiligne parcouru par le courant électrique (***Doc.5-d***).

$$\|\vec{F}\| = I.\ell.\|\vec{B}\|$$



Doc.5-e

* $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$ **rad** : seule la composante du vecteur champ magnétique normale à l'élément de fil conducteur qui baigne dans le champ magnétique uniforme se manifeste par une force de Laplace (***Doc.5-e***).

2. Application: le moteur électrique à courant continu

2.1. Expérience de la roue de Barlow

Cet "ancêtre" des moteurs électriques comporte :

- un disque en cuivre qui est mobile autour d'un axe matérialisé par une tige en cuivre disposée horizontalement ; la partie inférieure du disque plonge légèrement dans une cuve contenant une solution électrolytique concentrée (***Photo.1-a*** *et* ***1-b***).
- L'axe de rotation et la solution conductrice sont mis au contact des deux bornes d'un générateur de courant continu (**G**) par l'intermédiaire d'un rhéostat (**Rh**) permettant de faire varier l'intensité du courant électrique qui circule dans le circuit électrique ainsi formé et d'un interrupteur (**K**) ; un ampèremètre (**A**) permet de contrôler le passage du courant électrique.
- Une partie du disque est placée dans l'entrefer d'un aimant en **U** de telle sorte que le vecteur champ magnétique uniforme $\vec{B}$ qui y règne soit perpendiculaire au disque (***Doc.6-a***) et (***Doc.6-b***).

Photo.1-a : roue de Barlow

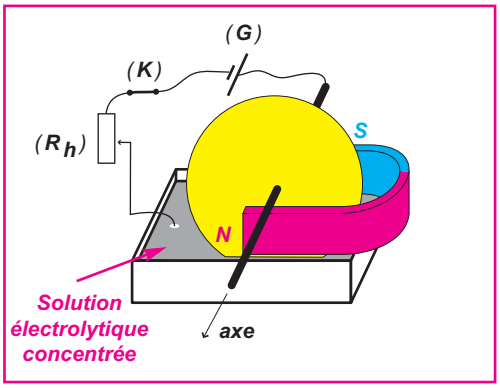
Photo.1-b :

(**K**) ouvert : le disque est immobile.

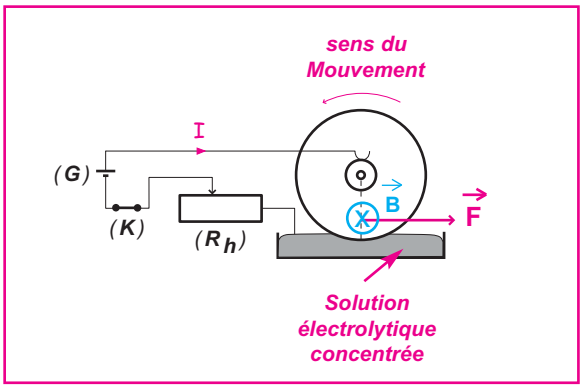
(**K**) fermé : le disque se met en mouvement de rotation.

Si on inverse le sens du courant électrique en agissant sur les connexions établies aux bornes de (**G**), le mouvement du disque est inversé. Il en est de même si l'on ne touche pas aux connexions de (**G**) mais si on inverse le sens de $\vec{B}$ en agissant sur la disposition de l'aimant en **U**.

Peter Barlow
Mathématicien et physicien britannique (Norwich 1776-Woolwich 1862).
Il imagina (1828) un appareil permettant de mettre en évidence l'action d'un champ magnétique sur un courant électrique (roue de Barlow).



Doc.6-a

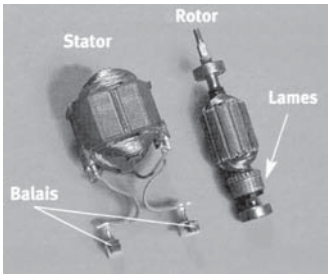


Doc.6-b

La zone de conducteur parcourue par un courant d'intensité **I**, qui suit approximativement un rayon de la roue, est soumise au vecteur champ magnétique $\vec{B}$ qui lui est perpendiculaire. La force de Laplace a un moment moteur par rapport à l'axe de la roue et celle-ci se met à tourner.

Il y a transformation de l'énergie électrique en énergie cinétique de rotation.

2.2. Le moteur à courant continu



Composition

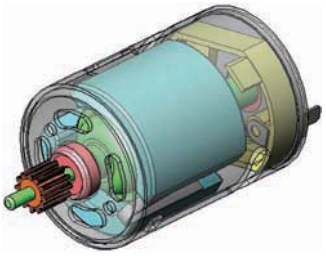
Un moteur à courant continu est constitué essentiellement d'une partie mobile et d'une partie fixe :

Partie mobile (le rotor)

Elle comporte une ***boucle de fil conducteur*** rigide dont les deux extrêmités sont reliées à deux demi-cylindres conducteurs (C_1) et (C_2) séparés par un isolant et appelés ***lames du collecteur*** ; l'ensemble tourne librement autour d'un axe fixe, appelé ***axe de rotation*** de la spire ou du rotor dans son ensemble.

Partie fixe (le stator)

Cette partie fixe du moteur, constituée d'un aimant ou d'un électroaimant, permet de faire régner un champ magnétique uniforme dans l'espace occupé par la boucle de fil conducteur.



moteur à courant continu

Un circuit électrique comporte un générateur électrique de tension continu ***(G)***, un interrupteur ***(K)***, et deux ***balais*** conducteurs fixes.

Lorsque la boucle de fil conducteur tourne, le contact électrique entre cette boucle et (**G**) est assuré par l'intermédiaire des deux lames et des deux balais.

Principe de fonctionnement

Considérons la partie mobile (le rotor) dans trois positions.

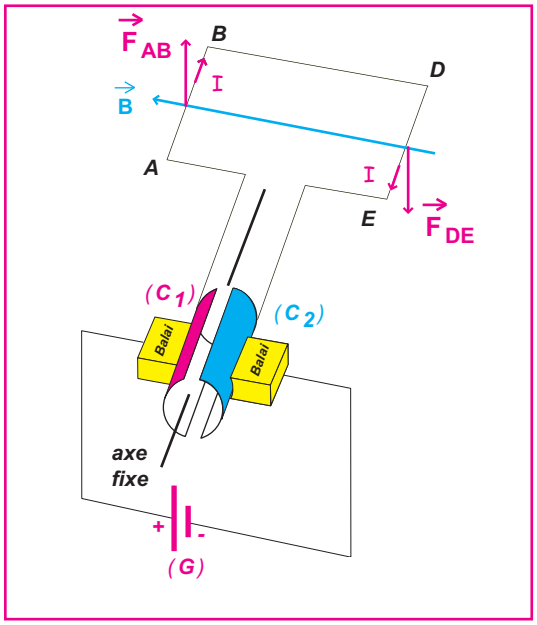
Position -1- (*Doc.7-a*)

Le contact entre la lame (C_1) et le balai relié à la borne (**+**) de (**G**) est tel que le courant électrique d'intensité **I** circule de **A** vers **B** dans la boucle de fil conducteur.

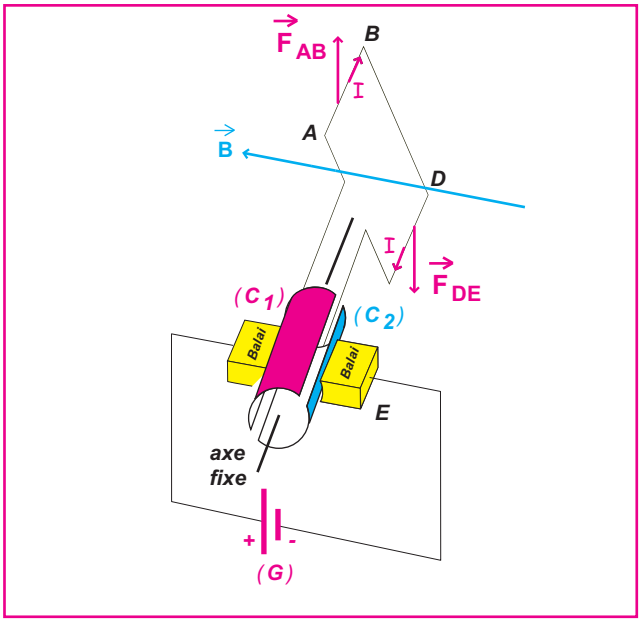
L'action du vecteur champ magnétique $\vec{B}$ sur la portion de fil conducteur (**AB**) est une force de Laplace $\vec{F}_{AB}$ alors que celle exercée sur la portion de fil conducteur (**DE**) est une force de Laplace $\vec{F}_{DE}$.

Pour chacune des deux forces, le sens est déterminé à l'aide de la règle des trois doigts de la main droite.

L'ensemble des deux forces constituent un couple de force provoquant la rotation de la boucle de fil conducteur dans le sens de rotation des aiguilles d'une montre.



Doc.7-a



Doc.7-b

Position -2- (*Doc.7-b*)

La lame (C_1) est encore en contact avec le balai relié à la borne (**+**) de (**G**) et le couple de forces de Laplace provoque le même phénomène de rotation.

Position -3- (*Doc.7-c*)

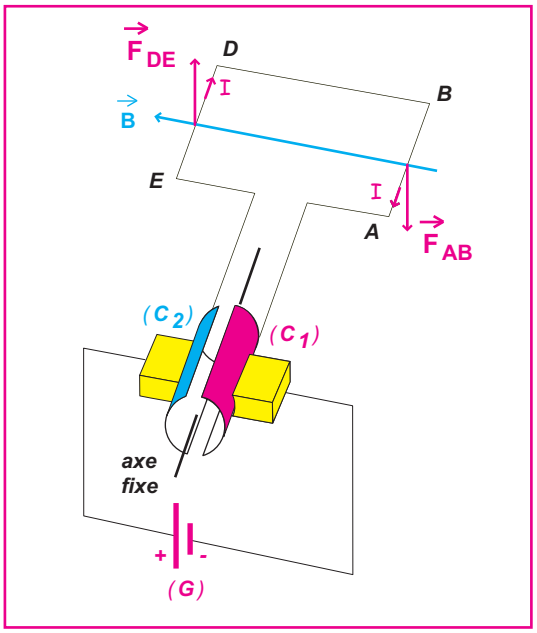
La lame (C_1) se trouve en contact avec le balai relié à la borne (**–**) de (**G**) ; pour chacune des deux forces, le sens est inversé et le couple de forces de Laplace est tel que le mouvement de rotation continue dans le même sens.

Conclusion

Grâce au collecteur, il ya changement du sens de circulation du courant électrique à chaque demi-tour ; le couple de forces de Laplace conduit à un mouvement de rotation du rotor dans le même sens car le moment de ce couple ne change pas ainsi de signe.

Dans un moteur à courant continu, on utilise de l'énergie électrique pour faire tourner le rotor.

Le moteur électrique est donc un convertisseur d'énergie électrique en énergie cinétique de rotation.



Doc.7-c

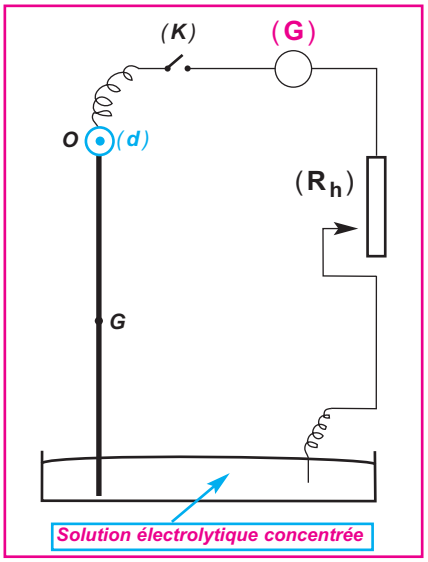
EXERCICE RÉSOLU

ENONCÉ :

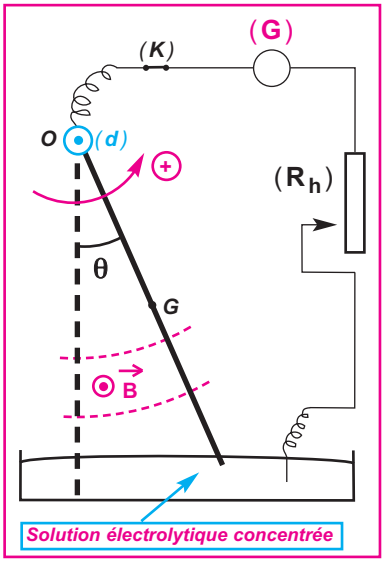
Un fil conducteur en cuivre rigide et homogène, de masse **m**, de longueur ℓ, est suspendu par son extrêmité supérieure en **O** à un axe fixe (**d**), autour duquel il peut touner librement ; sa partie inférieure plonge dans une cuve contenant une solution électrolytique concentrée lui permettant de faire partie d'un circuit électrique comprenant un rhéostat (R_h) et un générateur de tension continue (**G**) (**Doc 8-a**).

(**K**) ouvert : le fil conducteur occupe sa position d'équilibre stable suivant la verticale.

(**K**) fermé : le fil conducteur est parcouru par un courant continu d'intensité **I**. Sur une longueur de **2 cm**, entre deux points situés à **19 cm** et **21 cm** de **O**, règne un champ magnétique uniforme horizontal tel que le vecteur champ magnétique est normal à la figure et sortant (**Doc 8-b**).



Doc.8-a



Doc.8-b

1- a - Reproduire le schéma du document (**8-b**), et indiquer le sens du courant électrique qui circule dans le fil conducteur ainsi que les polarités de (**G**).

- b - Représenter les forces qui s'exercent sur le fil conducteur dans sa position d'équilibre.

2- Calculer l'angle θ que fait la verticale avec le fil conducteur lorsqu'il est à l'équilibre.

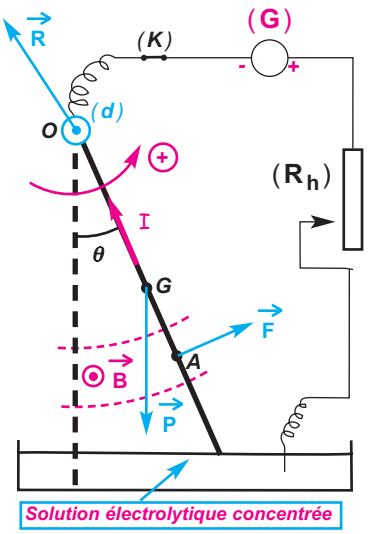
On donne : **I = 5 A** , ℓ = **25 cm** , **m = 8 g** , $\|\vec{B}\|$ = **0,05 Tesla**.

SOLUTION	
1-a- Détermination du sens du courant électrique En appliquant la règle des trois doigts de la main droite, le courant électrique circule de **G** vers **O**. Les polarités de (**G**) sont indiquées dans le document **8-c**.	

-b- Les forces qui s'exercent sur le fil conducteur à l'équilibre

Les forces qui s'exercent sur le fil conducteur à l'équilibre sont :

- Le poids $\vec{P}$
- La force de Laplace $\vec{F}$: s'applique au point **A** milieu de la portion de fil conducteur baignant dans le champ magnétique
- la réaction $\vec{R}$ de l'axe fixe (**d**) (**Doc 8-c**).



Doc.8-c

2- Etude de l'équilibre du fil conducteur

Système : {fil conducteur}.

Forces extérieures : $\vec{P}$, $\vec{F}$ et $\vec{R}$.

Appliquons le théorème des moments au système

$\Sigma[\mathcal{M}(\vec{\mathcal{F}}_{extérieures})/(d)] = 0$ (**Doc 8-d**).

$\mathcal{M}(\vec{R})/(d) = 0$ car cette force coupe l'axe de rotation.

$\mathcal{M}(\vec{F})/(d) = \|\vec{F}\| . \|\vec{OA}\|$

$\mathcal{M}(\vec{P})/(d) = - \|\vec{P}\| . \|\vec{OH}\|$

$\|\vec{OA}\| = 0{,}2$ m

$\|\vec{OH}\| = \|\vec{OG}\| . \sin\theta$

$\|\vec{F}\| . \|\vec{OA}\| - m \|\vec{g}\| . \|\vec{OG}\| \sin\theta = 0$

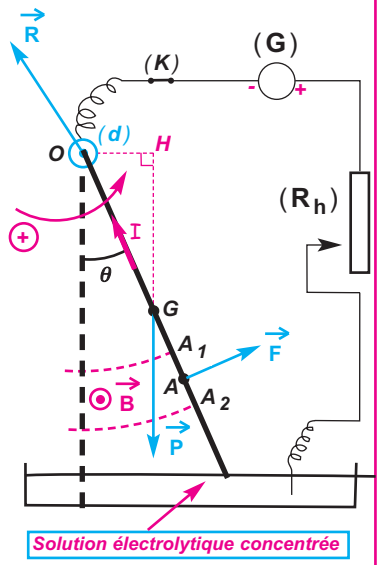
$$\text{d'où } \sin\theta = \frac{\|\vec{F}\| \, \|\vec{OA}\|}{m \, \|\vec{g}\| \, \|\vec{OG}\|}$$

$$\text{or } \|\vec{F}\| = I . A_1A_2 . \|\vec{B}\| \sin(\text{élément de conducteur}, \vec{B})$$

$$= I . A_1A_2 . \|\vec{B}\|$$

$$\boxed{\sin\theta = \frac{I . A_1A_2 . \|\vec{B}\| . \|\vec{OA}\|}{m . \|\vec{g}\| . \|\vec{OG}\|}}$$

Application numérique : $\sin\theta = 0{,}102$ d'où $\boxed{\alpha = 5{,}8°}$



Doc.8-d

L'ESSENTIEL

Un élément de circuit rectiligne, de longueur ℓ, parcouru par un courant d'intensité **I** et placé dans un champ magnétique $\vec{B}$, est soumis à une force magnétique $\vec{F}$ appelée force de Laplace.

Caractéristiques de la force magnétique $\vec{F}$:

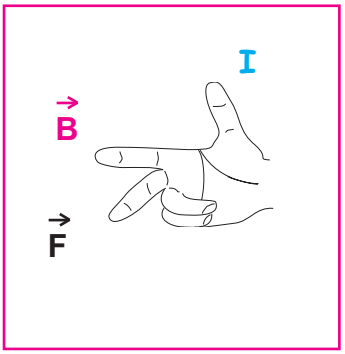
Direction

Elle est perpendiculaire au plan formé par l'élément de conducteur de longueur ℓ parcouru par le courant électrique d'intensité **I** et la direction du vecteur champ magnétique $\vec{B}$.

Sens

Il est donné par la règle des trois doigts de la main droite :

- le pouce indique le sens du courant électrique
- l'index indique le sens du vecteur champ magnétique
- le majeur indique le sens du vecteur force de Laplace.



Intensité

Lorsque le champ magnétique est uniforme, elle est donnée par la relation

$$\|\vec{F}\| = I.\ell.\|\vec{B}\|.\sin\alpha \quad \text{avec} \quad \alpha = (\text{élément de conducteur}, \vec{B})$$

$\|\vec{F}\|$ en **N**
I en **A**
ℓ en **m**
$\|\vec{B}\|$ en **T**

Origine du vecteur force $\vec{F}$

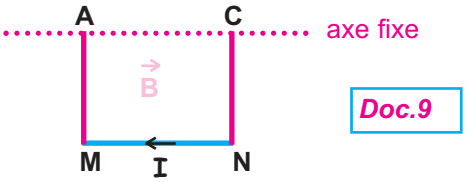
C'est le milieu du segment de longueur ℓ placé dans la région où règne le champ magnétique uniforme.

EXERCICES

Je vérifie mes connaissances

Choisir la (ou les) proposition(s) correcte(s)

1- Un conducteur (**AMNC**) est composé de trois parties rectilignes de même section formant trois côtés d'un rectangle, parcouru par un courant continu et pouvant tourner sans frottement autour d'un axe fixe horizontal passant par **A** et **C** ; un dispositif approprié permet de faire circuler un courant **I** de **N** vers **M** (***Doc.9***).



Doc.9

Placé dans un champ magnétique uniforme, le cadre quitte sa position d'équilibre stable si le vecteur champ magnétique $\vec{B}$:

a - est parallèle à (**MN**).

b - a une direction perpendiculaire au plan vertical contenant l'axe fixe de rotation et dirigé de l'arrière vers l'avant.

c - est vertical.

2- On considère la force de Laplace subie par un conducteur rectiligne parcouru par un courant électrique continu d'intensité **I** et placé dans un champ magnétique uniforme.

La force de Laplace :

a - a une valeur proportionnelle à celle du vecteur champ magnétique.

b - a une valeur maximale quand le conducteur est parallèle au vecteur champ magnétique.

c - est parallèle au vecteur champ magnétique.

d - a un sens qui dépend de celui du courant électrique.

e - a une valeur qui dépend de celle de **I**.

f - a une valeur proportionnelle à celle de **I**.

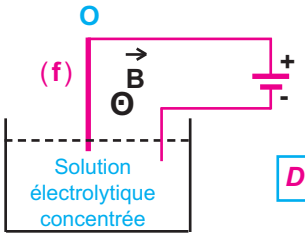
3- Dans l'expérience de la barre conductrice placée sur deux rails parallèles et baignant dans un champ magnétique uniforme, le déplacement de la barre a lieu :

a - si le vecteur champ magnétique est parallèle à la barre parcourue par un courant électriqe.

b - si la barre n'est pas traversée par un courant électrique.

c - si la barre est parcourue par un courant électrique, et le vecteur champ magnétique est perpendiculaire au plan formé par la barre conductrice et les rails.

4-



Doc.10

(**f**) est un fil de cuivre rigide et homogène susceptible de se mouvoir dans un plan vertical autour d'un axe horizontal, perpendiculaire au plan de la figure et passant par son extrêmité **O** (***Doc.10***).

Il peut s'écarter de sa position d'équilibre si :

a - $I \neq 0$ et $\|\vec{B}\| = 0$.

b - $I = 0$ et $\|\vec{B}\| \neq 0$.

c - $I \neq 0$ et $\|\vec{B}\| \neq 0$.

5- La force de Laplace :

a - n'est pas toujours perpendiculaire au plan formé par $\vec{B}$ et l'élément de conducteur parcouru par le courant d'intensité **I**.

b - a un sens qui peut être donné par la règle des trois doigts de la main droite.

c - peut être nulle.

J'applique mes connaissance et je raisonne

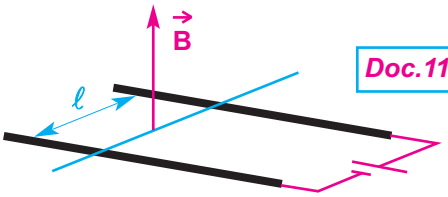
Ex-1- Dans l'expérience des rails de Laplace, la tige de masse m = **50 g**, placée dans le champ magnétique uniforme, a une longueur ℓ **= 8 cm** (***Doc.11***). Le vecteur champ magnétique a une valeur égale à **0,02 T**, et l'intensité du courant électrique continu est **I = 10 A**

1 - Donner les caractéristiques de la force de Laplace.

2 - Comparer sa valeur à celle du poids de la barre.

Donnée : intensité du champ de pesanteur :

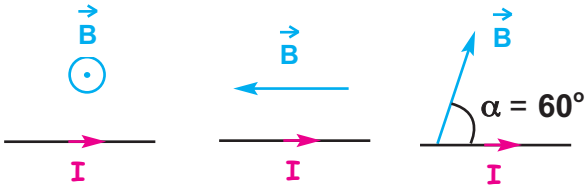
$$\|\vec{g}\| = 9{,}8\ N.kg^{-1}$$



Doc.11

Ex-2- Un conducteur rectiligne de longueur ℓ **= 20 cm**, parcouru par un courant électrique d'intensité **I = 1,5 A** est plongé dans un champ magnétique uniforme.

Dans chacun des cas représentés par les documents **12-a**, **12-b** et **12-c**, déterminer la direction, le sens et la valeur de la force de Laplace subie par le conducteur, sachant que la valeur du vecteur champ magnétique uniforme est égale à **200 mT**.



Doc.12-a ***Doc.12-b*** ***Doc.12-c***

Ex-3- Un conducteur (**AMNC**) est composé de trois parties rectilignes de même section, de même masse **m** et de longueur ℓ, formant trois côtés d'un carré pouvant tourner sans frottement autour d'un axe fixe horizontal passant par **A** et **C**. Ces deux extrêmités sont reliées á un dipôle comprenant un générateur de tension continue (**G**), un rhéostat (**Rh**), un ampèremètre (**A**) et un interrupteur (**K**). Le cadre baigne dans un champ magnétique uniforme (***Doc.13-a***).

(**K**) ouvert : le cadre occupe une position d'équilibre stable et verticale contenant l'axe fixe horizontal.

(**K**) fermé : le cadre occupe la position vue de profil et indiquée dans le document ***13-b***.

1 - Recopier le schéma du document ***13-b*** sur lequel on annotera le sens du courant électrique d'intensité **I** sur le côté **AM**.

2 - Exprimer **tgθ** en fonction de **m**, **I**, ℓ, $\|\vec{B}\|$ et $\|\vec{g}\|$.

Données :

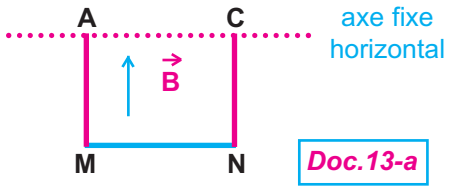
m = 6 g

I = 1 A

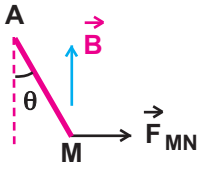
ℓ **= 12 cm**

$\|\vec{B}\| = 0{,}2\ T$.

$\|\vec{g}\| = 9{,}8\ N.kg^{-1}$



Doc.13-a



Doc.13-b

Ex-4- Le montage du document **14** comporte un dipôle (**D**) permettant de faire circuler un courant continu d'intensité **I** dans la barre (**t**) reposant sur deux rails conducteurs ; l'ensemble baigne dans un champ magnétique uniforme vertical et dirigé vers le haut.
Pour empêcher la barre (**t**) de se déplacer sous l'effet de la force de Laplace on l'attache à un contrepoids (**C**) de masse **M** par l'intermédiaire d'un fil inextensible et de masse négligeable passant sur la gorge d'une poulie.
L'ensemble des frottements exercés par les rails sur la barre (**t**) est équivalent à une force de valeur $\|\vec{f}\|$ = **0,5 N**.

1 - Recopier le schéma et annoter le sens du courant électrique qui circule dans la barre (**t**).

2 - Déterminer la valeur de **M** pour que la barre soit en équilibre.

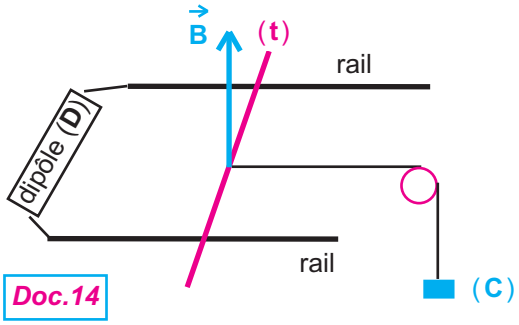
Données :

$\|\vec{g}\|$ = **9,8 N.kg^{-1}**

I = 10 A

$\|\vec{B}\|$ = **1T**.

distance entre les deux rails ℓ = **12 cm**.



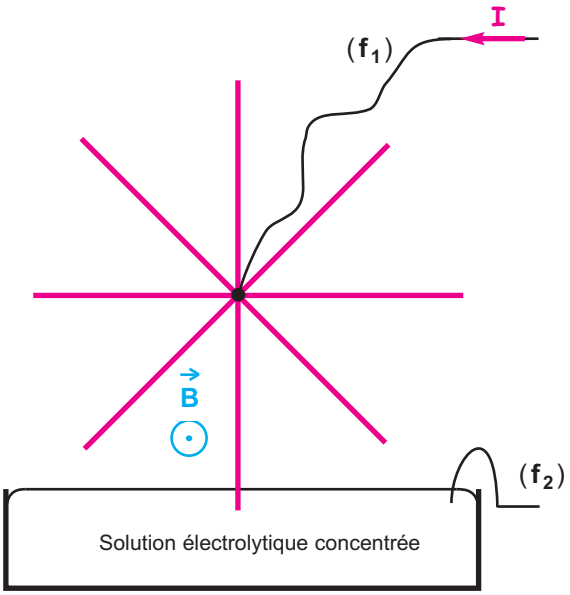
Doc.14

Ex-5- Une roue de Barlow est formée de huit rayons conducteurs identiques de longueur ℓ = **4 cm** et également répartis autour de son axe horizontal. Seule la partie inférieure de la roue plonge dans une solution électrolytique concentrée.
Les deux fils de connexions (f_1) et (f_2) sont reliées á un dipôle comprenant, en série, un générateur de tension continue (**G**), un rhéostat (**Rh**), un ampèremètre (**A**) et un interrupteur (**K**).
Ceci assure la circulation d'un courant électrique continu d'intensité **I = 10 A** dans le rayon immergé dans la solution conductrice.
L'ensemble est placé dans un champ magnétique uniforme (***Doc.15***).

1 - Représenter le vecteur force de Laplace s'exerçant sur le rayon dont l'extrêmité inférieure plonge dans la solution conductrice.

2 - Indiquer le sens du mouvement de la roue de Barlow.

3 - Calculer la valeur de cette force de Laplace, sachant que la valeur du vecteur champ magnétique est égale à **200 mT**.



Doc.15

Ex-6- Etude d'un texte scientifique : " Une expérience électromagnétique curieuse "

Le 13 mars 1822; le nom de Peter Barlow est maintenant attaché à la découverte d'un dispositif qu'il a qualifié lui-même de curieux, la roue de Barlow. Comme de nombreux scientifiques de sa génération il a travaillé sur l'électricité et l'électromagnétisme. ….
Voici comment P. Barlow décrit le dispositif, et son fonctionnement
Une roue dentée conductrice verticale, placée dans l'entrefer d'un aimant en U, peut tourner autour de son axe horizontal. Les extrémités de son axe, taillées en pointes, entrent dans deux trous coniques pratiqués dans un support conducteur. " La partie inférieure de la roue plonge dans une couche de mercure de faible épaisseur, que l'on recouvre d'un peu d'acide nitrique diluée ".
" Le support conducteur et le mercure sont placés dans un circuit en série avec une pile. Le courant électrique(…) peut traverser la roue soit du centre à la circonférence, soit de la circonférence au centre "

1- Quelles sont les caractéristiques du champ magnérique dans l'entrefer de l'aimant en U ?
2- En l'absence de courant électrique, l'aimant exercerait-il une action sur le disque de cuivre ?
3- Quel est le rôle du mercure ?
4- Faire le schéma du dispositif sans représenter l'aimant. Représenter le trajet du courant électrique.
5- Où les forces de Laplace qui provoquent la rotation du disque s'appliquent-elles principalement ? Quels sont leur direction et leur sens ?
6- Si on renverse le sens du courant ou qu'on retourne l'aimant, la rotation de la roue change -t-elle de sens.Pourquoi la roue se met en mouvement ?

POUR EN SAVOIR PLUS

La balance de Cotton

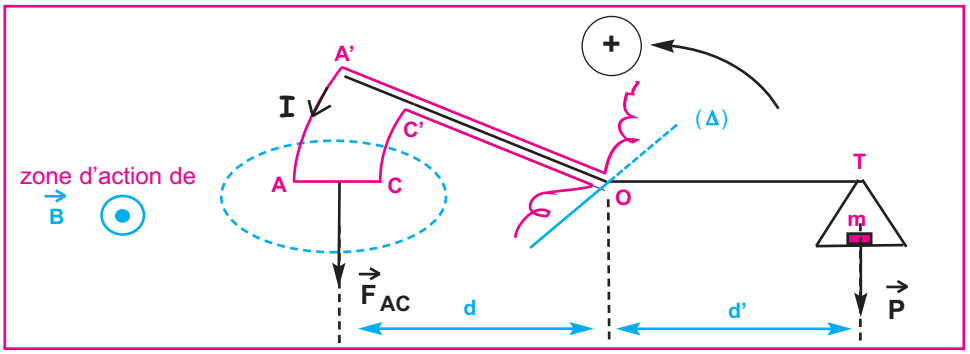
C'est une application à la mesure de la valeur du vecteur champ magnétique en un point de l'espace où règne un champ magnétique.

Description

Une balance de Cotton est constituée par un fléau rigide coudé (**TOA'**) qui porte une plaquette isolante **A'ACC'** et susceptible de tourner en **O** autour d'un axe fixe (Δ).

L'un des bras du fléau porte un fil conducteur appliqué le long de **OA'ACC'O** tel que $\overset{\frown}{AA'}$ et $\overset{\frown}{CC'}$ sont des arcs de cercle de centre **O**, alors que **AC**, **OA'** et **OC'** sont des parties rectilignes. L'autre bras du fléau supporte un plateau susceptible de recevoir des masses marquées.

Le brin de fil conducteur rectiligne **AC** de longueur ℓ baigne dans un champ magnétique uniforme pouvant être l'espace intérieur d'un aimant en **U** et tel que le vecteur champ magnétique $\vec{B}$ soit horizontal, sortant et normal à **AC** (***Doc.16***).



Doc.16: balance de Cotton

Etude théorique

- En l'absence de tout courant électrique dans le conducteur **OA'ACC'O** et de toute surcharge sur le plateau, il y a équilibre.
- Faisons circuler un courant continu d'intensité **I** dirigé de **A** vers **C**. Le vecteur champ magnétique exerce des forces magnétiques sur les différentes portions du cadre conducteur baignant dans l'espace où règne le champ magnétique :

Le brin rectiligne **AC** est soumise à une force $\vec{F}_{AC}$ de valeur $I.\ \ell.\|\vec{B}\|$, dirigé vers le bas. L'effet de cette force est déterminé par son moment par rapport à (Δ) de valeur

$$\mathcal{M}(\vec{F}_{AC}/(\Delta)) = I.\ \ell.\|\vec{B}\|.\ d$$

Sur les brins $\overset{\frown}{AA'}$ et $\overset{\frown}{CC'}$ s'exercent aussi des forces magnétiques ; décomposons ces brins circulaires en éléments de longueurs très petits, assimilables à de petits segments de droites ; sur un tel élément, de longueur $d\ell$, s'applique une force de valeur $I.\ d\ell.\|\vec{B}\|$ dirigée vers **O** et donc de moment par rapport à (Δ) nul donc sans effet sur la rotation du fléau. Il en est de même de toutes les forces élémentaires qui s'exercent le long de $\overset{\frown}{AA'}$ et $\overset{\frown}{CC'}$.

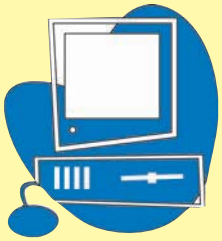
Les actions magnétiques sont donc caractérisées uniquement par $\mathcal{M}(\vec{F}_{AC}/(\Delta))$; le bras du fléau gauche bascule vers le bas. Pour équilibrer la balance, il faut ajouter dans le plateau une masse marquée de valeur **m** ; le moment de son poids par rapport à (Δ) est $\mathcal{M}(\vec{P}/(\Delta)) = -\,m\,.\,\|\vec{g}\|\,.\,d'$

Condition d'équilibre du fléau : $\mathcal{M}(\vec{P}/(\Delta)) + \mathcal{M}(\vec{F}_{AC}/(\Delta)) = 0$

$$I.\,\ell\,.\|\vec{B}\|.\,d - m.\,\|\vec{g}\|\,.\,d' = 0$$

d'où $$\|\vec{B}\| = \frac{m.\,\|\vec{g}\|\,.d'}{I.\,\ell\,.\,d}$$

Balance de Cotton



http://e.m.c.2.free.fr/laplace3.htm
http://artic.ac-besancon.fr/Sciences_physiques/tice/Laplace%20TICE/Page%20accueil%20LAPLACE.htm
http://www.lerepairedessciences.fr/lycee/Premiere_S/premS_cours/magnetisme_fichiers/barlow.swf
http://www.lerepairedessciences.fr/lycee/Premiere_S/premS_cours/PHY1S_Magn_1.htm
http://www.lerepairedessciences.fr/lycee/Premiere_S/premS_cours/magnetisme_fichiers/rails.swf
http://formation.paysdelaloire.iufm.fr/ressources/plp/maths_sciences/animation_explorer/barlow_ind.html
http://www.walter-fendt.de/ph11f/lorentzforce_f.htm

3 INTERACTION GRAVITATIONNELLE

À l'illustre savant anglais Isaac NEWTON revient la gloire de la découverte de la gravitation universelle : la chute des corps à la surface de la Terre, le mouvement des planètes, le flux et le reflux de la mer, ont dû lui livrer leurs secrets ...

Quelle plus belle contribution apporter au développement de la Science que l'explication du système du monde !

Les satellites de Jupiter

OBJECTIFS

- Appliquer la loi de gravitation universelle.
- Caractériser le vecteur champ de gravitation $\vec{G}$ en un point de l'espace.
- Représenter les lignes du champ de gravitation.
- Caractériser le vecteur champ de pesanteur $\vec{g}$ en un point de l'espace.
- Reconnaître les facteurs dont dépend le poids $\vec{P}$.
- Expliquer certains phénomènes naturels observables dus à l'interaction gravitationnelle.
- Faire une analogie formelle entre les interactions newtonienne et coulombienne.

INTERACTION GRAVITATIONNELLE

1. Forces de gravitation universelle

1.1 . Loi de gravitation universelle

En 2ème année nous avons vu que tous les corps pourvus de masse sont susceptibles d'exercer entre eux des actions mécaniques : il s'agit des forces gravitationnelles régies par une loi énoncée par **Isaac NEWTON** en **1687**.

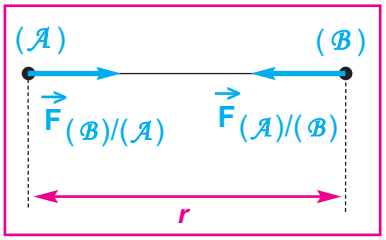
L'expérience de Cavendish (**1798**) a permis de vérifier que l'intensité commune à ces deux forces, outre qu'elle soit proportionnelle aux masses des deux corps, est inversement proportionnelle au carré de la distance qui sépare leurs centres d'inertie.

ENONCÉ DE LA LOI DE GRAVITATION UNIVERSELLE

Deux corps $(\mathcal{A})$ et $(\mathcal{B})$ supposés ponctuels, de masses respectives $m_{(\mathcal{A})}$ et $m_{(\mathcal{B})}$ et distants de **r**, s'attirent :

- La force d'attraction exercée par $(\mathcal{A})$ sur $(\mathcal{B})$ est $\vec{F}_{(\mathcal{A})/(\mathcal{B})}$.
- La force d'attraction exercée par $(\mathcal{B})$ sur $(\mathcal{A})$ est $\vec{F}_{(\mathcal{B})/(\mathcal{A})}$.

Ces deux forces sont appelées **" forces d'interaction gravitationnelle "** (***Doc.1***)



Doc.1

- $\vec{F}_{(\mathcal{A})/(\mathcal{B})} = -\vec{F}_{(\mathcal{B})/(\mathcal{A})}$ (3ème loi de Newton)

- L'intensité commune à ces deux forces attractives est :
  - proportionnelle aux masses des deux corps.
  - inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare.

$$\left\|\vec{F}_{(\mathcal{A})/(\mathcal{B})}\right\| = \left\|\vec{F}_{(\mathcal{B})/(\mathcal{A})}\right\| = G\,\frac{m_{(\mathcal{A})}\cdot m_{(\mathcal{B})}}{r^2}$$

G est une constante appelée **constante de gravitation universelle**

$G = 6{,}67.10^{-11}\ N\,.\,m^2\,.\,kg^{-2}$

Lorsque $m_{(\mathcal{A})}$ et $m_{(\mathcal{B})}$ sont exprimées en **kg** et **r** en **m,**

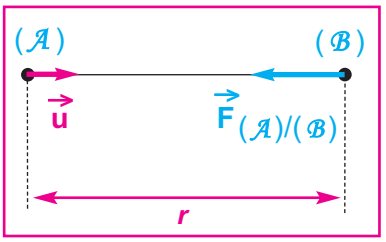
$\left\|\vec{F}_{(\mathcal{A})/(\mathcal{B})}\right\|$ et $\left\|\vec{F}_{(\mathcal{B})/(\mathcal{A})}\right\|$ sont en **Newton** (**N**)

REMARQUE :

- L'écriture vectorielle est : $\vec{F}_{(\mathcal{A})/(\mathcal{B})} = -\,G\,\dfrac{m_{(\mathcal{A})}\cdot m_{(\mathcal{B})}}{r^2}\,\vec{u}$

$\vec{u}$: vecteur unitaire porté par la droite joignant les deux corps et dirigé de ($\mathcal{A}$) vers ($\mathcal{B}$) (***Doc.2***)

Le choix du sens du vecteur $\vec{u}$ a pour but de mettre en évidence le signe (−) qui exprime le fait que la force de gravitation est attractive.



Doc.2

Analogie entre la loi de gravitation et la loi de Coulomb :

La force de gravitation universelle de Newton, de valeur

$$\|\vec{F}\| = G \frac{m.M}{r^2}$$

et la force d'interaction électrique de Coulomb, de valeur

$$\|\vec{F}\| = K \frac{|q|.|q'|}{r^2}$$

présentent au moins deux similitudes.

Ce sont deux forces :

* **centrales**, puisque chacune d'elles est de direction, la droite passant par les deux corps ponctuels en interaction pour la première et par les deux charges ponctuelles pour la deuxième.

* **d'intensités inversement proportionnelles au carré de la distance r séparant les deux corps ponctuels (ou charges ponctuelles).**

Elles présentent aussi des différences :

* la source d'interaction est une masse positive dans le cas de l'interaction gravitationnelle, par contre, dans le cas de l'interaction électrique, il s'agit d'une charge pouvant être positive ou négative.

* c'est pour celà que les forces de gravitation sont toujours attractives, alors que les forces électriques sont tantôt attractives si les deux charges sont de signes contraires, tantôt répulsives si elles sont de mêmes signes.

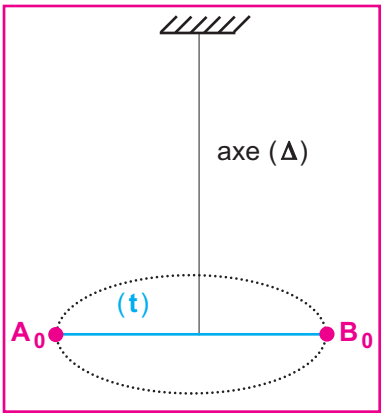
Un objet ponctuel de masse **m** et portant une charge **q** peut être en interaction gravitationnelle et électrique avec un autre objet de masse **m'** et de charge **q'**.

DÉTERMINATON EXPÉRIMENTALE DE LA CONSTANTE DE GRAVITATION :

Du temps de Newton, on a connu de grosses difficultés pour la détermination de la constante de gravitation **G** ; d'autant plus qu'il est illusoire de vouloir procéder à ce genre de calcul en étudiant le mouvement de tel ou tel corps autour du Soleil par exemple.

Le physicien Cavendish s'y prend en faisant exercer par un corps autre que la Terre, une force attractive sur un système bien choisi, pour créer un déplacement mesurable et déduire de cette mesure la valeur de **G**.

La gravitation avec des corps de masses humainement réalisables est très faible;c'est pour cette raison qu'il fait appel à un pendule de torsion de grande sensibilité.



Doc.3

EXPÉRIENCE DE CAVENDISH (1798)

Le dispositif de Cavendish est formé d'une tige (**t**) de longueur **2ℓ** et de masse négligeable, portant à chacune de ses deux extrémités **A** et **B** une petite sphère $S_{(Pt)}$ en platine, homogène et de masse **m**. La tige est fixée en son milieu à un fil de torsion très souple et de constante de torsion C. L'ensemble peut alors tourner autour de l'axe(Δ) formé par le fil (***Doc.3***).

Fil de torsion

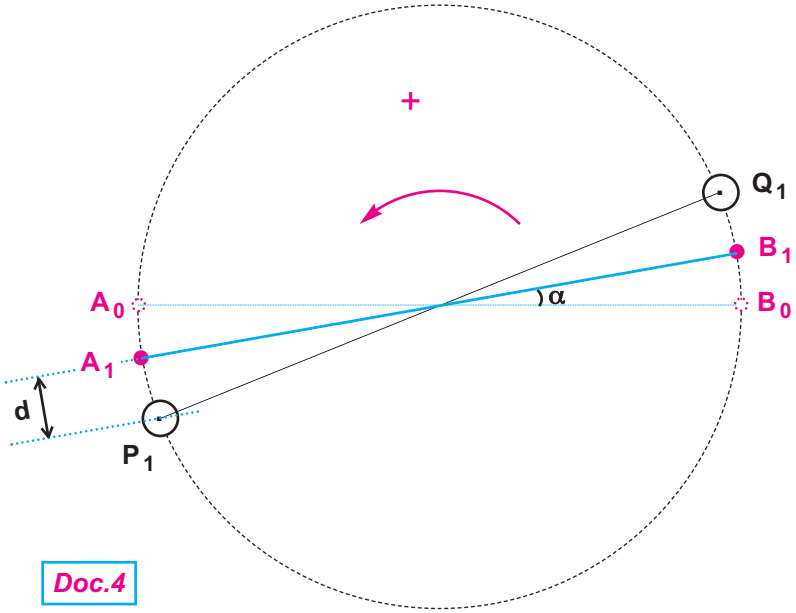
Un fil de torsion est caractérisé par une constante de torsion C.

Quand il est tordu d'un angle α, il exerce un couple de torsion dont le moment, par rapport à l'axe de rotation matérialisé par le fil lui-même, est donné par

$\mathcal{M}(\text{couple de torsion})_{/(\Delta)} = -C\alpha$

α en radians

C en $N.m^{-1}$



Doc.4

La tige étant en équilibre dans la position A_0B_0, on place au voisinage de chaque extrêmité une sphère $S_{(Pb)}$ en plomb, homogène et de masse **M** (les deux sphères sont centrées en P_1 et Q_1).

Les points A_0, B_0, P_1 et Q_1 se trouvent dans un même plan horizontal (***Doc.4***).

Dispositif de Cavendish.

A chaque extrêmité, la sphère de platine, placée dans le champ gravitation de la sphère en plomb, est attirée par celle-ci. Lorsque le système formé par la tige et les deux shères $S_{(Pt)}$ atteint sa position d'équilibre (A_1B_1), on mesure la torsion α du fil et la distance **d** qui sépare P_1 et la tige dans sa nouvelle position d'équilibre (A_1B_1).

Etude statique

Considérons le système constitué par les deux sphères de platine et la tige à laquelle elles sont fixées.

Les forces extérieures qui s'exercent sur ce système lorsqu'il occupe la position d'équilibre (A_1B_1) sont :

- le couple de torsion exercée par le fil matérialisant l'axe de rotation (Δ), et dont le moment par rapport à cet axe est donné par $\mathcal{M}_1 = -C\,\alpha$
- le couple de forces constitué par chacune des deux forces représentant l'interaction gravitationnelle entre sphère en platine et sphère en plomb à chacune des deux extrêmités de la tige. On négligera l'action de chacune des sphères en plomb sur la sphère en platine qui se trouve à l'extrémité opposée de la tige.

  Le moment de ce couple de forces par rapport à l'axe (Δ) est donné par :

$$\mathcal{M}_2 = G\frac{m.M}{d^2}.\,2\ell$$

- Les forces représentant l'interaction gravitationnelle entre la Terre et les différentes sphères sont parallèles à l'axe de rotation (Δ), et sont sans effet sur la rotation du fléau.

Appliquons la condition d'équilibre au système en équilibre autour de l'axe de rotation (Δ) :

$$\mathcal{M}_1 + \mathcal{M}_2 = 0$$

$$-C\,.\,\alpha + G\frac{m.M}{d^2}.\,2\ell = 0$$

D'où $$\boxed{G = \frac{C\,.\,\alpha\,.\,d^2}{2\ell\,.\,m\,.\,M}}$$

1.2 . Cas des corps à répartition de masse à symétrie sphérique

Un corps à répartition de masse à symétrie sphérique de masse **M** et de centre **O** peut être remplacé par un corps ponctuel de même masse et coïncidant avec le point **O**.

Ainsi la loi de gravitation universelle, énoncée dans le cas des corps ponctuels, peut s'appliquer aux corps à répartition de masse à symétrie sphérique.

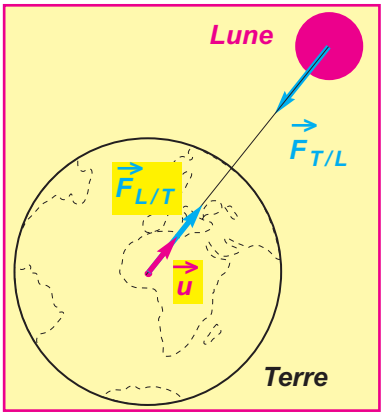
Exemple (***Doc.5***) : l'interaction gravitationnelle entre la Terre de masse m_T et la Lune de masse m_L se traduit par :

$\vec{F}_{T/L}$ force exercée par la Terre sur la Lune

$\vec{F}_{L/T}$ force exercée par la Lune sur la Terre

$$\vec{F}_{T/L} = -\vec{F}_{L/T} = -G\frac{m_T \cdot m_L}{r^2}\vec{u}$$

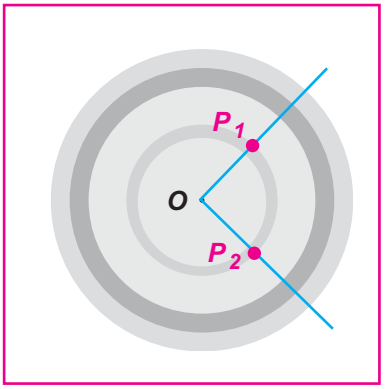
r est la distance entre les centres de la Terre et la Lune.



Doc.5

Objet à répartition de masse à symétrie sphérique

Un objet est à répartition de masse à symétrie sphérique si la masse volumique en un point quelconque de l'objet n'est fonction que de la distance qui sépare ce point du centre **O** de la sphère. Ainsi la matière est répartie en couches sphériques et l'objet est nécessairement sphérique. Le cas le pus simple est celui d'un corps sphérique homogène.



Si $OP_1 = OP_2$, les masses volumiques aux points P_1 et P_2 sont identiques .

Le Soleil, toutes les planètes du système solaire et leurs satellites sont des objets à répartition de masse à symétrie sphérique.

Les comètes, les astéroïdes et certains satellites naturels ne sont pas des corps à répartition de masse à symétrie sphérique.

FORCE DE GRAVITATION ET SATELLISATION :

La Lune, étant soumise à une force attractive exercée par la Terre, pourrait chuter et finir sa course en percutant cette dernière !

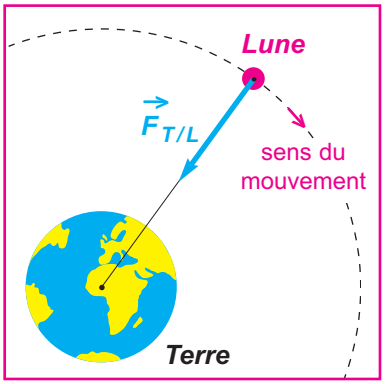
Cela ne cadre pas avec la réalité, car la Lune tourne autour de la Terre sur une orbite circulaire.

Comment expliquer le fait que la Lune, soumise à un effet attractif exercé essentiellement par la Terre, se maintienne en mouvement sur une orbite autour de la Terre ?

La Lune en rotation autour de la Terre.

La satellisation de la Lune autour de la Terre est la conséquence de la tendance du corps à conserver un mouvement rectiligne uniforme tel que l'exige le principe d'inertie. Ce mouvement rectiligne uniforme est à tout instant modifié par la force attractive, et le bilan de ces deux effets est un mouvement circulaire (***Doc.6***).

Jusqu'à présent, cette explication du mouvement des planètes autour du Soleil, ou des satellites autour de leur planète, est encore valable.



Doc.6

Voici le texte décrivant l'expérience imaginée plus tard par Newton pour expliquer pourquoi certains corps chutent et d'autres tournent autour de la Terre.

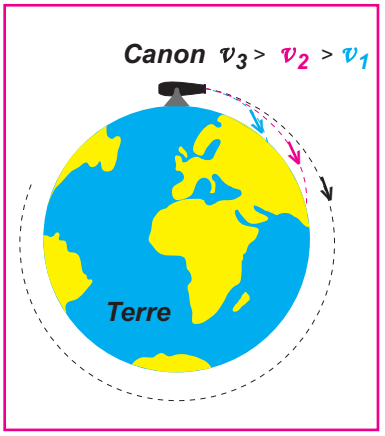
Imaginons un canon à la surface de la Terre au sommet d'une montagne, qui tire des boulets en ligne droite parallèlement au sol.

Plus la vitesse initiale du boulet est grande, plus il retombe loin (vitesses v_1 et v_2). Le boulet tiré, commence par parcourir une ligne dans l'alignement du fût du canon, puis progressivement s'en éloigne car il chute vers le sol (tout cela pour dire qu'il décrit une trajectoire parabolique) (***Doc.7***)

Maintenant considérons le cas d'un boulet tiré avec une très grande vitesse initiale (vitesses v_3). Comme prévu, il commence par suivre la ligne de tir puis progressivement s'en éloigne pour chuter.

Mais il nous faut considérer le phénomène suivant : étant donné qu'il parcourt une très grande distance avant d'atteindre le sol, il va voir ce dernier s'éloigner de lui ! Parce que la Terre est ronde et si vous vous déplacez dans l'air suivant une exacte ligne droite, inévitablement vous vous éloignez du sol qui est courbe. Suivant ce raisonnement, si le boulet est tiré avec une vitesse plus grande, il est possible que le point de chute du boulet s'éloigne jusqu'à disparaître (du fait de la courbure de la Terre) et de ce fait il ne chutera pas vers le sol.

Dans ce cas, le boulet n'atteindra jamais le sol et partira dans l'espace Sous certaines conditions, il est satellisé autour de la Terre, sinon, il est éjecté dans l'espace et se sépare complètement de la Terre.



Doc.7

Ainsi la Lune décrit une trajectoire circulaire autour de la Terre. En effet, soumise à une force de gravitation attractive exercée par la Terre, sa vitesse assez importante lui permet d'être satellisée autour de la Terre.

C'est le cas de toutes les planètes autour du Soleil et des satellites autour de leurs planètes.

2. Champ de gravitation

Considérons un corps ponctuel de masse m_1 placé en un point **D** de l'espace et soumis à la seule force gravitationnelle $\vec{F}_1$ exercée par la Terre.

Des corps ponctuels de masses m_2, m_3, ... placés successivement au même point **D** seront soumis aux forces gravitationnelles $\vec{F}_2$, $\vec{F}_3$, . . . :

On montre que

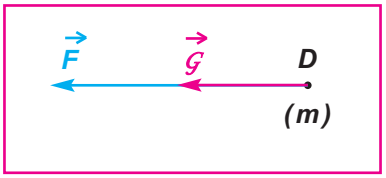
$$\frac{\vec{F}_1}{m_1} = \frac{\vec{F}_2}{m_2} = \frac{\vec{F}_3}{m_3} = \cdots = \overrightarrow{\text{Constante}}$$

le rapport $\frac{\vec{F}}{m}$ est indépendant de la valeur de **m** ; il définit le vecteur champ gravitationnel $\vec{\mathcal{G}}$ qui règne en **D**.

2.1 . Définition

Le vecteur champ gravitationnel $\vec{\mathcal{G}}$ en un point de l'espace est égal au quotient de la force gravitationnelle $\vec{F}$ subie par un corps ponctuel placé en ce point, par la masse **m** de ce corps (***Doc.8***).

$$\vec{\mathcal{G}} = \frac{\vec{F}}{m}$$



Doc.8

sa valeur est donnée par : $\|\vec{\mathcal{G}}\| = \frac{\|\vec{F}\|}{m}$

$\|\vec{F}\|$ en **N**

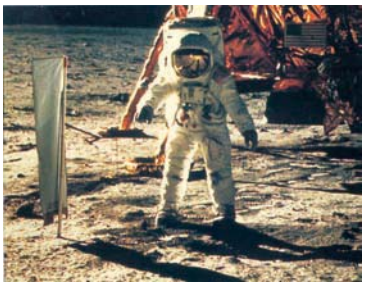
m en **kg**

$\|\vec{\mathcal{G}}\|$ en $\mathbf{N.kg^{-1}}$

EXEMPLE :

Au cours du voyage effectué par la fusée Apollo **XI** vers la Lune en **1969**, l'astronaute Neil Armstrong se sentant léger sur le sol lunaire sautille alors que, portant la même charge, il se déplace difficilement sur Terre.

La valeur du champ gravitationnel sur le sol lunaire est le sixième de celle régnant à la surface de la Terre ; de ce fait, l'astronaute se sent nettement plus léger à la surface de la Lune puisque l'intensité de la force gravitationnelle à laquelle il y est soumis est six fois moins importante qu'à la surface de la Terre.



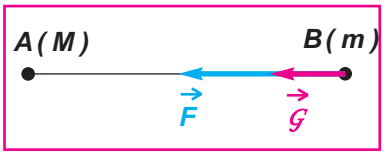
Le 20 Juillet1969, Neil Armstrong marche sur la Lune.

2.2 . Champ de gravitation créé par un corps ponctuel

Un corps ponctuel de masse **M**, placé en **A**, créé en **B** un champ gravitationnel $\vec{\mathcal{G}}$.

Un deuxième corps ponctuel de masse **m**, placé en **B**, subit d'après le paragraphe (**2.1**) une force gravitationnelle $\vec{F}$ telle que

$$\vec{F} = m.\vec{\mathcal{G}} \quad (\textit{Doc.10})$$



Doc.10

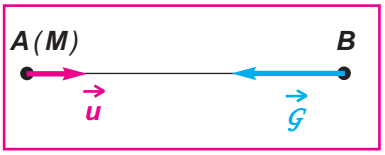
D'après la loi de gravitation universelle cette force peut s'écrire :

$$\vec{F} = -G\frac{m.M}{AB^2}\vec{u}$$

L'égalité entre les deux expressions de la force de gravitation donne :

$$m.\vec{\mathcal{G}} = -G\frac{m.M}{AB^2}\vec{u}$$

soit $$\vec{\mathcal{G}} = -G\frac{M}{AB^2}\vec{u} \quad (\textit{Doc.11}).$$



Doc.11

- Le champ de gravitation $\vec{\mathcal{G}}$ est créé par le corps de masse **M**. Il est dirigé vers le corps qui l'a créé, on dit qu'il est " **centripète** "

- La valeur du champ de gravitation est :

$$\|\vec{\mathcal{G}}\| = G\frac{M}{AB^2}$$

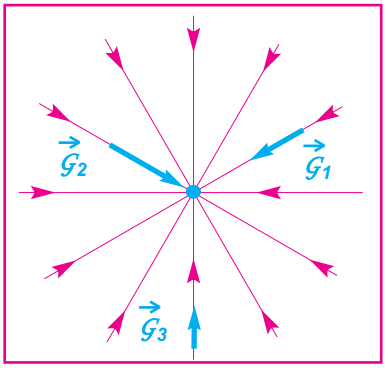
Elle est indépendante de la masse **m** du corps ponctuel placé en **B**.
Elle dépend uniquement de **M** et de $\|\overrightarrow{AB}\|$.

2.3 . Lignes de champ

Définition

Une ligne de champ gravitationnel est une courbe telle que le champ de gravitation $\vec{\mathcal{G}}$ lui est tangent en chacun de ses points.

Dans le document **12**, le champ de gravitation créé par un corps ponctuel est constamment dirigé vers le corps qui le crée ; les lignes de champ gravitationnel sont nécessairement des lignes droites passant par ce corps.



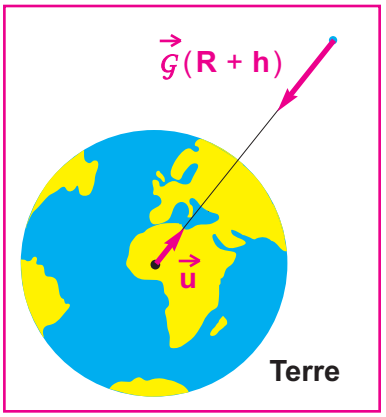
Doc.12 : lignes de champ dans le cas d'un corps ponctuel.

2.4 . Champ de gravitation créé par un corps à répartition de masse à symétrie sphérique

Considérons un corps à répartition de masse à symétrie sphérique de masse **M** et de rayon **R**. Le vecteur champ de gravitation créé par ce corps en un point **B** d'altitude **h** a pour expression :

$$\vec{\mathcal{G}}(h) = -G\frac{M}{(R+h)^2}\vec{u}$$

le rayon **R** et l'altitude **h** en **mètre**.



Doc.13

- Le vecteur champ de gravitation $\vec{\mathcal{G}}$ est dirigé vers le centre du corps qui l'a créé, il est " ***centripète*** ".

- La valeur du vecteur champ de gravitation est

$$\|\vec{\mathcal{G}}(h)\| = G\frac{M}{(R+h)^2}$$

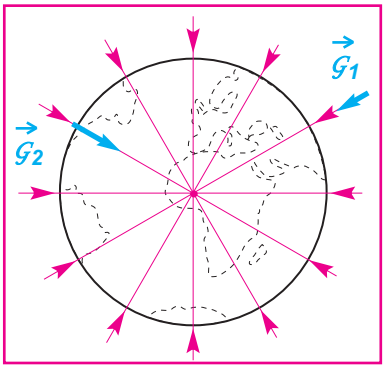
Elle est indépendante de la masse du corps pouvant être ponctuel ou à répartition de masse à symétrie sphérique et placé en **B**.
Elle dépend uniquement de **M**, **R** et **h**.

Exemple : champ de gravitation créé par la Terre (***Doc.13***).

Au sol $(h = 0)$: $\|\vec{\mathcal{G}}(0)\| = G\dfrac{M}{R^2}$

d'où à une altitude **h** quelconque :

$$\|\vec{\mathcal{G}}(h)\| = \|\vec{\mathcal{G}}(0)\| \cdot \frac{R^2}{(R+h)^2}$$



Doc.14 : lignes de champ dans le cas d'un corps à répartition de masse à symétrie sphérique.

Dans le document **14**, le champ de gravitation créé par la Terre, corps supposé être à répartition de masse à symétrie sphérique, est constamment dirigé vers l'objet qui le crée ; les lignes de champ gravitationnel sont des lignes passant par le centre de la Terre ; elles sont centripètes.

QUI EST RESPONSABLE DU MOUVEMENT D'UN CORPS ?

*Considérons une pomme de masse **m** lâchée sans vitesse initiale à quelques mètres du sol ; la valeur de la force qu'elle subit de la part de la Terre de masse **M** est :*

$$\left\| \vec{F}_{T/p} \right\| = G \frac{M \cdot m}{R^2}$$

De même, la valeur de la force exercée par la pomme sur la Terre est :

$$\left\| \vec{F}_{p/T} \right\| = G \frac{M \cdot m}{R^2}$$

Les intensités des deux forces qui constituent l'interaction gravitationnelle sont égales. Mais alors, pourquoi la Terre ne ressent-t-elle pas l'attraction de la pomme de la même manière que nous le constatons pour cette dernière puisque nous la voyons chuter ?

Raisonnons par rapport à un référentiel lié à la Terre.

La chute de la pomme est une réalité qui se déroule à nos yeux due à l'effet du champ de gravitation terrestre de valeur **9,8 N.kg^{-1}** (exercice résolu **n°2**)

Par contre le champ de gravitation dû à la pomme est totalement négligeable et reste incapable de provoquer la moindre perturbation sur le mouvement de la Terre.

Puisque les intensités des deux forces qui constituent l'interaction gravitationnelle sont égales, **il est clair que c'est le champ de gravitation qui exprime la nature du mouvement d'un corps et non pas la force gravitationnelle !**

La comparaison des deux champs gravitationnels créé par la pomme au centre de la Terre et celui créé par la Terre au niveau de la pomme, revient à une comparaison de masses.

Maintenant on comprend parfaitement bien pourquoi c'est la Terre de masse **6.10^{24} kg** qui tourne autour du Soleil de masse **2.10^{30} kg** et non pas l'inverse.

3. Champ de pesanteur

3.1 . Définition

Le vecteur champ de pesanteur $\vec{g}$ en un point d'altitude **h** par rapport à la Terre est donné par la relation :

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

- **m** est la masse du corps ponctuel (ou à répartition de masse à symétrie sphérique) dont le centre d'inertie est situé au point d'altitude **h** ; unité : **kg**.
- $\vec{P}$ est le poids de ce corps.

3.2 . Relation entre le champ de pesanteur et le champ de gravitation

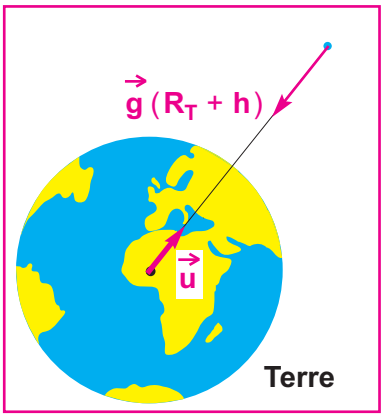
Si on néglige l'effet de la rotation de la Terre autour de l'axe des pôles, le poids $\vec{P} = m\,\vec{g}$ du corps peut être assimilé à la force de gravitation universelle que la Terre exerce sur lui $\vec{F} = m\,\vec{\mathcal{G}}$.

De l'égalité de ces deux forces on déduit que

$$\vec{g} = \vec{\mathcal{G}} = -\,G\,\frac{M_T}{(R_T + h)^2}\,\vec{u} \qquad (\textit{Doc.15})$$

R_T et M_T sont respectivement le rayon et la masse de la Terre.

$\vec{u}$ est un vecteur unitaire ayant pour origine le centre de la Terre et est dirigé vers le point considéré au voisinage de la Terre.



Doc.15

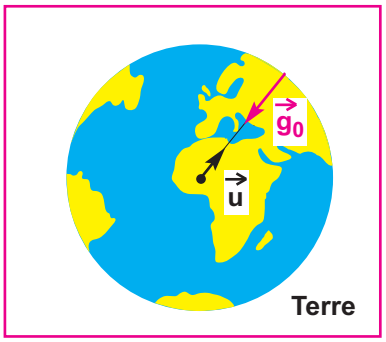
3.3 . Valeur du champ de pesanteur à l'altitude zéro

A l'altitude **h = 0**, le champ de pesanteur est :

$$\vec{g}_0 = -\,G\,\frac{M_T}{R_T^2}\,\vec{u} \qquad (\textit{Doc.16})$$

L'expression de la valeur du champ de pesanteur à l'altitude zéro qui est située au niveau de la surface de la mer est :

$$\|\vec{g}_0\| = G\,\frac{M_T}{R_T^2}$$



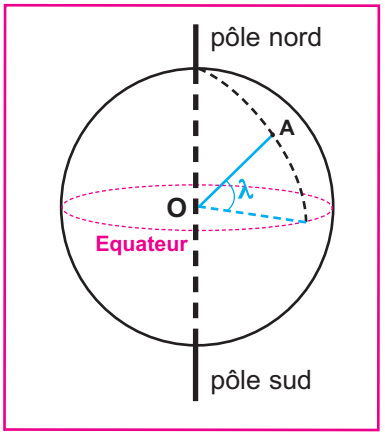
Doc.16 : le champ de pesanteur à la surface de la Terre

	λ	Paris	$\|\vec{g}_0\|$ (N.kg^{-1})
Nord	90°	aux pôles	9,83
Nord	36°	Tunis	9,80
Nord	49°	Paris	9,81
	0°	Equateur	9,78
Sud	22°	Rio de Janeiro	9,79
Sud	51°	Iles des Malouines	9,812

Doc.17 : quelques valeurs du champ de pesanteur selon la latitude.

LATITUDE

La latitude λ d'un point **A** de la surface de la Terre est l'angle que fait le rayon de la Terre passant par ce point avec le plan de l'équateur.



D'après le document (***Doc.17***) on remarque que $\|\vec{g}_0\|$ augmente quand on passe de l'équateur aux pôles.

A une altitude **h** : $\|\vec{g}\| = \|\vec{g}_0\| \cdot \dfrac{R_T^2}{(R_T + h)^2}$

avec $\|\vec{g}_0\| = 9{,}8\ \text{N.kg}^{-1}$

et à l'altitude **h = 32 km**, on a calculé

$$\|\vec{g}(32\ \text{km})\| = 9{,}704\ \text{N.kg}^{-1}$$

La variation relative est : $\dfrac{\Delta g}{g_0} = 1\ \%$.

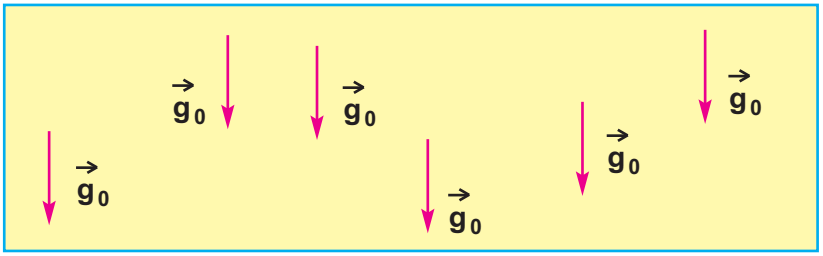
On peut alors supposer que la valeur du champ de gravitation ne change pratiquement pas jusqu'à une altitude de quelques dizaines de **kilomètres**.

En tenant compte du document ***18*** on peut affirmer que, dans un domaine restreint au voisinage de la Terre, le champ de pesanteur est supposé constant.

On dit qu'il est **uniforme**, c'est à dire de valeur constante et égale à celle au sol, de même direction et de même sens (***Doc.19***).

Entre deux points **M** et **M'** du globe terrestre, tels que les vecteurs champ de pesanteur $\vec{g}_M$ et $\vec{g}_{M'}$ font entre eux un angle de **1°**, l'arc terrestre $\overset{\frown}{MM'}$ est égal à **111 km**.
En tout point de cet arc, le champ de pesanteur est presque le même.

Doc.18



Doc.19

4. Applications

4.1 . Phénomène des marées dans les océans

La Terre baigne dans les champs gravitationnels solaire et lunaire.

Le phénomène des marées est une manifestation de ces champs gravitationnels; il s'agit d'un mouvement journalier d'oscillation de la mer, dont le niveau monte et descend alternativement en un même lieu.

Ce phénomène des marées résulte des attractions exercées sur notre planète par la Lune et le Soleil, et essentiellement sur les eaux des océans.

On considère que les océans et la Terre constituent deux systèmes indépendants :

La Terre : en son centre, le champ gravitationnel qui y règne est dû au Soleil et à la Lune ; sa valeur est supposée constante.

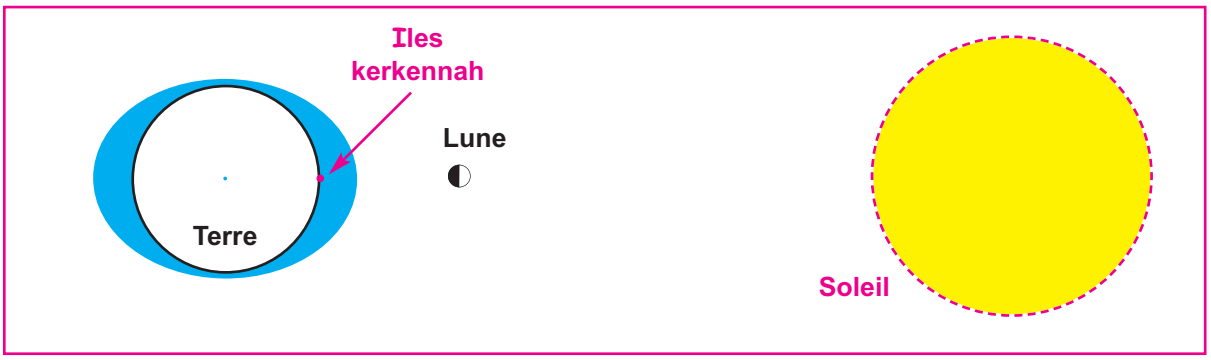
Les océans : un bloc d'eau appartenant aux océans baigne dans un champ gravitationnel résultant des champs gravitationnels solaire, lunaire et terrestre.

marée basse

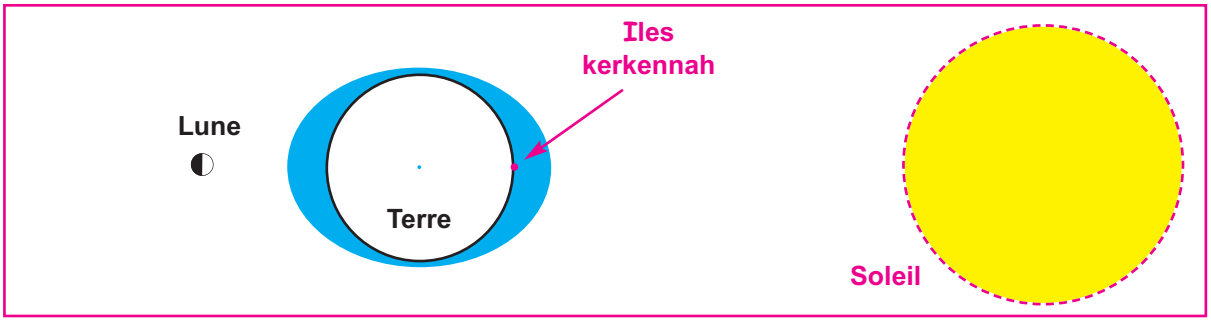
marée haute

On connaît différents types de marées :

Les marées de vives eaux : elles se produisent quand la Lune est alignée entre la Terre et le Soleil (***Doc.20***) et aussi quand la Terre est alignée entre la Lune et le Soleil (***Doc.21***).

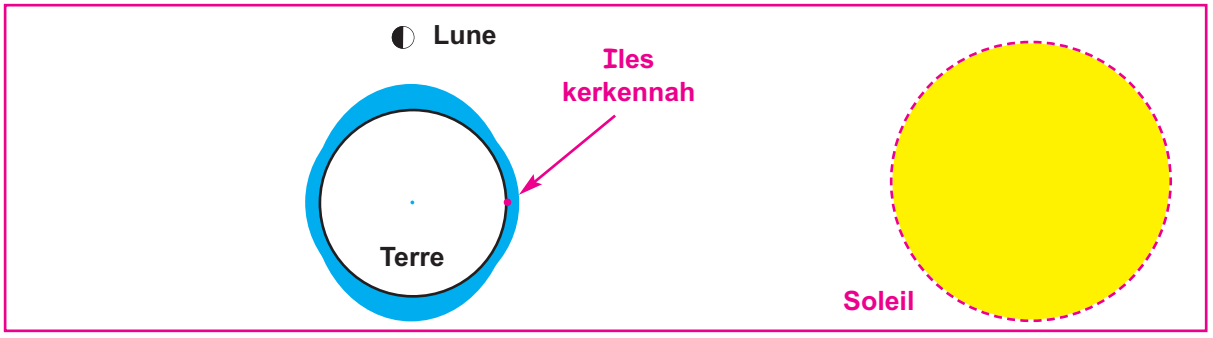


Doc.20 : Phénomène de marée haute aux Iles Kerkennah lors de la nouvelle Lune.



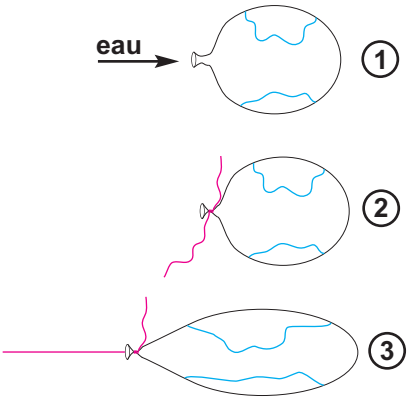
Doc.21 : Phénomène de marée haute aux Iles Kerkennah en pleine Lune.

Les marées de mortes eaux : elles se produisent quand la Lune, la Terre et le Soleil forment un triangle rectangle (***Doc.22***).



Doc.22 : Phénomène de marée de mortes eaux.

Activité expérimentale : **fabrication d'une marée**



Matériel : un ballon de baudruche, une ficelle, de l'eau.

1 - remplir le ballon d'eau qui symbolise la Terre

2 - fermer avec la ficelle en faisant un noeud

3 - tirer la ficelle d'un coup sec ; le ballon se déforme du côté où l'on tire, mais aussi du côté opposé.

4.2 . Astéroïdes et comètes

Le système solaire est l'ensemble formé d'une étoile moyenne (le Soleil), de **9** planètes (Vénus, Mercure, Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune et Pluton), de satellites, d'**astéroïdes** et de **comètes**.

Chaque satellite tourne autour d'une planète comme par exemple :

- la Lune autour de la Terre.
- Io, Europe, Ganymède et Callisto autour de Jupiter.

Astéroides :

Les **astéroïdes** ont été formés par les roches qui n'ont pas pu s'agglomérer lors de la formation du système solaire. Restes d'une planète avortée, ces petits corps sont répartis dans tout le système solaire ; ils sont les seuls corps célestes qui sont restés, jusqu'à aujourd'hui, tels qu'ils étaient à la formation de notre système solaire.

De notre Terre, ils nous apparaissent comme des points lumineux presque sans intérêt.

Grâce à la force gravitationelle exercée par le Soleil, ils décrivent des orbites elliptiques autour du Soleil.

Ils sont généralement regroupés en grand nombre sur des orbites communes autour du Soleil appelées ceintures.

La ceinture principale : appelée encore ceinture d'astétoïdes, elle est située entre Mars et Jupiter de **2** à **4 UA** du Soleil.

Elle comporte la plupart des astétoïdes. **Cérès**, **Pallas** et **Vesta** contiennent la moitié de la masse totale de la ceinture principale ; ils ont des diamètres respectifs de **933**, **523** et **501 km**. Plus de **200** ont un diamètre de **100 km**, un millier d'un diamètre supérieur à **30 km** et un million de corps avec un diamètre supérieur à **1 km**. L'espace entre les astétoïdes étant de plusieurs millions de **km**, les collisions sont très rares de nos jours.

Unité de distance

1 UA = distance Terre-Soleil
= **$1{,}496.10^{8}$ km**

La ceinture de Kuiper : il y a **40 ans**, un chercheur Kuiper avait postulé l'existence d'une ceinture au-delà de l'orbite de Neptune ; c'est une région du Système Solaire qui s'étend au delà de l'orbite de Neptune de **40** à **50 UA** du Soleil, et qui contiendrait des milliers de corps de glace.

Elle a été découverte en **1992** et depuis, de l'ordre de **1000** corps ont été catalogués. Certains d'entre eux sont très gros ; le plus gros ayant un diamètre dépassant **1000 km**.

Pluton, l'une des neuf planètes du système solaire, serait un astétoïde de la Ceinture de Kuiper !

La ceinture de Kuiper constitue la limite du sytème solaire.

D'autres ceintures :

- **Les Troyens** : au-delà de Jupiter et à la même distance de cette dernière au Soleil
- **Les Centaures** : se trouvent entre Jupiter et Neptune
- Une population d'astéroïdes résidant entre le Soleil et Mars ; ils sont regroupés en trois formations :
  * **la formation des Altens** : au voisinage du Soleil à une distance inférieure de **1 UA**
  * **la formation des Apollons** : un peu plus éloigné du soleil que la Terre
  * **la formation des Armors** : entre la Terre et Mars.

N'ayons pas peur si l'on dit que, de ces trois formations, par décrochement gravitationnel, des astéroïdes viendraient s'approcher de la Terre à une distance inférieure à la moitié de la distance Terre-Lune, ou même s'y écraser entraînant l'extinction des dinausores il y a **65 Millions d'années** ; en Tunguska (Sibérie) en **1908**, **2000 km^2** de forêt sont dévastés suite au choc d'un astéroïde avec notre planète.

COMÈTES :

Les **comètes** sont de petits corps glacés. Elles sont **1** million à tourner autour du Soleil sous l'effet de la force gravitationnelle exercée par ce dernier.

Elles sont restées pratiquement inchangées grâce à leur éloignement du Soleil.

Dès **1995**, on sait que les molécules les plus abondantes des glaces cométaires sont : l'eau (**H_2O**), les monoxydes (**CO**), dioxyde de carbone (**CO_2**), le méthanol (**CH_3OH**).

Il existe un gigantesque réservoir de Comètes estimés à **6** milliards et situés jusqu'à **20 000 UA** du Soleil à mi-chemin des étoiles les plus proches, dans une très vaste région froide (**-269°C**) où la lumière est quasiment inexistante ; il s''agit du nuage d'**Oort**.

D'autres comètes se trouvent dans la ceinture de Kuiper.

Des millions de kilomètres séparent les Comètes les unes des autres.

EXERCICE RÉSOLU N°1

ENONCÉ :

Considérons un électron, de masse $m_e = 0{,}91.10^{-30}$ kg et de charge $q_e = 1{,}6.10^{-19}$ C, en mouvement autour d'un proton de masse $m_p = 1{,}67.10^{-27}$ kg et de charge $q_p = -q_e$. La trajectoire est un cercle de rayon $r = 5{,}3.10^{-11}$ m.

1 - Déterminer la valeur de l'intensité commune aux deux forces de gravitation s'exerçant entre l'électron et le proton.

2 - Déterminer la valeur de l'intensité commune aux deux forces électriques s'exerçant entre l'électron et le proton.

3 - Comparer ces deux valeurs ; conclure.

Solution

1 - L'expression de l'intensité commune aux deux forces de gravitation s'exerçant entre l'électron et le proton est

$$\left\| \vec{F}_{gravitationnelle} \right\| = G \cdot \frac{m_e \cdot m_p}{r^2}$$

sa valeur est $\left\| \vec{F}_{gravitationnelle} \right\| = 6{,}67.10^{-11} \cdot \dfrac{1{,}67.10^{-27} \times 0{,}91.10^{-30}}{(5{,}3.10^{-11})^2}$

$$\boxed{\left\| \vec{F}_{gravitationnelle} \right\| = 3{,}6.10^{-46} \text{ N}}$$

2 - L'expression de l'intensité commune aux deux forces électriques s'exerçant entre l'électron et le proton est :

$$\left\| \vec{F}_{électrique} \right\| = K \frac{|q_p| \cdot |q_e|}{r^2}$$

sa valeur est $\left\| \vec{F}_{électrique} \right\| = 9.10^9 \dfrac{(1{,}6.10^{-19})^2}{(5{,}3.10^{-11})^2}$

$$\boxed{\left\| \vec{F}_{électrique} \right\| = 8{,}2.10^{-8} \text{ N}}$$

3 - Comparaison des deux forces :

$$\boxed{\frac{\left\| \vec{F}_{gravitationnelle} \right\|}{\left\| \vec{F}_{électrique} \right\|} = 4{,}4.10^{-39}}$$

La force de gravitation est négligeable devant la force électrique.

