

A.S : 2019/2020

Prof. : Adel Farjallah

Sciences Physiques

Document professeur

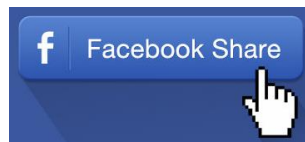
3<sup>ème</sup> Sciences expérimentales

Une version numérique du présent livre est disponible sur internet

[bit.ly/farjallah-physique-3eme-sc-prof](http://bit.ly/farjallah-physique-3eme-sc-prof) 

A utiliser aussi pour vérifier si votre copie papier du livre est originale ;  
NB : sur internet, vous trouver *la dernière version* mise à jour par l'auteur

**Vous pouvez partager un lien direct vers ce livre avec vos amis sur Facebook**



# Sommaire

Programme officiel..... 4

## Chimie

**Thème n°1 : Oxydoréduction..... 20**

Chapitre-1 : Phénomène d'oxydoréduction..... 22

Chapitre-2 : Classification électrochimique des métaux par rapport au dihydrogène..... 29

Chapitre-3 : Etude de quelques réactions redox..... 34

**Thème n°2 : Les acides et les bases..... 45**

Chapitre-1 : Définition des acides et des bases selon Brønsted..... 47

Chapitre-2 : Couples Acide / Base & réactions acido-basiques..... 51

**Thème n°3 : Chimie organique..... 57**

Chapitre-1 : Analyse des composés organiques..... 65

Chapitre-2 : Les alcools aliphatiques saturés..... 73

Chapitre-3 : Les acides carboxyliques aliphatiques saturés..... 102

Chapitre-4 : Les amines aliphatiques saturés..... 120

Chapitre-5 : Les acides aminés aliphatiques saturés & les protéines..... 139

Chapitre-6 : Vue d'ensemble de la chimie organique; notion de fonction organique..... 152

**Thème n°4 : La mesure en chimie..... 164**

Détermination d'une quantité de matière..... 164

**Thème n°5 : Evolution d'un système chimique..... 183**

Avancement d'une réaction chimique, transformation totale et transformation limitée..... 183

# Physique

<b>Thème n°1 : Les interactions dans l'Univers.....</b>	<b>194</b>
Chapitre-1 : Interaction électrique.....	195
Chapitre-2 : Interaction magnétique.....	208
Chapitre-3 : Interaction gravitationnelle.....	237
Chapitre-4 : Interaction forte.....	254
<b>Thème n°2 : Mécanique.....</b>	<b>258</b>
Chapitre-1 : Cinématique du solide en mouvement de translation.....	258
Chapitre-2 : Dynamique du solide en mouvement de translation.....	284
Chapitre-3 : Energie cinétique.....	294
Chapitre-4 : Mouvement dans un champ gravitationnel.....	305
Chapitre-5 : Mouvement dans un champ électrique uniforme.....	320
Chapitre-6 : Mouvement dans un champ magnétique uniforme.....	343
<b>Thème n°3 : Optique géométrique.....</b>	<b>355</b>
Chapitre-1 : Les lentilles minces.....	357
Chapitre-2 : Instruments d'optique.....	391
<b>Annexes.....</b>	<b>418</b>
Couples redox usuels.....	418
Couples Acide / Base usuels.....	419
Tableau périodique.....	420
Matériel de chimie.....	421
Outils mathématiques pour la mécanique.....	423
Matériel de physique.....	428
Les grandeurs physiques jusqu'à la 3 <sup>ème</sup> sciences.....	432

# Programme officiel

## A. PHYSIQUE (46,5 – 54 heures)

### LES INTERACTIONS DANS L'UNIVERS (20 – 23 heures)

Objectifs	Exemples de questionnements et d'activités	Contenu	Horaire
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Appliquer la loi de Coulomb.</li> <li>■ Mettre en évidence expérimentalement l'existence d'un champ électrique créé par une charge ponctuelle.</li> <li>■ Déterminer les caractéristiques d'un vecteur champ électrique.</li> <li>■ Représenter une force électrique.</li> <li>■ Appliquer la relation vectorielle <math>\vec{F} = q\vec{E}</math>.</li> <li>■ 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.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Etudier expérimentalement l'interaction entre deux pendules électriques et l'influence des facteurs dont-elle dépend ?</li> <li>▶ Pourquoi une averse soudaine après des coups d'éclair et des tonnerres intenses ?</li> <li>▶ Réaliser le spectre d'un champ électrique créé par :               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Une charge électrique ponctuelle,</li> <li>• deux charges électriques,</li> <li>• un champ électrique uniforme.</li> </ul> </li> </ul>	<p><b>I. Interaction électrique</b></p> <p><b>I-1. Loi de Coulomb</b></p> <p><b>I-2. Champ électrique</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Champ électrique créé par une charge ponctuelle :               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mise en évidence,</li> <li>• Vecteur champ électrique <math>\vec{E}</math>,</li> <li>• Force électrique <math>\vec{F} = q\vec{E}</math>,</li> <li>• Spectre et lignes de champ.</li> </ul> </li> <li>- Cas de deux charges ponctuelles.</li> <li>- Champ électrique uniforme.</li> </ul>	4,5 – 5 h



Objectifs	Exemples de questionnements et d'activités	Contenu	Horaire
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Mettre en évidence expérimentalement une interaction magnétique.</li> <li>■ Mettre en évidence expérimentalement l'existence d'un champ magnétique.</li> <li>■ Reconnaître un champ magnétique uniforme à partir de la forme de son spectre.</li> <li>■ Déterminer les caractéristiques d'un vecteur champ magnétique.</li> <li>■ Utiliser un teslamètre.</li> <li>■ Mettre en évidence expérimentalement la force de Laplace.</li> <li>■ Déterminer les caractéristiques de la force de Laplace.</li> <li>■ Expliquer le fonctionnement d'un moteur à courant continu.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Qu'est ce que l'aurore boréale ? Pourquoi est-elle fréquente aux grandes latitudes ?</li> <li>▶ Commenter un dossier préparé par les élèves sur la lévitation magnétique. ☒</li> <li>▶ A l'aide de petites aiguilles aimantées, mettre en évidence le champ magnétique terrestre <math>\vec{B}_T</math> et vérifier qu'il est uniforme dans une région très limitée de l'espace.</li> <li>▶ Réaliser les spectres magnétiques : <ul style="list-style-type: none"> <li>- d'un aimant droit,</li> <li>- d'un aimant en U,</li> <li>- d'un courant continu (fil et solénoïde).</li> </ul> </li> <li>▶ Etudier expérimentalement, dans le cas d'un solénoïde, l'influence de l'intensité du courant et celle du nombre de spires par unité de longueur sur la valeur du vecteur champ <math>\vec{B}</math>. ☒</li> <li>▶ Quel est le principe de fonctionnement du moteur d'un jouet électrique, de celui d'un baladeur CD, d'un appareil de mesure électrique à aiguille ?</li> <li>▶ Etudier expérimentalement les facteurs dont dépend la force de Laplace.</li> </ul>	<p><b>II. Interaction magnétique</b></p> <p><b>II-1. Les différents types d'interactions magnétiques</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Interactions aimant-aimant.</li> <li>- Interaction aimant-courant.</li> <li>- Interaction courant-courant.</li> <li>- Application : la lévitation magnétique</li> </ul> <p><b>II-2. Champ magnétique</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Notion de champ magnétique : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mise en évidence</li> <li>• Spectre et lignes de champ</li> <li>• Vecteur champ magnétique <math>\vec{B}</math>.</li> </ul> </li> <li>- Champ magnétique uniforme.</li> <li>- Champ magnétique terrestre.</li> <li>- Champ magnétique créé par un courant continu : cas d'un courant circulaire.</li> </ul> <p><b>II-3. Force de Laplace</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mise en évidence.</li> <li>- Caractéristiques.</li> <li>- Application : le moteur électrique à courant continu.</li> </ul>	10,5–12 h

☒ : Activité pouvant mettre en jeu les TIC (Technologies de l'information et de la communication)

Objectifs	Exemples de questionnements et d'activités	Contenu	Horaire
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Appliquer la loi de gravitation universelle.</li> <li>■ Caractériser le vecteur champ de gravitation <math>\vec{G}</math> en un point de l'espace.</li> <li>■ Représenter les lignes du champ de gravitation.</li> <li>■ Caractériser le vecteur champ de pesanteur <math>\vec{g}</math> en un point de l'espace.</li> <li>■ Reconnaître les facteurs dont dépend le poids <math>\vec{P}</math>.</li> <li>■ Expliquer certains phénomènes naturels observables dus à l'interaction gravitationnelle.</li> <li>■ Faire une analogie formelle entre les interactions newtonienne et coulombienne.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Pourquoi la Lune ne tombe-t-elle pas sur Terre ? Pourquoi ne s'éloigne-t-elle pas de la Terre ?</li> <li>▶ Peut-on calculer la masse d'une planète ?</li> <li>▶ Commenter un dossier, préparé par les élèves à l'avance, sur l'expérience de Cavendish (1798). ☐</li> <li>▶ Pourquoi les astronautes rebondissent-ils en se déplaçant sur la lune ?</li> <li>▶ Commenter un dossier, préparé par les élèves à l'avance, sur le phénomène des marées et un autre sur les ceintures d'astéroïdes (Kuiper). ☐</li> </ul>	<p><b>III. Interaction gravitationnelle</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Loi de gravitation universelle.</li> <li>- Champ de gravitation : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mise en évidence.</li> <li>• Vecteur champ de gravitation <math>\vec{G}</math>, ses caractéristiques.</li> </ul> </li> <li>- Cas particulier : Champ de pesanteur <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vecteur champ de pesanteur <math>\vec{g}</math>, ses caractéristiques.</li> <li>• Lignes de champ.</li> <li>• Champ uniforme.</li> </ul> </li> </ul> <p><u>Applications</u> : phénomènes des marées, ceintures d'astéroïdes (Kuiper).</p>	4 – 5 h
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Expliquer la cohésion du noyau atomique.</li> <li>■ Interpréter la cohésion de la matière : <ul style="list-style-type: none"> <li>- à l'échelle du noyau,</li> <li>- à l'échelle des atomes, des molécules et à notre échelle,</li> <li>- à l'échelle astronomique.</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Comment expliquer la cohésion d'un noyau atomique malgré la répulsion électrique mutuelle des protons ?</li> <li>▶ A quoi est due la cohésion du système solaire?</li> </ul>	<p><b>IV. Interaction forte.</b></p>	1 h

### Commentaires

On énoncera la loi de Coulomb et on mettra en évidence l'existence d'un champ électrique par son action sur un corps chargé.

On se limitera à la visualisation des spectres des champs électriques créés par une charge ponctuelle et par deux charges ponctuelles.

Avec l'interaction aimant – aimant, on distinguera le pôle nord du pôle sud d'un aimant.

L'étude des interactions magnétiques servira à la mise en évidence qualitative du champ magnétique.

On déterminera expérimentalement la direction et le sens du vecteur champ magnétique terrestre et on introduira les angles d'inclinaison et de déclinaison. On donnera à cette occasion les ordres de grandeur de champs magnétiques : de la Terre, d'une bobine, d'un aimant en fer à cheval, d'une bobine supra conductrice ...