Les forces de gravitation s'exerçant entre des particules élémentaires chargées sont négligeables devant les forces électriques d'interaction mutuelle.

EXERCICE RÉSOLU N°2

ENONCÉ :

La Terre, de masse M_T et de rayon **R**, est une planète appartenant au système solaire et qui peut être considérée comme étant à répartition de masse à symétrie sphérique. Une pomme de masse **m** se détache d'un arbre ; elle constitue un corps ponctuel en interaction gravitationnelle avec la Terre.

1 - Donner l'expression de la force $\vec{F}_{T/P}$ exercée par la Terre sur la pomme.

En déduire celle exercée par la pomme sur la Terre.

2 - Calculer la valeur commune aux forces gravitationnelles entre la Terre et la pomme.

On donne : la constante de gravitation universelle $G = 6{,}67.10^{-11}\ N\ .\ m^2\ .\ kg^{-2}$

$M_T = 6{,}0.10^{24}$ kg

$m = 1{,}0.10^{-1}$ kg

R = 6390 km

SOLUTION

1- Expression de la force exercée par la Terre sur la pomme

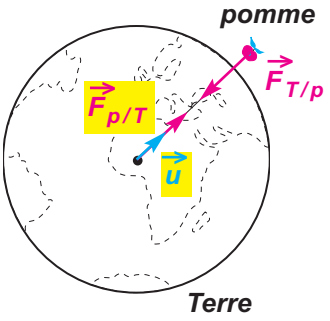
La Terre étant à répartition de masse à symétrie sphérique, l'expression de la force de gravitation qu'elle exerce sur la pomme est :

$$\vec{F}_{T/p} = -\ G\ \frac{M_T\ .\ m}{R^2}\ \vec{u}$$

Expression de la force exercée par la Terre sur la pomme

$$\vec{F}_{p/T} = G\ \frac{M_T\ .\ m}{R^2}\ \vec{u}$$

On choisira le vecteur unitaire $\vec{u}$ dirigé du centre de la Terre vers la pomme.



2- Valeur commune aux forces gravitationnelles s'exercant entre la Terre et la pomme

$$\|\vec{F}\| = \|\vec{F}_{T/p}\| = \|\vec{F}_{p/T}\| = G\ \frac{M_T\ .\ m}{R^2}$$

Application numérique :

$$\|\vec{F}\| = 6{,}67\ .\ 10^{-11}\left[\frac{6{,}0\ .\ 10^{24}\ .\ 0{,}1}{(6390\ .\ 10^3)^2}\right]$$

$$\|\vec{F}\| = 0{,}98\ N$$

EXERCICE RÉSOLU N° 3

ENONCÉ :

1 - La Terre de rayon **R** et **de** masse M_T peut être considérée comme étant à répartition de masse à symétrie sphérique de centre **O**.

a - Préciser les caractéristiques du champ de gravitation $\vec{\mathcal{G}}_o$ créé par la Terre en un point **A** de sa surface.

b - Donner l'expression de la valeur $\|\vec{\mathcal{G}}_z\|$ du champ de gravitation créé par la Terre en un point d'altitude **z**. Calculer sa valeur pour **z = 32 km**.
Déterminer la variation relative de la valeur du champ de gravitation $\frac{\Delta\mathcal{G}}{\mathcal{G}_o}$.

2 - Une pomme, de masse **m = 0,1kg**, est un corps ponctuel en interaction gravitationnelle avec la Terre.

a - Calculer la valeur $\|\vec{\mathcal{G}}_p\|$ du champ de gravitation créé par la pomme au centre de la Terre.

b - Comparer $\|\vec{\mathcal{G}}_p\|$ et $\|\vec{\mathcal{G}}_o\|$.

On donne : la constante de gravitation universelle $G = 6{,}67.10^{-11}\ N.m^2.kg^{-2}$
$R = 6390\ km$ et $M_T = 6{,}0.10^{24}\ kg$

SOLUTION

1 - a - Caractéristiques du vecteur champ de gravitation $\vec{\mathcal{G}}_o$

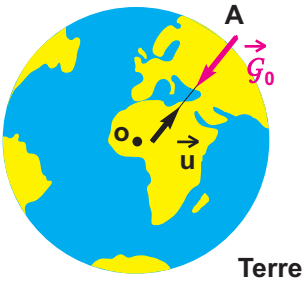
- direction : la droite (**OA**)
- sens : il est dirigé de **A** vers **O**
- origine : le point **A**
- expression vectorielle : $\vec{\mathcal{G}}_o = -G\frac{M_T}{R^2}\vec{u}$

sa valeur est $\|\vec{\mathcal{G}}_o\| = G\frac{M_T}{R^2}$

Application numérique :

$$\|\vec{\mathcal{G}}_o\| = 6{,}67.10^{-11}\left[\frac{6{,}0.10^{24}}{(6390.10^3)^2}\right]$$

$$\boxed{\|\vec{\mathcal{G}}_o\| = 9{,}8\ N.kg^{-1}}$$



b - Expression de $\|\vec{\mathcal{G}}_z\|$

$$\|\vec{\mathcal{G}}_z\| = G\frac{M_T}{(R+z)^2}$$

Application numérique :

$$\|\vec{\mathcal{G}}_z\| = 6{,}67.10^{-11}\left[\frac{6{,}0.10^{24}}{(6390.10^3 + 32000)^2}\right]$$

$$\boxed{\|\vec{\mathcal{G}}_z\| = 9{,}704\ N.kg^{-1}}$$

$$\frac{\Delta\|\vec{\mathcal{G}}\|}{\|\vec{\mathcal{G}}_o\|} = \frac{\|\vec{\mathcal{G}}_o\| - \|\vec{\mathcal{G}}_z\|}{\|\vec{\mathcal{G}}_o\|}$$

$$\boxed{\frac{\Delta\|\vec{\mathcal{G}}\|}{\|\vec{\mathcal{G}}_o\|} = 1\ \%}$$

2 -a - L'expression de la valeur du champ gravitationnel $\|\vec{\mathcal{G}}_P\|$

$$\|\vec{\mathcal{G}}_p\| = G\,\frac{m}{R^2}$$

Application numérique : $\|\vec{\mathcal{G}}_p\| = 6{,}67 \,.\, 10^{-11} \left[\frac{0{,}1}{(6390 \,.\, 10^3)^2}\right]$

$$\boxed{\|\vec{\mathcal{G}}_P\| = 1{,}63.10^{-25}\ N.kg^{-1}}$$

b -

$$\frac{\|\vec{\mathcal{G}}_o\|}{\|\vec{\mathcal{G}}_p\|} = \frac{9{,}8}{1{,}63.10^{-25}}$$

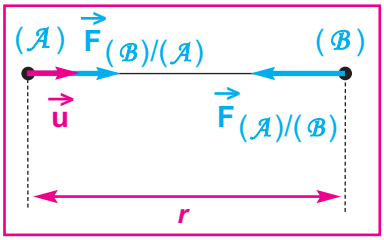
$$\boxed{\frac{\|\vec{\mathcal{G}}_o\|}{\|\vec{\mathcal{G}}_P\|} = 6.10^{25}}$$

Le champ de gravitation créé par la pomme au centre de la Terre est négligeable devant celui créé par la Terre à l'endroit où se trouve la pomme.

L'ESSENTIEL

Loi de gravitation universelle

Deux corps ponctuels de masses respectives m_A et m_B et distants de **r**, placés en deux points **A** et **B** exercent l'un sur l'autre des forces d'attraction directement opposées :



$$\vec{F}_{(\mathcal{A})/(\mathcal{B})} = -G\frac{m_{(\mathcal{A})}\cdot m_{(\mathcal{B})}}{r^2}\vec{u}$$

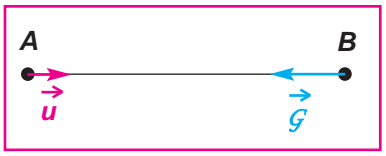
$G = 6{,}67.10^{-11}\ N.m^2.kg^{-2}$: constante de gravitation.

Un corps à répartition de masse à symétrie sphérique, comme la Terre, peut être remplacé par un corps ponctuel coïncidant avec son centre et dont la masse est égale à la masse du corps.

Champ de gravitation

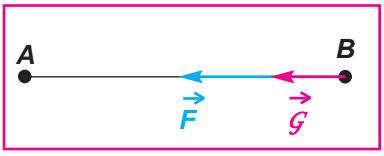
Le champ de gravitation créé, en un point **B**, par un corps ponctuel de masse m_A placé en **A** est :

$$\vec{\mathcal{G}} = -G\frac{m_A}{AB^2}\vec{u}$$



Le corps ponctuel de masse m_B placé en **B** subit la force :

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



Champ de pesanteur

On peut confondre champ de gravitation de la Terre et champ de pesanteur terrestre à une altitude **h** :

$$\vec{g}(h) = -G\frac{M_T}{(R_T+h)^2}\vec{u}$$

Le champ de pesanteur terrestre est uniforme dans un domaine restreint autour de la Terre.

Phénomène des marées

Le phénomène des marées résulte des attractions exercées sur notre planète par la Lune et le Soleil, et essentiellement sur les eaux des océans.

On connaît différents types de marées :

- ***les marées de vives eaux*** :
  elles se produisent quand la Lune est alignée entre la Terre et le Soleil et aussi quand la Terre est alignée entre la Lune Lune et le Soleil.
- ***les marées de mortes eaux*** :
  elles se produisent quand la Lune, la Terre et le Soleil forment un triangle rectangle.

Astéroïdes

Les astéroïdes sont de petits corps n'ayant pas pu s'agglomérer en planètes ; ils sont généralement regroupés, au sein du système solaire, en grand nombre sur des orbites communes autour du Soleil appelées ceintures.

On connaît **la ceinture principale** et **la ceinture de Kuiper**.

Comètes

Les comètes sont de petits corps glacés réunis essentiellement dans le grand **nuage de Oort**. Elles sont **1 million** à tourner autour du Soleil sous l'effet de la force gravitationnelle exercée par ce dernier.

EXERCICES

Je vérifie mes connaissances

Choisir la (ou les) proposition(s) correcte(s)

1- La valeur commune des deux forces constituant l'interaction gravitationnelle, calculée à l'aide de la formule de Newton

a - dépend de la forme des corps en présence.

b - ne dépend pas de la forme des corps en présence.

c - ne dépend pas de la forme des corps en présence si ces derniers ont la même forme.

2- La Lune ne tombe pas sur la Terre

a - parce que, à l'Antiquité, on dit qu'il y a un diable derrière chaque planète ou satellite pour les retenir en suspension dans l'espace.

b - parce que la Lune est soumise à une force gravitationnelle exercée par la Terre.

c - parce que la Lune est d'une part soumise à une force gravitationnelle exercée par la Terre, et d'autre part elle se meut avec une vitesse constante.

3- Une sphère ponctuelle de mase **m = 0,1 kg** est lâchée sans vitesse initiale à **2m** d'altitude. Le déplacement de l'objet vers la Terre a lieu parce que :

a - $\|\vec{F}_{T/S}\| = \|\vec{F}_{S/T}\|$

b - le solide est lâché sans vitesse initiale.

c - le champ gravitationnel créé par le solide au centre de la Terre est négligeable devant celui créé par la Terre à sa surface.

d - la masse du solide est négligeable devant celle de la Terre.

4- Deux objets non chargés électriquement

a - peuvent se repousser

b - s'attirent.

c - s'attirent uniquement s'ils ont des formes identiques.

J'applique mes connaissances et je raisonne

Ex-1- Calculer la valeur commune aux forces gravitationnelles s'exerçant entre le Soleil et Jupiter.

On donne :

Masse du Soleil : $m_{Soleil} = 2.10^{30}$ **kg**

Masse de Jupiter : $m_{Jupiter} = 2.10^{27}$ **kg**

Distance Soleil-Jupiter : $d = 8.10^{8}$ **km**.

Constante de gravitation universelle :

$G = 6,67.10^{-11}\ N.m^{2}.kg^{-2}$

Ex-2- On considère deux boules de pétanque identiques, de masse **m = 812 g** et de rayon **r = 4,5 cm**. On les pose par terre, en contact l'une avec l'autre.

1 - a - Calculer la valeur commune $\|\vec{F}\|$ aux forces gravitationnelles s'exerçant entre les deux boules.

b - Donner l'expression vectorielle de chacune de ces deux forces et les représenter sur un schéma en choisissant une échelle adaptée.

2 - a - Calculer la valeur $\|\vec{P}\|$ du poids de la boule.

b - Comparer la valeur de $\|\vec{F}\|$ à celle de $\|\vec{P}\|$; conclure.

On donne :

Masse d'une boule : **m = 812 g**

Rayon d'une boule : **r = 4,5 cm**

Rayon de la Terre : $R_T = 6390$ **km**.

Masse de la Terre : $M_T = 6.10^{24}$ **kg**

Constante de gravitation universelle :

$G = 6,67.10^{-11}\ N.m^{2}.kg^{-2}$

Ex-3- On considère l'interaction gravitationnelle entre une personne de masse **m** et un rocher de masse **M** distants de **d**. Dans la suite, ces deux corps sont tels qu'on peut appliquer la loi de gravitation universelle.

1 - Calculer la valeur commune $\|\vec{F}\|$ aux forces gravitationnelles s'exerçant entre ces deux corps.

2 - Calculer la valeur $\|\vec{P}\|$ du poids de la personne sachant que le champ de pesanteur dans la position où elle se trouve a pour valeur **9,80 N.kg^{-1}**.

3 - Quelle doit être la masse **M** du rocher pour que la valeur de la force de gravitation soit égale à celle du poids de la personne.

Données : **m = 80 kg**
M = 80 kg
d = 2 m

La constante de gravitation universelle est
G = 6,67.10^{-11} N.m^2.kg^{-2}

Ex-4- La Terre de masse m_T et de rayon r_T et la Lune de masse m_L et de rayon r_L sont supposées à répartition de masse à symétrie sphérique telles que

$$m_T = 81 m_L \text{ et } r_T = \frac{11}{3} r_L.$$

1 - Déterminer les caractéristiques du champ de gravitation lunaire $\vec{g}_{0S}$ à la surface de la Lune.

2 - Il existe sur la ligne joignant les astres un point **M** où les champs de gravitation lunaire et terrestre se compensent.

a - Calculer la distance **d** du point **M** au centre de la Terre.

b - Indiquer, sur le segment Terre - Lune, le domaine où l'action gravitationnelle de l'un des deux astres est prépondérante.

Données :
- valeur du champ de gravitation terrestre à sa surface $\|\vec{g}_{0T}\|$ = **9,80 N.kg^{-1}**
- distance des centres des deux astres Terre - Lune : **3,8.10^5 km**

Ex-5- L'astronome Pierre Bouguer (**1698-1758**) proposa des expériences s'appuyant sur la déformation d'un ressort pour mesurer la constante de gravitation universelle **G**.
Voici son raisonnement : " Supposons qu'on dispose d'un dynamomètre pour mesurer la valeur commune aux forces gravitationnelles s'exerçant entre la Terre de masse M_T et de rayon R_T et une boule d'acier de masse **m**, et que les mesures données par ce dynamomètre soient si précises qu'on puisse lire de très faibles différences. En effectuant la mesure à deux altitudes différentes, il est possible de calculer la valeur de **G** ".

1 - Dispositif au sommet du Mont Blanc, à une altitude h_1 : exprimer la valeur $\|\vec{P}_1\|$ du poids de la boule d'acier en fonction de M_T, R_T, **m**, h_1 et **G**.

2 - Dispositif au niveau de la mer : exprimer la valeur $\|\vec{P}_1\|$ du poids de la boule d'acier en fonction de M_T, R_T, **m** et **G**.

3 - En déduire l'expression littérale de **G** en fonction de $\|\vec{P}_0\|$, $\|\vec{P}_1\|$, **m**, M_T, h_1 et R_T ; calculer sa valeur numérique sachant que :

m = 50 kg
M_T = 6.10^{24} kg
h_1 = 4932 m
R_T = 6390 km

$\|\vec{P}_0\|$ = **490,06N**

$\|\vec{P}_1\|$ = **489,3 N**

Ex-6-Etude d'un texte scientifique : Un texte historique sur la gravitation
Voici quelques extraits de l'ouvrage de NEWTON : *Principes mathématiques de la philosophie naturelle, la loi de la gravitation universelle.*
" La Lune gravite vers la Terre, et par la force de gravité elle est continuellement retirée du mouvement rectiligne et retenue dans son orbite. " [...]
" La force qui retient la Lune dans son orbite tend vers la Terre et est en raison réciproque du carré de la distance des lieux de la Lune au centre de la Terre. " [...]
"La gravité appartient à tous les corps, et elle est proportionnelle à la quantité de matière que chaque corps contient. "

1 - Quel est le principe sous-entendu par NEWTON lorsqu'il écrit " ... et par la force de gravité elle est continuellement retirée du mouvement rectiligne " ?
Expliquer la signification de cette partie de phrase.
2 - Quel est l'objet acteur de cette force de gravité ? Quel est l'objet receveur ?
3 - S'agit-il d'une force d'attraction ou de répulsion ? Quel est le mot dans le texte qui permet de répondre à cette question ?
4 - Que signifie " ... tend vers la Terre " ?
5 - On note d la distance entre le centre de la Terre et le centre de la Lune.
La valeur de la force de la gravité est-elle proportionnelle à d ? d^2 ? $\frac{1}{d^2}$? Justifier la réponse.

6 - m_T désignant la masse de la Terre et m_L celle de la Lune, exploiter le texte de Newton pour écrire la loi de gravitation.

Ex-7- Etude d'un texte scientifique : Extraits de l'ouvrage de Newton "Les principes mathématiques de la philosophie naturelle", d'après la traduction de Mme de Chastelet (1756-1759).

Proposition I : les forces par lesquelles les satellites de Jupiter sont retirés perpétuellement du mouvement rectiligne (...), sont dirigées vers le centre de Jupiter et sont inversement proportionnelles aux carrés de leur distance à ce centre.
Proposition V : les satellites de Jupiter gravitent vers Jupiter, ceux de Saturne vers Saturne, et les planètes principales vers le Soleil, et c'est par la force de leur gravité que ces corps (...) sont retirés à tout moment de la ligne droite et qu'ils sont retenus dans des orbites curvilignes.
Proposition VI : tous les corps gravitent vers chaque planète et, sur la même planète, (...) leurs forces de gravité, à égale distance du centre, sont proportionnelles à la masse que chacun d'eux contient.
On considère que tous les satellites et planètes sont des corps dont la répartition de la masse est à symétrie sphérique. Les mouvements sont étudiés dans le référentiel "jupitérocentrique" (d'origine le centre de Jupiter et d'axes dirigés vers trois étoiles fixes). On note M la masse de Jupiter et G la constante de gravitation universelle.

On étudie le champ de gravitation de Jupiter.
1- Donner l'expression vectorielle de la force d'interaction gravitationnelle exercée par Jupiter sur un de ses satellites de masse m et situé à la distance r du centre O de Jupiter. Faire un schéma explicatif.
2- Donner, dans les propositions ci-dessus extraites du livre I, les citations en accord avec cette expression vectorielle.
3- Donner l'expression vectorielle du champ de gravitation créé par Jupiter, à la distance r de son centre.
4- Représenter quelques lignes du champ de gravitation autour de Jupiter.
5- Pourquoi est-il important de préciser que la répartition de la masse des corps est à symétrie sphérique ?

POUR EN SAVOIR PLUS

HISTORIQUE

Galilée (1564 - 1642)

Célèbre savant italien. Il peut être considéré comme le principal fondateur de la physique moderne.

Partisan convaincu de la méthode expérimentale, il fit de belles découvertes en mécanique telle que la chute des corps.

Dans les dernières années de sa vie, Galilée devint aveugle.

Quelle amertume dans cette déclaration faite à un ami, en 1638 :

" Ce ciel, ce monde, cet univers, que par mes observations merveilleuses et mes évidentes démonstrations j'avais agrandi cent et mille fois au-delà de tout ce qu'avaient cru les savants de tous les siècles passés, sont maintenant devenus pour moi si restreints et si diminués qu'ils ne s'étendent guère au-delà de l'espace occupé par ma personne ! "

Depuis les temps les plus lointains, l'observation des corps célestes dans le ciel constituait une science mais "intuitive" c'est-à-dire pur produit de l'inspiration de l'être humain et ne faisant pas l'objet de mesures.

Du temps des Grecs, dans l'Antiquité, l'univers se sépare en deux mondes différents : la Terre d'une part et le reste constitué par la Lune, le Soleil et les astres.

Aristote (- **350 ans** avant **Jésus-Christ**) a fixé cette description du monde céleste dans son ouvrage **" De la physique "** : la Terre au centre, puis viennent la Lune, Mercure, Vénus, le Soleil, Mars, Jupiter et Saturne qui sont en mouvement sur des sphères concentriques centrées sur la Terre; les étoiles occupent la sphère la plus extérieure tout en restant fixes les unes par rapport aux autres.

Ptolémée (**140 ans** après **Jésus-Christ**) développe dans son œuvre **" La grande synthèse "** un système qui cadre parfaitement bien avec la vision d'**Aristote** et qui permet de calculer le mouvement des planètes, de la Lune et du Soleil.

Ce système a tenu bon pendant **15** siècles environ sans connaître de modifications.

Copernic (**1473** - **1543**) et **Kepler** (**1571** - **1630**) ont mis fin aux préceptes de la vision du monde établis par **Aristote**.

La Terre n'occupe plus une place privilégiée dans le système solaire **!** Aussi bien la Terre que Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne tournent autour du Soleil sur des trajectoires pouvant être une ellipse ou un cercle.

Grâce aux observations effectuées à l'aide de sa lunette astronomique, **Galilée** (**1564** - **1642**) offre une justification éclatante au système de **Copernic** ; on passe ainsi définitivement du *système géocentrique* d'**Aristote** dans lequel la Terre est le centre de l'univers, au *système héliocentrique* ayant pour centre le Soleil.

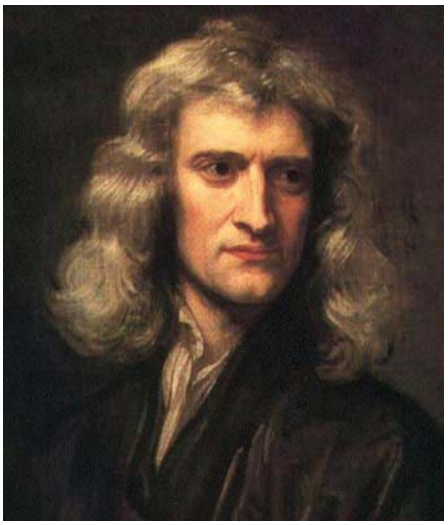
Notons que l'année du décès de **Galilée** correspond bien à celle de la naissance de **Isaac Newton** (**1642** - **1727**), quelle coïncidence **!**

En **1679 Newton** reçoit du physicien anglais **Hooke** une lettre dans laquelle il lui soumettait l'idée suivante **:** au cours de son mouvement circulaire, la planète (la Terre par exemple) est soumise à une force attractive exercée par le Soleil proportionnelle à $\frac{1}{r^2}$ (**r** est la distance séparant le centre du Soleil à celui de la Terre). Jusque là **Hooke** vient d'apporter une contribution de taille à ce qui sera la loi de gravitation universelle, mais **Newton** n'a pas donné suite à cette proposition audacieuse. Contre toute attente **Newton** publie en **1687** son ouvrage**" Les principes mathématiques de la philosophie naturellees"** dans lequel il reprend, à propos de la force de gravitation universelle, exactement ce qui a été proposé par **Hooke** mais en y ajoutant qu'elle était proportionnelle aux masses des deux corps en question.

C'est ainsi que **Newton** bâtit l'expression de la valeur de la force gravitationnelle attractive entre deux corps supposés ponctuels de masses m_A et m_B et distants de **r** :

$$\|\vec{F}_{A/B}\| = \|\vec{F}_{B/A}\| = G\,\frac{m_A \cdot m_B}{r^2}$$

La Physique en questions



" Professeur Coulomb : Avez-vous une idée, mon cher collègue, sur la nature des forces qui assurent la cohésion des corps, planètes ou cailloux ?
Professeur Newton : Enfantin, mon cher collègue ! Si les matériaux qui constituent notre Terre tiennent ensemble, c'est évidemment pour les mêmes raisons que nous restons sur Terre, retenus par la pesanteur. C'est donc la gravité qui est responsable de la cohésion de la matière.
Professeur Coulomb : Et vous pensez que ceci, qui vaut pour une planète, vaut pour un caillou ?
Professeur Newton : Bien entendu ! La planète et le caillou ne sont-ils pas faits de la même matière ?
Professeur Coulomb : Mais comment les parties d'un caillou pourraient-elles avoir entre elles une attraction gravitationnelle assez grande pour expliquer sa cohésion, alors que nous ne sentons pas l'attraction gravitationnelle de ce caillou sur nous, trop faible, contrairement à celle de la Terre ?
Professeur Newton : Alors, quelle est votre explication ?
Professeur Coulomb : Pour moi, il s'agit de forces électrostatiques, dues à l'attraction réciproque des particules négatives (électrons) et positives (noyaux) qui constituent la matière. D'ailleurs, vous savez bien que les forces électriques sont bien plus puissantes que les forces gravitationnelles, et que l'attraction électrique entre un électron et un proton est dans les 104 fois plus grande que leur attraction gravitationnelle, qui doit donc être complètement masquée.
Professeur Newton : C'est absurde ! Vous oubliez tout simplement qu'outre les attractions électriques entre les particules négatives et positives, il y a les répulsions entre les négatives, et entre les positives. Comme la matière est globalement neutre, ces attractions et répulsions se compensent et les forces électriques ne jouent pas ! "

Extrait de : *La Physique en questions (électricité et magnétisme), Jean-Marc Lévy-Leblond, Vuibert* (2, édition, 1999).

http://voyage.in2p3.fr/interactions.html#intro
http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/Meca/Systemes/inter_new.html
http://www.phychim.ac-versailles.fr/IMG/ppt/interaction_gravitationnelle.ppt
http://www.cerimes.education.fr/e_doc/forces/gravitation.htm

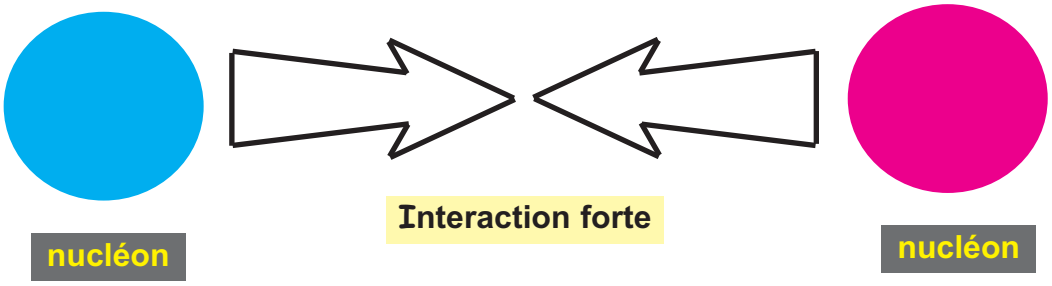
4 INTERACTION FORTE

L'histoire des interactions fortes commence en 1911 avec la découverte du noyau atomique par Rutherford .

En effet, il fallut trouver une nouvelle force pour expliquer que les noyaux atomiques ne se disloquent pas sous l'effet électrique répulsif des protons ente eux .

OBJECTIFS

- Expliquer la cohésion du noyau atomique.
- Interpréter la cohésion de la matière :
  - à l'échelle du noyau
  - à l'échelle des atomes,des molécules et à notre échelle
  - à l'échelle astronomique.



INTERACTION FORTE

1. Introduction

Tous les phénomènes physiques, chimiques ou biologiques tels que la chute d'une pomme, la lumière émise d'une ampoule électrique, les transformations nucléaires qui font briller les étoiles et qui alimentent les centrales nucléaires, etc... peuvent être expliqués à l'aide de quatre interactions dites **interactions fondamentales.**

Les deux interactions, dont les effets sont connus depuis longtemps, sont :

Interaction gravitationnelle

Issac Newton est le premier qui, en **1687**, a compris que la force qui fait tomber la pomme et celle qui maintient la Lune sur son orbite autour de la Terre sont le résultat d'une même interaction : **l'interaction gravitationnelle**.

Il s'agit d'une interaction attractive dont les effets ne sont perceptibles que lorsque des corps très massifs sont en jeu ; elle explique la pesanteur, les marées ainsi que les trajectoires des planètes et des étoiles.

Interaction électromagnétique

L'interaction électrique et l'interaction magnétique sont unifiées en **1860** par Maxwell en une seule et même interaction : **l'interaction électromagnétique**.

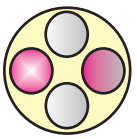
Il s'agit d'une interaction qui agit sur les corps ayant une charge électrique ; elle peut être attractive ou répulsive selon les signes des charges mises en jeu. Elle assure la cohésion de la matière en liant les électrons au noyau des atomes.

L'interaction électromagnétique permet d'expliquer l'électricité, le magnétisme, la lumière etc...

2. Cohésion de la matière à l'échelle du noyau et interaction forte

2.1 . Interactions dans un noyau d'Hélium

Un noyau d'Hélium $^{4}_{2}\mathbf{He}$ est formé de deux neutrons et deux protons (***Doc.1***).



Doc.1 : modélisation du noyau d'Hélium .
Le rayon d'un nucléon est de **$1{,}2.10^{-15}$ m.**

2-1-1. Interaction gravitationnelle

Les nucléons possèdent une masse ; ils subissent une attraction gravitationnelle.

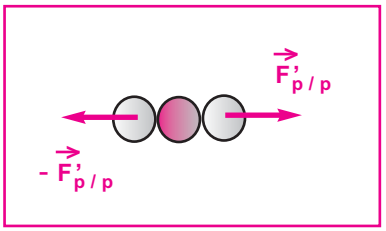
La valeur commune des deux forces qui constituent l'interaction gravitationnelle entre deux protons supposés jointifs est donnée par :

$$\left\|\vec{F}_{p/p}\right\| = G\,\frac{m_p \cdot m_p}{r^2} = 6{,}67.10^{-11}\,\frac{(1{,}67.10^{-27})^2}{(2{,}4.10^{-15})^2} = 10^{-35}\ \text{N}$$

2-1-2 . Interaction électrique

Les protons portent des charges positives ; ils subissent une répulsion électrique (***Doc.2***).

La valeur commune des deux forces qui constituent l'interaction électrique entre deux protons supposés séparés par un neutron est donnée par :



Doc.2

$$\left\|\vec{F}'_{p/p}\right\| = k\,\frac{q_p \cdot q_p}{d^2} = 9.10^9\,\frac{(1{,}6.10^{-19})^2}{(4{,}8.10^{-15})^2} = 10\ \text{N}$$

2-1-3 . Interaction forte

Au sein de ce minuscule noyau, l'attraction gravitationnelle entre les nucléons est pratiquement inexistante (**10^{-35} N**) alors que les protons se repoussent très fortement (**10 N**).

De plus les protons et les neutrons se déplacent à plus de **30.000 km.s^{-1}** (plus d'un dixième de la vitesse de la lumière, soit le tour de la Terre en **1,34** seconde) !

Si les nucléons étaient soumis seulement à ces deux interactions, les noyaux se disloqueraient. Or le noyau de la plupart des atomes est stable ; il faut donc admettre l'existence d'un troisième type d'interaction capable de contrer la répulsion électrique et d'assurer la cohésion du noyau : **l'interaction forte.**

LES QUARKS

En **1964**, **Murray Gell-Mann** et **George Zweig** émirent l'hypothèse que les protons et les neutrons ne sont pas des particules élémentaires c'est à dire insécables mais constituées de particules plus petites appelées **quarks**.

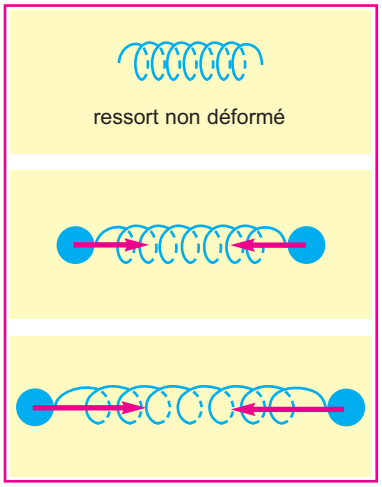
En réalité, l'interaction forte s'exerce entre les quarks.

L'interaction forte assure la cohésion des noyaux atomiques

2.2 . Mode d'action de l'interaction forte

- L'interaction forte s'exerce sur les nucléons.
- Elle est de courte portée ; son rayon d'action est de l'ordre de la taille des noyaux atomiques, soit **10^{-15} m**.
- Contrairement à l'interaction électromagnétique et à l'intéraction gravitationnelle, l'interaction forte augmente avec ladistance!

Plus les particules sont proches les unes des autres moins elles interagissent. Ce comportement est analogue à celui de deux billes attachées à un ressort : plus les billes s'éloignent l'une de l'autre, plus le ressort tente de les rapprocher (***Doc.3***).



Doc.3 : plus les billes sont éloignées l'une de l'autre, plus le ressort tend à les rapprocher en exerçant une tension plus forte.

2.3 . Les limites de l'interaction forte

Si le nombre de protons dans le noyau est important, l'interaction électrique prend le pas sur l'interaction forte et les noyaux deviennent instables.

C'est le cas des noyaux lourds instables tel que l'uranium.

L'ESSENTIEL

L'interaction forte :
- est attractive,
- est d'une portée courte (distance nucléaire),
- d'une intensité élevée (dans le noyau, elle est environ mille fois plus élevée que l'interaction électrique),
- elle s'exerce entre les nucléons(les neutrons et les protons).

L'interaction forte assure la cohésion de la matière à l'échelle des noyaux.

Cohésion de la matière

Les atomes, les ions et les molécules qui constituent la matière sont des assemblages des noyaux chargés positivement et d'électrons chargés négativement. Les noyaux se repoussent mutuellement, les électrons en font autant, tandis que noyaux et électrons s'attirent. Les forces attractives compensent les forces répulsives, ce qui permet d'expliquer la stabilité de la matière de l'Univers.

Suivant l'échelle à laquelle on étudie la matière, l'une ou l'autre de ces interactions (interaction gravitationnelle, interaction électromagnétique, interaction forte) prédomine.

	Interaction gravitationnelle	**Interaction électromagnétique**	**Interaction forte**
À l'échelle astronomique	Prédominante	Négligeable car à cette echelle les objets sont globalement neutres	Négligeable
À l'échelle humaine	Négligeable	Prédominante	Négligeable
À l'échelle atomique	Négligeable	Prédominante	Négligeable
À l'échelle du noyau	Négligeable	Négligeable pour les noyaux tels que z>83	Prédominante si z<83 elle permet d'expliquer la cohésion du noyau

EXERCICES

Je verifie mes connaissances

Choisir la (ou les) proposition(s) correcte(s)

1- L'interaction gravitationnelle :
a- est attractive.
b-est répulsive.
c-dépend de la masse des corps.

2- L'interaction électromagnétique:
a-est attractive.
b-est répulsive.
c-dépend de la charge des corps.

3- L'interaction gravitationnelle est :
a- à courte portée.
b-de grande portée.
c-à courte et longue portée.

4- L'interaction électrique est :
a- à courte portée.
b- de grande portée.
c- à courte et longue portée.

5- L'interaction forte a une portée de l'ordre de :
a - 10^{-9}m
b- 10^{-18}m
c- 10^{-15}m

6- L'interaction forte s'exerce :
a- entre protons et électrons.
b- entre protons.
c- entre protons et neutrons.

7- L'interaction forte assure la cohésion de la matière :
a-à l'échelle des noyaux.
b-à l'échelle des atomes.
c-à l'échelle des molécules.

J'applique mes connaissances et je raisonne

Ex-1- Les interactions gravitationnelle et électrique s'exercent au niveau de l'atome, par exemple entre les deux protons du noyau d'un atome d'hélium, où ils sont séparés d'une distance de l'ordre de **d = 10^{-15} m**.

1 - On considére que les protons sont des corps ponctuels.
Donner les expressions des valeurs des forces exprimant l'interaction gravitationnelle et l'interaction électrique entre les deux protons.

2 - Pour chacune des deux interactions, préciser si elle est attractive ou répulsive.

3 - Exprimer le rapport des deux valeurs en fonction de la charge et de la masse du proton, puis calculer numériquement chacune d'elles.

4 - Expliquer pourquoi ces deux interactions ne permettent pas d'expliquer la cohésion du noyau étudié.

La masse du proton $m_p = 1{,}67.10^{-27}$ *kg.*

La charge du proton: $e = 1{,}6.10^{-19}$*C.*

Ex-2- Le noyau de l'atome d'hélium est constitué de deux protons et de deux neutrons.
On considère que le noyau est compact.

1- Quelle distance minimale sépare les centres de deux nucléons ?

2 - Donner les caractéristiques de la force d'interaction gravitationnelle qui s'exerce entre deux nucléons.

3 - Donner les caractéristiques de la force d'interaction électrique qui s'exerce entre deux protons. Comparer les valeurs de ces deux forces d'interaction. Que peut-on en déduire quant à la cohésion de ce noyau ?

4- a- Dans l'atome d'hélium, quelle est la nature de la force qui maintient les électrons au voisinage du noyau ?

b- L'atome à une structure lacunaire, pourquoi un morceau de matière ne peut-il pas en pénétrer un autre ?

c- En déduire, la nature de l'interaction qui prédomine à l'échelle atomique et humaine.

constante de gravitation: $G = 6{,}67.10^{-11}$ *SI,*
constante électrique : $k = 9.10^{9}$ *SI,*
rayon d'un nucléon: $r = 1{,}2.10^{-15}$ *m,*
masse d'un nucléon : $m = 1{,}7.10^{-27}$*kg,*
charge du proton: $e = 1{,}6.10^{-19}$*C.*

Ex-3-Etude d'un texte scientifique : Le combat des forces et la stabilité d'un noyau

"Puisqu'ils portent une charge électrique positive, les protons se repoussent. Comment sont-ils alors liés dans le noyau atomique? Parce qu'ils subissent une force très attractive, l'interaction forte, plus intense à courte distance que la force électromagnétique [....]
L'interaction électromagnétique étant de portée infinie, sa répulsion est cumulative [....]. En revanche, l'interaction forte étant de courte portée, chaque nucléon n'est attiré que par ses proches voisins, indépendamment de la taille du noyau. La cohésion des noyaux provient d'un jeu subtil entre cette répulsion électrostatique et l'interaction forte entre nucléons. Quand le nombre de charges positives augmente, la répulsion électrostatique finit par l'emporter sur l'interaction forte et casse le noyau."

***Extrait d'un article de pour la science, dossier hors série,* octobre 1996.**

1- Pour quelle raison les proton restent-ils confinés dans le noyau, alors qu'ils devraient se repousser électriquement ?
2- a- Entre quelles particules l'interaction forte s'exerce-t-elle ?
b- Quelle est la portée de cette interaction ?
3- Pourquoi, d'après le texte, les noyaux deviennent instables lorsque le nombre de nucléons augmente ?

Ex-4-Etude d'un texte scientifique : Les interactions fondamentales

Première catégorie : la force gravitationnelle. Cette force est universelle, c'est-à-dire que chaque particule ressent la force de gravité en fonction de sa masse [...]. Elle peut agir à très grande distance et elle est toujours attractive.
Seconde catégorie : la force électromagnétique qui interagit avec les particules chargées électriquement [...].
La force entre deux charges positives sera répulsive comme le sera la force entre deux charges négative, mais entre une charge positive et une charge négative cette force est attractive .
L'attraction électromagnétique entre les électrons et les protons fait que les électrons tournent autour du noyau de l'atome, exactement comme l'attraction gravitationnelle fait que la terre tourne au tour du soleil.
Dernière catégorie : l'interaction forte qui retient les protons et les neutrons ensemble dans le noyau de l'atome.

Extrait de: *"Une brève histoire du temps"*
Stephen Hawking.

1- a- Quelles sont les trois catégories de forces évoquées dans cet extrait ?
b- Quelle est la nature de chacune de ces interactions ?
2- À quelle échelle chacune d'elle est-elle prédominante ? Expliquer, dans chaque cas, pourquoi les deux autres sont négligeables.

POUR EN SAVOIR PLUS

LES INTERACTIONS FONDAMENTALES

" Dans la conception contemporaine, il faut entendre par force non seulement ce qui pousse, qui tire ou modifie le mouvement, mais aussi tout ce qui incite au changement, à la métamorphose.
La force, ou mieux l'interaction, dans l'acception physicienne, se définit donc comme l'agent unique de la transformation.

Les forces, en apparence, sont au nombre de quatre : forte, faible, électromagnétique et gravitationnelle.

Les quatre influences physiques s'entrecroisent en nous et en toutes choses. Aux noeuds des relations sont les particules. [...]

L'intensité d'une interaction donnée peut être caractérisée par un nombre, une constante universelle qui mesure le taux auquel procèdent les transformations induites par la dite interaction. Les quatre forces sont spécifiques, hiérarchisées en portée et en intensité, mais non exclusives.

L'interaction forte domine en intensité toutes les autres, dont l'interaction électromagnétique (d'où son nom), laquelle surpasse l'interaction faible, qui elle-même laisse très loin derrière la minuscule force de gravitation.

Pourtant, il ne faut pas s'y méprendre, cette hiérarchie microscopique ne reflète en rien l'influence des forces à grande échelle. La gravitation est sans conteste la force dominante à l'échelle cosmique, parce qu'elfe n'est contrebalancée par aucune antigravitation, et que son intensité, bien que déclinante s'exerce sans limite de distance.

Les interactions forte et faible, de par leur portée minuscule, se sont fait un royaume du noyau de l'atome.

Quant à l'interaction électromagnétique, bien que de portée illimitée, elle ne saurait gouverner le vaste Cosmos car les grandes structures sont inactives du point de vue de l'électricité. En effet, les charges électriques plus et moins, en nombre égal, partout se neutralisent. Ce n'est pas pour autant une entité négligeable : la force électromagnétique a pris possession du vaste domaine laissé vacant entre l'atome et l'étoile, qui inclut le minéral, l'animal, le végétal et l'homme.

Ainsi chacune des quatre forces assume son identité et sa fonction précise. [...]
Parmi les quatre forces en lesquelles les physiciens reconnaissent les moteurs universels, la vie terrestre, la vie pensée à deux mètres de haut, enfin presque, a rendu familières les deux forces à longue portée, à savoir l'interaction électromagnétique et la gravitation. La première maintient la cohésion des oeuvres architecturales du monde supranucléaire (atomes, molécules, corps liquides et solides).

La seconde contrôle le mouvement de la Terre autour du Soleil et tient, entre autres choses, la Terre sous nos pieds.

Les interactions forte et faible régissent le microcosme et sont dans les conditions ambiantes de notre existence totalement insoupçonnables. "

***Michel Cassé, Nostalgie de la lumière,* 1987.**

http://www.ostralo.net/interactionsfondamentales/pages/interforte.htm
http://www.palais-decouverte.fr/index.php?id=148
http://voyage.in2p3.fr/interactions.html#forte
http://www.cerimes.education.fr/e_doc/forces/forte.htm

MOUVEMENTS DE TRANSLATION

Chapitre 5- ETUDE CINEMATIQUE

Chapitre 6- ETUDE DYNAMIQUE

Chapitre 7- ÉNERGIE CINÉTIQUE

Chapitre 8- MOUVEMENTS DANS LES CHAMPS

5 ETUDE CINEMATIQUE D'UN SOLIDE EN MOUVEMENT DE TRANSLATION

La cinématique est l'étude mathématique des mouvements, indépendamment des causes qui les produisent et de la masse des corps en mouvement ; elle les décrit , mais ne les explique pas.

Cependant, nous verrons dans les chapitres suivants que la détermination des causes des mouvements découle, en partie, de leur étude cinématique.

TGV en mouvement

OBJECTIFS

- Reconnaître un solide en mouvement de translation.
- Représenter les vecteurs position, vitesse et accélération d'un mobile.
- A l'aide de l'expérience, reconnaître chacun des mouvements suivants et être capable d'en écrire l'équation horaire :
  - mouvement rectiligne uniforme
  - mouvement rectiligne uniformément varié (accéléré ou retardé)
  - mouvement rectiligne sinusoïdal.
- Connaissant l'expression d'une grandeur grandeur cinématique ($\mathbf{x}, v$ ou a) en fonction du temps ainsi que les conditions initiales, retrouver les expressions des deux autres.
- Etablir, pour un mouvement rectiligne uniformément varié, la relation $v_2^2 - v_1^2 = 2a(\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1)$.
- Caractériser un mouvement rectiligne sinusoïdal par son amplitude $\mathbf{X}_m$ et sa période $\mathbf{T}$.
- Etablir la relation entre l'accélération et l'élongation d'un mobile en mouvement rectiligne sinusoïdal.

ETUDE CINÉMATIQUE D'UN SOLIDE EN MOUVEMENT DE TRANSLATION

1. Généralités

1.1 . Solide de référence

La cinématique s'intéresse à l'étude des mouvements des corps sans se préoccuper des causes de ces mouvements.

L'état de mouvement ou l'état de repos d'un corps est une notion relative : par exemple, dans un avion en vol, un passager endormi est à la fois dans un état de repos par rapport à l'avion et dans un état de mouvement par rapport à la Terre ; s'il se lève et se déplace, son mouvement par rapport à l'avion sera différent de celui par rapport à la Terre.

CONCLUSION : la description d'un mouvement se fait par rapport à un corps choisi comme référence.

1.2 . Repères d'espace et de temps

Pour décrire mathématiquement les caractéristiques d'un mouvement, un observateur utilise un **repère d'espace** lié au solide de référence et un **repère de temps**.

Le repère d'espace est déterminé par une origine **O** et **trois axes** le plus souvent **orthonormés** ;

il est noté $\mathcal{R}\{\mathbf{O}, \vec{\mathbf{i}}, \vec{\mathbf{j}}, \vec{\mathbf{k}}\}$.

Le repère temps est constitué par une **origine des temps** (**t = 0**) et une horloge (ou chronomètre) ; l'**unité de temps** est la **seconde** de symbole **s** dans le système international.

INSTANT

Un **instant** est caractérisé par un nombre algébrique **t**, appelé **date**, correspondant à l'intervalle de temps qui sépare cet instant d'un autre instant dont la date est prise arbitrairement égale à **zéro**.

L'instant de date **t = 0** est appelé **origine des temps**.

La date associée à un instant antérieur à l'origine des temps est négative.

1.3 . Référentiels

Un **référentiel** est un ensemble constitué par un objet de référence, un repère d'espace et un repère temps.

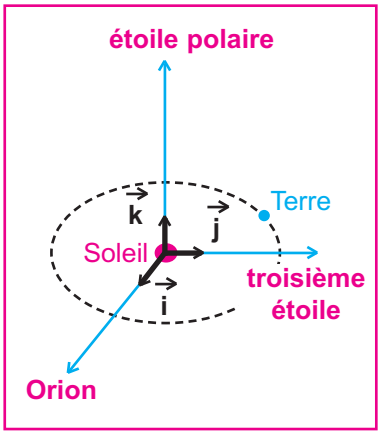
Les référentiels les plus connus sont :

RÉFÉRENTIEL DE COPERNIC

Le référentiel de Copernic est constitué par :

- **un corps de référence** : le système solaire.
- **un repère d'espace** : l'origine est le centre d'inertie du système solaire (pratiquement confondu avec le centre du Soleil), les trois vecteurs unitaires sont orientés vers trois corps lointains et pratiquement fixes : l'étoile polaire, la constellation Orion et une troisième étoile (***Doc.1***).
- **un repère temps** : une origine des temps et une horloge.

Ce référentiel est utilisé pour étudier le mouvement des planètes, des étoiles ...



Doc.1

Référentiel héliocentrique

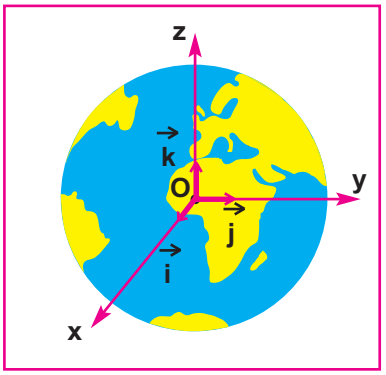
Le référentiel héliocentrique est constitué par :
- **un objet de référence** : le Soleil.
- **un repère d'espace** : l'origine est le centre du Soleil, les trois vecteurs unitaires sont orientés vers trois corps lointains et pratiquement fixes : l'étoile polaire, la constellation Orion et une troisième étoile (***Doc.1***).
- **un repère temps** : une origine des temps et une horloge.

Ce référentiel est utilisé pour étudier le mouvement des planètes.

Référentiel géocentrique

Il est encore appelé **référentiel de Coriolis** ; il est constitué par :
- **un objet de référence** : la Terre
- **un repère d'espace** : l'origine est le centre de la Terre, les trois vecteurs unitaires sont orientés vers trois étoiles lointaines, pratiquement fixes et dont l'une est l'étoile polaire (***Doc.2***).
- **un repère temps** : une origine des temps et une horloge.

Ce référentiel est utilisé pour étudier le mouvement de la Lune et des satellites artificiels autour de la Terre.

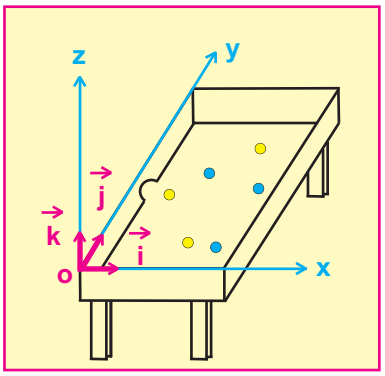


Doc.2

Référentiel terrestre

Il est encore appelé **référentiel de laboratoire** ; il est constitué par :
- **un objet de référence** : la Terre
- **un repère d'espace** : l'origine est un point de la surface de la Terre ou d'un corps au contact de la Terre, et les trois vecteurs unitaires constituent une base généralement orthonormée ; exemple : le repère d'espace $\mathcal{R}\{\mathbf{O}, \vec{\mathbf{i}}, \vec{\mathbf{j}}, \vec{\mathbf{k}}\}$ lié à la table de billard (***Doc.3***).
- **un repère temps** : une origine des temps et une horloge.

Ce référentiel est bien adapté à tout mouvement se produisant à la surface de la Terre.



Doc.3

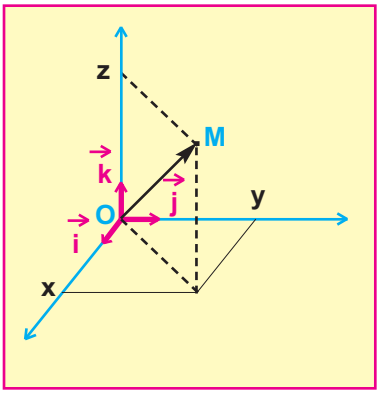
2. Grandeurs cinématiques

2.1 . Repérage du point mobile

Coordonnées cartésiennes

La position **M** d'un point mobile à un instant de date **t** est définie dans l'espace rapporté au repère $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ généralement orthonormé par ses coordonnées cartésiennes **x**, **y** et **z** (***Doc.4***) ; elles dépendent de la date **t**.

Les fonctions $x = f(t)$, $y = h(t)$ et $z = g(t)$ sont appelées **équations horaires** ou **équations paramétriques de la trajectoire**.



Doc.4

Vecteur position

A cette position **M** du point mobile, au cours de son mouvement, est associé un **vecteur position**

$$\overrightarrow{OM} = x\,\vec{i} + y\,\vec{j} + z\,\vec{k} \qquad (\textit{Doc.4}).$$

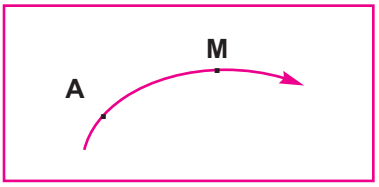
On peut le noter comme suit :

$$\overrightarrow{OM} \begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases}$$

Abscisse curviligne

Si la trajectoire est curviligne, on peut l'orienter et choisir un point **A** comme origine.

La position **M** du point mobile à un instant **t** est donnée par la valeur algébrique de l'arc $s = \overset{\frown}{AM}$ appelée **abscisse curviligne** (***Doc.5***).



Doc.5

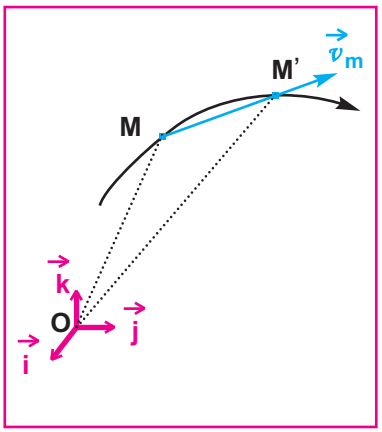
2.2 . Vecteur vitesse instantanée

2.2.1. Cas d'un point matériel

Désignons par **M** la position d'un point mobile à un instant **t** et par **M'** sa position à un instant $t + \Delta t$; Δt est une grandeur positive correspondant à un intervalle de temps.

Le **vecteur vitesse moyenne** du mobile entre les dates **t** et $t + \Delta t$ est défini par la relation vectorielle :

$$\vec{v}_m(t, t + \Delta t) = \frac{\overrightarrow{MM'}}{\Delta t} \qquad (\textit{Doc.6})$$



Doc.6

Il a même direction et même sens que le vecteur $\overrightarrow{MM'}$; seulement ce vecteur vitesse moyenne ne décrit pas avec précision le mouvement car, pendant l'intervalle de temps Δt, le déplacement réel du mobile s'effectue le long d'une courbe et non pas suivant le vecteur $\overrightarrow{MM'}$.

Définition

Pour que la description du mouvement dans un repère $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ soit plus précise, il faut réduire Δt.
Si cet intervalle de temps Δt est très petit devant la durée du mouvement et tend vers zéro, le vecteur

$\vec{v}_m(t, t + \Delta t) = \dfrac{\overrightarrow{MM'}}{\Delta t}$ correspond pratiquement

au **vecteur vitesse instantanée** $\vec{v}(t)$ à l'instant de date t.

$$\vec{v}(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\overrightarrow{MM'}}{\Delta t}$$

$$\vec{v}(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\overrightarrow{MM'}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\overrightarrow{OM'} - \overrightarrow{OM}}{\Delta t}$$

$$= \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\overrightarrow{\Delta OM}}{\Delta t} = \frac{d\,\overrightarrow{OM}}{dt}$$

Le vecteur vitesse instantannée $\vec{v}(t)$ est la dérivée par rapport au temps du vecteur position $\overrightarrow{OM}$

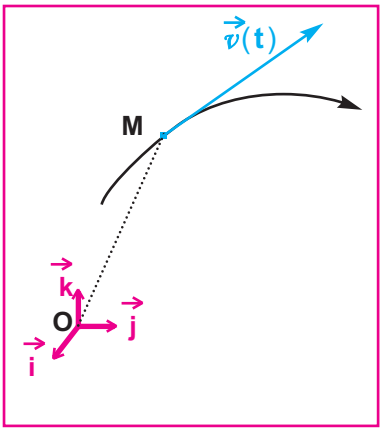
$$\vec{v}(t) = \frac{d\,\overrightarrow{OM}}{dt}$$

Direction et sens

Lorsque $\Delta t \longrightarrow 0$, $M' \longrightarrow M$ et la direction du vecteur $\overrightarrow{MM'}$ tend vers la tangente à la trajectoire au point M (*Doc.7*).

La direction du vecteur vitesse instantanée en un point M de la courbe est donnée par la tangente à la courbe en ce point.
Δt étant positif, le sens de $\vec{v}(t)$ est celui de $\overrightarrow{MM'}$

donc celui du mouvement.
Le sens du vecteur vitesse instantanée est celui du mouvement.



Doc.7

Coordonnées du vecteur vitesse instantanée

$$\vec{v}(t) = \frac{d\,\overrightarrow{OM}}{dt} = \frac{d}{dt}\left[x.\vec{i} + y.\vec{j} + z.\vec{k}\right]$$

$$= \frac{dx}{dt}\vec{i} + \frac{dy}{dt}\vec{j} + \frac{dz}{dt}\vec{k}$$

$$= v_x.\vec{i} + v_y.\vec{j} + v_z.\vec{k}$$

On peut le noter comme suit :

$$\vec{v}(t)\left[\begin{array}{l} v_x = \dfrac{dx}{dt} \\ v_y = \dfrac{dy}{dt} \\ v_z = \dfrac{dz}{dt} \end{array}\right.$$

$$v_x = \frac{dx}{dt},\quad v_y = \frac{dy}{dt} \quad \text{et} \quad v_z = \frac{dz}{dt}$$

sont les coordonnées du vecteur vitesse instantanée dans le repère orthonormé (**O**, $\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$) .

La valeur du vecteur vitesse instantanée est :

$$\|\vec{v}(t)\| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$

Quelques valeurs de vitesses

- électron dans un conducteur métallique : **quelques millimètres par seconde**
- piéton : **1,5 m.s^{-1}** environ
- coureur à pied : **7** à **10 m.s^{-1}**
- insecte : **8** à **16 m.s^{-1}**
- projectile d'une arme à feu : **400** à **1200 m.s^{-1}**
- train **T.G.V** : **105 m.s^{-1}** correspondant à **380 km.h^{-1}**
- satellite artificiel : **quelques milliers de m.s^{-1}**

2.2.2. Cas d'un solide en mouvement de translation

Pour un solide en mouvement de translation, on s'intéresse à l'étude du mouvement de son centre d'inertie **G** car il a le même mouvement que tous les autres points du solide.

Lorsque le mouvement est rectiligne, on associe un repère d'espace (**O**, $\vec{i}$) constitué par un seul axe.

Le vecteur position de **G** est : $\overrightarrow{OG} = x\,\vec{i}$

Son vecteur vitesse instantanée est :

$$\vec{v} = \frac{d\,\overrightarrow{OG}}{dt} = \frac{dx}{dt}\vec{i}$$

2.3 . Vecteur accélération instantanée

2.3.1. Cas d'un point matériel

Le vecteur accélération moyenne $\vec{a}_m$ d'un point mobile entre les instants de dates **t** et **t + Δt** est défini par la relation vectorielle :

$$\vec{a}_m = \frac{\vec{v}(t + \Delta t) - \vec{v}(t)}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

DÉFINITION

Le vecteur accélération instantanée $\vec{a}(t)$ est la limite, lorsque **Δt** tend vers **zéro**, du vecteur accélération moyenne entre les instants de dates **t** et **t +Δt**.

$$\vec{a}(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt}$$

Le vecteur accélération instantanée $\vec{a}(t)$

est la dérivé par rapport au temps du vecteur vitesse instantanée $\vec{v}(t)$

$$\vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}}{dt}$$

L'accélération d'un point mobile est liée à la variation du vecteur vitesse par unité de temps du point mobile et non pas à l'augmentation de la valeur de sa vitesse comme on peut le penser communément.

COORDONNÉES DU VECTEUR ACCÉLÉRATION INSTANTANÉE

$$\vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d(v_x . \vec{i} + v_y . \vec{j} + v_z . \vec{k})}{dt}$$

$$= \frac{dv_x}{dt}\vec{i} + \frac{dv_y}{dt}\vec{j} + \frac{dv_z}{dt}\vec{k}$$

$$= \frac{d}{dt}\left[\frac{dx}{dt}\right]\vec{i} + \frac{d}{dt}\left[\frac{dy}{dt}\right]\vec{j} + \frac{d}{dt}\left[\frac{dz}{dt}\right]\vec{k}$$

$$= \frac{d^2x}{dt^2}\vec{i} + \frac{d^2y}{dt^2}\vec{j} + \frac{d^2z}{dt^2}\vec{k}$$

$$= a_x . \vec{i} + a_y . \vec{j} + a_z . \vec{k}$$

On peut le noter comme suit :

$$\vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\overrightarrow{OM}}{dt^2} \quad \left[\begin{array}{l} a_x = \dfrac{dv_x}{dt} = \dfrac{d^2x}{dt^2} \\ a_y = \dfrac{dv_y}{dt} = \dfrac{d^2y}{dt^2} \\ a_z = \dfrac{dv_z}{dt} = \dfrac{d^2z}{dt^2} \end{array}\right.$$

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$$

$$a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2}$$

$$a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2z}{dt^2}$$

sont les coordonnées du vecteur accélération instantanée ;

sa norme est : $\|\vec{a}(t)\| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$

2.3.2. Vecteur accélération instantanée dans le repère de Frenet

Dans le cas d'une trajectoire plane, le vecteur accélération instantanée $\vec{a}$ peut s'écrire dans le **repère de Frenet** (**M**, $\vec{\mathcal{T}}$, $\vec{\mathcal{N}}$) (***Doc.8***) : $\vec{a} = a_t . \vec{\mathcal{T}} + a_n . \vec{\mathcal{N}}$

$\vec{a}_t$: est l'accélération tangentielle ; elle traduit la variation par rapport au temps de la valeur de la vitesse $\vec{v}$.

$\vec{a}_n$: est l'accélération normale ; elle est responsable du changement de direction du vecteur vitesse $\vec{v}$.

$$\vec{a} = \frac{dv}{dt}\vec{\mathcal{T}} + \frac{v^2}{r}\vec{\mathcal{N}}$$

On peut le noter comme suit :

$$\vec{a} \quad \left[\begin{array}{l} a_t = \dfrac{dv}{dt} \\ a_n = \dfrac{v^2}{r} \end{array}\right.$$

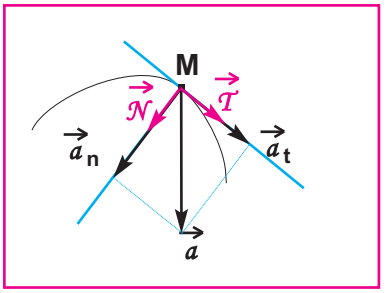
REPÈRE DE FRENET

Le **repère de Frenet** est un repère d'espace lié au point mobile en mouvement.

Son origine est, à chaque instant au cours du mouvement plan, la position **M** du point mobile.

Ses vecteurs unitaires sont :

- le vecteur $\vec{\mathcal{T}}$ tangent à la trajectoire et dirigé dans le sens positif choisi arbitrairement sur la trajectoire.
- le vecteur $\vec{\mathcal{N}}$, perpendiculaire à $\vec{\mathcal{T}}$, est dirigé vers l'intérieur de la concavité de la trajectoire.



Doc.8

r est le rayon de courbure au point **M** ; il est supposé être le rayon du cercle auquel appartient l'élément d'arc où se trouve le point **M**.

La composante normale de l'accélération est centripète car sa valeur $\frac{v^2}{r}$ est positive ; donc l'accélération $\vec{a}$ est toujours dirigée vers l'intérieur de la concavité de la trajectoire.

Si le point **M** appartient à une droite (cas d'une trajectoire rectiligne), **r** est infini et $a_n = 0$; le vecteur accélération est réduit à sa composante tangentielle ; il est porté par la trajectoire rectiligne.

Si le point **M** décrit une trajectoire circulaire avec une vitesse $\vec{v}$ de valeur absolue constante :

$$\|\vec{v}\| = \text{constante} \Longrightarrow \frac{dv}{dt} = 0 \Longrightarrow a_t = 0$$

l'accélération $\vec{a}$ est réduite à sa composante normale :

$$\vec{a} = \vec{a}_n = \frac{v^2}{r}\vec{\mathcal{N}}$$

$\vec{a}$ est un vecteur radial c'est à dire portée par un rayon, et centripète c'est à dire dirigée vers le centre de la trajectoire circulaire.

Remarque

Pour un solide en mouvement de translation, et comme pour la vitesse instantanée, on s'intéresse à l'accélération instantanée de son centre d'inertie **G**.

Dans un repère d'espace (**O**, $\vec{i}$) constitué par un seul axe le vecteur accélération instantanée, lorsque la trajectoire est rectiligne, s'écrit :

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}\vec{i}$$

3. Mouvement rectiligne uniforme

3.1 . Choix du repère d'espace

Le mouvement est dit rectiligne si la trajectoire du point mobile est une ligne droite ; il est dans ces conditions plus commode de repérer la position **M(t)** du point mobile dans un repère (**O**, $\vec{i}$) porté par la trajectoire.

Chronophotographie d'un corps en mouvement rectiligne uniforme.

Dans ce repère, on peut écrire :

$\overrightarrow{OM} = x \,.\, \vec{i}$; **x** est l'abscisse du point mobile à l'instant **t**.

$\vec{v} = v \,.\, \vec{i}$; $\quad v = \dfrac{dx}{dt}$ est la vitesse du point mobile à l'instant **t**.

$\vec{a} = a \,.\, \vec{i}$; $\quad a = \dfrac{dv}{dt}$ est l'accélération du point mobile à l'instant **t**.

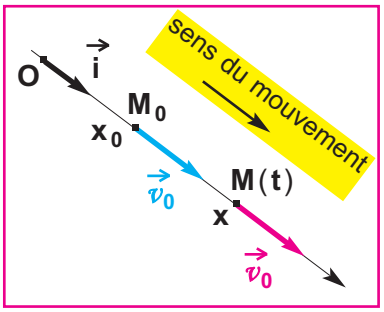
3.2 . Equation horaire

Un mouvement est rectiligne uniforme si le vecteur vitesse garde la même direction, le même sens et la même valeur au cours du mouvement (***Doc.9***).

Désignons par v_0 la valeur algébrique de cette vitesse

$$\vec{v} = v_0 . \vec{i} = \overrightarrow{C^{te}} \quad ; \quad v = v_0 = \frac{dx}{dt} = C^{te},$$

d'où $\qquad x = v_0\, t + b$



Doc.9

L'abscisse instantanée **x** est une fonction affine du temps car sa dérivée v_0 est une constante.

La constante **b** représente l'abscisse x_0 du point mobile à la date **t = 0** ; elle est appelée **abscisse initiale** :

$$x = v_0 . t + x_0$$

C'est l'équation horaire du mouvement rectiligne uniforme d'un point mobile.

4. Mouvement rectiligne uniformément varié

En 2ème année, nous avons vu qu'un mouvement rectiligne est uniformément accéléré ou retardé si la vitesse instantanée du mobile varie proportionnellement au temps.

Un mouvement rectiligne est **uniformément** varié (accéléré ou retardé) si le vecteur accélérération instantanné est constant au cours du temps :

$$\vec{a} = \frac{dv}{dt}\,\vec{i} = \overrightarrow{\text{Constante}}$$

La valeur de la vitesse instantanée v est une fonction affine du temps car sa dérivée a est une constante ; ceci permet d'écrire :

$$v = at + b$$

b est une constante qui correspond à la valeur de v à l'instant **t = 0** ; elle est appelée vitesse initiale, et on la note v_0.

$$v = at + v_0$$

Sachant que $v = \frac{dx}{dt}$, la fonction **x(t)** qui admet pour dérivé

$v = at + v_0$, s'écrit $x(t) = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + C$

La constante **C** représente l'abscisse x_0 du point mobile à l'instant **t = 0** ; elle est appelée abscisse initiale.

$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0 t + x_0$$

C'est l'équation horaire d'un mouvement rectiligne uniformément varié (accéléré ou retardé).

4.1. Mouvement rectiligne uniformément accéléré

Un mouvement rectiligne est uniformément accéléré si :

- la valeur absolue de la vitesse instantanée augmente au cours du temps, l'accélération étant constante et non nulle.

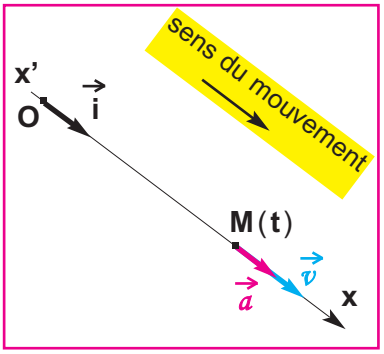
Chronophotographie d'un corps en mouvement rectiligne uniformément accéléré.

Puisque $\|\vec{v}\|$ augmente, $\|\vec{v}\|^2$ augmente aussi, ce qui permet d'écrire :

$$\frac{d(\|\vec{v}\|^2)}{dt} > 0 \quad \text{soit} \quad \frac{d(\vec{v}.\vec{v})}{dt} > 0$$

$$\Longrightarrow 2\vec{v}\frac{d\vec{v}}{dt} > 0 \quad \Longrightarrow \quad \vec{a}.\vec{v} > 0$$

- le vecteur accélération est de même sens que celui du mouvement, ce qui peut être exprimé par la relation $\vec{a}.\vec{v} \geqslant 0$; le signe **=** concerne un point mobile qui est mis en mouvement rectiligne uniformément accéléré à partir du repos (***Doc.10***).



Doc.10

Remarque : le sens du mouvement ne veut pas dire le sens positif choisi arbitrairement pour le repère d'espace $(O, \vec{i})$.

4.2. Mouvement rectiligne uniformément retardé

Un mouvement rectiligne est uniformément retardé si :

- la valeur absolue de la vitesse instantannée diminue au cours du temps, l'accélération étant constante et non nulle.

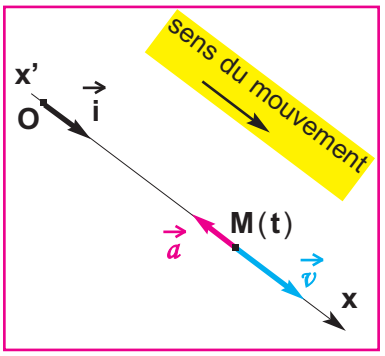
Chronophotographie d'un corps en mouvement rectiligne uniformément retardé.

Puisque $\|\vec{v}\|$ diminue, $\|\vec{v}\|^2$ diminue aussi, ce qui permet d'écrire :

$$\frac{d(\|\vec{v}\|^2)}{dt} < 0 \quad \text{soit} \quad \frac{d(\vec{v}.\vec{v})}{dt} < 0$$

$$\Longrightarrow 2\vec{v}\frac{d\vec{v}}{dt} < 0 \quad \Longrightarrow \quad \vec{a}.\vec{v} < 0$$

- le vecteur accélération est de sens contraire à celui du mouvement, ce qui peut être exprimé par la relation $\vec{a}.\vec{v} \leqslant 0$; un tel mouvement finit par conduire à $v = 0$, qui peut être le point de départ d'un mouvement rectiligne uniformément accéléré (***Doc.11***).



Doc.11

4.3. Relation entre les carrés des vitesses

Considérons deux positions du point mobile à deux instants t_1 et t_2 (***Doc.12***) ; les abscisses et les vitesses du point mobile à ces deux instants sont exprimées par les relations (**1**), (**2**), (**3**) et (**4**) :

$$x_1 = \frac{1}{2}at_1^2 + v_0t_1 + x_0 \quad (1) \qquad v_1 = at_1 + v_0 \quad (2)$$

$$x_2 = \frac{1}{2}at_2^2 + v_0t_2 + x_0 \quad (3) \qquad v_2 = at_2 + v_0 \quad (4)$$

A l'aide des équations (**2**) et (**4**) exprimons $(v_2)^2 - (v_1)^2$ en fonction de $(x_2 - x_1)$

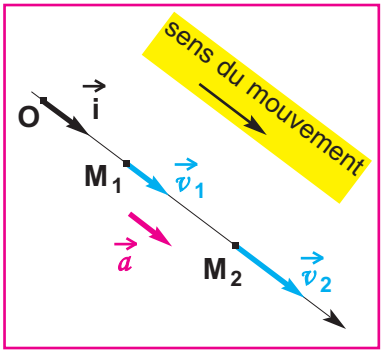
$$(v_2)^2 - (v_1)^2 = (at_2 + v_0)^2 - (at_1 + v_0)^2$$

$$= a^2t_2^2 + 2av_0t_2 + v_0^2 - (a^2t_1^2 + 2av_0t_1 + v_0^2)$$

$$= a^2t_2^2 + 2av_0t_2 - a^2t_1^2 - 2av_0t_1$$

$$= 2a[(\frac{a}{2}t_2^2 + v_0t_2) - (\frac{a}{2}t_1^2 + v_0t_1)]$$

$$= 2a[(\frac{a}{2}t_2^2 + v_0t_2 + x_0) - (\frac{a}{2}t_1^2 + v_0t_1 + x_0)] = 2a(x_2 - x_1)$$



Doc.12

d'où $\boxed{(v_2)^2 - (v_1)^2 = 2a(x_2 - x_1)}$

5. Mouvement rectiligne sinusoïdal

Considérons le dispositif expérimental du document ***13-a***.

Il est constitué d'un ressort ,à spires non jointives et de masse négligeable,disposé verticalement ; à son extrêmité inférieure est accroché un solide (**S**) de centre d'inertie **G**, l'autre extrêmité étant fixe.

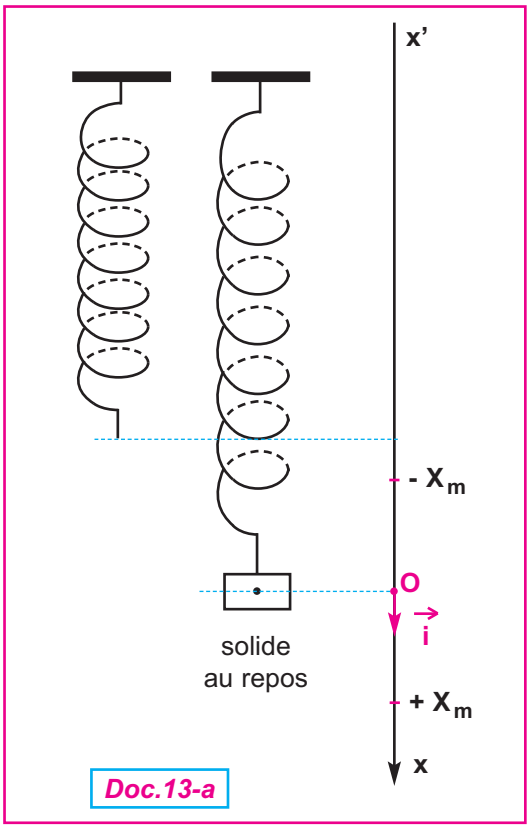
Lorsque le solide est en équilibre, **G** est en **O**, origine d'un repère (**O**, $\vec{i}$). On écarte (**S**) de sa position d'équilibre verticalement de X_m et on le lâche sans lui communiquer de vitesse initiale ; son centre d'inertie **G** se met à osciller entre les deux positions d'abcisses $+X_m$ et $-X_m$.

On dit que **G** effectue un mouvement rectiligne périodique.

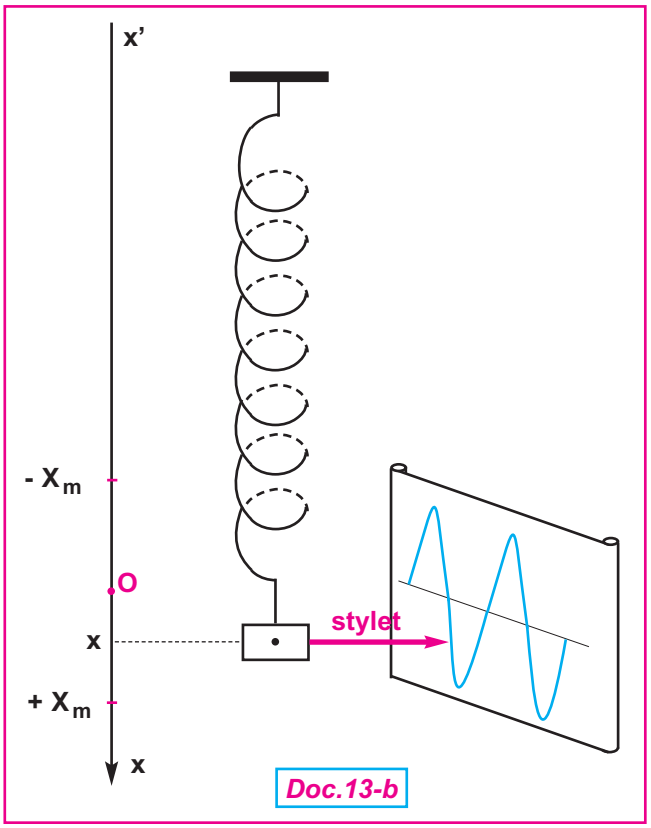
Un stylet solidaire du solide inscrit les différentes positions de **G** sur le papier qui se déroule à vitesse constante (***Doc.13-b***).

La courbe obtenue correspondant à la représentation graphique du centre d'inertie en fonction du temps est une sinusoïde.

Le mouvement de G est dit alors rectiligne sinusoïdal.



Doc.13-a

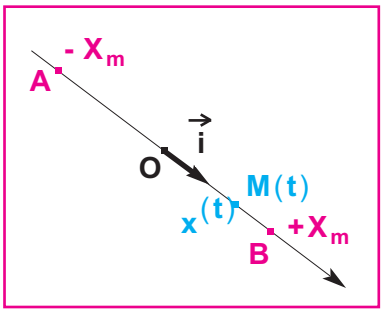


Doc.13-b

5.1 . Définition

Un point mobile est en mouvement rectiligne sinusoïdal si :
- sa trajectoire est un segment de droite [**AB**] de milieu **O** (***Doc.14***)
- dans le repère (**O**, $\vec{i}$) d'origine **O** et porté par la trajectoire, son abscisse **x(t)** (ou élongation instantanée) est une fonction sinusoïdale de la forme

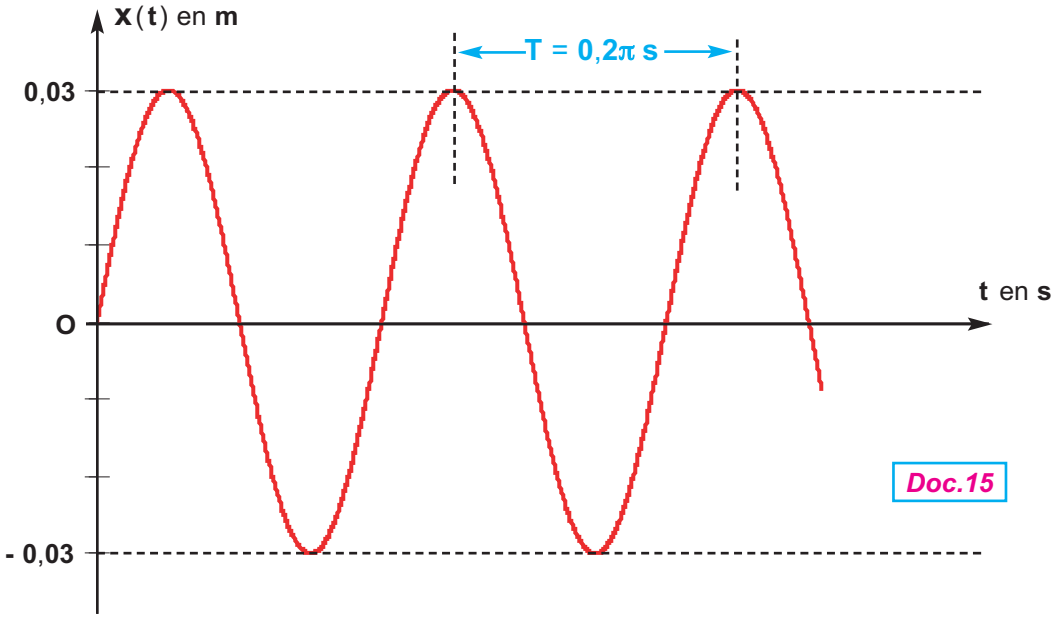
$$x(t) = X_m \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_x\right)$$



Doc.14

C'est l'équation horaire d'un mouvement rectiligne sinusoïdal.

Exemple : le document (***Doc.15***) correspond à une représentation graphique de la fonction $x(t) = 3.10^{-2} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right)$



Doc.15

PÉRIODE : **T** en **seconde**.

$$x(t + T) = X_m \sin\left[\frac{2\pi}{T}(t + T) + \varphi_x)\right]$$

$$X_m \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + 2\pi + \varphi_x\right)$$

$$X_m \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_x\right) = x(t)$$

Le point mobile se retouve dans la même position d'abscisse **x(t)** après avoir effectué une oscillation.
T est mesurée à l'aide d'un chronomètre.

FRÉQUENCE : $N = \frac{1}{T}$ correspond au nombre d'oscillations effectuées en une seconde ; l'unité est le Hertz (**Hz**).

MOUVEMENT PÉRIODIQUE

Il se répète identique à lui-même à des intervalles de temps égaux. Pendant une période le point mobile effectue une oscillation.

Au cours du mouvement périodique décrit dans le document (***Doc.14***) une oscillation peut être

M → B → M → A → M

A → O → B → O → A

O → B → O → A → O

La valeur commune à ces intervalles de temps est la période **T** du mouvement.

AMPLITUDE DU MOUVEMENT ou **ÉLONGATION MAXIMALE** :
Elle est donnée par X_m , et s'exprime en **m** ;

elle est déterminée à l'aide des conditions initiales.

ELONGATION À L'INSTANT t ou **ABSCISSE À L'INSTANT t :**
Elle est donnée par $x(t)$, et s'exprime en **m** ;
elle varie entre $-X_m$ et $+X_m$.

PULSATION DU MOUVEMENT : $\omega = \dfrac{2\pi}{T}$ en **rad.s^{-1}**

PHASE À L'INSTANT t : $\dfrac{2\pi}{T}t + \varphi_x$

c'est un angle qui s'exprime en radian (**rad**).
PHASE À L'INSTANT t = 0 ou **PHASE INITIALE** : φ_x en **rad**.

φ est déterminée à l'aide des conditions initiales :
à $t = 0$, $x(0) = X_m \sin(\varphi_x)$ d'où les valeurs possibles de φ_x.

5.2 . Vecteur vitesse instantanée

Le vecteur position s'écrit :

$$\overrightarrow{OM} = x(t)\,\vec{i} \quad \text{avec } x(t) = X_m \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_x\right)$$

Le vecteur vitesse instantannée s'écrit :

$$\vec{v} = \frac{d\,\overrightarrow{OM}}{dt} = \frac{dx}{dt}\vec{i} = v(t)\,\vec{i}$$

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} = X_m \frac{2\pi}{T} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_x\right)$$

$$= X_m \frac{2\pi}{T} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_x + \frac{\pi}{2}\right)$$

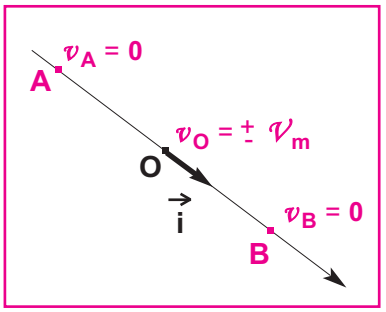
que l'on peut écrire sous la forme :

$$v(t) = \mathcal{V}_m \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_v\right)$$

avec $\mathcal{V}_m = X_m \dfrac{2\pi}{T}$ et $\varphi_v = \varphi_x + \dfrac{\pi}{2}$

$v(t)$ et $\mathcal{V}_m$ en **m.s^{-1}**

La vitesse est nulle aux points de rebroussement **A** et **B**, par contre elle est maximale en valeur absolue au milieu **O** telle que $v_O = \pm\,\mathcal{V}_m$ (***Doc.16***) ; le signe de v_O dépend du sens dans lequel évolue le mouvement du point mobile.



Doc.16

5.3 . Relation entre x(t) et v(t)

$$\begin{cases} x(t) = X_m \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_x\right) \\ v(t) = X_m \frac{2\pi}{T} \cos\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_x\right) \end{cases}$$

que l'on peut écrire

$$\begin{cases} x(t) = X_m \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_x\right) & (1) \\ \dfrac{v(t)}{\left(\frac{2\pi}{T}\right)} = X_m \cos\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_x\right) & (2) \end{cases}$$

$(1)^2 + (2)^2$ donne :

$$\boxed{\frac{v^2(t)}{\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2} + x^2(t) = X_m^2}$$

X_m est constante ; lorsque $x(t)$ augmente en valeur absolue, $v(t)$ diminue en valeur absolue ; en **O**, $v(t)$ est maximale et égale à $\pm X_m \frac{2\pi}{T} = \pm X_m \omega$

5.4 . Vecteur accélération instantanée

Dans le repère (**O**, $\vec{i}$) porté par la trajectoire, on peut écrire

$$\vec{a} = a(t)\,\vec{i}$$

Relation entre a(t) et x(t)

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d}{dt}\left[X_m \frac{2\pi}{T} \cos\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_x\right)\right] = -X_m \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_x\right)$$

$$= -\frac{4\pi^2}{T^2} x(t) = -\omega^2 x(t) = \omega^2 X_m \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_x + \pi\right)$$

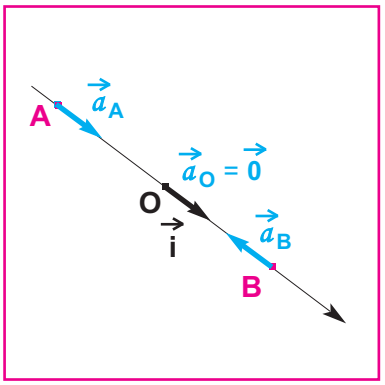
L'accélération peut s'écrire encore :

$$a(t) = \mathcal{A}_m \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_a\right)$$

avec $\mathcal{A}_m = \omega^2 X_m$ et $\varphi_a = \varphi_x + \pi$

$$\boxed{a(t) = -\frac{4\pi^2}{T^2} x(t)}$$

$a(t)$ en $m.s^{-2}$



Doc.17

L'accélération est nulle en **O** mais maximale en valeur absolue aux points **A** et **B** telle que :

$$a_A = \frac{4\pi^2}{T^2} X_m = \omega^2 X_m \quad \text{et} \quad a_B = -\frac{4\pi^2}{T^2} X_m = -\omega^2 X_m \quad (\textit{Doc.17}).$$

Relation entre $x(t)$ et $\frac{d^2x(t)}{dt^2}$

$$a(t) = \frac{d^2x(t)}{dt^2} = -\frac{4\pi^2}{T^2}\,x(t) = -\omega^2\,x(t)$$

d'où

$$\boxed{\frac{d^2x(t)}{dt^2} + \omega^2\,x(t) = 0}$$

$$x(t) = X_m \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_x\right) = X_m \sin(\omega t + \varphi_x)$$

est une solution de cette équation.

EXERCICE RÉSOLU N°1

ENONCÉ :

Dans un repère $\{ O, \vec{i}, \vec{j} \}$, le vecteur vitesse d'un point mobile

$$\vec{v} = 5\,\vec{i} - (3\,t - 5)\,\vec{j} \quad (v \text{ en } m.s^{-1})$$

À l'instant $t_0 = 1$ s, il passe par le point M_0 de coordonnées $x_0 = 2$ m et $y_0 = 3$ m.

1- a - Donner les coordonnées cartésiennes du vecteur accélération.

- b - Donner les équations horaires $x = f(t)$ et $y = h(t)$ du point mobile.

- c - Ecrire l'équation cartésienne de la trajectoire.

2- a - Déterminer les caractéristiques du vecteur vitesse du mobile à l'instant $t = 1$s.

On précicera la valeur de l'angle α que fait $\vec{v}$ avec le vecteur unitaire $\vec{i}$.

- b - Déterminer les composantes normale et tangentielle $\vec{a}_T$ et $\vec{a}_N$ du vecteur accélération à l'instant $t = 1$ s.

- c - En déduire le rayon de courbure **r** à cet instant.

SOLUTION

1 - a - Coordonnées cartésiennes du vecteur accélération :

$v_x = 5\ m.s^{-1}$ et $a_x = \dfrac{dv_x}{dt}$ permettent d'écrire $\boxed{a_x = 0}$

$v_y = -3t + 5$ et $a_y = \dfrac{dv_y}{dt}$ permettent d'écrire

$$\boxed{a_y = -3\ m.s^{-2}}$$

- b - Equations horaires :

$v_x = 5\ m.s^{-1}$ et $v_x = \dfrac{dx}{dt}$ permettent d'écrire $x = 5t + C_1$

Détermination de la constante C_1 :

$x(t_0 = 1s) = 5 . 1 + C_1 = 2$ d'où $C_1 = -3$ m

$$\boxed{x = 5t - 3} \quad (1)$$

$v_y = -3t + 5$ et $v_y = \dfrac{dy}{dt}$ permettent d'écrire

$$y = -\frac{3}{2}t^2 + 5t + C_2$$

Détermination de la constante C_2 :

$y(t_0 = 1s) = -\dfrac{3}{2} . 1^2 + 5 . 1 + C_2 = 3$ d'où $C_2 = -0{,}5$ m

$$\boxed{y = -1{,}5\,t^2 + 5t - 0{,}5} \quad (2)$$

- c - Equation cartésienne de la trajectoire :

De la relation (**1**), on tire $t = \frac{x+3}{5}$ que l'on emplace dans (**2**) ;

$$y = -1{,}5\frac{(x+3)^2}{25} + 5\frac{(x+3)}{5} - 0{,}5$$

d'où $\boxed{y = -0{,}06x^2 + 0{,}64x + 1{,}96}$

la trajectoire est un arc de parabole (***Doc.18***).

2- a - Caractéristiques du vecteur vitesse à t = 1 s :

$\boxed{v_x = 5\ m.s^{-1}}$ et $\boxed{v_y = 2\ m.s^{-1}}$ (***Doc.18***).

Valeur de la vitesse : $\|\vec{v}\| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$

Application numérique :

$$\|\vec{v}\| = \sqrt{5^2 + 2^2}$$

$$\boxed{\|\vec{v}\| = 5{,}39\ m.s^{-1}}$$

Détermination de l'angle $\alpha = (\vec{v}, \vec{i})$ à t = 1 s :

$$tg\alpha = \frac{\|\vec{v}_y\|}{\|\vec{v}_x\|}$$

Application numérique :

$$tg\ \alpha = \frac{2}{5}$$

$$\boxed{\alpha = 21{,}8^0}$$

- b - Composantes normale et tangentielle de $\vec{a}$ à t = 1 s :

$\|\vec{a}_T\| = \|\vec{a}\| \sin\alpha$ et $\|\vec{a}_T\| = \|\vec{a}\| \cos\alpha$

Application numérique :

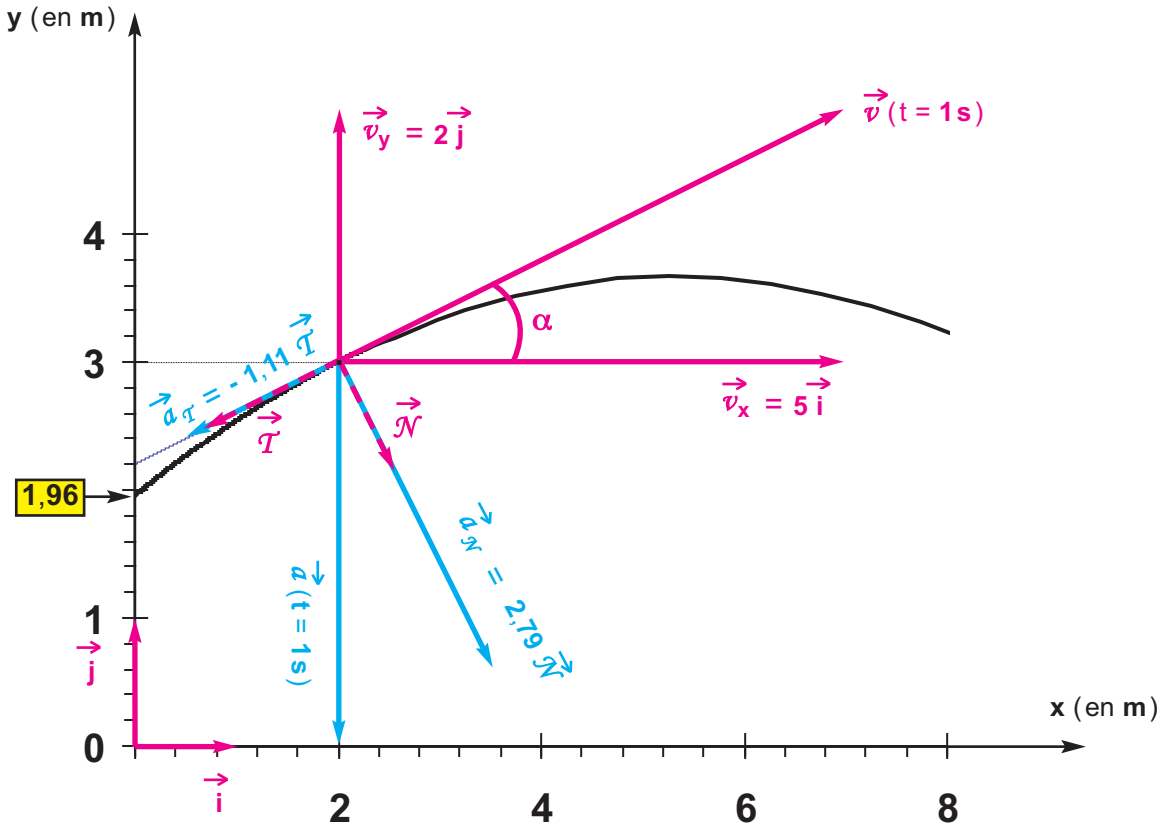
$\|\vec{a}_T\| = 3 . \sin(21{,}8)$ $\boxed{\|\vec{a}_T\| = 1{,}11\ m.s^{-2}}$

$\|\vec{a}_N\| = 3 . \cos(21{,}8)$ $\boxed{\|\vec{a}_N\| = 2{,}79\ m.s^{-2}}$ (***Doc.18***)

- c - Rayon de courbure à t = 1 s :

$\|\vec{a}_N\| = \frac{v^2}{r}$ d'où $r = \frac{v^2}{\|\vec{a}_N\|}$

Application numérique : $r = \frac{(5{,}39)^2}{2{,}79}$ $\boxed{r = 10{,}41\ m}$

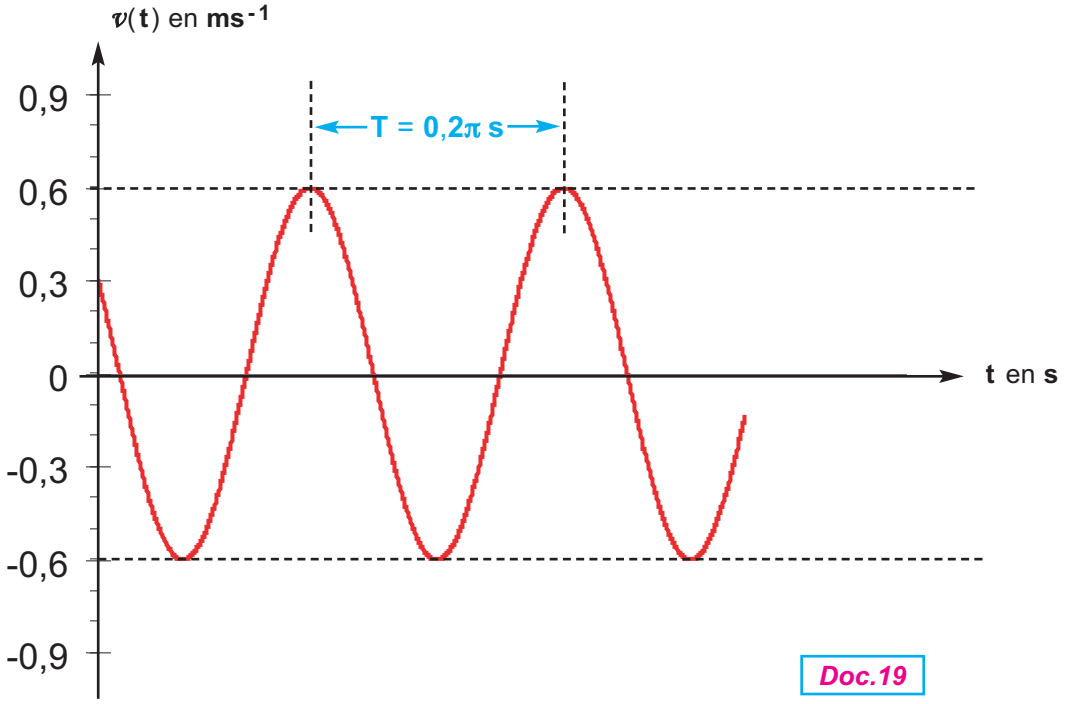

y (en m)
x (en m)
$\vec{v}_y = 2\vec{j}$
$\vec{v}$ (t = 1 s)
$\vec{v}_x = 5\vec{i}$
α
$\vec{a}_{\mathcal{T}} = -1{,}11\,\vec{\mathcal{T}}$
$\vec{\mathcal{T}}$
$\vec{\mathcal{N}}$
$\vec{a}_{\mathcal{N}} = 2{,}79\,\vec{\mathcal{N}}$
$\vec{a}$ (t = 1 s)
1,96
$\vec{j}$
$\vec{i}$
0
1
2
3
4
2
4
6
8

Doc.18

Exercice résolu n° 2

Enoncé :

La courbe du document ***19*** représente les variations de la vitesse $v(t) = \mathcal{V}_m \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_v\right)$ d'un point mobile en mouvement rectiligne sinusoïdal.



Doc.19

1 -a- Nommer les paramètres $\mathcal{V}_m$, **T** et φ_v ; déterminer leurs valeurs numériques.

-b- En déduire l'amplitude X_m et la phase à l'origine φ_x de l'abscisse **x(t)**.

-c- Ecrire l'équation horaire de **x(t)**.

2 - À quels instants le mobile passe-t-il par le point d'élongation **x = 0,03 m** avec une vitesse négative ?

Solution

1-a- Nomenclature des paramètres $\mathcal{V}_m$, T et φ_v :

$\mathcal{V}_m$: amplitude de la vitesse.

T : période du mouvement.

φ_v : phase à l'origine de la vitesse.

Valeurs numériques des paramètres $\mathcal{V}_m$, T et φ_v :

On relève directement sur la courbe du document **19**,

$\mathcal{V}_m = 0{,}6\ m.s^{-1}$ $T = 0{,}2\pi\ s$

A l'instant **t = 0**, la fonction $v(t)$ est égale à **0,3 m.s^{-1}** et décroissante :

$v(t = 0) = \mathcal{V}_m \sin(\varphi_v)$ (1)

$$\frac{dv}{dt}(t = 0) = \mathcal{V}_m \frac{2\pi}{T} \cos(\varphi_v) < 0 \qquad (2)$$

De la relation (1), on tire $\sin(\varphi_v) = \dfrac{v(t = 0)}{\mathcal{V}_m}$

Application numérique :

$$\sin(\varphi_v) = \frac{0,3}{0,6} = 0,5$$

$$\varphi_v = \frac{\pi}{6} \text{ rad} \quad \text{ou bien} \quad \varphi_v = \frac{5\pi}{6} \text{ rad}$$

D'après (2), nous retiendrons $\dfrac{5\pi}{6}$ car $\cos(\varphi_v) < 0$

$$\boxed{\varphi_v = \frac{5\pi}{6} \text{ rad}}$$

-b- Valeurs numériques des paramètres X_m et φ_x :

$$X_m = \frac{\mathcal{V}_m}{\left(\frac{2\pi}{T}\right)}$$

Application numérique : $X_m = \dfrac{0,6}{\left(\frac{2\pi}{0,2\pi}\right)}$

$$\boxed{X_m = 0,06 \text{ m}}$$

$$\varphi_v = \varphi_x + \frac{\pi}{2} \quad \text{d'où} \quad \varphi_x = \varphi_v - \frac{\pi}{2}$$

Application numérique : $\varphi_x = \dfrac{5\pi}{6} - \dfrac{\pi}{2}$

$$\boxed{\varphi_x = \frac{\pi}{3} \text{ rad}}$$

-c- Equation horaire de l'abscisse x :

$$\frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{0,2\pi} = 10 \text{ rad.s}^{-1}$$

$$\boxed{x(t) = 0,06 . \sin\left(10\ t + \frac{\pi}{3}\right)}$$

2- Détermination des instants tels que x = 0,03 m et $v < 0$:

$$x(t) = 0,06 \sin\left(10\ t + \frac{\pi}{3}\right) = 0,03 \text{ m}$$

$$\sin\left(10\,t + \frac{\pi}{3}\right) = \frac{1}{2}$$

$$10\,t + \frac{\pi}{3} = \frac{\pi}{6} + 2k\pi \quad \text{ou} \quad \frac{5\pi}{6} + 2k\pi$$

comme $v(t) = 0{,}6\,.\cos\left(10\,t + \frac{\pi}{3}\right) < 0$

$$10\,t + \frac{\pi}{3} = \frac{5\pi}{6} + 2k\pi$$

$$t = \frac{1}{10}\left(\frac{5\pi}{6} - \frac{\pi}{3} + 2k\pi\right)$$

$$\boxed{t = \frac{\pi}{20} + \frac{2k\pi}{10} = \frac{T}{4} + k.T}$$

L'ESSENTIEL

Les grandeurs cinématiques (trajectoire, coordonnées, vitesse et accélération) dépendent du référentiel d'observation qui est constitué d'un objet de référence, d'un repère d'espace et d'un repère temps.

Le repérage de la position d'un point est déterminé par la connaissance des coordonnées cartésiennes **x**, **y** et **z** du point mobile dans le repère (**O**, $\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$) ;

Dans le référentiel lié au point **O**, un point mobile **M** est défini par :

- un vecteur position $\overrightarrow{OM} = x\,\vec{i} + y\,\vec{j} + z\,\vec{k}$

- un vecteur vitesse $\vec{v}(t) = \dfrac{d\overrightarrow{OM}}{dt} = \dfrac{dx}{dt}\vec{i} + \dfrac{dy}{dt}\vec{j} + \dfrac{dz}{dt}\vec{k}$

- un vecteur accélération $\vec{a}(t) = \dfrac{d\vec{v}}{dt} = \dfrac{dv_x}{dt}\vec{i} + \dfrac{dv_y}{dt}\vec{j} + \dfrac{dv_z}{dt}\vec{k}$

Le vecteur accélération peut s'exprimer dans le repère de Frenet $(M, \vec{\mathcal{T}}, \vec{\mathcal{N}})$:

$$\vec{a}(t) = \frac{dv}{dt}\vec{\mathcal{T}} + \frac{v^2}{r}\vec{\mathcal{N}}$$

Un point mobile peut être :

- en mouvement rectiligne uniforme :

$$\vec{a} = \vec{0}\ ;\ \vec{v} = \overrightarrow{\text{Constante}}\ ;\ \overrightarrow{OM} = (vt + x_0)\,\vec{i}\,.$$

- en mouvement rectiligne uniformément varié :

$$\vec{a} = \overrightarrow{\text{Constante}}\ ;\ \vec{v} = (at + v_0)\,\vec{i}\ ;\ \overrightarrow{OM} = \left(\frac{1}{2}at^2 + v_0 t + x_0\right)\vec{i}\,.$$

il est accéléré si $\vec{a}.\vec{v} \geq 0$, retardé si $\vec{a}.\vec{v} < 0$.

- en mouvement rectiligne sinusoïdal :

$$\overrightarrow{OM} = x(t)\,\vec{i} \quad \text{avec } x(t) = X_m.\sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_x\right)$$

$$\vec{a} = a(t)\,\vec{i} \quad \text{avec} \quad a(t) = -\frac{4\pi^2}{T^2}x(t) = -\omega^2\,x(t)$$

TRAVAUX PRATIQUES

BUT

- Réaliser en classe un enregistrement chronophotographique du mouvement d'une bille lâchée sans vitesse initiale.
- Reconnaître, à partir de cet enregistrement, la nature du mouvement du corps en chute libre.

ENREGISTREMENT CHRONOPHOTOGRAPHIQUE

Il y a deux possibilités :

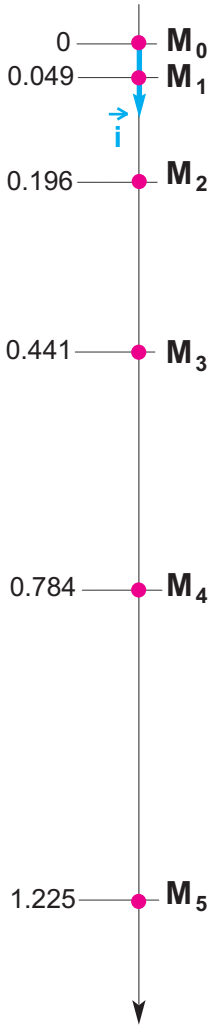
- à l'aide d'une caméra Cam Web
- à l'aide d'un appareil photographique
- ou, à défaut, exploiter la figure du document (***Doc.20***).

TABLEAU DE MESURES

points	M_0	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
t (en **s**)						
x (en **m**)						

EXPLOITATION DES MESURES

-Tracer la courbe $\mathbf{x} = \mathbf{h}(\mathbf{t}^2)$; établir l'expression de $\mathbf{x} = \mathbf{h}(\mathbf{t}^2)$.
-Déterminer l'accélération du mouvement de la bille.
-Conclure sur la nature de son mouvement.



Doc.20

EXERCICES

Je vérifie mes connaissances

Choisir la (ou les) proposition(s) correcte(s)

1- L'équation horaire **x** = **f**(**t**) du mouvement rectiligne uniforme d'un point mobile permet de connaître à tout instant :

a - la vitesse du point mobile.

b - l'accélération du point mobile.

c - la position du point mobile.

3- L'équation horaire **x** = **f**(**t**) du mouvement rectiligne uniformément retardé d'un point mobile permet de connaître à tout instant :

a - la vitesse du mouvement du point mobile.

b - l'accélération du mouvement du point mobile.

c - la position du point mobile.

d - l'instant où le mouvement du point mobile change de sens.

e - la position où le mouvement du point mobile change de sens.

4- Les équations horaires **x** = **f**(**t**) et **y** = **g**(**t**) du mouvement plan d'un point mobile selon une trajectoire curviligne permettent de connaître à tout instant :

a - la vitesse du point mobile.

b - l'accélération du point mobile.

c - la position du point mobile.

d - les coordonnées de l'accélération du point mobile dans le repère de Frenet.

e - le rayon de courbure de la trajectoire.

5- La trajectoire d'un point mobile est une courbe située dans un plan; sa vitesse est constante. À tout instant au cours du mouvement, le vecteur accélération du point mobile est :

a -nul.

b -perpendiculaire au vecteur vitesse.

c -de direction tout à fait quelconque.

6- Un point mobile est animé d'un mouvement rectiligne sinusoidal. Lorsqu'il passe par le milieu de sa trajectoire :

a - sa vitesse est nulle.

b - son accélération est maximale.

c - la vitesse et l'accélération sont nulles.

d - la vitesse est maximale en valeur absolue.

7- Un point mobile est animé d'un mouvement tel que le vecteur accélération varie au cours du temps :

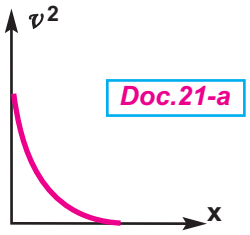
a - sa vitesse est constante.

b - le sens du mouvement peut changer.

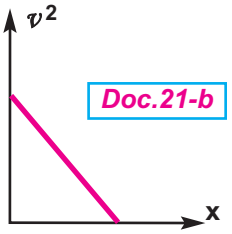
c - la trajectoire est nécessairement rectiligne.

8- Un solide, lâché sur un plan incliné, glisse sans frottements selon un mouvement rectiligne uniformément accéléré.
Le document qui correspond à la représentation graphique de v^2 en fonction de l'abscisse **x** est:

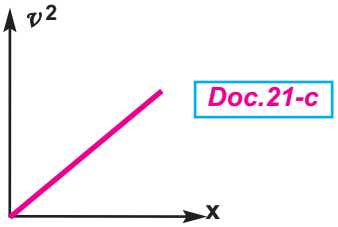
a -



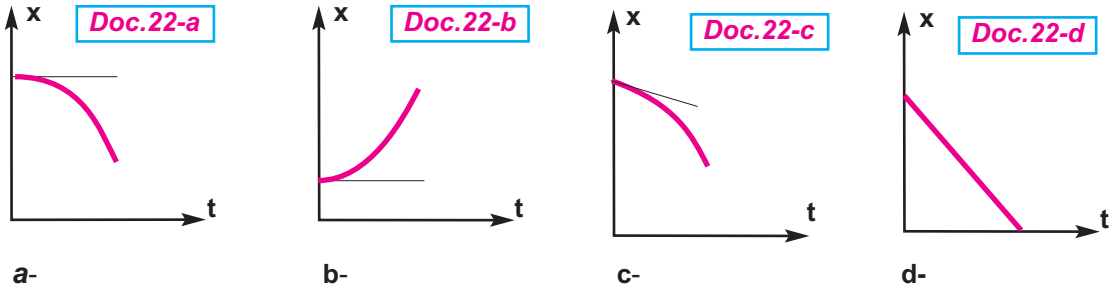
b -



c -



9- Un solide, lâché sans vitesse initiale, glisse sans frottement sur un plan incliné selon un mouvement rectiligne uniformément accéléré.
Le document qui correspond à la représentation graphique de **x = f(t)** est:



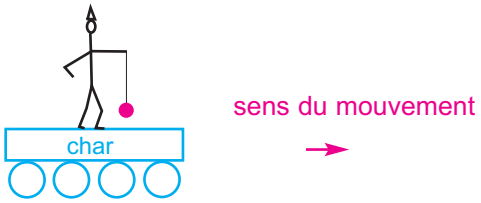
J'applique mes connaissances et je raisonne

Ex-1- Un clown est debout et immobile sur un char de carnaval avançant à vitesse constante. Il fait osciller régulièrement un Yo-Yo (boule attachée à un élastique) dans une direction perpendiculaire au plateau du char. (***Doc.23***)

Au centre du Yo-Yo est disposé une petite lampe allumée.

1 - Tracer la forme de la trajectoire de la lampe par rapport au référentiel du char.

2 - Tracer l'allure de la trajectoire de la lampe par rapport à un référentiel terrestre.



Ex-2- La vitesse d'écoulement du sang dans une artère est supposée constante et de valeur égale à $\|\vec{v}_s\| = 0{,}2\ m.s^{-1}$

1 - Calculer le chemin parcouru par une globule rouge pendant une durée de **4 s**.

2 - En supposant cette vitesse d'écoulement indépendante de la grosseur des artères, quelle est la durée de parcours d'une globule rouge partant du coeur et arrivant au pied d'un individu, après un parcours de **1,5 m** ?

Ex-3- Un automobiliste **A** quitte Tunis à **10h 30 min** et se dirige vers Sousse par l'autoroute. Un automobiliste **B** quitte Sousse à **10h 45 min** et se dirige vers Tunis par la même autoroute.
Les valeurs de leurs vitesses respectives, que l'on suppose constantes, sont :

$\|\vec{v}_A\| = 100\ km.h^{-1}$

$\|\vec{v}_B\| = 130\ km.h^{-1}$

La distance Tunis-Sousse, par l'autoroute, est égale à **D = 120 km** (***Doc.24***).

1 - Ecrire les équations horaires des mouvements de **A** et **B** sachant que l'automobiliste **A** quitte **Tunis**, qui est confondu avec **O**, à **t = 0**. On supposera que l'autoroute suit une ligne droite.

2 - À quelle distance de **Tunis** et à quelle heure les deux automobilistes se croisent-ils ?

Ex-4- Un mobile (**M**) décrit une trajectoire rectiligne munie d'un repère espace $(O, \vec{i})$; son vecteur accélération est constant pendant toute la durée du mouvement qui est fixée à $t_f = 5$ **s**.

A l'instant $t_0 = 0$, le mobile part du point M_0 d'abscisse $x_0 = -0{,}5$ **m**, avec une vitesse $\vec{v}_0 = -\vec{i}$ (v_0 en $m.s^{-1}$), puis il passe au point M_1, d'abscisse $x_1 = 5$ **m**, avec la vitesse $\vec{v}_1 = 4{,}7\,\vec{i}$ (v_1 en $m.s^{-1}$).

1 - Détérminer les caractéristiques de l'accéleration $\vec{a}_1$ du mobile.

2 - Calculer la date t_1 à laquelle le mobile passe au point M_1.

3 - Donner l'équation horaire du mobile.

4 - A la date **t = 2 s**, un deuxième mobile (**N**) part de la position d'abscisse $x_1 = 5$ **m**, avec un mouvement rectiligne uniforme dont la vitesse est $\vec{v}_N = 4\,\vec{i}$ (v_N en $m.s^{-1}$).

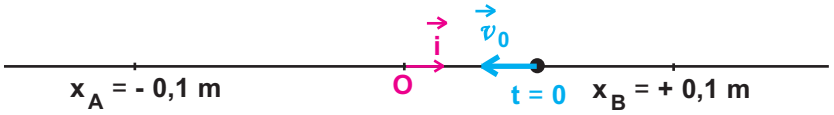
Calculer la date t_R et l'abscisse x_R en lesquelles le mobile (**M**) rattrape le mobile (**N**).

5 - Vérifier ces deux derniers résultats à l'aide des représentations graphiques des équations horaires des deux mobiles.

Ex-5- Un point matériel, animé d'un mouvement rectiligne sinusoïdal, se déplace sur un segment **AB** de longueur **20 cm**.
La période du mouvement est $T_0 = 2$ **s**.
A l'origine des temps le mobile est à la position d'abscisse **x = 5 cm** et sa vitesse est négative. (***Doc.25***)

1 - Ecrire l'équation horaire du mouvment.

2 - A quel instant le mobile passe-t-il pour la **1ère** fois par la position d'équilibre ?



Doc.25

Ex-6- Un mobile ponctuel (**M**), supposé ponctuel, est animé d'un mouvement rectiligne sinusoïdal de période $T = \frac{\pi}{10}$ **s** de part et d'autre d'un point **O**.

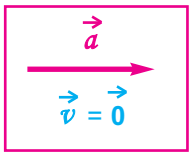
1 - En choisissant comme origine des élongations le point **O**, déterminer l'équation horaire du mouvement de (**M**) sachant qu'à l'origine des temps, son abscisse x_0 est égale à **2 cm** et sa vitesse est nulle.

2 - Quelle est la vitesse maximale du mobile ? En quel point le mobile acquiert cette vitesse ?

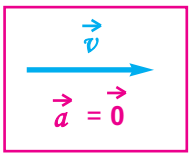
3 - Quelle est la vitesse du mobile (**M**) quand son élongation vaut **0,5 cm**.

4 - Quelle est la vitesse du mobile à la date **t = 1 s** ?
Quel est alors le sens du vecteur accélération ?

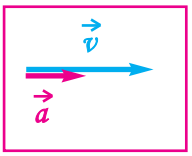
Ex-7- Identifier dans chacun des documents ***26-a***, **b**, **c** ou **d**, la nature (rectiligne uniforme, rectiligne uniformément accéléré, rectiligne uniformément retardé) du mouvement décrit par les vecteurs $\vec{a}$ et $\vec{v}$ représentés à un instant **t** quelconque.



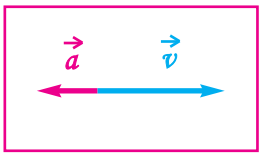
Doc.26-a



Doc.26-b



Doc.26-c



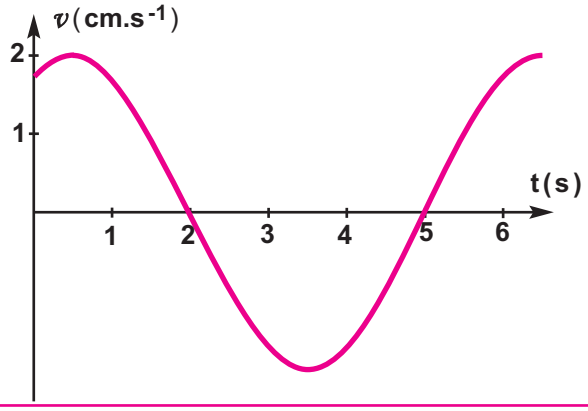
Doc.26-d

Ex-8- Un mobile est en mouvement rectiligne sinusoïdal. Le document (***Doc.27***) correspond à la courbe $v = f(t)$

1 - Déduire de cette courbe :
- l'amplitude $\mathcal{V}_m$ de la vitesse ;
- la période **T** du mouvement ;
- la phase φ_v de la vitesse.

2 - Déterminer l'amplitude $\mathcal{X}_m$ et la phase φ_x de l'abscisse **x** du mobile (**M**).

3 - Déduire de la courbe **v = f(t)**, la courbe **x = g(t)** sans préciser d'échelle pour l'élongation **x**.

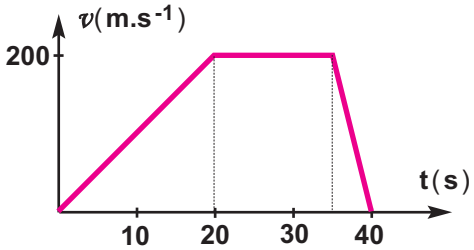


Doc.27

Ex-9- Un mobile décrit une trajectoire rectiligne. Sa position par rapport à un point **O** de la trajectoire orientée est repérée à l'instant **t** par son abscisse **x**.

1 - Caractériser le mouvement du mobile durant les différentes étapes du trajet à partir du diagramme des vitesses. (***Doc.28***)

2 - Déterminer la distance totale parcourue par le mobile pendant les **40 s**.

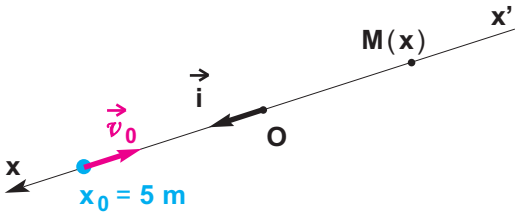


Doc.28

Ex-10- Le mouvement d'une bille lancée dans le sens **Ox** dans une gouttière rectiligne est déterminé par les données suivantes : $a = 2\ m.s^{-2}$ et à **t = 0** (instant du lancement) $v_0 = -6\ m.s^{-1}$ et $x_0 = 5\ m$ (***Doc.29***).

1 - Etablir les équations horaires du mouvement.

2 - Déterminer l'intervalle de temps qui sépare les deux passages par l'origine **O**. Calculer la valeur de la vitesse de la bille à ces passages.



Doc.29

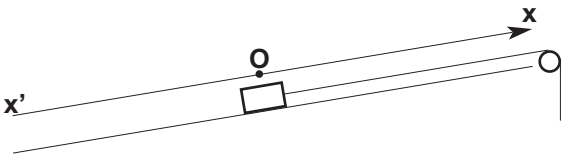
Ex-11- Un mobile **M** peut glisser sans frottement le long de la ligne de plus grande pente **x'Ox** d'un plan incliné.
Il est attaché à un fil inextensible tendu parallèle à **x'Ox** (***Doc.30-a***).
A l'instant $t_0 = 0$, le mobile (***M***) est au repos au point **O**, origine de l'axe et on applique au fil une traction qui fait gravir à (***M***) le plan incliné.
On étudie le mouvement de (***M***).
On en déduit la mesure v de la vitesse du mobile (***M***) à chaque instant et on trace le graphique $v = f(t)$ qui est le segment de droite **OA** (***Doc.30-b***).

Au temps $t_1 = 2$ **s**, le fil de traction casse. En représentant maintenant la vitesse v du mobile en fonction du temps **t**, on obtient la demi-droite **ABC** qui coupe l'axe des temps au point **B** d'abscisse $t_2 = 2{,}63$ **s**.

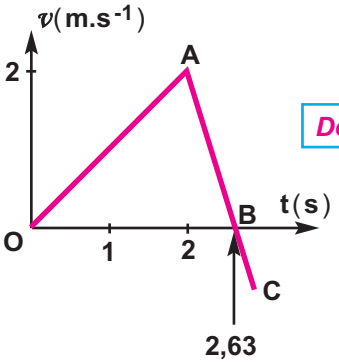
1 - Déduire du graphique, sans calcul, la nature du mouvement de (***M***) et le sens du déplacement entre les dates t_0 et t_1, t_1 et t_2 et $t > t_2$.

2 - Déterminer les caractéristiques du vecteur accélération au cours de chacune des trois phases.

3 - Déterminer la distance parcourue entre t_0 et t_2.



Doc.30-a

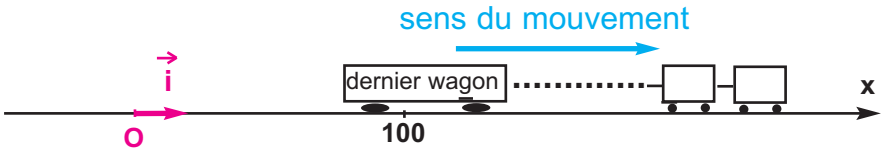


Doc.30-b

Ex-12- Sur le quai d'une gare, un voyageur, en retard, court avec une vitesse constante de valeur **8 m.s^{-1}** pour essayer de prendre son train en stationnement à la gare.
En **t = 0**, le train démarre alors qu'il est encore à **100 mètres** du dernier wagon, au niveau de l'origine **O** d'un repère (**O**, $\vec{i}$)
L'accélération constante du train a une valeur de **0,5 m.s^{-2}** (***Doc.31***).

1 - Le voyageur rejoindra-t-il son train ? Sinon, à quelle distance minimale s'en trouvera-t-il ?

2 - Quelle devrait être, à l'instant du démarrage, la distance minimale entre le train et le voyageur pour que celui-ci atteigne effectivement le dernier wagon?



Doc.31

POUR EN SAVOIR PLUS

PRINCIPE DE LA DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DE LA VALEUR ABSOLUE DE LA VITESSE INSTANTANÉE DU CENTRE D'INERTIE D'UN SOLIDE EN MOUVEMENT DE TRANSLATION

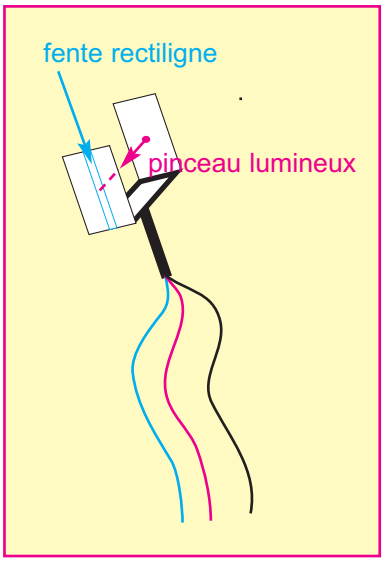
UTILISATION D'UN CAPTEUR MESUREUR DE TEMPS

On utilise cette approche expérimentale dans les montages utilisant un solide auquel on peut coller un carton de largeur **e** (***Doc.32***).

L'un des deux bras du capteur comporte une source de lumière permettant d'émettre un pinceau lumineux très fin ; l'autre bras comporte une fente fine et rectiligne.

Le capteur sera disposé de sorte que la fente occupe la position d'abcisse **x**.

Le solide étant en mouvement, lorsque le côté avant du carton cache la fente, empêchant le pinceau lumineux de l'atteindre, le comptage du temps se déclenche ; il s'arrête dès que le côté arrière du carton passe devant la fente, lui permettant d'être de nouveau éclairée.



Doc.32

L'intervalle de temps **Δt** relevé sur l'afficheur du chronomètre correspond à la durée du passage du carton au niveau de la position d'abcisse **x**.

La valeur absolue de la vitesse instantanée du solide, à son passage par cette position, est donnée par la relation :

$$\|\vec{v}\| = \frac{e}{\Delta t}$$

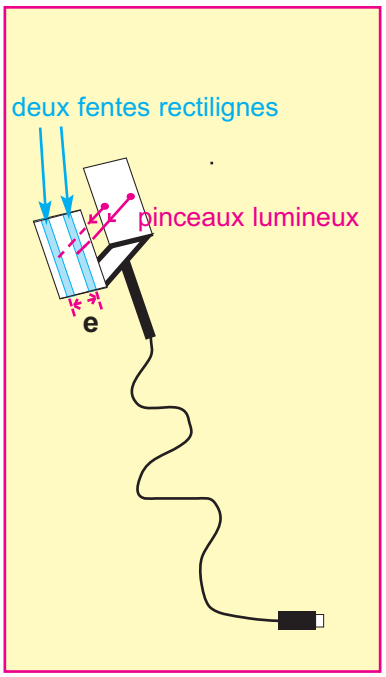
à condition que **Δt** soit faible devant la durée du trajet **e** en **m**, **Δt** en **s** et $\|\vec{v}\|$ en $\mathbf{m.s^{-1}}$.

UTILISATION D'UN CAPTEUR MESUREUR DE VITESSE

Contrairement au précédent, le capteur mesureur de vitesse comporte deux fentes fines espacées d'une distance **e** choisie par le constructeur (***Doc.33***).

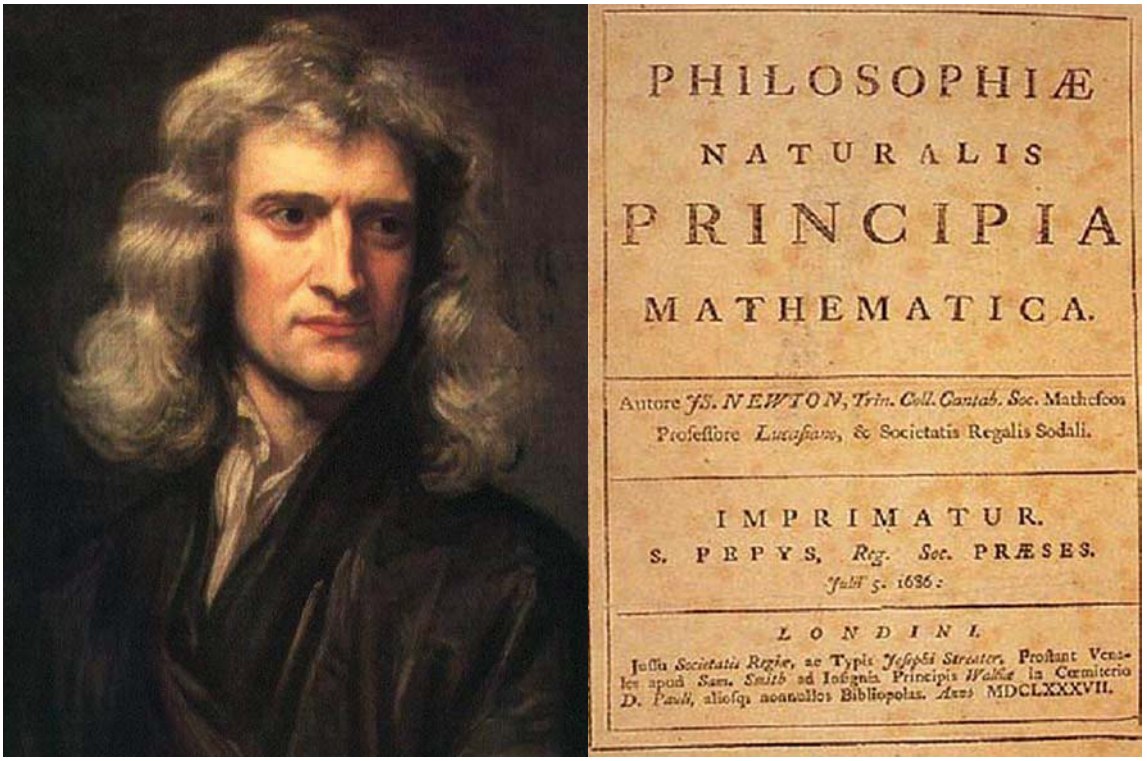
Lorsque le carton accolé au solide cache la première fente le comptage se déclenche ; il s'arrête dès que l'autre fente est à son tour cachée.

Ce qu'on lit sur l'afficheur correspond à la valeur absolue de la vitesse instantanée du solide à son passage par la position d'abcisse **x** ; en effet le chronomètre se charge lui-même d'effectuer le calcul de $\frac{e}{\Delta t}$ où **Δt** représente la durée que met le centre d'inertie **G** du solide pour effectuer le trajet **e**.



Doc.33

6 ETUDE DYNAMIQUE D'UN SOLIDE EN MOUVEMENT DE TRANSLATION



Newton a commencé avec les lois sur le mouvement et la gravitation qu'il avait observé dans la nature, puis il a utilisé ces lois pour transformer la physique en un système mathématique général constitué de règles et de lois. Newton a exposé ses idées dans plusieurs publications, et un d'entre elles, Philosophiae Naturalis Principia Mathematica (Principes mathématiques de la philosophie naturelle, en 1687) est considérée parmi les plus grands travaux scientifiques jamais réalisés.

OBJECTIFS

- Distinguer entre la deuxième loi de Newton et le théorème du centre d'inertie.
- Reconnaître un référentiel galiléen.
- Appliquer la deuxième loi de Newton.
- Appliquer le théorème du centre d'inertie.
- Reconnaître un solide isolé et un solide pseudo-isolé.

ÉTUDE DYNAMIQUE D'UN SOLIDE EN MOUVEMENT DE TRANSLATION

1. Référentiel galiléen

Définition : un référentiel galiléen est un référentiel où la première loi de Newton (ou principe d'inertie) peut être vérifiée.

Le référentiel de Copernic peut être considéré comme un référentiel galiléen.

Tout référentiel en mouvement de translation rectiligne et uniforme par rapport à un référentiel galiléen est galiléen.

Exemples de référentiels considérés comme galiléens :

- le référentiel héliocentrique peut être considéré comme galiléen.
- le référentiel géocentrique peut être considéré comme galiléen pour des expériences ayant lieu pendant des durées petites devant une année, par exemple le mouvement d'un satellite autour de la Terre.
- le référentiel terrestre peut être considéré comme galiléen pour des expériences à la surface de la Terre ayant lieu pendant des durées petites devant un jour ; dans les expériences de laboratoire, les mouvements des objets sont étudiés par rapport à des référentiels terrestres où l'origine du repère d'espace est relié au laboratoire : ces référentiels sont supposés galiléens.

Exemples de référentiels ne pouvant pas être considérés comme galiléens :

- au cours d'un freinage, d'une accélération ou dans un virage, le référentiel lié à une automobile ne peut pas être considéré comme galiléen.
- le référentiel lié à un manège en mouvement de rotation, ne peut pas être considéré comme galiléen.

2. Deuxième loi de Newton

Il est facile de constater, qu'une force peut ralentir ou accélérer le mouvement d'un solide ou modifier la direction de son vecteur vitesse.

La deuxième loi de Newton précise la relation qui existe entre les forces s'exerçant sur un corps, entre autre, en mouvement de translation et le vecteur accélération.

Activité expérimentale

On reprend le tableau de mesures rempli au cours des travaux pratiques réalisés dans le chapitre-**5**-.

Points	M_0	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
t (en **s**)						
x (en **m**)						
$\|\vec{a}\|$ (en $m.s^{-2}$)						

On calcule la valeur du poids de la bille $\|\vec{P}\| = m\|\vec{g}\|$ avec $\|\vec{g}\| = 9{,}8\ m.s^{-2}$.

On compare cette valeur au produit $m\|\vec{a}\|$; vérifier que $\|\vec{P}\| = m\|\vec{a}\|$.

Le poids de la bille, assimilable à un objet ponctuel, est une force exercée par la Terre sur la bille, donc orientée vers le bas suivant la verticale passant par le centre de gravité de la bille.

Au cours du déplacement de la bille, la valeur de sa vitesse augmente ce qui implique que son mouvement est accéléré ; ceci permet de conclure que le vecteur accélération $\vec{a}$ est, autant que le vecteur vitesse, de direction verticale et dirigé vers le bas.

D'une part, les deux grandeurs vectorielles poids et accélération sont de même sens, d'autre part $\|\vec{P}\| = m\|\vec{a}\|$ ceci permet d'écrire $\vec{P} = m\,\vec{a}$

Ce résultat est applicable à tout corps ponctuel soumis à un système de forces $\{\vec{F}_i\}$ équivalent à une force unique $\vec{\mathcal{F}} = \sum \vec{F}_i$; ce qui permet d'écrire :

$$\vec{\mathcal{F}} = m\,\vec{a}$$

Enoncé de la deuxième loi de Newton

Dans un référentiel galiléen, la somme vectorielle des forces s'exerçant sur un corps ponctuel est égale, à chaque instant, au produit de la masse **m** du corps par son vecteur accélération $\vec{a}$

$$\boxed{\sum \vec{F} = m.\,\vec{a}}$$

Cette relation est appelée aussi **relation fondamentale de la dynamique**.

Isaac Newton (1642 - 1727)

Est né le 25 Décembre 1642 (année de la mort de Galilée) à Woolsthorpe dans le Lincolnshire (Angleterre), de parents paysans.

À 12 ans, il part pour l'école secondaire de Grantham, il y reste quatre années jusqu'à ce que sa mère le rappelle à Woolsthorpe pour qu'il devienne fermier et qu'il apprenne à administrer son domaine. Pourtant, sa mère s'apercevant que son fils était plus doué pour la mécanique que pour le bétail, l'autorisa à retourner à l'école pour peut-être pouvoir entrer un jour à l'université.

Newton est devenu l'un des plus grands génies et savants de l'histoire humaine. On peut le comparer, par l'envergure de ses travaux et découvertes, à deux autres grands noms de la science : Archimède et Albert Einstein.

L'étendue de ses travaux et son éclectisme sont tels qu'il auraient suffi à faire la réputation d'une bonne douzaine de savants.

Il meurt le 30 mars 1727, son corps fut alors inhumé à Westminster, aux côtés des rois d'Angleterre.

Cette écriture vectorielle traduit une relation de cause à effet ; ceci permet d'affirmer que c'est la somme vectorielle des forces qui s'exercent sur le corps ponctuel qui est responsable de la variation de sa vitesse au cours du mouvement.

3. Théorème du centre d'inertie

Considérons un système matériel (**S**) = {M_i} de masse **m**, constitué d'un ensemble de points matériels M_i de masses m_i.

Dans un repère galiléen, la relation fondamentale de la dynamique appliquée à un point matériel M_i appartenant au système (**S**) s'écrit : $\vec{F}_i = m_i \vec{a}_i$

La somme des forces agissantes sur (**S**) est alors :

$$\sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i = \sum_{i=1}^{n} (m_i \vec{a}_i)$$

soit $$\sum_{i=1}^{n} \vec{F}_{i(int)} + \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_{i(ext)} = \sum_{i=1}^{n} (m_i \vec{a}_i)$$

Les forces intérieures s'annulent deux à deux, leur somme est alors nulle ; ceci nous permet d'écrire :

$$\sum_{i=1}^{n} \vec{F}_{i(ext)} = \sum_{i=1}^{n} (m_i \vec{a}_i) = \sum m_i \left(\frac{d^2}{dt^2} \overrightarrow{OM_i}\right)$$

$$\sum_{i=1}^{n} \vec{F}_{i(ext)} = \frac{d^2}{dt^2} \left(\sum m_i \overrightarrow{OM_i}\right)$$

$$\sum_{i=1}^{n} \vec{F}_{i(ext)} = \frac{d^2}{dt^2} (m \overrightarrow{OG})$$

finalement, on obtient : $$\boxed{\sum_{i=1}^{n} \vec{F}_{i(ext)} = m.\vec{a}_G}$$

Barycentre d'un système matériel

Le centre d'inertie **G** d'un système matériel est le barycentre des points matériels M_1, M_2,... M_i ... qui le constituent pondérés chacun de sa mase m_i

$$\sum_{i=1}^{n} m_i \overrightarrow{OM_i} = \overrightarrow{OG} \sum m_i = m \overrightarrow{OG}$$

Enoncé du théorème du centre d'inertie

Dans un repère galiléen, le centre d'inertie d'un système matériel de masse **m** a le même mouvement qu'un point matériel de même masse soumis à l'action de l'ensemble des seules forces extérieures au système.

$$\boxed{\sum \vec{F}_{ext} = m.\vec{a}_G}$$

Remarque :

La deuxième loi de Newton et le théorème du centre d'inertie sont valables dans le cadre de la mécanique newtonienne, c'est-à-dire tant que les vitesses des corps en mouvement étudiés sont petites devant celle de la lumière.

4. Applications

Glissement d'un solide sur un plan incliné

On considère un solide (**S**) de masse **m** qui glisse sans frottement suivant la ligne de plus grande pente d'un plan incliné d'un angle α par rapport à l'horizontale.

On se propose de déterminer les caractéristiques du vecteur accélération du centre d'inertie **G** du solide.

Démarche à suivre :

- ***Référentiel*** : référentiel terrestre supposé galiléen ;

  le repère d'espace (O, $\vec{i}$, $\vec{j}$) est lié au plan incliné comme l'indique le document ***1***.

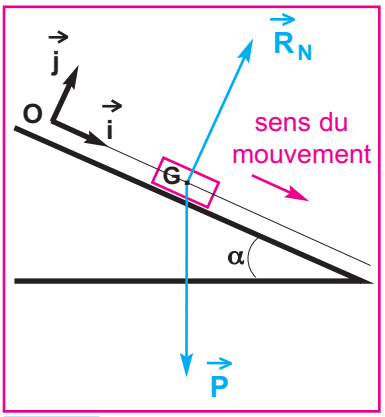
- ***Sytème*** : solide (**S**).

- ***Forces extérieures*** : * $\vec{P} = m\vec{g}$: le poids, force exercée par la Terre sur le solide

$$\vec{P} \begin{cases} P_x = m\|\vec{g}\|\sin\alpha \\ P_y = -m\|\vec{g}\|\cos\alpha \end{cases}$$

* $\vec{R}_N$: la réaction normale du plan, force exercée par le plan sur le solide

$$\vec{R}_N = R_N\vec{j}$$



Doc.1

On négligera tout type de frottement.

Le solide (**S**) est constamment en contact avec le plan incliné ; la coordonnée y_G de son centre d'inertie **G** est constante au cours de ce mouvement rectiligne ; ceci permet d'écrire que :

$$a_{Gy} = \frac{d^2y_G}{dt^2} = 0 \qquad \text{d'où} \qquad \vec{a}_G = a_{Gx}\vec{i}$$

Appliquons le théorème du centre d'inertie au système :

$$\vec{P} + \vec{R}_N = m\vec{a}_G \qquad (1)$$

La projection de la relation (**1**) sur l'axe (O ; $\vec{i}$) porté par la ligne de plus grande pente du plan incliné donne

$$P_x = m\,a_G$$

soit $$m\|\vec{g}\|\sin\alpha = m\,a_G$$

Le vecteur accélération est donnée par la relation :

$$\boxed{\vec{a}_G = (\|\vec{g}\|\sin\alpha.)\vec{i}}$$

SOLIDE ISOLÉ; SOLIDE PSEUDO-ISOLÉ

Un solide isolé est un solide qui ne subit aucune action extérieure. Un tel solide ne peut exister dans le champ de pesanteur.

Si les actions extérieures qu'il subit se compensent, le solide est dit pseudo-isolé.

Dans les deux cas on a :

$$\boxed{\sum \vec{F}_{ext} = \vec{0}}$$

d'après le théorème du centre d'inertie :

$$m.\vec{a}_G = \vec{0} \Longrightarrow \vec{a}_G = \vec{0}$$

$$\vec{a}_G = \frac{d\vec{v}_G}{dt} \Longrightarrow \vec{v}_G = \overrightarrow{\text{constante}}$$

Conclusion : le centre d'inertie du solide reste au repos s'il est initialement au repos sinon il continue à se déplacer selon un mouvement rectiligne uniforme.

Ce résultat est déjà connu depuis la classe de 1ère année sous le nom de ``Première loi de Newton'' ou `` Principe d'inertie''.

EXERCICE RÉSOLU

ENONCÉ :

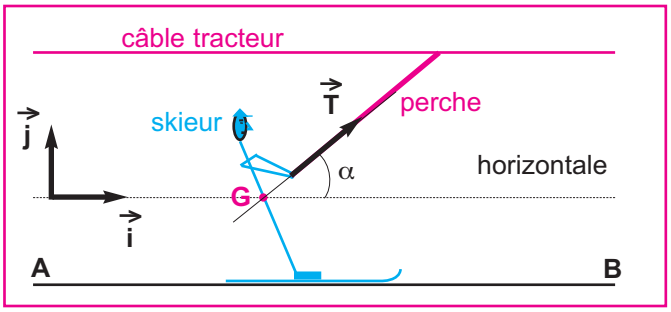
Cet exercice décrit un modèle trés simplifié du mouvement du centre d'inertie **G** d'un skieur le long d'un trajet (**AB**) rectiligne et horizontal.

Durant tout le déplacement, l'ensemble des frottements est équivalent à une force $\vec{f}$ de valeur constante et égale à **50 N**, supposée être appliquée en **G**.

On supposera que le skieur, considéré comme un solide, reste constamment en contact avec la piste ; soit **m = 80 kg** sa masse lorsqu'il est muni de son équipement.

On donne la valeur du champ de pesanteur $\|\vec{g}\| = 9{,}8\ m.s^{-2}$.

Le skieur se tient immobile en **A** sur l'aire de départ d'un téléski. Afin d'atteindre, au bout de **8 s**, une vitesse de valeur égale à $2\ m.s^{-1}$ en **B**, il s'accroche à une perche faisant un angle α égal à **45°** avec l'horizontale et exerçant sur lui une force de traction $\vec{T}$ constante (***Doc.2***).



Doc.2

1 - Faire l'inventaire de toutes les forces qui s'exercent sur le skieur au cours du mouvement. Recopier le schéma et y représenter les forces.

2 - Déterminer les caractéristiques de l'accélération $\vec{a}$ du centre d'inertie **G** du skieur.

3 - En déduire la valeur de $\vec{T}$.

SOLUTION

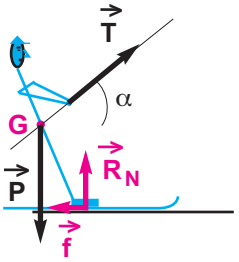
1 - Forces s'exerçant sur le skieur le long du trajet (AB)

$\vec{P}$: poids du skieur

$\vec{R}_N$: réaction normale de la piste sur le skieur

$\vec{f}$: force de frottement

$\vec{T}$: force exercée par la perche (***Doc.3***).



Doc.3

2 - Accélération $\vec{a}$ du centre d'inertie du skieur

Au cours de son mouvement, le skieur reste constamment au contact de la piste, et sa coordonnée y_G est constante :

d'où $a_y = \dfrac{d^2 y_G}{dt^2} = 0 \Longrightarrow \vec{a} = a_x \vec{i}$

L'accélération $\vec{a}$ a une direction horizontale.

À propos de la direction et du sens du vecteur accélération de **G**, on peut procéder autrement.

Entre **A** et **B**, la valeur de la vitesse augmente; ceci implique que l'accélération $\vec{a}$ est de même sens que le mouvement.

L'accélération $\vec{a}$ est orientée de **A** vers **B**.

Montrons que la valeur de l'accélération $\vec{a}$ est constante :

- ***Référentiel*** : référentiel terrestre supposé galiléen ;

  le repère d'espace : $(O, \vec{i}, \vec{j})$ lié à la piste comme l'indique le document ***4***.

- ***Sytème*** : { **skieur** }

- ***Forces extérieures*** : les vecteurs forces sont reportés à partir d'un même point pour en faciliter l'exploitation ;

$$\vec{P}\left|\begin{array}{l} P_x = 0 \\ P_y = -m\,\|\vec{g}\| \end{array}\right. , \qquad \vec{R}_N\left|\begin{array}{l} R_{Nx} = 0 \\ R_{Ny} = \|\vec{R}_N\| \end{array}\right.$$

$$\vec{f}\left|\begin{array}{l} f_x = -\|\vec{f}\| \\ f_y = 0 \end{array}\right. \quad \text{et} \quad \vec{T}\left|\begin{array}{l} T_x = \|\vec{T}\|\cos\alpha \\ T_y = \|\vec{T}\|\sin\alpha \end{array}\right.$$

Appliquons le théorème du centre d'inertie au système :

$$\sum \vec{F}_{ext} = m\,\vec{a}$$

$$\vec{P} + \vec{R}_N + \vec{f} + \vec{T} = m\,\vec{a} \qquad (1)$$

La projection de la relation (**1**) sur l'axe $(O; \vec{i})$ donne

$$-\|\vec{f}\| + \|\vec{T}\|\cos\alpha = m\,a \qquad (2)$$

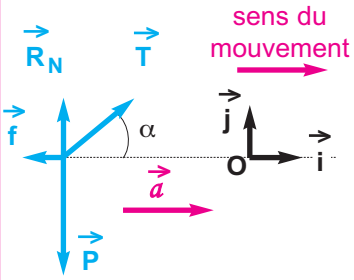
Tous les paramètres, autres que a, et intervenant dans la relation (**2**), sont constants ; donc la valeur de l'accélération est constante.

D'où $\vec{v} = \vec{a}.t + \vec{v}_0$

Donc $$\|\vec{a}\| = \frac{\|\vec{v}_B\|}{t_B - t_A}$$

Application numérique : $\|\vec{a}\| = \frac{2}{8}$ $\boxed{a = +0{,}25\ m.s^{-2}}$

En effet, **G** décrit un mouvement rectiligne au cours duquel la valeur de la vitesse augmente ; on peut affirmer que le vecteur accélération est de même sens que celui du mouvement.



Doc.4

à $t = t_B$, $\vec{v} = \vec{v}_B$

d'où $\vec{v}_B = \vec{a}.t_B + \vec{v}_0$ (**3**)

à $t = t_A$, $\vec{v} = \vec{v}_A = \vec{0}$

d'où $\vec{0} = \vec{a}.t_A + \vec{v}_0$ (**4**)

(**3**) - (**4**) $\Longrightarrow$

$$\vec{a} = \frac{\vec{v}_B}{t_B - t_A}$$

3 - Valeur de la force $\vec{T}$

A partir de la relation (**2**) on peut écrire $\|\vec{T}\| = \dfrac{m\,a + \|\vec{f}\|}{\cos\alpha}$

Application numérique : $\|\vec{T}\| = \dfrac{80\,.\,0{,}25 + 50}{\cos 45^0}$ $\boxed{\|\vec{T}\| = 99\ N}$

L'ESSENTIEL

Un référentiel galiléen est un référentiel où la première loi de Newton (ou principe d'inertie) peut être vérifiée.

Un référentiel terrestre sera considéré comme galiléen avec une approximation suffisante.

Deuxième loi de Newton : dans un référentiel galiléen, la somme vectorielle $\vec{F}$ des forces s'exerçant sur un corps ponctuel est égale au produit de la masse **m** du corps par son vecteur accélération $\vec{a}$, soit $\vec{F} = m.\vec{a}$

Cette relation est appelé aussi **relation fondamentale de la dynamique**.

Théorème du centre d'inertie

Soit un système de centre d'inertie **G**, et $\sum \vec{F}_{ext}$ la somme vectorielle des forces extérieures agissant sur le système à l'instant **t** :

alors $\sum \vec{F}_{ext} = m.\vec{a}_G(t)$ dans un référentiel galiléen.

Un solide isolé est un solide qui ne subit aucune action extérieure.

Un solide est dit pseudo-isolé, s'il subit des actions extérieures qui se compensent.

Travaux pratiques

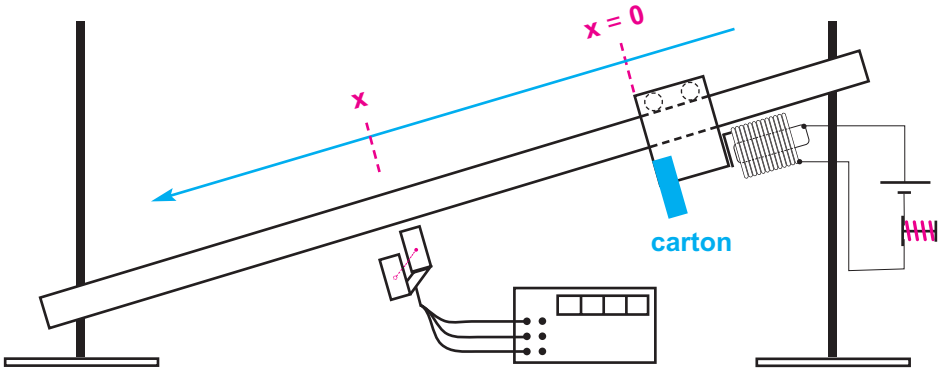
But

Appliquer le théorème du centre d'inertie à un solide en mouvement de translation, afin de déterminer la valeur de l'intensité de la force de frottement à laquelle il est soumis.

Matériel

- un chariot de masse **m** muni d'une bande en carton et pouvant se déplacer sur un rail incliné d'un angle α d'une dizaine de degrés par rapport à l'horizontale
- six chronomètres électriques au millième de seconde reliés chacun à un capteur
- un système électromécanique permettant de lâcher le chariot sans vitesse initiale
- une règle graduée au millimètre permet de repérer la position du chariot au cours de son mouvement
- une balance électronique
- un rapporteur muni d'un fil à plomb
- un papier millimétré.

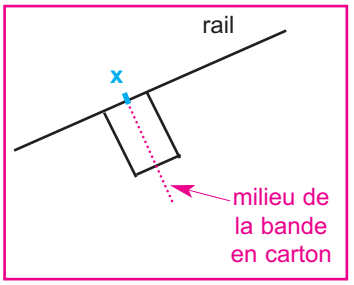
A défaut de matériels, on peut utiliser un seul chronomètre muni d'un capteur pour réaliser les mêmes mesures ; il suffit de changer la position du capteur selon les valeurs de **x** indiquées dans le tableau de mesures, et lâcher de nouveau le chariot dans les mêmes conditions initiales. *(Doc.5)*



Doc.5

Protocole expérimental

- réaliser le montage correspondant au schéma du document ***5***
- déterminer la valeur de **m** à l'aide de la balance électronique
- mesurer la largeur **e** de la bande en carton fixée au chariot
- déterminer la valeur de l'angle α
- régler la position de l'électro-aimant de sorte que, lorsque celui ci retient le chariot, l'abscisse du milieu de la bande en carton est **x** = **0** (***Doc.6***)
- pour une position quelconque du chariot, le milieu de la bande en carton d'abscisse **x** doit être au centre du capteur
- pour chaque position d'abcisse **x**, on notera, sur le tableau de mesures, l'intervalle de temps **Δt** indiqué sur le chronomètre.



Doc.6

Tableau de mesures

Position	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
x (en m)						
Δt (en s)						

Exploitation des résultats de mesures

1- Compléter le tableau de mesures

Δt étant faible par rapport à la durée totale du mouvement du chariot, la valeur absolue de la vitesse du chariot à son passage par la position d'abcisse **x** correspond au rapport $\frac{e}{\Delta t}$

Si l'on dispose de mesureurs de vitesse, il suffit de les placer aux différentes positions **M** et de relever directement les différentes valeurs de la vitesse.

Position	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
x (en m)						
Δt (en s)						
v (en $m.s^{-1}$)						
v^2 (en $m^2.s^{-2}$)						

2- Tracer le graphique $v^2 = f(x)$

3 - En déduire la valeur de l'accélération $\vec{a}$ du chariot.

- En appliquant le théorème du centre d'inertie au solide en mouvement de translation, exprimer la valeur de la force de frottement en fonction de **m**, $\|\vec{g}\|$, α et a.
en déduire la valeur de $\|\vec{f}\|$.

EXERCICES

Dans tous les exercices, les mouvements des corps ont lieu dans des repères terrestres supposés galiléens.

Je vérifie mes connaissances

Choisir la (ou les) proposition(s) correcte(s)

1- Lorsqu'un solide est soumis à des forces dont la somme est constante, et de direction verticale :

a - tous les points du solide ont une accélération constante.

b - le centre d'inertie du solide a une accélération constante.

c - le mouvement du centre d'inertie du solide a lieu avec une vitesse de valeur constante.

2- La somme $\vec{F}$ des forces agissant sur un corps ponctuel de masse **m** produit une accélération $\vec{a}$.
Si on quadruple la valeur de la masse, la valeur de l'accélération est divisée par **2** lorsque la valeur de $\vec{F}$ est :

a - multipliée par **8.**

b - multipliée par **2.**

c - divisée par **2**.

3- Le newton est la valeur de la force nécessaire pour :

a - déplacer à la vitesse de **1 m.s^{-1}** un objet de masse **m = 1 kg.**

b - maintenir égale à **1 m.s^{-2}** la valeur de l'accélération d'un objet de masse **m = 1 kg.**

c - maintenir égale à **10^{-3} m.s^{-2}** la valeur de l'accélération d'un objet de masse **m = 1000 kg**.

4- Un solide est animé d'un mouvement rectiligne uniformément retardé :

a - la somme des forces extérieures qui s'exercent sur le solide est constante et positive.

b - la somme des forces extérieures qui s'exercent sur le solide augmente au cours du mouvement.

c - la somme des forces extérieures qui s'exercent sur le solide diminue au cours du mouvement .

d - la somme des forces extérieures est de sens contraire au mouvement.

J'applique mes connaissances et je raisonne

Ex-1- Un traîneau de masse **m = 150 kg** est tiré par des chiens sur un plan horizontal. Les frottements agissant sur le traîneau sont assimilables à une force $\vec{f}$ horizontale de valeur constante et égale à **400 N**.
L'attelage des chiens exerce sur le traîneau une force $\vec{F}$ horizontale de valeur constante.

1 - Quelles sont les forces exercées sur le traîneau ?

2 - Calculer la valeur de la somme de ces forces.

3 - Calculer la valeur de $\vec{F}$ si le mouvement du traîneau a lieu avec une vitesse de valeur constante.

Ex-2- Cet exercice décrit un modèle trés simplifié du mouvement du centre d'inertie **G** d'un skieur le long d'un trajet comportant une portion (**BC**) rectiligne et inclinée d'un angle β = **40°** par rapport à l'horizontale, et une plateforme (**CD**) rectiligne et horizontale.

Durant tout le déplacement, l'ensemble des frottements est équivalent à une force $\vec{f}$ de valeur constante et égale à **50 N**, et qui est supposée être appliquée en **G**.

On supposera que le skieur, considéré comme un solide, reste constamment en contact avec la piste ; soit **m = 60 kg** sa masse lorsqu'il est muni de son équipement.

On donne la valeur du champ de pesanteur $\|\vec{g}\|$ = **9,8 m.s^{-2}** (***Doc.7***).

Trajet (BC)

1 - Faire l'inventaire de toutes les forces qui s'exercent sur le skieur au cours du mouvement.
Recopier le schéma et y représenter les forces.

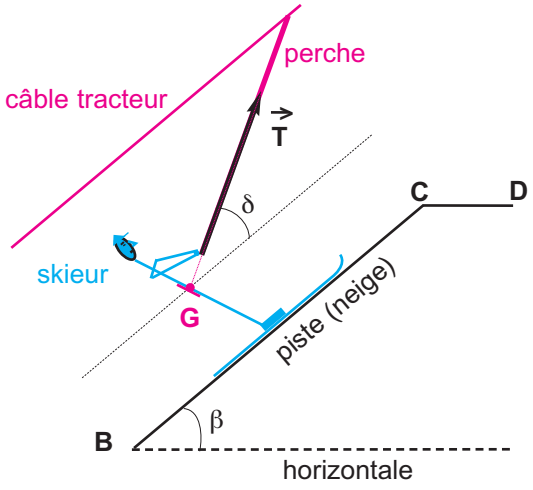
2 - Le skieur quitte **B** avec une vitesse de valeur **2 m.s^{-1}**, et qui est maintenue constante jusqu'en **C** grâce à une perche à laquelle il est accroché et qui exerce sur lui une force de traction $\vec{T}$ inclinée par rapport à la piste d'un angle δ = **30°** et de valeur constante.
Déterminer les caractéristiques de la tension $\vec{T}$.

Trajet (CD)

Arrivé en **C**, le skieur lâche la perche et s'engage sur la plate-forme avec une vitesse de **2 m.s^{-1}** qui l'amène jusqu'à l'arrêt en **D**.

3 - Faire l'inventaire de toutes les forces qui s'exercent sur le skieur au cours du mouvement.
Recopier le schéma et y représenter les forces.

4 - Déterminer les caractéristiques de l'accélération $\vec{a}$ du centre d'inertie **G** du skieur.



Doc.7

Ex-3- Une voiture de masse **M = 1200 kg** se déplace sur une route horizontale rectiligne.
Elle est soumise à des actions mécaniques extérieures de deux types :
- les actions motrices, modélisées par un vecteur force $\vec{F}$, parallèle à la route, de valeur constante et égale à **3000 N** ;
- les actions résistantes, modélisées par un vecteur force horizontal $\vec{f}$ de valeur inconnue mais constante.

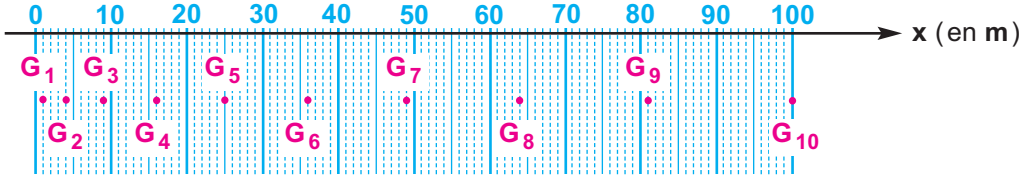
Afin de déterminer la valeur de la force $\vec{f}$, on procède à la mesure de la vitesse de la voiture à différentes instants, durant la phase de démarrage.

On photographie les positions successives de la voiture toutes les secondes.
Le départ des photographies est synchronisé avec celui de la voiture. A **t = 0**, l'avant de la voiture au repos coïncide avec la position origine **x = 0** ; la première position représentée est celle à l'instant **t = 1s** (***Doc.8***).

1 - Tracer la courbe représentant les variations de l'abscisse **x** en fonction de t^2.

2 - Déterminer les caractéristiques de l'accélération $\vec{a}$ de la voiture.

3 - En déduire la valeur de la force $\vec{f}$.



Doc.8

Ex-4- On peut lire dans une revue sportive la définition suivante :
Curling : jeu écossais qui remonte au **XVI ème** siècle. On y joue sur une patinoire horizontale ; il s'agit d'atteindre un but circulaire avec un palet de pierre, muni d'une poignée, que l'on fait glisser sur la glace.
Le palet "pèse" **20 kg**. Le curling se joue entre équipes de quatre. Quand un joueur tire, deux de ses partenaires peuvent balayer la glace devant le palet pour en faciliter le glissement.

1- Dans cette question les forces de frottement sont négligées.
Un joueur pousse le palet pendant **3 s** avec une force $\vec{F}$ constante, suivant une trajectoire rectiligne, le faisant ainsi passer de l'immobilité à la vitesse de lancement $\vec{v}_L$ de valeur **2,1 m.s^{-1}** ; ensuite le palet poursuit seul sa trajectoire sur la glace.

a- Préciser, en le justifiant, la nature du mouvement du centre d'inertie du palet pendant sa phase de lancement.

b- Déterminer les caractéristiques du vecteur accélération $\vec{a}_1$ associé à ce mouvement ; en déduire la valeur de $\|\vec{F}\|$.

c- Préciser, en le justifiant, la nature du mouvement du centre d'inertie du palet pour **t > 3,0 s** ?

2- En réalité il y a des frottements équivalents à une force $\vec{f}$ constante, et le palet lancé avec la vitesse $\vec{v}_L$ précédente parcourt **40 m** et atteint le but avec une vitesse que l'on considère comme nulle.

a- Préciser, en le justifiant, la nature du mouvement du centre d'inertie du palet au cours de cette phase du mouvement.

b- Déterminer les caractéristiques du vecteur accélération $\vec{a}_2$ associé à ce mouvement ; en déduire la valeur de $\|\vec{f}\|$.

c- Calculer la durée mise pour effectuer le trajet de **40 m**.

Ex-5- Etude d'un appontage

Un avion atterrit (apponte) sur le pont d'un porte-avions. Ce pont est supposé plan et horizontal. Il est assimilable à un référentiel galiléen. Le freinage de l'avion est uniquement assuré par des câbles, solidaires du pont, qui s'accrochent sous l'avion et le stoppent progressivement. Le mouvement de l'avion sur le pont peut être considéré comme un mouvement de translation rectiligne.

Dans tout cet exercice, on ne tiendra pas compte des forces de frottement. La masse de l'avion est **m = 1,2.10^4 kg**.

On choisit comme instant initial (**t = 0**), celui où l'avion touche le pont. Pour repérer la position de l'avion sur le pont du porte-avions on mesure la coordonnée d'un de ses points sur un axe (**Ox**), parallèle à la trajectoire, orienté dans le sens du mouvement et dont l'origine **O** se trouve à l'extrémité du pont (***Doc.9***).

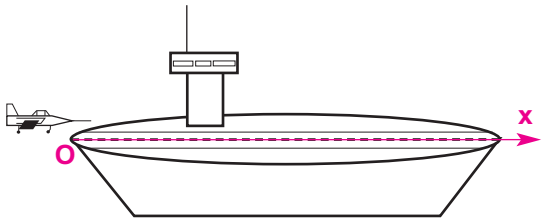
À l'instant **t = 2 s** (donc **2 s** après que l'avion ait touché le pont), une série de clichés de l'avion est prise à intervalles de temps réguliers **τ = 0,1 s**.

On obtient le document (***Doc.10***) où, pour davantage de clarté, l'avion n' a pas été systématiquement figuré sur les clichés ; seul un point a été représenté.

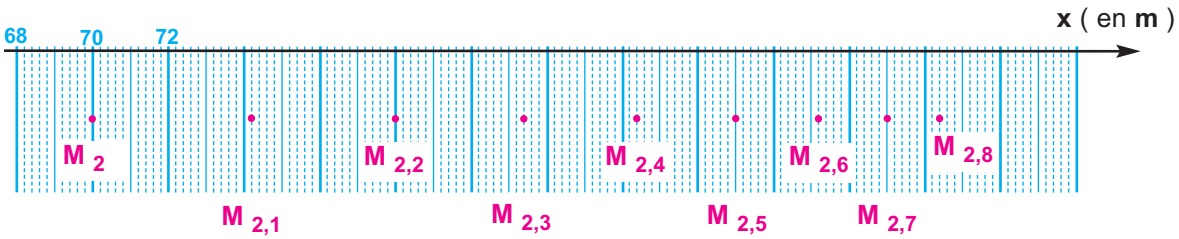
1 - Tracer la courbe représentant les variations de l'abscisse **x** en fonction de **t^2**.

2 - En utilisant le graphe précédent, déterminer, sur l'intervalle de temps [**2,1 s** ; **2,7 s**], les caractéristiques du vecteur accélération du mouvement. Préciser, en le justifiant, quel est le type de mouvement de l'avion.

3 - Déduire, en explicitant le raisonnement, les caractéristiques de la force $\vec{F}$ exercée par les câbles sur l'avion.



Doc.9



M$_2$ représente la position au temps **t = 2 s**

M$_{2,1}$ représente la position au temps **t = 2,1 s**

Doc.10

POUR EN SAVOIR PLUS

La mécanique de Newton vue par Richard Feynman

*Richard Feynman (**1918 - 1988**), éminent physicien américain, a recu le prix Nobel en **1965**. Renommé pour ses talents de pédagogue, il publie cette année-là **La nature de la physique**. Le texte suivant est un extrait de la traduction française (Le Seuil, **1980**) de cet ouvrage.*

Richard Feynman illustre les lois de Newton :

"Qu'est-ce qui fait tourner les planètes autour du Soleil ?

Au temps de Kepler (**1571 - 1630**), il y avait des gens pour répondre qu'il y avait derrière chaque planète un ange battant des ailes et la poussant sur son orbite. [...]

Au même moment, Galilée (**1564-1642**) étudiait les lois de mouvement des objets les plus courants, qu'on trouve sur Terre. En étudiant ces lois, faisant un grand nombre d'expériences pour voir comment des boules roulent sur un plan incliné, comment les pendules se balancent, et d'autres encore, Galilée découvrit un grand principe, le principe d'inertie qui est le suivant : si rien n'agit sur un objet se déplaçant en ligne droite à une certaine vitesse, l'objet continuera indéfiniment à la même vitesse sur la même ligne droite.[...]