On réalisera différents spectres d'aimants et de courants (fil, solénoïde) ; on montrera que les lignes de champ sont orientées.

Pour le champ magnétique créé par un courant circulaire, on se limitera au cas du solénoïde (bobine longue).

On mettra expérimentalement en évidence l'existence des faces nord et sud d'une bobine.

L'expression de la force de Laplace sous forme de produit vectoriel est hors programme ; on donnera la formule :  $\|\vec{F}\| = I\ell\|\vec{B}\| \sin \alpha$ .

L'expérience de la roue de Barlow permettra d'expliquer le principe de fonctionnement du moteur électrique à courant continu.

Au terme de l'étude des interactions électrique et magnétique, on fera remarquer que celles-ci se manifestent toutes les deux entre des

charges électriques. Donc, elles sont de même type : **interaction électromagnétique**.

La loi de gravitation est relative à un couple de points matériels, et peut s'appliquer à des corps homogènes ou à répartition de masse à symétrie sphérique.

On signalera que la chute libre d'un corps est une manifestation de l'existence du champ de pesanteur.

Bien qu'on le confonde à une force de gravitation, le poids d'un corps n'en est pas rigoureusement une à cause de la rotation de la Terre autour d'elle-même.

Pour chaque type d'interaction, on donnera quelques ordres de grandeurs des valeurs des forces mises en jeu.

On procèdera à une analogie formelle entre les interactions newtonienne et coulombienne.

La cohésion des noyaux atomiques, malgré l'interaction électromagnétique répulsive entre protons permettra de faire dégager l'existence de l'interaction forte. Les forces nucléaires seront considérées comme étant des forces fortement attractives entre les nucléons d'un même noyau, c'est-à-dire des forces dont la portée ne dépasse pas la dimension du noyau.

A la fin, on ne manquera pas de comparer les portées des interactions électromagnétique, gravitationnelle et forte et de signaler qu'elles sont considérées comme étant des interactions fondamentales du fait qu'elles permettent d'expliquer la plupart des phénomènes connus actuellement. Toutefois, il n'y a pas lieu d'évoquer l'interaction faible (4<sup>e</sup> type d'interaction fondamentale).

**MOUVEMENTS DE TRANSLATION** (16,5 – 20 heures)

Objectifs	Exemples de questionnements et d'activités	Contenu	Horaire
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Reconnaître un solide en mouvement de translation.</li> <li>■ Représenter les vecteurs : position, vitesse et accélération d'un mobile.</li> <li>■ Reconnaître la nature du mouvement d'un mobile par recours à l'expérience.</li> <li>■ Connaissant l'expression d'une grandeur cinématique (x, v ou a) en fonction du temps ainsi que les conditions initiales, retrouver les expressions de deux autres.</li> <li>■ Etablir, pour un mouvement rectiligne uniformément varié, la relation : <math>v_2^2 - v_1^2 = 2a \cdot (x_2 - x_1)</math>.</li> <li>■ Caractériser un mouvement rectiligne sinusoïdal par son amplitude <math>X_m</math> et sa période T.</li> <li>■ Etablir la relation (<math>a + \omega^2 x = 0</math>) entre l'accélération a et l'élongation x d'un mobile en mouvement rectiligne sinusoïdal.</li> <li>■ Appliquer la loi fondamentale de la dynamique (2<sup>ème</sup> loi de Newton).</li> <li>■ Appliquer le théorème du centre d'inertie.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Réaliser des enregistrements de mouvements ou faire des mesures de grandeurs cinématiques pour étudier des mouvements rectilignes. ☒</li> <li>▶ Déterminer par mesure directe (pour les mouvements lents) ou par enregistrement la période T et l'amplitude <math>X_m</math> d'un mobile en mouvement rectiligne sinusoïdal. ☒</li> <li>▶ Vérifier expérimentalement la relation : <math>\Sigma \vec{F}_{\text{ext}} = m\vec{a}_G</math> ☒</li> </ul>	<p><b>I- Etude cinématique</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Généralités : repérage d'un mobile (vecteur position, coordonnées cartésiennes, abscisse curviligne), vecteur vitesse, vecteur accélération (accélération normale, accélération tangentielle), lois horaires.</li> <li>- Mouvement rectiligne uniforme.</li> <li>- Mouvement rectiligne uniformément varié.</li> <li>- Mouvement rectiligne sinusoïdal : définition, équation horaire, vitesse, accélération, amplitude, période, fréquence, pulsation et phase.</li> </ul> <p><b>II. Etude dynamique</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Loi fondamentale de la dynamique (2<sup>ème</sup> loi de Newton).</li> <li>- Théorème du centre d'inertie.</li> </ul> <p><u>Applications :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Glissement d'un solide sur un plan incliné ;</li> <li>• Solide isolé ou pseudo isolé.</li> </ul>	7,5 – 9 h



Objectifs	Exemples de questionnements et d'activités	Contenu	Horaire
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Calculer l'énergie cinétique d'un solide en mouvement de translation.</li> <li>■ 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...).</li> <li>■ Appliquer la relation fondamentale de la dynamique au mouvement d'un projectile.</li> <li>■ Calculer le travail d'une force électrique.</li> <li>■ Appliquer l'expression du travail d'une force électrique : <math display="block">W_{A \rightarrow B} = q(V_A - V_B).</math></li> <li>■ Appliquer la relation fondamentale de la dynamique au mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme.</li> <li>■ Déterminer les caractéristiques de la force de Lorentz.</li> <li>■ Appliquer la relation fondamentale de la dynamique au mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Pourquoi les vitesses des véhicules sont-elles plus limitées en temps pluvieux qu'en temps sec ?</li> <li>▶ Sur quoi se base-t-on pour fixer les distances de sécurité routière ?</li> <li>▶ Etudier expérimentalement la variation de l'énergie cinétique d'un solide en chute libre ou mobile sur un banc à coussin d'air incliné. ☐</li> <li>▶ Dans quelle direction, par rapport à l'horizontale, un lanceur de poids doit-il effectuer son lancement pour optimiser sa performance ?</li> <li>▶ Quel est le principe de fonctionnement de l'oscilloscope ?</li> <li>▶ Expliquer la perturbation de l'image sur l'écran de l'oscilloscope par la présence d'un aimant.</li> <li>▶ Etudier expérimentalement l'influence de <math>\vec{B}</math>, <math>\vec{v}</math>, et de l'angle <math>\alpha</math> que fait <math>\vec{v}</math> avec <math>\vec{B}</math> sur les caractéristiques de la force de Lorentz. ☐</li> <li>▶ Comment séparer les isotopes d'un élément chimique?</li> </ul>	<p><b>III. Energie cinétique</b></p> <p>III-1. Energie cinétique d'un solide en translation.</p> <p>III-2. Variation de l'énergie cinétique : Théorème de l'énergie cinétique <u>Application</u> : Détermination d'une force de liaison.</p> <p><b>IV- Mouvements dans les champs</b></p> <p>IV-1. Mouvement dans un champ gravitationnel : Mouvement d'un projectile.</p> <p>IV-2. Mouvement dans un champ électrique</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Travail d'une force électrique dans un champ électrique uniforme : notion de différence de potentiel (d.d.p.) électrique</li> <li>- Accélération d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme.</li> </ul> <p><u>Application</u> : canon à électrons.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Déviation d'une particule chargée par un champ électrique uniforme</li> </ul> <p><u>Application</u> : déflexion d'un faisceau d'électrons (oscilloscope).</p> <p>IV-3. Mouvement dans un champ magnétique uniforme</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme : Force de Lorentz.</li> <li>- Application : spectrographe de masse.</li> </ul>	9 - 11 h

**Commentaires**

On se limitera aux mouvements de translation dans le plan.

Dans les généralités sur la cinématique, on s'intéressera au point matériel.

Pour l'étude cinématique des mouvements, on introduira brièvement la dérivée d'une fonction scalaire et on généralisera aux fonctions vectorielles tout en se limitant à des vecteurs unitaires constants. Il est à noter que les notions introduites ne doivent en aucune manière donner lieu à un développement excessif.

On donnera sans démonstration, les expressions de l'accélération tangentielle et de l'accélération normale. Il est à remarquer que l'étude de « la composition de vitesses » est strictement hors programme.

Le vecteur déplacement est hors programme.

On énoncera la loi fondamentale de la dynamique (2<sup>ème</sup> loi de Newton). Il est indiqué de préciser d'emblée que la relation :  $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$  traduisant cette loi n'est valable que dans les référentiels galiléens. On saisira cette occasion pour définir le repère de Copernic, le repère géocentrique et pour signaler sans développement excessif le caractère approximativement galiléen de ces repères ainsi que tout repère lié au laboratoire.

L'application du théorème du centre d'inertie à un solide isolé ou pseudo-isolé permettra de vérifier le principe d'inertie.

Le mouvement d'un projectile sera traité uniquement dans le cas d'un champ de pesanteur uniforme.

On montrera que pour un champ électrique uniforme, le travail de la force électrique qui s'exerce sur une charge  $q$  passant d'un point A à un point B ne dépend pas du chemin suivi, il ne dépend que de la valeur de la charge  $q$  et de la différence entre les valeurs d'une grandeur appelée potentiel électrique, caractérisant les états électriques des points A et B du champ. Le potentiel électrique est noté  $V$ .


La différence de potentiel entre deux points A et B d'un champ électrique (notée  $U_{AB} = V_A - V_B$ ) se calcule comme étant le produit scalaire  $\vec{E} \cdot \vec{AB}$ . Par suite, lors d'un déplacement de la charge électrique  $q$  de A vers B, le travail s'écrit :  $W = q \cdot (V_A - V_B) = q \cdot U_{AB}$ .

On généralisera cette expression du travail pour un champ électrique quelconque.

L'expression de la force de Lorentz sous forme de produit vectoriel est hors programme. On donnera la formule :  $\|\vec{F}\| = |q| \cdot \|\vec{v}\| \cdot \|\vec{B}\| \cdot \sin \alpha$ .

La superposition de deux champs (électrique et magnétique) est hors programme.

**SYSTEMES OPTIQUES ET IMAGES** (10 – 11 heures)

Objectifs	Exemples de questionnements et d'activités	Contenu	Horaire
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Classer les lentilles en lentilles convergentes et lentilles divergentes.</li> <li>■ Déterminer, graphiquement, la position de l'image d'un point objet donnée par une lentille convergente.</li> <li>■ Appliquer la relation de conjugaison des lentilles minces convergentes.</li> <li>■ Réaliser des montages permettant de mesurer la distance focale d'une lentille.</li> <li>■ Expliquer le principe de fonctionnement du microscope.</li> <li>■ Utiliser le modèle réduit de l'œil pour expliquer les défauts de la vision.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Comment allumer un papier à l'aide d'une loupe ?</li> <li>▶ Comment déterminer si les verres d'une paire de lunettes sont convergents ou divergents ?</li> <li>▶ Comment expliquer que la loupe agrandit les objets ?</li> <li>▶ En quoi diffèrent les loupes et les microscopes ?</li> <li>▶ Pourquoi les lentilles divergentes servent-elles pour les myopes ?</li> <li>▶ Pourquoi les lentilles convergentes servent-elles pour les hypermétropes ?</li> <li>▶ Vérifier expérimentalement la relation de conjugaison et le grandissement. </li> <li>▶ Comment déterminer l'ordre de grandeur de l'épaisseur d'un cheveu ?</li> </ul>	<b>I Les lentilles minces</b> <b>I.1. Classification</b> (divergentes, convergentes). <b>I.2. Définitions :</b> centre optique, axes optiques, foyers, plans focaux, distance focale et vergence. <b>I.3. Images données par une lentille convergente et une lentille divergente :</b> nature et position, relation de conjugaison, grandissement. <b>I.4. Focométrie</b> <u>Applications :</u> œil et microscope.	10 – 11h

**Commentaires**

Avant l'étude des lentilles sphériques (ou cylindriques) minces, on généralisera les notions d'objet réel ou virtuel et d'image réelle ou virtuelle pour un système optique.

On définira les caractéristiques des lentilles minces et on décrira les différents types de lentilles.

La distance focale sera considérée comme une grandeur non algébrique alors que la vergence sera considérée comme une grandeur algébrique.

L'étude théorique et expérimentale des lentilles minces se fera dans les conditions de Gauss que l'on précisera.

On établira la relation de conjugaison et on la vérifiera expérimentalement dans le cas d'une lentille convergente.

On donnera le modèle réduit de l'œil et on signalera succinctement les défauts de la vision et leur correction.

On mesurera la distance focale d'une lentille par recours à la relation de conjugaison, par la méthode de Bessel et par celle de Silbermann, toute autre méthode de mesure est hors programme.

Lors d'une activité expérimentale, on amènera les élèves à modéliser un instrument optique simple tel que le microscope et à y tracer la marche d'un faisceau lumineux.

## B. CHIMIE (39 – 42 heures)

### OXYDOREDUCTION (6 heures)

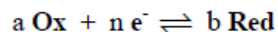
Objectifs	Exemples de questionnements et d'activités	Contenu	Horaire
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Interpréter l'action d'un acide sur un métal et celle d'un cation métallique sur un métal par le transfert d'électrons.</li> <li>■ Distinguer l'oxydation de la réduction et l'oxydant du réducteur.</li> <li>■ Représenter un couple oxydant réducteur par son symbole ou son équation formelle.</li> <li>■ Ecrire l'équation d'une réaction d'oxydoréduction.</li> <li>■ Faire une classification électrochimique des métaux par rapport au dihydrogène.</li> <li>■ Réaliser quelques expériences d'oxydoréduction.</li> <li>■ Interpréter une réaction d'oxydoréduction.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Pourquoi du fer abandonné à l'air rouille facilement ?</li> <li>▶ Pourquoi protéger les objets métalliques par de la peinture ?</li> <li>▶ Pourquoi préférer les ustensiles de cuisine en acier inoxydable ?</li> <li>▶ Pourquoi conseille-t-on d'utiliser des tuyaux de cuivre dans les installations d'eau courante de pluie?</li> </ul>	<p><b>I. Phénomène d'oxydoréduction.</b></p> <p><b>I-1. Action des acides sur les métaux</b></p> <p><b>I-2. Action d'un cation métallique sur un métal</b></p> <p><b>I-3. Définitions :</b> oxydation, réduction, oxydant, réducteur, couple oxydant réducteur, réaction d'oxydo-réduction.</p> <p><b>II. Classification électrochimique des métaux par rapport au dihydrogène</b></p> <p><b>III. Etude de quelques réactions d'oxydoréduction :</b></p> <p><b>III-1. par voie humide</b></p> <p><b>III-2. par voie sèche</b></p>	<p>2,5 h</p> <p>1 h</p> <p>2,5 h</p>



**Commentaires**

L'étude de l'action de l'acide chlorhydrique et de l'acide sulfurique dilué à froid sur les métaux ainsi que l'action d'un cation métallique sur un métal servira à définir l'oxydation, la réduction, l'oxydant, le réducteur, la réaction d'oxydoréduction, et à introduire la notion de couple oxydant-réducteur.

A tout couple oxydant réducteur simple, on associe une équation formelle de la forme :



Selon les conditions expérimentales et les réactifs mis en jeu, on observe pour un couple oxydant réducteur donné soit la réduction soit l'oxydation.

Au niveau du paragraphe III, on introduira le nombre d'oxydation comme étant un outil commode à l'identification du réducteur et de l'oxydant lorsque le transfert d'électrons n'est pas évident.

On écrira le nombre d'oxydation en chiffres romains. Il sera déduit pour les édifices simples (exemples : H<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, HCl) à partir du schéma de Lewis. Pour les édifices complexes, on utilisera les règles déduites de la définition.

On traitera expérimentalement un exemple d'oxydoréduction par voie humide et deux exemples par voie sèche parmi ceux des listes suivantes : a) (MnO<sub>4</sub><sup>-</sup> + Fe<sup>2+</sup>) ; (S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup> + I<sup>-</sup>) ; (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + I<sup>-</sup>),  
b) (Fe + S) ; (CuO + C) ; (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Al).

**ACIDES ET BASES DE BRONSTED** (3 heures)

Objectifs	Exemples de questionnements et d'activités	Contenu	Horaire
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Reconnaître un acide et une base selon Brønsted.</li> <li>■ Ecrire l'équation qui traduit une réaction acide-base.</li> <li>■ Représenter un couple acide-base par son symbole et par son équation formelle.</li> <li>■ Retrouver les couples acide-base mis en jeu dans une réaction acido-basique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ En quoi consiste le détartrage d'une cafetière par exemple et quel est le principe d'un détartrant d'une manière générale ?</li> <li>▶ Pourquoi utilise-t-on un médicament à base de bicarbonate de soude (hydrogénocarbonate de sodium) pour remédier aux maux d'aigreur ?</li> <li>▶ Effectuer la réaction entre le chlorure d'hydrogène et l'ammoniac en milieu anhydre.</li> <li>▶ Que veut-on dire par pluies acides et où résident leurs dangers ?</li> </ul>	<p><b>I. Définition des acides et des bases selon Brønsted</b></p> <p><b>II. Réactions acide-base</b></p> <p><b>III. Couples acide-base.</b></p>	3h

**Commentaires**

On rappellera les définitions des acides et des bases selon Arrhenius et on soulignera leurs insuffisances.

Un acide sera défini comme étant une entité chimique (neutre ou chargée) capable de céder un ion  $H^+$  au cours d'une réaction chimique.

Une base sera définie comme étant une entité chimique (neutre ou chargée) capable de capter un ion  $H^+$  au cours d'une réaction chimique.

Une réaction acide base consiste en un transfert d'ions  $H^+$ .

La définition de Brønsted permettra d'introduire les couples acide-base.

La réaction d'ionisation de l'eau permettra d'introduire les deux couples de l'eau  $H_3O^+ / H_2O$  et  $H_2O / OH^-$ .

On peut considérer que  $H^+$  est fixé à une molécule d'eau pour donner  $H_3O^+$  et que celui-ci est entouré de molécules d'eau.

**CHIMIE ORGANIQUE** (22,5 – 25 heures)

Objectifs	Exemples de questionnements et d'activités	Contenu	Horaire
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Réaliser des expériences simples d'analyse qualitative d'un composé organique.</li> <li>■ Retrouver la formule brute d'un composé à partir des résultats d'une étude quantitative.</li> <li>■ Distinguer un isomère de chaîne d'un isomère de position.</li> <li>■ Nommer un alcool.</li> <li>■ Réaliser des expériences simples communes aux alcools.</li> <li>■ Réaliser des expériences simples distinctives des trois classes d'alcool.</li> <li>■ Distinguer expérimentalement entre un aldéhyde et une cétone.</li> <li>■ Distinguer les trois classes d'alcool.</li> <li>■ Reconnaître et nommer un acide carboxylique.</li> <li>■ Reconnaître les principales propriétés chimiques d'un acide carboxylique.</li> <li>■ Reconnaître et nommer : <ul style="list-style-type: none"> <li>- un ester,</li> <li>- un anhydride d'acide,</li> <li>- un chlorure d'acyle.</li> </ul> </li> <li>■ Ecrire l'équation de la synthèse d'un dérivé d'acide à partir de l'acide ou à partir d'un autre dérivé.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Quels sont les éléments chimiques qui rentrent dans la composition du sucre, de l'amidon, de l'urée... ?</li> <li>▶ Comment reconnaître pratiquement une substance inorganique ?</li> <li>▶ Réaliser la pyrolyse de la sciure de bois ?</li> <li>▶ Effectuer la combustion du butane (ou du méthane, du sucre,...).</li> <li>▶ Réaliser la réaction de la chaux sodée avec l'urée.</li> <li>▶ A quoi sont dues les odeurs caractéristiques d'un milieu hospitalier ?</li> <li>▶ Comment contrôler le degré d'alcool chez un conducteur de voiture ?</li> <li>▶ Comment expliquer la transformation du jus de fruit en vinaigre ?</li> <li>▶ Réaliser la réaction de l'acide chlorhydrique avec le méthyl propan-2-ol.</li> <li>▶ Effectuer la réaction de l'acide éthanoïque avec l'éthanol en présence d'acide sulfurique concentré et caractériser la formation de l'éthanoate d'éthyle par son odeur (odeur de colle forte).</li> <li>▶ Comment explique-t-on le goût aigre du lait caillé ?</li> </ul>	<p><b>I. Analyse des composés organiques</b></p> <p><b>I-1. Analyse qualitative</b></p> <p><b>I-2. Analyse quantitative, formule brute</b></p> <p><b>II. Composés oxygénés</b></p> <p><b>II-1. Alcools aliphatiques saturés</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Structure, classes et nomenclature.</li> <li>2. Réactivité chimique : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Combustion.</li> <li>- Réaction avec un hydracide halogéné.</li> <li>- Déshydratation inter et intramoléculaire.</li> <li>- Oxydation ménagée.</li> <li>- Réaction avec l'acide éthanoïque.</li> </ul> </li> </ol> <p><u>Applications</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ethylotest.</li> <li>• Oxydation biochimique.</li> </ul> <p><b>II-2. Acides carboxyliques aliphatiques saturés</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Structure et nomenclature.</li> <li>2. Ionisation dans l'eau.</li> <li>3. Propriétés acides. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Action sur le B.B.T.</li> <li>- Action sur les métaux.</li> </ul> </li> <li>4. Réaction avec les alcools : <ul style="list-style-type: none"> <li>estérification.</li> </ul> </li> <li>5. Dérivés d'acides carboxyliques : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Chlorures d'acyle,</li> <li>- Anhydrides d'acide,</li> <li>- Esters.</li> </ul> </li> </ol>	<p>3,5 h</p> <p>4,5 - 5 h</p> <p>4,5 - 5,5 h</p>