Le pas suivant fut franchi par Newton qui discuta la question: "Si elle ne va pas en ligne droite, que se passe-t-il alors ?". Et il donna la réponse suivante : il faut une force pour modifier la vitesse, de quelque façon que ce soit. Par exemple, si vous poussez une boule dans la direction où elle se déplace, elle accélèrera. Si vous la voyez modifier sa direction, alors la force doit avoir agi de côté. La force peut se mesurer comme le produit des deux effets.

De combien change la vitesse pendant un petit intervalle de temps ? C'est ce que l'on appelle l'accélération ; et quand on la multiplie par un coefficient appelé masse de l'objet, ou son coefficient d'inertie, alors tout ça donne la force. On peut la mesurer.

Par exemple, lorsqu'on fait tourner au-dessus de sa tête une pierre attachée au bout d'une ficelle, on s'aperçoit qu'il faut tirer sur la ficelle ; la raison en est que la vitesse de la pierre sur son cercle, bien que constante, change de direction ; il faut donc une force qui tire en permanence vers l'intérieur, et elle est proportionnelle à la masse. De sorte que si l'on prend deux objets différents et qu'on les fait tourner au-dessus de sa tête l'un après l'autre, mais à la même vitesse, et qu'on mesure la force à exercer sur chacun, alors ces forces diffèrent dans la même proportion que les masses."

http://www.ecligne.net/mecanique/2_cinematique/2_translation/1_translation_base_cours.html
http://pagesperso-orange.fr/j.m.masson/animations/mouvements.swf
http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/meca/incline.html
http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/meca/coussin.html

7 ÉNERGIE CINÉTIQUE

Les méfaits de l'énergie cinétique.

OBJECTIFS

- Calculer l'énergie cinétique d'un solide en mouvement de translation.
- Appliquer le théorème de l'énergie cinétique pour déterminer entre autres la valeur d'une grandeur inaccessible à la mesure (force de frottement, réaction d'un support …).

ENERGIE CINETIQUE

1. Energie cinétique d'un point matériel

L'énergie cinétique d'un point matériel, de masse **m**, animé à un instant **t** d'une vitesse $\vec{v}$ est proportionnelle à sa masse et au carré de sa vitesse à cet instant.

$$\mathcal{E}_c = \frac{1}{2} m\, v^2$$

m en **kg**; v en **m.s^{-1}** et $\mathcal{E}_c$ en **joule** (**J**).

Remarque : l'énergie cinétique, comme la vitesse, est relative au référentiel d'étude.

2. Energie cinétique d'un système de points matériels :

cas d'un solide en translation

L'énergie cinétique, à un instant donné, d'un système de **n** points matériels de masses respectives m_i, dotés chacun d'une vitesse $\vec{v}_i$ par rapport à un repère donné, est égale à la somme des énergies cinétiques de chacun des points matériels qui le constituent à cet instant :

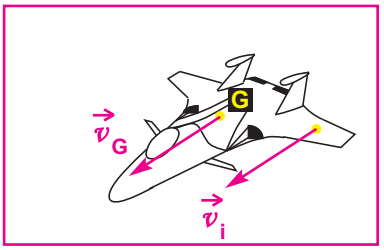
$$\mathcal{E}_c = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{i=n} m_i\, v_i^2$$

Décomposons le solide en **n** points matériels de masses respectives m_i.

Tous ces points matériels ont la même vitesse $\vec{v}_i$, égale à la vitesse $\vec{v}_G$ du centre d'inertie **G** du solide (***Doc.1***).

L'énergie cinétique d'un point matériel de masse m_i est donnée par $\mathcal{E}_{c_i} = \frac{1}{2} m_i\, v_i^2$ et l'énergie cinétique du solide a pour expression :

$$\mathcal{E}_c = \frac{1}{2} v_G^2 \sum_{i=1}^{i=n} m_i$$



Doc.1 : tous les points du planeur ont le même vecteur vitesse.

la masse totale du solide est $m = \sum_{i=1}^{i=n} m_i$

d'où :

L'énergie cinétique d'un solide en mouvement de translation, de masse **m** et animé d'une vitesse $\vec{v}$, est la même que celle d'un point matériel ayant la masse **m** et la même vitesse $\vec{v}$ que le solide.

$$\mathcal{E}_c = \frac{1}{2} m\, v^2$$

APPLICATION

Un camion de masse **m = 30 tonnes** roule à une vitesse de valeur $\|\vec{v}\| = 80\ km.h^{-1}$.

1 - Calculer son énergie cinétique.

2 - Quelle est l'énergie cinétique d'une voiture de masse m_1 = **800 kg** roulant à la même vitesse que le camion ? Conclure.

1- Energie cinétique du camion $\mathcal{E}_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$

$$\mathcal{E}_c = 0{,}5.30.10^3.\left(\frac{80}{3{,}6}\right)^2 \qquad \boxed{\mathcal{E}_c = 7{,}4.10^6\ J}$$

1- Energie cinétique de la voiture $\mathcal{E}_{c_1} = \frac{1}{2} m_1 . v_1^2$

$$\mathcal{E}_{c_1} = 0{,}5.800\left(\frac{80}{3{,}6}\right)^2 \qquad \boxed{\mathcal{E}_{c_1} = 0{,}2.10^6\ J}$$

A vitesse égale, l'énergie cinétique d'un véhicule croît avec sa masse.

3. Variation de l'énergie cinétique : théorème de l'énergie cinétique

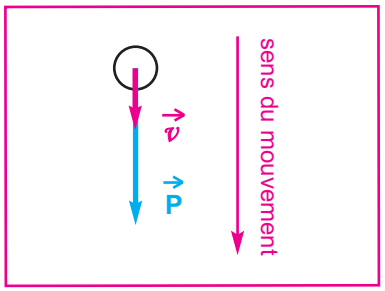
3.1 . Cas d'un corps ponctuel en chute libre

ETUDE QUALITATIVE

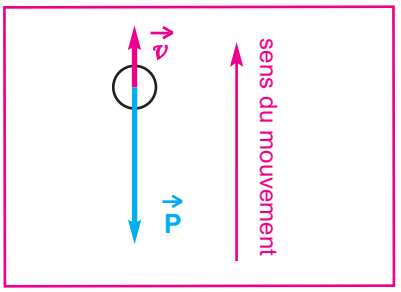
- Une bille ponctuelle, abandonnée sans vitesse initiale, tombe de plus en plus vite sous l'action de son poids qui est pratiquement la seule force agissante (***Doc.2-a***).

Remarque : au cours de ce mouvement de chute, l'énergie potentielle de pesanteur du système { **Terre** + **bille** } diminue et l'énergie cinétique de la bille augmente. Ce mode de transfert de l'énergie de la forme potentielle à la forme cinétique résulte du travail du poids de la bille en mouvement.

- Lançons la bille verticalement vers le haut; pendant la phase ascendante, le mouvement de la bille est ralenti sous l'action de son poids qui est pratiquement la seule force agissante (***Doc.2-b***).



Doc.2-a : le poids est une force motrice; son travail est moteur.
Il augmente l'énergie cinétique de la bille.

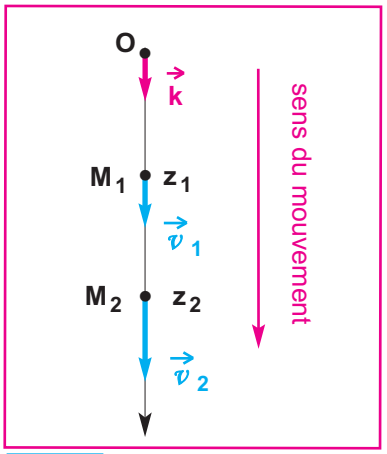


Doc.2-b : le poids est une force résistante, son travail est résistant.
Il diminue l'énergie cinétique de la bille.

Etude quantitative

Le référentiel d'étude est supposé galiléen.

- Evaluons la variation de l'énergie cinétique de la bille en chute libre, entre deux instants t_1 et t_2 correspondants à son passage par deux positions M_1 et M_2 d'abscisses respectives z_1 et z_2 par rapport à un repère d'espace $(O, \vec{k})$ et où les vitesses sont respectivement égales à $\vec{v}_1$ et $\vec{v}_2$: (***Doc.3***).



Doc.3

$$\mathcal{E}_{C_2} - \mathcal{E}_{C_1} = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2$$

$\mathcal{E}_{C_2} - \mathcal{E}_{C_1}$ est noté par $\Delta\mathcal{E}_{C\,t_1 \to t_2}$

- La chute libre sans vitesse initiale dans le sens descendant est un mouvement rectiligne uniformément accéléré d'accélération $\vec{a} = \|\vec{g}\| \vec{k}$. Appliquons la relation entre les carrés des vitesses et les abscisses, ceci donne

$$v_2^2 - v_1^2 = 2 \|\vec{g}\| (z_2 - z_1)$$

- La variation de l'énergie cinétique $\Delta\mathcal{E}_C$ s'écrit alors :

$$\Delta\mathcal{E}_{C\,t_1 \to t_2} = m\|\vec{g}\| (z_2 - z_1)$$

Le produit $m\|\vec{g}\| (z_2 - z_1)$ représente le travail du poids $\vec{P} = m\vec{g}$ au cours du déplacement correspondant au segment de longueur $(z_2 - z_1)$ parcouru entre les instants t_1 et t_2;

d'où : $\Delta\mathcal{E}_{C\,t_1 \to t_2} = \mathcal{W}(\vec{P})$

Conclusion

La variation de l'énergie cinétique de la bille, en mouvement de chute libre, entre deux instants t_1 et t_2 est égale au travail de son poids, l'unique force qui s'exerce entre ces deux instants.

3.2 . Enoncé du théorème de l'énergie cinétique

Le cas particulier d'un corps ponctuel en chute libre peut être généralisé pour un système matériel quelconque en translation soumis à un ensemble de forces.
Le théorème de l'énergie cinétique relie la variation de l'énergie cinétique d'un système matériel et le travail des forces qui lui sont appliquées.

ENONCÉ

Dans un référentiel galiléen, la variation de l'énergie cinétique d'un système matériel déformable ou indéformable, entre deux instants t_1 et t_2 quelconques, est égale à la somme algébrique des travaux de toutes les forces extérieures et intérieures au système entre ces deux instants.

$$\Delta \mathcal{E}_C \underset{t_1 \to t_2}{} = \sum_{t_1 \to t_2} \mathcal{W} \left(\vec{F}_{ext} + \vec{F}_{int} \right)$$

Cas d'un système déformable

La somme des travaux des forces intérieures n'est pas nécessairement nulle.

EXEMPLE - 1

Deux solides, reliés par un fil, compriment entre eux un ressort. On brûle le fil, le ressort se détend et communique aux deux solides des énergies cinétiques respectives $\mathcal{E}_{C_2}$ et $\mathcal{E}_{C_1}$ (**Doc.4**).

Les seules forces qui travaillent **au cours de l'éclatement** du système déformable {ressort + deux solides} sont les tensions intérieures au système.

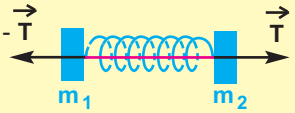
EXEMPLE - 2

Pour un système formé de deux véhicules, au cours d'un accident, les seules forces qui travaillent sont les forces d'interaction qui sont des forces intérieures au système.

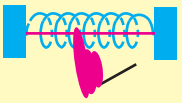
Cas d'un système indéformable

Toutes les forces intérieures s'annulent deux à deux, et la somme de leurs travaux est nulle. La variation de l'énergie cinétique est causée uniquement par la somme des travaux des forces extérieures exercées sur le solide.

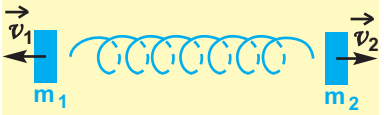
ressort non déformé



ressort comprimé et fil tendu



on brûle le fil

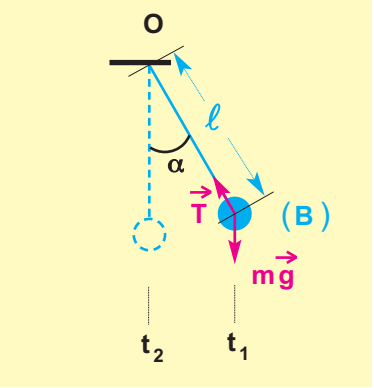


le ressort se détend et les travaux des forces intérieures $\vec{T}$ et $-\vec{T}$ transfèrent de l'énergie cinétique aux deux solides de masses respectives m_1 et m_2

Doc.4

Exemple

Une bille(**B**) de masse m, assimilée à un point matériel, est suspendue par un fil de longueur l à une potence fixe. Appliquons le théorème de l'énergie cinétique au système bille (**B**) entre l'instant t_1 de sa libération sans vitesse initiale (le fil auquel est attachée la bille (**B**) fait un angle α avec la verticale) et l'instant t_2 de son passage par la verticale où son énergie cinétique est $\mathcal{E}_c$ (**Doc.5**).



Doc.5

Les forces exercées sur (**B**) entre ces deux instants sont :

- la tension $\vec{T}$ du fil
- le poids $m\vec{g}$ de la boule (B_1).

$$\Delta \mathcal{E}_c\,{}_{t_1 \to t_2} = \mathcal{W}(m\vec{g})\,{}_{t_1 \to t_2} + \mathcal{W}(\vec{T})\,{}_{t_1 \to t_2}$$

$\mathcal{W}(\vec{T})\,{}_{t_1 \to t_2} = 0$ car la force $\vec{T}$ est constamment normale au déplacement; $\Delta \mathcal{E}_c\,{}_{t_1 \to t_2} = \mathcal{E}_c$.

$$\mathcal{E}_c = m\|\vec{g}\|\ell(1 - \cos\alpha)$$

Validité du théorème de l'énergie cinétique

Dans ce paragraphe nous allons juste aborder, sans mener à son terme, la démonstration du théorème de l'énergie cinétique pour un solide en translation et ceci dans le but de justifier pourquoi ce théorème n'est valable que dans un repère galiléen.

$$\mathcal{E}_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(\vec{v})^2$$

$$\frac{d\mathcal{E}_c}{dt} = m\vec{v}\frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{v}.\vec{a}$$

D'après le théorème du centre d'inertie qui n'est applicable que dans un repère galiléen, on peut écrire :

$m\vec{a} = \vec{F}$; $\vec{F}$ étant la somme des forces exercées sur le solide.D'où

$$\frac{d\mathcal{E}_c}{dt} = \vec{F}.\vec{v} = \mathcal{P}(\vec{F});$$

$\mathcal{P}(\vec{F})$ correspond à la puissance de la somme des forces exercées sur le solide.

On continue la démonstration en écrivant :

$d\mathcal{E}_c = \mathcal{P}(\vec{F})\,dt = d\mathcal{W}$ (il ne s'agit pas d'une multiplication des deux membres de la relation précédente par le facteur **dt** !!!)

$d\mathcal{E}_c$ et $d\mathcal{W}$ représentent respectivement la variation de l'énergie cinétique entre deux instants **t** et **t + dt**, et le travail élémentaire de $\vec{F}$ pendant cet intervalle de temps **dt**.

3.3. Application du théorème de l'énergie cinetique : détermination d'une force de liaison

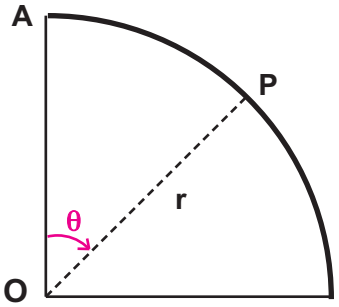
Dans certaines situations, la détermination de la valeur d'une force de liaison, nécessite l'utilisation du théorème de l'énergie cinétique.

L'exercice suivant permettra cette application.

Un solide (**S**) de masse **m**, assimilable à un point matériel, peut glisser sans frottement sur une gouttière ayant la forme d'un quart de cercle de centre **O** et de rayon **r**.

On le déplace légèrement de sorte qu'il quitte le sommet **A** avec une vitesse nulle.

Une position **P** de (**S**) à un instant **t** est repérée par l'angle θ que fait le rayon **OP** avec le rayon **OA** (***Doc.6***).



Doc.6

1 - a - Reproduire le schéma du document **6** et représenter les forces exercées sur (**S**) au point **P**.

1 - b - Appliquer, au point **P**, la deuxième loi de Newton au système (**S**), et en déduire les expressions de :

- la composante tangentielle a_t du vecteur accélérationen en fonction de $\|\vec{g}\|$ et θ.
- le module $\|\vec{R}\|$ de la réaction de la gouttière en fonction de **m**, $\|\vec{g}\|$, θ et de la vitesse v au point **P**.

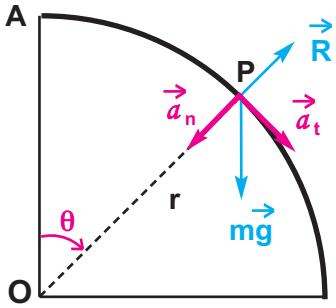
2 - a - En appliquant le théorème de l'énergie cinétique au système (**S**) entre l'instant où il quitte **A** et celui où il se trouve au point **P**, exprimer le module du vecteur vitesse de (**S**), en fonction de $\|\vec{g}\|$, θ et **r**.

2 - b - En déduire l'expression de $\|\vec{R}\|$ en fonction de $\|\vec{g}\|$, θ et **m**.

2 - c - Déterminer, en degré, la valeur de l'angle θ lorsque le solide (**S**) quitte la gouttière.

Solution

1 - a - Représentation des forces exercées sur (**S**)



1 - b - Composantes tangentielle et normale du vecteur accélération

La deuxième loi de Newton appliquée au système (**S**) dans le référentiel terrestre supposé galiléen s'écrit : $m\vec{g} + \vec{R} = m\vec{a}$

Projection sur $P,\vec{\mathcal{T}}$: $m\|\vec{g}\|\sin\theta = ma_t$ (1) d'où $\boxed{a_t = \|\vec{g}\|\sin\theta}$ (1')

Projection sur $P,\vec{\mathcal{N}}$: $m\|\vec{g}\|\cos\theta - \|\vec{R}\| = ma_n$ (2)

or $a_n = \dfrac{v^2}{r}$ d'où $\boxed{\|\vec{R}\| = m\|\vec{g}\|\cos\theta - m\dfrac{v^2}{r}}$ (2')

2 - a - Module du vecteur vitesse de (**S**)

Appliquons le théorème de l'énergie cinétique au solide (**S**) :
t_1 : instant où (**S**) quitte le point **A** sans vitesse initiale
t_2 : instant où (**S**) est au point **P** .

$$\Delta\mathcal{E}_c{}_{t_1\to t_2} = \mathcal{W}_{t_1\to t_2}(m\vec{g}) + \mathcal{W}_{t_1\to t_2}(\vec{R}) \Longrightarrow \frac{1}{2}mv^2 - 0$$

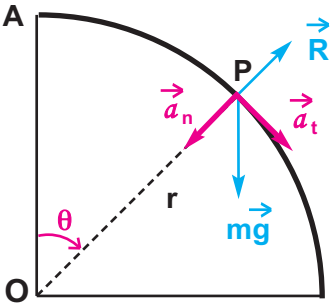
$$= m\|\vec{g}\|r(1-\cos\theta) + 0 \Longrightarrow \boxed{\|\vec{v}\| = \sqrt{2\|\vec{g}\|r(1-\cos\theta)}}$$

L'accélération tangentielle $a_t = \dfrac{dv}{dt} = \|\vec{g}\|\sin\theta$ n'est pas constante car θ dépend du temps.
L'établissement des équations d'un tel mouvement dépasse le cadre du secondaire et le théorème de l'énergie cinétique s'impose pour déterminer l'expression de la vitesse au point **P**.

2 - b - Expression du module de la réaction de la gouttière

Dans l'expression (2') on remplace $\dfrac{v^2}{r}$ par $2\|\vec{g}\|(1-\cos\theta)$

On obtient $\boxed{\|\vec{R}\| = m\|\vec{g}\|(3\cos\theta - 2)}$



2 - c - Valeur de θ lorsque le solide (**S**) quitte la gouttière

Lorsque (**S**) perd tout contact avec la gouttière, la réaction $\vec{R}$ s'annule :

$$\|\vec{R}\| = 0 \Longrightarrow (3\cos\theta - 2) = 0 \Longrightarrow \cos\theta = \frac{2}{3}$$

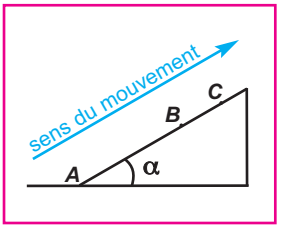
$$\Longrightarrow \boxed{\theta = 48{,}2^\circ}$$

EXERCICE RÉSOLU

ENONCÉ :

On considère un véhicule de masse **m = 100kg** en mouvement sur une piste inclinée d'un angle α = **30°** par rapport à l'horizontale. Au cours de son mouvement, le véhicule est constamment soumis à des forces de frottements dont la résultante $\vec{f}$ a une valeur constante $\|\vec{f}\|$ = **100 N** .

Lorsque le véhicule se déplace, son centre d'inertie **G** décrit la ligne de plus grande pente. (***Doc.7***)



Doc.7

1- Sous l'effet d'une force motrice $\vec{F}$, développée par le moteur et de même direction que la ligne de plus grande pente, le véhicule quitte la position **A** avec une vitesse nulle et atteint la position **B** avec une vitesse de valeur $\|\vec{v}_B\|$ = **20 m.s^{-1}**.

En appliquant le théorème de l'énergie cinétique au système constitué par le véhicule, calculer la valeur de $\vec{F}$.

On donne **AB = 100 m** .

2- Arrivé au point **B**, la force motrice est supprimée et le véhicule continue son mouvement jusqu'au point **C** où sa vitesse s'annule. Calculer la distance **BC**.

On donne $\|\vec{g}\|$ = **9,8 m.s^{-2}**

SOLUTION

1- Détermination de la valeur de $\|\vec{F}\|$

- Système : {**véhicule**}.
- Référentiel : Référentiel **terrestre** supposé galiléen.
- Les deux états :

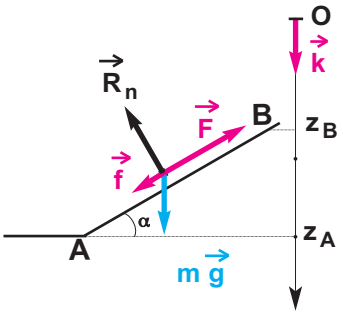
état initial : **G** en **A** ; $\mathcal{E}_{C(A)} = 0$

état final : **G** en **B** ; $\mathcal{E}_{C(B)} = \frac{1}{2} m v_B^2$

Forces appliquées	Travaux effectués par les forces entre **A** et **B**
Le poids $m\vec{g}$	$w_{A\to B}(m\vec{g}) = m\|\vec{g}\|(z_B - z_A)$ $= -m\|\vec{g}\|AB\sin\alpha$
La réaction normale $\vec{R}_n$ du plan	$w_{A\to B}(\vec{R}_n) = 0$
La force motrice $\vec{F}$	$w_{A\to B}(\vec{F}) = \|\vec{F}\|.AB$
La force de frottement $\vec{f}$	$w_{A\to B}(\vec{f}) = -\|\vec{f}\|.AB$

Comment appliquer le théorème de l'énergie cinétique ?

1- Choisir un système
2- Définir le référentiel d'étude
3- Définir clairement les deux instants (s'aider d'un schéma pour préciser les deux états)
4- Dresser le bilan des forces appliquées au système et calculer leurs travaux entre les deux instants considérés
5- Formuler et appliquer le théorème



Appliquons le théorème de l'énergie cinétique :

$$\Delta \mathcal{E}_{c\,A \to B} = \sum_{A \to B} w\left(\vec{F}_{ext} + \vec{F}_{int}\right)$$

$$\mathcal{E}_{c(B)} - \mathcal{E}_{c(A)} = -\,m\|\vec{g}\|AB\sin\alpha + \|\vec{F}\|.AB - \|\vec{f}\|.AB$$

$$\frac{1}{2}m v_B^2 = (-\,m\|\vec{g}\|\sin\alpha + \|\vec{F}\| - \|\vec{f}\|)AB$$

$$\boxed{\|\vec{F}\| = \frac{\frac{1}{2}m v_B^2}{AB} + \|\vec{f}\| + m\|\vec{g}\|\sin\alpha}$$

$$\|\vec{F}\| = \frac{0{,}5.100.(20)^2}{100} + 100 + 100.9{,}8.0{,}5$$

$$\boxed{\|\vec{F}\| = 790\ N}$$

2- Détermination de la distance BC

- Système : {**véhicule**}.
- Référentiel : Référentiel **terrestre** supposé galiléen.
- Les deux états :

état initial : **G** en **B** ; $\mathcal{E}_C(B) = \frac{1}{2}m v_B^2$

état final : **G** en **C** ; $\mathcal{E}_C(C) = 0$

Forces appliquées	Travaux effectués par les forces entre **B** et **C**
Le poids $m\vec{g}$	$w_{B \to C}(m\vec{g}) = m\|\vec{g}\|(z_C - z_B)$ $= -\,m\|\vec{g}\|BC\sin\alpha$
La réaction normale $\vec{R}_n$ du plan	$w_{B \to C}(\vec{R}_n) = 0$
La force de frottement $\vec{f}$	$w_{B \to C}(\vec{f}) = -\|\vec{f}\|.AB$

Appliquons le théorème de l'énergie cinétique :

$$\Delta \mathcal{E}_{c\,B \to C} = \sum_{B \to C} w\left(\vec{F}_{ext} + \vec{F}_{int}\right)$$

$$\mathcal{E}_{c(C)} - \mathcal{E}_{c(B)} = -\,m\|\vec{g}\|BC\sin\alpha - \|\vec{f}\|.BC$$

$$-\frac{1}{2}m v_B^2 = -(m\|\vec{g}\|\sin\alpha + \|\vec{f}\|)BC$$

$$\boxed{BC = \frac{\frac{1}{2}m v_B^2}{\|\vec{f}\| + m\|\vec{g}\|\sin\alpha}}$$

$$\boxed{BC = 33{,}9\ m}$$

L'ESSENTIEL

- L'énergie cinétique d'un objet ponctuel de masse **m** ou d'un solide en mouvement de translation de même masse, animé d'une vitesse $\vec{v}$ est donnée par :

$$\mathcal{E}_c = \frac{1}{2} m v^2$$

m en **kg** ; v en **m.s^{-1}** ; $\mathcal{E}_c$ en **joule**.

- L'énergie cinétique d'un solide de masse **m** dont le centre d'inertie **G** est animé d'une vitesse $\vec{v}_G$ s'écrit :

$$\mathcal{E}_c = \frac{1}{2} m v_G^2$$

Remarque : l'énergie cinétique, comme la vitesse, est relative au référentiel d'étude.

Enoncé du théorème de l'énergie cinétique

Dans un référentiel galiléen, la variation de l'énergie cinétique d'un système matériel déformable ou indéformable, entre deux instants t_1 et t_2 quelconques est égale à la somme algébrique des travaux de toutes les forces extérieures et intérieures appliquées au système entre ces deux instants.

$$\Delta \mathcal{E}_c{}_{t_1 \to t_2} = \mathcal{E}_c(t_2) - \mathcal{E}_c(t_1) = \sum_{t_1 \to t_2} \mathcal{W}(\vec{F}_{ext} + \vec{F}_{int})$$

Travaux pratiques

But

Vérifier le théorème de l'énergie cinétique.

Matériel

- un pendule formé d'une bille de rayon **r** d'environ **1cm**, de masse **m**, attaché à un fil inextensible, de masse négligeable et de longueur ℓ telle que ℓ + **r** = **1 m**.
- un électro-aimant
- un rapporteur
- un mesureur de vitesse
- un support.

Protocole expérimental

- Réaliser le montage représenté sur la figure ci -contre.
- Ecarter le pendule d'un angle α à partir de la verticale et positionner l'électro-aimant de manière à retenir la bille dans une position telle que le plan formé par la direction du fil et la verticale passe par le milieu des bras du mesureur de vitesse.
- Libérer le pendule en agissant sur l'électro-aimant et noter la valeur de la vitesse.

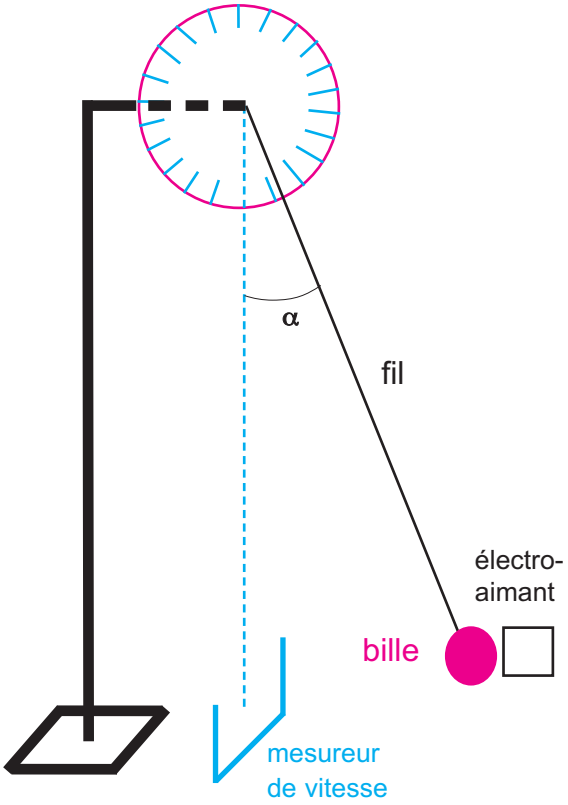


Tableau de mesures

α (en degré)	5	10	15	20	25
$\cos\alpha$					
$\lVert \vec{v} \rVert$ ($m.s^{-1}$)					
$\mathcal{E}_c = \frac{1}{2} m v^2$ (J)					

Exploitation des résultats de mesures

1 - Tracer le graphe correspondant à $E_c = f(\cos\alpha)$

2 - Etude théorique : Etablir l'expression de E_c en fonction de **m** , $\lVert \vec{g} \rVert$, **L et** α. En déduire la valeur de $\lVert \vec{g} \rVert$

On admettra que la bille est libérée par l'aimant sans vitesse initiale.

3 - Conclure.

EXERCICES

Je vérifie mes connaissances

Choisir la (ou les) proposition(s) correcte(s)

1- Un solide de masse **m** en mouvement de translation suivant une trajectoire rectiligne inclinée par rapport à l'horizontale ; l'étude du mouvement se fait par rapport à un référentiel terrestre supposé galiléen.

Il est soumis à une force de frottement $\vec{f}_d$.
A l'instant initial t_1, il est animé d'une vitesse $\vec{v}_1$ et son centre d'inertie se trouve en **A**.
A l'instant t_2, il est animé d'une vitesse $\vec{v}_2$ et son centre d'inertie se trouve en **B**.

a - $\mathcal{E}_c(B) - \mathcal{E}_c(A) = \mathcal{W}_{AB}(\vec{f}_d)$

b - $\mathcal{E}_c(B) - \mathcal{E}_c(A) = \mathcal{W}_{AB}(\vec{f}_d) + \mathcal{W}_{AB}(\vec{P})$

c - $\mathcal{E}_c(B) - \mathcal{E}_c(A) = \mathcal{W}_{AB}(\vec{P})$

d - $\mathcal{E}_c(B) - \mathcal{E}_c(A) = \mathcal{W}_{AB}(\vec{R}_n) + \mathcal{W}_{AB}(\vec{P})$

2- Un solide en mouvement de translation de masse **m** est animé d'une vitesse v et possède une énergie cinétique $\mathcal{E}_c$.

a - $\mathcal{E}_c$ double si v double, **m** étant constante.

b - $\mathcal{E}_c$ reste inchangée si **m** double et v est divisée par **2.**

c - $\mathcal{E}_c$ double si v double et **m** est divisée par **2.**

J'applique mes connaissances et je raisonne

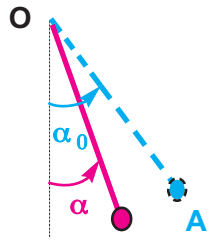
Ex-1- On lâche un mobile de masse 500g depuis un point A d'une table inclinée d'un angle α par rapport à l'horizontale.

1- Donner l'expression de la vitesse v obtenue après un trajet de longueur x, la vitesse initiale étant nulle et le mouvement se faisant sans frottements.

2- En déduire la valeur de l'angle α pour x = 50 cm et v=2m.s^{-1}.

3- En réalité, le mouvement se fait avec frottements. L'angle α n'a pas été modifié. Pour x= 50 cm, v = 1,7 m.s^{-1}.
Calculer la valeur de la force de frottement, supposée constante qui est à l'origine de cette différence.

Ex-2- Un pendule simple est formé d'une boule (**S**), de masse **m** = **100 g**, fixée à l'extrémité **A** d'un fil **OA**, de masse négligeable et dont l'extrémité **O** est attachée à un point fixe. La boule est supposée ponctuelle et la distance qui sépare le point de suspension **O** du fil au centre d'inertie **G** de la boule est ℓ.
On écarte le pendule d'un angle α_0 de sa position d'équilibre et on le libère sans vitesse initiale.
Une position quelconque du pendule au cours de son mouvement est repérée par l'angle α que fait la direction du fil tendu avec la verticale (**Doc-8-a**).



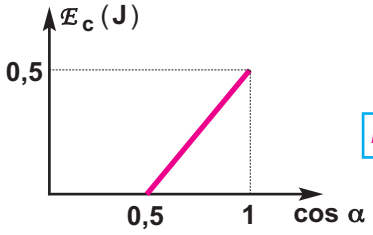
Doc.8-a

Le diagramme de l'énergie cinétique de la boule (**B**) en fonction de **cos** α est porté sur le document **8-b**.

1 - Etablir, pour une position quelconque du pendule, l'expression de l'énergie cinétique de la boule en fonction de **m**, ℓ, α, α_0 et $\|\vec{g}\|$.

2 - En exploitant le diagramme du document **16**, déterminer :
- la valeur de la longueur ℓ
- la valeur de α_0
- la valeur de la vitesse de la boule à son passage par la position d'équilibre.

Données : $\|\vec{g}\| = 9{,}8\ N.kg^{-1}$

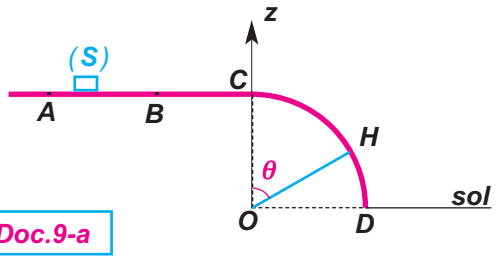


Doc.8-b

Ex 3- Un chariot (**S**) de masse **M = 10 kg** est placé sur des rails disposés suivant une trajectoire (**ABCD**) contenue dans un plan vertical et composée :
- d'une portion rectiligne horizontale (**ABC**) telle que **AB = 0,5 m**
- d'une portion circulaire (**CD**) de rayon **r** et de centre **O** pris comme origine de l'axe vertical **Oz** passant par **C** (**Doc.9-a**).

Dans tout l'exercice, on supposera tout type de frottement négligeable.

Des sportifs entrent en compétition en se prêtant au jeu suivant : un sportif exerce sur (**S**), initialement au repos en **A**, une force $\vec{F}$ horizontale et constante tout le long du trajet (**AB**) afin de lui imprimer une vitesse $\vec{v}_B$ en **B**.
Arrivé en **C** avec une vitesse $\vec{v}_C = \vec{v}_B$, le chariot suit le trajet circulaire qu'il quitte en une position **H** telle que l'angle $(\overrightarrow{OC}, \overrightarrow{OH}) = \theta$.



Doc.9-a

1- Mouvement suivant le trajet (AB) .

a - Representer les forces que nous supposons être appliquées au centre d'inertie **G** du chariot

b - En appliquant le théorème de l'énergie cinétique au système constitué par le chariot, montrer que la valeur de la vitesse $\vec{v}_B$ s'écrit :

$$\|\vec{v}_B\| = \sqrt{\frac{2\,\|\vec{F}\|\,.\,\|\overrightarrow{AB}\|}{M}}$$

2- Mouvement suivant le trajet circulaire (CD)

Pour chaque sportif participant à la compétition, on note la valeur de $\vec{F}$ et l'angle θ correspondant à la position **H** où le chariot quitte les rails entre **C** et **D**.

Ceci permet de tracer la courbe $\cos\theta = f(\|\vec{F}\|)$ (**Doc.9-b**).

a - Représenter le(s) force(s) s'exerçant sur (**S**) au point **H**

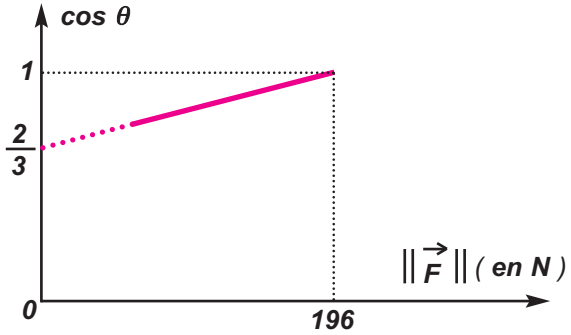
b - En appliquant au point **H** le théoreme du centre d'inertie au système (**S**) montrer que

$$v_H^2 = \|\vec{g}\|\,.\,r\,.\cos\theta$$

c - Montrer que

$$\cos\theta = \left(\frac{2\,\|\overrightarrow{AB}\|}{3M\,\|\vec{g}\|\,r}\right)\cdot\|\vec{F}\| + \frac{2}{3}$$

d - déduire la valeur de **r** sachant que $\|\vec{g}\| = 9{,}8\ N.kg^{-1}$



Doc.9-b

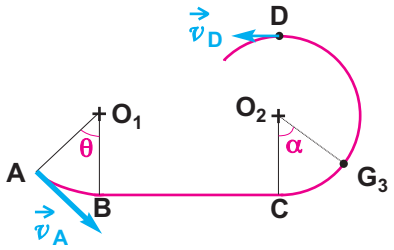
Ex 4- On étudie le mouvement du centre d'inertie **G** d'un solide de masse **m = 0,5 kg** glissant sur une piste (**ABCD**) (**Doc.10-a**).

- la partie **AB** est un arc de cercle de rayon **r** et telle que $(\overrightarrow{O_1A}, \overrightarrow{O_1B}) = \theta = 60°$.
- la partie **BC** est rectiligne et horizontale de longueur $\ell = 1$ **m** .
- la partie **CD** est un demi-cercle de rayon **r**.
- seule la partie **BC** présente des frottements équivalents à une force constante .

1 - a - Donner les expressions littérales exprimant les travaux des forces extérieures s'exerçant sur le solide au cours du trajet (**ABCD**)

b - En appliquant le théorème de l'énergie cinétique, établir que $v_D^2 = v_A^2 + b$;
b sera exprimée en fonction des paramètres de l'exercice .

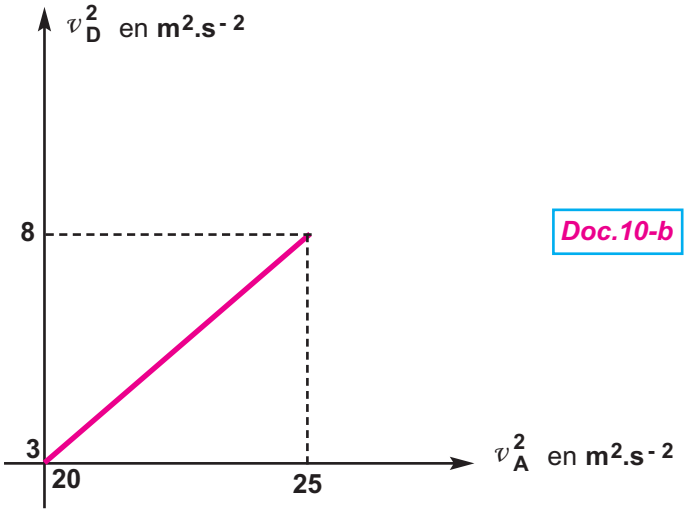
Doc.10-a



2 - Deux mesureurs de vitesse sont placés en **A** et **D** et permettent de mesurer les valeurs des vitesses $\vec{v}_A$ et $\vec{v}_D$. Ainsi on trace la courbe $v_D^2 = f(v_A^2)$ (**Doc.10-b**). En déduire la valeur de $\|\vec{f}\|$.

3 - Etablir l'expression de la valeur de la réaction $\vec{R}_1$ exercée par la portion de piste **CD** sur le solide en un point entre **C** et **D** défini par $\alpha = (\overrightarrow{O_2C}, \overrightarrow{O_2M})$ en fonction de **m**, $\|\vec{g}\|$, **r**, α et sa vitesse $\|\vec{v}\|$ en ce point.

4 - Quelle est la valeur minimale de la vitesse $\|\vec{v}_A\|$ pour que le solide atteigne le point **D**.



Doc.10-b

Ex 5- Un véhicule roule sur une route horizontale à la vitesse v. La distance de freinage d est définie comme la distance nécessaire pour immobiliser ce véhicule en utilisant ses freins. On donne, pour une automobile en bon état roulant sur route horizontale sèche, le tableau suivant :

v (km.h^{-1})	30	60	90	110	130
v (m.s^{-1})					
d (m)	6	24	54	80	113

1- Reproduire le tableau et compléter la deuxième ligne.

2- Tracer le graphe représentant la distance de freinage d en fonction de la vitesse v, exprimée en unité S.I.

Peut-on dire que la distance de freinage d et la vitesse v sont proportionnelles ?

3-Tracer le graphe représentant la distance de freinage d en fonction du carré de la vitesse.

Pourquoi ce graphe permet-il de dire qu'il existe une relation de la forme d = kv^2 entre d et v ?

Calculer la valeur du coefficient k :

4- Le tableau correspond à une étude faite sur un véhicule de masse 1000kg équipé de freins adéquats. Quelle relation simple existe-t-il entre l'énergie cinétique du véhicule et la distance de freinage d ?

Ex 6- Etude d'un texte scientifique : Les météorites

Les météorites de petite taille sont sensiblement freinées par les couches denses de l'atmosphère. Elles peuvent arriver intactes ou s'être fragmentées durant leur approche du sol. On les retrouve en général fichées en terre ou déposées en surface.
Les météorites les plus importantes, supérieures a une dizaine de mètres de diamètre peuvent provoquer des dégâts importants car elles ne sont pratiquement pas ralenties par l'atmosphère terrestre et arrivent au sol avec des vitesses de l'ordre de 100 kilomètres par seconde. La collision ne dure qu 'une fraction de seconde, mais l'énergie libérée est comparable à celle de plusieurs explosions nucléaires. A l'instant du choc, on pense que les grosses météorites sont totalement ou presque totalement vaporisées. Il y'a formation d'un cratère imprimé dans les roches terrestres.

Texte extrait du livre *"Météorites et leurs impacts"* d 'Alain Carion, Masson.

Météorite : *Objet solide provenant de l'espace et qui atteint la surface de la terre.*
Fichees : *enfoncées par la pointe.*

1- a - Pourquoi certaines météorites ne parviennent-elles pas jusqu 'au sol ?
b - Comment varie leur énergie cinétique durant leur approche du sol ?
c - Pourquoi les grosses météorites ont-elles des vitesses plus élevées que les autres ?
d - Qu 'en est-il de leur énergie cinétique ?
e - Comment peut-on justifier les dégâts importants provoquer par une grosse météorite ?
2- a - Quelles sont les données qui manquent pour évaluer l'énergie cinétique d'une grosse météorite à son arrivée au sol ?
b - En raisonnant sur des ordres de grandeurs, évaluer approximativement cette énergie cinétique sachant que la masse est de l'ordre du tonne.

POUR EN SAVOIR PLUS

ENERGIE CINÉTIQUE ET SÉCURITÉ ROUTIÈRE

Les chiffres de la sécurité routière sont implacables : la vitesse intervient comme facteur principal ou aggravant dans près d'un accident mortel sur deux.

L'automobile n'échappe pas en effet aux Lois de la physique. Tout corps en mouvement accumule de l'énergie.

L'énergie cinétique d'un mobile étant proportionnelle à sa masse et au carré de sa vitesse, celle-ci est un facteur aggravant.

La violence des chocs et les conséquences corporelles des accidents en sont considérablement augmentés.

Les occupants d'une voiture en mouvement ne sont pas immobiles (par rapport à la route) ; par conséquent ils ont leur propre énergie cinétique.

Si le mobile est stoppé brutalement (en rencontrant un obstacle) les passagers restent en mouvement jusqu'à ce qu'ils rencontrent eux-mêmes un obstacle (pare-brise, volant, tableau de bord, siège, …) et que leur énergie cinétique soit elle-même absorbée. Selon la violence du choc, il y a risque de blessures graves voire de décès.

Les organes vitaux (le coeur, le foie, les poumons, le cerveau …) ont également leur propre énergie cinétique. Tout comme le passager se heurte au pare-brise, au tableau de bord … les organes se heurtent à la cage thoracique et à la boîte crânienne.

A 30 $km.h^{-1}$, la violence d'un choc équivaut à une chute verticale d'une hauteur de 3,5 m.

A 60 $km.h^{-1}$, la violence d'un choc équivaut à une chute verticale du haut d'un immeuble de 5 étages.

A 150 $km.h^{-1}$, le choc équivaut à une chute verticale de plus de 88 m...

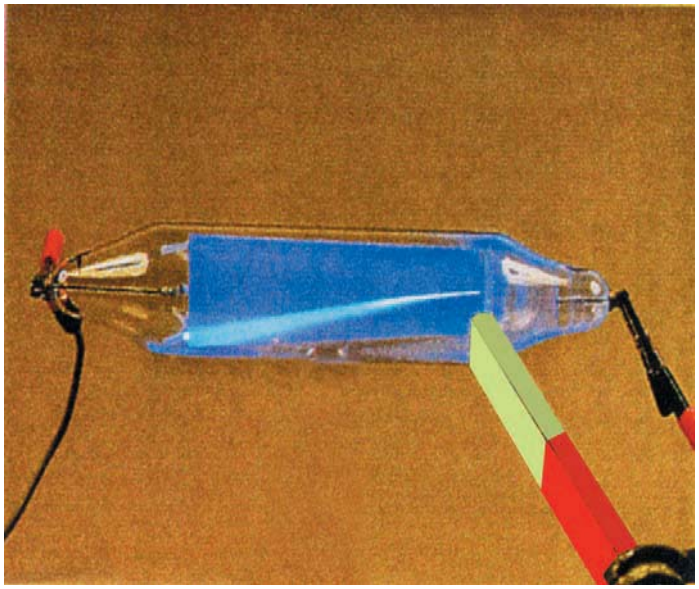
Plus la vitesse est élevée, plus le choc est violent et moindres sont les chances de survie.

Au final, ce sont les distances de sécurite, l'état de vigilance du conducteur et l'adaptation à la conduite aux conditions de la route qui déterminent la prise de risque de l'automobiliste. Mais la vitesse, elle, intervient toujours de manière directe ou indirecte dans la gravite de l'accident. Le port de la ceinture de sécurité, l'airbag, permettent de limiter les conséquences des accidents frontaux, à condition que la vitesse, lors de l'impact, ne soit pas excessive.

http://pagesperso-orange.fr/guy.chaumeton/animations/plan-incline.htm
http://olical.free.fr/meca1s/nrjcin/voitEc.swf
http://physiquecollege.free.fr/_private/troisieme/energie/energie_cinetique_qcm.htm

8 MOUVEMENTS DANS LES CHAMPS

L'eau de ces jets dessine des paraboles.



Déviation d'un faisceau d'électrons par un champ magnétique dans un tube de Crookes.

OBJECTIFS

- Appliquer la relation fondamentale de la dynamique au mouvement d'un projectile.
- Calculer le travail d'une force électrique.
- Appliquer l'expression du travail d'une force électrique
- Appliquer la relation fondamentale de la dynamique au mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme.
- Déterminer les caractéristiques de la force de Lorentz.
- Appliquer la relation fondamentale de la dynamique au mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme.

Mouvement dans un champ gravitationnel : mouvement d'un projectile

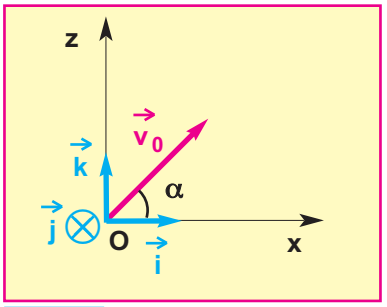
Un caillou projeté par le pneu d'un camion vers l'arrière ; une fléchette sortant de l'extrémité du canon d'un pistolet, une balle frappée avec une raquette, une boule métallique lancée par un athlète ... Tous ces objets, dont les centres de gravité décrivent, au cours de leur évolution dans l'air, des trajectoires paraboliques, portent le nom de **projectiles**.

Au cours de leur mouvement, ces objets sont soumis pratiquement à la seule action de leurs poids ; ils sont en chute libre.

1.Chute libre avec vitesse initiale non verticale

Un solide (**S**), de masse **m** et de centre d'inertie **G**, est lancé à l'instant **t = 0** d'un point **O**, origine du repère d'espace (**O**, $\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$) avec une vitesse initiale $\vec{v}_0$ contenue dans le plan vertical ($\vec{i}$, $\vec{k}$) et faisant un angle α avec l'horizontale (***Doc.1***).

Etudions le mouvement du centre d'inertie **G** de ce projectile dans le champ de pesanteur supposé uniforme, par rapport au référentiel terrestre.



Doc.1

$\vec{a} = \vec{g}$ (d'après la 2ème loi Newton)

1.1 . Equations horaires du mouvement

Les conditions initiales (à **t = 0**) :

$$\vec{a}\begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = 0 \\ a_z = -\|\vec{g}\| \end{cases} \qquad \vec{v}_0\begin{cases} v_{0x} = \|\vec{v}_0\| \cos\alpha \\ v_{0y} = 0 \\ v_{0z} = \|\vec{v}_0\| \sin\alpha \end{cases} \qquad \overrightarrow{OG}_0\begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = 0 \\ z_0 = 0 \end{cases}$$

Coordonnées du vecteur vitesse

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}\begin{cases} a_x = \dfrac{dv_x}{dt} \\ a_y = \dfrac{dv_y}{dt} \\ a_z = \dfrac{dv_z}{dt} \end{cases}$$

- $a_x = \dfrac{dv_x}{dt} = 0$; donc v_x est constante.

Etant constante, v_x garde sa valeur initiale à l'instant **t = 0**

$$v_x = \|\vec{v}_0\| \cos \alpha$$

- $a_y = \dfrac{dv_y}{dt} = 0$; donc v_y est constante.

Etant constante, v_y garde sa valeur initiale à l'instant **t = 0**

$$v_y = 0$$

- $a_z = \dfrac{d\vec{v}_z}{dt} = -\|\vec{g}\|$, d'où $v_z = -\|\vec{g}\| t + cte$

La constante correspond à v_z à l'instant **t = 0**.

$$v_z = -\|\vec{g}\| t + \|\vec{v}_0\| \sin \alpha$$

D'où $\vec{v} \begin{cases} v_x = \|\vec{v}_0\| \cos \alpha \\ v_y = 0 \\ v_z = -\|\vec{g}\| t + \|\vec{v}_0\| \sin \alpha \end{cases}$

Coordonnées du vecteur position

$$\vec{v} = \frac{d\overrightarrow{OG}}{dt} \begin{cases} v_x = \dfrac{dx}{dt} \\ v_y = \dfrac{dy}{dt} \\ v_z = \dfrac{dz}{dt} \end{cases}$$

- $v_x = \dfrac{dx}{dt} = \|\vec{v}_0\| \cos\alpha$; d'où $x = (\|\vec{v}_0\| \cos\alpha)\, t + cte$

La constante correspond à l'abscisse **x** à l'instant **t = 0** : $x_0 = 0$

$$x = (\|\vec{v}_0\| \cos\alpha)\, t$$

- $v_y = \dfrac{dy}{dt} = 0$; **y** est alors constante, sa valeur

correspond à celle de **y** à l'instant **t = 0** : $y_0 = 0$

$$y = 0$$

- $v_z = \dfrac{dz}{dt} = -\|\vec{g}\|\, t + \|\vec{v}_0\| \sin\alpha$

La fonction **z** dont la dérivée est une fonction affine du temps s'écrit :

$$z = -\frac{1}{2}\|\vec{g}\|\, t^2 + (\|\vec{v}_0\| \sin\alpha)\, t + cte$$

La valeur de la constante correspond à la coordonnée **z** à l'instant **t = 0** : $z_0 = 0$.

D'où: $z = -\dfrac{1}{2}\|\vec{g}\|\, t^2 + (\|\vec{v}_0\| \sin\alpha)\, t$

$$\overrightarrow{OG} \begin{cases} x = (\|\vec{v}_0\| \cos\alpha)\, t \\ y = 0 \\ z = -\dfrac{1}{2}\|\vec{g}\|\, t^2 + (\|\vec{v}_0\| \sin\alpha)\, t \end{cases}$$

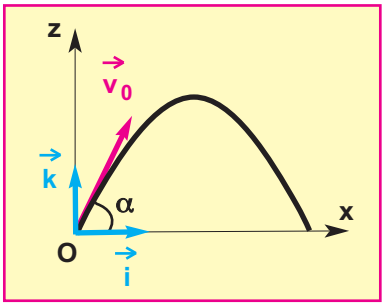
- La coordonnée **y** étant constamment nulle, le mouvement s'effectue dans le plan vertical **oxz**, c'est à dire dans le plan qui contient le vecteur vitesse $\vec{v}_0$.
- Les cordonnées **x** et **z** correspondent aux équations paramétriques de la trajectoire.

1.2 . Equation cartésienne de la trajectoire

L'équation cartésienne de la trajectoire est la relation qui lie les coordonnées **x** et **z** ; on l'obtient en éliminant le paramètre **t** entre ces deux coordonnées.

De l'expression de **x**, on tire celle de **t** et on la remplace dans l'équation de **z**.

$$x = (\|\vec{v}_0\| \cos\alpha)\, t \implies t = \frac{x}{\|\vec{v}_0\| \cos\alpha} \quad \text{d'où}$$



Doc.2

$$z = -\frac{1}{2}\|\vec{g}\|\left(\frac{x}{\|\vec{v}_0\| \cos\alpha}\right)^2 + \|\vec{v}_0\| \sin\alpha \, \frac{x}{\|\vec{v}_0\| \cos\alpha}$$

$$z = -\left(\frac{\|\vec{g}\|}{2\, v_0^2 \cos^2\alpha}\right) x^2 + (\operatorname{tg}\alpha)\, x$$

La trajectoire du centre d'inertie d'un corps en chute libre avec vitesse initale non verticale est parabolique (***Doc.2***).

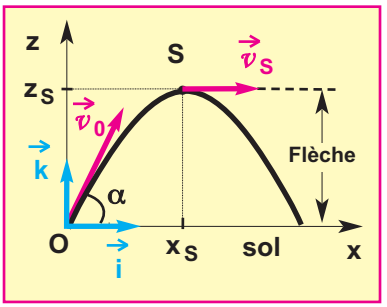
Pour $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$ **rad**, la trajectoire du centre d'inertie **G** du projectile possède un sommet **S** de coordonnées(x_S , z_S).

En balistique (science du mouvement des projectiles d'armes à feu), on utilise les termes ***flèche*** et ***portée*** que nous allons définir dans les paragraphes suivants :

La flèche

La flèche est la hauteur maximale, atteinte par le projectile, par rapport au sol.

Elle correspond à la coordonnée z_S du sommet **S** de la trajectoire du centre d'inertie **G** quand l'origine **O** du repère d'étude est au niveau du sol (***Doc.3***).



Doc.3

Cherchons l'expression de z_S :

En **S**, le vecteur vitesse est horizontal et sa composante selon l'axe **Oz** s'annule à l'instant t_S telle que :

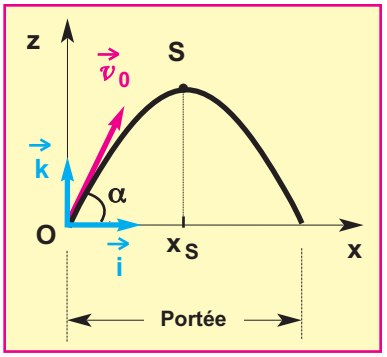
$$v_{zS} = -\|\vec{g}\|\, t_S + \|\vec{v}_0\| \sin\alpha = 0 \implies t_S = \frac{\|\vec{v}_0\| \sin\alpha}{\|\vec{g}\|}$$

$$z_S = -\frac{1}{2}\|\vec{g}\|\, t_S^2 + (\|\vec{v}_0\| \sin\alpha)\, t_S$$

$$z_S = -\frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2\,\|\vec{g}\|} + \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{\|\vec{g}\|}$$

$$z_S = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2\,\|\vec{g}\|}$$

La flèche est maximale pour $\alpha = \frac{\pi}{2}$ **rad**, ce qui correspond à un tir vertical.



Doc.4

La portée

La portée est l'abscisse x_P du point d'impact **P** du corps lancé avec **le sol**. Dans l'exemple correspondant au document **4**, l'ordonnée de **P** est nulle.

$$z = -\left(\frac{\|\vec{g}\|}{2\,v_0^2 \cos^2 \alpha}\right) x^2 + (\operatorname{tg} \alpha)\, x = 0$$

$$= \left(-\frac{\|\vec{g}\|}{2\,v_0^2 \cos^2 \alpha}\, x + (\operatorname{tg} \alpha)\right) x = 0$$

La solution $x = 0$ correspond à l'abscisse du point de lancement, l'autre solution correspond à l'abscisse du point **P**.

$$x_P = \frac{2 v_0^2 \cos^2\alpha . \operatorname{tg}\alpha}{\|\vec{g}\|} = \frac{2 v_0^2 \cos^2\alpha . \sin\alpha}{\|\vec{g}\| \cos\alpha}$$

$$= \frac{2 v_0^2 \cos\alpha . \sin\alpha}{\|\vec{g}\|} \qquad x_P = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{\|\vec{g}\|}$$

Remarquons que :

- pour une même vitesse initale $\vec{v}_0$ donnée, la portée est maximale pour $\sin 2\alpha = 1$, soit $\alpha = 45°$.
- pour une vitesse initiale de valeur constante, on a une même portée pour deux angles de tir α_1 et α_2 solutions de l'équation $x_P = d$: les deux solutions α_1 et α_2 sont telles que : $2\alpha_1 = \pi - 2\alpha_2$ soit $\alpha_1 = \frac{\pi}{2} - \alpha_2$
- en remplaçant x_P dans l'expression de la coordonnée $x(t)$ on trouve

$$t_P = \frac{2\,\|\vec{v}_0\| \sin \alpha}{\|\vec{g}\|}$$

On peut retrouver l'expression de x_S en remarquant que, par raison de symétrie de la trajectoire parabolique par rapport à la verticale passant par le sommet **S**, on peut écrire :

$$x_P = 2\, x_S .$$

L'expression de x_S se déduit de celle de **x** en remplaçant **t** par t_S ; ce qui permet d'écrire :

$$x_S = (\|\vec{v}_0\| \cos\alpha)\, t_S$$

$$= (\|\vec{v}_0\| \cos\alpha)\, \frac{\|\vec{v}_0\| \sin\alpha}{\|\vec{g}\|}$$

$$= \frac{v_0^2 \sin\alpha \cos\alpha}{\|\vec{g}\|}$$

$$x_P = 2\, x_S = 2\, \frac{v_0^2 \sin\alpha \cos\alpha}{\|\vec{g}\|}$$

$$x_P = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{\|\vec{g}\|}$$

2.Chute libre avec vitesse initiale verticale

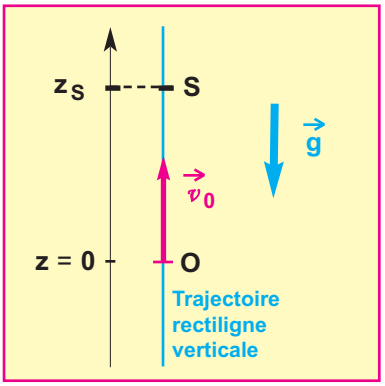
2.1.Chute libre avec vitesse initiale verticale et dirigée vers le haut

Lorsque le projectile est lancé à partir du point **O**, avec une vitesse $\vec{v}_0$, verticale et dirigée vers le haut ($\alpha = \frac{\pi}{2}$ **rad**), la trajectoire est portée par la verticale passant par **O** (***Doc.5***). Le mouvement est rectiligne ; il est décrit par les équations suivantes :

$$\vec{a} = -\|\vec{g}\|\,\vec{k}$$

$$\vec{v} = (-\|\vec{g}\|\,t + \|\vec{v}_0\|)\,\vec{k}$$

$$\overrightarrow{OG} = (-\frac{1}{2}\|\vec{g}\|\,t^2 + \|\vec{v}_0\|t)\,\vec{k}$$



Doc.5 : **Chute libre avec vitesse initiale verticale et dirigée vers le haut.**
Le mouvement comporte deux phases :
- **mouvement ascendant uniformément retardé avec arrêt instantané au point S**
- **mouvement descendant uniformément accéléré.**

Le projectile rebrousse chemin au point **S**, à l'instant t_S lorsque sa vitesse s'annule.

$$v_S = -\|\vec{g}\|t_S + \|\vec{v}_0\| = 0 \Longrightarrow t_S = \frac{\|\vec{v}_0\|}{\|\vec{g}\|}$$

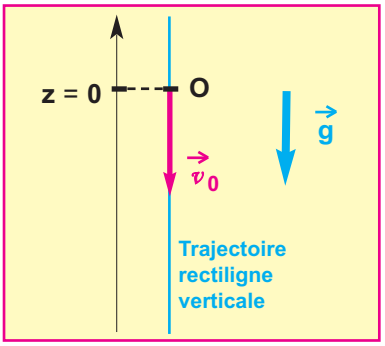
La coordonnée z_S du point **S** est obtenu en remplaçant **t** par t_S dans l'expression de **z**.

$$z_S = -\frac{1}{2}\|\vec{g}\|\,t_S^2 + \|\vec{v}_0\|t_S$$

$$= -\frac{1}{2}\|\vec{g}\|\left(\frac{\|\vec{v}_0\|}{\|\vec{g}\|}\right)^2 + \|\vec{v}_0\|\frac{\|\vec{v}_0\|}{\|\vec{g}\|}$$

$$= -\frac{1}{2}\frac{v_0^2}{\|\vec{g}\|} + \frac{v_0^2}{\|\vec{g}\|}$$

d'où : $$z_S = \frac{1}{2}\frac{v_0^2}{\|\vec{g}\|}$$



Doc.6 : **Chute libre avec vitesse initiale verticale et dirigée vers le bas.**
Le mouvement est rectiligne uniformément accéléré.

2.2.Chute libre avec vitesse initiale verticale et dirigée vers le bas

La trajectoire est rectiligne ; elle est portée par la verticale passant par le point de lancement **O** (***Doc.6***).
Le mouvement est décrit par les équations :

$$\vec{a} = -\|\vec{g}\|\,\vec{k}$$

$$\vec{v} = (-\|\vec{g}\|\,t - \|\vec{v}_0\|)\,\vec{k}$$

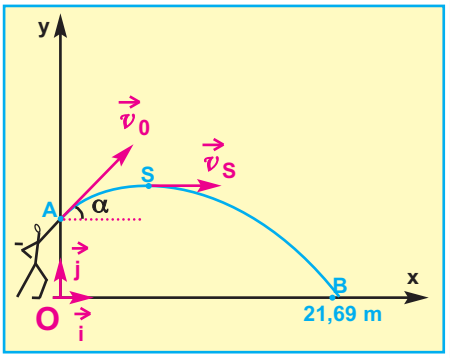
$$\overrightarrow{OG} = (-\frac{1}{2}\|\vec{g}\|\,t^2 - \|\vec{v}_0\|t)\,\vec{k}$$

EXERCICE RÉSOLU

ENONCÉ :

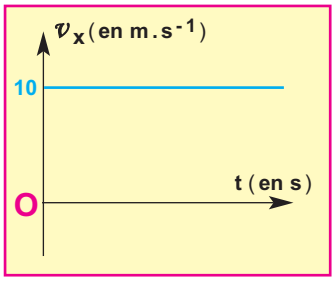
Lors des championnats du monde d'athlétisme qui eurent lieu à Paris, en août **2003**, le vainqueur de l'épreuve du lancer du poids (Andrey Mikhnevich) a réussi un jet à une distance **D = 21,69 m**.

Pour simplifier les raisonnements, on ne travaillera que sur le centre d'inertie **G** du boulet métallique dont le mouvement a lieu dans un plan vertical ; en outre, au cours de son mouvement, le boulet est soumis uniquement à son poids $\vec{P}$ et que dans cette région la valeur du champ de pesanteur est $\|\vec{g}\| = 9{,}8\ m.s^{-2}$ (*Doc-7*).

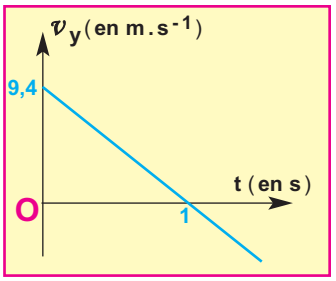


Doc.7

L'entraîneur de l'un de ses concurrents souhaite étudier ce lancer. Pour cela, il dispose pour **G**, en plus de la valeur **21,69 m** de record, des deux documents **8** et **9** tracés à l'aide d'un dispositif approprié et correspondant à $v_x(t)$ et $v_y(t)$.
Le boulet a quitté la main de l'athlète à la position indiquée dans le document **7**.



Doc.8



Doc.9

1- Déterminer les caractéristiques de la vitesse initiale $\vec{v}_0$.

2- Déterminer l'instant t_S où le boulet atteint le sommet **S** de la trajectoire.

3- Etude dynamique :

a- En appliquant le théorème du centre d'inertie au système {**boulet**} dans le repère d'espace $(O, \vec{i}, \vec{j})$ associé à un référentiel terrestre supposé galiléen, trouver les coordonnées du vecteur accélération $\vec{a}$ de **G**.

b- Etablir l'équation de la trajectoire de **G** en fonction des données littérales.

c- En déduire la valeur de y_A.

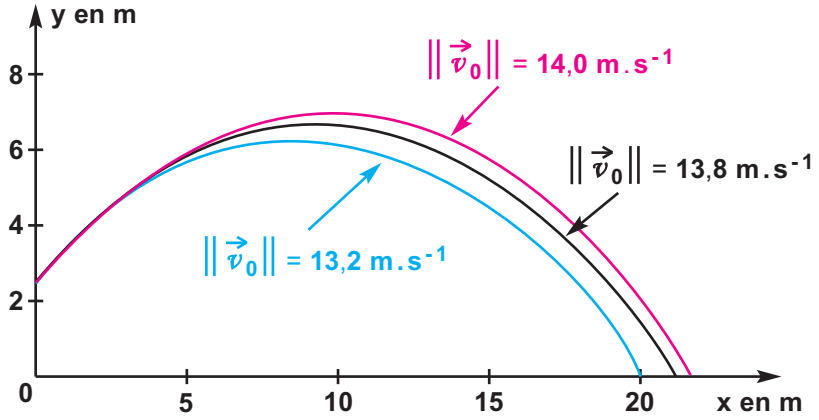
4- L'entraineur veut ensuite savoir sur quel(s) paramètre(s) il peut travailler pour améliorer la performance de l'athlète. Celui-ci est plus petit que le recordman du monde, sa taille est telle que l'altitude initiale de ses lancers n'est au maximum que de **h' = 2,45 m**.

L'entraineur décide donc d'étudier l'influence de la valeur $\|\vec{v}_0\|$ de la vitesse initiale du lancer et de l'angle de tir α.

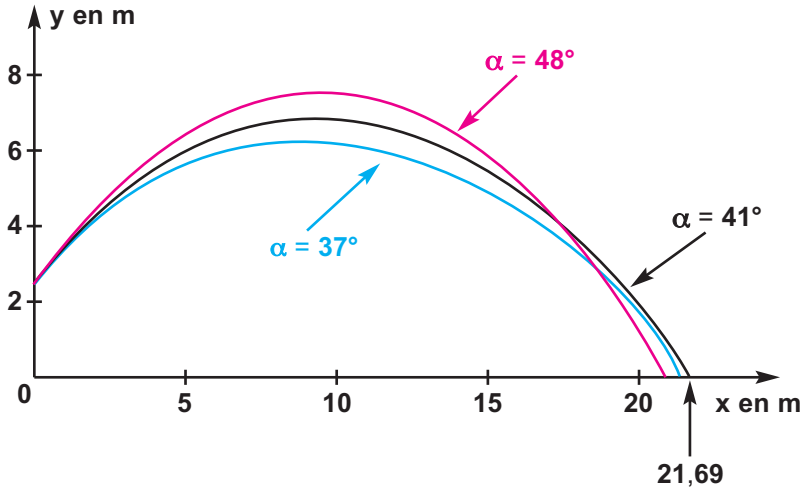
Il réalise des séries de simulations rassemblées dans les réseaux de courbes correspondants aux documents **10** et **11**.

Sur le document **10**, l'angle de tir est maintenu constant soit α = **41°**.

Sur le document **11**, la vitesse est maintenue constante soit $\|\vec{v}_0\| = 13{,}8\ m.s^{-1}$.



Doc.10



Doc.11

a- A partir des documents **10** et **11**, choisir parmi les propositions suivantes celle(s) qui est (sont) correcte(s).

1) Pour un angle α fixé, quand $\|\vec{v}_0\|$ augmente, la distance horizontale **D** du jet :
- augmente
- diminue
- est la même
- augmente, passe par un maximum puis diminue
- diminue, passe par un minimum puis augmente

2) Pour une vitesse initiale de valeur $\|\vec{v}_0\|$ fixée, quand α augmente, la distance horizontale **D** du jet :
- augmente
- diminue
- est la même
- augmente, passe par un maximum puis diminue
- diminue, passe par un minimum puis augmente

b- Confronter les documents **10** et **11** pour en déduire si, parmi les combinaisons proposées, il en existe une satisfaisante pour battre le record du monde. Justifier la réponse.

SOLUTION

1- Caractéristiques de $\vec{v}_0$:

D'après le document **8**, $v_{0x} = 10\ m.s^{-1}$
D'après le document **9**, $v_{0y} = 9{,}4\ m.s^{-1}$

D'après le document **7**, $\boxed{\|\vec{v}_0\| = \sqrt{v_{0x}^2 + v_{0y}^2}}$

et $\boxed{tg\ \alpha = \dfrac{v_{0x}}{v_{0y}}}$

Application numérique :

$\|\vec{v}_0\| = \sqrt{(10)^2 + (9{,}4)^2}$ $\boxed{\|\vec{v}_0\| = 13{,}7\ m.s^{-1}}$

$tg\ \alpha = \dfrac{9{,}4}{10}$ donc $\boxed{\alpha = 43°}$

2- Instant t_S :

En **S**, d'après le document **7** la vitesse est horizontale, donc

$v_{Sy} = 0$; d'après le document **9**, ceci a lieu à l'instant $\boxed{t_S = 1\ s.}$

3 -a- Coordonnées de $\vec{a}$:

système : {**boulet**} .

Référentiel terrestre supposé galiléen.

Forces extérieures : poids $\vec{P} = m\vec{g}$.

Appliquons le théoréme du centre d'inertie au système.

$\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a} \Leftrightarrow m\vec{g} = m\vec{a}$ d'où $\vec{a} = \vec{g}$

donc $\boxed{\vec{a}\begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = -\|\vec{g}\| = -9{,}8\ m.s^{-2} \end{cases}}$

-b- Equation de la trajectoire de G :

Conditions initiales : **t = 0**

$\vec{v}_0 \begin{cases} v_{0x} = \|\vec{v}_0\|\cos\alpha \\ v_{0x} = \|\vec{v}_0\|\sin\alpha \end{cases}$ $\overrightarrow{OG}_0 \begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = y_A \end{cases}$

d'après les conditions initiales

$\vec{a} = \dfrac{d\vec{v}}{dt} \Longrightarrow \vec{v} \begin{cases} v_x = cte_1 \\ v_y = -\|\vec{g}\|t + cte_2 \end{cases}$

$cte_1 = \|\vec{v}_0\|\cos\alpha$ et $cte_2 = \|\vec{v}_0\|\sin\alpha$

$$\vec{v}\begin{cases} v_x = \|\vec{v}_0\|\cos\alpha \\ v_y = -\|\vec{g}\|t + \|\vec{v}_0\|\sin\alpha \end{cases}$$

$$\vec{v} = \frac{d\overrightarrow{OG}}{dt} \Rightarrow \overrightarrow{OG}\begin{cases} x = \|\vec{v}_0\|\cos\alpha\, t + cte_3 \\ y = -\frac{1}{2}\|\vec{g}\|t^2 + (\|\vec{v}_0\|\sin\alpha)t + cte_4 \end{cases}$$

d'après les conditions initiales :

$cte_3 = 0$ et $cte_4 = y_A$

d'où : $$\overrightarrow{OG}\begin{cases} x = (\|\vec{v}_0\|\cos\alpha)\, t \\ y = -\frac{1}{2}\|\vec{g}\|t^2 + (\|\vec{v}_0\|\sin\alpha)t + y_A \end{cases}$$

éliminons **t** entre **x** et **y** :

$$x = (\|\vec{v}_0\|\cos\alpha)\, t \Longrightarrow t = \frac{x}{(\|\vec{v}_0\|\cos\alpha)}$$

remplaçons **t** dans **y** :

$$y = -\frac{1}{2}\|\vec{g}\|\left[\frac{x}{(\|\vec{v}_0\|\cos\alpha)}\right]^2 + \|\vec{v}_0\|\sin\alpha\left[\frac{x}{(\|\vec{v}_0\|\cos\alpha)}\right] + y_A$$

d'où : $$\boxed{y = -\frac{\|\vec{g}\|}{2v_0^2\cos^2\alpha}x^2 + (\operatorname{tg}\alpha)x + y_A}$$

-c- Valeur de y_A :

remplaçons **x** et **y** par leurs valeurs en **B**

$$0 = -\frac{\|\vec{g}\|}{2v_0^2\cos^2\alpha}x_B^2 + (\operatorname{tg}\alpha)x_B + y_A$$

d'où : $$\boxed{y_A = \frac{\|\vec{g}\|}{2v_0^2\cos^2\alpha}x_B^2 - (\operatorname{tg}\alpha)x_B}$$

Application numérique :

$$y_A = \frac{9{,}8}{2(13{,}7)^2\cos^2(43°)}(21{,}69)^2 - \operatorname{tg}(43°).(21{,}69)$$

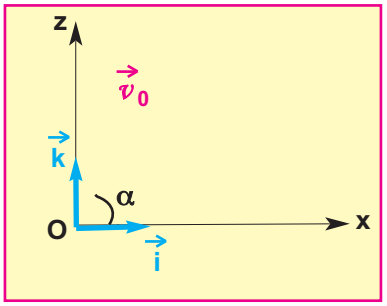
$$\boxed{y_A = 2{,}54\ m}$$

L'ESSENTIEL

En chute libre avec vitesse initiale $\vec{v}_0$, faisant un angle α avec l'horizontale, le centre d'inertie **G** décrit une trajectoire parabolique située dans le plan vertical contenant le vecteur $\vec{v}_0$.

Les conditions initiales (à **t = 0**) :

$$\vec{v}_0 \begin{cases} v_{0x} = \|\vec{v}_0\| \cos\alpha \\ v_{0y} = 0 \\ v_{0z} = \|\vec{v}_0\| \sin\alpha \end{cases} \qquad \overrightarrow{OG}_0 \begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = 0 \\ z_0 = 0 \end{cases}$$



Vecteur accélération :

$$\vec{a} \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = 0 \\ a_z = -\|\vec{g}\| \end{cases}$$

Vecteur vitesse :

$$\vec{v} \begin{cases} v_x = \|\vec{v}_0\| \cos\alpha \\ v_y = 0 \\ v_z = -\|\vec{g}\|\, t + \|\vec{v}_0\| \sin\alpha \end{cases}$$

Vecteur espace :

$$\overrightarrow{OG} \begin{cases} x = (\|\vec{v}_0\| \cos\alpha)\, t \\ y = 0 \\ z = -\dfrac{1}{2}\|\vec{g}\|\, t^2 + (\|\vec{v}_0\| \sin\alpha)\, t \end{cases}$$

Equation cartésienne de la trajectoire :

$$z = -\frac{\|\vec{g}\|}{2\, v_0^2 \cos^2\alpha}\, x^2 + (\mathrm{tg}\alpha)\, x$$

La flèche est la hauteur maximale, atteinte par le projectile, par rapport au sol.
La portée est l'abscisse x_P du point d'impact **P** du corps lancé avec **le sol**.

Travaux pratiques

But

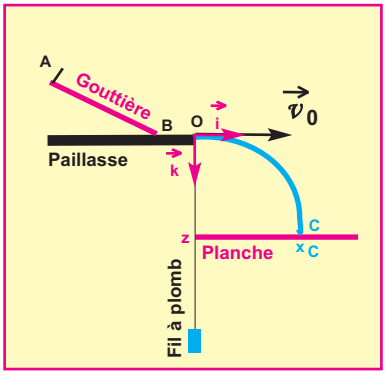
- Tracer point par point la trajectoire d'un projectile
- Déterminer la valeur du vecteur vitesse initiale du projectile

Matériel

- Une gouttière
- Une planche
- Support à crémaillère (à défaut ; utiliser des pieds munis de noix de serrage)
- Papier millimètré, un papier carbone
- Bille en acier
- Fil à plomb
- Mètre

Protocole expérimental

- Placer la gouttière **AB** inclinée de quelques degrés par rapport à la paillasse comme l'indique la figure (***Doc.12***).
- La planche est disposée horizontalement sur un support à crémaillère.
  Le fil à plomb permettra de disposer le bord de la planche et celui de la paillasse dans le même plan vertical.
- Coller sur la planche un papier blanc que l'on recouvre avec du papier carbone.
- Libérée sans vitesse initiale du point **A**, la bille effectue le chemin **ABO**. Arrivée en **O**, origine du repère (O, $\vec{i}$, $\vec{k}$), la bille aborde un mouvement de chute libre avec une vitesse initiale $\vec{v}_0$ horizontale.
- On fait varier l'ordonnée **z** du plan de la planche en agissant sur le support à crémaillère et on mesure à chaque fois l'abscisse x_C du point d'impact **C** grâce à la trace laissée par la bille sur le papier blanc.
- Remplir le tableau de mesures suivant :



Doc.12

z (m)	0,1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0,9	0.8
x (m)								
x^2 (m^2)								

Exploitation des résultats de mesures

1- Tracer la trajectoire du centre d'inertie de la bille en reportant **z** = f (**x**)

2- Tracer la courbe **z** = f(x^2)

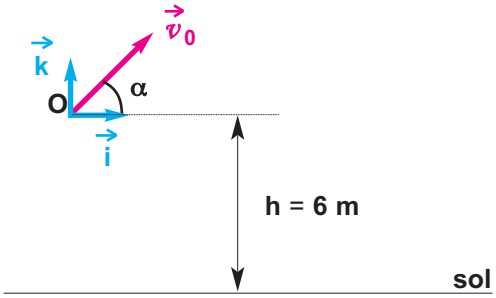
3- Etablir l'équation théorique **z**= f(x^2) et en déduire la valeur de $\|\vec{v}_0\|$.

EXERCICES

Je vérifie mes connaissances

Choisir la (ou les) proposition(s) correcte(s)

1- Une bille est lancée à partir d'un point **O** situé à **6 m** au dessus du sol, avec une vitesse $\vec{v}_0$ pointée vers le haut et faisant un angle α = **30°** avec l'horizontale.

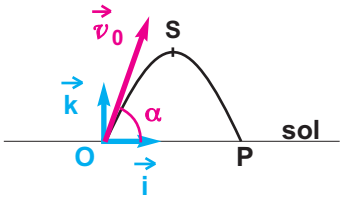


L'angle que fait l'horizontale avec le vecteur vitesse v de la bille au cours de son mouvement de chute libre est :

a - toujours inférieur à **30°**.
b - toujours supérieur à **30°**.
c - prend une valeur supérieure à **30°** en certains points de la trajectoire.

2- Un projectile est lancé en **O** depuis le sol horizontal avec une vitesse $\vec{v}_0$, faisant un angle α = **45°** avec l'horizontale .
Il retombe en **P**. On appelle **S** le sommet de la trajectoire.
Pour des vitesses de valeurs identiques, lorsque l'angle α augmente :

a - la durée du mouvement du projectile augmente.
b - la flèche z_S augmente.
c - la portée x_S augmente.

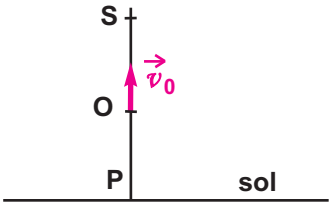


3- Au sommet de la trajectoire d'un mouvement de chute libre,la vitesse est :

a - nulle.
b - verticale.
c - horizontale.
d - de valeur minimale.

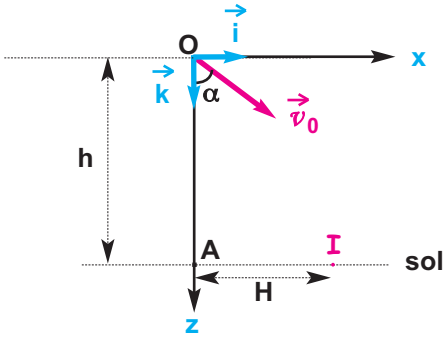
4 - une bille est lancée verticalement vers le haut à partir d'un point **O** situé au dessus du sol. La valeur de sa vitesse s'annule en un point **S** où elle rebrousse chemin et retombe en **P**. On appelle $\vec{v}$ le vecteur vitesse instantanée de la bille.
Le vecteur accélération de la bille :

a - est colinéaire à $\vec{v}$ et de sens opposé à $\vec{v}$ lors du mouvement de **O** vers **S.**
b - est colinéaire à $\vec{v}$ et de même sens que $\vec{v}$ lors du mouvement de **S** vers **P**.
c - est toujours perpendiculaire à $\vec{v}$.



J'applique mes connaissances et je raisonne

Ex-1- A **t = 0**, un corps ponctuel, est lancée d'un point **O** origine du repère d'espace **(O ; $\vec{i}$, $\vec{k}$)**, situé à la distance **h** du sol, avec une vitesse $\vec{v}_0$, faisant un angle α avec la verticale et orientée vers le bas .
A t_I **= 0**, le corps touche le sol en un point **I** situé à une distance **H** de **A** (**Doc-13**).
La résistance de l'air est négligeable.
Le référentiel d'étude est terrestre supposé galiléen.



Doc.13

Données :
Intensité du champ de pesanteur :
$\|\vec{g}\| = 9{,}8\ m.s^{-2}$ $\|\vec{v}_0\| = 10\ m.s^{-1}$

$\alpha = 8°$ et **h = 1,40 m**.

1 - Déterminer les équations horaires du mouvement ; en déduire l'équation de la trajectoire.

2 - Déterminer :
- la valeur de **H**;
- la valeur de t_I ;
- la valeur de la vitesse au point **I**.

Ex-2- Deux corps (**A**) et (**B**) supposés ponctuels, sont lâchés du même point **O** d'un balcon, origine d'un repère d'espace (**O** ; $\vec{i}$, $\vec{k}$), et situé à une altitude **h** par rapport au sol. (**A**) est lâché sans vitesse initiale, et, au même instant, (**B**) est lancé avec une vitesse initiale horizontale $\vec{v}_0$ parallèle à $\vec{i}$.
" *On pense que (**B**) touchera le sol plus tard que (**A**)* ".
On considérera que le référentiel terrestre est galiléen et que tous les frottements sont supposés nuls (**doc-14**).

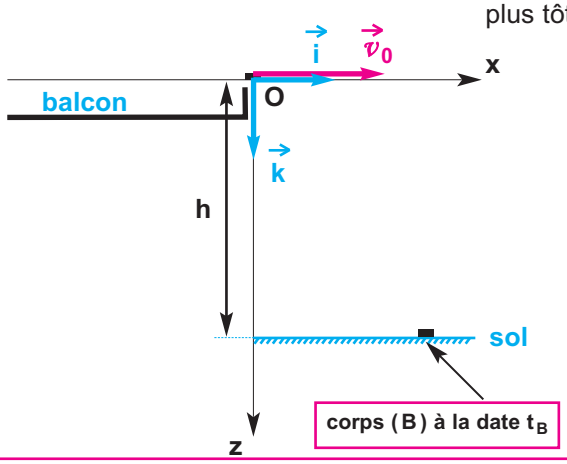
1 - On considère que le mouvement a lieu dans le plan vertical **xOz**.

Etablir sous forme littérale les équations horaires **x(t)** et **z(t)** du mouvement du corps (**B**).

2 - En déduire l'expression littérale de la durée de chute t_B ; Calculer sa valeur.
Données :
$\|\vec{g}\| = 10\ m.s^{-2}$

h = 5 m.

3 - À l'aide de ce résultat, montrer que l'on a tort, et préciser si (**B**) arrive au sol plus tôt ou en même temps que (**A**).



Doc.14

Ex-3- Akrem décide d'utiliser ses connaissances en mécanique pour étudier le mouvement de la flèche tirée par son pistolet.
Il considère la flèche comme un objet ponctuel.

I - Étude du mouvement de la flèche

A **t = 0**, la flèche est tirée du point M_1 situé à la hauteur h_1 du sol, avec une vitesse initiale $\vec{v}_0$ faisant l'angle α avec l'horizontale (**Doc-15-a**).

1 - Dans le repère d'espace $(O ; \vec{i}, \vec{k})$, **O** étant le point du sol se trouvant à la verticale de M_1, établir sous forme littérale les équations horaires **x(t)** et **z(t)** du mouvement de la flèche après son lancement.
En déduire l'équation de la trajectoire et sa nature. L'instant initial est celui où la flèche se trouve au point M_1.

2 - La cible est un disque de centre **C**.
Le point **C**, sera-il atteint ? justifier la réponse.

Données :

$\|\vec{g}\| = 9{,}8\ m.s^{-2}$

$h_1 = 10\ m$

$x_C = 10\ m$; $z_C = 1{,}2\ m$

$\|\vec{v}_0\| = 10\ m.s^{-1}$

$\alpha = 45^0$.

II - Détermination de la valeur de la vitesse initiale $\vec{v}_0$

A cet effet Akrem effectue deux essais.

1 - Tir vertical

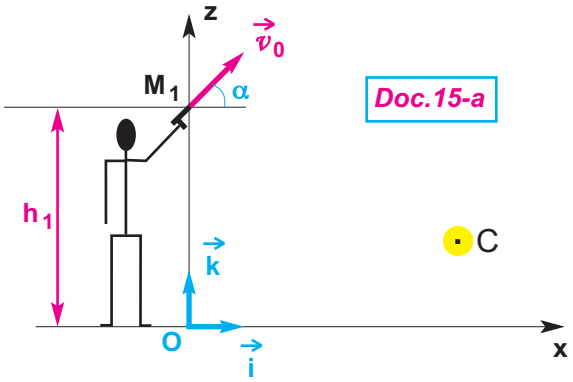
Le canon du pistolet est vertical ; son extrémité est située au point M_2 tel que $h_2 = 1{,}7\ m$ (**doc-15-b**).
Il tire vers le haut et constate que la flèche touche le sol **2,2 s** après son départ de M_2.

Calculer la valeur de $\|\vec{v}_0\|$ en utilisant les équations établies dans la première partie.

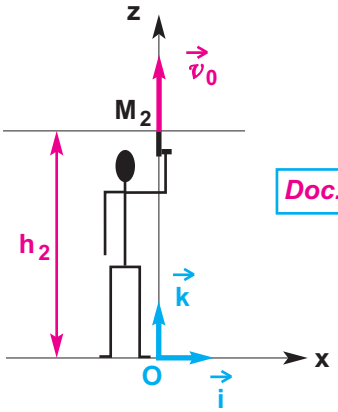
2 - Tir horizontal

Pour tirer horizontalement, Akrem abaisse le pistolet. Le canon de celui-ci est maintenant horizontal ; son extrémité est située au point M_3 tel que $h_3 = 1{,}2\ m$ (**doc-15-c**).
Il tire et constate que la flèche touche le sol en un point **B** qui se trouve sur la même horizontale que **O**, à une distance égale à **4,9 m**.

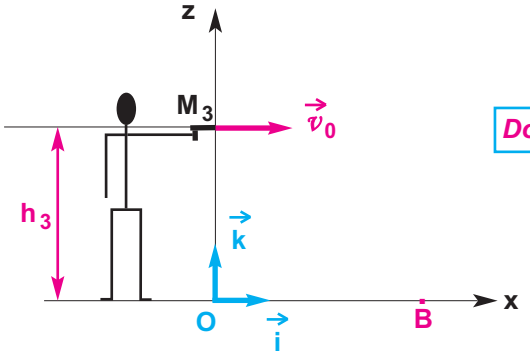
Calculer la valeur de $\|\vec{v}_0\|$ en utilisant les équations établies dans la première partie.



Doc.15-a



Doc.15-b



Doc.15-c

Ex-4- Dans cet exercice, on ne tient pas compte de l'action de l'air sur la balle de tennis de masse **m**. Vitesse et position de la balle désignent la vitesse et la position de son centre d'inertie.

Un joueur de tennis effectue un service (**doc-16**). Il lance d'abord la balle avec une vitesse $\vec{v}_1$ verticale et dirigée vers le haut, depuis le point **P** tel que **OP** = **h**. La balle atteint, sans vitesse, le point **P'** situé sur la même verticale et telle que **OP'** = **h'**.

Lorsque la balle est en **P'**, le joueur la frappe avec sa raquette ; elle quitte alors ce point avec une vitesse $\vec{v}_0$ horizontale dans le plan de la figure.

La balle passe par le point **M**, au-dessus du filet vertical (**f**) distant du joueur de **d**.

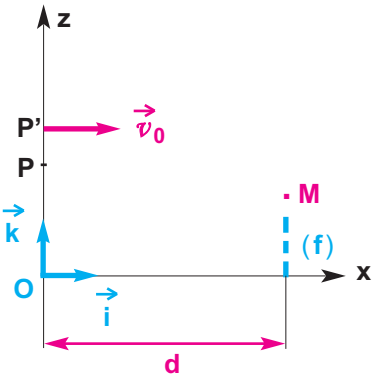
La hauteur du filet est ℓ.

a - Déterminer la valeur de $\|\vec{v}_1\|$.

b - Etablir, dans le repère d'espace (**O**; $\vec{i}$, $\vec{k}$), l'équation de la trajectoire de la balle après l'impulsion communiquée par la raquette.

- Déterminer la valeur de $\|\vec{v}_0\|$.
- Déterminer la valeur de l'angle β que fait la vitesse $\vec{v}_M$ avec l'horizontale.
- Quelle est la valeur minimale de $\|\vec{v}_0\|$ pour que la balle touche le filet ?

Données :
h = 1,2 m
h' = 2,2 m
d = 12,5 m
ℓ **= 0,9 m**
z_M **= 1,5 m.**



Doc.16

Ex-5- Un gravillon assimilé à son centre d'inertie **G** est projeté vers l'arrière par le pneu d'un camion. Il quitte le pneu à l'instant **t = 0**, avec une vitesse $\vec{v}_0$ de valeur $\|\vec{v}_0\| = 12\ m.s^{-1}$ et faisant un angle $\alpha = 37°$ avec l'horizontale. La vitesse est définie dans le référentiel terrestre lié à la route et supposé galiléen (**doc-17**)

1 - Établir les équations horaires **x(t)** et **z(t)** du mouvement du gravillon dans le repère $(O\ ;\ \vec{i},\ \vec{k})$.
À la date **t = 0**, le gravillon se trouve au point **O**.

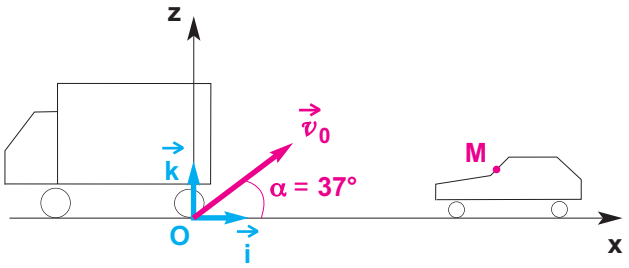
2 - Donner l'allure de la trajectoire.

3 - Une voiture suit le camion à la vitesse constante de **90 km.h^{-1}**. Le gravillon heurte le pare-brise de la voiture au point **M** à l'instant t_M. À la date **t = 0**, le point **M** de la voiture est à une distance **d = 44 m** du point **O**.

a - Établir l'équation horaire $x_M(t)$ du mouvement du point **M** dans le repère $(O\ ;\ \vec{i},\ \vec{k})$

b - Calculer la valeur de t_M. En déduire la hauteur **h** du point d'impact **M** par rapport au sol.

$\|\vec{g}\| = 9{,}8\ m.s^{-2}$



Doc.17

Ex-6-Etude d'un texte scientifique : Parabole de sûreté

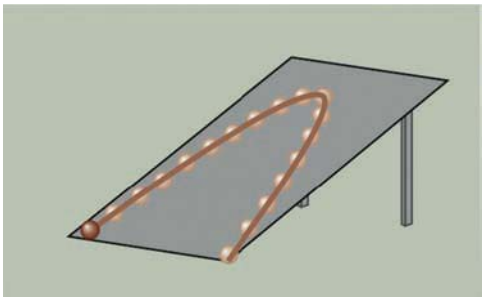
Lorsqu'un obus sort de la gueule d'un canon, sa vitesse est de quelques centaines de mètres par seconde. La trajectoire de l'obus n'est pas rigoureusement parabolique car l'air tend à freiner son mouvement. L'angle d'inclinaison du canon par rapport au sol determine la flèche et la portée du tir.
Bien sûr, avec un type de canon donné, toutes les cibles potentielles ne peuvent pas étre atteintes. On peut montrer, en négligeant l'action de l'air, que l'ensemble des cibles accessibles sont situés dans une région de l'espace délimitée dans le plan vertical par une parabole appelée parabole de sûreté.

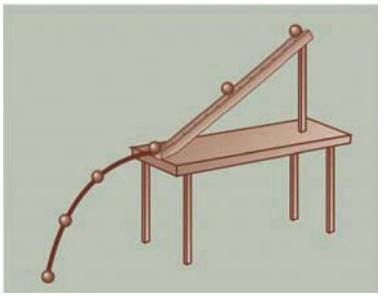
1- Montrer que le mouvement de l'obus se situe dans un plan.
2- Donner les définitions de la flèche et de la portée,
3- Que vaut la valeur de la flèche ? On l'exprimera en fonction de la vitesse initiale Vo et de l'angle d'inclinaison α du canon par rapport au sol.
4- Déterminer l'équation de la parabole de sûreté en fonction de Vo et de g, accélération de la pesanteur, On prendra tg α comme variable.

POUR EN SAVOIR PLUS

GALILÉE ET LE MOUVEMENT PARABOLIQUE DE LA CHUTE DES GRAVES

Galilée réalise quelques expériences sur la trajectoire des projectiles en utilisant une bille trempée dans l'encre. Voici sa description de cette expérience.
"Je prends une bille de bronze parfaitement ronde et pas plus grande qu'une noix, et je la lance sur un miroir de métal, tenu non pas perpendiculairement, mais un peu incliné, de telle façon que la bille puisse rouler sur sa surface et je la presse légèrement dans son mouvement : elle laisse alors la trace d'une ligne parabolique très précise et très nette, plus large ou plus étroite selon que l'angle de projection sera plus ou moins élevé. Ce qui d'ailleurs constitue une expérience évidente et sensible sur la forme parabolique du mouvement des projectiles."





Grâce à ces expériences, il est en mesure d'affirmer qu'un projectile est en chute libre durant toute la durée du mouvement. La trajectoire du projectile est déviée de la ligne droite. Cependant, les distances entre la ligne droite et la trajectoire sont dans le rapport des carrés des temps.

Galilée a aussi su décomposer la chute parabolique d'un corps en une composante verticale, qui est un mouvement uniformément accéléré sous l'action de l'attraction terrestre, et une composante horizontale, qui est un mouvement d'inertie (sans force), *"Un projectile qu'entraîne un mouvement composé d'un mouvement horizontal uniforme et d'un mouvement naturellement accéléré vers le bas, décrit au cours de son déplacement une trajectoire semi-parabolique.*
Si un mobile se meut d'un mouvement uniforme sur un plan horizontal, et si le support que fournit le plan disparaît, le mobile acquerra en outre, du fait de sa gravité, un mouvement naturel vers le bas….. Les espaces parcourus par un corps grave animé d'un mouvement accéléré, sont comme les carrés des temps…. Les points par lesquels passe un mobile animé d'un mouvement semblablement composé pendant ces mêmes intervalles de temps se trouvent sur une même ligne parabolique."

Galilée représente sur une verticale les hauteurs de départ de la bille. Il indique également la distance des points d'impact observés et les distances attendues ainsi que les différences entre ces valeurs.C'est la première fois dans l'histoire qu'un tel rapport d'expérience est fait.

Discours et démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles (1638), p. 205-209

http://www.walter-fendt.de/ph11f/projectile_f.htm
http://www.ac-orleans-tours.fr/physique/phyel/term/gjs/index.htm

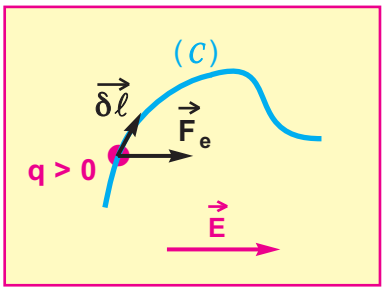
MOUVEMENT DANS UN CHAMP ÉLECTRIQUE UNIFORME

1. Travail d'une force électrique

1.1 . Travail élémentaire d'une force électrique dans un champ électrique uniforme

Considérons une charge ponctuelle **q** positive se trouvant dans une région où règne un champ électrique uniforme $\vec{E}$. La force électrique $\vec{F}_e = q\,\vec{E}$ est constante.
Considérons la charge **q** en mouvement suivant une trajectoire $(\mathcal{C})$ quelconque dans le champ électrique uniforme $\vec{E}$.

Décomposons la trajectoire $(\mathcal{C})$ en une succession de petits tronçons qui peuvent être assimilés à des segments rectilignes qu'on appellera déplacements élémentaires ;un déplacement élémentaire est noté $\overrightarrow{\delta\ell}$ (***Doc.1***).



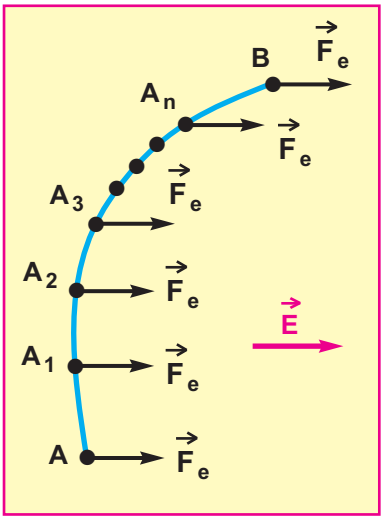
Doc.1

Le travail de la force électrique $\vec{F}_e$ le long de $\overrightarrow{\delta\ell}$, appelé travail élémentaire et noté $\delta\mathcal{W}(\vec{F}_e)$, est défini par :

$$\boxed{\delta\mathcal{W}(\vec{F}_e) = \vec{F}_e \cdot \overrightarrow{\delta\ell}}$$

1.2. Travail d'une force électrique dans un champ électrique uniforme

Le travail de la force électrique $\vec{F}_e$ le long du trajet $(\mathcal{C})$ est égal à la somme des travaux élémentaires de cette force le long des déplacements élémentaires supposés rectilignes $\overrightarrow{AA_1}$, $\overrightarrow{A_1A_2}$, $\overrightarrow{A_2A_3}$, ... $\overrightarrow{A_nB}$ (***Doc.2***).



Doc.2

Calculons la somme des travaux élémentaires de la force électrique $\vec{F}_e$:

$$\mathcal{W}_{A\to B}(\vec{F}_e) = \sum_{A}^{B} \delta\mathcal{W}(\vec{F}_e) = \sum_{A}^{B} \vec{F}_e \cdot \overrightarrow{\delta\ell}$$

$$= \vec{F}_e \cdot \overrightarrow{AA_1} + \vec{F}_e \cdot \overrightarrow{A_1A_2} + \vec{F}_e \cdot \overrightarrow{A_2A_3} + \ldots + \vec{F}_e \cdot \overrightarrow{A_nB}$$

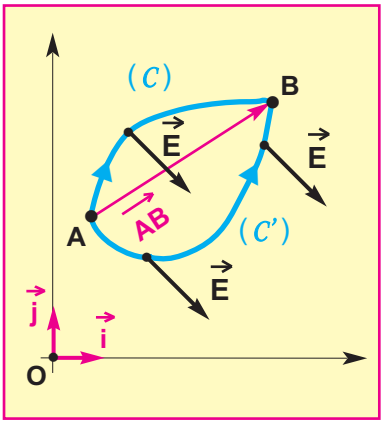
$$= \vec{F}_e \cdot (\overrightarrow{AA_1} + \overrightarrow{A_1A_2} + \overrightarrow{A_2A_3} + \ldots + \overrightarrow{A_nB})$$

c'est-à-dire : $\mathcal{W}_{A\to B}(\vec{F}_e) = \vec{F}_e \cdot \overrightarrow{AB} = q\,\vec{E} \cdot \overrightarrow{AB}$

Conclusion

Le travail de la force électrique s'exerçant sur une charge ponctuelle **q** qui se déplace dans un champ électrique uniforme $\vec{E}$ est indépendant du chemin suivi ; il ne dépend que des positions du point de départ **A** et du point d'arrivée **B** dans le champ électrique (***Doc.3***) :

$$\mathcal{W}_{A \to B}(\vec{F}_e) = \vec{F}_e \cdot \overrightarrow{AB} = q\,\vec{E} \cdot \overrightarrow{AB}$$



Doc.3 :

$$\mathcal{W}_{(C)}(\vec{F}_e) = \mathcal{W}_{(C')}(\vec{F}_e) = \vec{F}_e \cdot \overrightarrow{AB}$$

1.3 . Notion de différence de potentiel

Considérons un repère (**O** , $\vec{i}$, $\vec{j}$) dans la région de l'espace où règne le champ électrique uniforme $\vec{E}$ (***Doc.3***), dans ce repère le vecteur $\overrightarrow{AB}$ s'écrit :

$$\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{AO} + \overrightarrow{OB} = \overrightarrow{OB} - \overrightarrow{OA}$$

Par conséquent :

$$\vec{E} \cdot \overrightarrow{AB} = \vec{E} \cdot (\overrightarrow{OB} - \overrightarrow{OA})$$
$$= \vec{E} \cdot \overrightarrow{OB} - \vec{E} \cdot \overrightarrow{OA}$$
$$= (-\vec{E} \cdot \overrightarrow{OA}) - (-\vec{E} \cdot \overrightarrow{OB})$$

Définition :

Le produit scalaire $(-\vec{E} \cdot \overrightarrow{OA})$ est appelé potentiel électrique du point **A** se trouvant dans l'espace où règne le champ électrique uniforme, on le note V_A ;

le produit scalaire $(-\vec{E} \cdot \overrightarrow{OB})$ est appelé potentiel électrique du point **B** se trouvant dans l'espace où règne le champ électrique uniforme, on le note V_B.

La différence de potentiel électrique :

La différence $(V_A - V_B)$ est appelée ***différence de potentiel électrique*** entre les points **A** et **B**.

Ainsi, le produit scalaire $\vec{E} \cdot \overrightarrow{AB}$ est égal à la différence de potentiel électrique $(V_A - V_B)$ entre les points **A** et **B** :

$$\vec{E} \cdot \overrightarrow{AB} = (V_A - V_B)$$

avec $V_A = -\vec{E} \cdot \overrightarrow{OA}$

et $V_B = -\vec{E} \cdot \overrightarrow{OB}$.

Unité :

L'unité du potentiel électrique est le **volt** (**V**).

Expression du travail de la force électrique :

L'expression du travail d'une force électrique s'exerçant sur une charge électrique ponctuelle **q** se déplaçant dans un champ électrique uniforme $\vec{E}$ d'un point **A** porté à un potentiel électrique V_A vers un point **B** porté à un potentiel électrique V_B peut s'écrire :

$$\mathcal{W}_{A \to B}(\vec{F}_e) = q\,\vec{E} \cdot \overrightarrow{AB} = q\,(V_A - V_B)$$

$$\boxed{\mathcal{W}_{A \to B}(\vec{F}_e) = q\,(V_A - V_B)}$$

Remarques :

- La différence de potentiel électrique $(V_A - V_B)$ est égale à la différence entre le potentiel électrique du point de départ **A** et le potentiel électrique du point d'arrivée **B**.
- La différence de potentiel électrique peut être abrégée par **d.d.p.** électrique.
- La tension électrique U_{AB} entre deux points **A** et **B** est la différence de potentiel électrique $(V_A - V_B)$ entre ces deux points : $U_{AB} = (V_A - V_B)$.

L'électron-Volt :

Lorsqu'on exprime en **joule** le travail de la force électrique s'exerçant sur une charge ponctuelle, le résultat présente une valeur numérique trop faible ; on utilise alors une autre unité plus appropriée : l'**électron-volt** (**eV**)

L'électron-volt est égal au travail d'une force électrique appliquée à une particule qui porte la charge élémentaire $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ **C** et qui se déplace entre deux points entre lesquels existe une **d.d.p.** de **1 Volt** :

$$1\ eV = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ J$$

1.4 . Relation entre la valeur du champ électrique uniforme et la différence de potentiel électrique

Un champ électrique uniforme est établi dans la région de l'espace entre deux plaques (P_1) et (P_2) parallèles et portées respectivement aux potentiels électriques $V_{(P_1)}$ et $V_{(P_2)}$ tels que $V_{(P_2)}$ soit inférieur à $V_{(P_1)}$.

Considérons deux points **A** et **B** de la région où règne le champ électrique (***Doc.4***), et établissons l'expression du produit scalaire $\vec{E} \cdot \overrightarrow{AB}$:

Dans le repère orthonormé $(O, \vec{i}, \vec{j})$ on a :

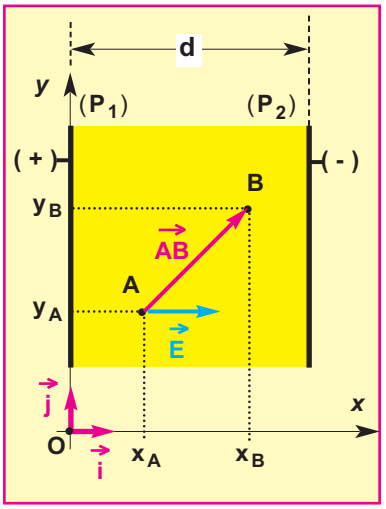
$\overrightarrow{AB} = (x_B - x_A)\,\vec{i} + (y_B - y_A)\,\vec{j}$ et $\vec{E} = E\,\vec{i}$,

D'où, $\vec{E} \cdot \overrightarrow{AB} = E\,(x_B - x_A)$.

Or $\vec{E} \cdot \overrightarrow{AB} = V_A - V_B$, par conséquent :

$E\,(x_B - x_A) = V_A - V_B$ d'où l'expression

$$E = \frac{(V_A - V_B)}{x_B - x_A} = \frac{U_{AB}}{x_B - x_A}$$



Doc.4

Lorsque les points **A** et **B** sont respectivement sur les plaques (P_1) et (P_2), la différence de potentiel entre ces deux points devient $(V_{(P_1)} - V_{(P_2)}) = U_{P_1P_2}$.
En désignant par **d** l'écartement des plaques (P_1) et (P_2), on a alors $d = |x_B - x_A|$.
Le champ électrique étant uniforme, sa valeur $\|\vec{E}\|$ est constante et vérifie :

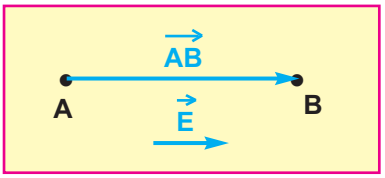
$$\boxed{\|\vec{E}\| = \frac{|U_{P_1P_2}|}{d} = \frac{|U_{AB}|}{|x_B - x_A|}}$$

Cette relation permet de calculer la différence de potentiel électrique entre deux points quelconques situés entre les plaques qui délimitent le champ électrique uniforme.

1.5 . Sens du champ électrique

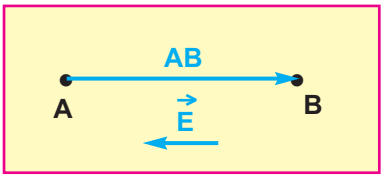
Supposons pour simplifier que $\vec{E}$ et $\overrightarrow{AB}$ ont la même direction.

● Si $V_A > V_B$, $(V_A - V_B) > 0$, ce qui équivaut à dire que $\vec{E} \cdot \overrightarrow{AB} > 0$, ce qui implique que $\vec{E}$ a le même sens que $\overrightarrow{AB}$ (***Doc.5-a***) ; par conséquent, $\vec{E}$ est dirigé du point **A** porté au potentiel électrique V_A le plus élevé vers le point **B** porté au potentiel électrique V_B le moins élevé.



Doc.5-a

● Si $V_B > V_A$ alors $(V_A - V_B) < 0$ ce qui équivaut à dire que $\vec{E} \cdot \overrightarrow{AB} < 0$, ce qui implique que $\vec{E}$ a le sens contraire de $\overrightarrow{AB}$ (***Doc.5-b***), par conséquent, $\vec{E}$ est dirigé du point **B** porté au potentiel électrique V_B le plus élevé vers le point **A** porté au potentiel électrique V_A le moins élevé.



Doc.5-b

Le champ électrique est dirigé
dans le sens des potentiels décroissants

1.6 . Généralisation : Champ électrique quelconque

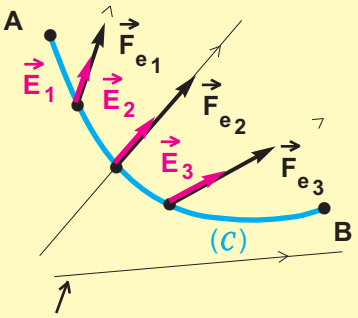
On montre que dans un champ électrique quelconque (***Doc.6***), le travail de la force électrique $\vec{F}_e$ s'exerçant sur une charge ponctuelle **q** est indépendant du chemin suivi, il ne dépend que des potentiels électriques des points de départ et d'arrivée.

$$\mathcal{W}_{A \to B}(\vec{F}_e) = q\,(V_A - V_B)$$

CHAMP ÉLECTRIQUE QUELCONQUE

Un champ électrique est quelconque lorsqu'il n'est pas uniforme, ses caractéristiques (direction, sens, valeur) changent d'un point à l'autre dans la région de l'espace où il règne.

CAS D'UNE CHARGE POSITIVE



Lignes du champ électrique

Doc.6

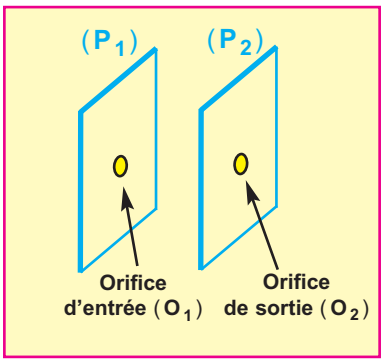
2 . Accélération d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme

2.1 . Dispositif expérimental

Deux plaques (P_1) et (P_2) distantes de **d**, entre lesquelles on applique une tension continue positive $U_{P_1P_2} = (V_{(P_1)} - V_{(P_2)})$, sont placées dans une ampoule où règne un vide poussé (***Doc.7***). Les plaques (P_1) et (P_2) comportent respectivement les orifices (O_1) et (O_2) qui sont disposés tels que la droite (O_1O_2) soit parallèle au vecteur champ électrique uniforme $\vec{E}$ (***Doc.8***).

Un dispositif approprié permet d'injecter des particules assimilables à des corps ponctuels ayant chacune une charge **q positive** et une vitesse pratiquement nulle au voisinage de l'orifice (O_1).

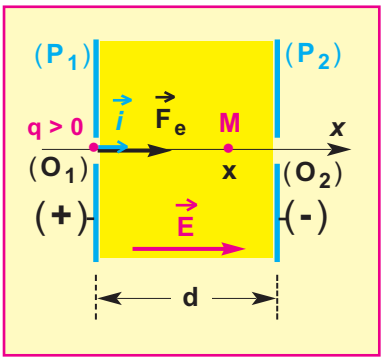
Dans l'espace délimité par les deux plaques règne un champ électrique uniforme ; de ce fait, chaque particule est soumise à une force électrique constante $\vec{F}_e = q\,\vec{E}$.



Doc.7

2.2 . Etude dynamique

On supposera que la valeur du poids $\vec{P}$ de la particule est négligeable devant celle de la force électrique $\vec{F}_e$. Dans un référentiel terrestre supposé galiléen, on applique la deuxième loi de Newton au système constitué par la particule conformément à la description du document **8**.



Doc.8

$\vec{F}_e = m\,\vec{a}$, la masse **m** et $\vec{F}_e$ sont constants,

donc $\vec{a}$ est constant et de même sens que $\vec{F}_e$,

comme la vitesse initiale $\vec{v}_0$ est nulle alors

le mouvement de la particule est rectiligne uniformément accéléré.

Etablissons l'expression de la valeur algébrique de l'accélération $\vec{a}$ dans le repère (**O** , $\vec{i}$) :

On a $\vec{F}_e = m\,\vec{a}$ qui est équivalent à $q\,\vec{E} = m\,\vec{a}$

Or, $\vec{a} = a\,\vec{i}$ et $\vec{E} = E\,\vec{i}$, donc :

$q\,E\,\vec{i} = m\,a\,\vec{i}$, c'est-à-dire $q\,E = m\,a$.

On sait que $E = \dfrac{U_{P_1P_2}}{x_2 - x_1}$, x_1 et x_2 étant respectivement les abscisses de (O_1) et (O_2) ;

d'où : $\dfrac{q\,U_{P_1P_2}}{x_2 - x_1} = m\,a$

par conséquent :

$$a = \frac{q\ U_{P_1P_2}}{m\,(x_2 - x_1)}$$

$x_2 - x_1 > 0$, $q > 0$ et $U_{P_1P_2} > 0$, donc la valeur algébrique de l'accélération est positive.

Détermination de la vitesse de sortie de la particule en (O_2)

Première méthode :

Puisque le mouvement est rectiligne uniformément accéléré, on peut appliquer la relation entre les carrées des vitesses v_1 et v_2 aux points O_1 et O_2 et leurs abscisses x_1 et x_2.

$v_2^2 - v_1^2 = 2\,a\,(x_2 - x_1)$, or $v_1 = 0$ et $x_2 - x_1 = d$, alors :

$$v_2^2 = 2\,\frac{q\,U_{P_1P_2}}{m\,d}\,d = \frac{2\,q}{m}\,U_{P_1P_2}$$

d'où : $$\|\vec{v}_{(O_2)}\| = \sqrt{\frac{2\,q}{m}\,U_{P_1P_2}}$$

$q > 0$ et $U_{P_1P_2} > 0$, on peut alors écrire que :

$q\,U_{P_1P_2} = |q|\,|U_{P_1P_2}|$; par conséquent :

$$\boxed{\|\vec{v}_{(O_2)}\| = \sqrt{|U_{P_1P_2}|}\,\sqrt{\frac{2\,|q|}{m}}}$$

La charge **q** et la masse **m** de la particule sont constantes ; alors, on conclut que :

> À sa sortie d'un champ électrique uniforme, la particule a une vitesse de valeur proportionnelle à la racine carrée de la valeur absolue de la tension accélératrice.

Deuxième méthode :

On va retrouver le résultat précédent en appliquant le théorème de l'énergie cinétique au système constitué par la particule entre l'instant d'entrée, sans vitesse, par l'orifice (O_1) et l'instant de sortie par l'orifice (O_2) animé d'une vitesse $\vec{v}_{(O_2)}$.

$$\Delta \mathcal{E}_{C\,(O_1)\to(O_2)} = \mathcal{E}_{C_2} - \mathcal{E}_{C_1} = \mathcal{W}_{(O_1)\to(O_2)}(\vec{F}_e)$$

$$\frac{1}{2} m v_2^2 - 0 = q\,U_{P_1P_2},$$

d'où : $\frac{1}{2} m v_2^2 = |q|\,|U_{P_1P_2}|$

par conséquent : $\|\vec{v}_{(O_2)}\| = \sqrt{\frac{2|q|}{m}}\sqrt{|U_{P_1P_2}|}$

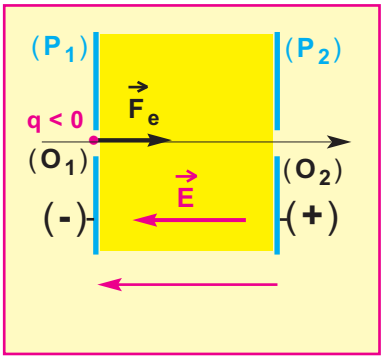
Remarques :

- Considérons le cas où la particule, assimilable à un corps ponctuel, a une charge **q négative** et une vitesse pratiquement nulle au voisinage de l'orifice (O_1) ; pour que cette particule ait un mouvement rectiligne uniformément accéléré il faut appliquer aux bornes des plaques (P_1) et (P_2) une tension $U_{P_1P_2}$ **négative** (*Doc.9*).

On constate de nouveau que la charge **q** et la tension $U_{P_1P_2}$ sont de même signe, ce qui nous permet d'écrire que :

$$q\,U_{P_1P_2} = |q|\,|U_{P_1P_2}|.$$

Donc : $\|\vec{v}_{(O_2)}\| = \sqrt{\frac{2|q|}{m}|U_{P_1P_2}|}$



Doc.9

- Lorsque la charge **q** et la tension $U_{P_1P_2}$ sont de même signe, le travail de la force électrique $\vec{F}_e$ s'appliquant de l'orifice (O_1) vers l'orifice (O_2) est moteur : $\mathcal{W}_{(O_1)\to(O_2)}(\vec{F}_e) > 0$.

Donc, l'énergie cinétique de la particule augmente ; par conséquent, le champ électrique uniforme qui règne entre les plaques (P_1) et (P_2) est un champ électrique accélérateur.

2.3 . Application : le canon à électrons

Le canon à électrons est un dispositif se trouvant dans un tube où règne un vide poussé. Ce dispositif permet d'obtenir un faisceau rectiligne d'électrons ayant tous la même vitesse ; ce ***faisceau d'électrons*** est alors dit ***homocinétique***.

Le document ***10*** correspond au schéma du canon à électrons d'un oscilloscope.

Les électrodes (**C**), (**G**), (**F**) et (**A**) sont respectivement portées aux potentiels électriques $V_{(C)}$, $V_{(G)}$, $V_{(F)}$ et $V_{(A)}$.

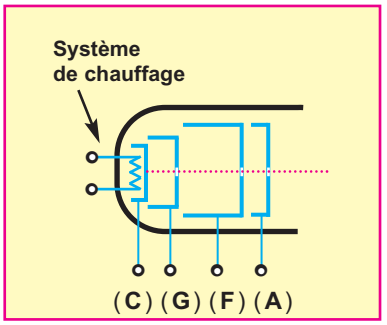
Le filament de chauffage permet d'extraire les électrons de la cathode (**C**) avec une vitesse pratiquement nulle.

$V_{(G)}$ étant supérieur à $V_{(C)}$, la grille (**G**), éloigne les électrons de la cathode et contrôle leur débit pour modifier à volonté la luminosité du spot.

D'autre part, $V_{(F)}$ étant supérieur à $V_{(G)}$, l'électrode (**F**), focalise les électrons et leur donne davantage d'énergie cinétique, on obtient à la sortie de l'électrode (**F**) un faisceau fin.

Enfin, $V_{(A)}$ étant supérieur à $V_{(F)}$, l'électrode (**A**) achève l'accélération des électrons qui sont alors animés d'une vitesse de valeur :

$$\|\vec{v}\| = \sqrt{\frac{2\,e}{m}\,U_{AC}}$$



Doc.10 : CANON À ÉLECTRONS
Dans un oscilloscope, la tension accélératrice U_{AC} est égale à **2000 V**.
Les tensions intermédiaires sont : U_{GC} = **100 V** ; U_{FG} = **1000 V** et U_{AF} = **900 V**.
La vitesse acquise à la sortie du canon à électrons est environ égale à **26600 km.s^{-1}**.

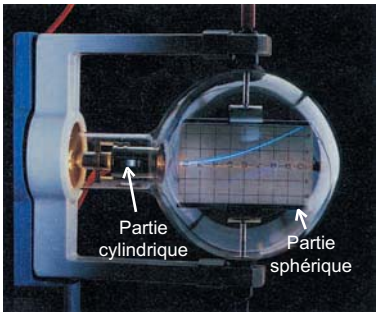
3 . Déviation d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme

3.1 . Expérience qualitative

La photo montre une ampoule en verre transparent, vide d'air. Dans la partie cylindrique de l'ampoule, se trouve un canon à électrons qui produit un faisceau d'électrons homocinétique.

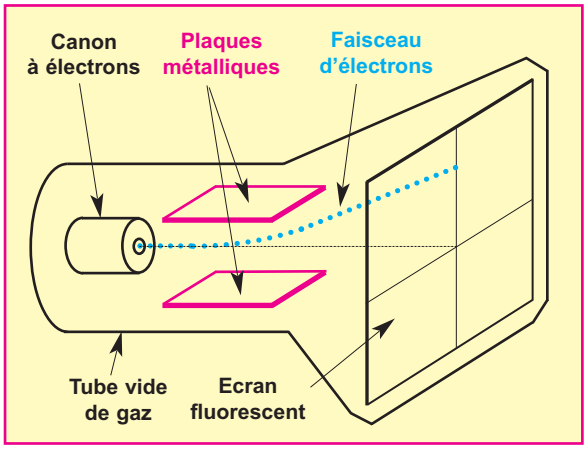
Ce faisceau d'électrons pénètre entre deux plaques horizontales qui se trouvent dans la partie sphérique de l'ampoule avec une vitesse initiale $\vec{v}_0$ parallèle aux plaques. Le faisceau d'électrons subit alors une déviation (ou déflexion) d'allure parabolique entre les deux plaques horizontales, d'où leur qualification de plaques déflectrices.

Une substance fluorescente rend visible la courbure de la trajectoire des électrons.



3.2 . Etude du mouvement des électrons entre les plaques déflectrices

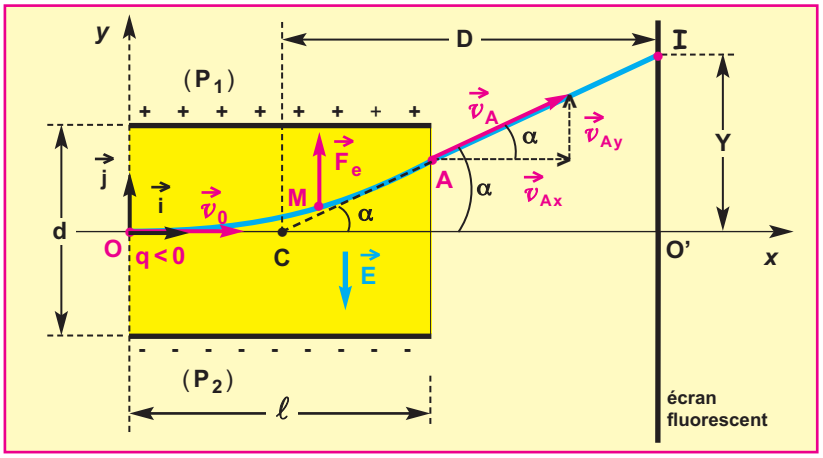
Le document ***11*** schématise un dispositif comprenant un canon à électrons, deux plaques déflectrices horizontales et un écran fluorescent.



Doc.11

Les deux plaques métalliques, notées (P_1) et (P_2), sont horizontales et symétriques par rapport à l'axe du canon à électrons ; elles sont écartées d'une distance **d** l'une de l'autre et leur longueur est ℓ (***Doc.12***).

Un écran plan fluorescent, perpendiculaire à l'axe du canon à électrons, est placé à une distance **D** du centre **C** des plaques.



Doc.12

Le mouvement de l'électron de masse **m** et de charge $q = -e = -1{,}6.10^{-19}$ **C** est étudié dans le repère d'espace (O, $\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$) lié au laboratoire et considéré comme galiléen.

À l'instant $t = 0$, l'électron pénètre par le point **O** avec la vitesse $\vec{v}_0 = v_0\,\vec{i}$ entre deux plaques (P_1) et (P_2) aux bornes desquelles on applique une tension continue ***positive*** $U = V_{(P_1)} - V_{(P_2)}$.

Le champ électrique $\vec{E}$ qui en résulte agit sur les électrons dans l'espace de longueur ℓ mesurée à partir du point **O** ;

sa valeur est $\|\vec{E}\| = \dfrac{U}{d}$ (***Doc.12***).

Les conditions initiales :

Dans le repère d'espace (**O** , $\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$), les vecteurs $\vec{i}$ et $\vec{j}$ étant dans le plan de la figure (***Doc.12***), les coordonnées du vecteur position initiale $\overrightarrow{OM_0}$ et du vecteur vitesse initiale $\vec{v}_0$ d'un électron sont :

$$\overrightarrow{OM_0}\begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = 0 \\ z_0 = 0 \end{cases} \qquad \vec{v}_0\begin{cases} v_{0x} = \|\vec{v}_0\| \\ v_{0y} = 0 \\ v_{0z} = 0 \end{cases}$$

Les coordonnées du vecteur champ électrique $\vec{E}$ sont :

$$\vec{E}\begin{cases} E_x = 0 \\ E_y = -\|\vec{E}\| \\ E_z = 0 \end{cases}$$

Le poids $\vec{P}$ de l'électron étant négligeable par rapport à la force électrique $\vec{F}_e$, appliquons la deuxième loi de Newton au système constitué par l'électron assimilable à un corps ponctuel :

$\vec{F}_e = m\,\vec{a}$ équivalent à $q\,\vec{E} = m\,\vec{a}$

d'où l'accélération : $\vec{a} = \dfrac{q}{m} \cdot \vec{E} = \dfrac{-e}{m}\vec{E}$

dont les coordonnées sont :

$$\vec{a}\begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = \dfrac{e\,\|\vec{E}\|}{m} = \dfrac{e\,U}{m\,d} \\ a_z = 0 \end{cases}$$

$\vec{a} = \dfrac{d\vec{v}}{dt}$, d'où la vitesse $\vec{v}$ s'écrit :

$$\vec{v} \begin{cases} v_x = C^{te} \\ v_y = \dfrac{e\ U}{m\ d}\ t + C^{te} \\ v_z = C^{te} \end{cases}$$

D'après les conditions initiales :

$$\vec{v} \begin{cases} v_x = \|\vec{v}_0\| & (1) \\ v_y = \dfrac{e\ U}{m\ d}\ t & (2) \\ v_z = 0 \end{cases}$$

$\vec{v} = \dfrac{d\overrightarrow{OM}}{dt}$ d'où le vecteur position $\overrightarrow{OM}$ s'écrit :

$$\overrightarrow{OM} \begin{cases} x = \|\vec{v}_0\|\ t + C^{te} \\ y = \dfrac{e\ U}{2\ m\ d}\ t^2 + C^{te} \\ z = C^{te} \end{cases}$$

D'après les conditions initiales :

$$\overrightarrow{OM} \begin{cases} x = \|\vec{v}_0\|\ t & (3) \\ y = \dfrac{e\ U}{2\ m\ d}\ t^2 & (4) \\ z = 0 \end{cases}$$

Quel que soit l'instant **t**, on a : **z = 0** ; *le mouvement de l'électron s'effectue dans le plan* (**O** , $\vec{i}$, $\vec{j}$).

Equation cartésienne de la trajectoire

On obtient l'équation de la trajectoire en éliminant le temps **t** entre les coordonnées **x** et **y**, données par les relations (**3**) et (**4**) :

(**3**) donne : $t = \dfrac{x}{\|\vec{v}_0\|}$,

en remplaçant **t** par $\dfrac{x}{\|\vec{v}_0\|}$ dans (**4**),

on obtient l'équation de la trajectoire

$$y = \frac{e\,U}{2\,m\,d\,v_0^2}\,x^2 \quad (5).$$

Donc, *la trajectoire d'un électron du faisceau a la forme d'un arc de parabole*.

Vitesse de l'électron au point de sortie A

L'électron quitte l'espace délimité par les deux plaques (P_1) et (P_2) au point **A** à l'instant t_A ; il est animé

d'une vitesse $\vec{v}_A$ et son abscisse est $x_A = \ell$;

d'après la relation (**3**) on peut écrire $x_A = \|\vec{v}_0\|\,t_A$ d'où

$$t_A = \frac{x_A}{\|\vec{v}_0\|} = \frac{\ell}{\|\vec{v}_0\|},$$

les coordonnées de la vitesse $\vec{v}_A$ sont alors :

$$\vec{v}\left[\begin{array}{l} v_{Ax} = \|\vec{v}_0\| \\ v_{Ay} = \dfrac{e\,U\,\ell}{m\,d\,\|\vec{v}_0\|} \\ v_{Az} = 0 \end{array}\right.$$

L'expression de la valeur de la vitesse au point **A** est :

$$\|\vec{v}_A\| = \sqrt{v_{Ax}^2 + v_{Ay}^2} = \sqrt{v_0^2 + \left(\frac{e\,U\,\ell}{m\,d\,\|\vec{v}_0\|}\right)^2}$$

La déviation du faisceau d'électrons

L'électron du faisceau homocinétique pénètre dans le champ électrique avec la vitesse $\vec{v}_0$.
En négligeant l'effet du poids à la sortie de l'espace où règne le champ électrique uniforme $\vec{E}$, on peut alors considérer que le mouvement de l'électron est rectiligne uniforme (*principe de l'inertie*), sa trajectoire (**AI**) est un segment de droite qui porte le vecteur $\vec{v}_A$.
La déviation de l'électron est l'angle α entre les directions de $\vec{v}_0$ et $\vec{v}_A$.
On peut déterminer la déviation α de deux manières :

- première méthode :

$$\mathrm{tg}\,\alpha = \frac{\|\vec{v}_{Ay}\|}{\|\vec{v}_{Ax}\|}, \text{ puisque } v_{Ax} = \|\vec{v}_0\|$$

$$\text{et } v_{Ay} = \frac{e\,U\,\ell}{m\,d\,\|\vec{v}_0\|} \quad \text{alors} \quad \mathrm{tg}\,\alpha = \frac{e\,U\,\ell}{m\,d\,v_0^2}.$$

- deuxième méthode :

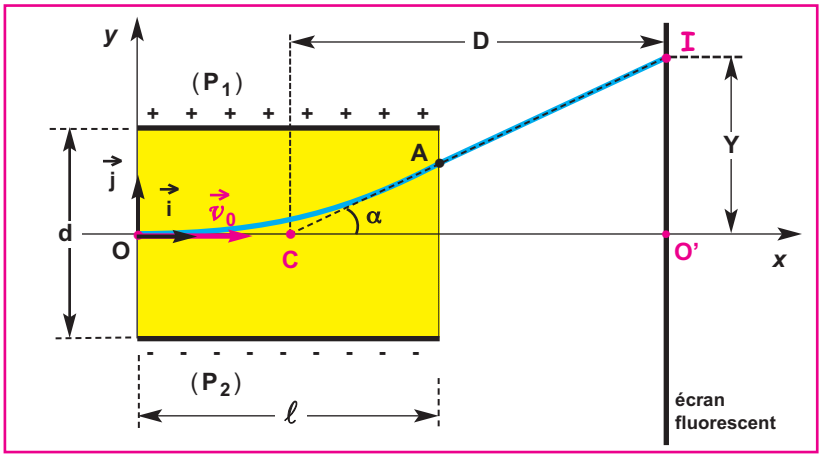
tg α est la pente de la droite tangente à la trajectoire au point **A** ; elle est égale à la valeur de la dérivée de **y** par rapport à **x** pour $x = \ell$.

$$y(x) = \frac{e\,U}{2\,m\,d\,v_0^2}\,x^2 \quad \text{alors} \quad \frac{dy}{dx} = \frac{e\,U}{m\,d\,v_0^2}\,x\,;$$

$$\text{quand } x = \ell \text{ alors : } \mathrm{tg}\,\alpha = \frac{e\,U\,\ell}{m\,d\,v_0^2}$$

*La déviation α augmente lorsque la tension **U** augmente et inversement.*

Déflexion électrique de l'électron



Doc.13

Le point d'impact de l'électron sur l'écran est le point **I**.
La déflexion électrique de l'électron est la distance **Y = O'I** (***Doc.13***), le point **O'** est le centre de l'écran, c'est le point où viendrait l'électron en l'absence de champ électrique.

Pour calculer la déflexion électrique **Y**, on va utiliser une propriété de la parabole : la droite tangente à la parabole en un point **A** d'abscisse $x_A = \ell$, coupe l'axe ($\vec{Oi}$)

en un point **C** d'abscisse $x_C = \dfrac{\ell}{2}$.

ainsi $\text{tg}\,\alpha = \dfrac{Y}{CO'} = \dfrac{Y}{D}$; donc $Y = D\ \text{tg}\,\alpha$,

cependant, on a déjà établi que $\text{tg}\,\alpha = \dfrac{e\,U\,\ell}{m\,d\,v_0^2}$.

Donc, $Y = \dfrac{e\,U\,\ell}{m\,d\,v_0^2}\,U$, de la forme $Y = K\,U$

avec $K = \dfrac{D\,e\,\ell}{m\,d\,v_0^2}$ = constante.

Par conséquent : **Y est proportionnel à U**.

La déflexion électrique est proportionnelle à la tension appliquée aux bornes des plaques de déviation.

3.3 . Application : l'oscilloscope

L'oscilloscope comprend un tube cathodique où on distingue trois parties essentielles :

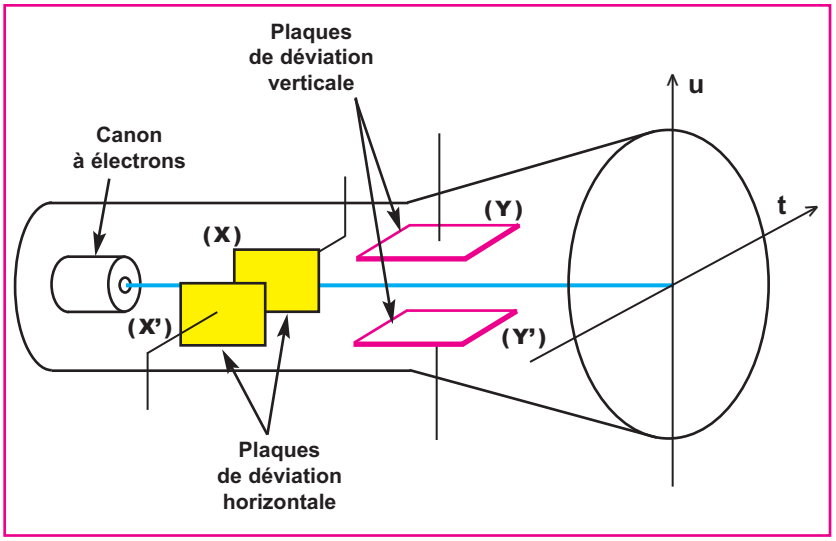
- le canon à électrons qui produit, focalise et accélère les électrons de façon à obtenir un faisceau d'électrons homocinétique.
- le système de déviation constitué de deux paires de plaques (les unes verticales et les autres horizontales) entre lesquelles on établit des tensions permettant de dévier le faisceau respectivement suivant les directions horizontale et verticale.
- l'écran fluorescent sur lequel l'impact des électrons fait apparaître une petite tâche lumineuse qu'on appelle ***spot*** et dont la couleur dépend de la substance enduite sur la paroi interne de l'écran (***Doc.14***).

À ces trois parties s'ajoutent des dispositifs électroniques permettant un réglage commode de l'appareil.

Le tube cathodique est schématisé dans le document ***15***.

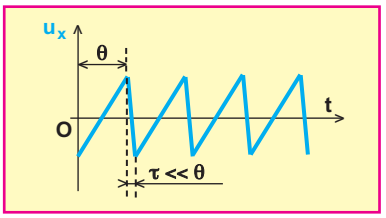
SUBSTANCE	COULEUR
Oxyde de zinc + Silicate de manganèse	vert
Sulfate de zinc + Cuivre	bleu-vert
Tungstate de calcium	bleu-violet
Phosophate de zinc + Cuivre	rouge

Doc.14



Doc.15

Quand on applique entre les deux plaques (**X'**) et (**X**) de déviation horizontale une tension $\mathbf{u_x}$ en dents de scie (***Doc.16***) et une tension **u** entre les deux plaques (**Y'**) et (**Y**) de déviation verticale, des champs électriques $\vec{E}_x$ et $\vec{E}_y$ variables dans le temps apparaissent entre ces deux paires de plaques, déviant le faisceau d'électrons qui trace, sur l'écran, la courbe représentant **u**(**t**).

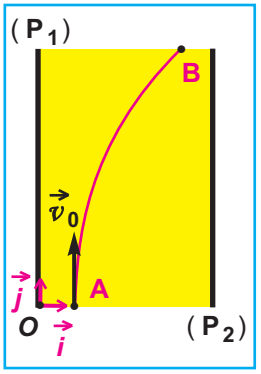


Doc.16 : TENSION EN DENTS DE SCIE
Elle permet au spot de balayer l'écran de gauche à droite à vitesse constante, puis de revenir très rapidement à gauche.

EXERCICE RÉSOLU N° 1

ENONCÉ :

Entre deux plaques (P_1) et (P_2), distantes de **d = 2 cm**, est appliquée une tension $U_{P_1P_2}$ = **10 V**. Une charge ponctuelle **q** de valeur absolue $3{,}2 . 10^{-19}$ **C**, pénètre par le point **A** et décrit une trajectoire curviligne **(AB)** (***Doc.17***). Au cours de son mouvement, on négligera l'effet du poids de la particule chargée.



Doc.17

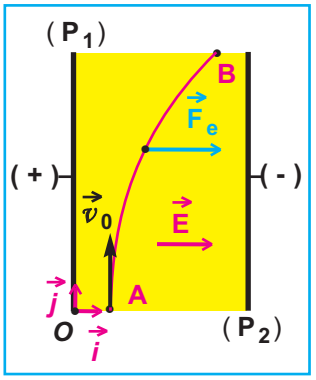
1 - a - Quelle est la nature du champ électrique $\vec{E}$ qui règne entre les deux plaques ?

- b - Déterminer les caractéristiques de $\vec{E}$.

- c - En déduire le signe de la charge **q**.

2 - Etablir l'expression de la **d.d.p.** U_{AB} et la calculer sachant que $(x_B - x_A)$ = **1 cm**.

3 - Calculer le travail de la force électrique qui s'exerce sur la charge ponctuelle au cours de son déplacement le long de **(AB)** en **joule** puis en **électron-volt**.

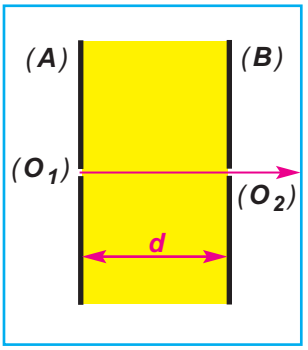
SOLUTION	COMMENTAIRE
1 - a - Nature du champ électrique $\vec{E}$: champ électrique uniforme. **- b - Caractéristiques de $\vec{E}$** - Direction : perpendiculaire aux plaques (P_1) et (P_2). - Sens : suivant les potentiels décroissants, c'est-à-dire de (P_1) vers (P_2). - Valeur : $\lVert\vec{E}\rVert = \dfrac{U_{P_1P_2}}{d}$ $\quad \boxed{\lVert\vec{E}\rVert = 500\ V.m^{-1}}$ **- c - Signe de la charge q** La force électrique qui s'exerce sur la charge est $\vec{F}_e = q . \vec{E}$, elle a même direction que $\vec{E}$ donc perpendiculaire aux plaques. D'après le sens de la déviation, on peut conclure que $\vec{F}_e$ et $\vec{E}$ ont même sens, donc **q > 0** (***Doc.18***).	 ***Doc.18***
2 - Expression de la d.d.p. U_{AB} $U_{AB} = \vec{E} . \vec{AB}$; dans le repère $(O, \vec{i}, \vec{j})$, on a $\vec{E} = E\vec{i} = +\lVert\vec{E}\rVert\vec{i}$ et $\vec{AB} = (x_B - x_A)\vec{i} + (y_B - y_A)\vec{j}$, alors : $U_{AB} = \lVert\vec{E}\rVert\vec{i} . [\ (x_B - x_A)\vec{i} + (y_B - y_A)\vec{j}\ ]$ $U_{AB} = \lVert\vec{E}\rVert (x_B - x_A)$ $U_{AB} = 500 . 0{,}01 = 5\ V.$ $\quad \boxed{U_{AB} = 5\ V}$	On remarque que seules les abscisses selon l'axe perpendiculaire aux plaques figurent dans la formule de la **d.d.p.** U_{AB} .
3 - Calcul du travail de la force électrique $\mathcal{W}_{A \to B}(\vec{F}_e) = q (V_A - V_B)$ $\quad \boxed{\mathcal{W}_{A \to B}(\vec{F}_e) = 1{,}6 . 10^{-18}\ J}$ Calcul du travail en électron-volt : $\mathcal{W}_{A \to B}(\vec{F}_e) = \dfrac{1{,}6 . 10^{-18}}{1{,}6 . 10^{-19}} = 10\ eV.$	

EXERCICE RÉSOLU N°2

ENONCÉ :

Entre deux plaques (**A**) et (**B**), distantes de **d = 5 cm** on établit une tension de valeur absolue **U = 1 kV**. La plaque (**A**) comporte un orifice (O_1) et la plaque (**B**) un orifice (O_2) tels que la droite (O_1O_2) soit parallèle au champ électrique $\vec{E}$.

Un électron de masse $m = 9{,}1.10^{-31}$ kg et de charge $q = -1{,}6.10^{-19}$ C est mis en mouvement rectiligne uniformément accéléré à partir de l'orifice (O_1) où sa vitesse est supposée nulle (***Doc.19***).



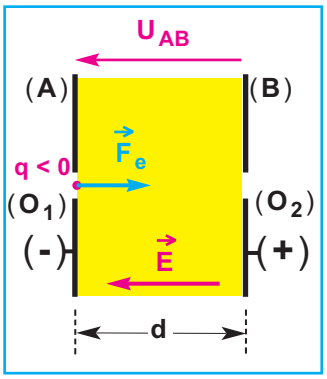
Doc.19

1 - Montrer que la valeur du poids $\vec{P}$ de l'électron est négligeable devant celle de la force électrique qui s'exerce sur l'électron.

On donne $\|\vec{g}\| = 9{,}8\ m.s^{-2}$.

2 - Préciser, en le justifiant, le signe de U_{AB}.

3 - En appliquant le théorème de l'énergie cinétique, déterminer la valeur de la vitesse de l'électron à sa sortie en (O_2).

SOLUTION	COMMENTAIRE
1 - Montrons que le poids est négligeable Entre les plaques accélératrices, la particule est soumise à la force électrique $\vec{F}_e = q.\vec{E}$ et au poids $\vec{P} = m.\vec{g}$. Calculons le rapport des valeurs de ces forces : $\dfrac{\|\vec{P}\|}{\|\vec{F}_e\|} = \dfrac{m\,\|\vec{g}\|}{e\,\|\vec{E}\|} = \dfrac{m\,\|\vec{g}\|\,d}{e\,U}$ Application numérique : $\boxed{\dfrac{\|\vec{P}\|}{\|\vec{F}_e\|} = 3.10^{-15} << 1}$ Cela signifie que la valeur du poids est négligeable devant celle de la force électrique qui s'exerce sur l'électron.	
2 - Signe de la d.d.p. U_{AB} Le mouvement de la particule chargée est rectiligne uniformément accéléré, donc le vecteur accélération $\vec{a}$ est de même sens que le mouvement, c'est-à-dire de (**A**) vers (**B**). D'après la deuxième loi de Newton, appliquée au système {**électron**}, $\vec{F}_e = m\vec{a}$; donc, $\vec{F}_e$ et $\vec{a}$ sont de même sens, alors la force $\vec{F}_e$ est orientée de (**A**) vers (**B**) (***Doc.20***). D'autre part $\vec{F}_e = q\vec{E}$ et $q < 0$; donc le sens du vecteur champ électrique est contraire au sens de la force électrique, c'est-à-dire de (**B**) vers (**A**) ; on sait que le sens du vecteur champ électrique est dirigé vers les potentiels décroissants, donc $V_{(A)} < V_{(B)}$, d'où $V_{(A)} - V_{(B)} = U_{AB} < 0$.	 ***Doc.20***

3- Calcul de la vitesse de sortie du champ accélérateur

Appliquons le théorème de l'énergie cinétique au système {électron} dans un repère terrestre supposé galiéen :

$$\Delta \mathcal{E}_{C\,(O_1)\rightarrow(O_2)} = \mathcal{E}_{C_2} - \mathcal{E}_{C_1} = \mathcal{W}_{(O_1)\rightarrow(O_2)}(\vec{F}_e) = q\,(V_{(A)} - V_{(B)}) = -\,e\,U_{AB}.$$

La vitesse au point **B** est $\vec{v}$. Au point **A**, la vitesse est nulle.

D'autre part : $-\,e\,U_{AB} = -\,e\,(-\,U) = e\,U$; par conséquent :

$$\|\vec{v}\| = \sqrt{\frac{2\,e}{m}\,U}$$

Application numérique :

$$\|\vec{v}\| = \sqrt{\frac{2\,.\,1{,}6\,.\,10^{-19}\,.\,10^{3}}{9{,}1\,.\,10^{-31}}} = 1{,}875\,.\,10^{7}\ m.s^{-1}$$

$$\boxed{\|\vec{v}\| = 1{,}875\,.\,10^{7}\ m.s^{-1}}$$

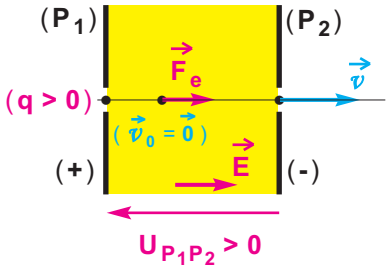
L'ESSENTIEL

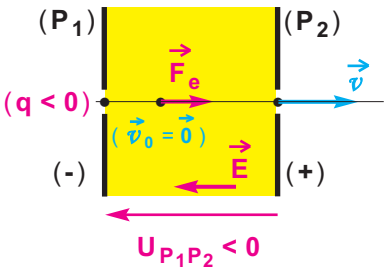
● Une charge ponctuelle **q**, qui se déplace dans un champ électrique uniforme $\vec{E}$ d'un point de départ **A** vers un point d'arrivée **B** portés respectivement aux potentiels électriques V_A et V_B, est soumise à une force électrique $\vec{F}_e$ dont le travail est indépendant du chemin suivi ;

son expression est : $\mathcal{W}_{A \to B}(\vec{F}_e) = q\,(V_A - V_B)$.

● Le champ électrique $\vec{E}$ est dirigé dans le sens des potentiels électriques décroissants.

● Un champ électrique uniforme permet d'accélérer des particules chargées :



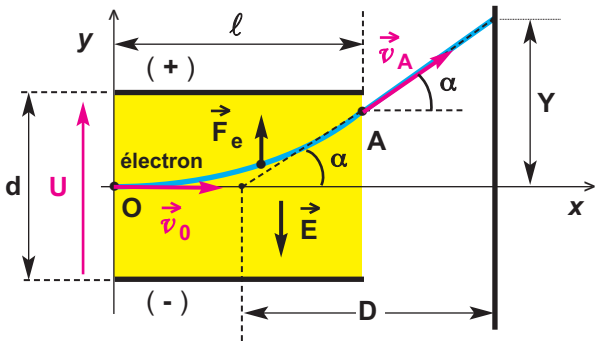


Le vecteur accélération vaut $\vec{a} = \dfrac{\vec{F}_e}{m} = \dfrac{q\,\vec{E}}{m} = \vec{C}^{te}$; puisque la vitesse initiale $\vec{v}_0 = \vec{0}$, alors le mouvement de la particule est rectiligne uniformément accéléré.

À la sortie du champ accélérateur, la valeur de la vitesse est proportionnelle à la racine carrée de la tension accélératrice :

$$\|\vec{v}\| = \sqrt{\frac{2\,|q|}{m}\,|U_{P_1P_2}|}$$

● Un champ électrique uniforme $\vec{E}$ permet de dévier un faisceau de particules chargées, dans le cas d'un faisceau d'électrons on a :



$\vec{a} = \dfrac{\vec{F}_e}{m} = \dfrac{q\,\vec{E}}{m} = \vec{C}^{te}$; ses coordonnées sont ($a_x = 0$; $a_y = \dfrac{e\,\|\vec{E}\|}{m}$; $a_z = 0$)

■ La trajectoire est parabolique dans le plan (**Oxy**), son équation est : $y = \dfrac{e\,U}{2\,m\,d\,v_0^2}\,x^2$.

■ La déflexion électrique **Y** est proportionnelle à la tension **U** appliquée aux bornes des plaques de déviation ; son expression est : $Y = \dfrac{D\,e\,\ell}{m\,d\,v_0^2}\,U$.

Travaux pratiques

But

- Visualiser les lignes du champ relatives à un champ électrique uniforme.
- Chercher la forme des surfaces équipotentielles entre deux électrodes planes en regards.
- Etablir la relation $\|\vec{E}\| = \frac{U_{PN}}{d}$

A - Expérience qualitative :

Visualisation des lignes de champ relatives à un champ électrique uniforme.

Matériel

- une cuve à fond transparent.
- deux plaques rectangulaires en cuivre à fixer dans la cuve, l'une en face de l'autre, et distantes de **3 cm**.
- un générateur de tension continue règlable et permettant d'obtenir quelques **kilovolts**.
- quatre fils électriques de connexion.
- deux pinces crocodile.
- huile de paraffine.
- de la semoule.

Protocole

On relie les plaques de cuivre, préalablement placées dans la cuve contenant de l'huile de paraffine, aux pôles (**+**) et (**-**) du générateur entre lesquelles on maintient une tension de quelques **kilovolts**.

On saupoudre la surface de l'huile de paraffine avec les grains de semoule.

Conclusion

Les grains de semoule s'orientent en se disposant suivant des lignes perpendiculaires aux plaques. Elles matérialisent les lignes de champ électrique créées entre les deux plaques en regard.

B - Expérience quantitative :

- Recherche de la forme des surfaces équipotentielles entre deux électrodes planes en regards.
- Détermination des caractéristiques du champ électrique uniforme.

Matériel

- une cuve à fond transparent.
- deux plaques rectangulaires en cuivre fixées dans la cuve, l'une en face de l'autre, et distantes de **10 cm**.
- un générateur de tension continue règlable et permettant d'obtenir **6 V**.
- un voltmètre muni d'une sonde (**S**) (à défaut on utilise un fil droit en cuivre).
- quatre fils électriques de connexion.
- trois pinces crocodile.
- deux papiers millimétrés numérotés (**1**) et (**2**).
- une solution de sulfate de cuivre ($0{,}1\ mol.L^{-1}$).

Protocole

- On relie les plaques de cuivre (**P**) et (**N**) respectivement aux pôles (**+**) et (**-**) du générateur entre lesquelles on maintient une tension continue de **6 V**.
- On relie la plaque (**N**) et la **sonde** (**S**) aux bornes du voltmètre.
- On pose sous la cuve le papier millimétré (**1**), il permet de repérer la position de la sonde par rapport à l'une des deux plaques.
- Sur le papier millimétré (**2**), on dessine deux traits parallèles représentant en vrai grandeur les deux électrodes (Positive) et (Négative).

Mesures

Plaçons la **sonde** (**S**) à une distance **d** par rapport à la plaque (**N**) et mesurons à chaque fois la **d.d.p** U_{MN}.

Tableau des mesures

d $(10^{-2}\ m)$						
$U_{MN} = (V_M - V_N)$ (Volt)						
$\frac{U_{MN}}{d}$ $(V.m^{-1})$						

Exploitation des resultats des mesures

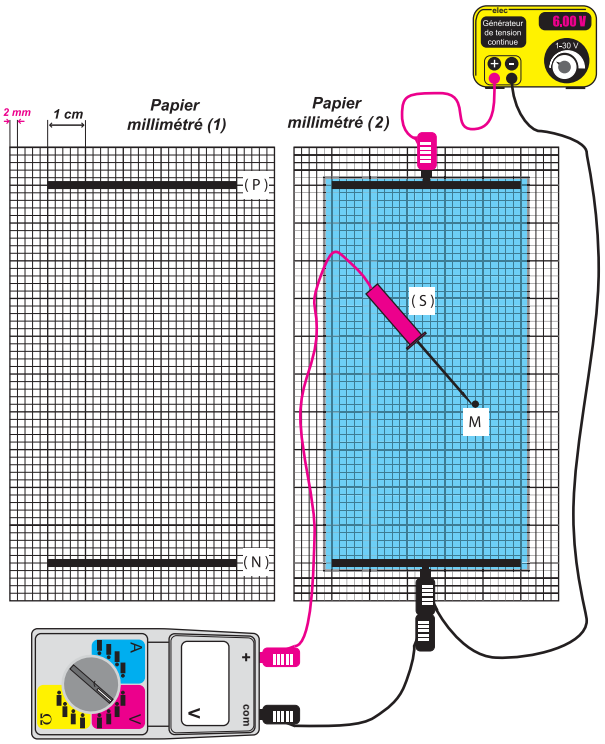
Montrer que le rapport $\frac{U_{MN}}{d}$ a la même valeur quelque soit la position du point entre les deux plaques ; elle correspond à la valeur du vecteur champ électrique qui règne entre les plaques (**P**) et (**N**).

Conclusion :

Deux plaques métalliques identiques, en regard l'une de l'autre, séparées d'une distance **d** et reliées aux pôles (**+**) et (**-**) d'un générateur de tension continu, créent dans l'espace qui les sépare un champ électrique uniforme dont les lignes de champ sont orthogonales aux plaques, dirigées du potentiel le plus élevé vers le potentiel le moins élevé.

La valeur du vecteur champ électrique $\vec{E}$ est donnée par :

$$\left\| \vec{E} \right\| = \frac{U_{PN}}{d}$$



EXERCICES

Je vérifie mes connaissances

Choisir la (ou les)proposition(s) correcte(s)

1- Le travail d'une force électrique est :

a - $\mathcal{W}_{A \to B}(\vec{F}_e) = q\, U_{AB}$.

b - $\mathcal{W}_{A \to B}(\vec{F}_e) = q\, U_{BA}$.

c - $\mathcal{W}_{A \to B}(\vec{F}_e) = |q|\,|U_{AB}|$.

2- En négligeant le poids devant la force électrique, la variation de l'énergie cinétique d'une particule chargée est :

a - $\Delta\mathcal{E}_{c\,A \to B} = \mathcal{E}_{c_B} - \mathcal{E}_{c_A} = q\,(V_B - V_A)$.

b - $\Delta\mathcal{E}_{c\,A \to B} = \mathcal{E}_{c_B} - \mathcal{E}_{c_A} = q\,(V_A - V_B)$.

3- Le travail d'une force électrique s'exerçant sur une particule électrisée qui se déplace dans un champ électrique uniforme peut être :

a - nulle.
b - positive.
c - négative.

4- Un champ électrique uniforme $\vec{E}$ règne entre deux plaque (P_1) et (P_2) portées respectivement aux potentiels électriques $V_{(P_1)}$ et $V_{(P_2)}$. Une particule électrisée portant une charge négative **q** pénètre avec une vitesse initiale $\vec{v}_0$ dans le champ $\vec{E}$ par un trou de la plaque (P_1). En négligeant le poids, la particule aura un mouvement rectiligne uniformément accéléré si :

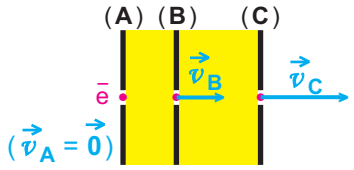
a - $\vec{v}_0 = \vec{0}$ et $V_{(P_1)} > V_{(P_2)}$.

b - $\vec{v}_0$ et la force électrique $\vec{F}_e$ ont le même sens.

c - La direction de $\vec{v}_0$ n'est pas perpendiculaire aux plaques.

J'applique mes connaissances et je raisonne

Ex-1- On étudie les accélérations successives d'un électron par les plaques (**A**), (**B**) et (**C**). L'électron se présente au trou de la plaque (**A**) avec une vitesse considérée comme nulle (***Doc.21***).
On donne : $U_{BA} = 100$ **V** ; $U_{CB} = 900$ **V**.
$e = 1{,}6.10^{-19}$ **C** ; $m = 9{,}1.10^{-31}$ **kg**.



Doc.21

Appliquer le théorème de l'énergie cinétique pour déterminer :

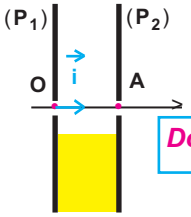
a - La valeur $\|\vec{v}_B\|$ de la vitesse avec laquelle l'électron passe par l'orifice de la plaque (**B**).

b - La valeur $\|\vec{v}_C\|$ de la vitesse de passage de l'électron par l'orifice de la plaque (**C**).

Ex-2- À $t_0 = 0$ **s**, des ions Kr^{8+}, de masse $m = 14.10^{-26}$ **kg**, de charge **q**, pénètrent en **O** avec une vitesse presque nulle entre deux plaques (P_1) et (P_2) écartées d'une distance **d = 1 cm** et soumises à la tension **U = 98000 V**. Ils sortent par le point **A** avec une vitesse $\vec{v}_A$ (***Doc.22***).

1 - Représenter la force électrique $\vec{F}$ s'exerçant sur un ion Kr^{8+}, le champ électrique $\vec{E}$ et comparer les potentiels électriques $V_{(P_1)}$ et $V_{(P_2)}$.

2 - Montrer qu'on peut négliger l'effet du poids devant celui de la force électrique.



Doc.22

3 - Déterminer la nature du mouvement d'un ion Kr^{8+}.

4 - Calculer la valeur algébrique de son accélération $\vec{a}$.

5 - Calculer la valeur de l'instant t_A de sortie par le point **A**.

6 - Calculer en $km.s^{-1}$ la valeur de la vitesse de sortie par le point **A**.

7 - Comment peut-on augmenter $\|\vec{v}_A\|$? Peut-on l'augmenter indéfiniment ?

On donne : $e = 1{,}6.10^{-19}$ **C**; $\|\vec{g}\| = 9{,}8\ m.s^{-2}$.

Ex-3- Une boule électrisée supposée ponctuelle, de masse **m = 0,05 g**, de charge **q < 0**, est en équilibre en un point **O** (**0 mm** ; **0 mm**) entre deux plaques (***Doc.23***) horizontales (A_1) et (A_2) distantes de **d = 4 cm** et aux bornes desquelles on a appliqué une tension $U_0 = 4$ **kV**.

1 - a - Représenter le poids $\vec{P}$ et la force électrique $\vec{F}$ qui s'exercent sur la boule en équilibre en **O**.

b - Représenter le champ électrique $\vec{E}$.

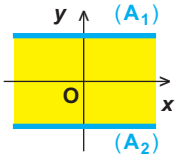
c - Comparer les potentiels électriques $V_{(A_1)}$ et $V_{(A_2)}$ des deux plaques.

2 - Décrire ce que l'on observerait lorsqu'on maintient aux bornes des plaques :

a - la tension $U_1 = 4{,}5$ **kV**.

b - la tension $U_2 = 3{,}5$ **kV**.

3 - Calculer le travail de la force électrique s'excerçant sur la boule quand elle s'est déplacée verticalement vers le haut du point **O** vers le point **D** (**0 mm** ; **12 mm**) sachant que la tension appliquée est $U_3 = 5$ **kV**. On donne $\|\vec{g}\| = 9{,}8\ N.kg^{-1}$.



Doc.23

Ex-4- Deux plaques (P_1) et (P_2) parallèles et horizontales sont fixées à l'intérieur d'une ampoule vide de gaz. Elles sont reliées aux pôles (+) et (-) d'un générateur de haute tension qui délivre une tension $U = V_{(P_1)} - V_{(P_2)} = 2700$ V (*Doc.24-a*).

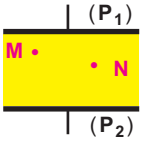
1 - a - Associer les pôles (+) et (-) aux plaques correspondantes.

b - Tracer une ligne orientée du champ électrique $\vec{E}$ et qui passe par le point **N**.

c - Représenter le vecteur $\vec{E}$ au point **M**.

2 - Calculer la valeur $\|\vec{E}\|$ du champ électrique sachant que l'écartement des plaques est **d = 6 cm**.

3 - En réalité, ces plaques servent à dévier la trajectoire du mouvement d'un faisceau d'électrons qui entrent dans la région du champ électrique $\vec{E}$ par le point **O** avec une vitesse $\vec{v}_0$ et sortent par le point **S** avec une vitesse $\vec{v}_S$ en suivant une trajectoire parabolique (*Doc.24-b*).



Doc.24-a

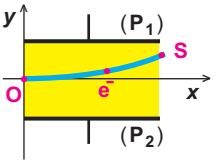
a - Ecrire l'expression du travail de la force électrique $\vec{F}$ qui s'exerce sur un électron du point **O** vers le point **S**.

b - Quel est le signe de la différence de potentiel électrique $(V_S - V_O)$? Calculer sa valeur numérique sachant que les coordonnées du point de sortie sont **S** (x_S = **10 cm** ; y_S = **2 cm**).

c - Calculer en **joule** et en **électron-volt** le travail $\mathcal{W}_{O \to S}(\vec{F})$.

4 - En appliquant le théorème de l'énergie cinétique au système constitué par un électron, calculer la valeur de la vitesse de sortie $\vec{v}_S$.

On donne : $\|\vec{v}_0\| = 18{,}750.10^6\ m.s^{-1}$; $m = 0{,}91.10^{-30}$ kg.



Doc.24-b

Ex-5- Des noyaux d'hélium He^{2+} (particule α), de masse $m = 6{,}64.10^{-27}$ kg, de charge $q = 3{,}2.10^{-19}$ C, sont émis avec une vitesse négligeable à travers l'ouverture (O_1) d'une plaque (P_1). Ils traversent successivement trois régions (I), (II), (III) d'une enceinte dans laquelle on a fait le vide (*Doc.25*). On négligera l'action gravitationnelle sur leur mouvement.

1 - La région (I) est limitée par les plaques (P_1) et (P_2), auxquelles on applique une tension $U_0 = U_{P_1P_2}$. On veut que les particules α, en passant par (O_2), aient une vitesse $\vec{v}_0$ ayant la direction de la droite (O_1O_2).

a - Quel est le signe de U_0 ?

b - Déterminer l'expression de $\|\vec{v}_0\|$ et calculer sa valeur. On donne U_0 = **2000 V**.

2 - Les particules α pénètrent avec la vitesse $\vec{v}_0$ dans la région (II), de longueur **L = 50 cm**, où n'existe aucun champ électrique.

a - Quelle est la nature du mouvement des particules dans cette région ?

b - Quelle est la durée du trajet d'une particule dans cette région ?

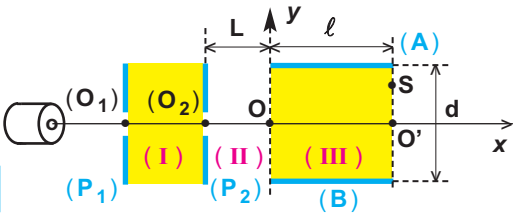
3 - Après avoir franchi la région (II), les particules α pénètrent en **O** dans la région (III) de longueur ℓ = **20 cm** entre les deux plaques (**A**) et (**B**) distantes de **d = 5 cm**. Le champ électrique $\vec{E}$ dans la région (III) est crée par une tension U_{AB}.

a - Déterminer le sens de $\vec{E}$ pour que les particules α sortent par le point **S** se trouvant au dessus du point **O'**.

b - En déduire le signe de U_{AB}.

c - Montrer que le mouvement des particules α dans la région (III) est curviligne dans le plan (**OXY**).

d - Etablir l'équation de la trajectoire ; en déduire :
- la valeur de U_{AB} pour que **O'S = 5 mm**.
- la durée du trajet O_2S.