Objectifs	Exemples de questionnements et d'activités	Contenu	Horaire
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Reconnaître et nommer une amine.</li> <li>■ Reconnaître la géométrie de l'azote dans une amine.</li> <li>■ Réaliser des expériences simples communes aux amines.</li> <li>■ Réaliser des expériences simples distinctives des trois classes d'amines.</li> <li>■ Distinguer les trois classes d'amines.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ A quoi est due cette bonne odeur de mer émanant des poissons frais ?</li> <li>▶ A mêmes concentrations, comparer les pH ou les conductibilités électriques d'une solution d'éthylamine et d'une solution aqueuse de soude.</li> <li>▶ Dégager expérimentalement les réactivités distinctives des différentes classes d'amines.</li> </ul>	<b>III- Composés azotés</b> <b>III-1. Les amines aliphatiques</b> 1. Définition- nomenclature. 2. Structure des amines : - géométrie de l'azote dans les amines. - les trois classes d'amines. 3. Réactivité chimique : - caractère basique des amines. - réactions avec l'acide nitreux.	4 – 4,5 h
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Distinguer par leurs structures entre un acide <math>\alpha</math> aminé, un acide <math>\beta</math> aminé et un acide <math>\gamma</math> aminé.</li> <li>■ Reconnaître et nommer un acide <math>\alpha</math> aminé.</li> <li>■ Décrire la liaison peptidique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Quelles sont les substances qui représentent le code génétique dans la nature ?</li> <li>▶ Qu'est-ce que le glycoColle ?</li> <li>▶ On dit que les protéines sont comparables à des « colliers » constitués de mille à plusieurs milliers de perles. Que désigne-t-on par « perles » ?</li> </ul>	<b>III-2. Acides aminés aliphatiques et protéines</b> 1. Structure et formule générale des acides aminés (acides $\alpha$ aminés, acides $\beta$ aminés, acides $\gamma$ aminés...) 2. Les acides $\alpha$ aminés : - nomenclature. - les acides $\alpha$ aminés en solution aqueuse. 3. Des acides $\alpha$ aminés aux protéines : la liaison peptidique. 4. Polypeptides et protéines : - définition. - structure des protéines.	4 – 4,5 h
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Distinguer entre polypeptides et protéines.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Qu'est-ce qu'ils ont en commun, les tissus vivants tels que les cheveux, les muscles, la peau, la soie, la laine... ?</li> <li>▶ Comment se déroule la synthèse des protéines dans l'organisme humain ?</li> <li>▶ Quelle est la structure des enzymes ?</li> <li>▶ Quelle différence y a-t-il entre peptide, polypeptide et protéine ?</li> <li>▶ Quel est le rôle des polypeptides dans l'organisme humain ?</li> </ul>	<b>IV- Notion de fonction organique</b>	2 h
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Reconnaître une fonction organique.</li> <li>■ Distinguer les différentes fonctions organiques.</li> <li>■ Reconnaître des isomères de fonctions.</li> <li>■ Retrouver les différentes transformations chimiques permettant de passer d'une fonction à une autre.</li> </ul>			

**Commentaires**

On signalera la notion d'isomérisation à chaque fois lorsque l'occasion se présente.

On se limitera aux composés organiques ne renfermant pas plus de huit atomes de carbone.

Pour l'analyse des composés organiques, on se limitera à ceux de type  $C_XH_Y$ ,  $C_XH_YO$ ,  $C_XH_YO_2$  et  $C_XH_YN$ .

On signalera l'existence des polyalcools et des polyacides carboxyliques.

On se limitera à une étude qualitative de l'estérification et on signalera que cette réaction est lente et limitée par la réaction d'hydrolyse.

Pour les composés dérivés des acides carboxyliques (esters, anhydrides et chlorures d'acides), la nomenclature ne doit pas faire l'objet d'une étude systématique. On se limitera aux dérivées ne renfermant pas plus de six atomes de carbone.

A partir d'une étude expérimentale, on montrera qu'une amine est une base faible.

Dans les énoncés des objectifs visant la reconnaissance des composés oxygénés et azotés étudiés, on s'appuiera sur le groupement fonctionnel sans mentionner le qualificatif « fonctionnel » avant d'avoir introduit la notion de fonction chimique.



**MESURE D'UNE QUANTITE DE MATIERE** (3,5 – 4 heures)

Objectifs	Exemples de questionnements et d'activités	Contenu	Horaire
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Titrer une solution aqueuse par réaction acide-base ou par réaction d'oxydoréduction.</li> <li>■ Calculer la conductance <math>G</math> d'une portion de solution électrolytique.</li> <li>■ Tracer la courbe d'étalonnage <math>G = f(C)</math> pour des solutions titrées.</li> <li>■ Exploiter une courbe d'étalonnage pour déterminer la concentration inconnue d'une solution.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Doser une solution aqueuse de diiode par une solution de thiosulfate de sodium. ☒</li> <li>▶ Comment détermine-t-on la composition d'une eau minérale ?</li> <li>▶ Comment reconnaître la bonne qualité d'une huile d'olive ?</li> <li>▶ Comment mesurer le degré de pollution de l'air?</li> <li>▶ A partir d'une solution de chlorure de sodium de concentration donnée, préparer par dilution plusieurs solutions de concentrations connues.</li> <li>▶ Par application de la loi d'Ohm et dans les mêmes conditions, mesurer leurs conductances, tracer la courbe d'étalonnage <math>G = f(C)</math> et l'exploiter pour déterminer la concentration d'un sérum physiologique. ☒</li> </ul>	<p><b>I. Détermination d'une quantité de matière à l'aide d'une réaction chimique</b></p> <p><b>I-1. Dosage acido-basique</b></p> <p><b>I-2. Dosage iodométrique</b>  <u>Application</u> : Détermination de la qualité d'une huile d'olive avec le calcul de son taux d'insaturation.</p> <p><b>II. Détermination d'une quantité de matière par mesure d'une grandeur physique</b></p> <p><b>II-1. Masse, volume et concentration</b></p> <p><b>II-2. Conductance électrique</b></p>	3,5 – 4 h

☒ : Activité pouvant mettre en jeu les TIC (Technologies de l'information et de la communication)

**Commentaires**

On rappellera l'équivalence acido-basique et on calculera la molarité d'une solution acide ou d'une solution basique.

On rappellera la relation entre la quantité de matière et les grandeurs physiques : masse, volume et concentration.

On ne parlera ni de conductivité ni des facteurs dont dépend la conductance d'une solution électrolytique.

**EVOLUTION D'UN SYSTEME CHIMIQUE** (4 heures)

Objectifs	Exemples de questionnements et d'activités	Contenu	Horaire
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Calculer l'avancement d'une réaction.</li> <li>■ Calculer l'avancement final d'une réaction.</li> <li>■ Calculer l'avancement maximal d'une réaction.</li> <li>■ Calculer le taux d'avancement final d'une réaction chimique.</li> <li>■ Déterminer le caractère total ou limité d'une réaction.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Réaliser l'expérience des ions iodure avec les ions peroxodisulfates <math>S_2O_8^{2-}</math>, calculer son avancement <math>x</math> à un instant <math>t</math> donné.</li> <li>▶ Comparer l'avancement final de la réaction des ions iodures <math>I^-</math> avec les ions peroxodisulfates <math>S_2O_8^{2-}</math> à son avancement maximal.</li> <li>▶ Par mesure du pH, comparer l'avancement final de la réaction de dissociation de l'acide éthanoïque dans l'eau à son avancement maximal</li> <li>▶ La transformation d'un système chimique est-elle toujours totale ?</li> </ul>	<p><b>I- Avancement d'une réaction chimique</b></p> <p><b>I-1. Système chimique et transformation chimique</b></p> <p><b>I-2. Notion d'avancement d'une réaction</b></p> <p><b>II- Transformation totale et transformation limitée</b></p> <p><b>II-1. Avancement final et avancement maximal</b></p> <p><b>II-2. Taux d'avancement final d'une réaction chimique :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cas d'une réaction totale,</li> <li>- Cas d'une réaction limitée.</li> </ul>	4 h

**Commentaire**

On exprimera l'avancement  $x$  en mole.

A partir d'une étude expérimentale de la réaction des ions peroxodisulfate  $S_2O_8^{2-}$  (ou de l'eau oxygénée  $H_2O_2$ ) avec les ions iodure  $I^-$ , on montrera, qualitativement, l'importance du facteur temps dans l'évolution d'une transformation chimique.

Lors de l'étude de l'évolution temporelle d'une transformation chimique, il sera commode de consigner les compositions du système en

quantités de matière (réactifs et produits) dans un tableau. Un tel tableau pourra être appelé tableau descriptif ou tableau d'avancement.

Si une transformation chimique se produit à volume constant, dans un système constitué d'une seule phase, il conviendra d'utiliser l'avancement volumique (avancement par unité de volume).

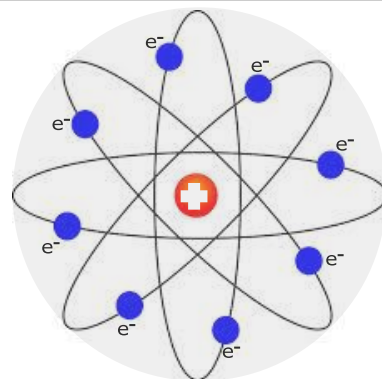
On définira le taux d'avancement final d'une réaction chimique comme étant le quotient de son avancement final  $x_f$  sur son avancement maximal  $x_{max}$ .

# Chimie

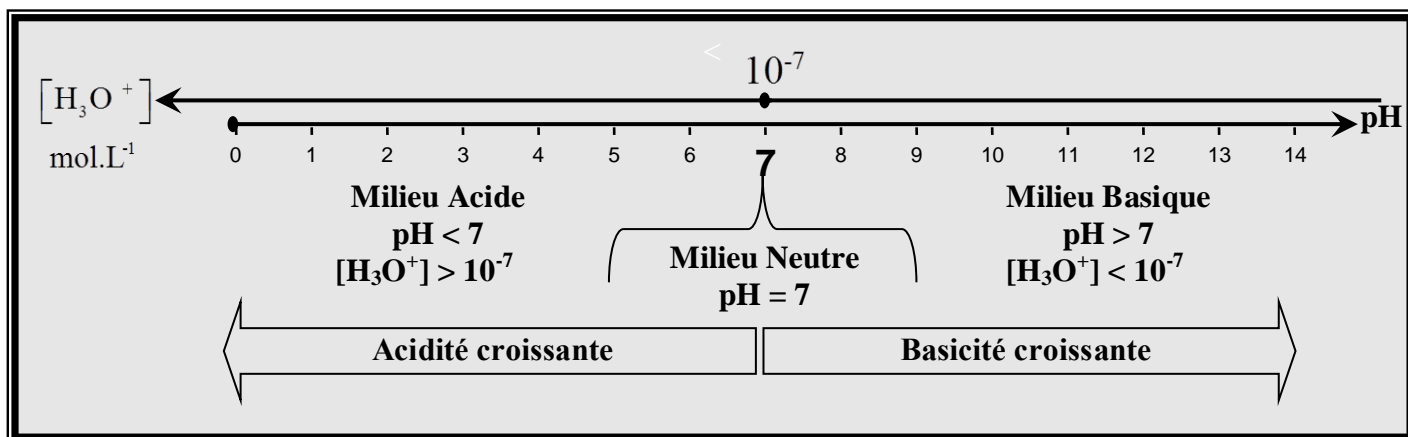
## Thème n°1 : Oxydoréduction

### Rappels

- ❖ L'atome est constitué d'un noyau chargé positivement, entouré par des électrons ( $e^-$ ) répartis sur des couches.  
Seuls les électrons de la couche externe (couche de valence) interviennent lors des transformations chimiques ; formation des ions et des édifices chimiques (molécules ou ions polyatomiques), et des réactions chimiques.