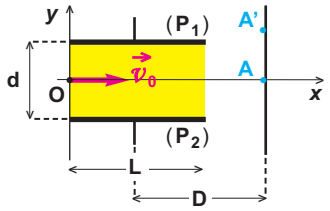


Doc.25

Ex-6- On se propose de déterminer la vitesse d'éjection des particule α de charge $q = 3{,}2.10^{-19}$ **C** et de masse $m = 6{,}64.10^{-27}$ **kg**. Ces particules pénètrent par le point **O** avec une vitesse horizontale $\vec{v}_0$ dans l'espace vide entre deux plaques horizontales (P_1) et (P_2). La distance entre les plaques est **d = 10 cm** et leur longueur est **L = 15 cm** (*Doc.26*).
En absence de champ électrique entre (P_1) et (P_2), on observe une tache **A** sur une plaque photographique disposée perpendiculairement à **X'X** et se trouvant à une distance **D = 50 cm** du centre des plaques.
Lorsqu'on applique une tension continue $U = 6.10^4$ **V** aux bornes de (P_1) et (P_2), on constate une tache se forme en un point **A'**.

1 - Etablir l'équation de la trajectoire du mouvement d'une particule α dans le repère $(O, \vec{i}, \vec{j})$.

2 - Déterminer la valeur $\|\vec{v}_0\|$ de la vitesse d'éjection des particules α sachant que **AA' = 8,5 mm**.



Doc.26

Ex-7- Les plaques déviatrices **(A)** et **(B)** ont une longueur **L = 20 cm** et sont séparées d'une distance **d = 7 cm**.
Le repère d'étude $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ a une origine **O** équidistante des deux plaques.
Des protons sont émis au point **C** sans vitesse, ils sont ensuite accélérés entre **C** et **D** par une tension **U = 1000 V**.
Le faisceau homocinétique obtenu pénètre en **O** dans la région délimitée par les plaques **(A)** et **(B)** avec une vitesse $\vec{v}_0$ incliné d'un angle α = **30°** par rapport au vecteur $\vec{i}$ (*Doc.27*).

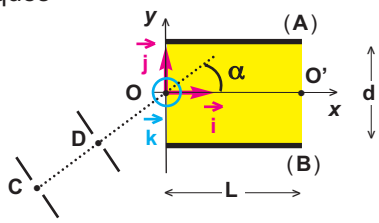
1 - Déterminer la valeur $\|\vec{v}_0\|$ de la vitesse avec laquelle les protons entrent par le point **O** entre les plaques **(A)** et **(B)**.

On donne : masse d'un proton $m = 1{,}67.10^{-27}$ **kg** ; charge électrique d'un proton $e = 1{,}6.10^{-19}$ **C**.

2 - Indiquer le signe que doit avoir $(V_{(A)} - V_{(B)})$ pour que le faisceau de protons passe par le point **O'** (**L** , **0** , **0**).

3 - La tension continue qui est maintenue aux bornes de **(A)** et **(B)** est **U'**.
- **a -** Etablir l'équation de la trajectoire des protons dans le repère $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ en fonction de **U**, **U'**, α et **d**.
- **b -** Calculer la valeur de **U'** qui permet de réaliser la sortie en **O'**.

4 - Dans le cas où la tension **U'** a la valeur précédemment calculée, déterminer à quelle distance minimale de la plaque supérieure **(A)** passe le faisceau de protons.



Doc.27

Ex-8- Dans le vide d'un tube cathodique, le filament de chauffage émet des électrons avec une vitesse initiale négligeable. Les électrons sont accélérés entre les électrodes (**C**) et (**A**) où existe un champ électrique uniforme créé par la tension positive U_0.

La valeur de la vitesse des électrons avec laquelle ils traversent l'anode (**A**) est $\|\vec{v}_0\| = 16000\ km.s^{-1}$.

1 - Calculer U_0.

On donne : charge électrique de l'électron $-e = -1{,}6.10^{-19}\ C$; masse de l'électron $m = 0{,}91.10^{-30}\ kg$.

2 - Le faisceau d'électrons subit une déviation entre les plaques (P_1) et (P_2) qui sont soumises à une tension $U_{P_1P_2}$ pouvant être positive ou négative (***Doc.28***).

a - Vers quel sens (vers le haut ou vers le bas) est dévié le faisceau d'électrons lorsque $U_{P_1P_2} > 0$? $U_{P_1P_2} < 0$?

b - Montrer que les coordonnées du vecteur accélération $\vec{a}$ dans le repère cartésien $(O, \vec{i}, \vec{j})$ sont

$$\left(a_x = 0\ ;\ a_y = \frac{-e\,U_{P_1P_2}}{m\,d}\right).$$

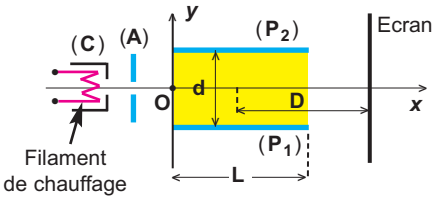
c - Etablir l'équation de la trajectoire et vérifier que la déviation parabolique est en accord avec le signe de $U_{P_1P_2}$.

d - Montrer que la déviation **Y** du spot sur l'écran est proportionnelle à $U_{P_1P_2}$.

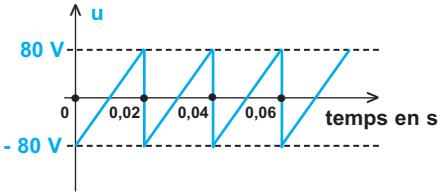
e - Sachant que **d = 2 cm** et **L = 4 cm**, quelle doit être la distance **D** pour que la sensibilité $\frac{U_{P_1P_2}}{Y}$ soit égale à $20\ V.cm^{-1}$.

3 - La distance **D** ayant la valeur trouvée ci-dessus, on applique à présent une tension en dents de scie de période **T = 0,02 s** et dont la valeur varie de **- 80 V** à **+ 80 V** (***Doc.29***).

Montrer que, sur l'écran, le spot décrit périodiquement de part et d'autre de sa position centrale, un segment de droite dont on calculera la longueur avec une vitesse constante dont on calculera la valeur.



Doc.28



Doc.29

POUR EN SAVOIR PLUS

LE TUBE CATHODIQUE

Le tube cathodique :
Canon à électron, sous vide, utilisé par les écrans dits "à rayonnement", pour afficher des images mouvantes. Exemples : Oscilloscopes, Téléviseurs.

L'invention du tube cathodique a eu lieu à la fin du XIXème siècle en effet il y a un peu plus de cent ans (1897), Karl Ferdinand Braun inventait le tube cathodique qui porte son nom, Braunsche röhre (tube de Braun), et qui deviendra ensuite l'oscillographe cathodique.

Ce tube est l'ancêtre des tubes de nos télévisions. Ferdinand Braun et ses assistants inventèrent la plupart des principes qui permettent le fonctionnement de la télévision.Ce sont les connaissances de l'époque qui permirent la fabrication d'un tel tube. En fait, le tube cathodique de Braun appartient à une famille nombreuse de tubes tous similaires, appelés tubes de Crookes ou de Hittorf et qui ont en commun deux caractéristiques : La première est qu'on pouvait y faire le vide à l'intérieur. L'autre était qu'il était composé d'une enveloppe en verre et de deux électrodes, une négative et une positive. À l'époque, ce tube était extrêmement connu dans les laboratoires européens. On espérait, grâce à ce tube, comprendre pourquoi et comment l'électricité est conduite dans le vide.

Le tube apportera la réponse de la conduction électrique dans le vide. C'est J.-J. Thomson qui découvrira, grâce à ce dispositif, l'électron en 1897 et qui en déterminera le rapport masse sur charge ; mais l'invention de la télévision sera plus tardive (Zworykin, 1923 ; Baird, 1926). Etonnamment, cette invention n'a pas été trés utilisée dans les années qui suivirent, et les oscilloscopes apparaîtront dans les laboratoires à partir de l'entre-deux guerres.

Le tube cathodique a permis de nombreuses applications comme la télévision, les ordinateurs, les oscilloscopes... Pourtant actuellement même si elle est très rentable, la technologie des CRT(Cathode Ray Tube) se voit remplacer par une technologie beaucoup plus fine.
Nous recherchons des écrans toujours plus grands, toujours plus nets pour plus de confort visuel.

http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/Meca/Charges/q_dans_E1.html
http://www.up.univ-mrs.fr/~laugierj/CabriJava/0pjava55.html
http://www.ac-grenoble.fr/disciplines/spc/articles.php?lng=fr&pg=57
http://www.geocities.com/athens/olympus/9531/programmes/1sti3/prog15.html
http://www.lgl.lu/museedelaphysi/Tube%20de%20Crookes%20avec%20moulinet%20et%20aimants/tube%20de%20Crookes.htm

MOUVEMENT DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE UNIFORME

1. La force de Lorentz

1.1 . Activité expérimentale

EXPÉRIENCE :

Photo.1

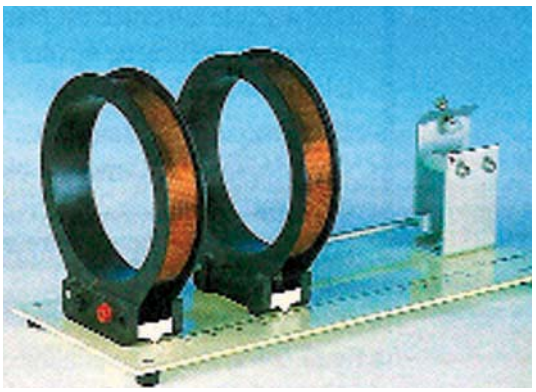


Photo.2

LES BOBINES DE HELMHOLTZ

Les bobines de Helmholtz sont deux bobines circulaires de rayon **R** et de même axe.

Elles sont situées à une distance **R** l'une de l'autre. Leurs spires sont parcourues par des courants électriques continus de même sens et de même intensité ce qui fait apparaître un champ magnétique uniforme résultant des deux champs magnétiques créés par les bobines.

L'appareillage se compose de deux parties :

- Deux bobines de Helmholtz qui créent dans le volume qu'elles délimitent un champ magnétique uniforme ; le vecteur champ magnétique constant $\vec{B}$ qui en résulte est de valeur proportionnelle à l'intensité **I** du courant électrique continu parcourant les spires qui les constituent (***Photo.2***).
- Un canon à électrons produisant un faisceau d'électrons homocinétique à l'intérieur d'une ampoule de verre contenant de la vapeur de mercure sous pression réduite.

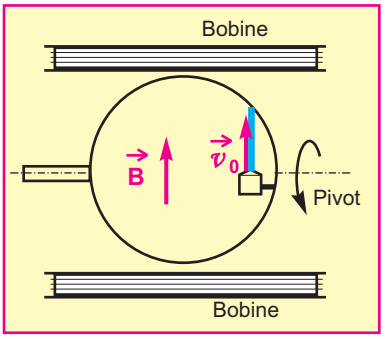
On peut faire varier la valeur de la vitesse des électrons en agissant sur la tension accélératrice aux bornes du canon à électrons.

En faisant tourner l'ampoule autour de l'axe de son support, on modifie ainsi à volonté la direction de la vitesse initiale $\vec{v}_0$ des électrons par rapport à la direction du champ magnétique $\vec{B}$ (***Photo.1***).

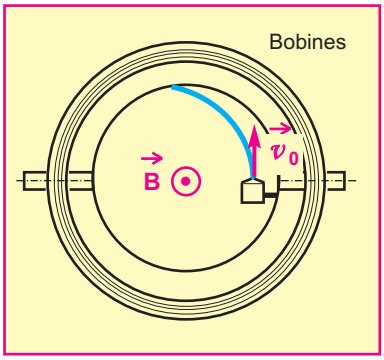
La matérialisation de la trajectoire des électrons est due aux chocs avec les atomes du gaz raréfié provoquant une luminescence bleue caractéristique du mercure.

Observations :

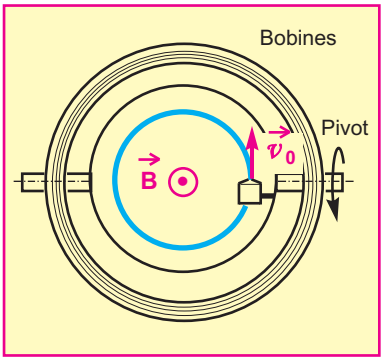
- Lorsque le vecteur vitesse initiale $\vec{v}_0$ est parallèle au champ magnétique $\vec{B}$, la trajectoire des électrons n'est pas déviée (***Doc.1***).
- Lorsque $\vec{v}_0$ est perpendiculaire au vecteur champ magnétique $\vec{B}$, la trajectoire s'incurve tout en demeurant dans un plan perpendiculaire à $\vec{B}$ (***Doc.2***). Lorsqu'on augmente l'intensité du courant électrique qui parcourt les spires des deux bobines, jusqu'à rendre la valeur de $\vec{B}$ assez importante, la trajectroire devient circulaire (***Doc.3***) et (***Photo.3***).



Doc.1



Doc.2



Doc.3

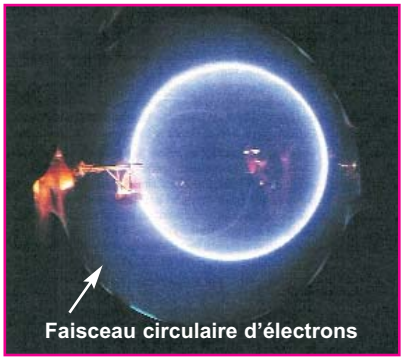


Photo.3

- Lorsque la direction de la vitesse initiale $\vec{v}_0$ est inclinée d'un angle aigu θ par rapport à la direction de $\vec{B}$, la trajectoire des électrons est une hélice circulaire (***Photo.4***).

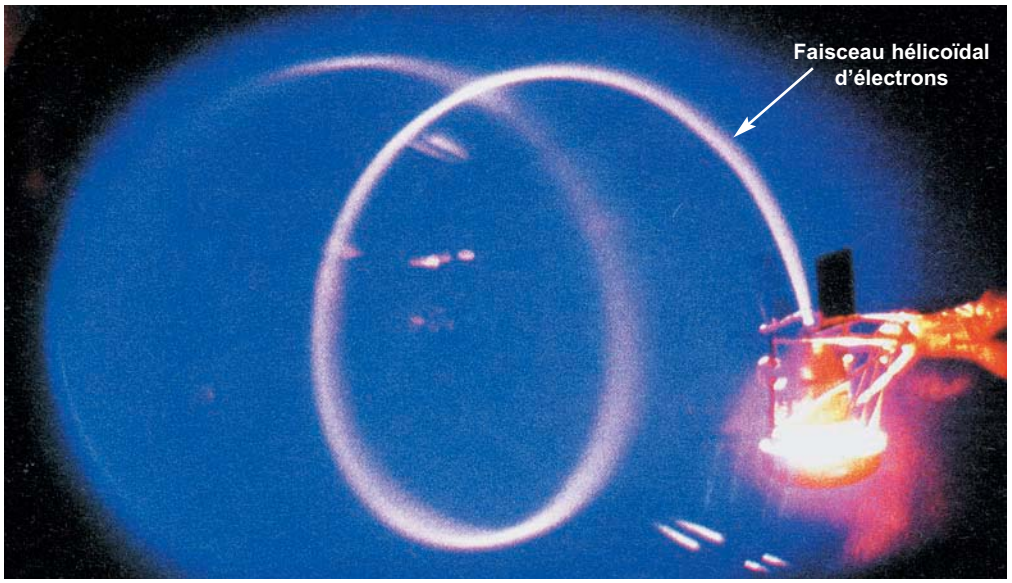


Photo.4

REMARQUE :

La déviation de la trajectoire des électrons est possible même si le champ magnétique n'est pas uniforme. On peut s'en apercevoir en approchant un aimant droit d'un faisceau d'électrons (***Photo.5***). Dans la suite du cours, on se limitera au cas où le champ magnétique est uniforme.

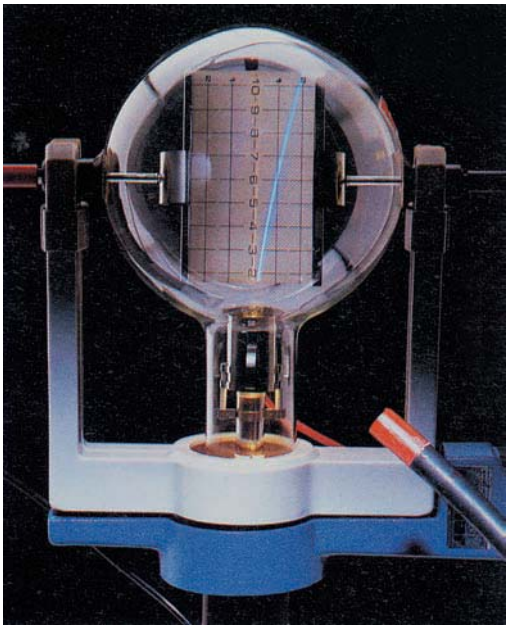


Photo.5

CONCLUSION :

Un champ magnétique uniforme permet de dévier un faisceau d'électrons lorsque ses particules chargées sont animées d'une vitesse non parallèle au champ magnétique uniforme.

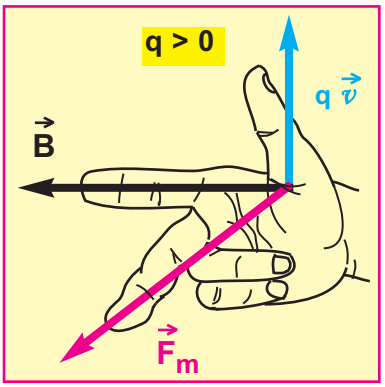
1.2 . La force de Lorentz

La déviation de la trajectoire des électrons animés d'une vitesse $\vec{v}$ dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ est causée par une force magnétique $\vec{F}_m$ appelée force de Lorentz.

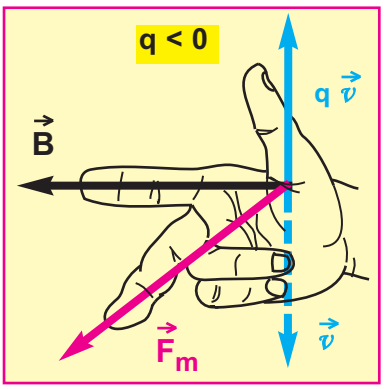
CARACTÉRISTIQUES DE LA FORCE DE LORENTZ :

- **Direction :** la force de Lorentz $\vec{F}_m$ est perpendiculaire au plan formé par les vecteurs $\vec{v}$ et $\vec{B}$.
- **Sens :** il est donné par la règle des trois doigts de la main droite ; le pouce, l'index et le majeur sont disposés selon trois axes orthogonaux.

- le vecteur $q\vec{v}$ est donné par le pouce :
  - le pouce est de même sens que $\vec{v}$ si **q > 0** (***Doc.4 - a***),
  - le pouce est de sens contraire à $\vec{v}$ si **q < 0** (***Doc.4 - b***).
- le vecteur champ magnétique uniforme $\vec{B}$ est donné par l'index ;
- le vecteur force de Lorentz $\vec{F}_m$ est donné par le majeur.



Doc.4-a



Doc.4-b

Valeur de la force de Lorentz :

$$\|\vec{F}_m\| = |q|\,\|\vec{v}\|\,\|\vec{B}\|\,\sin\theta$$

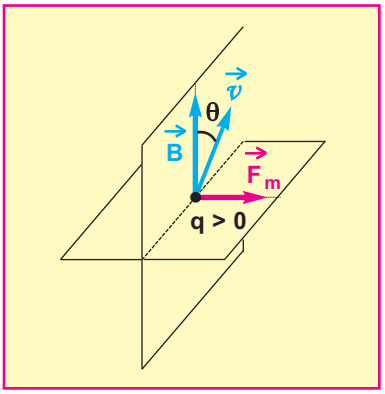
$\theta = (\vec{v}, \vec{B})$: angle non orienté (***Doc.5***) ;

$|q|$ en **C** ;

$\|\vec{v}\|$ en $\mathbf{m.s^{-1}}$;

$\|\vec{B}\|$ en **T** ;

$\|\vec{F}_m\|$ en **N**.



Doc.5

Remarques :

- Si les vecteurs $\vec{v}$ et $\vec{B}$ sont parallèles :

$\theta = 0°$ donc $\sin\theta = 0$, alors $\|\vec{F}_m\| = 0$; par conséquent la force de Lorentz est nulle : $\vec{F}_m = \vec{0}$ (***Doc.6 - a***).

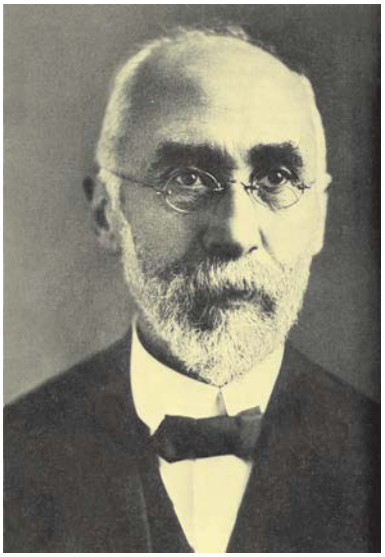
Le champ magnétique n'a pas d'effet sur la particule chargée en mouvement. La vitesse initiale n'est donc pas modifiée, la trajectoire est rectiligne.

- Si les vecteurs $\vec{v}$ et $\vec{B}$ sont perpendiculaires (***Doc.6 - b***) :

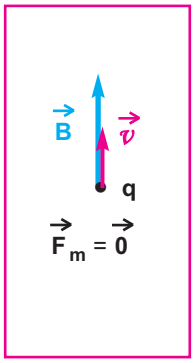
$\theta = 90°$ donc $\sin\theta = 1$, d'où $\|\vec{F}_m\| = |q|\,\|\vec{v}\|\,\|\vec{B}\|$.

Le faisceau d'électrons subit une déviation dans le plan formé par les vecteurs $\vec{v}$ et $\vec{F}_m$.

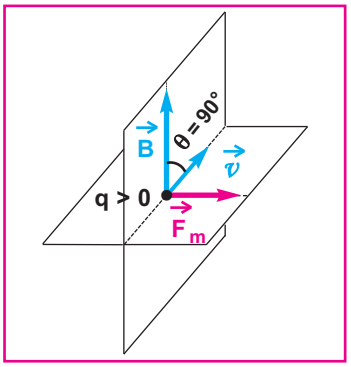
- Si $\vec{v} = \vec{0}$ alors $\vec{F}_m = \vec{0}$: Le champ magnétique n'a pas d'action sur une particule chargée au repos dans le repère considéré.



Lorentz (Hendrick Anton), physicien hollandais (Arnhem 1853 - Haarlem 1928).
De 1895 à 1900, il donne un premier modèle microscopique de la plupart des phénomènes électriques connus à cette époque.
En 1896, il a donné une première évaluation de la masse de l'électron.
En 1902, il a obtenu le Prix Nobel de physique.



Doc.6-a



Doc.6-b

2. Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme

Nous nous limitons au seul cas où le vecteur vitesse initiale $\vec{v}_0$ de la particule est perpendiculaire au vecteur champ magnétique $\vec{B}$ supposé uniforme.

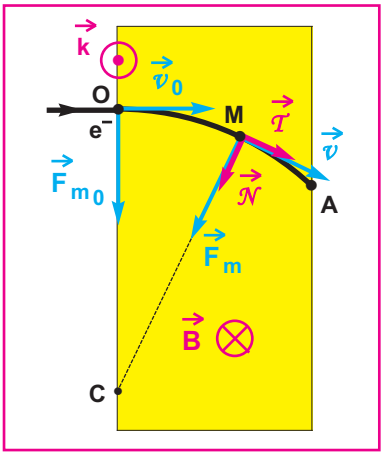
Un électron, corps ponctuel de masse **m** et de charge **q** = -**e**, pénètre en **O** dans le champ magnétique uniforme à un instant de date **t** = **0**.

Le mouvement est étudié dans le référentiel du laboratoire considéré comme galiléen. Le poids $\vec{P}$ de la particule est négligeable par rapport à la force de Lorentz $\vec{F}_m$.

2.1 . Etude dynamique

Considérons l'axe (**O** , $\vec{k}$) perpendiculaire au plan de la figure et de même direction que le vecteur $\vec{B}$ (***Doc.7***).

La force de Lorentz $\vec{F}_m$ est à chaque instant perpendiculaire au plan formé par le vecteur $\vec{B}$ et le vecteur vitesse $\vec{v}$.
Elle est donc contenue dans le plan de la figure.
Appliquons la deuxième loi de Newton au système {**électron**} : $\vec{F}_m = m\,\vec{a}$.



Doc.7

Le vecteur accélération $\vec{a}$ est de même sens que le vecteur force $\vec{F}_m$, alors sa projection sur l'axe (**O** , $\vec{k}$) est nulle :

$$a_z = 0, \text{ donc } a_z = \frac{dv_z}{dt} = 0 \text{ ce qui implique que } v_z = C^{te}.$$

Or le vecteur vitesse initiale $\vec{v}_0$ a une coordonnée nulle selon l'axe (**O** , $\vec{k}$) : $v_{0z} = 0$,

alors : $v_z = v_{0z} = 0$.

$$\text{Or } v_z = \frac{dz}{dt} = 0 \text{ donc } z = C^{te} ;$$

puisque à **t** = **0** on a $z_0 = 0$, alors **z** = **0** quel que soit l'instant de date **t**.

Ainsi, le mouvement de l'électron dans la région où règne le champ magnétique uniforme s'effectue dans le plan formé par le vecteur vitesse et le vecteur force de Lorentz.

La trajectoire de l'électron est incurvée dans le sens de la force de Lorentz $\vec{F}_m$ qui reste perpendiculaire aux vecteurs vitesse et champ magnétique ;
par conséquent l'accélération $\vec{a}$ est perpendiculaire au vecteur vitesse $\vec{v}$.

Orientons la trajectoire dans le sens du mouvement et exprimons le vecteur $\vec{a}$ dans le repère de Frenet (**M** , $\vec{\mathcal{T}}$, $\vec{\mathcal{N}}$) d'origine **M** qui est la position de l'électron à l'instant **t**.

$$\vec{a} = a_T\,\vec{\mathcal{T}} + a_N\,\vec{\mathcal{N}} = \frac{dv}{dt}\,\vec{\mathcal{T}} + \frac{v^2}{R}\,\vec{\mathcal{N}} \;;$$

R étant le rayon de courbure de la trajectoire.

La vitesse $\vec{v}$ est portée par la tangente à la trajectoire au point **M**, alors : $\vec{v} = v\,\vec{\mathcal{T}}$.

L'accélération $\vec{a}$ étant perpendiculaire à $\vec{v}$, alors elle est perpendiculaire à $\vec{\mathcal{T}}$.

Par conséquent : $a_T = \dfrac{dv}{dt} = 0$ donc $v = C^{te} = v_0$.

Dans la région où règne le champ magnétique uniforme, le mouvement de l'électron est uniforme.

L'accélération de l'électron a une composante tangentielle nulle : $a_T = 0$, elle est donc réduite à sa composante normale :

$$\vec{a} = a_N\,\vec{\mathcal{N}} \quad \text{d'où} \quad \|\vec{a}\| = a_N = \frac{v^2}{R} \;.$$

Or $\|\vec{F}_m\| = e\,\|\vec{v}_0\|\,\|\vec{B}\|$ et $\|\vec{F}_m\| = m\,\|\vec{a}\|$

d'où $e\,\|\vec{v}_0\|\,\|\vec{B}\| = m\,\dfrac{v^2}{R}$; on sait que $v = v_0$ d'où :

$$R = \frac{m\,\|\vec{v}_0\|}{e\,\|\vec{B}\|} = C^{te}$$: le rayon **R** de courbure est constant

Dans la région où règne le champ magnétique uniforme, le mouvement de l'électron est circulaire.

GÉNÉRALISATION :

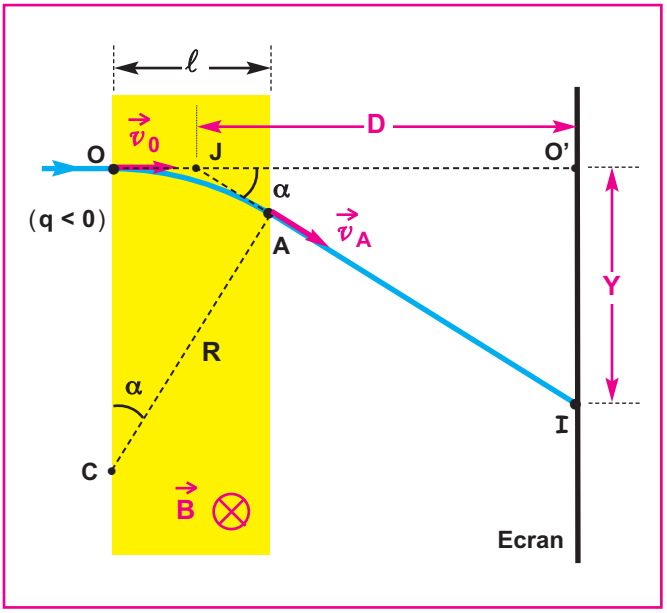
Dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$, une particule de masse **m** et de charge **q** arrivant avec une vitesse initiale $\vec{v}_0$ perpendiculaire à $\vec{B}$ prend un mouvement circulaire uniforme dans le plan perpendiculaire à $\vec{B}$, de rayon :

$$R = \frac{m \, \|\vec{v}_0\|}{|q| \, \|\vec{B}\|}$$

2.2 . Déviation et déflexion magnétique

Un faisceau d'électrons pénètre dans une région d'étendue ℓ où règne un champ magnétique uniforme $\vec{B}$.
La vitesse initiale $\vec{v}_0$ est perpendiculaire à $\vec{B}$.
Étant soumis à la force de Lorentz, les électrons décrivent une trajectoire circulaire de rayon $R = \dfrac{m \, \|\vec{v}_0\|}{e \, \|\vec{B}\|}$ avec une vitesse de valeur constante $\|\vec{v}_0\|$.

Au point **A**, les électrons quittent la région où règne le champ magnétique. D'après le principe d'inertie, en supposant l'effet du poids non appréciable, le mouvement des électrons devient rectiligne uniforme de vitesse ayant la valeur $\|\vec{v}_A\| = \|\vec{v}_0\|$ (***Doc.8***).



Doc.8

En dehors de la région où règne le champ magnétique uniforme, la partie rectiligne de la trajectoire est tangente au point **A** à sa partie circulaire $\overset{\frown}{OA}$, elle est donc perpendiculaire au rayon **CA**.
Les électrons finissent leur course au point d'impact **I** d'un écran (***Doc.8***).
Lorsque le champ magnétique $\vec{B}$ est nul, le faisceau d'électrons n'est pas dévié et arrive au point **O'** de l'écran.
On désigne par **J** le point d'intersection de la droite (**AI**) avec la droite (**OO'**).
L'écran se trouve à une distance **D** du point **J**.
La déviation du faisceau d'électrons est égale à l'angle α formé par les directions des vecteurs vitesses $\vec{v}_A$ et $\vec{v}_0$.
Les angles $\widehat{OCA}$ et $\widehat{O'JI}$ ont des côtés perpendiculaires deux à deux, ils sont égaux, donc : $\widehat{OCA} = \alpha$.

Cherchons l'expression de l'angle α :

on sait que $\overset{\frown}{OA} = R\,\alpha$;
lorsque l'étendue ℓ du champ est faible devant le rayon **R**,
on peut faire l'approximation $\overset{\frown}{OA} = \ell$;

$$\text{alors } \alpha = \frac{\ell}{R} = \frac{e\,\ell\,\|\vec{B}\|}{m\,\|\vec{v}_0\|}.$$

La déflexion magnétique **Y** est égale à la distance **O'I** :
Y = **O'I** . Cherchons son expression :

$$\text{tg}\,\alpha = \frac{O'I}{JO'} = \frac{Y}{D}.$$

Lorsque la déviation α est faible (α **< 10 deg**) alors :

tg $\alpha = \alpha$ (rad).

$$\text{tg}\,\alpha = \alpha = \frac{Y}{D} = \frac{e\,\ell\,\|\vec{B}\|}{m\,\|\vec{v}_0\|} \quad \text{donc} \quad Y = \frac{e\,\ell\,D\,\|\vec{B}\|}{m\,\|\vec{v}_0\|}.$$

Le champ magnétique uniforme s'obtient grâce à un courant passant dans des bobines, par exemple les bobines de déflexion d'un téléviseur ; la valeur du vecteur champ magnétique est proportionnelle à l'intensité **i** du courant qui parcourt les spires.
On peut donc énoncer le résultat suivant :

La déflexion magnétique est proportionnelle à l'intensité du courant qui parcourt les spires des bobines de déflexion.

3. Application: Le spectrographe de masse

J.J. Thomson (1913), Aston (1917), Dempster (1918) mirent au point divers appareils appelés spectromètres ou spectrographes de masse, permettant de trier des particules de charge massique $\frac{|q|}{m}$ différentes.

Tous ces appareils reposent sur le même principe que nous allons développer.

Un spectrographe comprend :

- une chambre d'ionisation où sont produits, avec une vitesse sensiblement nulle, des ions de masses différentes mais de même charge ;
- une chambre d'accélération où les ions sont accélérés par un champ électrique uniforme ;
- une chambre de déviation semi-circulaire où règne un champ magnétique uniforme ; dans cette zone, chaque ion est animé d'un mouvement circulaire uniforme de rayon qui dépend de sa masse ;
- un dispositif de détection où sont recueillis séparément les ions (plaques photographique sensible, collecteurs, compteur ...) (***Photo.6***) et (***Doc.9***).

Le spectrographe de masse permet :

- ✓ d'identifier les isotopes d'un élément ;
- ✓ de déterminer la composition isotopique d'un élément (pourcentage de chaque isotope) ;
- ✓ de mesurer la masse des isotopes ;
- ✓ d'analyser un mélange gazeux ou solide ;
- ✓ de déterminer la formule de composés organiques : lors de l'ionisation les molécules sont brisées en fragments ionisés dont on peut déterminer la masse, donc la nature.

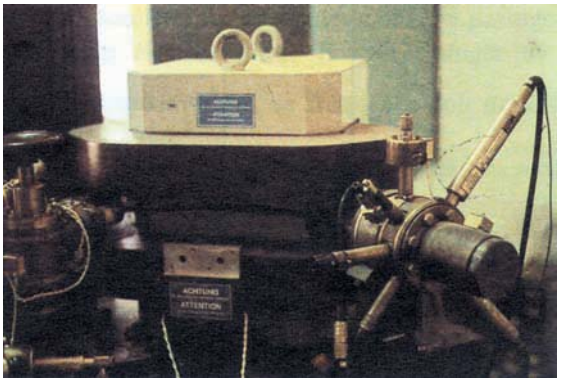
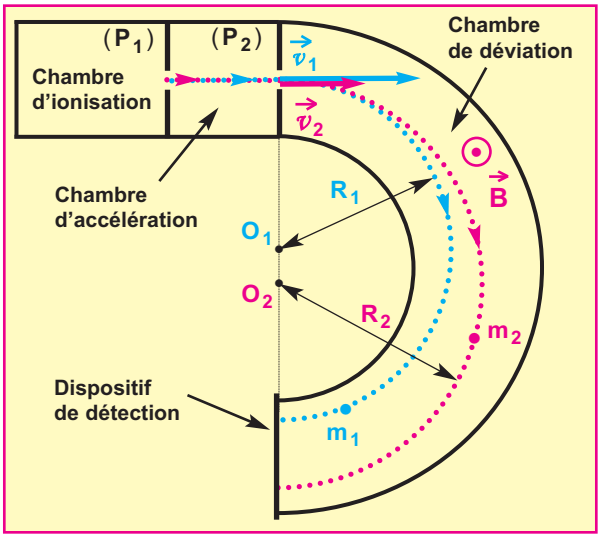


Photo.6 : SPECTROGRAPHE DE MASSE du CRMT de Marseille : à gauche les chambre d'ionisation et d'accélération, au centre l'aimant, à droite le dispositif de détection.



Doc.9 : SCHÉMA D'UN SPECTROGRAPHE DE MASSE

Deux ions de même charge positive **q** et de masses différentes m_1 et m_2, sont produits dans la chambre d'ionisation d'un spectrographe de masse .
Ces ions pénètrent dans la chambre d'accélération par le trou de la plaque (P_1) avec des vitesses négligeables.
Un champ électrique uniforme règne entre les plaques (P_1) et (P_2) maintenues sous une tension continue positive $U_{P_1P_2}$. Ils ont alors des mouvements rectilignes uniformément accélérés qui leur communiquent à la sortie par le trou de la plaque (P_2) des vitesses $\vec{v}_1$ et $\vec{v}_2$ de valeurs données par les relations :

$$\|\vec{v}_1\| = \sqrt{\frac{2\,q\,U_{P_1P_2}}{m_1}} \quad \text{et} \quad \|\vec{v}_2\| = \sqrt{\frac{2\,q\,U_{P_1P_2}}{m_2}} .$$

Ces relations montrent que la valeur de la vitesse est inversement proportionnelle à la racine carré de la masse.
Donc, à la sortie de la chambre d'accélération, l'ion le plus léger a le mouvement le plus rapide.
Ces ions entrent alors dans la chambre où règne un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ perpendiculaire aux vecteurs vitesses $\vec{v}_1$ et $\vec{v}_2$. Ils ont alors des mouvements circulaires uniformes de rayons R_1 et R_2 donnés par les relations :

$$R_1 = \frac{m_1\,\|\vec{v}_1\|}{q\,\|\vec{B}\|} \quad \text{et} \quad R_2 = \frac{m_2\,\|\vec{v}_2\|}{q\,\|\vec{B}\|} .$$

En tenant compte des expressions de $\|\vec{v}_1\|$ et de $\|\vec{v}_2\|$, on peut écrire :

$$R_1 = \frac{1}{\|\vec{B}\|}\sqrt{\frac{2\,U_{P_1P_2}}{q}\;m_1} \quad \text{et}$$

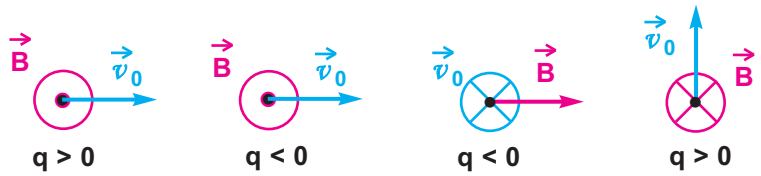
$$R_2 = \frac{1}{\|\vec{B}\|}\sqrt{\frac{2\,U_{P_1P_2}}{q}\;m_2} .$$

Puisque **q**, $U_{P_1P_2}$ et $\|\vec{B}\|$ sont constants, le rayon de courbure est proportionnel à la racine carrée de la masse de l'ion. Donc, l'ion qui a la masse la plus grande aura le rayon le plus grand ; c'est ainsi qu'on arrive à séparer les ions de même charge électrique mais de masses différentes.

Exercice résolu n° 1

Enoncé :

1- Déterminer la direction et le sens de la force magnétique $\vec{F}_m$ dans les cas suivants :



2- Calculer la valeur de la force de Lorentz s'exerçant sur des particules électrisées animées d'une vitesse $\vec{v}_0$ perpendiculaire au vecteur champ magnétique $\vec{B}$ dans les deux cas suivants :

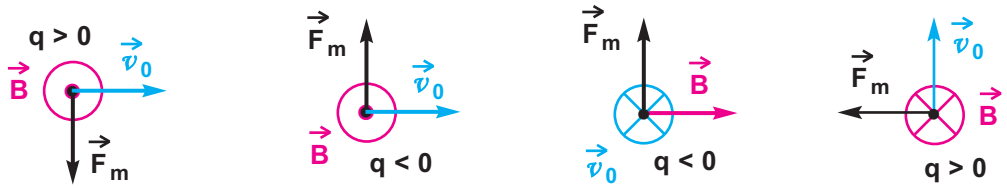
- la particule est un électron ;
- la particule est un noyau d'hélium $^{4}_{2}He^{2+}$ appelée particule α .

3- Montrer que le poids des particules est une force négligeable devant la force de Lorentz.
On donne : $e = 1{,}6 . 10^{-19}$ C ; $m_e = 9{,}1 . 10^{-31}$ kg ;

$m_\alpha = 6{,}65 . 10^{-27}$ kg ; $\|\vec{g}\| = 9{,}8\ m.s^{-2}$; $\|\vec{v}_0\| = 2 . 10^{5}\ m.s^{-1}$; $\|\vec{B}\| = 0{,}1$ T.

Solution

1- Utilisation de la règle des trois doigts de la main droite :



2- Calcul de la valeur de la force de Lorentz :

- **La particule est un électron :**

$\|\vec{F}_m\| = e\ \|\vec{v}_0\|\ \|\vec{B}\| = 1{,}6 . 10^{-19} . 2 . 10^{5} . 0{,}1 = 3{,}2 . 10^{-15}$ N.

$\boxed{\|\vec{F}_m\| = 3{,}2 . 10^{-15}\ N}$

- **La particule est l'ion $^{4}_{2}He^{2+}$:**

$\|\vec{F}_m\| = q\ \|\vec{v}_0\|\ \|\vec{B}\| = 2 . 1{,}6 . 10^{-19} . 2 . 10^{5} . 0{,}1 = 6{,}4 . 10^{-15}$ N.

$\boxed{\|\vec{F}_m\| = 6{,}4 . 10^{-15}\ N}$

3- Comparaison de la valeur de la force de Lorentz à celle du poids de la particule :

- **La particule est un électron :** $\dfrac{\|\vec{P}\|}{\|\vec{F}_m\|} = \dfrac{9{,}1 . 10^{-31} . 9{,}8}{3{,}2 . 10^{-15}} = 3 . 10^{-14} << 1$

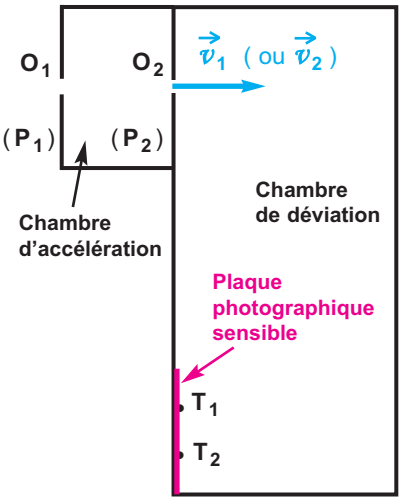
- **La particule est l'ion $^{4}_{2}He^{2+}$:** $\dfrac{\|\vec{P}\|}{\|\vec{F}_m\|} = \dfrac{6{,}65 . 10^{-27} . 9{,}8}{6{,}4 . 10^{-15}} = 1 . 10^{-11} << 1$

Les valeurs des poids de ces particules sont négligeables devant celles des forces de Lorentz.

EXERCICE RÉSOLU N° 2

ENONCÉ :

On introduit dans un spectrographe de masse des ions $^{A_1}_{3}Li^+$ et $^{A_2}_{3}Li^+$ (A_1 et A_2 désignent les nombres de masse) de même charge $e = 1{,}6.10^{-19}$ C et de masses respectives m_1 et m_2. Dans tout l'exercice, on néglige l'effet du poids devant ceux des forces électrique et magnétique.



1 - Dans la chambre d'accélération, les ions se présentent au point O_1 avec des vitesses pratiquement nulles ; ils sont accélérés par une tension continu $U_{P_1P_2} = U$ établie entre les plaques (P_1) et (P_2).

a - Représenter sur un schéma le champ électrique $\vec{E}$ règnant entre les plaques (P_1) et (P_2).

b - Préciser le signe de $U = U_{P_1P_2}$.

c - Etablir les expressions des valeurs $\|\vec{v}_1\|$ et $\|\vec{v}_2\|$ des vitesses acquises par les deux ions au point O_2 en fonction de U, e et des masses respectives m_1 et m_2.

2 - Les ions pénètrent ensuite dans une chambre de déviation où règne un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ perpendiculaire au plan de la figure.

a - Quel doit être le sens de $\vec{B}$ pour que les ions soient déviés vers la plaque photographique sensible ?

b - Chacune des particules décrit dans la région où règne le champ magnétique uniforme un demi-cercle avec une vitesse de valeur constante. Déterminer les expressions des rayons de ces trajectoires en fonction de U, e, $\|\vec{B}\|$ et de leurs masses respectives.

3 - Les ions arrivent sur la plaque photographique sensible et forment deux tâches, l'une à **9,3 cm** et l'autre à **10,0 cm** de la fenêtre d'admission O_2.

On donne : $U = 1000$ V, $\|\vec{B}\| = 0{,}12$ T, la masse d'un proton est sensiblement égale à la masse d'un neutron $m_p = m_n = 1{,}67.10^{-27}$ kg.

a - Calculer les masses m_1 et m_2.

b - En déduire les valeurs des nombres de masse A_1 et A_2 des deux particules.

SOLUTION	COMMENTAIRE
1 - a - La force électrique est $\vec{F}_e$ est dirigée de O_1 vers O_2, puisque $\vec{F}_e = e\,\vec{E}$, alors $\vec{E}$ a le même sens que $\vec{F}_e$. **b -** Le champ électrique est dirigé vers les potentiels décroissants donc $V_{(P_1)} > V_{(P_2)}$, donc $U = U_{P_1P_2} > 0$. **c -** Considérons la particule de masse m_1 ; appliquons au système {**particule de masse m_1**}, le théorème de l'énergie cinétique dans l'intervalle de temps correspondant aux positions de départ O_1 et d'arrivée O_2.	

$$\Delta \mathcal{E}_{C_{O_1 \to O_2}} = \mathcal{E}_{C_{O_2}} - \mathcal{E}_{C_{O_1}} = \mathcal{W}_{O_1 \to O_2}(\vec{F}_e)$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 - 0 = e\,U \quad \text{d'où} \quad \|\vec{v}_1\| = \sqrt{\frac{2\,e\,U}{m_1}}$$

de même : $\|\vec{v}_2\| = \sqrt{\dfrac{2\,e\,U}{m_2}}$

2- a - On applique la règle des trois doigts : le pouce a le sens de $\vec{v}_1$ (ou $\vec{v}_2$) car la charge des ions est positive, la force de Lorentz indiqué par le majeur est orientée vers la plaque sensible. Donc, le sens de $\vec{B}$ donné par l'index est sortant.

b - $R_1 = \dfrac{m_1 \|\vec{v}_1\|}{e\,\|\vec{B}\|}$ or $\|\vec{v}_1\| = \sqrt{\dfrac{2\,e\,U}{m_1}}$ alors

$$R_1 = \frac{1}{\|\vec{B}\|}\sqrt{\frac{2\,m_1\,U}{e}} \quad \text{de même :} \quad R_2 = \frac{1}{\|\vec{B}\|}\sqrt{\frac{2\,m_2\,U}{e}}$$

3 - a -

$$R_1^2 = \frac{1}{B^2}\,\frac{2\,m_1\,U}{e} \quad \text{d'où} \quad m_1 = \frac{e\,B^2\,R_1^2}{2\,U}.$$

De même, $m_2 = \dfrac{e\,B^2\,R_2^2}{2\,U}$.

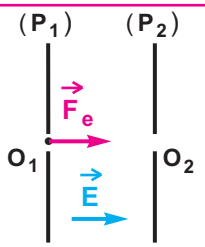
Applications numériques : $\boxed{m_1 = 9{,}96 \,.\, 10^{-27}\ \text{kg}}$

$\boxed{m_2 = 11{,}52 \,.\, 10^{-27}\ \text{kg}}$

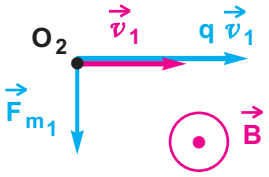
b - Calculs des nombres de masse des deux isotopes :

$$A_1 = \frac{9{,}96 \,.\, 10^{-27}}{1{,}67 \,.\, 10^{-27}} = 5{,}96 \quad \text{alors} \quad \boxed{A_1 = 6}$$

$$A_2 = \frac{11{,}52 \,.\, 10^{-27}}{1{,}67 \,.\, 10^{-27}} = 6{,}898 \quad \text{alors} \quad \boxed{A_2 = 7}$$



2- a -



2- b -

e, **U** et $\|\vec{B}\|$ étant constants le rayon de courbure est proportionnel à la racine carrée de la masse de l'ion : celui qui a la masse la plus grande aura le rayon le plus grand.

L'ESSENTIEL

- Une particule chargée, en mouvement dans une région de l'espace où règne un champ magnétique $\vec{B}$, est soumise à une force magnétique appelée force de Lorentz $\vec{F}_m$.

- Caractéristiques de la force de Lorentz :
  - La direction de $\vec{F}_m$ est à chaque instant perpendiculaire au plan formé par les vecteurs vitesse $\vec{v}$ et champ magnétique $\vec{B}$;
  - Le sens de $\vec{F}_m$ est donné par la règle des trois doigts de la main droite (le pouce a le sens de $q\,\vec{v}$; le sens de $\vec{B}$ est montré par l'index ; le sens de $\vec{F}_m$ est donné par le majeur).
  - La valeur de la force de Lorentz est : $\|\vec{F}_m\| = |q|\,\|\vec{v}\|\,\|\vec{B}\| \sin(\vec{v}, \vec{B})$.

- Une particule de charge **q** pénétrant avec une vitesse initiale $\vec{v}_0$ dans une région de l'espace où règne un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ perpendiculaire à $\vec{v}_0$ est animée d'un mouvement circulaire uniforme dans le plan perpendiculaire à $\vec{B}$; le rayon de sa trajectoire circulaire est :

$$R = \frac{m\,\|\vec{v}_0\|}{|q|\,\|\vec{B}\|}$$

EXERCICES

Je vérifie mes connaissances

Choisir la (ou les) proposition(s) correcte(s)

1- Une particule de vitesse $\vec{v}$ et de charge **q** pénètre dans une région où règne un champ magnétique $\vec{B}$ parallèle à $\vec{v}$.

a **-** Le champ magnétique n'a pas d'effet sur la particule chargée en mouvement.
b - La vitesse initiale n'est pas modifiée.
c **-** La trajectoire est rectiligne.
d **-** La trajectoire est circulaire.

2- Une particule de vitesse $\vec{v}$ et de charge **q** pénètre dans une région où règne un champ magnétique $\vec{B}$ perpendiculaire à $\vec{v}$.

a **-** Le champ magnétique n'a pas d'effet sur la particule chargée en mouvement.
b - La vitesse initiale n'est pas modifiée.
c **-** La trajectoire est rectiligne.
d **-** La trajectoire est circulaire.
e **-**la trajectoire de la particule s'incurve tout en demeurant dans un plan perpendiculaire à **B**
f-La valeur de la force de Lorentz est

$$\|\vec{F}_m\| = |q|\,\|\vec{v}\|\,\|\vec{B}\|$$

3- Une particule électrisée de masse **m** et de charge **q** négative, est en mouvement dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$.
On désigne par $\vec{v}$ la vitesse de la particule.
On néglige l'action de la pesanteur.

a **-** La trajectoire est toujours un cercle.
b **-** La trajectoire peut être une droite.
c **-** Le mouvement est toujours uniforme.
d **-** L'accélération de la particule peut être le vecteur nul.
e **-** La trajectoire est soit plane, soit rectiligne.
f **-** L'accélération de la particule est un vecteur normal à $\vec{v}$.
g- La trajectoire peut être une parabole.

4- Un électron ayant une vitesse $\vec{v}_0$ est soumis à l'action d'un champ magnétique uniforme $\vec{B}$. Il décrit alors une trajectoire circulaire.

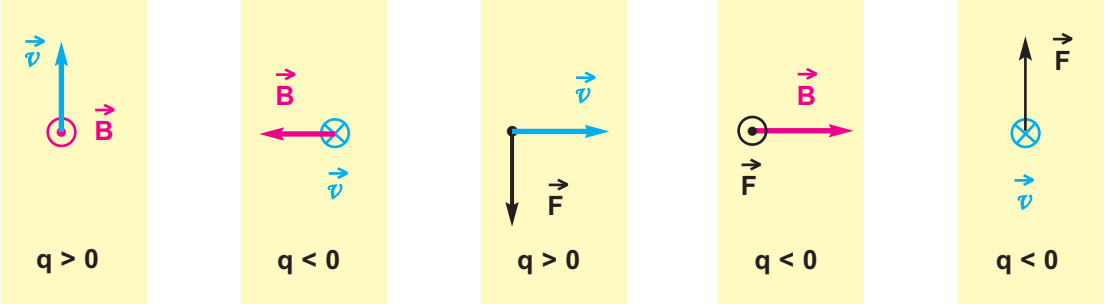
a- Le mouvement de l'électron est circulaire uniforme.
b- L'électron " n'a pas d'accélération".
c- La vitesse initiale $\vec{v}_0$ de l'électron est colinéaire à $\vec{B}$.
d- Le rayon du cercle augmente si l'on fait croître la valeur de $\vec{B}$, $\vec{v}_0$ étant constant.

5- On étudie l'action d'un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ sur des noyaux d'hélium ${}^{4}_{2}He^{2+}$ et sur des protons ${}^{1}_{1}H^{+}$ de vitesses orthogonales à $\vec{B}$.
On admettra que les noyaux d'hélium(α) sont quatre fois plus lourds que les protons(p).

a-Les rayons R_α et R_p des trajectoires des noyaux d'hélium et des protons sont égaux lorsqu'ils ont même vitesse
b- Le rayon R_α de la trajectoire. des noyaux d'hélium est le double du rayon R_p de la trajectoire des protons lorsqu'ils ont même vitesse.
c- Les rayons R_α et R_p des trajectoires des noyaux d'hélium et des protons sont égaux lorsque la vitesse des protons est le double de celle des noyaux d'hélium.

J'applique mes connaissances et je raisonne

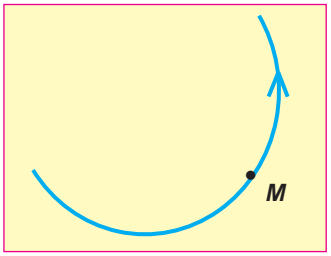
Ex-1- Tracer le vecteur manquant ($\vec{F}$, $\vec{B}$ ou $\vec{v}$) dans chaque cas ci-dessous.



Ex-2- Dans une chambre à bulles, la trajectoire des particules est matérialisée grâce à l'apparition de petites bulles gazeuses. On a observé la trajectoire circulaire d'une particule chargée négativement. Le champ magnétique est perpendiculaire au plan de la trajectectoire.

a- Tracer, en **M** le vecteur force agissant sur cette particule.

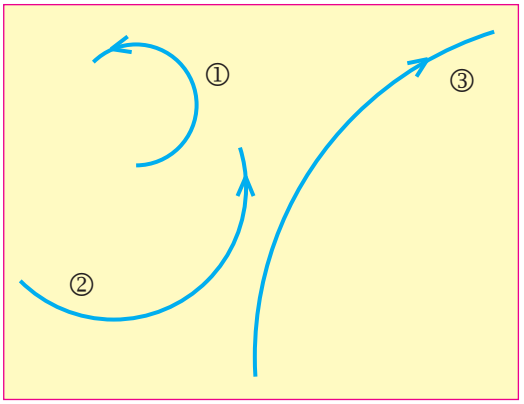
b- En déduire le sens du vecteur champ magnétique.



Ex-3- On a obtenu, dans une chambre à bulles, les trajectoires de trois particules électrisées. En valeur absolue, la charge de ces trois particules est la même.

a- La particule (**1**) étant chargée positivement, donner les signes des charges des particules (**2**) et (**3**).

b- En supposant que les trois particules ont la même vitesse, classer ces particules par masse croissante.



Ex-4- Soit un espace $\mathcal{E}$ muni d'un repère (**O** , $\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$) dans lequel règne un champ magnétique $\vec{B}$ ayant pour coordonnées :

$B_x = 0$; $B_y = 0$; $B_z = 6.10^{-4}$ T.

Un électron pénètre dans cet espace avec une vitesse initiale $\vec{v}$ ayant pour coordonnées :

$v_x = 4.10^{6}$ m.s^{-1} ; $v_y = 0$; $v_z = 0$.

1- Montrer que la trajectoire de l'électron est circulaire.

2- Calculer le rayon de la trajectoire.

3- Tracer ce cercle dans le repère (**O** , $\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$)

4- Calculer la période de ce mouvement.

On donne :

- masse de l'électron : $m = 9{,}1.10^{-31}$ kg ;
- charge de l'électron : $-e = -1{,}6.10^{-19}$ C.

Ex-5- Une particule chargée, lancée dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$, avec une vitesse $\vec{v}$ perpendiculaire à $\vec{B}$.

1- Montrer que la période **T** de révolution de cette particule est indépendante de sa vitesse.

2- On considère un proton de masse $m_p = 1{,}67 . 10^{-27}$ kg et de charge $e = 1{,}6 . 10^{-19}$ C. Calculer la période de révolution de ce proton sachant que $\|\vec{B}\| = 4 . 10^{-5}$ T.

3- La vitesse du proton considéré est $\|\vec{v}\| = 15000\ m . s^{-1}$. Calculer le rayon du cercle décrit par cette particule.

Ex-6- Un faisceau homocinétique d'électrons de vitesse $\|\vec{v}_0\| = 3 . 10^6\ m . s^{-1}$ pénètre dans un champ magnétique uniforme de valeur $\|\vec{B}\| = 10^{-3}$ T, $\vec{B}$ et $\vec{v}_0$ sont orthogonaux.

1- Calculer la valeur de la force $\vec{F}$ de Lorentz.

2- Calculer la valeur de l'accélération des électrons.

3- Calculer le rayon de la trajectoire.

4- Représenter $\vec{B}$, $\vec{v}_0$ et $\vec{F}$ sur un schéma.

Ex-7- Dans la chambre d'accélération d'un spectrographe de masse, on introduit au point **S**, des particules de charge **q**, de masse **m** et ayant une vitesse négligeable. Elles sont accélérées par la tension **U** entre les plaques (P_1) et (P_2). Au point **O**, chaque particule est animée d'une vitesse $\vec{v}_0$. Au delà de (P_2) le champ électrique est nul et il règne un champ magétique uniforme $\vec{B}$ perpendiculaire au plan de la figure (***Doc.10***).

1- Donner l'expression de $\|\vec{v}_0\|$ en fonction de **q**, **m** et **U**.

2- Rappeler l'expression du rayon R_0 en fonction de $\|\vec{v}_0\|$, **m**, **q** et $\|\vec{B}\|$ et exprimer ce rayon en fonction de **q**, **m**, $\|\vec{B}\|$ et **U**.

3- Les particules étudiées étant les ions des isotopes du zinc, $^{68}Zn^{2+}$ de masse $m_1 = 113{,}56 . 10^{-27}$ kg et $^{70}Zn^{2+}$ de masse $m_2 = 116{,}90 . 10^{-27}$ kg.

Le point d'impact des ions $^{68}Zn^{2+}$ se trouve au point M_1 tel que $OM_1 = 20$ cm.

a- Déterminer le sens de **B**.

b- M_2 étant le point d'impact sur (P_2) des ions $^{70}Zn^{2+}$, calculer la distance OM_2.

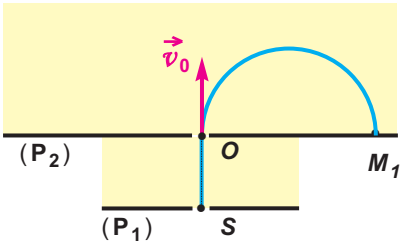
4- Pour identifier des ions désignés par X_1, X_2 et X_3, portant chacun une charge de valeur absolue $|q| = e = 1{,}6 . 10^{-19}$ C, on les introduit successivement en **O** avec la même vitesse $\vec{v}_0$ que les ions $^{68}Zn^{2+}$. Les trajectoires obtenues ont respectivement les rayons $R_1 = 5{,}59$ cm ; $R_2 = 10{,}30$ cm ; $R_3 = 6{,}76$ cm (***Doc.11***).

a- Quel est le signe de la charge portée par chacun de ces ions ?

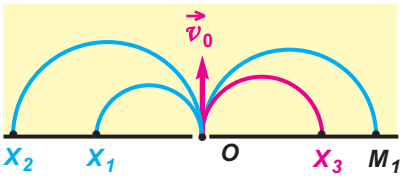
b- Déterminer les masses m_{X_1}, m_{X_2} et m_{X_3} de ces ions.

c- Identifier les ions X_1, X_2 et X_3 dans la liste suivante : $^{39}K^+$; $^{23}Na^+$; $^{35}Cl^-$; $^{19}F^-$.

On rappelle que la masse d'un nucléon est égale à $1{,}67 . 10^{-27}$ kg.



Doc.10



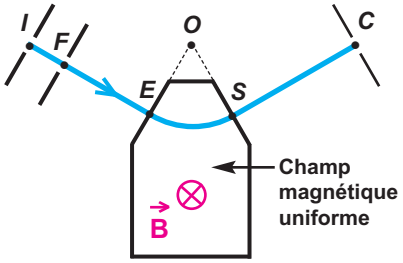
Doc.11

Ex-8- Dans le spectrographe de masse schématisé ci-après (***Doc.12***), des ions de strontium Sr^{2+} de charge $q = 3{,}2.10^{-19}$ C, de masse m, sortent en ***I*** d'une chambre d'ionisation avec une vitesse négligeable.

Ils sont accélérés entre ***I*** et ***F*** par une tension **U** continue et réglable.

Ils sont ensuite déviés entre ***E*** et ***S*** par un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ perpendiculaire au plan de la figure et de valeur $\|\vec{B}\| = 0{,}16$ T.

Ils sont enfin recueillis à l'entrée ***C*** d'un collecteur. Dans cet appareil tous les ions que l'on veut recueillir en ***C*** doivent suivre la même trajectoire ***IFESC***.



Doc.12

La portion ***ES*** de la trajectoire est un arc de cercle de centre ***O*** et de rayon **R = 0,70 m**.

1- Etablir l'expression de la tension **U** en fonction de **q**, **R**, **m** et $\|\vec{B}\|$ pour que l'ion Sr^{2+} suive la trajectoire imposée.

2- On utilise ce spectrographe de masse pour identifier les isotopes du strontium ; tous les atomes de strontium s'ionisent sous forme Sr^{2+}.

a- On place d'abord dans la chambre d'ionisation du strontium 88 de masse $m = 145{,}42.10^{-27}$ kg.
Calculer la valeur à donner à **U** pour que les ions $^{88}Sr^{2+}$ soient collectés en ***C***.

b- On place maintenant dans la chambre d'ionisation un mélange d'isotopes du strontium. Pour les recueillir successivement en ***C***, il faut donner à **U** différentes valeurs comprises entre **13930 V** et **14440 V**.
Entre quelles valeurs se situent les nombre de masse de ces isotopes ?

Ex-9- Dans une chambre d'ionisation (C_1), on produit simultanément des ions $^{12}_{6}C^{+}$ et $^{24}_{12}Mg^{2+}$ de masses respectives $m_1 = 20{,}04.10^{-27}$ kg et $m_2 = 40{,}08.10^{-27}$ kg, de charges respectives q_1 et q_2.

On donne : $e = 1{,}6.10^{-19}$ C.

Ces ions pénètrent, sans vitesse initiale, par le point ***I*** dans une deuxième chambre (C_2) où règne un champ électrique uniforme $\vec{E}$ produit par deux plaques parallèles (P_1) et (P_2) entre lesquelles est maintenue une tension $U_{P_1P_2} = 40000$ V (***Doc.13***).

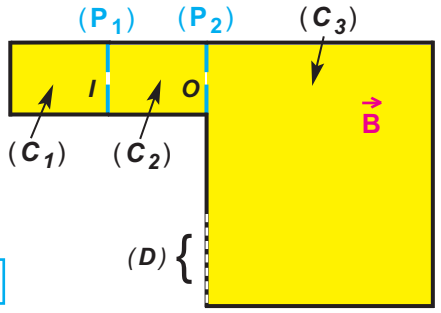
1- Calculer les valeurs $\|\vec{v}_1\|$ et $\|\vec{v}_2\|$ des vitesses acquises par les deux ions au point ***O*** ; le résultat trouvé est-il prévisible ?

2- Les ions $^{12}_{6}C^{+}$ et $^{24}_{12}Mg^{2+}$, animés des vitesses $\vec{v}_1$ et $\vec{v}_2$ de valeurs, pénètrent dans une troisième chambre(C_3)où règne un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ de direction perpendiculaire au plan de la figure.

a- Préciser sur le schéma le sens de $\vec{B}$ pour que les ions parviennent dans le domaine (***D***).

b- Montrer que dans (C_3), les ions ont un mouvement circulaire uniforme dans le plan de la figure.

c- Calculer et comparer les rayons R_1 et R_2 correspondant aux ions carbone et magnésium ; on donne $\|\vec{B}\| = 0{,}25$ T.
Peut-on, dans ces conditions, séparer ces ions ?



Doc.13

Ex-10- Une particule de charge **q**, de masse **m**, traverse une chambre de Wilson dans laquelle règne un champ magnétique uniforme $\vec{B}$, perpendiculaire au plan de la figure et orienté vers l'avant de ce plan.
La particule ralentit en franchissant la surface *(AC)*.
Le cliché matérialisant la trajectoire permet de dire que la particule a décrit des arcs de cercles de rayons R_1 et R_2 respectivement dans les zones **I** et **II** ; les mesures ont donné

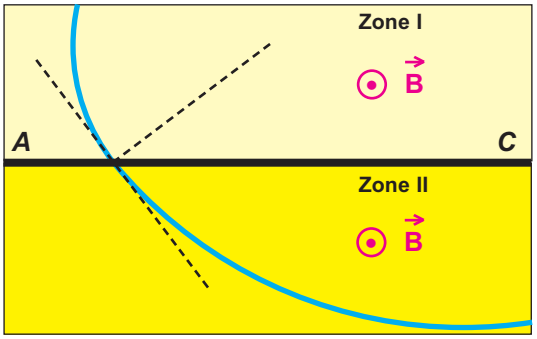
$$R_1 = \frac{R_2}{3} = 14 \text{ cm}$$ (*Doc.14*).

1- Etablir l'expression de R_1 et R_2 en fonction de **q**, **m**, $\|\vec{B}\|$ et les valeurs $\|\vec{v}_1\|$ et $\|\vec{v}_2\|$ des vitesses de la particule.

2- Dans quel sens se déplace la particule (de **I** vers **II** ou de **II** vers **I**) ? Quel est le signe de la charge de la particule ?

3- Calculer la charge massique $\frac{q}{m}$ et identifier la particule.
Données :
charge élémentaire : $e = 1{,}6 . 10^{-19}$ C ;
masse d'un nucléon : $m_0 = 1{,}67 . 10^{-27}$ kg ;
valeur du champ magnétique : $\|\vec{B}\| = 0{,}5$ T ;
valeur de la vitesse d'entrée dans le dispositif : $\|\vec{v}_0\| = 2 . 10^7 \text{ m.s}^{-1}$;

on néglige la masse des électrons.



Doc.14

Ex-11-Etude d'un document scientifique : Physique et sport

À l'occasion des Jeux Olympiques de l'été 1996, une revue scientifique faisait état des dernières méthodes de dépistage du dopage. On y décrivait une nouvelle méthode en voie d'homologation, mettant en jeu la spectrométrie de masse.
Le dopage par les stéroïdes* anabolisants administrés aux sportifs pour que leurs muscles se développent serait assez facile à dépister. Pourtant des stéroïdes anabolisants, notamment la testostérone, sont naturellement présents dans l'organisme : comment faire la différence entre l'hormone naturelle et l'anabolisant interdit ?
On propose dans cette méthode de mesurer le rapport des concentrations en carbone ^{13}C et en carbone ^{12}C du dioxyde de carbone provenant de la combustion de l'hormone extraite d'un prélèvement d'urine de l'athlète contrôlé, par la technique de la spectrométrie de masse. Le déplacement des particules dans les chambres d'accélération et de déviation s'effectue dans le vide.L'analyse des impacts a permis de dénombrer les atomes ^{12}C et ^{13}C contenus dans les ions arrivés sur le détecteur pendant une certaine durée.
Les résultats des comptages $N_1(^{12}C)$ et $N_2(^{13}C)$ effectués à partir des échantillons d'urine d'un athlète sont comparés à des comptages réalisés à partir d'un étalon standard international.

**Les stéroïdes anabolisants sont des médicaments fabriqués chimiquement*
***Les jeunes qui consomment des stéroïdes s'exposent à une conséquence extrêmement grave... qui peut les empêcher d'atteindre leur pleine croissance physique.*

1- Pourquoi le ^{12}C et le ^{13}C sont des isotopes ?
2- Expliquer le principe de fonctionnement d'un spectrographe de masse.
3- Comment peut-on dépister le dopage par les stéroïdes anabolisants d'un athlète ?

POUR EN SAVOIR PLUS

LES ACCÉLÉRATEURS DE PARTICULES

Les accélérateurs de particules sont des instruments qui utilisent des champs électriques et/ou magnétiques pour amener des particules chargées électriquement à des vitesses élevées.
Les accélérateurs sont un des moyens mis à la disposition des physiciens pour étudier les propriétés des particules élémentaires.
On en distingue deux grandes catégories : les accélérateurs linéaires et les accélérateurs circulaires.

Les principaux ingrédients nécessaires pour accélérer les particules sont les champs électriques et magnétiques et un vide de bonne qualité.

La classification des accélérateurs de particules peut suivre l'historique des technologies employées : par exemple, l'accélérateur électrostatique, les machines " tandem ",
les accélérateurs linéaires à hyperfréquences, les cyclotrons (dont le cyclotron isochrone et le bêtatron), les synchrotrons (dont le synchrocyclotron, les synchrotrons à protons, à électrons), les anneaux des collisions (anneaux électron-positron, anneaux de collision à protons). Bien sûr, chaque machine peut être associée aux découvertes historiques qu'elles ont permises.
Classification par l'énergie :

-basses énergies de 10 à100 MeV;
-énergie moyenne de 100 à1 000 MeV;
-hautes énergies plus de 1 GeV et au delà du TeV (un téraélectron-volt = 10^{12} eV).

D'autres classifications sont possibles selon les applications de l'accélérateur : industrie, médecine, recherche fondamentale, exploration et compréhension des composants élémentaires de la matière, de l'énergie et de l'espace et du temps.

Plus simplement, ces très grandes machines des XXe et XXIe siècles peuvent être classées selon la géométrie des trajectoires de l'accélération : linéaire ou circulaire.

Le caractère fondamental de nombreux accélérateurs modernes est la présence d'un champ magnétique enroulant les trajectoires sous forme de cercles ou de spirales. On peut les appeler "circulaires ".

D'autres accélèrent en ligne droite, on les appelle " rectilignes ou linéaires ".

De très nombreux petits accélérateurs linéaires sont utilisés en médecine (radiothérapie anti-tumorale) ...

www.science-et-vie.net

QUELQUES APPLICATIONS DE LA SPECTROMÉTRIE DE MASSE

La spectrométrie de masse, à l'heure actuelle, présente un spectre très vaste d'applications qui s'étend de la recherche fondamentale au contrôle des processus de production industrielle. Seules les principales d'entre elles sont regroupées ici par domaine scientifique ou technique.

Sciences de la terre. Ce terme désigne un vaste domaine où la spectrométrie de masse est couramment employée, principalement à la mesure des abondances élémentaires et des rapports d'abondances isotopiques : géologie, océanographie, glaciologie, volcanologie, physique de l'atmosphère, étude des météorites, planétologie, etc. Des procédés particuliers, mis au point dans ce but, ont aussi trouvé des applications dans d'autres domaines.

Dilution isotopique. C'est une méthode de mesure des abondances élémentaires dans les échantillons géologiques. Pour doser un élément dont les rapports d'abondance isotopique sont connus, on ajoute à l'échantillon une quantité connue de cet élément dont la composition isotopique a été modifiée et mesurée. La mesure des rapports isotopiques du mélange permet de calculer la quantité de l'élément présent dans l'échantillon. Ces dosages sont très importants pour suivre les évolutions à long terme et dater les événements géologiques (géochronologie).

Chimie. L'analyse élémentaire et isotopique est largement utilisée que ce soit en chimie minérale ou organique. De nombreux domaines de recherche et de processus industriels font appel à ces techniques d'analyse quantitative : industrie des parfums, pétrochimie, chimie des polymères, etc.

Applications biomédicales. Dans ce domaine également les applications de la spectrométrie de masse sont multiples. Une des plus importantes est l'analyse de la structure des biomolécules et de leur identification, notamment les protéines (séquençage des acides aminés). En médecine, quand cela est possible, le marquage isotopique de molécules évite l'ingestion de molécules marquées par un radio-isotope par le patient pour le suivi des transferts biologiques à travers les organes. Les principaux domaines d'utilisation sont l'analyse des gaz respiratoires, des gaz dissous dans le sang, la mise au point des traitements du cancer. Ces techniques sont aussi largement utilisées en pharmacologie, en toxicologie et pour l'identification des micro-organismes.

Contrôle de l'environnement. L'analyse élémentaire et bactériologique de l'air et des aérosols qu'il contient, l'analyse de l'eau, le suivi des pollutions par les pesticides ou de nombreux processus industriels, l'optimisation des dispositifs polluants tels que les moteurs automobiles font largement appel à la spectrométrie de masse.

Activités diverses. Bien d'autres domaines d'activités sont redevables à la spectrométrie de masse. Les effets isotopiques dans les processus naturels permettent la détermination de l'origine des matériaux ($^{13}C/^{12}C$) ou de pollutions ($^{34}S/^{32}S$, $^{15}N/^{14}N$....). Ces techniques sont aussi utilisées pour la datation et l'identification d'objets historiques (archéologie), d'oeuvres d'art (muséographie), etc. Elles sont en usage dans la gestion des problèmes de société : détection des drogues, détection des fraudes, investigation de la police scientifique...

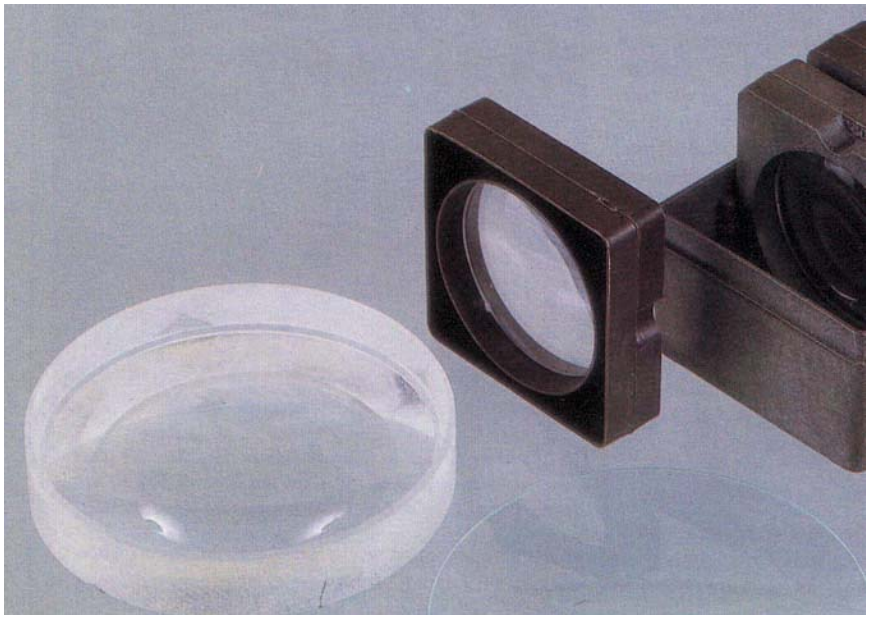
http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/Meca/Charges/q_dans_B2.html
http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/divers/specmass.html

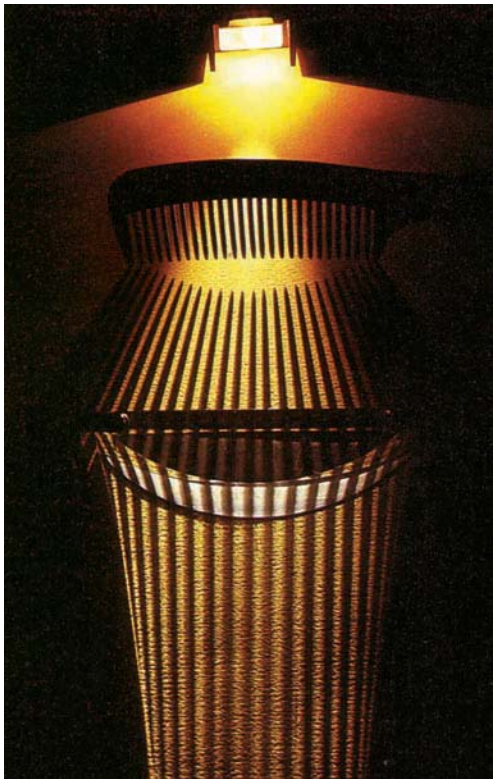
SYSTEMES OPTIQUES ET IMAGES

Chapitre 9 - LENTILLES MINCES

Chapitre 10 - INSTRUMENTS D'OPTIQUE

9 LENTILLES MINCES





Quel est la nature de chaque lentille ?
Quel est leur rôle ?

OBJECTIFS

- Classer les lentilles en lentilles convergentes et lentilles divergentes.
- Déterminer graphiquement la position de l'image d'un point objet, donnée par une lentille convergente.
- Appliquer la relation de conjugaison des lentilles minces convergentes.
- Réaliser des montages permettant de mesurer la distance focale d'une lentille.

LENTILLES MINCES

1. Généralités

1.1. Système optique

Un système optique est un ensemble de milieux transparents séparés par des surfaces polies.

Exemples : loupe, oculaire, prisme, jumelles, etc...

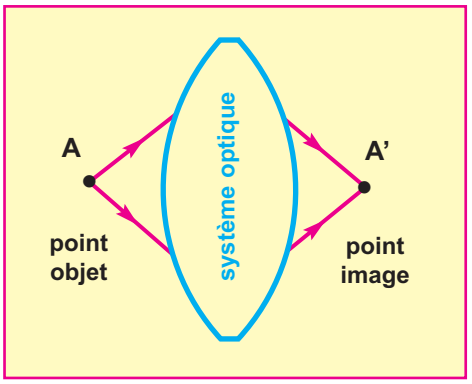
IMAGE D'UN POINT LUMINEUX

Soit un point lumineux **A** appelé point objet qui envoie des rayons lumineux sur un système optique (**S**).

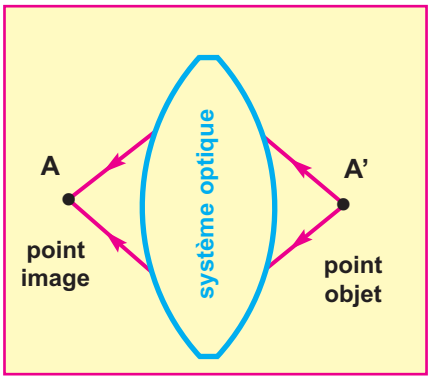
Si les rayons sortants passent tous par un même point **A'**, **A'** est appelé point image de **A** (***Doc.1-a***).

L'application du principe du retour inverse de la lumière montre que si **A'** est le point objet, et si on inverse le sens de la marche de la lumière, **A** sera le point image (***Doc.1-b***).

A' et **A** sont dits deux points conjugés par rapport à (**S**).



Doc.1-a

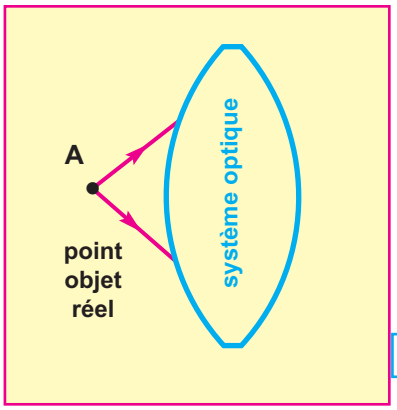


Doc.1-b

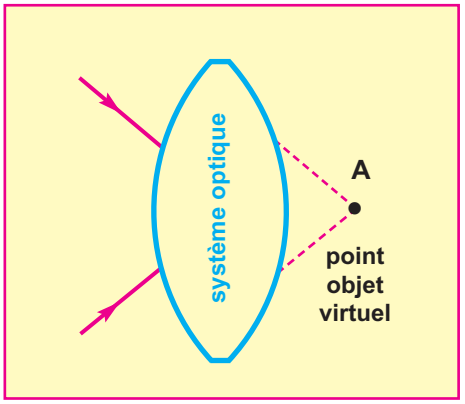
LES DEUX TYPES D'OBJETS ET D'IMAGES

Un point objet réel correspond au point de départ des rayons arrivant sur le système optique (***Doc.2-a***).

Un point objet virtuel correspond au point de concours des prolongements des rayons arrivant sur le système optique (***Doc.2-b***).



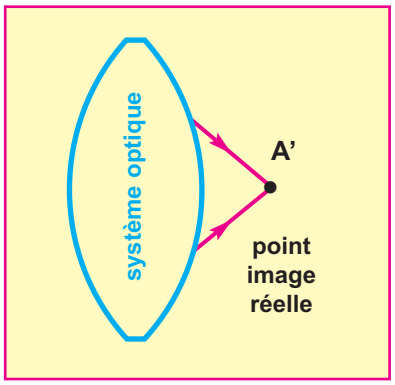
Doc.2-a



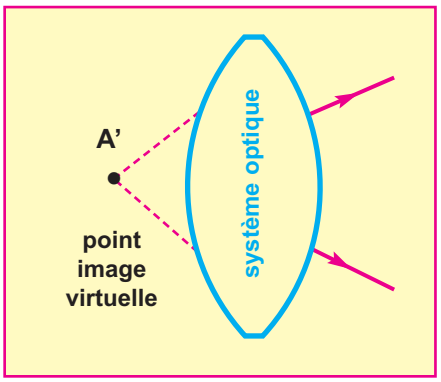
Doc.2-b

Un point image réelle correspond au point de concours des rayons sortant du système optique (***Doc.2-c***).

Un point image virtuelle correspond au point de concours des prolongements des rayons sortant du système optique (***Doc.2-d***).



Doc.2-c



Doc.2-d

REMARQUE

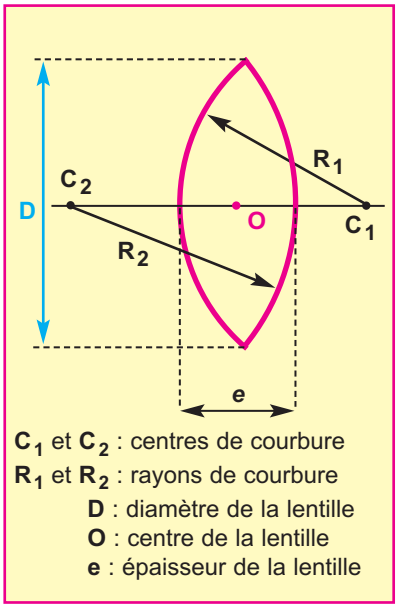
Une image réelle peut être recueillie sur un écran placé à l'endroit où elle se trouve.

Une image virtuelle est visible à l'œil nu mais ne peut pas être recueillie sur un écran.

1.2. Lentilles sphériques minces

Une lentille sphérique est un milieu transparent limité par deux surfaces dont l'une au moins n'est pas sphérique (***Doc.3-a***).

Une lentille sphérique est dite mince si son épaisseur ***e*** au centre est faible devant son diamètre **D** (ou bien ***e*** petite devant les rayons de courbure $\mathbf{R_1}$ et $\mathbf{R_2}$ de ses faces).

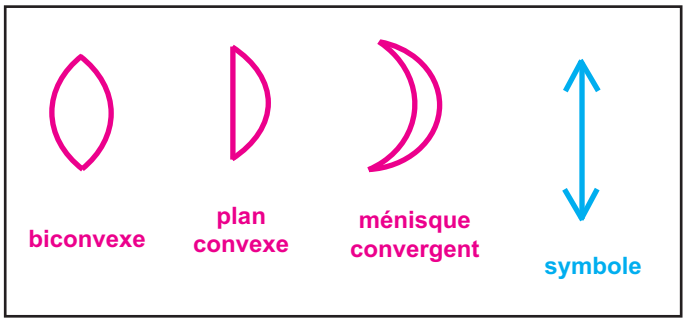


Doc.3-a

CLASSIFICATION DES LENTILLES SHÉRIQUES MINCES

- **Les lentilles minces à bords minces :**

l'épaisseur au centre est plus grande que sur le bord ; ce sont des lentilles convergentes (***Doc.3-b***).

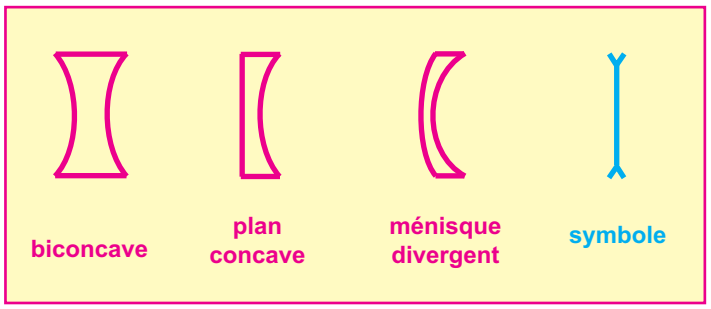


Doc.3-b

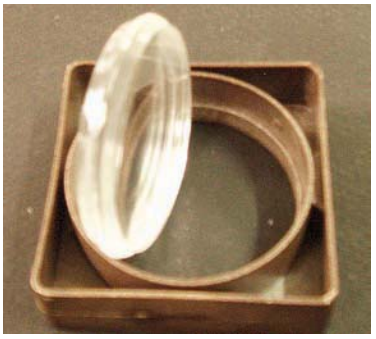
Lentilles minces à bords minces

- **Les lentilles minces à bords épais :**

l'épaisseur au centre est plus petite que sur le bord ; ce sont des lentilles divergentes (***Doc.3-c***).



Doc.3-c



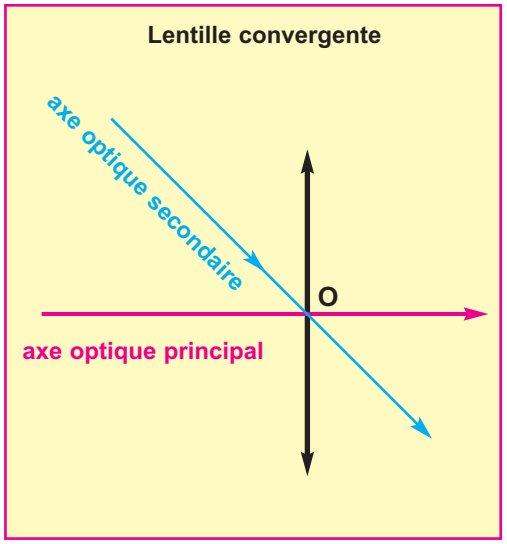
Lentilles minces à bords épais

2. Caractéristiques d'une lentille

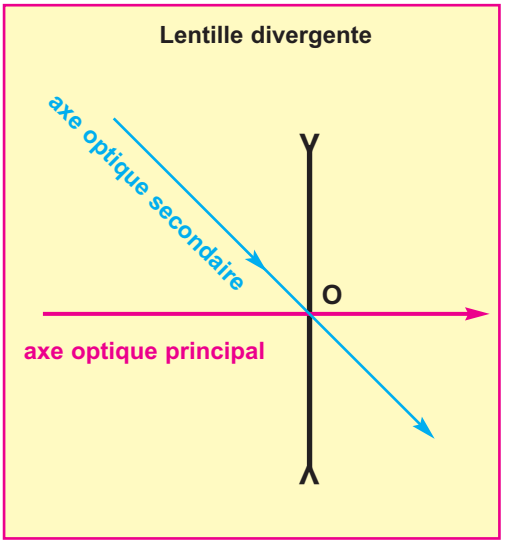
2.1. Centre optique et axes optiques d'une lentille

Tout rayon passant par le centre **O** de la lentille n'est pas dévié : **O** est le centre optique de la lentille.

L'axe optique principal est la droite joignant les centres de courbures des faces de la lentille.
Un axe optique secondaire est toute autre droite passant par le centre optique de la lentille (***Doc.4-a***) et (***Doc.4-b***).



Doc.4-a



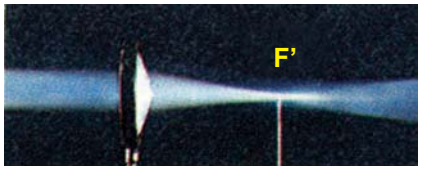
Doc.4-b

2.2. Foyers et plans focaux d'une lentille

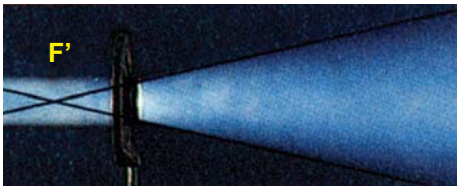
Foyer image et plan focal image

ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE :

- Eclairons une lentille (L_1) convergente et une lentille (L_2) divergente avec un faisceau lumineux parallèle à leur axe optique principal.

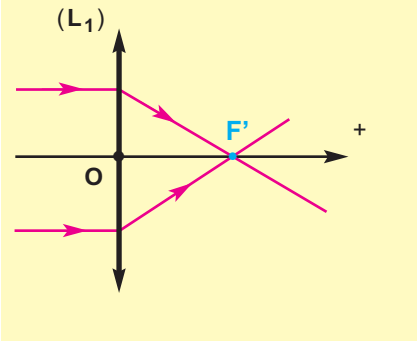


Foyer image F' d'une lentille convergente



Foyer image F' d'une lentille divergente

LENTILLE CONVERGENTE (L_1)

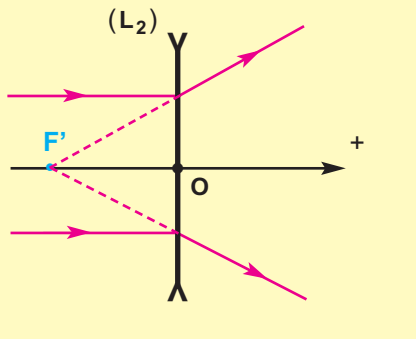


Doc.5-a

Le faisceau lumineux émergent converge vers une région pratiquement ponctuelle **F'**, située sur l'axe optique principal de la lentille (***Doc.5-a***).

F' est un foyer principal image.

LENTILLE DIVERGENTE (L_2)

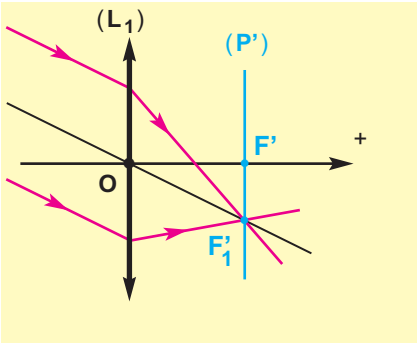


Doc.5-b

Le faisceau lumineux émergent diverge à partir d'une région pratiquement ponctuelle **F'**, située sur l'axe optique principal de la lentille et appelée foyer principal image (***Doc.5-b***).

F' est un foyer principal image.

- Eclairons maintenant les deux lentilles (L_1) et (L_2) avec un faisceau lumineux parallèle à l'un de leurs axes optiques secondaires.

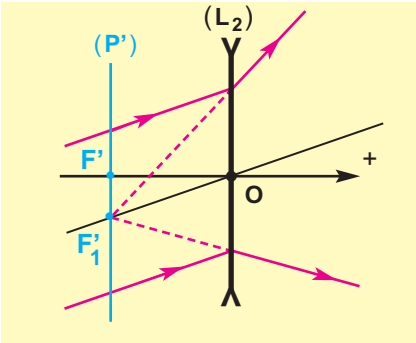


Le faisceau lumineux émergent converge vers une région pratiquement ponctuelle F'_1, située dans un plan (**P'**) perpendiculaire à l'axe principal et passant par le foyer image principal **F'** (***Doc.6-a***).

F'_1 est un foyer image secondaire

(**P'**) est le plan focal image.

Doc.6-a



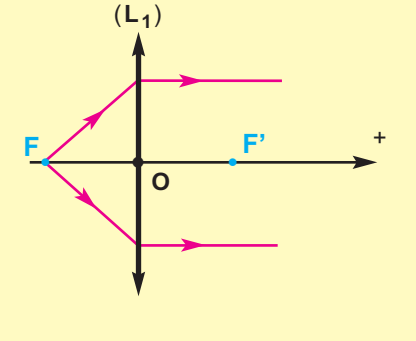
Le faisceau lumineux émergent diverge à partir d'une région pratiquement ponctuelle F'_1, située dans un plan (**P'**) perpendiculaire à l'axe principal et passant par le foyer image principal **F'** (***Doc.6-b***).

F'_1 est un foyer image secondaire

(**P'**) est le plan focal image.

Doc.6-b

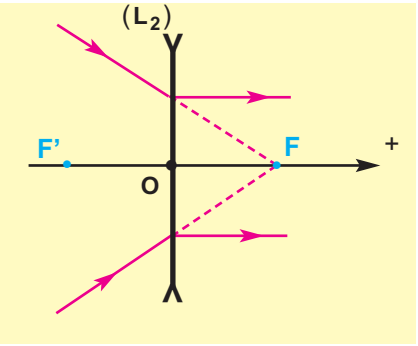
FOYER OBJET ET PLAN FOCAL OBJET



Doc.7-a

Plaçons une source ponctuelle en un point **F** de l'axe principal, symétrique de **F'** par rapport à la lentille. Le faisceau émerge parallèlement à l'axe principal (***Doc.7-a***).

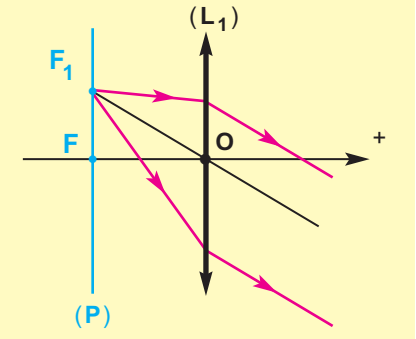
F est le foyer objet principal.



Doc.7-b

Envoyons sur une lentille divergente un faisceau de lumière dont les prolongements des rayons convergent en un point **F** de l'axe principal, symértique de **F'** par rapport à la lentille. Le faisceau émerge parallèlement à l'axe principal (***Doc.7-b***).

F est le foyer objet principal.

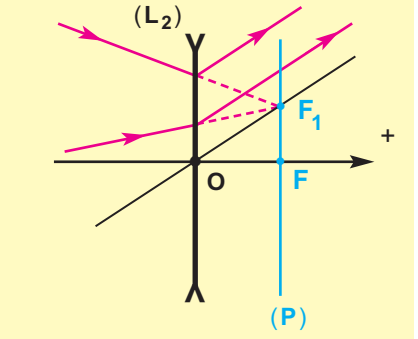


Doc.8-a

La source est maintenant placée en un point F_1 du plan (**P**) perpendiculaire à l'axe principal et contenant le foyer objet principal, le faisceau émerge parallèlement à l'axe secondaire (OF_1) (***Doc.8-a***).

F_1 est un foyer objet secondaire

(**P**) est le plan focal objet.



Doc.8-b

Un faisceau de rayons incidents dont les prolongements convergent vers un point F_1 du plan (**P**) perpendiculaire à l'axe principal et contenant le foyer principal objet, émerge parallèlement à l'axe secondaire (OF_1) (***Doc.8-b***).

F_1 est un foyer objet secondaire

(**P**) est le plan focal objet.

2.3. Distance focale et vergence d'une lentille

Distance focale

On appelle distance focale **f** d'une lentille, la grandeur scalaire correspondant à la distance qui sépare le centre optique de la lentille et l'un de ses foyers principaux.

Vergence

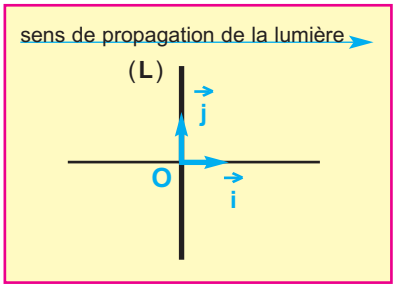
Dans le repère direct (**O** , $\vec{i}$, $\vec{j}$) dont les caractéristiques sont indiquées sur le document ***9***, la vergence **C** d'une lentille est définie par la relation :

$$C = \frac{1}{\overline{OF'}}$$

C s'exprime en ***dioptries*** de symbole δ .

La vergence d'une lentille convergente est positive car $\overline{\mathbf{OF'}}$ est comptée positive ; celle d'une lentille divergente est négative car $\overline{\mathbf{OF'}}$ est comptée négative.

REMARQUE : la vergence s'appelle aussi la convergence.

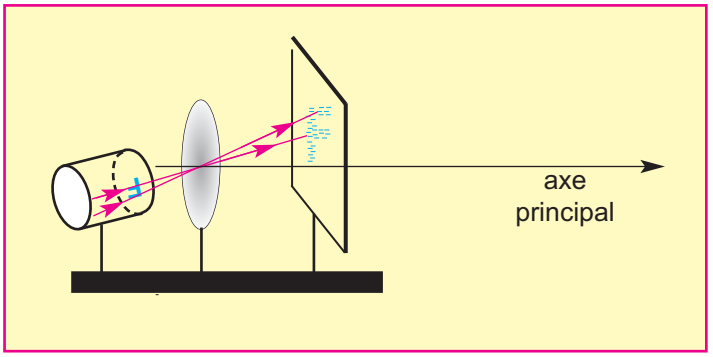


Doc.9

2.4. Conditions de Gauss

ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE

D'un objet en forme de **F** éclairé par une lanterne et placé incliné par rapport à son axe principal, une lentille convergente donne sur un écran, une image très déformée (***Doc.10-a***).



Doc.10-a

La photo **1-a** correspond à l'image d'un objet placé sur l'axe principal d'une lentille convergente qui n'est pas diaphragmée.

La photo **1-b** correspond à l'image d'un objet placé sur un axe secondaire de cette même lentille ; l'image est moins nette que celle obtenue dans le cas de la photo **1-a**.

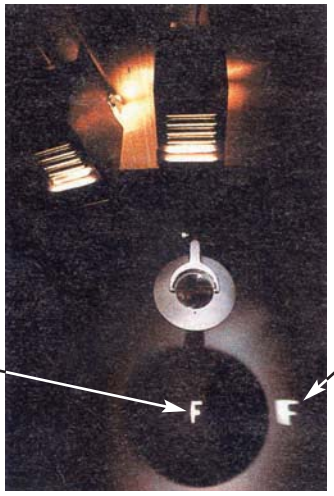
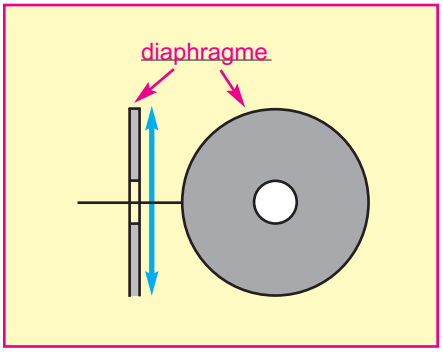


Photo.1-a : image plus nette bordée de lumière parasite

Photo.1-b : image très déformée

Diaphragmons la lentille, c'est-à-dire interposons une surface opaque munie d'un orifice circulaire au centre de la lentille (***Doc.10-b***), l'image très déformée devient plus lisible (***Photo.2-b***) alors que l'autre image devient encore plus nette avec disparition de la lumière parasite (***Photo.2-a***).



Doc.10-b

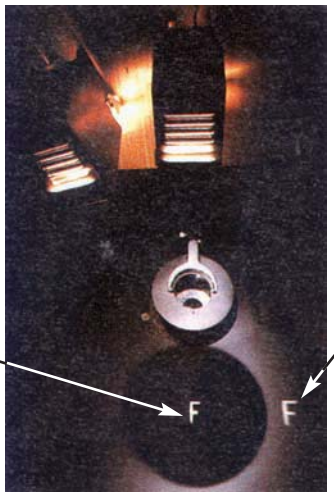


Photo.2-a : image nette sans lumière parasite

Photo.2-b : image plus lisible

En résumé, une lentille donne des images nettes si elle satisfait aux conditions de Gauss :

- le faisceau traverse la lentille près de son centre optique
- les rayons sont peu inclinés par rapport à l'axe optique principal.

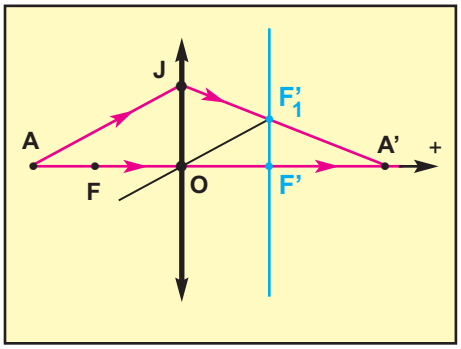
3. Image d'un objet lumineux donnée par une lentille

3.1. Objet ponctuel situé sur l'axe

Objet réel

Le point objet réel **A** est au point de départ de deux rayons incidents :
- le rayon **AO**, ne subissant pas de déviation
- le rayon **AJ**.

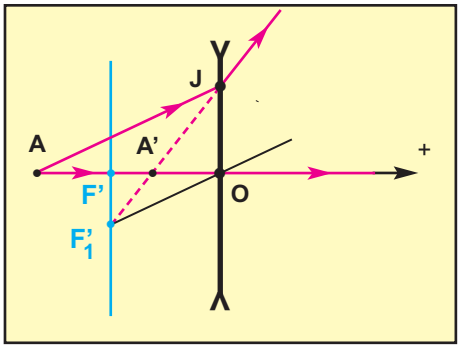
Le point image **A'** est au point de concours des rayons émergents (***Doc.11-a***) et (***Doc.11-b***).



Doc.11-a

Le rayon incident (**AJ**), parallèle à l'axe secondaire (**OF'$_1$**), émerge de sorte que le rayon sortant passe par le foyer secondaire image **F'$_1$**.

A', point de concours des deux rayons émergents est un point image réelle.



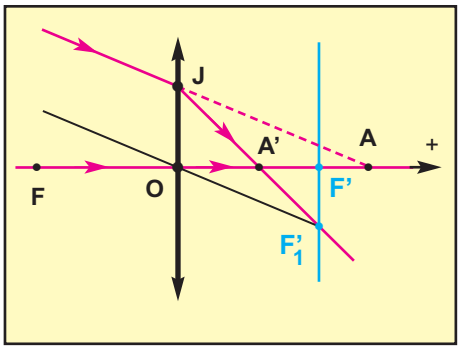
Doc.11-b

Le rayon incident (**AJ**), parallèle à l'axe secondaire (**OF'$_1$**), émerge de sorte que le rayon sortant passe par le foyer secondaire image **F'$_1$**.

A', point de concours des prolongements des rayons émergents est un point image virtuelle.

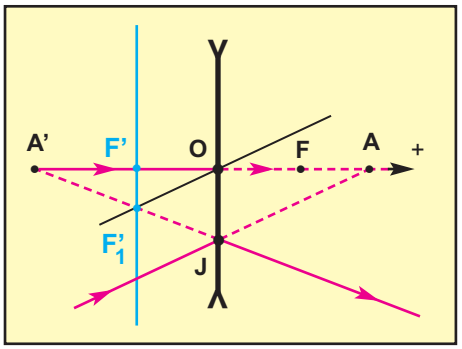
Objet virtuel

Le point objet virtuel **A** est au point de concours des prolongements de deux rayons incidents :
- le rayon porté par l'axe principal et ne subissant pas de déviation
- le rayon incident en **J** et parallèle à l'axe secondaire (**OF'$_1$**), qui émerge selon la direction (**JF'$_1$**) (***Doc.11-c***) et (***Doc.11-d***).



Doc.11-c

A', point de concours des rayons émergents (**JF'$_1$**) et (**OF'**), est un point image réelle.



Doc.11-d

A', point de concours des prolongements des rayons émergents (**JF'$_1$**) et (**OF'**), est un point image virtuelle.

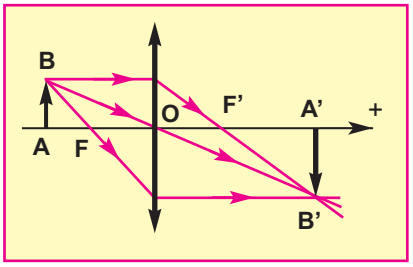
3.2. Objet étendu

Construction graphique de l'image

Pour construire l'image **A'B'** d'un objet **AB** plan perpendiculaire à l'axe optique principal, on utilise le fait que son image est plane et lui est parallèle. En particulier, si **A** se trouve sur l'axe, il suffit de construire **B'** :
A' est la projection orthogonale de **B'** sur l'axe optique principal.

Pour une lentille convergente, on trace la marche de deux rayons issus de **B** parmi les trois rayons représentés sur le document (***Doc.12***).

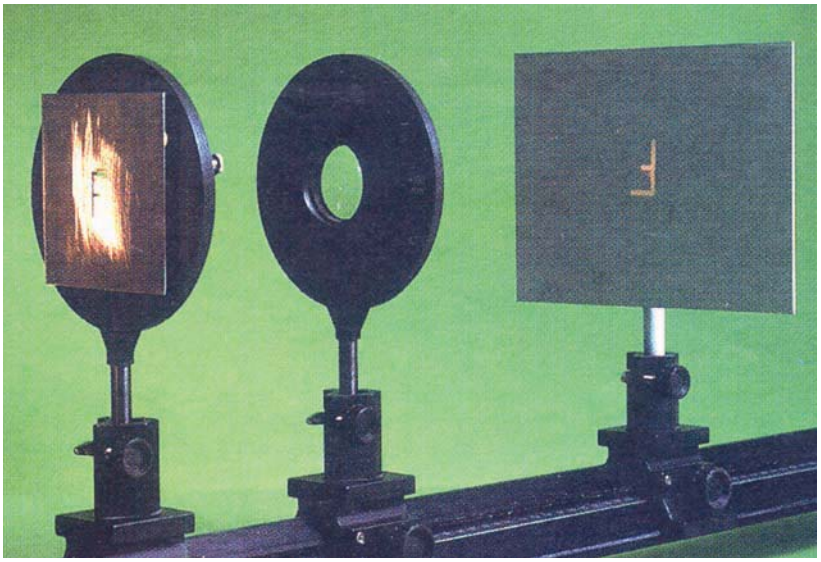
Pour une lentille divergente, on trace la marche du rayon parallèle à l'axe principal et de celui qui passe par le centre optique.



Doc.12

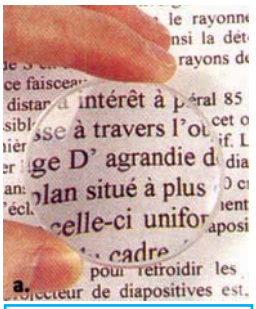
Objet réel

Un objet lumineux en forme de **F** est placé à une distance **d** d'une lentille (**L**) de distance focale **f** connue.

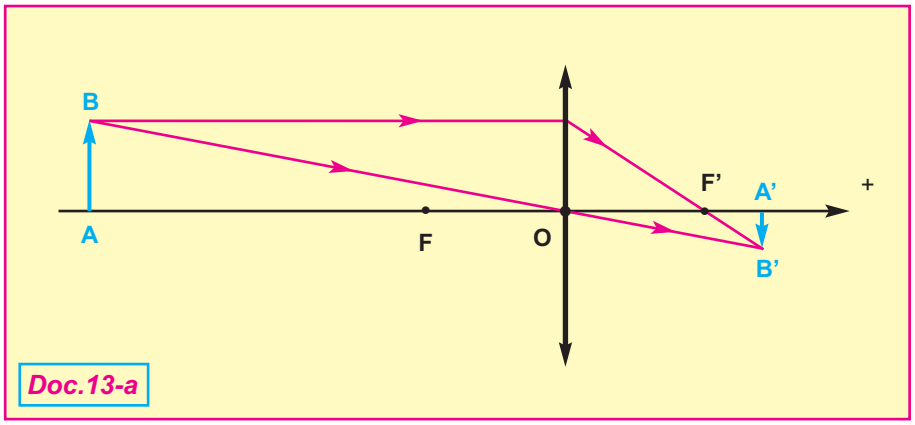


L'objet est très éloigné de la lentille
(objet considéré à l'infini).

Une lentille convergente donne de cet objet une image réelle, recueillie sur un écran placé dans le plan focal image de la lentille (***Doc.13-a***).

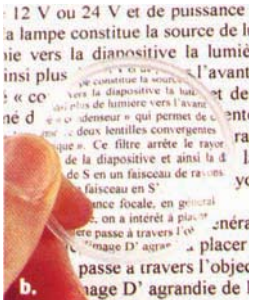


écriture observée à travers une lentille convergente

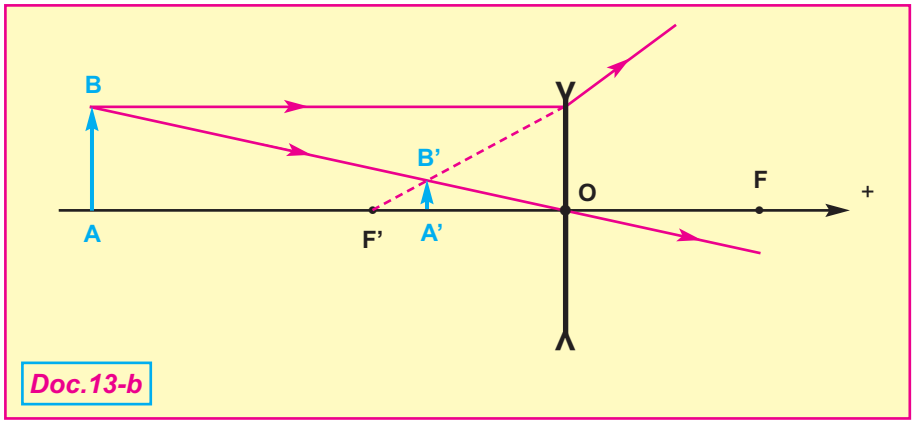


Doc.13-a

Une lentille divergente donne du même objet une image virtuelle qui se forme dans le plan focal image de la lentille ; elle est observée par l'œil en regardant à travers la lentille (***Doc.13-b***).



écriture observée à travers une lentille divergente



Doc.13-b

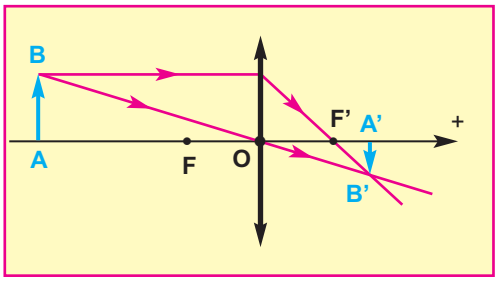
D'un objet réel, placé avant son plan focal objet, une lentille convergente donne une image réelle et renversée :

- plus petite que l'objet si **d > 2 f** (***Doc.14-a***).
- de même taille et symétrique de l'objet par rapport à la lentille si **d = 2 f** (***Doc.14-b***).
- plus grande que l'objet si **2 f > d > f** (***Doc.14-c***).
- à l'infini ; on l'observe en regardant à travers la lentille si **d = f** (***Doc.14-d***).

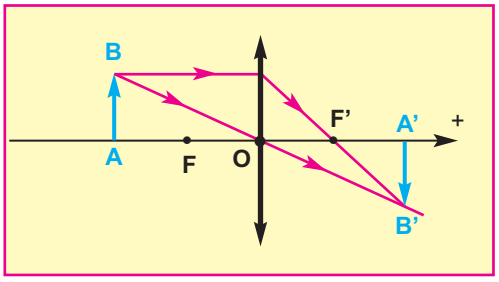
Si L'objet réel et placé entre le plan focal objet et le centre de la lentille, l'image est virtuelle, droite et plus grande que l'objet ; elle peut être observée par l'œil en regardant à travers la lentille (***Doc.14-e***) : c'est l'effet de loupe.

D'un objet réel, une lentille divergente donne une image virtuelle, droite et plus petite que l'objet (***Doc.15-a***), (***Doc.15-b***), (***Doc.15-c***), (***Doc.15-d***) et (***Doc.15-e***).

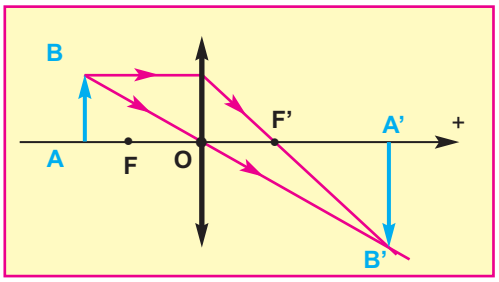
Systèmes optiques et images



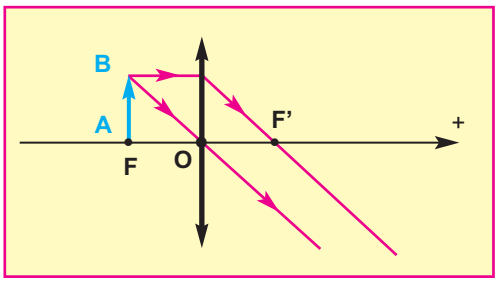
Doc.14-a



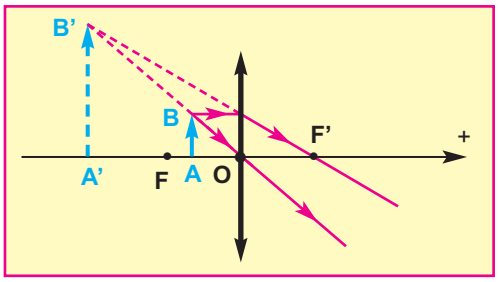
Doc.14-b



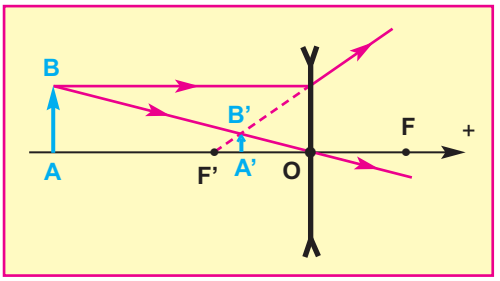
Doc.14-c



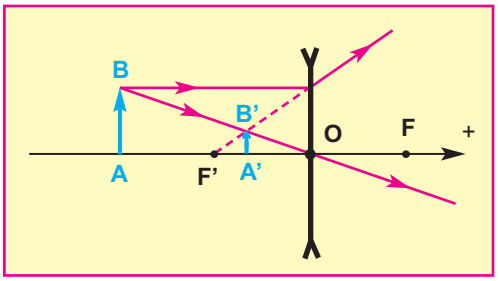
Doc.14-d



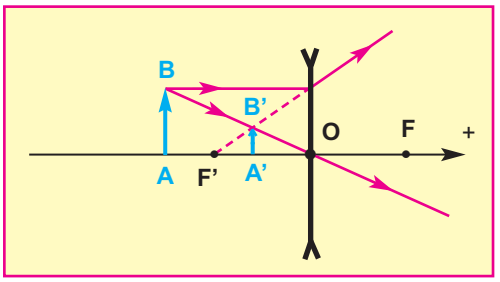
Doc.14-e



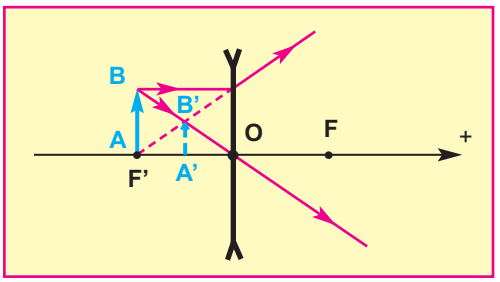
Doc.15-a



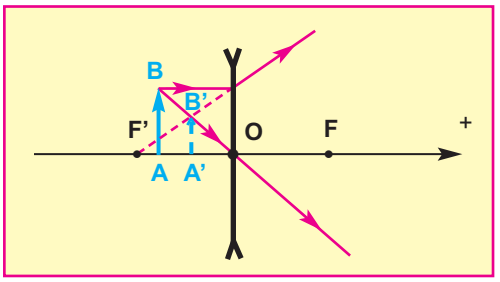
Doc.15-b



Doc.15-c



Doc.15-d

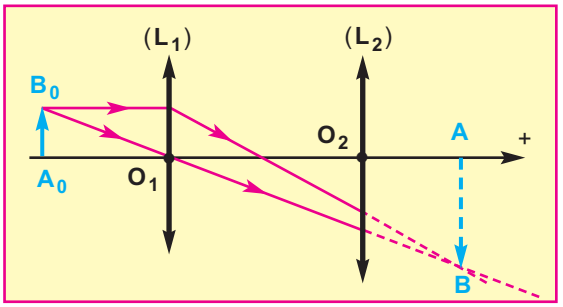


Doc.15-e

Objet virtuel

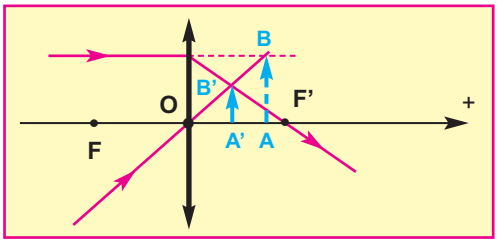
Comment obtenir un objet virtuel ?

Une lentille (L_1) donne d'un objet lumineux (A_0B_0) une image réelle (**AB**). (**AB**) est un objet virtuel pour une lentille (L_2) placée entre (L_1) et (**AB**) (***Doc.16-a***).

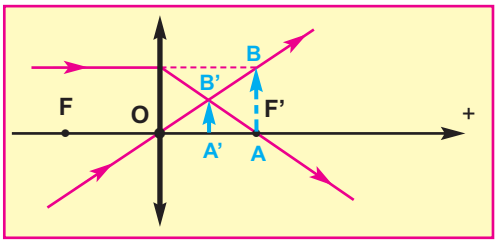


Doc.16-a

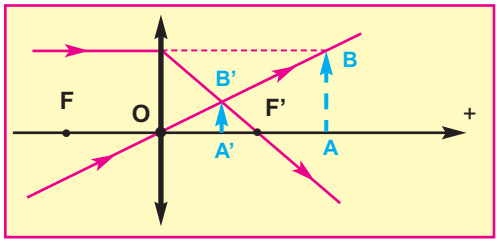
D'un objet virtuel, une lentille convergente donne une image réelle, droite et plus petite que l'objet (***Doc.16-b***), (***Doc.16-c***) et (***Doc.16-d***).



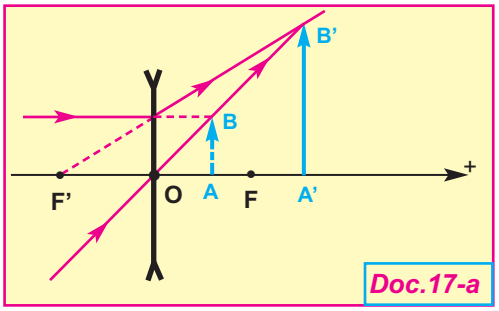
Doc.16-b



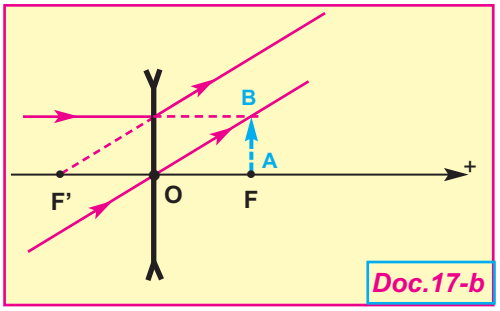
Doc.16-c



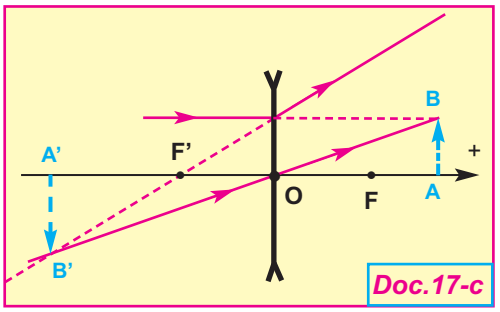
Doc.16-d



Doc.17-a



Doc.17-b



Doc.17-c

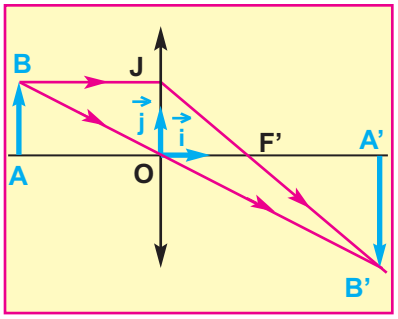
D'un objet virtuel, une lentille divergente donne une image :

- réelle, droite et plus grande que l'objet si **d < f** (***Doc.17-a***) ;
- rejetée à l'infini si **d = f** (***Doc.17-b***) ;
- virtuelle, renversée et plus grande que l'objet si **d > f** (***Doc.17-c***).

4. Relation de conjugaison, grandissement

RELATION DE CONJUGAISON

Soit une lentille de centre optique **O**, **AB** un objet plan perpendiculaire à l'axe principal et **A'B'** son image donnée par la lentille. Les points **A** et **A'** sont situés sur l'axe principal (***Doc.18***).



Doc.18

Les deux triangles **F'A'B'** et **F'OJ** sont rectangles et ont un angle aigu commun ; ils sont donc semblables.

Ce qui nous permet d'écrire : $\dfrac{\overline{A'B'}}{\overline{OJ}} = \dfrac{\overline{F'A'}}{\overline{F'O}}$. Or, $\overline{OJ} = \overline{AB}$

d'où : $\dfrac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \dfrac{\overline{F'A'}}{\overline{F'O}}$.

De même, en considérant les triangles semblables **OA'B'** et **OAB**

on peut écrire : $\dfrac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \dfrac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$

En identifiant les deux expressions de $\dfrac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$ on peut écrire :

$\dfrac{\overline{F'A'}}{\overline{F'O}} = \dfrac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$. D'autre part : $\dfrac{\overline{F'A'}}{\overline{F'O}} = \dfrac{\overline{OA'} - \overline{OF'}}{-\overline{OF'}} = \dfrac{\overline{OA'}}{-\overline{OF'}} + 1$

Ce qui donne : $\dfrac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = \dfrac{\overline{OA'}}{-\overline{OF'}} + 1$

En divisant les membres de cette égalité par $\overline{OA'}$, on

obtient : $\dfrac{1}{\overline{OA}} = \dfrac{1}{-\overline{OF'}} + \dfrac{1}{\overline{OA'}}$.

Ce résultat, nous l'écrivons sous la forme :

$$\boxed{\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}}}$$: Relation de conjugaison

Dans le repère (O, $\vec{i}$, $\vec{j}$) où le vecteur $\vec{i}$ est orienté dans le sens de propagation de la lumière, on a :

$\overline{OF'}$ est égale à $+f$ pour lentille convergente et à $-f$ pour une lentille divergente.

$\overline{OA}$ est négative pour un objet réel (avant la lentille) et positive pour un objet virtuel (après la lentille)

$\overline{OA'}$ permet de prévoir la position et la nature de l'image : elle est positive pour une image réelle (après la lentille) et négative pour une image virtuelle (avant la lentille).

Grandissement d'une lentille

Pour caractériser la taille d'une image **A'B'** donnée par une lentille d'un objet **AB**, on introduit le grandissement

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$$

Les deux triangles **OAB** et **OA'B'** sont rectangles et ont un angle aigu commun ; ils sont donc semblables.
Ce qui permet d'écrire :

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$$

- Si $\gamma > 0$, l'image est droite (même sens que l'objet).
- Si $\gamma < 0$,l'image est renversée (objet et image de même sens).
- Si $|\gamma| > 1$, l'image est plus grande que l'objet.
- Si $|\gamma| < 1$, l'image est plus petite que l'objet.

5. Détermination de la distance focale d'une lentille : focométrie

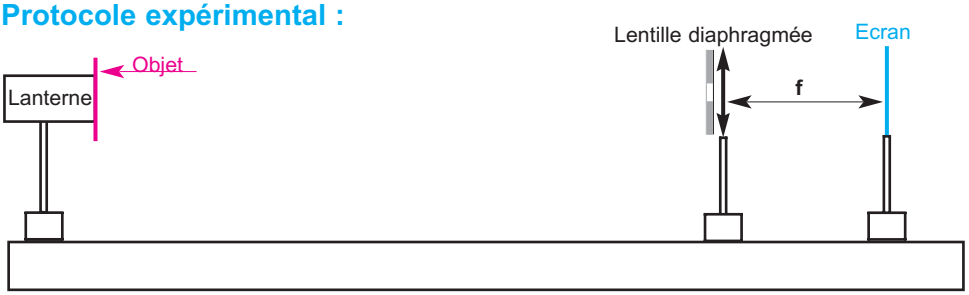
5.1. Méthode utilisant un objet à l'infini.

Cas d'une lentille convergente

Principe de la méthode :

L'image d'un objet situé à l'infini se forme dans le plan focal image.

Protocole expérimental :



L'objet lumineux (une fente en forme d'une lettre, pratiquée dans un plan opaque et éclairée par une lanterne) est disposée à une distance de l'ordre de **1,5 m** à **2 m** de la lentille.
On place un écran derrière la lentille, on réalise la mise au point pour avoir une image nette sur l'écran et on mesure la distance séparant la lentille de l'écran.

ATTENTION : ne jamais regarder le Soleil à travers une lentille, on peut devenir aveugle !

Cas d'une lentille divergente

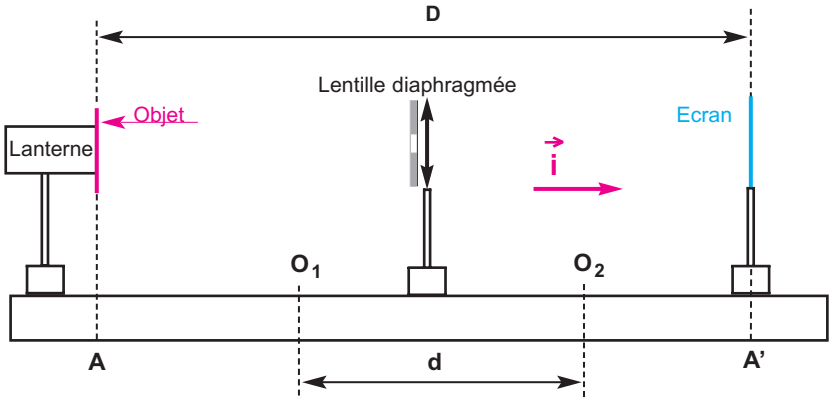
On accole à la lentille divergente de vergence **C** inconnue, une lentille convergente de vergence C_0 connue telle que $C_0 > |C|$. L'ensemble est convergent, on détermine sa distance focale puis sa vergence $C' = C_0 + C$

$$C = C' - C_0 \quad \text{et} \quad f = \frac{1}{|C|}$$

5.2. Méthode de Bessel

Etude théorique

Sur un banc d'optique, on fixe un objet **AB** et un écran distants de **D**.
Entre l'objet et l'écran, on déplace une lentille convergente de distance focale **f**.
Si **D > 4 f**, on observe sur l'écran une image nette **A'B'** pour deux positions distinctes O_1 et O_2 de la lentille distantes de **d** .
Montrons que la distance focale **f** de la lentille est donnée par : $f = \dfrac{D^2 - d^2}{4\,D}$.



Posons $\overline{AO} = x$ (**O**, étant une position de la lentille qui permet d'obtenir une image nette sur l'écran) $\overline{OA'} = \overline{OA} + \overline{AA'} = -x + D$.

La relation de conjugaison $\dfrac{1}{\overline{OA'}} - \dfrac{1}{\overline{OA}} = \dfrac{1}{\overline{OF'}}$ s'écrit : $\dfrac{1}{D - x} + \dfrac{1}{x} = \dfrac{1}{f}$.

En réduisant au même dénominateur les deux termes du premier membre, on obtient :

$\dfrac{D}{x\,(D - x)} = \dfrac{1}{f}$. Ceci donne l'équation du second degré suivante : $x^2 - x\,D + D\,f = 0$ (**1**)

Si le discriminant $\Delta = D^2 - 4\,D\,f > 0$ (**D > 4 f**), l'équation (**1**) admet deux racines distinctes x_1 et x_2 correspondant aux abscisses des deux positions O_1 et O_2 de la lentille qui donnent sur l'écran une image nette de l'objet **AB**.

$$x_1 = \frac{D - \sqrt{D^2 - 4\,D\,f}}{2} \quad ; \quad x_2 = \frac{D + \sqrt{D^2 - 4\,D\,f}}{2} .$$

$$d = O_1O_2 = x_2 - x_1 = \sqrt{D^2 - 4\,D\,f}$$

On élève au carré et on en déduit **f** : $\boxed{f = \dfrac{D^2 - d^2}{4\,D}}$

Protocole expérimental

- Maintenir fixes l'écran et l'objet à la distance **D** l'un de l'autre.
- Chercher les deux positions O_1 et O_2 qui donnent chacune une image nette sur l'écran.
- Mesurer la distance $d = O_1O_2$.
- Calculer **f**.

5.3. Méthode de Silbermann

La méthode de Silbermann est un cas limite de celle de Bessel. Elle correspond au cas où les deux positions $\mathbf{O_1}$ et $\mathbf{O_2}$ de la lentille qui donnent sur l'écran une image nette de l'objet **AB** sont confondues (l'équation (**1**) admet une racine double).

$$x_1 = x_2 = \frac{D}{2}$$

Ce qui se produit lorsque le discriminant $\Delta = D^2 - 4\,D\,f = 0$, ce qui signifie :

$$\boxed{f = \frac{D}{4}}$$

Protocole expérimental

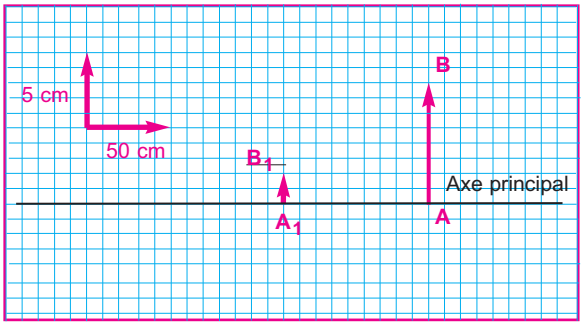
On procède comme pour la méthode de Bessel.
Si on trouve deux positions distinctes de la lentille pour lesquelles on observe des images nettes, on rapproche l'écran de l'image puis on recommence la recherche jusqu'à ce qu'on ne trouve qu'une seule position de la lentille qui donne une image nette sur l'écran.

On mesure dans ces conditions la distance **D** séparant l'objet et l'écran : $f = \frac{D}{4}$.

EXERCICE RÉSOLU N°1

ENONCÉ :

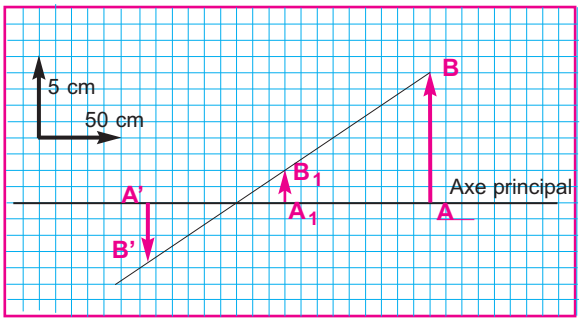
I- Une lentille (L_1) donne d'un objet virtuel **AB**, une image A_1B_1 représentée sur le document ***19***.



Doc.19

Déterminer graphiquement la position du centre optique O_1, la nature (convergente ou divergente) et la vergence C_1 de la lentille (L_1).

II - Une deuxième lentille (L_2) de centre optique O_2 est accolée derrière (L_1) (les deux axes principaux coïncident et les deux centres optiques O_1 et O_2 sont pratiquement confondus en un même point **O**).
De l'objet **AB**, le système formé par les deux lentilles accolées, donne l'image **A'B'** représentée sur le document ***20***.



Doc.20

Déterminer graphiquement la nature (convergente ou divergente) et la vergence C_2 de la lentille (L_2).

SOLUTION

I - Caractéristiques de la lentille (L_1)

Le rayon incident O_1B, passant par le centre optique O_1 de la lentille et le rayon émergent O_1B_1 correspondant sont portés par la même droite.

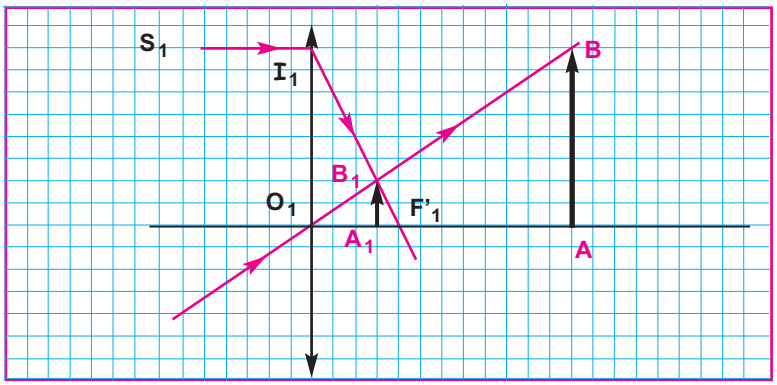
Le centre optique O_1 de la lentille est alors à l'intersection de la droite BB_1 et de l'axe principal.

Le rayon émergent I_1B_1, correspondant au rayon incident S_1I_1 parallèle à l'axe principal et dont le prolongement passe par le point objet **B**, converge vers le foyer principal image F'_1.

La lentille (L_1) est donc convergente

sa distance focale : f_1 = **40 cm**

sa vergence : C_1 = **2,5 δ**



II- Caractéristiques de la lentille (L_2)

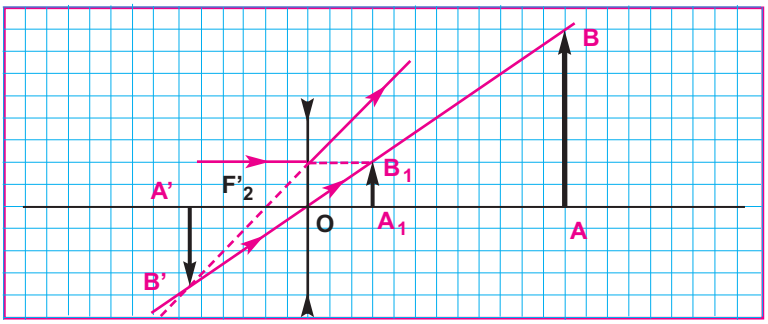
(**AB** , **A'B'**) est un couple objet-image conjugués pour le système {(L_1) , (L_2)}

(A_1B_1 , **A'B'**) est un couple objet-image conjugués pour le système (L_2). Pour ce système : le prolongement du rayon émergent correspondant au rayon incident **S'I'** parallèle à l'axe principal, diverge à partir de **F'**.

La lentille (L_2) est divergente

sa distance focale : f_2 = **20 cm**

sa vergence C_2 = - **5 δ**



EXERCICE RÉSOLU N°2

ENONCÉ :

I - On dispose de deux lentilles (L_1) et (L_2) accolées, de vergence respectives $C_1 = 2{,}5\ \delta$ et $C_2 = -5\ \delta$ et d'un objet **AB**. ((L_1) et (L_2) ont le même axe optique et leurs centres optiques O_1 et O_2 sont confondus en un point **O**).
D'un objet **AB**, virtuel, situé à **1,2 m** de **O**, le système formé par les deux lentilles accolées, donne une image **A'B'** (On supposera que **A** est sur l'axe optique).

1- Etablir l'expression de la différence $\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}}$ en fonction de C_1 et C_2.

2- En déduire la position et la nature (réelle ou virtuelle) de l'image **A'B'** ainsi que le grandissement du système formé par les deux lentilles.

II -
1- Déterminer graphiquement la vergence **C** de la lentille (**L**) qui, placée au point **O**, donne de l'objet **AB** la même image **A'B'**.
2- Comparer **C** à $C_1 + C_2$. Conclure.

SOLUTION

I- 1

- Pour la lentille (L_1), A_1B_1 est l'image de **AB**.
- Pour la lentille (L_2), A_1B_1 est un objet dont l'image est **A'B'**.

D'autre part, les positions des centres optiques O_1 et O_2 étant confondus avec **O**, les relations de conjugaison dans (L_1) et dans (L_2) s'écrivent alors :

dans (L_1) : $$\frac{1}{\overline{OA_1}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'_1}} = C_1 \qquad (1)$$

dans (L_2) : $$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA_1}} = \frac{1}{\overline{OF'_2}} = C_2 \qquad (2)$$

En additionnant les relations (**1**) et (**2**), on obtient la relation de conjugaison dans le système {(L_1) , (L_2)} :

$$\boxed{\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = C_1 + C_2} \qquad (3)$$

I- 2-

Position de l'image **A'B'** :

$$\frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{\overline{OA}} + C_1 + C_2$$

$$\frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{1,2} + 2,5 + (-5) = -1,67\ m^{-1}$$ d'où : $\boxed{\overline{OA'} = -0,59\ m}$

Nature de l'image **A'B'** :

$\overline{OA'}$ étant négatif, l'image **A'B'** est alors virtuelle.

Grandissement du système formé par les deux lentilles :

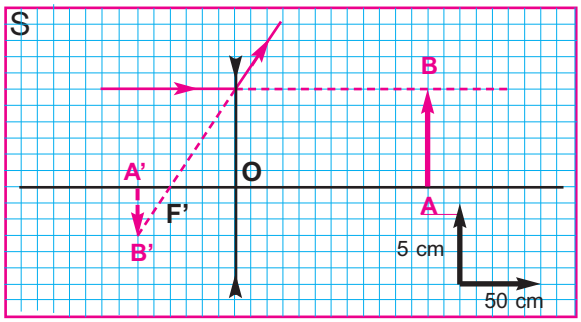
- Grandissement γ_1 de (L_1) : $\gamma_1 = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA_1}}{\overline{OA}}$ (3)

- Grandissement γ_2 de (L_2) : $\gamma_2 = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{A_1B_1}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA_1}}$ (4)

Le grandissement $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$ du système formé par les deux lentilles.

est obtenu en effectuant le produit $\gamma_2 . \gamma_1$:

$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = \frac{(-0,59)}{1,2} = -0,5$. Ce qui signifie que l'image **A'B'** est renversée et sa taille est la moitié de celle de l'objet **AB**.



II -1- Détermination graphique de la vergence **C** de la lentille **(L)**

On commence par représenter la lentille, l'objet **AB** et son image **A'B'** on trouve: **C = - 2,5 δ**

II - 2- Comparaison de **C** avec $C_1 + C_2$ et Conclusion :

Nous remarquons que $C = C_1 + C_2$.

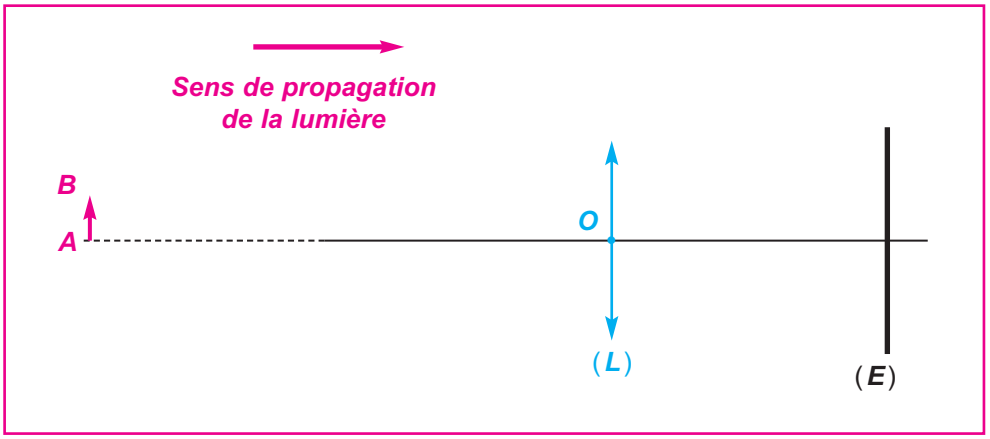
Conclusion :

> L'ensemble de deux lentilles minces accolées est équivalent à une lentille mince dont la vergence est égale à la somme des vergences des lentilles.

EXERCICE RÉSOLU N°3

ENONCÉ :

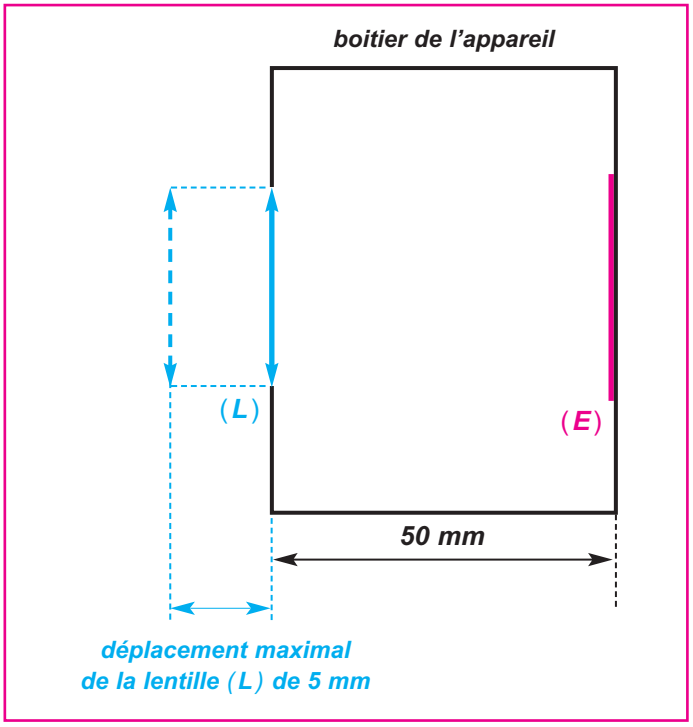
Un appareil photographique comporte deux éléments essentiels : l'objectif et la pellicule.
On modélise :
- l'objectif par une lentille mince convergente (**L**) de centre optique **O** ; on appelle **F** et **F'** les foyers principaux, respectivement objet et image de cette lentille dont la distance focale est **f'** = **50 mm**.
- la pellicule par un écran (**E**) où se forme l'image réelle de l'objet photographié (***Doc-21***).



Doc.21

I- On photographie un objet **AB** situé à une trés grande distance de (**L**). En le considérant " **à l'infini** ", et pour avoir une image nette, à quelle distance **OA'** de l'écran (**E**) se trouve la lentille (**L**) ?

II- Pour obtenir des images, sur l'écran (**E**), d'objets plus rapprochés de (**L**), il est nécessaire d'effectuer une mise au point, c'est-à-dire de faire varier la distance lentille-écran (***Doc-22***).



Doc.22

1- Si l'objet **AB** à photographier se rapproche de (**L**), la distance entre la lentille et l'écran doit-elle augmenter ou diminuer ? Justifier la réponse.

2- L'objectif permet d'augmenter de **5 mm** au maximum la distance entre la lentille et la pellicule par rapport à sa position quand l'objet est " **à l'infini** " (***Doc-22***).

a- A quelle distance doit se trouver un objet pour que son image soit nette sur la pellicule quand la distance lentille-écran est maximale ?

b- Calculer le grandissement γ dans ces conditions.

III- Photographie d'une carte postale de format 10 cm x **15 cm**

1- En la plaçant à **55 cm** de (**L**) dans un plan perpendiculaire à l'axe principal de la lentille (**L**), le grandissement vaut **0**,**1** en valeur absolue. Quelles seraient les dimensions de son image sur la pellicule de format **24 mm** x **36 mm** ? La couvre-t-elle totalement ?

2- On veut que les dimensions de l'image de la carte postale soient **24 mm** x **36 mm**.

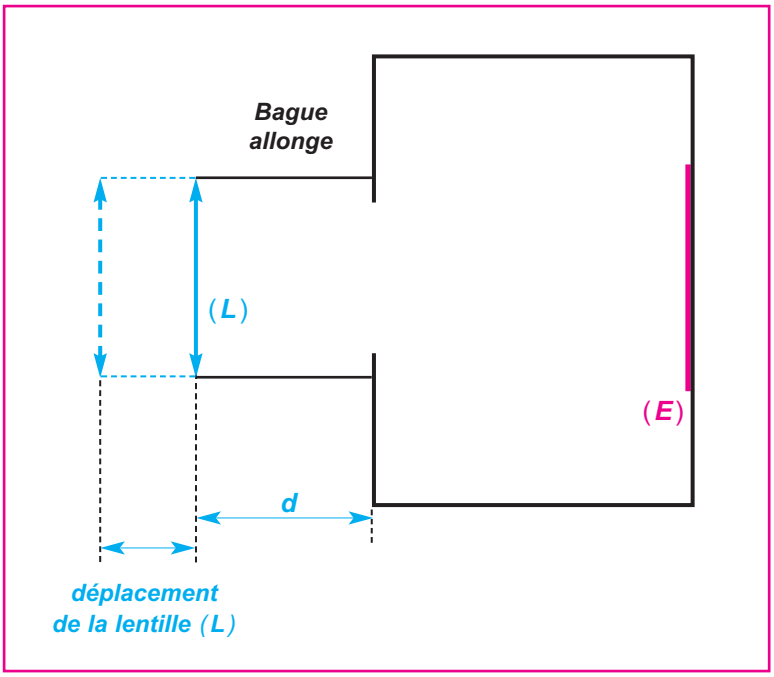
a- Calculer la valeur absolue du grandissement γ souhaité.

b- Pour simplifier les calculs numériques, on prendra : $\gamma = -\frac{1}{4}$

Calculer alors la distance **OA** à laquelle on doit placer la carte postale, ainsi que la distance **OA'** entre la lentille et l'écran.

c- On ne peut pas obtenir la distance **OA'** nécessaire trouvée au **III 2-a** avec le seul objectif de l'apppareil photographique.

Il est toutefois possible d'adapter, entre l'objectif et le boitier de l'appareil photographique, un ou plusieurs tubes creux appelés " bagues allonges " de longueur **d** (***Doc-23***).



Doc.23

Disposant de bagues allonges de longueurs **5 mm**, **10 mm** et **20 mm**, indiquer :

- laquelle ou lesquelles choisir ;
- comment procéder pour que l'image de la carte postale soit nette sur la pellicule avec pour grandissement : $\gamma = -\frac{1}{4}$

SOLUTION

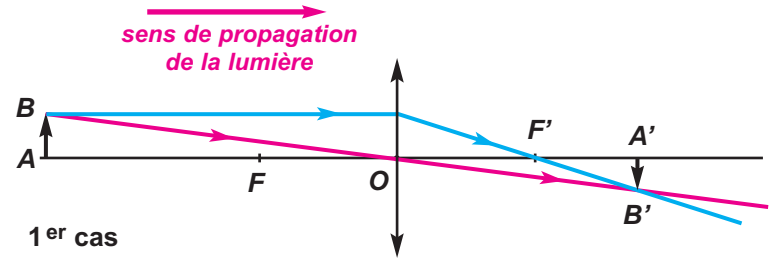
I - Photographie d'un objet à l'infini

L'image d'un objet situé à l'infini se forme dans le plan focal image de la lentille, donc à la distance **OA'** = **OF'** = **f'** de la lentille convergente. L'écran (**E**) doit donc se trouver à la distance **OF' = 50 mm** de la lentille (**L**).

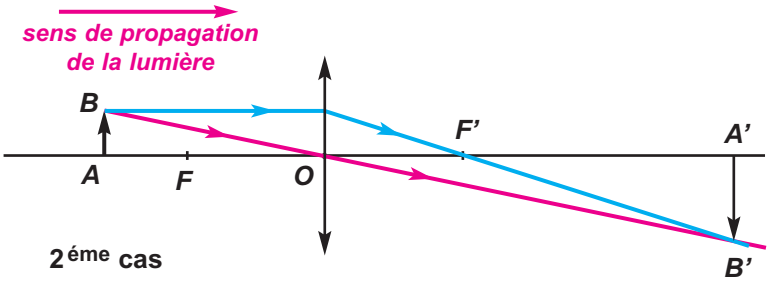
II - Images d'objets plus rapprochés

1- Quand l'objet AB se rapproche

Faisons deux schémas pour 2 positions différentes de l'objet **AB** par rapport à la lentille, et voyons comment évolue la position de l'image **A'B'** de **AB**.



1er cas



2éme cas

Pour construire **A'B'**, on a utilisé 2 rayons particuliers : celui passant par le centre optique **O** de la lentille (en rose), qui n'est pas dévié, et celui parallèle à l'axe principal, qui émerge de la lentille en passant par **F'** (en bleu).
Du 1er cas au 2ème cas, l'objet **AB** s'est approché de la lentille et l'image **A'B'** s'en est éloignée. Ainsi, lorsque l'objet se rapproche de (**L**), la distance lentille-écran doit augmenter, pour avoir une image nette sur l'écran.

2- Distance lentille-écran pouvant varier de 5 mm par rapport à sa position pour un objet à l'infini

a- Distance minimale pour photographier un objet

La distance maximale lentille-écran est égale à :

$\overline{OA'} = \overline{OF'} + 5$ **mm** , d'après l'énoncé et la question **1**.

Application numérique :

$\overline{OA'} = 50$ **mm** + **5 mm**

$\overline{OA'} = 55$ **mm** , au maximum.

Pour trouver la distance objet-lentille correspondante (distance minimale pour pouvoir photographier nettement un objet), on utilise la formule de conjugaison :

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}} \quad \text{d'où} \quad \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OF'}} \quad \text{donc :}$$

$$\boxed{\overline{OA} = \frac{\overline{OA'} \cdot \overline{OF'}}{\overline{OF'} - \overline{OA'}}}$$

Application numérique : $\boxed{\overline{OA} = -550 \text{ cm}}$

L'objet doit donc se trouver à la distance (minimale) **OA = 550 cm** de la lentille, quand la distance lentille-écran est maximale.

b- Grandissement pour un objet à distance minimale de la lentille

Par définition, $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$

Application numérique : $\overline{OA'} = 55$ mm et $\overline{OA} = -550$ mm

$$\boxed{\gamma = -0{,}1}$$

III- Photographie d'une carte postale de format 10 cm x 15cm

1- Cas d'un grandissement de 0,1 en valeur absolue

Le grandissement valant **0,1** en valeur absolue, les dimensions de la carte postale sont divisées par **10** sur la pellicule.
L'image a donc, dans ce cas, pour dimensions **1 cm** x **1,5 cm** soit encore **10 mm** x **15 mm**. Ces dimensions logent sur la pellicule **24 mm** x **36 mm**, mais ne la couvrent pas entièrement.

2- Cas où l'image de la carte postale couvre toute la pellicule 24 mm x 36 mm

a- Grandissement souhaité

On veut que pour un objet de **10 cm**, son image sur la pellicule soit de **2,4 cm**, et pour un objet de **15 cm**, son image doit être de **3,6 cm**.

D'où : $|\gamma| = \left| \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} \right| = \frac{A'B'}{AB}$.

Application numérique : $\boxed{|\gamma| = 0{,}24}$

b- Grandissement $\gamma = -\frac{1}{4}$. Distance lentille-écran nécessaire

On a $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = -\frac{1}{4}$ et $\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}}$

d'où $\frac{1}{-\frac{\overline{OA}}{4}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}}$ équivalent à $-\frac{5}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}}$

Application numérique : $\boxed{\overline{OA} = -5\,\overline{OF'} = -250 \text{ mm}}$

$$\boxed{\overline{OA'} = -\frac{OA}{4} = 62{,}5 \text{ mm}}$$

c'est la distance maximale lentille-pellicule.

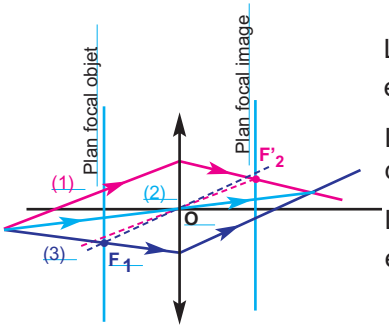
c- Utilisation de " bagues allonges "

Grâce aux tubes creux, on peut augmenter la distance lentille-pellicule. À la question précédente, nous avons vu que pour le grandissement souhaité, il fallait une distance **OA' = 62,5 mm**, soit augmenter la distance de **62,5 mm - 55 mm = 7,5 mm**.
Comme il n'y a pas de bague allonge de **7,5 mm**, on prend celle de longueur immédiatement supérieure : **d = 10 mm**
Pour obtenir la position souhaitée de la lentille, il suffira alors de la rapprocher de l'écran de **2,5 mm**, ce qui est possible.

L'ESSENTIEL

Marche d'un rayon lumineux

- **A travers une lentille convergente**

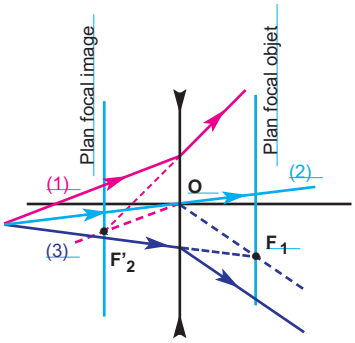


Le rayon incident (**1**) arrivant parallèlement à l'axe secondaire **OF'$_2$**, émerge en passant par le foyer secondaire image **F'$_2$**.

Le rayon incident (**2**) passant par le centre optique **O**, ne subit pas de déviation.

Le rayon incident (**3**) passant par le foyer secondaire objet **F$_1$**, émerge parallèlement à l'axe secondaire **OF$_1$**.

- **A travers une lentille divergente**



Le rayon incident (**1**) se propage parallèlement à l'axe secondaire **OF'$_2$**. Le prolongement du rayon émergent passe par le foyer secondaire image **F'$_2$**.

Le rayon incident (**2**) passant par le centre optique **O**, ne subit pas de déviation.

Le rayon incident (**3**) dont le prolongement passe par le foyer secondaire objet **F$_1$**, émerge parallèlement à l'axe secondaire **OF$_1$**.

Construction de l'image donnée par une lentille

Pour construire l'image **A'B'** d'un objet **AB** donnée par une lentille, on trace la marche de deux rayons parmi les trois figurant sur la figure ci-contre.

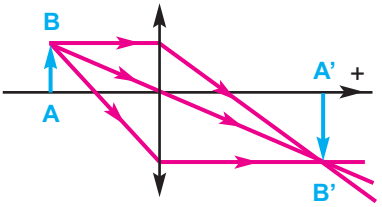


Image d'un objet donnée par une lentille

- Une lentille convergente donne d'un objet :

- une image réelle et renversée si l'objet est réel et placé avant le plan focal image ;
- une image virtuelle et droite si l'objet est réel et placé entre le centre optique et le plan focal image ;
- une image réelle et droite si l'objet est virtuel.

- Une lentille divergente donne d'un objet une image réelle, si et seulement si, il est situé entre le centre optique et le plan focal objet.

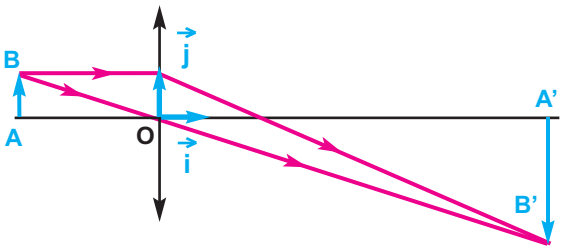
Relation de conjugaison

Soit une lentille de centre optique **O**, **AB** un objet frontal (perpendiculaire en **A** à l'axe principal) et **A'B'** son image par la lentille.

- La relation de conjugaison s'écrit :

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}}$$

- Le grandissement s'écrit : $\gamma = \dfrac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \dfrac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$

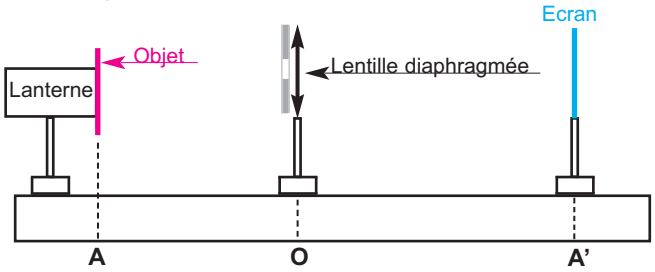


TRAVAUX PRATIQUES

BUT : Vérifier la relation de conjugaison.

MATÉRIEL

- Un banc d'optique
- Une lentille convergente de distance focale **f** connue
- Un diaphragme
- Un écran
- Un objet en forme de **L**, éclairé par une lanterne



PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

- Placer la lentille devant l'objet.
- Faire varier la distance de la lentille à l'objet et chercher à chaque fois la position de l'écran donnant une image nette.
- Mesurer alors la distance **OA** entre l'objet et la lentille et la distance **OA'** entre la lentille et l'écran.
- Remplir le tableau suivant en changeant à chaque fois la position de la lentille.
  (le sens positif est celui de la propagation de la lumière qui est indiqué sur la figure)
- Tracer un graphique en plaçant en abscisse $\frac{1}{\overline{OA}}$ et en ordonnée $\frac{1}{\overline{OA'}}$.

OA (cm)							
$\frac{1}{\overline{OA}}$ **(cm^{-1})**							
$\overline{OA'}$ **(cm)**							
$\frac{1}{\overline{OA'}}$ **(cm^{-1})**							

EXPLOITATION DES RÉSULTATS DE MESURES :

1- Déduire de la courbe la relation mathématique : $\frac{1}{\overline{OA'}} = f\left(\frac{1}{\overline{OA}}\right)$

2 - En identifiant la relation précédente avec la relation de conjugaison,

vérifier que l'ordonnée à l'origine est égale à $\frac{1}{f}$.

EXERCICES

Je vérifie mes connaissances

Choiisr la (ou les) proposition(s) correcte(s)

1- L'image donnée par une lentille convergente d'un objet situé avant le foyer objet **F** se trouve :
a - entre la lentille et le foyer image **F'**.
b - entre le foyer objet **F** et la lentille.
c - au delà du foyer image **F'**.

2- L'image donnée par une lentille divergente d'un objet situé avant le foyer image **F'** se trouve :
a - entre la lentille et le foyer image **F'**.
b - entre le foyer objet **F** et la lentille.
c - avant le foyer image **F'**.

3- Soit une lentille convergente de distance focale **f**.
Un point objet **B** est situé dans le plan focal objet. L'image de **B** est :
a - à l'infini dans la direction de l'axe optique principal.
b - dans le plan perpendiculaire à l'axe optique principal et passant par **F'**.
c - à l'infini, dans la direction faisant un angle $\theta = \frac{FB}{f}$ avec l'axe optique principal.

4- Soit une lentille divergente de distance focale **f**.
Un point objet **B** est situé dans le plan focal objet. L'image de **B** est :
a - à l'infini dans la direction de l'axe optique principal.
b - dans le plan perpendiculaire à l'axe optique principal et passant par **F'**.
c - à l'infini, dans la direction faisant un angle $\theta = \frac{FB}{f}$ avec l'axe optique principal.
d - se rapproche de la lentille lorsque l'objet se trouve entre la lentille et le plan focal objet.

5- L'image d'un objet réel donnée par une lentille peut être observable sur un écran :
a - si l'objet se trouve avant le plan focal objet et que la lentille est convergente.
b - si l'objet se trouve entre le plan focal objet et la lentille qui est convergente.
c - quelque soit la position de l'objet dans le cas d'une lentille divergente.

J'applique mes connaissances et je raisonne

Ex-1- La distance focale d'une lentille convergente est égale à **5 cm**.
Le diamètre de la lentille est égal à **4 cm**.
Un objet **AB** de **1 cm** est situé à **15 cm** de la lentille ; **AB** est perpendiculaire à l'axe optique principal et **A** se trouve sur ce dernier.

1 - Faire un schéma à l'échelle. Placer les foyers et le centre optique de la lentille.
2 - Construire l'image **A'B'** de **AB** obtenue par cette lentille.
Mesurer la distance **OA'** ainsi que la longueur **A'B'** sur le schéma.
3 - Retrouver ces résultats par le calcul.

Ex-2- L'image **A'B'** d'un objet **AB**, obtenue par une lentille convergente de distance focale égale à **120 mm,** se forme sur un écran situé à **440 mm** de la lentille.

1 - Faire un schéma à l'échelle **1/4**. Placer les foyers et le centre optique de la lentille.
2 - Déterminer, à partir du schéma, la taille et la position de **AB**.
3 - Retrouver ces résultats par le calcul.

Ex-3- L'image **A'B'** d'un objet **AB** obtenue par une lentille divergente de distance focale égale à **120 mm** se forme sur un écran situé à **440 mm** de la lentille.

1 - Faire un schéma à l'échelle **1/4**. Placer les foyers et le centre optique de la lentille.
2 - Déterminer, à partir du schéma, la taille et la position de **AB**.
3 - Retrouver ces résultats par le calcul.

Ex-4- La distance focale d'une lentille convergente est égale à **8 cm** et son diamètre à **4 cm**. Un objet réel **AB** de **1 cm** est situé à **18 cm** de la lentille ; **AB** est perpendiculaire à l'axe optique principal et **A** se trouve sur ce dernier.

1 - Schématiser le dispositif à l'échelle **1/2**.

2 - Tracer le faisceau lumineux partant de **B** et s'appuyant sur les bords de la lentille.

Ex-5- La distance focale d'une lentille convergente est égale à **125 mm** et son diamètre est de **80 mm**. Un faisceau de lumière parallèle éclaire totalement la lentille. Il est incliné d'un angle de **10°** par rapport à l'axe optique.

1- Réaliser le schéma à l'échelle.

2- Tracer la marche du faisceau de lumière incident et émergent.

Ex-6- La distance focale d'une lentille divergente est égale à **125 mm** et son diamètre est de **80 mm**. Un faisceau de lumière parallèle éclaire totalement la lentille. Il est incliné d'un angle de **10°** par rapport à l'axe optique.

1- Réaliser le schéma à l'échelle.

2- Tracer la marche du faisceau de lumière incident et émergent.

Ex-7- Un objet réel **AB** de **2 cm** est situé à **35 cm** d'une lentille convergente de distance focale **20 cm**. **AB** est perpendiculaire à l'axe optique de la lentille et **A** se trouve sur ce dernier. Déterminer, par le calcul, la position et la taille de l'image **A'B'** de **AB** par la lentille.

Ex-8- Un objet réel **AB** de **2 cm** est situé à **35 cm** d'une lentille divergente de distance focale **20 cm**. **AB** est perpendiculaire à l'axe optique de la lentille et **A** se trouve sur ce dernier. Déterminer, par le calcul, la position et la taille de l'image **A'B'** de **AB** par la lentille.

Ex-9- Un point objet **B** est situé très loin d'une lentille convergente de distance focale égale à **150 mm**. Le diamètre de cette lentille vaut **50 mm**. L'objet **B** se trouve dans une direction faisant un angle de **12°** avec l'axe optique de la lentille.

1 - Faire un schéma à l'échelle et construire **B'** l'image de **B** par la lentille.

2 - Tracer la marche du faisceau lumineux issu de **B** et s'appuyant sur les bords de la lentille.

3 - Calculer la distance **F'B'**.

Ex-10- On dispose d'un objet lumineux **AB** situé à **5 m** d'un mur sur lequel on veut projeter son image de façon à avoir un grandissement $\gamma = -4$.

1 - Déterminer graphiquement la position de la lentille ainsi que sa distance focale. Faire la représentation graphique à l'échelle **1/20**.

2 - On double la vergence de la lentille en maintenant la position de la lentille. Où la nouvelle image de l'objet **AB** se forme-t-elle ?

Ex-11- Le grandissement d'une lentille de vergence **C** inconnue est égal à **- 2** pour un objet réel placé à une distance **|x| = 1,2 m** devant le centre optique de la lentille.

1 - Donner l'expression littérale exprimant la distance focale f de la lentille en fonction du grandissement γ et de **x**.

2 - Calculer la distance focale f de la lentille.

3 - Calculer la mesure algébrique **OA' = y** à laquelle se forme l'image de l'objet.

4 - En déduire la distance **AA'** séparant l'objet et son image.

5 - Peut-on affirmer qu'en doublant la distance **OA**, on double le grandissement γ ?

Ex-12- Un objet éclairé **AB** est situé à **40 cm** d'une lentille convergente. On déplace un écran jusqu'à y observer l'image de **AB** par la lentille. On constate alors que l'image est de même dimension que l'objet.

1 - Déterminer par le calcul la position de l'image. Faire un schéma en plaçant **A** sur l'axe optique principal, et en traçant le rayon lumineux passant par **B** et le centre optique de la lentille.

2 - En utilisant la formule de conjugaison, calculer la distance focale **f** de la lentille.