- ❖ Une solution est caractérisé par :
  - Une concentration molaire :  $C = \frac{n}{V}$  ; avec :  $\begin{cases} n : \text{quantité de matière du soluté (en mol)} \\ V : \text{volume de la solution (en L)} \end{cases}$   
*On se limite aux solutions pour lesquelles  $V_{\text{solution}} \approx V_{\text{solvant}}$ , (dites diluées).*
  - Molarités des espèces chimiques dissoutes : concentration de la solution en chaque espèce.
  - Un pH, indicateur de son caractère acido-basique (il est mesuré à l'aide d'un pH-mètre, ou estimé à l'aide d'un papier pH) :



- L'ion hydronium  $H_3O^+$  est composé d'un ion  $H^+$  hydraté (fixé sur une molécule d'eau)
- ❖ On appelle solution d'**électrolyte**, toute solution conductrice du courant électrique nettement mieux que l'eau pure ;
  - Elle contient des ions positifs (cations) et des ions négatifs (anions) provenant de l'électrolyte.
  - Plusieurs ions peuvent être identifiés par la couleur du précipité qu'ils donnent avec la soude (NaOH) ou le nitrate d'argent ( $AgNO_3$ ).

Test à la soude				
Bleu	Vert	Rouille	Blanc gélatineux et soluble dans une solution d'ammoniac	Blanc insoluble dans une solution d'ammoniac
$Cu^{2+}$	$Fe^{2+}$	$Fe^{3+}$	$Zn^{2+}$	$Al^{3+}$

Test au nitrate d'argent		
Blanc qui noircit à la lumière	Blanc qui <b>ne</b> noircit <b>pas</b> à la lumière	Jaune
$Cl^-$	$SO_4^{2-}$	$PO_4^{3-}$



**Application**

On dissout **24 mL** de chlorure d'hydrogène gazeux ( $\text{HCl}$ ) dans  $V = 100 \text{ mL}$  d'eau

- Calculer la concentration molaire de la solution.
- Le chlorure d'hydrogène étant un électrolyte fort ;
  - Ecrire l'équation de son ionisation dans l'eau.
  - Déterminer la molarité de la solution en ions hydronium, en ions chlorures et en chlorure d'hydrogène.
- Vérifier que la solution est acide, et donner la valeur de son pH.
- On verse un excès de nitrate d'argent sur la solution ; il se forme un précipité blanc qui noircit à la lumière :
  - Quel est l'ion identifié ; écrire l'équation de la réaction de précipitation.
  - Calculer (en mg) la masse du précipité formé.

On donne :  $M(\text{Ag}) = 108 \text{ g.mol}^{-1}$  ;  $M(\text{Cl}) = 35,5 \text{ g.mol}^{-1}$  ;  $V_m = 24 \text{ L.mol}^{-1}$

- $C = \frac{n(\text{HCl})}{V}$ , avec  $n(\text{HCl}) = \frac{V(\text{HCl})}{V_m} = \frac{24 \cdot 10^{-3} \text{ L}}{24 \text{ L.mol}^{-1}} = 10^{-3} \text{ mol}$ ; d'où  $C = \frac{10^{-3} \text{ mol}}{0,1 \text{ L}} = 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$
- $\text{HCl} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{Cl}^-$
  - $$\begin{cases} [\text{H}_3\text{O}^+] = C = 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1} \\ [\text{Cl}^-] = C = 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1} \\ [\text{HCl}] = 0 \end{cases}$$
- $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1} > 10^{-7} \text{ mol.L}^{-1}$  ; alors la solution est acide. On a  $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}} \Rightarrow \text{pH} = 2$
- $$\begin{cases} * \text{ L'ion identifié : } \text{Cl}^- \\ * \text{ L'équation de la réaction de précipitation : } \text{Ag}^+ + \text{Cl}^- \longrightarrow \text{AgCl}_{(\text{sd})} \end{cases}$$
  - $m(\text{AgCl}) = n(\text{AgCl}) \cdot M(\text{AgCl})$ 
    - \*  $M(\text{AgCl}) = 108 + 35,5 = 143,5 \text{ g.mol}^{-1}$
    - \*  $n(\text{AgCl}) = n(\text{Cl}^-) = [\text{Cl}^-] \cdot V = 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1} \cdot 0,1 \text{ L} = 10^{-3} \text{ mol}$
 D'où  $m(\text{AgCl}) = 10^{-3} \text{ mol} \cdot 143,5 \text{ g.mol}^{-1} = 143,5 \text{ mg}$

## Chapitre-1 : Phénomène d'oxydoréduction

### Objectifs

- Interpréter l'action d'un acide sur un métal et celle d'un cation métallique sur un métal par le transfert d'électrons.
- Distinguer l'oxydation de la réduction et l'oxydant du réducteur.
- Représenter un couple oxydant réducteur par son symbole ou son équation formelle.
- Ecrire l'équation d'une réaction d'oxydoréduction.

### Prérequis

- Structure de l'atome, formation des ions.
- Caractère acido-basique des solutions aqueuses, pH et  $[H_3O^+]$ .
- Tests d'identification des ions  $Zn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$  et  $Fe^{3+}$ .
- Equation d'une réaction chimique.

### Matériel

* 6 Tubes à essai	* Limaille de fer
* 1 Bécher	* Grenaille de zinc
* 1 Erlenmeyer	* Solution aqueuse de HCl (~ 0.1 M)
* 2 Spatules	* Solution aqueuse de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (~ 0.1 M)
* 1 Lame de fer (décapée)	* Solution aqueuse de soude
* 1 Fil de cuivre (décapé)	* Solution aqueuse de CuSO <sub>4</sub>
* Papier pH	* Solution aqueuse de AgNO <sub>3</sub> (~ 0.1 M)

Ce phénomène est souvent observé avec les métaux, tel que la transformation du fer en rouille sous l'action de l'oxygène et la vapeur d'eau atmosphériques.

Les métaux sont facilement reconnus par leur grande conductibilité électrique et thermique, ainsi que leur éclat ; ils donnent tous des cations :

ex Cu donne  $Cu^+$  ou  $Cu^{2+}$

Fe -----  $Fe^{2+}$  ou  $Fe^{3+}$

Zn -----  $Zn^{2+}$

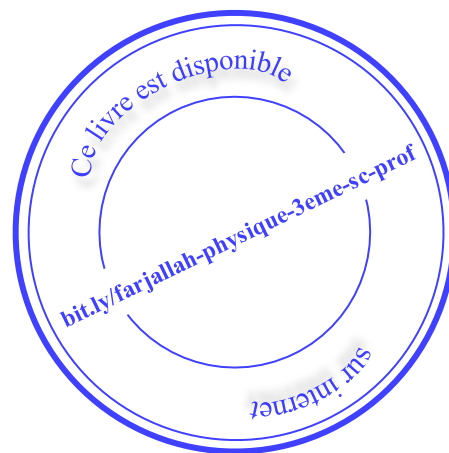
Ag -----  $Ag^+$

Al -----  $Al^{3+}$

Ni -----  $Ni^{2+}$

Sn -----  $Sn^{2+}$

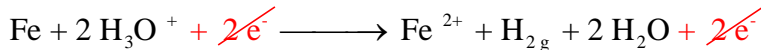
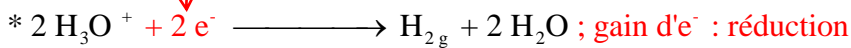
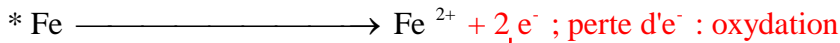
. .  
. .



### I- Action des acides sur les métaux

#### 1) Action de l'acide chlorhydrique sur le fer

- Dégagement d'un gaz qui détonne en présence d'une flamme : H<sub>2</sub>
- Le pH du milieu réactionnel augmente  $\Rightarrow [H_3O^+]$  diminue.
- Le test à la soude prouve la formation d'ions  $Fe^{2+}$   
 $\Rightarrow$  Réaction entre Fe et  $H_3O^+$ , qui donne  $Fe^{2+}$  et H<sub>2</sub>



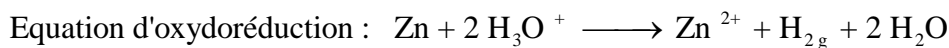
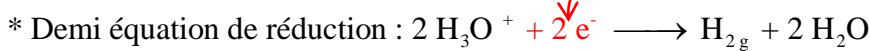
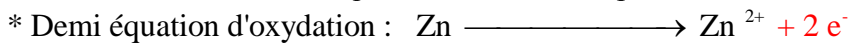
$\text{Fe} + 2\text{H}_3\text{O}^+ \longrightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{H}_{2\text{g}} + 2\text{H}_2\text{O}$  : Equation de l'oxydoréduction ; bilan des 2 demi-équations d'oxydation, et de réduction.

$\text{H}_3\text{O}^+$  a arraché des  $\text{e}^-$  au fer : il l'a oxydé ;  $\text{H}_3\text{O}^+$  est l'oxydant dans cette réaction.

D'autre part, Fe a donné des  $\text{e}^-$  à  $\text{H}_3\text{O}^+$  qui l'ont permis de se réduire en  $\text{H}_2$  : il l'a réduit ; Fe est le réducteur dans cette réaction.

## 2) Action de l'acide sulfurique sur le zinc

Mêmes observations, sauf que le test à la soude prouve la formation d'ions  $\text{Zn}^{2+}$



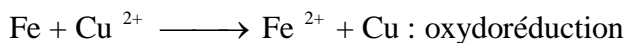
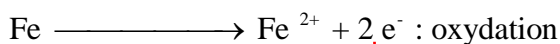
Réducteur    Oxydant

## II- Action d'un cation métallique sur un métal

### 1) Action de l'ion $\text{Cu}^{2+}$ sur le fer

Une lame de fer plongée dans une solution de sulfate de cuivre ( $\text{Cu}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$ ) se recouvre d'un dépôt de cuivre, et la solution perd sa couleur bleu due aux ions  $\text{Cu}^{2+}$  : le test à la soude prouve la formation d'ions  $\text{Fe}^{2+}$ .

⇒ Réaction entre Fe et  $\text{Cu}^{2+}$  qui donne  $\text{Fe}^{2+}$  et Cu

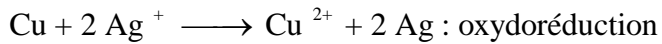
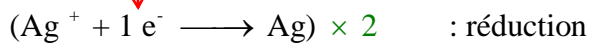
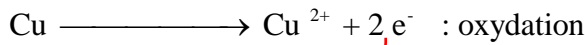


Réducteur    Oxydant

### 2) Action de l'ion $\text{Ag}^+$ sur le cuivre

Un fil de cuivre plongé dans une solution de nitrate d'argent ( $\text{Ag}^+ + \text{NO}_3^-$ ) se recouvre d'un dépôt gris noirâtre d'argent, et la solution se colore en bleu : le test à la soude prouve la formation d'ions  $\text{Cu}^{2+}$ .