3 - En traçant par exemple le rayon lumineux issu de **B** et parallèle à l'axe optique, vérifier graphiquement le résultat de la question précédente. Quel autre rayon peut-on utiliser ? En faire un tracé.

4 - Exprimer la distance entre l'objet et l'écran en fonction de **f**. Proposer alors une méthode rapide pour mesurer une distance focale.

Ex-13- Un point lumineux **A** est placé à **50 cm** sur l'axe optique d'une lentille convergente de distance focale **f = 20 cm**.

1 - Déterminer la position de **A'**, image de **A** par la lentille.

2 - Vérifier ce résultat à l'aide d'une construction géométrique.

3 - Si on avance **A** de **3 cm** sur l'axe optique en direction de la lentille, comment et de combien se déplace **A'** ?

Ex-14- Une lentille convergente L_1, de centre optique O_1, donne d'un objet réel **AB**, haut de **2 cm** et situé à **12 cm** de la lentille, une image réelle A_1B_1 situé à **6 cm** après la lentille.
AB est perpendiculaire à l'axe optique principal de la lentille et **A** est situé sur cet axe.

1 - Construire, sur papier millimétré, l'image A_1B_1 de **AB**.

2 - Déterminer la distance focale f_1, la vergence C_1 de L_1 et la grandeur de l'image A_1B_1.

3 - On place au-dela de L_1, à **4 cm** de O_1, une lentille divergente L_2 de même axe que L_1, de centre optique O_2 et de distance focale f_2 = - **3 cm**.

a - Quel est le rôle joué par A_1B_1 pour la lentille L_2 ?

b - Déterminer la nature et la position de l'image A_2B_2 donné de l'objet **AB** par le systéme (L_1,L_2).
En déduire le grandissement du système et la taille de l'image.

Ex-15-ETUDE D'UN TEXTE SCIENTIFIQUE **: Les lentilles minces**

Dans le cas le plus fréquent, chacune des deux faces d'une lentille mince est une section d'une surface sphérique, les lentilles étant ordinairement rondes. (Il existe des surfaces cylindriques, mais nous étudierons surtout les surfaces sphériques) Chaque face peut être concave, convexe ou plane ; ….Mais examinons d'abord les propriétés générales des lentilles.
Soient les rayons parallèles à l'axe de la lentille biconvexe. On suppose qu'elle est en verre ou en plastique transparent. Selon la loi de Descartes, chaque rayon s'infléchit vers l'axe,aux deux faces de la lentille …
Une lentille mince focalise les rayons incidents, parallèles à l'axe principal, en un point appelé le foyer F. Ceci n'est pas tout à fait vrai pour une lentille avec des faces sphériques ; mais c'est presque vrai (autrement dit, les rayons parallèles sont localisés en une région minuscule presque de la taille d'un point) quand le diamètre de la lentille est petit comparativement aux rayons de courbure respectifs des deux faces de la lentille. C'est-à-dire celles qui sont très minces par rapport à leur diamètre, vérifiant cette condition…

Physique générale 3 Par Douglas C. Giancoli, Louis-André Hamel,

1-Représenter, vue en coupe, les lentilles citées dans le texte.
2- Les rayons incidents, parallèles à l'axe principal, d'une lentille mince sont focalisés en un point appelé le foyer F.S'agit-il de foyer image ou foyer objet ?
3-On suppose que la lentille est infiniment mince.Pourquoi le rayon passant par le centre optique d'une lentille mince n'est-il pas dévié ?

POUR EN SAVOIR PLUS

LENTILLES ET LUNETTES, UNE LONGUE HISTOIRE...

Les premières traces d'utilisation d'une lentille proviennent de la Grèce antique. Aristophane y fait notamment référence dans sa pièce Les Nuées écrite en 423 av. J.-C. en évoquant un verre à feu (une lentille convexe) utilisée pour produire du feu en focalisant les rayons solaires.
Les écrits de Pline l'ancien (23 - 79) montrent également qu'un tel dispositif était connu dans l'empire romain. Ils mentionnent ce qui peut être interprété comme la première utilisation d'une lentille pour corriger la vue en décrivant l'utilisation que fait Nero d'une émeraude de forme convexe lors des spectacles de gladiateurs (probablement pour corriger une myopie).

Les grands philosophes ont bien sûr apporté leur pierre à l'édifice : Aristote a évoqué la myopie et la presbytie dans "Problemata", Euclide a étudié le pouvoir optique de plusieurs objets et Sénèque a expliqué comment la taille des caractères peut être grossie à l'aide de globes remplis d'eau.
C'est finalement le scientifique arabe Alhazen (Al Hassan Ibn Al Haytham)qui a dressé la première liste des différentes formes de lentilles et de leur faculté grossissante dans "Opticae Thesaurus", aux environs de l'année 1000. Il a écrit le premier traité d'optique qui décrit comment le cristallin forme une image sur la rétine.

Les lentilles n'ont cependant pas été utilisées par le grand public avant la généralisation des lunettes de vue, probablement inventées en Italie dans les années 1280.

Au XIIIème et XIVème siècle les verres étaient fabriqués avec du béryl, une pierre transparente teintée, ou bien de quartz, et à partir des années 1300 on utilisa du verre de Venise.

Par la suite, les travaux de l'italien Giambattista della Porta (1535-1615) décrivit diverses expériences d'optique. Johannes Kepler fut en 1611, avec son ouvrage Dioptrice le véritable fondateur de la dioptrique actuelle et le savant qui expliqua la marche des rayons lumineux au sein des matériaux, la réfraction et la réflexion de la lumière.

Ce n'est que vers 1728 qu'on vit apparaître les montures, et seulement à la fin du XVIIIème siècle qu'on imagina de les faire tenir derrière les oreilles.

Etudit arabe travaillant avec des bésicles au 13ème siècle

Notions sur la fabrication des pièces et instruments d'optique

Les verres destinés aux lentilles sont des combinaisons d'oxydes divers. Les verres crown sont formés, en général, de silicates de calcium et de sodium ou de potassium, les verres flint, de silicates de potassium et de plomb, avec, pour les uns et les autres, addition d'oxydes de bore, de phosphore ou de fluorures. La présence de plomb entraîne l'augmentation de l'indice et de la dispersion.

Depuis quelques dizaines d'années, à ces verres connus depuis longtemps se sont ajoutés des verres à grand indice contenant des oxydes de verres rares, et surtout des verres organiques : ce sont des matières plastiques transparentes, moulables et incassables, mais facilement rayables, et dont les indices varient avec la température beaucoup plus que les verres minéraux.

Les blocs de verres destinés à constituer les lentilles sont sciés ou moulés à des dimensions légèrement supérieures à celles des pièces à fabriquer, puis ébauchés, par frottement sur un outil en fonte épousant la forme de la surface à tailler, avec interposition d'émeris ou de corindons en grains plias ou moins gros selon la matière usinée. On poursuit le travail sur des outils en laiton, avec des abrasifs de plus en plus fins.

Le polissage final s'effectue souvent à sec en frottant doucement la pièce avec un feutre enduit d'oxyde de fer, Fe_20_3, ou d'oxyde de cérium en poudre impalpable. On peut obtenir un polissage encore plus fin en recouvrant la pièce, à chaud, d'une très mince couche de poix qu'on imprègne d'une petite quantité de bouillie faite d'eau et de l'une des poudres .

En général, ce travail est effectué sur des machines spéciales pour plusieurs lentilles à la fois ; les lentilles de très petit rayon de courbure (objectifs de microscope) et celles de grand diamètre (objectifs de lunettes astronomiques) sont difficiles à réaliser et très coûteuses.

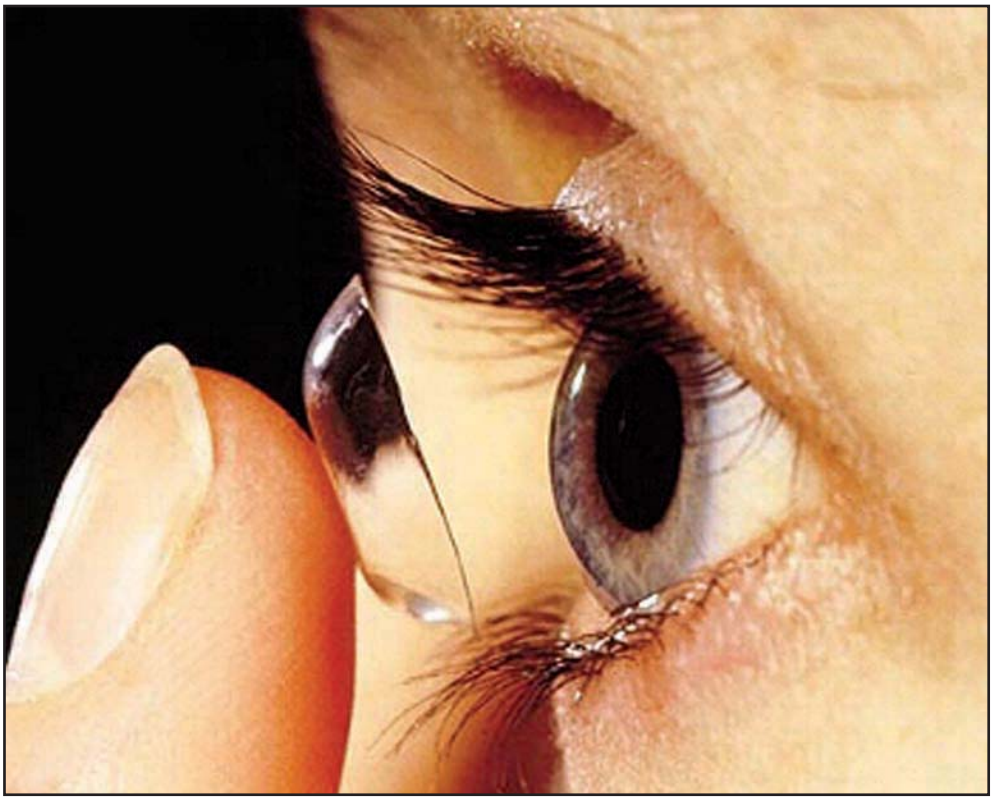
Les systèmes optiques comportent, en général, plusieurs lentilles : une opération délicate et importante consiste à les associer de façon que les centres de courbure soient parfaitement alignés. Le collage des lentilles, qui réduit les réflexions, exige que les surfaces à coller aient des rayons de courbure bien égaux. La colle la plus utilisée est le baume du Canada, résine naturelle appliquée à chaud; son indice est voisin de celui du crown ordinaire (1,52 à 1,53).

Les montures des instruments d'optique doivent être réalisées avec la même précision que celles des systèmes optiques. On comprend donc quel est le soin qu'il faut apporter à ces fabrications et, par conséquent, le prix élevé des appareils d'optique.

A l'utilisation, pour continuer à avoir des images de qualité, il faut assurer une parfaite propreté de toutes les surfaces réfringentes et éviter, spécialement, tout contact avec les doigts. La poussière s'enlève à l'aide d'un blaireau doux ou bien par soufflage. Les rayures par frottement sont particulièrement à craindre sur certains verres doux. Dans les pays chauds et humides, les altérations chimiques des verres sont parfois rendues très rapides par l'action des moisissures.

http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/optiqueGeo/lentilles/lentille_mince.html
http://perso.orange.fr/gilbert.gastebois/java/optique/optique.html
http://www.opticien-lentilles.com/flash4/invention.html

10 INSTRUMENTS D'OPTIQUE



L'œil extraordinaire appareil imageur, a besoin parfois d'autres instruments optiques.

OBJECTIFS

- Utiliser le modèle réduit de l'œil pour expliquer les défauts de la vision.
- Expliquer le principe de fonctionnement du microscope.

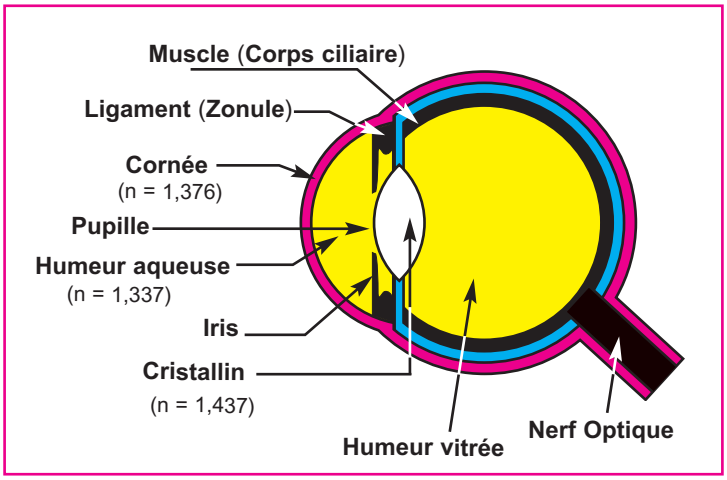
INSTRUMENTS D'OPTIQUE

1- L'œil

1.1. Description simplifiée de l'oeil

L'oeil est un globe d'un diamètre de l'ordre de **2,5 cm** ; il comprend :

- la cornée : c'est une membrane transparente, elle est directement en contact avec l'air ambiant ;
- l'humeur aqueuse : c'est un liquide transparent ; avec l'humeur vitrée, elle maintient la pression et donc la forme du globe oculaire ;
- l'iris : c' est un diaphragme qui permet de faire varier la quantité de lumière qui pénètre dans l'oeil ;
- le cristallin : c'est la lentille de l'oeil ; il s'agit d'une lentille convergente souple, maintenue par des ligaments (**zonules**) qui sont liés à des muscles (**corps ciliaire**) ;
- le corps ciliaire : c'est un muscle qui permet de modifier la courbure du cristallin afin d'obtenir un objectif à distance focale variable ;
- l'humeur vitrée (**corps vitré**) : c'est un corps gélatineux et transparent dont l'indice est égal à **1,336** ; il maintient la rétine contre les parois de l'oeil;
- la rétine : c'est une membrane nerveuse tapissant le fond de l'oeil ; epaisse de quelques dixièmes de millimètre, d'une surface voisine de quelques centimètres carrées, elle est constituée de plus de **130 millions** de cellules nerveuses et transforme la lumière en signaux électriques qui sont acheminés par le **nerf optique** vers le cerveau ;
- la pupille : c'est l'orifice central de l'iris (***Doc.1***).

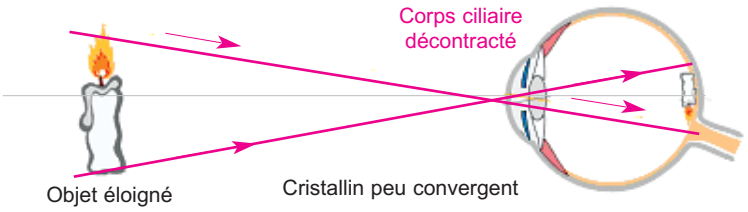


Doc.1 : la lumière pénètre dans l'oeil par la cornée, traverse l'humeur aqueuse, le cristallin et l'humeur vitrée. La convergence de l'oeil est donc assurée à la fois par le cristallin, la cornée et l'humeur vitrée.

1.2. Vision des objets et accomodation

OBJET TRÈS ÉLOIGNÉ

Pour un **oeil normal**, lorsque l'objet observé est à l'infini (très éloigné de l'oeil), le corps cilaire (qui est un muscle) est décontracté, le cristallin est peu bombé donc peu convergent. L'image de l'objet se forme exactement sur la rétine (***Doc.2-a***). L'oeil est dit au repos, il n'y a pas de fatigue.



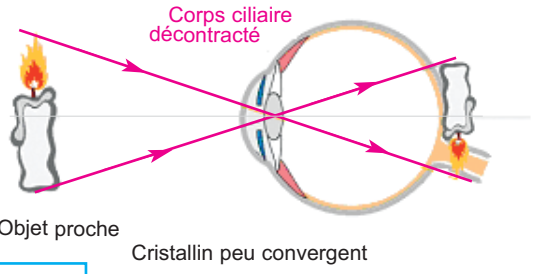
Doc.2-a

OBJET RAPPROCHÉ

Si, lorsque l'objet est rapproché, le cristallin reste tel qu'il est (la convergence de l'oeil n'est pas modifiée), l'image se forme alors derrière la lentille et l'objet observé paraît flou (***Doc.2-b***).

Or l'oeil a la faculté de modifier à volonté sa vergence afin que l'image se forme sur la rétine.

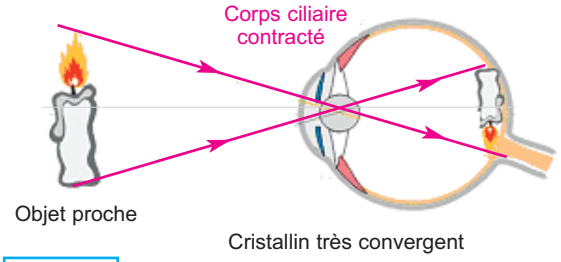
Cette faculté s'appelle l'accommodation.



Doc.2-b

Pendant l'accommodation, le cristallin est soumis à la pression des ligaments qui le rattachent au corps ciliaire. Il change de forme et sa courbure augmente, il devient plus convergent. L'image de l'objet se forme sur la rétine (***Doc.2-c***).

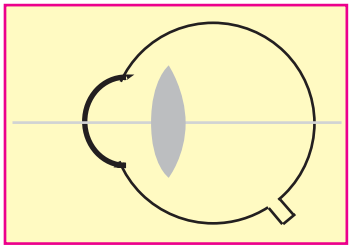
L'accomodation est suivi de fatigue.



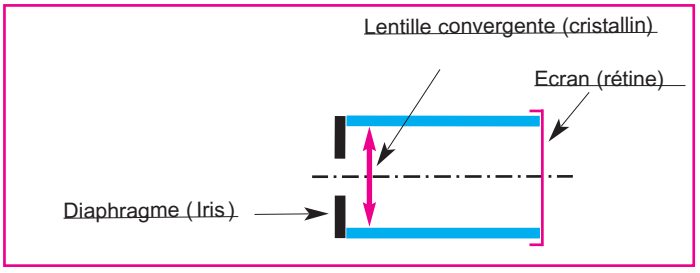
Doc.2-c

1.3. Modélisation de l'oeil (oeil réduit)

Pour l'étude de la formation des images et pour la compréhension des anomalies visuelles, on modélise (représente) l'œil par un oeil réduit. Dans ce modèle l'ensemble des milieux transparents de l'œil est assimilé à un système optique simple constitué d'une lentille convergente de distance focale variable, et d'un écran sphérique ou plan (la rétine) à distance fixe de cette lentille (***Doc.3-a***) et (***Doc.3-b***).



Doc.3-a



Doc.3-b

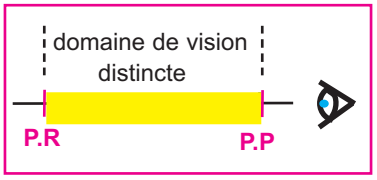
1.4. Défauts de l'oeil

Un œil peut voir nettement des objets situés dans un domaine de vision limité par deux positions extrêmes appelées respectivement **le punctum proximum (P.P)** et **le punctum remotum (P.R)** (***Doc.4***).

Pour un œil normal :

- le **P.R.** est rejeté à l'infini, sans accommodation ; l'image d'un objet éloigné (à l'infini) se forme sur la rétine.
- le **P.P.** est situé à environ **25 cm** de l'œil.

S'il n'en est pas ainsi, l'œil présente les défauts de **myopie** d'**hypermétropie** ou de **presbytie** ; ils peuvent être corrigés par des lunettes de vue ou des lentilles de contact.



Doc.4 : le punctum proximum **P.P** correspond à la position la plus proche de l'objet pour laquelle la vision est nette ; le punctum remotum **P.R** correspond à la position la plus éloignée de l'objet pour laquelle la vision est nette.

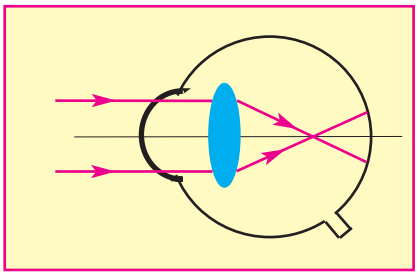
La myopie

Un myope voit flou les objets éloignés car son oeil est trop convergent (l'image d'un objet éloigné se forme en avant de la rétine) (***Doc.5-a***).

Ce défaut est dû essentiellement à un allongement du globe oculaire suivant l'axe principal.

La position de son punctum remotum n'est plus à l'infini.

Pour une myopie moyenne, le **P.R** est voisin de **30 cm** et le **P.P** est situé très près de l'oeil.

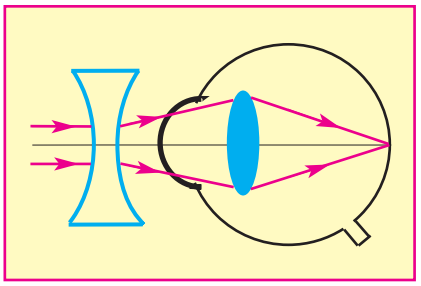


Doc.5-a : oeil myope non corrigé.

Corriger la myopie revient à rejeter le **P.R** à l'infini.

Pour cela un verre correcteur divergent est placé en avant de l'œil.

L'oeil corrigé devient moins convergent et l'image d'un objet à l'infini se forme sur la rétine, ce qui correspond à une vision de loin nette (***Doc.5-b***).

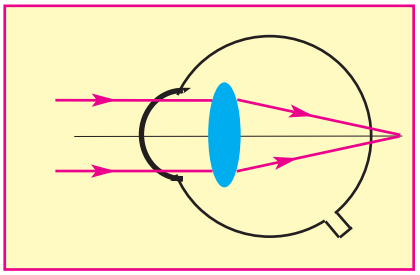


Doc.5-b : oeil myope corrigé.

A cause de la correction, il faut accommoder davantage en vision de près. Un myope retire ses lunettes pour lire avec moins de fatigue.

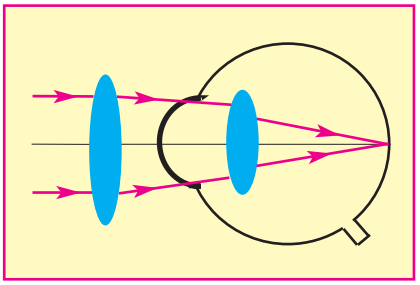
L'hypermétropie

L'hypermétropie est une anomalie de l'oeil dans laquelle l'image d'un objet éloigné se forme en arrière de la rétine (***Doc.6-a***). **L'oeil n'est pas assez convergent** (il est trop court), son **P.R** est en arrière de l'oeil (il est virtuel) et son **P.P** est plus grand que pour un oeil normal.



Doc.6-a : oeil hypermétrope non corrigé.

Pour corriger l'hypermétropie, un verre correcteur convergent (lentille de contact ou lunettes de vue) est placé devant l'œil (***Doc.6-b***). La vergence du système {verre correcteur + œil hypermétrope} doit permettre de voir net un objet situé à l'infini (l'image se forme sur la rétine).



Doc.6-b : oeil hypermétrope corrigé.

La presbytie

Avec le temps, le cristallin devient beaucoup moins souple ; il perd progressivement sa capacité à modifier sa courbure.

L'accommodation est alors moins efficace, la vision d'objets très rapprochés n'est plus possible. Ce vieillissement du cristallin, inévitable, et qui survient généralement entre quarante et cinquante ans, porte le nom de **presbytie**.

La correction de la presbytie est simple, puisque le cristallin n'est plus assez convergent pour la vision rapprochée, il suffit de porter des verres correcteurs convergents pour la lecture par exemple. Cette correction est proche de celle utilisée dans le cas d'un oeil hypermétrope, à ceci près qu'elle concerne la vision rapprochée et non pas la vision éloignée.

2. Le microscope

2.1. Description simplifiée du microscope

Le microscope est composé de deux systèmes optiques convergents :

- **l'objectif**, assimilable à une lentille convergente de courte distance focale (de l'ordre du millimètre) est placé près de l'objet ;
- **l'oculaire,** placé devant l'œil de l'observateur,est modélisé par une lentille convergente de courte distance focale(de l'ordre du centimètre).

Ces deux systèmes convergents (**l'objectif et l'oculaire**) sont maintenus à une distance constante l'un de l'autre.
L'ensemble peut être déplacé à l'aide d'une vis de mise au point rapide et d'une vis micrométrique.

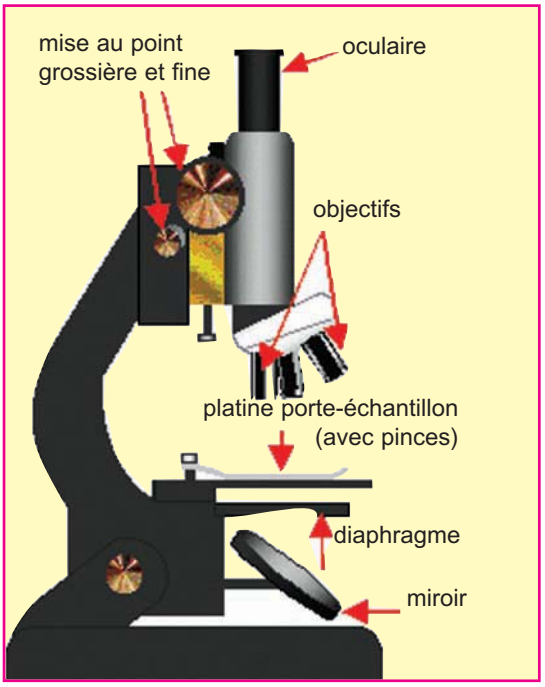


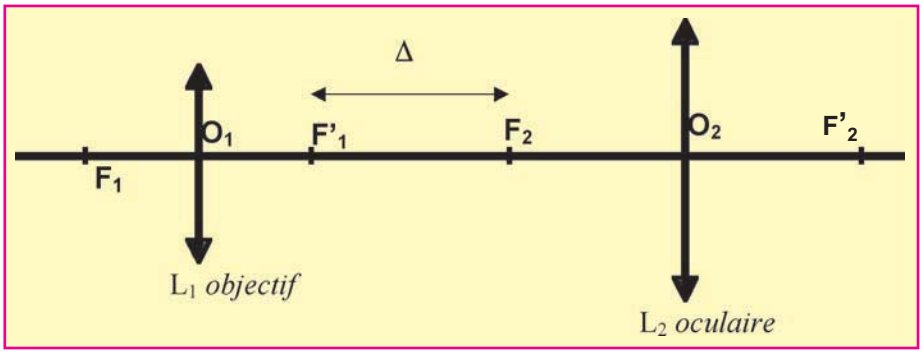
Schéma d'un microscope.

2.2.Modélisation du microscope

On modélise le microscope en considérant l'objectif et l'oculaire comme des lentilles convergentes.

La distance entre le foyer image F'_1 de l'objectif et le foyer objet F_2 de l'oculaire est appelée **intervalle optique :** $\Delta = \overline{F'_1F_2}$

Cet intervalle optique est de l'ordre de 16 à 18 cm.

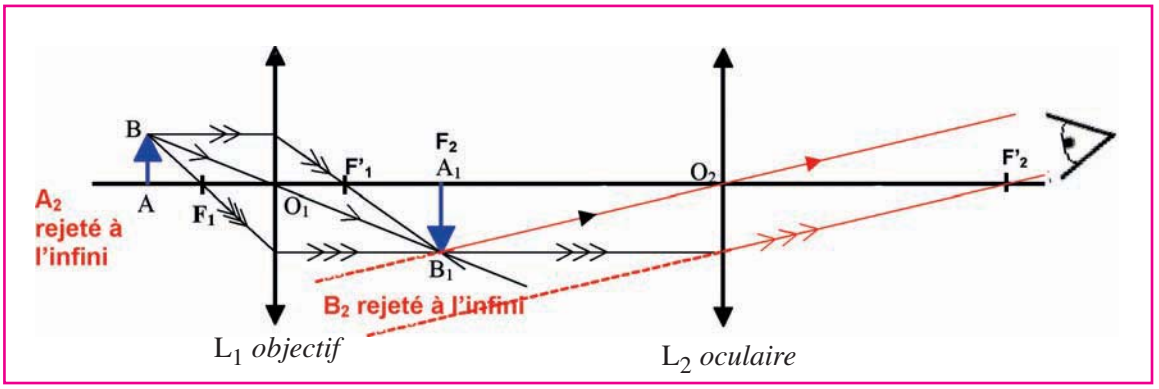


2.3. Formation des images

L'objectif donne, de l'objet **AB**, une image intermédiaire $\mathbf{A_1B_1}$ réelle et renversée, proche de l'oculaire.

On peut déterminer sa position par construction.

Cette image intermédiaire A_1B_1 devient objet pour l'oculaire qui donne une image définitive A_2B_2 virtuelle, renversée et agrandie.
En utilisation normale, sans accomodation pour l'œil, l'image définitive A_2B_2 observée à travers l'oculaire est rejetée à l'infini.
L'image intermédiaire A_1B_1 doit donc se trouver dans le plan focal objet de l'oculaire.

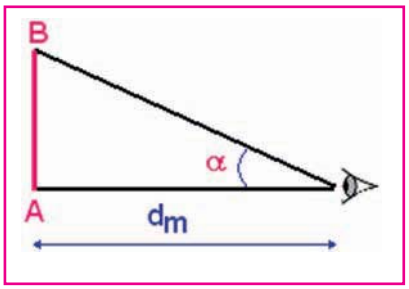


Construction de l'image d'un objet dans le cas où l'œil n' accommode pas.

2.3. Caractéristiques des images

Grossissement d'un microscope

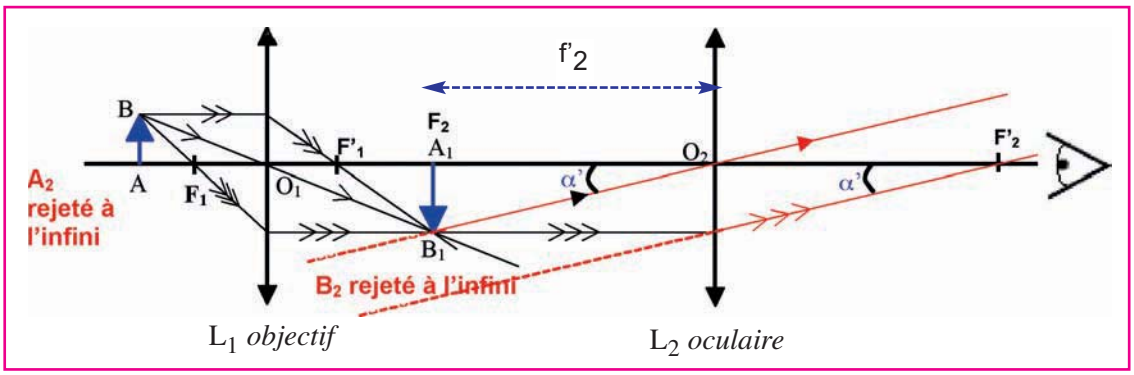
Soit α l'angle sous lequel on voit l'objet **AB** à l'œil nu lorsque l'objet est placé à la distance minimum de vision distincte d_m.



Les angles sont petits et exprimés en radian.
On obtient
$\alpha = \tan\alpha = \dfrac{AB}{d_m}$

Soit α' l'angle sous lequel on voit A_2B_2 image de l'objet AB au travers du microscope

Les angles sont petits et exprimés en radian. On obtient $\alpha' = \tan\alpha' = \dfrac{A_1B_1}{f'_2}$



Le grossissement du microscope est défini par $G = \frac{\alpha'}{\alpha}$

Or, le grandissement $|\gamma_1|$ de l'objectif s'écrit :

$$|\gamma_1| = \frac{A_1B_1}{AB} = \frac{F'_1F_2}{O_1F_1}$$

Soit $|\gamma_1| = \frac{\Delta}{f_1'}$ (avec $\Delta = \overline{F'_1F_2}$ l'intervalle optique)

L'indication gravée sur l'objectif traduit son grandissement;

Ce qui conduit finalement au grossissement.

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{A_1B_1}{f'_2} \cdot \frac{d_m}{AB} = \frac{|\gamma_1|.AB}{f'_2} \cdot \frac{d_m}{AB} = \frac{|\gamma_1|.d_m}{f'2}$$. Soit $\boxed{G = |\gamma_1|.G_2}$

G_2 est le grossissement commercial de l'oculaire. $G_2 = \frac{d_m}{f'_2}$

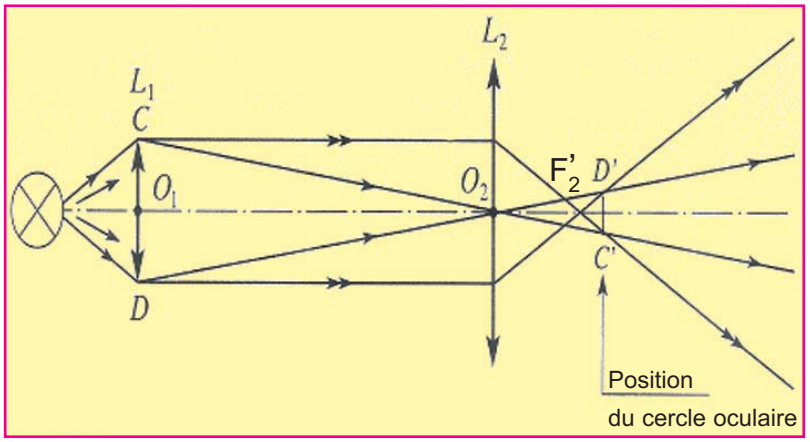
Latitude de mise au point

La latitude de mise au point est la longueur séparant les deux positions du point objet A dont les images dans le microscope se forment au punctum remotum (PR : point le plus éloigné que l'œil peut voir nettement sans accommoder) et au punctum proximum (PP : point le plus proche que l'œil peut voir nettement en accommodant).

La latitude de mise au point d'un microscope est faible.
Un dispositif avec une vis micrométrique permet de régler la distance entre l'objet et l'objectif.
En agissant sur la vis, on place l'objet près du foyer objet de l'objectif : l'image finale est à l'infini.

Position de l'oeil : le cercle oculaire

Le cercle oculaire est l'image de l'objectif à travers l'oculaire.
L'œil doit être placé au cercle oculaire pour recevoir toute la lumière émergente de l'objet.



EXERCICE RÉSOLU N°1

ENONCÉ :

Un oeil myope a son punctum remotum **PR** situé à **1 m**, et son punctum proximum **PP** situé à **10 cm**. Pour corriger sa vue, on place sur l'oeil une lentille de contact de **-1 δ**.
Indiquer, sur l'axe optique principal, les limites du domaine de vision nette de l'oeil corrigé.
On prendra la distance pupille-rétine égale à **17 mm**.

Solution

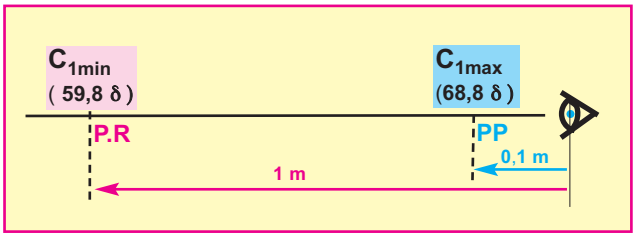
Nous assimilons l'oeil à une lentille convergente de focale variable dont le centre optique **O** se trouve à **17 mm** de la rétine (***Doc.5-a***).

Oeil non corrigé : d'un objet placé dans le champ de vision distincte, l'oeil myope de vergence **C**, donne une image nette sur la rétine si elle vérifie la relation de conjugaison :

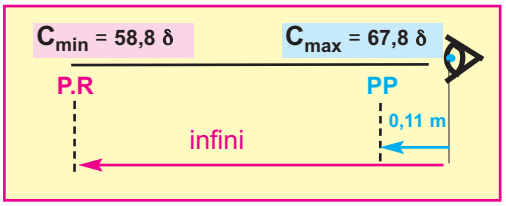
$$C = \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{0{,}017} - \frac{1}{\overline{OA}} = 58{,}8 - \frac{1}{\overline{OA}}$$

Les valeurs limites de la vergence correpondant aux positions extrêmes du champ de vision sont :

- **Objet au P.R** ($\overline{OA}$ = **- 1m**), la vergence est minimale et égale à $C_{1min} = 59{,}8\ \delta$
- **Objet au P.P** ($\overline{OA}$ = **- 0,1m**), la vergence est maximale et égale à $C_{1max} = 68{,}8\ \delta$



Oeil corrigé : l'oeil et la lentille de contact (C_2 **= -1 δ**) se comportent comme un oeil pouvant, par accomodation, modifier sa vergence entre les valeurs extrêmes $C_{min} = C_{1min} + C_2 = 58{,}8\ \delta$ et $C_{max} = C_{1max} + C_2 = 67{,}8\ \delta$ correspondant respectivement aux positions **P.R** et **P.P** du champ de vision distincte de l'oeil corrigé. Les distances **P.R** et **P.P** sont déterminées à partir de la relation de conjugaison.



$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}} \Rightarrow \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{-(P.P)} = C_{max}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{-(P.P)} = \frac{1}{\overline{OA'}} - C_{max} = 58{,}8 - 67{,}8 = -9\ m^{-1}$$

d'où : $\boxed{P.P = 0{,}11m}$

de même : $\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{-(P.R)} = C_{min}$

d'où : $\frac{1}{-(P.R)} = \frac{1}{\overline{OA'}} - C_{min} = 58{,}8 - 58{,}8 = 0$, ce qui signifie que le **P.R** est à l'infini.

EXERCICE RÉSOLU N°2

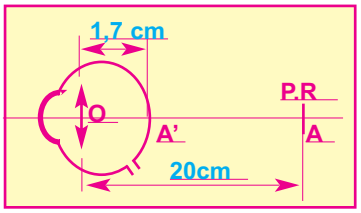
ENONCÉ :

Le **P.R** virtuel d'un oeil hypermétrope est situé à **20 cm** de la pupille. Quelle est la vergence C_0 de la lentille de contact qui lui permet de voir un objet net à l'infini (***Doc.7***) ?

Solution

Oeil non corrigé.

Le **P.R** de l'oeil hypermétrope est virtuel signifie :
l'image d'un objet virtuel situé au **P.R** se forme sur la rétine.
La vergence de l'oeil en ce point est déterminée par la relation de conjugaison et correspond à la vergence minimale de l'oeil non corrigé.



Doc.7

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = C_{min} \Rightarrow C_{min} = \frac{1}{0,017} - \frac{1}{0,2}$$

d'où : $\boxed{C_{min} = 53,8\ \delta}$

Oeil corrigé.

Après correction :

Pour un objet à l'infini ($\frac{1}{\overline{OA}} = 0$), l'image est sur la rétine ($\frac{1}{\overline{OA'}} = 58,8\ \delta$)

et la vergence **C'** de l'oeil corrigé est minimale et égale à $\frac{1}{\overline{OA'}} = 58,8\ \delta$

Or $C' = C_{min} + C_0$ **d'où** $\boxed{C_0 = C' - C_{min} = 5\ \delta}$ ce qui correspond à une lentille convergente.

EXERCICE RÉSOLU N° 3

ENONCÉ :

Principe d'un microscope utilisé dans un laboratoire de SVT :

Un objectif de très courte distance focale (quelques millimètres) placé près de l'objet observé, donne de celui-ci une image agrandie. Un oculaire joue le rôle de loupe pour observer cette image.
Un microscope est un appareil constitué :

- d'un objectif assimilable à une lentille mince convergente (L_1) de vergence C_1 = 250 δ.
- d'un oculaire, lentille convergente (L_2) de vergence C_2 = 40 δ.

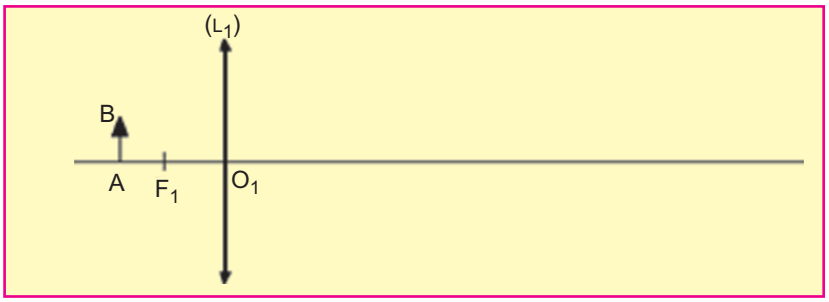
L'intervalle optique, distance fixe séparant le foyer principal image F'_1 de l'objectif du foyer principal objet F_2 de l'oculaire est F'_1F_2= 16 cm.
On utilise cet appareil pour observer un objet AB perpendiculaire à l'axe optique du microscope, le point A étant supposé placé sur axe.
On appelle A_1B_1 l'image de AB à travers l'objectif (L_1) et A_2B_2 l'image de A_1B_1 à travers (L_2).

1- MICROSCOPE RÉEL

a-Calculer les distances focales f'_1 et f'_2 de l'objectif et de l'oculaire.
Calculer α (on fera l'approximation tan $\alpha = \alpha$).

2-MICROSCOPE MODÉLISÉ

Pour illustrer le principe du microscope, on utilise le schéma suivant :



a- Reproduire ce schéma et construire l'image A_1B_1 de AB à travers l'objectif (L_1).
b- Où doit se trouver l'image A_1B_1 pour l'oculaire si l'on veut que l'image définitive A_2B_2 soit à l'infini ?
c- Représenter l'oculaire sur le schéma, sans souci d'échelle.Construire l'image définitive A_2B_2 et indiquer sur le schéma l'angle α', sous lequel on voit A_2B_2 image de l'objet AB à travers du microscope.

3- MICROSCOPE RÉEL RÉGLÉ DE TELLE FAÇON QUE L'IMAGE DÉFINITIVE A_2B_2 SOIT À L'INFINI :

a- Calculer la distance entre l'objectif et l'image A_1B_1.
b- En déduire la distance entre l'objet observé et l'objectif.
c- Calculer la taille de l'image intermédiaire A_1B_1 et le grandissement γ_1 de l'objectif.
La valeur obtenue est-elle en accord avec l'indication (**x40**) signalée sur la monture de l'objectif ?
d- Etablir l'expression de α' en fonction de A_1B_1 et f'_2 Calculer sa valeur.

4- GROSSISSEMENT

Une des grandeurs importantes qui caractérise un microscope est son grossissement standard G, défini par le rapport $G = \frac{\alpha'}{\alpha}$.

a- Calculer le grossissement G de ce microscope.
b- On peut aussi exprimer G en fonction du grandissement γ_1 de l'objectif et du grossissement G_2 de l'oculaire ; $G = |\gamma_1|.G_2$.
On a mélangé les trois oculaires dans la boîte qui les contient et qui comporte les indications x4 ; x10 ; x40. Quel oculaire a-t-on utilisé ?

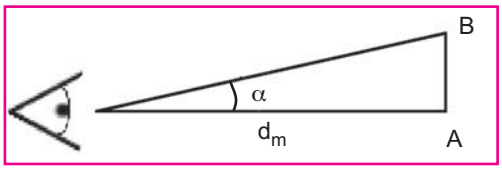
Solution

1- MICROSCOPE RÉEL

a- La distances focale f_1' de l'objectif est : $f'_1 = \frac{1}{C_1} = \frac{1}{250} = 4.10^{-3}$ m

La distances focale f_2' de l'oculaire est : $f'_2 = \frac{1}{C_2} = \frac{1}{40} = 2,5.10^{-3}$ m

b- Schéma permettant de déterminer le diamètre apparent de la spore lorsqu'elle est observée à l'œil nu à une distance d_m= 25 cm.



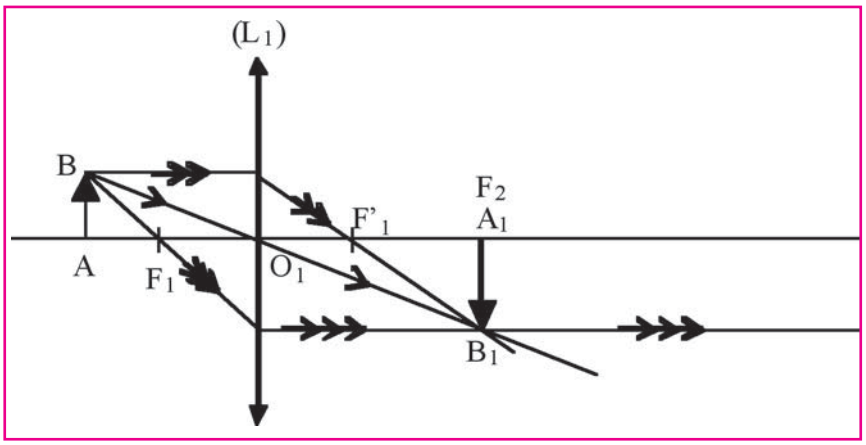
L'angle α est petit et exprimé en radian.

$$\alpha = \tan\alpha = \frac{AB}{d_m}$$

$$\alpha = \frac{2.10^{-5}}{2,5.10^{-2}} = 8.10^{-6} \text{ rad}$$

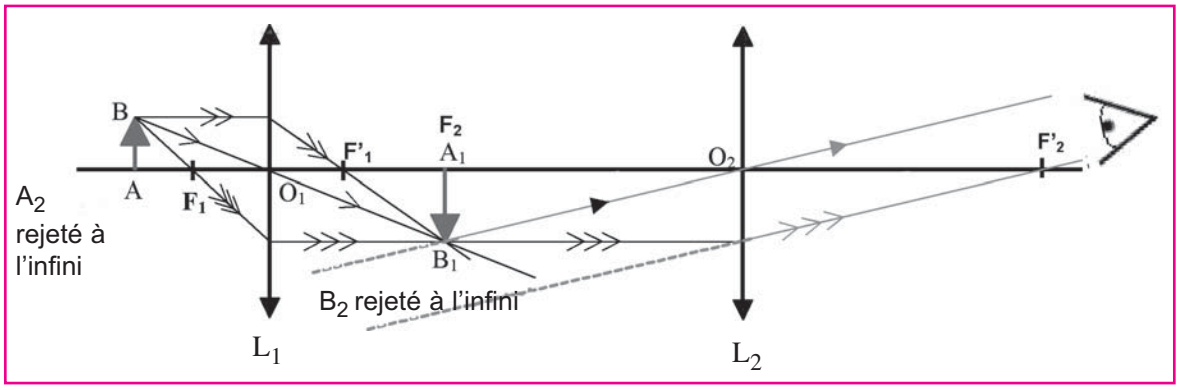
2-MICROSCOPE MODÉLISÉ

a- Construction de l'image A_1B_1 de AB à travers l'objectif (L_1)



b- L'image A_1B_1 doit se trouver dans le plan focal objet de l'oculaire si l'on veut que l'image définitive A_2B_2 soit à l'infini.

c- Construction de l'image définitive A_2B_2.



3- Microscope réel réglé de telle façon que l'image définitive A_2B_2 soit à l'infini :

a- Distance O_1A_1 entre l'objectif et l'image A_1B_1 :

$O_1A_1 = O_1F'_1 + F'_1A_1$

$O_1A_1 = f'_1 + F'_1F_2$

$O_1A_1 = 0{,}4 + 16 = 16{,}4$ cm

b- Distance AO_1 entre l'objet observé et l'objectif :

La relation de conjugaison donne :

$$\frac{1}{\overline{O_1A_1}} - \frac{1}{\overline{O_1A}} = \frac{1}{\overline{O_1F'_1}}$$

$$\frac{1}{\overline{O_1A}} = \frac{1}{\overline{O_1A_1}} - \frac{1}{\overline{O_1F'_1}}$$

$$\overline{O_1A} = \left(\frac{1}{\overline{O_1A_1}} - \frac{1}{\overline{O_1F'_1}}\right)^{-1}$$

$$\overline{O_1A} = \left(\frac{1}{\overline{O_1A_1}} - C_1\right)^{-1}$$

$$\overline{O_1A} = \left(\frac{1}{16{,}4 \times 10^{-2}} - 250\right)^{-1} - 4{,}1 \times 10^{-3} \text{ m} = -4{,}1 \text{ mm} < 0 \text{ car A est à gauche de } O_1$$

$O_1A = 4{,}1$ mm

c- Taille de l'image intermédiaire A_1B_1 :

La relation de grandissement donne : $\gamma_1 = \dfrac{\overline{A_1B_1}}{\overline{AB}} = \dfrac{\overline{O_1A_1}}{\overline{O_1A}}$ soit $A_1B_1 = 8.10^{-5}$ m.

$\overline{A_1B_1} = -8.10^{-5}$ m. Soit $A_1B_1 = 8.10^{-5}$ m.

Grandissement γ_1 de l'objectif :

$$\gamma_1 = \frac{16{,}4.10^{-2}}{-4{,}1.10^{-3}} = -40$$

L'indication (x40) signalée sur la monture de l'objectif est égale à $|\gamma_1|$, elle est donc cohérente avec le résultat obtenu.

d- Expression de α'

$$\tan\alpha' = \alpha' = \frac{A_1B_1}{O_2F_2} = \frac{A_1B_1}{F'_2} \qquad \alpha' = \frac{8.10^{-5}}{2{,}5.10^{-2}} = 3.10^{-3} \text{ rad}$$

4- Grossissement

a- Le grossissement standard G de ce microscope est : $G = \dfrac{\alpha'}{\alpha}$; $G = \dfrac{3{,}2.10^{-3}}{8.10^{-6}} = 400$

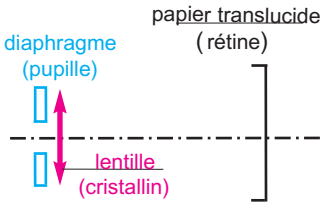
b- $G = |\gamma_1|.G_2$; $G_2 = \dfrac{G}{|\gamma_1|}$; $G_2 = \dfrac{400}{40} = 10$

L'oculaire utilisé est celui qui comporte l'indication X10.

L'ESSENTIEL

L'œil est modélisé par une lentille convergente, un diaphragme et un papier translucide plaçé au plan focal image de la lentille.

La faculté de l'œil de former une image nette sur la rétine est dûe à une modification de la courbure des faces de la pupille qui s'appelle l'accommodation.



défauts	l'image d'un objet situé à l'infini se forme	Qualité attribué à l'oeil	Les défauts de la vision sont corrigés par
Sans défaut	sur la rétine	œil normal	
Hypermétropie	en arrière de la rétine	œil de profondeur trop courte	une lentille convergente
Myopie	en avant de la rétine	œil de profondeur trop longue	une lentille divergente

Le microscope est un système optique modélisé par deux lentilles convergentes : l'objectif et l'oculaire.

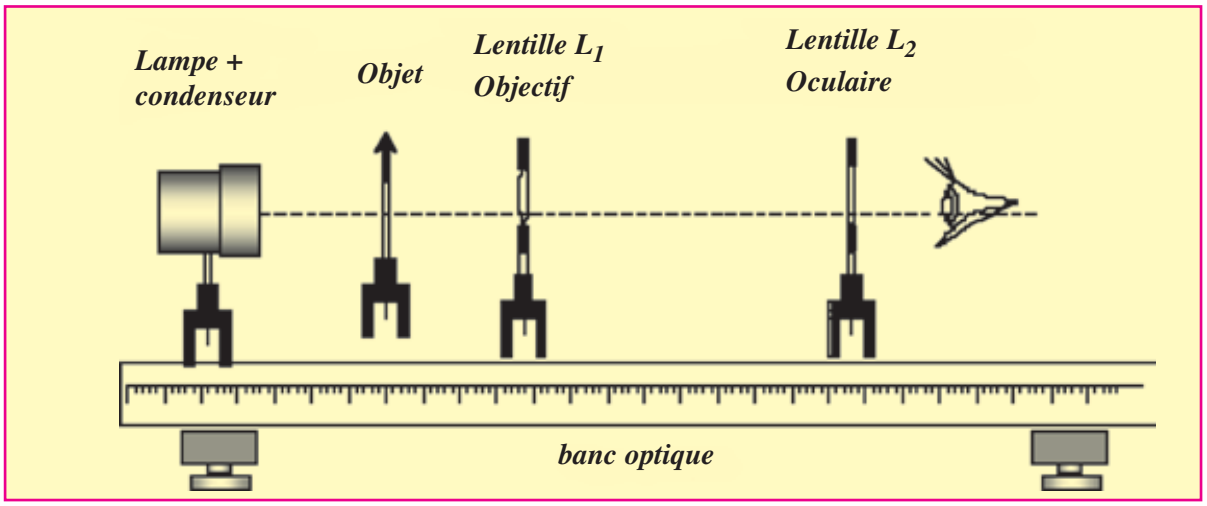
Dans le cas ou l'oeil n'accomode pas, l'objectif donne d'un petit objet une image renversée et agrandie située dans le foyer objet de l'oculaire. L'image définitive observée à travers l'oculaire est virtuelle, renversée, très agrandie et située à l'infini.

TRAVAUX PRATIQUES

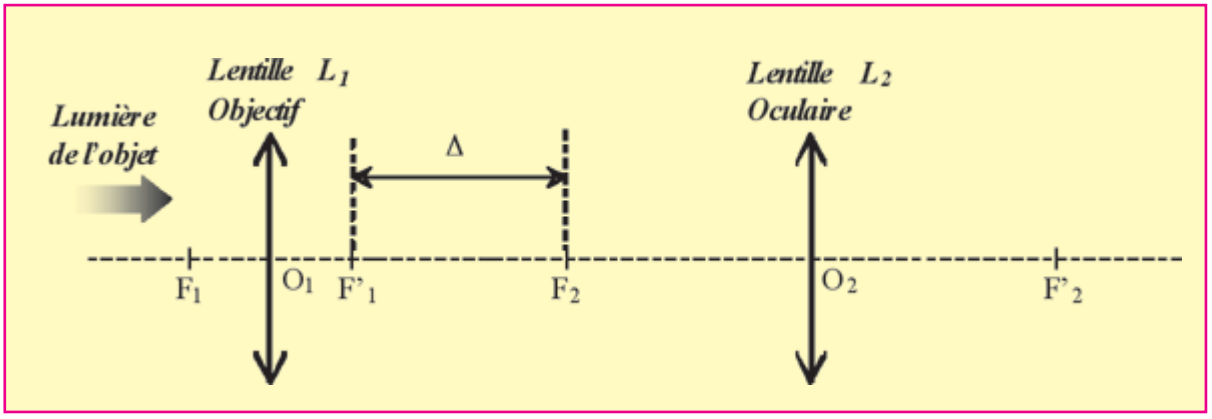
BUT : réaliser un microscope simplifié.

MATÉRIEL

- Un banc d'optique et son dispositif.
- Des lentilles de vergences différentes connues.

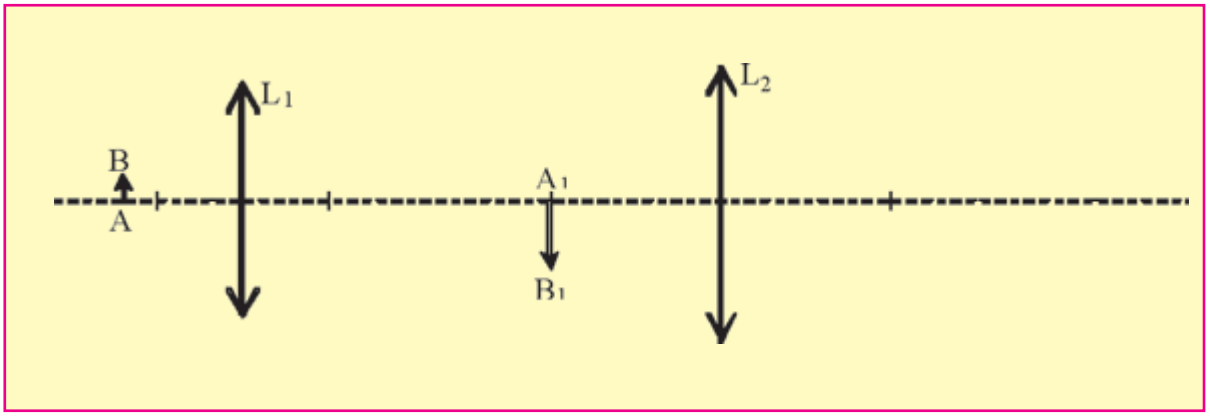


MODÉLISATION



ACTIVITÉ 1

- On donne $C_1 = +50\ \delta$ et $C_2 = +25\ \delta$. Déterminer f_1' et f_2'.
- Soit AB un objet lumineux de 0,70 cm de haut placé à 0,80 cm du foyer objet F_1.
- Reproduire le schéma ci-après et construire la marche de deux rayons issus de B donnant l'image B_1 par la lentille L_1.
- Poursuivre la marche de ces rayons de manière à trouver l'image B' de B_1 par la lentille L_2.
- Où se trouvent les images B' et A' ? Pourquoi ? Quel en est l'intérêt ?



ACTIVITÉ 2

On diminue légèrement la distance objet - microscope.
L'objet de 0,70 cm de haut se trouve alors à 0,60 cm de F_1.

- Placer à l'échelle l'objet et les lentilles L_1 et L_2 ainsi que leurs foyers sur un papier millimétré. (L'intervalle optique est de 5,0 cm)
- Construire les images B_1 et B'.
- À quelle distance se trouve l'image A'B' de l'œil en supposant que l'œil soit collé contre l'oculaire ?
- Comparer cette distance à la distance minimale de vision distincte d_m = 25 cm et conclure.

- Calculer $\overline{O_1A_1}$.

- Donner l'expression de $\overline{O_2A_1}$ en fonction de f_1', f_2', Δ et $\overline{O_1A_1}$

- Calculer sa valeur et en déduire $\overline{O_2A'}$.

EXERCICES

Je vérifie mes connaissances

Choiisr la (ou les) proposition(s) correcte(s)

1- Une personne myope voit très bien :
a- un objet très éloigné.
b- un objet très proche.
c- un objet qui se situe entre 10 et 100 cm environ.
d- un objet qui se situe entre 1 m et l'infini.

2- La position la plus proche de l'objet pour laquelle la vision est nette est :
a- Le punctum proximum (P.P).
b- Le punctum remotum (P.R).

3- Un œil normal possède une distance focale f =17 mm au repos.
a- La vergence de l'œil est égale à 17δ.
b- L'image d'un objet à l'infini se forme à 17 mm du cristallin.
c- La vergence de l'œil est égale à 59δ.
d- Lorsque l'œil accommode, sa distance focale diminue.

4- Une personne présente à l'opticien l'ordonnance que lui a prescrit l'ophtalmologiste.
On y lit entre autres : œil droit : - 2
œil gauche : - 1,5.
a- La personne souffre de myopie.
b- La personne souffre d'hypermétropie.

5- Dans un microscope :
a- l'œil doit être placé près de l'objectif.
b- l'œil doit être placé près de l'oculaire.

6- Dans un microscope :
a- l'oculaire est un ensemble de lentilles convergentes, de distance focale grande.
b- l'oculaire est un ensemble de lentilles convergentes, de distance focale faible.
c- l'oculaire est un ensemble de lentilles divergentes, de distance focale faible.
d- l'oculaire est un ensemble de lentilles divergentes, de distance focale faible grande.

7- Dans un microscope :
a- l'objectif est un ensemble de lentilles convergentes, de distance focale très faible.
b- l'objectif est un ensemble de lentilles convergentes, de distance focale très grande.
c- l'objectif est un ensemble de lentilles divergentes, de distance focale très faible.
d- l'objectif est un ensemble de lentilles divergentes, de distance focale très grande.

8- Dans un microscope :
a- l'image observée est réelle, renversée par rapport à l'objet.
b- l'image observée est réelle, droite par rapport à l'objet.
c- l'image observée est virtuelle, renversée par rapport à l'objet.
d- l'image observée est virtuelle, droite par rapport à l'objet.

J'applique mes connaissances et je raisonne

Ex-1- On représente très simplement l'œil comme un système constitué d'une lentille convergente de centre optique 0 (le cristallin) et d'un écran (la rétine).
La distance lentille-rétine reste constante.
1- Construire l'image d'un objet AB à l'infini dans le cas d'un œil myope, d'un œil normal, d'un œil hypermétrope. Où se situe l'image A'B' dans chaque cas ?
2- Construire très simplement ces mêmes images pour un oeil myope et un œil hypermétrope corrigés par une lentille L adéquate.
3- Quelle est l'augmentation de vergence entre le PR et le PP ?

Ex-2- Un œil, dont le PP se trouve à 36 cm est caractérisé par une distance cristallin-rétine égale à 14,5 mm.
1- Calculer la distance focale f' du cristallin et sa vergence maximale.
2- Sachant que l'accommodation augmente sa vergence de 6 dioptries, calculer la vergence de la lentille représentant l'œil au repos ainsi que sa distance focale f'.
3- En déduire le défaut de l'œil.

Ex-3- On considère un œil normal dont la rétine est située à 15 mm en arrière du centre optique de la lentille.
1- Donner la définition d'un oeil normal.
2- Où se situe le punctum remotum PR de cet œil ?
3- En déduire la distance focale image f' de la lentille représentant cet œil et sa vergence quand l'oeil est au repos.
4- Cet œil permet de voir nettement des objets rapprochés, expliquer le phénomène.
5- Trouver la nouvelle distance focale f' de cet œil quand l'objet est situé à 2 m.

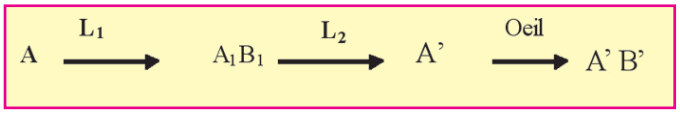
Ex-4- L'objectif d'un microscope donne une image A_1B_1 intermédiaire de l'objet AB de grandeur 1,8 mm. L'objet AB a une grandeur de 1,2 cm.
Calculer le grandissement de l'objectif.

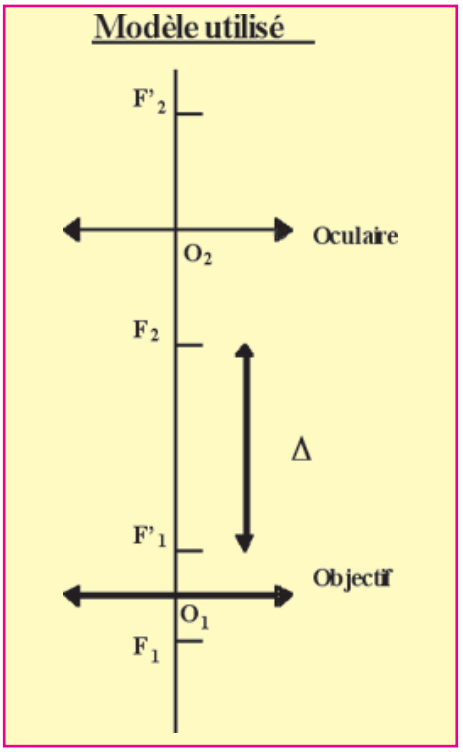
Ex-5- L'objectif d'un microscope est assimilé à une lentille mince de vergence égale à 200 dioptries.
1- Rappeler le rôle de l'objectif.
2- La grandeur de l'objet à mesurer est de 0,3 mm ; il est situé à 6 mm du centre optique 0_1 de l'objectif.
a- Donner les caractéristiques de l'image intermédiaire A'B', fournie par l'objectif.
b- Calculer le grandissement de l'objectif.
c- Réaliser la construction de cette image A_1B_1 en utilisant : pour l'échelle horizontale : 1 mm représente 5 mm, pour l'échelle verticale : 1 mm représente 50 mm.

Ex-6- Le grandissement de l'objectif d'un microscope est égal à 30.
1- Quelle est la vision la moins fatigante pour les yeux si on considère un oeil normal ?
2- Où doit se situer l'image A_1B_1 formée par l'objectif par rapport à l'oculaire pour obtenir l'observation souhaitée à travers le microscope ? Quel est le rôle de l'oculaire ?
3- Réaliser la construction avec un oculaire de 40 dioptries et une image A_1B_1 de 2 cm de hauteur.

Ex-7- Une lentille mince convergente a pour distance focale f égale à 4,0 mm. Un objet AB mesurant 0,2 mm est placé à 4,1 mm de son centre optique.
1- Quels sont la nature, le sens et la taille de L'image A'B' de l'objet AB ?
2- À 18 cm de cette lentille, on place une seconde lentille convergente, de distance focale f' égale à 16 mm. L'image A'B' de AB formée par la première lentille joue le rôle d'objet pour la seconde.
a- Quels sont la nature, le sens et la taille de l'image A"B" de A'B' ?
b- Quel appareil repose sur ce principe ?

Ex-8- On modélise le microscope par :
Objectif : lentille L_1 de vergence $C_1 = +8\ \delta$;
Oculaire : lentille L_2 de vergence $C_2 = +5\ \delta$.
Intervalle optique $= F'_1 F_2 = 67{,}5$ cm soit $O_1O_2 = 1$ m.
On observera à travers le microscope l'image A'B' d'un quadrillage millimétré AB. L'objectif (L_1) donne de l'objet AB observé, une première image A_1B_1 qui va servir d'objet pour l'oculaire (L2).





1- Où doit se former l'image intermédiaire A_1B_1 donnée par l'objectif pour que l'œil observe l'image définitive A'B' sans accommoder ?
2- En déduire la position de l'objet AB par rapport à l'objectif. Calculer le grandissement γ donné par l'objectif pour faciliter la construction par la suite.
3- Construire sur une feuille de papier millimétrée, la marche des rayons lumineux dans le microscope modélisé en prenant l'échelle **1/ 5** selon l'axe optique, et une image intermédiaire A_1B_1 haute de 5,4 cm.
4- Quel est le rôle de l'objectif dans un microscope ?
5- Quel est le rôle de l'oculaire ?

Ex-9- Etude d'un texte scientifique : **La cataracte**

" La cataracte résulte d'une opacification du cristallin, la lentille ajustable qui focalise l'image des objets observés sur la rétine. Cette opacification brouille l'image et en diminue l'intensité (...) Ce cristallin contient une forte proportion de protéines ce qui assure la focalisatïon de la lumière sur la rétine (...) Les protéines de la partie centrale du cristallin sont parmi les plus vieilles de l'organisme : elles ont l'âge de l'individu ! Cette quasi-incapacité de renouvellement des protéines est la cause de l'opacification du cristallin avec l'âge (...) Le cristallin, totalement transparent au point d'être invisible chez l'enfant, jaunit et devient légèrement laclescent* dès l'âge de 50 ans (...) Dans l'oeil, l'exposition aux rayons ultraviolets solaires produit de nombreux radicaux fibres qui oxydent les protéines du cristallin. Une dizaine d'études épidémiologiques ont récemment établi que le risque de cataracte est augmenté chez les personnes ayant eu une forte exposition aux ultraviolets. Un autre facteur de risque important de cataracte est le tabagisme. Le tabac augmente lui aussi la production de radicaux libres. "

D'après *Pour La Science,* Février 2002.

* *Lactescent: qui ressemble à du lait*

a- Relever dans le document la modification anatomique responsable des troubles de la cataracte.
b- Identifier dans le document les facteurs responsables ou aggravants de cette maladie.
c- Citer les deux grandeurs physiques, inverses l'une de l'autre, caractérisant toute lentille. Donner leurs unités.
d- Comment nomme-t-on la capacité qu'a le cristallin de s'ajuster pour obtenir une vision nette ? Donner le nom du défaut de l'oeil entraîné par la perte de cette faculté.

Ex-10- Etude d'un texte scientifique **:**

Sur le site http://www.snof.org/histoire/vinciphysio.html on trouve les phrases suivantes attribuées à Léonard de Vinci.

"Si l'oeil doit voir une chose de trop près, il ne peut pas bien la juger, comme il arrive à celui qui veut voir le bout de son nez. Donc en règle générale, la nature enseigne qu'on ne verra pas parfaitement une chose si l'intervalle qui se trouve entre l'oeil et la chose vue n'est au moins de la grandeur du visage."

"Si l'oeil qui regarde l'étoile se tourne rapidement de la partie opposée, il lui semblera que cette étoile se compose en une ligne courbe enflammée. Et cela arrive parce que l'oeil réserve pendant un certain espace la similitude de la chose qui brille et parce que cette impression de l'éclat de l'étoile persiste plus longtemps dans la pupille que n'a fait le temps de son mouvement."

1- Étude du premier paragraphe.

a- Expliquer le phénomène évoqué par Léonard de Vinci.

b- Quel est l'ordre de grandeur évoqué ? Donner sa valeur approximative.

2- Étude du second paragraphe.

a- Quel est le phénomène évoqué dans le second paragraphe ?

b- Justifier l'observation qui fait apparaître " une ligne courbe enflammée ".

c- Quelle est la durée approximative de cette persistance?

d- Citer des exemples illustrant ce phénomène.

Ex-11- Etude d'un texte scientifique : **L'oeil : une caméra haute définition**

La lumière est reçue par l'œil comme par une caméra : un diaphragme, l'iris, permet de régler la quantité de lumière passant à travers la pupille. Les rayons lumineux sont déviés par réfraction lors de la traversée de milieux transparents (cristallin principalement) comme ils le sont par les lentilles d'un objectif. L'analogie est suffisante pour que notre œil soit qualifié de "camérulaire".

On appelle "définition de l'image", le nombre de capteurs par mm≈. Elle diffère de manière importante entre une caméra, aussi perfectionnée soit-elle, et notre œil. La rétine de notre œil contient environ 180 000 capteurs par mm≈ dans sa région centrale, chacun d'entre eux correspondant à un point de l'image. Pour les caméscopes grand public, le nombre de capteurs est de 10 000 par mm≈ ...

D'après *Science et Vie,* novembre 1994.

1- Etablir une analogie entre les deux listes suivantes en reliant sur votre copie les termes correspondants :

œill, iris, rétine, cristallin,

diaphragme, lentille, caméra, pellicule.

2- Comparer la "définition de l'image" de la rétine de notre œil à celle d'un caméscope grand public en effectuant un rapport.

Ex-12- Etude d'un texte scientifique : **La correction chirurgicale**

Aujourd'hui, on peut guérir presque tous les défauts de la vue grâce aux nouvelles techniques chirurgicales développées petit à petit depuis trente ans.

L'utilisation de lasers " excimer " permet, sous anesthésie locale, de modifier la courbure de la cornée afin de permettre la focalisation des rayons lumineux sur la rétine. Dans ce traitement de surface, le laser rabote, en la vaporisant, une fine pellicule de cornée d'une épaisseur de 1 à 25 µm. La finesse de cette intervention assure une grande précision dans la correction des défauts de l'oeil.

L'utilisation, depuis 1991, de laser " lasik " permet d'agir sur les fortes myopies par une intervention interne. A l'aide d'outils spéciaux (des microkeratomes), on soulève une petite lamelle de cornée de 160 µm d'épaisseur et, à l'aide du lasik, on enlève alors une partie de l'intérieur de la cornée avant de rabattre le petit couvercle cornéen qui se suture ensuite en quelques minutes. La récupération par le patient est dans ce cas quasi immédiate.

Enseignement Scientifique 1L, *Hachette Education*.

1- Quelle est la caractéristique de l'oeil que l'on modifie par ces interventions ?

2- Quel traitement la modifie-t-il le plus ? Pourquoi ?

3- Rechercher à quelle phase de la fabrication artisanale des lentilles correspond le premier traitement.

Ex-13- Etude d'un texte scientifique : **Le microscope**

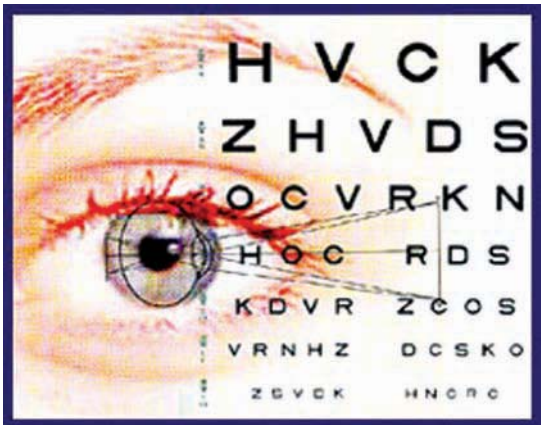
"La partie optique du microscope se compose d'un oculaire et d'un objectif. L'oculaire est une lentille près de laquelle on applique l'œil; l'objectif se trouve très près de l'objet. On place l'objet à une distance légèrement supérieure à la distance focale de l'objectif. Dans l'espace compris entre l'oculaire et l'objectif se forme une image renversée et grossie de l'objet. Il faut que cette image se situe entre l'oculaire et son foyer, car l'oculaire joue le rôle de loupe à travers laquelle on examine l'objet. On démontre que le grossissement du microscope est égal au produit des grossissements de l'oculaire et de l'objectif, pris séparément (…) Le microscope ne permet pas de discerner les détails d'un objet inférieurs au micromètre. Les détails de l'ordre du millimètre sont discernables à l'œil nu..."

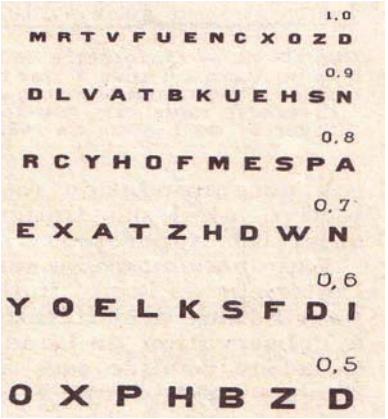
D'après : ***La physique à la portée de tous,*** **de Alexandre Kitaïgorodski.**

1- Est-il possible d'observer à l'œil nu un objet dont les dimensions sont de quelques dizaines de micromètres ? La réponse sera justifiée.
2- Faire un schéma, sans souci d'échelle, du microscope décrit dans le texte. Aucune construction de rayons lumineux n'est demandée. Sur ce schéma, figureront en particulier: l'objectif (L_1), l'oculaire (L_2), les centres optiques O_1 et O_2 respectivement des lentilles (L_1) et (L_2), les foyers objet et image de chacune d'elles, un objet (AB), A étant sur l'axe optique, l'image intermédiaire (A_1B_1) de cet objet et l'œil.
3- Dans le texte, l'auteur mentionne le terme "image intermédiaire".
Pour quelle lentille joue-t-elle le rôle d'objet ? Pour quelle lentille joue-t-elle le rôle d'image ?
4- Dans le texte donné, il est fait référence au grossissement du microscope.
En tenant compte de la définition donnée ci-dessus, indiquer quel abus de langage fréquent figure dans le texte.

POUR EN SAVOIR PLUS

OPTOMETRIE

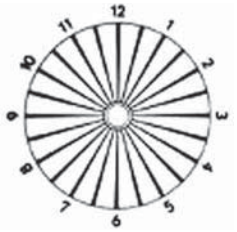




On appelle ainsi l'étude des yeux, au point de vue de la netteté des images observées et de son amélioration éventuelle; les expressions " examen de la vue" et "détermination de la réfraction oculaire" sont aussi couramment employées.

Les méthodes de l'optométrie subjective font appel uniquement aux perceptions du sujet examiné ; la plus employée consiste à essayer successivement devant l'oeil différents verres, jusqu'a ce que l'observation de tests (optotypes de dimensions diverses, placés a distance fixe (5 m pour la vision lointaine, et 30 cm, par exemple, pour la vision de près), soit aussi bonne que possible.

Ces optotypes sont le plus souvent des lettres de formes conventionnels (épaisseur des traits 5 fois plus faibles que la hauteur h)



L'avantage des lettres est leur facile désignation ; leur inconvénient est que certaines sont plus aisément identifiables que d'autres, et qu'en outre, leur mauvaise visibilité, quand la vision est imparfaite, ne renseigne guère sur l'importance et l'orientation d'un éventuel astigmatisme.

Pour déceler cette dernière amétropie, des disques rayonnés, ou encore des ensembles de traits, parallèles, ou disposés en chevrons, d'orientations diverses, peuvent être mises.

Les verres qu'on place devant l'oeil ne sont pas essayés au hasard : des modes opératoires systématiques permettent à l'optométriste de réduire les tâtonnements. Mais l'acuité visuelle ne dépend pas seulement du fait ou l'oeil peut ou non accommoder sur le plan vise, et qu'il a ou non tel ou tel astigmatisme ; elle dépend aussi considérablement, du choix du test observé, de sa luminance et de son contraste.

Le microscope électronique : Découvrir l'infiniment petit

On doit l'idée du microscope électronique au physicien français Louis Cartan. Il permet une plongée dans le monde de l'extrême petitesse, étonnamment plus profonde que ne l'autorisait jusque-là le microscope optique, parvenu depuis des années à son point de perfection, car on se heurtait alors à des phénomènes de réfraction si on accroissait le grossissement. Le microscope électronique est, dans son principe, assez voisin du microscope optique, la grande différence est que les rayons qui frappent l'objet à examiner ne sont pas des rayons lumineux mais des faisceaux d'électrons. Quant aux lentilles, remplacées par des champs électriques ou magnétiques, elles se présentent comme de petits disques de nickel ou des bobines de fil de cuivre. L'image est reçue directement sur un écran fluorescent ou recueillie sur un film photographique.

C'est grâce à un tel instrument que l'on a pu voir et photographier les virus, et même de grosses molécules. Sous le grossissement d'un million qu'il permet d'obtenir, un globule rouge aurait 8 m de diamètre et un Français moyen une hauteur de quelque 1 700 km !
Au Laboratoire d'Optique électronique du C.N.R.S., à Toulouse, fonctionne depuis quelques années un microscope électronique géant, alimenté par un imposant générateur d'un million et demi de volts, qui le surmonte. Sous la tension maximale, la vitesse des électrons est très voisine de celle de la lumière. L'ensemble est abrité sous une sphère de 24 m de diamètre.

Dans ce même laboratoire, un nouvel instrument, pesant vingt tonnes et fonctionnant sous une tension de trois millions et demi de volts, a été mis au point. C'est, de loin, le plus puissant du monde.

http://www.snof.org/histoire/vinciphysio.html
http://www.snof.org/histoire/lunettes.html
http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/optigeo/mnuopgeo.html
http://www.microscopies.com/index2.htm
http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/optiqueGeo/instruments/microscope.html
http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/oeilac_j.html
http://hypo.ge-dip.etat-ge.ch/www/physic/simulations/optique/oeil.html
http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/optiqueGeo/instruments/correction.html

Proétudes.blogspot.com
PROÉTUDES
Surfer en toute confiance

Sommaire

Avant-propos 3
Programme officiel 4

INTERACTIONS DANS L'UNIVERS

Chapitre 1 **Interaction électrique** 8

1. Loi de Coulomb 9
2. Notion de champ électrique 11
3. Champ électrique créé par une charge ponctuelle 14
4. Champ électrique créé par deux charges ponctuelles 16
5. Champ électrique uniforme 17
   - Exercices résolus 18
   - L'essentiel 22
   - Exercices 23
   - Pour en savoir plus 26

Chapitre 2 **Interaction magnétique** 29

Interaction magnétique-champ magnétique 30
1. Les différents types d'interaction magnétique 30
2. Champ magnétique 33
   - Exercice résolu 41
   - L'essentiel 44
   - Travaux pratiques 45
   - Exercices 46
   - Pour en savoir plus 50

Force de Laplace 54
1. Mise en évidence et caracteristiques 54
2. Application: le moteur électrique 60
   - Exercice résolu 63
   - L'essentiel 65
   - Exercices 66
   - Pour en savoir plus 70

Chapitre 3 **Interaction gravitationelle** 72

1. Forces de gravitation universelle 73
2. Champ de gravitation 79
3. Champ de pesanteur 83
4. Applications 85
   - Exercices résolus 89
   - L'essentiel 93
   - Exercices 94
   - Pour en savoir plus 97

Chapitre 4 **Interaction forte** 99

1. Introduction 100
2. Cohésion de la matière à l'échelle du noyau et interaction forte 100
   - L'essentiel 102
   - Exercices 103
   - Pour en savoir plus 105

MOUVEMENTS DE TRANSLATION

Chapitre 5 **Etude cinématique** 107

1. Généralités 108
2. Grandeurs cinématiques 110
3. Mouvement rectiligne uniforme 116
4. Mouvement rectiligne uniformément varié 116
5. Mouvement rectiligne sinusoïdal 119
   - Exercices résolus 124
   - L'essentiel 130
   - Travaux pratiques 131
   - Exercices 132
   - Pour en savoir plus 137

Chapitre 6 **Etude dynamique** 138

1. Référentiel galiléen 139
2. Deuxième loi de Newton 139
3. Théorème du centre d'inertie 141
4. Applications 142
   - Exercice résolu 144
   - L'essentiel 146
   - Travaux pratiques 147
   - Exercices 149
   - Pour en savoir plus 153

Chapitre 7 **Energie cinétique** 154

1. Energie cinétique d'un point matériel 155
2. Energie cinétique d'un système de points matériels 155
3. Variation de l'énergie cinétique : théorème de l'énergie cinétique 156
   - Exercice résolu 162
   - L'essentiel 164
   - Travaux pratiques 165
   - Exercices 166
   - Pour en savoir plus 171

Chapitre 8 **Mouvement dans les champs** 172

Mouvement d'un projectile 173
1. Chute libre avec vitesse initiale non verticale 173
2. Chute libre avec vitesse initiale verticale 178
   - Exercice résolu 179
   - L'essentiel 183
   - Travaux pratiques 184
   - Exercices 185
   - Pour en savoir plus 190

Mouvement dans un champ électrique uniforme 191
1. Travail d'une force électrique 191
2. Accélération d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme 196
3. Déviation d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme 199
   - Exercices résolus 207
   - L'essentiel 210
   - Travaux pratiques 211
   - Exercices 213
   - Pour en savoir plus 218

Mouvement dans un champ magnétique uniforme 219
1. La force de Lorentz 219
2. Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme 223
3. Application :Le spectrographe de passe 227
   - Exercices résolus 229
   - L'essentiel 232
   - Exercices 233
   - Pour en savoir plus 238

SYSTEMES OPTIQUES ET IMAGES

Chapitre 9 **Lentilles minces** 241

1. Généralités 242
2. Caractéristiques d'une lentille 244
3. Image d'un objet lumineux donnée par une lentille 249
4. Relation de conjugaison, grandissement 254
5. Détermination de la distance focale d'une lentille : focométrie 255
   - Exercices résolus 258
   - L'essentiel 267
   - Travaux pratiques 268
   - Exercices 269
   - Pour en savoir plus 272

Chapitre 10 **Instruments d'optique** 274

1. L'oeil 275
2. Le microscope 278
   - Exercices résolus 281
   - L'essentiel 286
   - Travaux pratiques 287
   - Exercices 289
   - Pour en savoir plus 294