⇒ Réaction entre Cu et  $\text{Ag}^+$  qui donne  $\text{Cu}^{2+}$  et Ag



Réducteur Oxydant

### III- Conclusion

- \* Toute réaction au cours de laquelle il y a transfert d' $\text{e}^-$  entre les réactifs, est dite réaction d'oxydoréduction (ou redox). L'oxydation est la transformation correspondant à une perte d' $\text{e}^-$ , et la réduction celle correspondant à un gain d' $\text{e}^-$ .
- \* L'oxydant est le réactif qui arrache des  $\text{e}^-$  à l'autre, le réducteur est celui qui en cède.

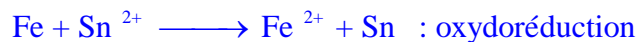
#### Application-1

On verse une solution aqueuse de chlorure d'étain ( $\text{SnCl}_2$ ) sur de la limaille de fer ; après quelque temps on filtre le mélange et on lui ajoute de la soude : il se forme un précipité vert.

1. Quel est l'ion mis en évidence par le test à la soude ; expliquer sa formation en écrivant la demi-équation correspondante.
2. En déduire la demi-équation de la réduction ayant lieu.
3. Ecrire l'équation de la réaction redox ayant lieu ; indiquer l'oxydant et le réducteur.



3.



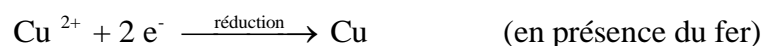
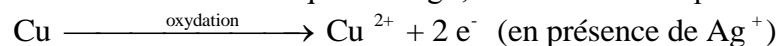
Réducteur Oxydant

### IV- Notion de couples redox (oxydant / réducteur)

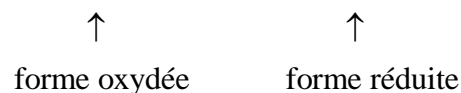
#### 1) Exemples de couples redox simples

\* Un couple du cuivre

Selon le réactif avec lequel il réagit, l'élément cuivre peut subir l'oxydation ou la réduction :

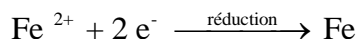
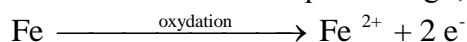


On dit que  $\text{Cu}^{2+}$  et Cu constituent un couple redox  $\text{Cu}^{2+} / \text{Cu}$ , et les 2 demi-équations précédentes peuvent être regroupées en une seule équation :  $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu}$ , appelée équation formelle du couple.

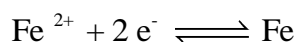


\* Un couple du fer

Selon le réactif avec lequel il réagit, l'élément fer peut subir l'oxydation ou la réduction :

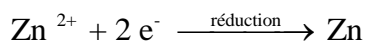
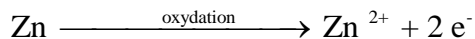


$\text{Fe}^{2+}$  et Fe constituent un couple redox représenté par le symbole  $\text{Fe}^{2+} / \text{Fe}$ , ou l'équation formelle

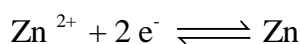


\* Couple du zinc

De même, l'élément zinc peut subir l'oxydation ou la réduction :

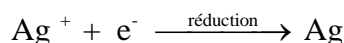
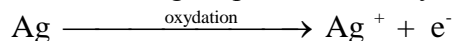


$\text{Zn}^{2+}$  et Zn constituent un couple redox représenté par le symbole  $\text{Zn}^{2+} / \text{Zn}$ , ou l'équation formelle

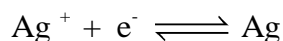


\* Un couple de l'argent

L'élément argent peut subir l'oxydation ou la réduction :



$\text{Ag}^{+}$  et Ag constituent un couple redox représenté par le symbole  $\text{Ag}^{+} / \text{Ag}$ , ou l'équation formelle



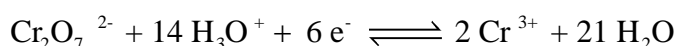
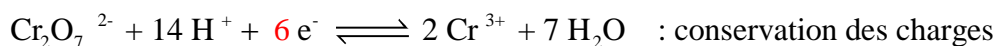
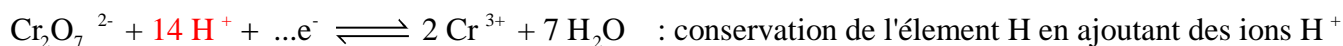
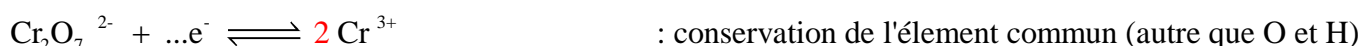
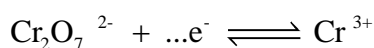
## 2) Exemples de couples redox complexes

\* Couple de l'hydrogène

Equation formelle :  $2 \text{H}_3\text{O}^{+} + 2 \text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{H}_{2\text{g}} + 2 \text{H}_2\text{O}$  ; d'où le symbole  $\text{H}_3\text{O}^{+} / \text{H}_2$



\* Un couple du chrome  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} / \text{Cr}^{3+}$  ; pour écrire son équation formelle :



### 3) Définition

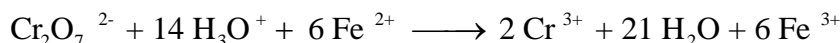
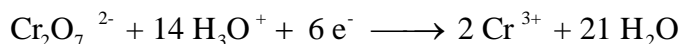
Un couple redox (ou oxydant / réducteur) est constitué de deux entités chimiques l'une correspond à la forme oxydée Ox et l'autre à la forme réduite Red d'un même élément chimique. On le note Ox/Red.

On lui associe une équation formelle  $\left\{ \begin{array}{l} a \text{ Ox} + n e^- \rightleftharpoons b \text{ Red} : \text{pour un couple simple} \\ a \text{ Ox} + c \text{ H}_3\text{O}^+ + n e^- \rightleftharpoons b \text{ Red} + d \text{ H}_2\text{O} : \text{pour un couple complexe} \end{array} \right.$

### 4) Intérêt des équations formelles

Il est possible d'écrire l'équation d'une réaction redox en additionnant les équations formelles des couples mis en jeu, chacune écrite dans le sens ayant lieu et en veillant à la conservation des  $e^-$  transférés.

ex. oxydation des ions ferreux  $\text{Fe}^{2+}$  en ions ferriques  $\text{Fe}^{3+}$  par l'ion dichromate, mettant en jeu les couples redox  $\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{2+}$  et  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} / \text{Cr}^{3+}$  :

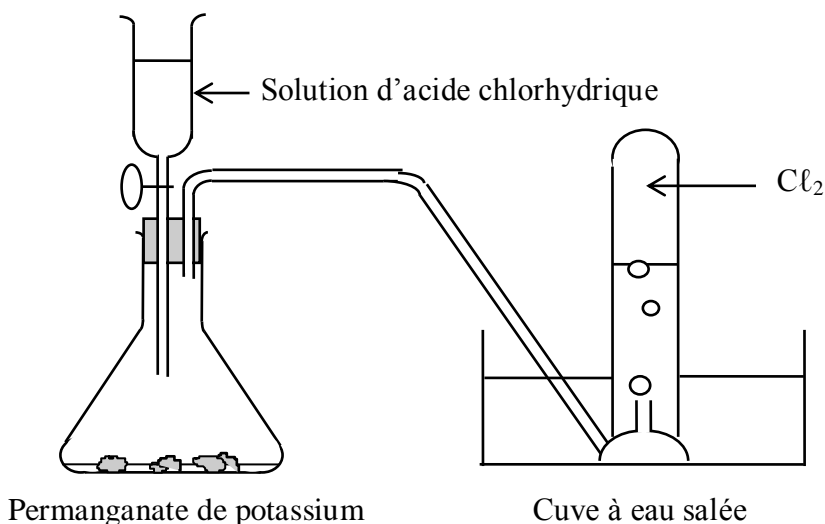


#### Application-2

La figure ci-contre illustre une expérience de préparation du dichlore, en faisant réagir une solution d'acide chlorhydrique sur des cristaux de permanganate de potassium  $\text{KMnO}_4$ .

Les couples redox mis en jeu sont  $\text{Cl}_2 / \text{Cl}^-$  et  $\text{MnO}_4^- / \text{Mn}^{2+}$

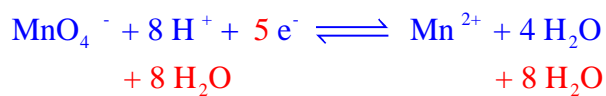
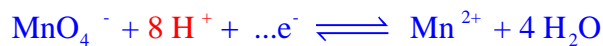
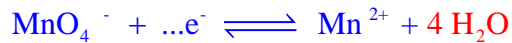
- Ecrire l'équation formelle associée au couple du chlore.
- Ecrire l'équation formelle associée au couple du manganèse.
- Lequel des couples a subi l'oxydation ; écrire la demi-équation correspondante.
  - Lequel des couples a subi la réduction ; écrire la demi-équation correspondante.
  - Ecrire l'équation bilan de la réaction redox ayant lieu.
- L'acide étant versé en excès, à la fin de la réaction le dichlore obtenu occupe **2,24 L** dans les CNTP : calculer la masse de  $\text{KMnO}_4$  utilisée.



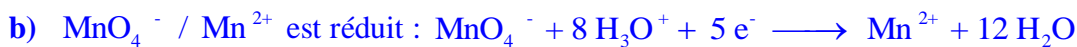
On donne : K = 39 ; Mn = 55 ; O = 16 ;  $V_m = 22,4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$  dans les CNTP



2.



3.



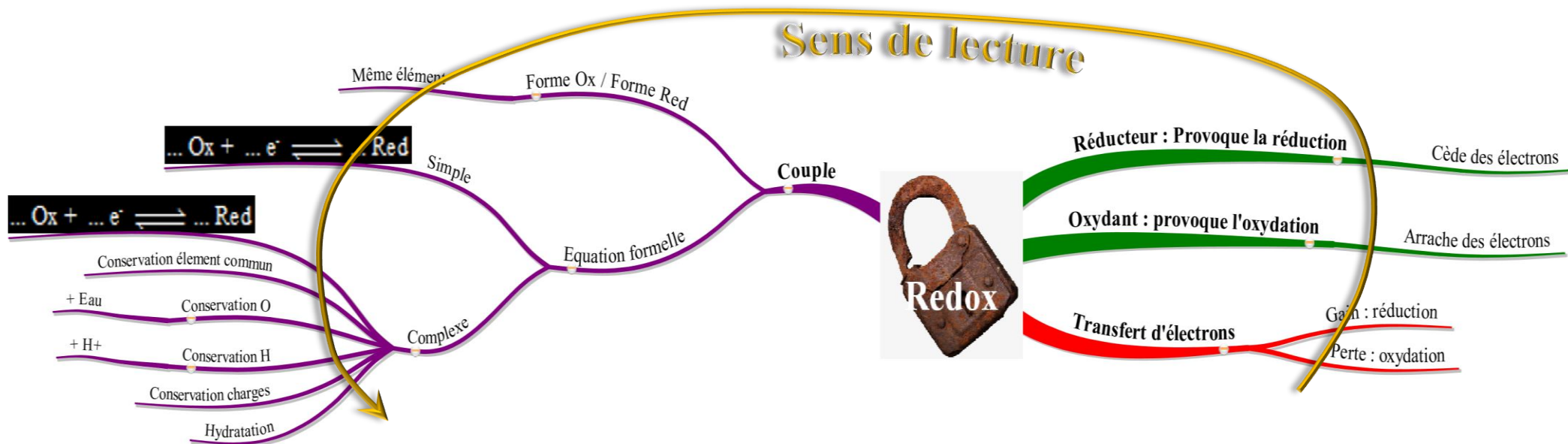
c)



\*  $M(KMnO_4) = 39 + 55 + (16 \times 4) = 158 \text{ g.mol}^{-1}$

\*  $n(KMnO_4) = n(MnO_4^-) = \frac{2}{5} n(Cl_2) = \frac{2}{5} \frac{V(Cl_2)}{V_m} = \frac{2}{5} \frac{2,24 \text{ L}}{22,4 \text{ L.mol}^{-1}} = 0,04 \text{ mol}$

D'où  $m(KMnO_4) = 0,04 \text{ mol} \cdot 158 \text{ g.mol}^{-1} = 6,32 \text{ g}$



C'est une **Mind Map** (carte mentale), qui récapitule l'essentiel de ce cours.  
**NB : cette Mind Map n'est qu'une suggestion, l'élève retient mieux avec celle qu'il prépare lui-même.**

### Pourquoi utiliser les Mind Maps ?

Basée sur les avancées dans le domaine des **neurosciences**, la méthode a été mise au point par le psychologue anglais [Tony Buzan](#). Elle est censée faciliter la mémorisation, la pensée logique et la créativité en assurant un fonctionnement conjoint, harmonieux et optimal des deux hémisphères du cerveau. D'ailleurs, son arborescence est similaire la structure du tissu cérébral.



- Pour télécharger le livre "Organisez vos idées avec le Mind Mapping" : [bit.ly/organisez-vos-idees-avec-le-mind-mapping](http://bit.ly/organisez-vos-idees-avec-le-mind-mapping)
- Pour télécharger le logiciel phare de création de cartes mentales "Buzan's iMindMap" : [bit.ly/buzan-imindmap](http://bit.ly/buzan-imindmap)
- Pour télécharger le logiciel libre de création de cartes mentales "Freemind" (gratuit, mais moins performant) : [bit.ly/my-freemind](http://bit.ly/my-freemind)

Cette Mind Map, ainsi que celles relatives aux autres chapitres, sont téléchargeables dans un seul dossier ici : [bit.ly/farjallah-physique-3eme-sc-mind-maps](http://bit.ly/farjallah-physique-3eme-sc-mind-maps)

Que vous pouvez d'ailleurs partager avec vos amis sur Facebook :



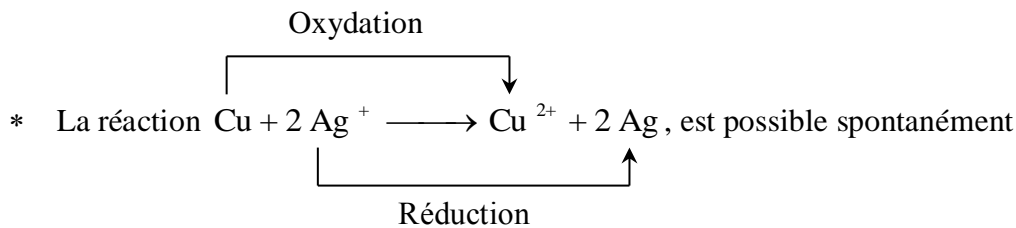


## Chapitre-2 : Classification électrochimique des métaux par rapport au dihydrogène

Objectifs	
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Etablir une classification électrochimique des métaux par rapport au dihydrogène.</li> <li>➤ Utiliser la classification électrochimique pour prévoir l'action d'un ion métallique ou d'un acide sur un métal.</li> </ul>	
Prérequis	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notions d'oxydation, réduction, oxydant, réducteur, et réaction d'oxydoréduction.</li> <li>▪ Notion de couple redox.</li> </ul>	
Matériel	
<ul style="list-style-type: none"> <li>* 1 Tube à essai</li> <li>* 4 Bêchers</li> <li>* 1 Lame de fer (décapée)</li> <li>* 1 Lame de zinc (décapée)</li> <li>* 1 Lame de cuivre (décapée)</li> <li>* 1 Fil de cuivre (décapé)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Pièce en argent</li> <li>* Solution aqueuse de HCl (~ 0.1 M)</li> <li>* Solution aqueuse de CuSO<sub>4</sub></li> <li>* Solution aqueuse de FeSO<sub>4</sub></li> <li>* Solution aqueuse de ZnSO<sub>4</sub></li> </ul>

### I- Comparaison des pouvoirs oxydant et réducteur des métaux

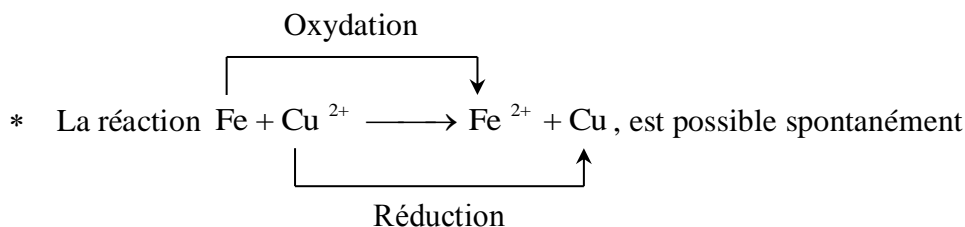
#### 1) L'argent et le cuivre



\* La réaction inverse  $\text{Cu}^{2+} + 2 \text{Ag} \longrightarrow \text{Cu} + 2 \text{Ag}^+$ , est impossible spontanément

On dit que  $\left\{ \begin{array}{l} * \text{ Le couple } \text{Ag}^+ / \text{Ag} \text{ possède un pouvoir oxydant plus fort que } \text{Cu}^{2+} / \text{Cu} \\ * \text{ Le couple } \text{Cu}^{2+} / \text{Cu} \text{ possède un pouvoir réducteur plus fort que } \text{Ag}^+ / \text{Ag} \end{array} \right.$

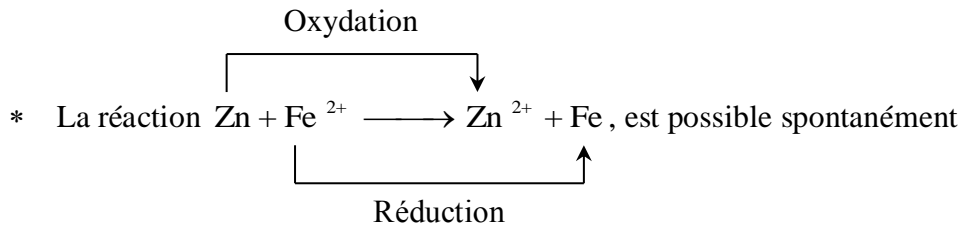
#### 2) Le cuivre et le fer



\* La réaction inverse  $\text{Fe}^{2+} + \text{Cu} \longrightarrow \text{Fe} + \text{Cu}^{2+}$ , est impossible spontanément

$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} * \text{ Cu}^{2+} / \text{Cu} \text{ possède un pouvoir oxydant plus fort que } \text{Fe}^{2+} / \text{Fe} \\ * \text{ Fe}^{2+} / \text{Fe} \text{ possède un pouvoir réducteur plus fort que } \text{Cu}^{2+} / \text{Cu} \end{array} \right.$

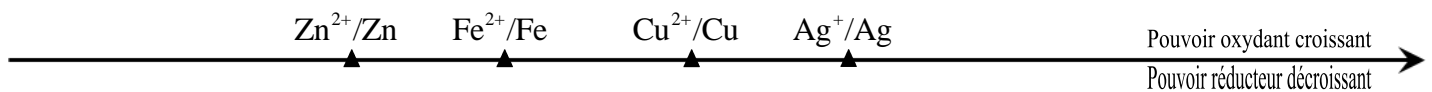
### 3) Le fer et le zinc



\* La réaction inverse  $\text{Zn}^{2+} + \text{Fe} \longrightarrow \text{Zn} + \text{Fe}^{2+}$ , est impossible spontanément

⇒ { \*  $\text{Fe}^{2+} / \text{Fe}$  possède un pouvoir oxydant plus fort que  $\text{Zn}^{2+} / \text{Zn}$   
 \*  $\text{Zn}^{2+} / \text{Zn}$  possède un pouvoir réducteur plus fort que  $\text{Fe}^{2+} / \text{Fe}$

### 4) Conclusion et généralisation

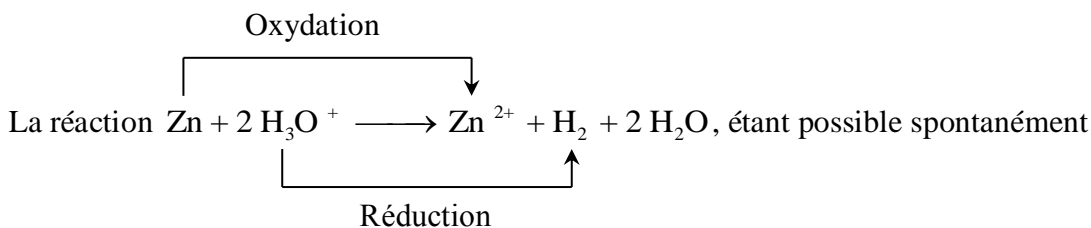


On vient de faire une classification électrochimique de quelques métaux ; en poursuivant de la sorte, on pourra classer tous les métaux.

## II- Classification électrochimique des métaux par rapport au dihydrogène

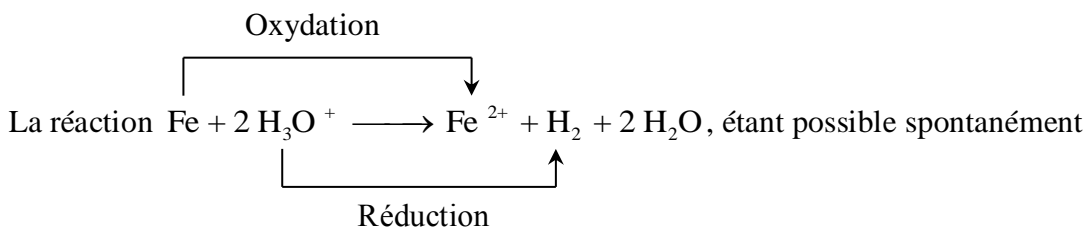
Le couple  $\text{H}_3\text{O}^+ / \text{H}_2$  de l'hydrogène est choisi comme référence en électrochimie ; auquel on compare les pouvoirs oxydant ou réducteur des autres couples.

### 1) Le zinc et le dihydrogène



⇒ { \*  $\text{H}_3\text{O}^+ / \text{H}_2$  possède un pouvoir oxydant plus fort que  $\text{Zn}^{2+} / \text{Zn}$   
 \*  $\text{Zn}^{2+} / \text{Zn}$  possède un pouvoir réducteur plus fort que  $\text{H}_3\text{O}^+ / \text{H}_2$

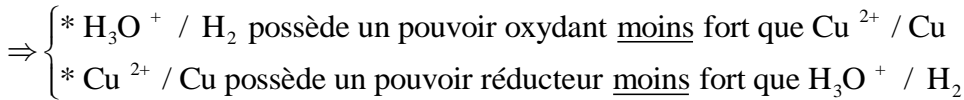
### 2) Le fer et le dihydrogène



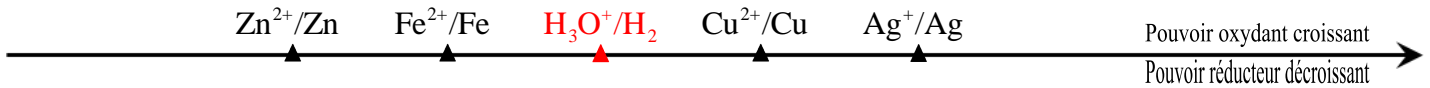
⇒ { \*  $\text{H}_3\text{O}^+ / \text{H}_2$  possède un pouvoir oxydant plus fort que  $\text{Fe}^{2+} / \text{Fe}$   
 \*  $\text{Fe}^{2+} / \text{Fe}$  possède un pouvoir réducteur plus fort que  $\text{H}_3\text{O}^+ / \text{H}_2$

### 3) Le cuivre et le dihydrogène

Un fil de cuivre plongé dans une solution acide, n'est pas oxydé par les ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  : la réaction entre Cu et  $\text{H}_3\text{O}^+$  est impossible spontanément.



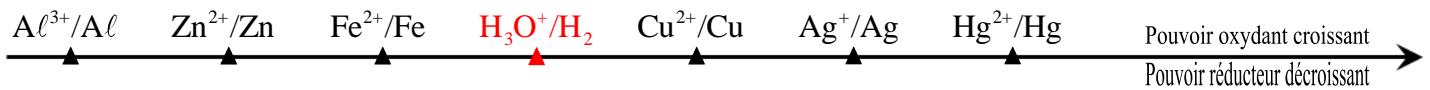
### 4) Conclusion et généralisation



En continuant de la sorte, on pourra classer les autres métaux (figure-1)

Figure-1

Classification électrochimique de quelques couples redox



#### Application-1

On considère la classification électrochimique de la **Figure-1**

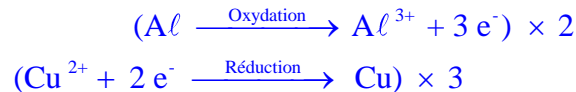
1. Pour chacun des cas suivant ; dire si une réaction redox est possible spontanément. Si oui écrire les demi-équations d'oxydation et de réduction, ainsi que l'équation bilan.

- Une lame d'aluminium plongée dans une solution aqueuse de sulfate de cuivre  $\text{CuSO}_4$
- Du mercure (Hg) versé dans une solution de nitrate d'argent  $\text{AgNO}_3$
- Une lame d'aluminium plongée dans une solution aqueuse de sulfate de zinc  $\text{ZnSO}_4$
- Du mercure versé dans une solution d'acide chlorhydrique
- Une lame d'aluminium plongée dans une solution aqueuse d'acide sulfurique  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

2. Conclure. (quels sont les intérêts de la classification électrochimique des couples redox)

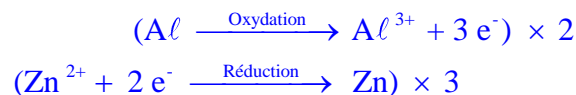
1.

- a)  $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}$  possède un pouvoir oxydant plus fort que  $\text{Al}^{3+}/\text{Al}$  : une réaction d'oxydation de l'aluminium par  $\text{Cu}^{2+}$  est possible ;

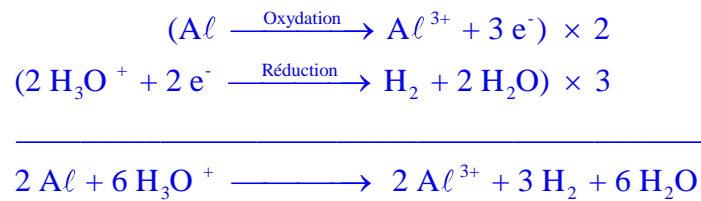


- b)  $\text{Ag}^+/\text{Ag}$  possède un pouvoir oxydant moins fort que  $\text{Hg}^{2+}/\text{Hg}$  :  $\text{Ag}^+$  ne pouvant oxyder Hg, alors aucune réaction n'est possible.

- c)  $\text{Zn}^{2+}/\text{Zn}$  possède un pouvoir oxydant plus fort que  $\text{Al}^{3+}/\text{Al}$  : une réaction d'oxydation de l'aluminium par  $\text{Zn}^{2+}$  est possible ;



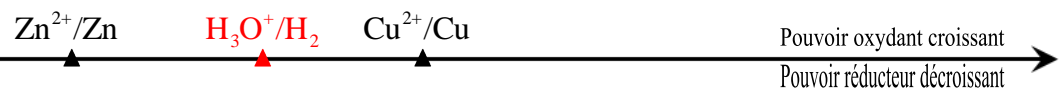
- d)  $\text{H}_3\text{O}^+/\text{H}_2$  possède un pouvoir oxydant moins fort que  $\text{Hg}^{2+}/\text{Hg}$  :  $\text{H}_3\text{O}^+$  ne pouvant oxyder Hg, alors aucune réaction n'est possible.
- e)  $\text{H}_3\text{O}^+/\text{H}_2$  possède un pouvoir oxydant plus fort que  $\text{Al}^{3+}/\text{Al}$  : une réaction d'oxydation de l'aluminium par  $\text{H}_3\text{O}^+$  est possible ;



2. La classification électrochimique permet de prévoir si une réaction redox est possible lorsque deux couples sont mis en jeu, notamment si une réaction est possible entre un cation métallique et un métal ou entre une solution acide et un métal.

### Application-2

On donne :

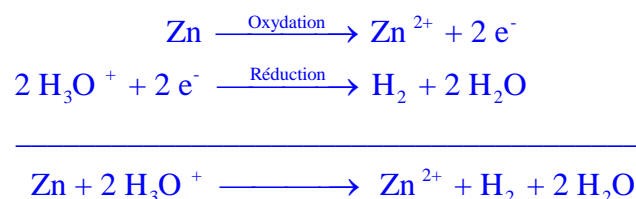


Le laiton est un alliage de **cuivre** et de **zinc** très apprécié dans l'industrie. On se propose de déterminer la composition d'un échantillon de laiton de masse  $m = 100 \text{ g}$  ; pour cela on l'attaque par un excès d'une solution aqueuse d'acide chlorhydrique : il se dégage **16,5 L** d'un gaz qui détonne en présence d'une flamme.

1. Expliquer ce qui se passe, équations chimiques à l'appui.
2. Calculer la masse de zinc présente dans l'échantillon de laiton.
3. En déduire la composition du laiton.
4. Quel est le métal restant à la fin de la réaction, donner sa masse.

$$\text{On donne : } \text{Zn} = 65,41 ; \quad V_m = 24 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$$

1. D'après la classification électrochimique, les ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  provenant de l'acide oxydent le zinc et non le cuivre : le  $\text{H}_2$  dégagé provient de la réduction du couple  $\text{H}_3\text{O}^+/\text{H}_2$  qui accompagne l'oxydation du Zinc selon l'équation :



2.  $m(\text{Zn}) = n(\text{Zn}) \cdot M(\text{Zn})$

$$\text{Tout le zinc étant oxydé, alors } n(\text{Zn}) = n(\text{H}_2) = \frac{V(\text{H}_2)}{V_m} = \frac{16,5 \text{ L}}{24 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}} = 0,687 \text{ mol}$$

$$\text{D'où } m(\text{Zn}) = 0,687 \text{ mol} \cdot 65,41 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} \approx 45 \text{ g}$$

3. La composition du laiton est  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Zn} : \frac{m(\text{Zn})}{m} \cdot 100 = \frac{45 \text{ g}}{100 \text{ g}} \cdot 100 = 45 \% \\ \text{Cu} : 55 \% \end{array} \right.$

4. Le métal restant est du cuivre, de masse 55 g.

Pouvoir oxydant plus fort <---> Pouvoir réducteur plus faible

Pouvoir réducteur plus fort <---> Pouvoir oxydant plus faible

$H_3O^+ / H_2$  Couple de référence



Classification  
électrochimique

Provoque la réduction

Pouvoir réducteur plus fort

Provoque l'oxydation

Pouvoir oxydant plus fort

## Chapitre-3 : Etude de quelques réactions redox

Objectifs
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Appliquer les règles relatives à la détermination du nombre d'oxydation d'un élément.</li> <li>➤ Reconnaître une réaction d'oxydoréduction et équilibrer l'équation bilan au moyen du nombre d'oxydation, en particulier lorsque le transfert d'électrons n'est pas évident.</li> <li>➤ Interpréter une réaction d'oxydoréduction.</li> </ul>
Prérequis
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Schéma de Lewis, d'atomes et d'édifices chimiques.</li> <li>▪ Notion d'électronégativité.</li> <li>▪ Notions d'oxydation, réduction, oxydant, réducteur, et réaction d'oxydoréduction.</li> <li>▪ Notion de couple redox.</li> </ul>
Matériel
Rien

### Rappels

- ❖ Dans le schéma de Lewis d'un atome, on ne représente que les électrons de valence.

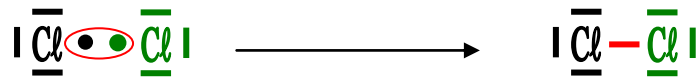
EN ↗ H								He
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar	EN ↘
Métaux alcalins	Métaux Alcalino-terreux					Halogènes	Gaz rares	

- ❖ L'association des atomes dans un édifice chimique obéit à la règle du duet et de l'octet :
  - Dans un composé ionique, il y a *échange* d' $e^-$  entre les atomes du composé pour satisfaire la règle du duet et de l'octet. (liaison ionique).
  - Dans une molécule ou un ion polyatomique, il y a *partage* d' $e^-$  entre les atomes pour satisfaire la règle du duet et de l'octet. (liaison covalente)
- ❖ Une liaison covalente entre deux atomes identiques est symétrique : le doublet liant est partagé équitablement, tandis qu'une liaison covalente entre deux atomes différents est dissymétrique : le doublet liant est plus attiré par l'atome le plus électronégatif (EN)

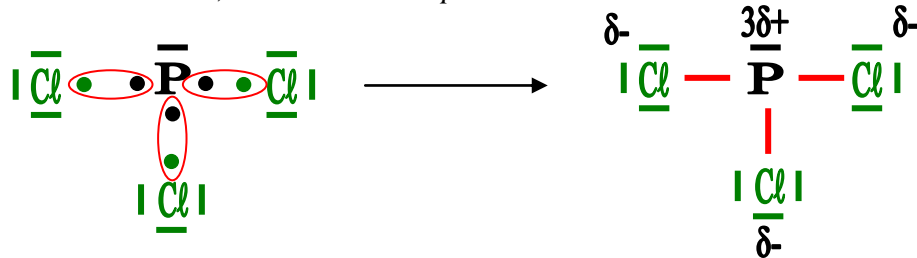


**Exemples :**

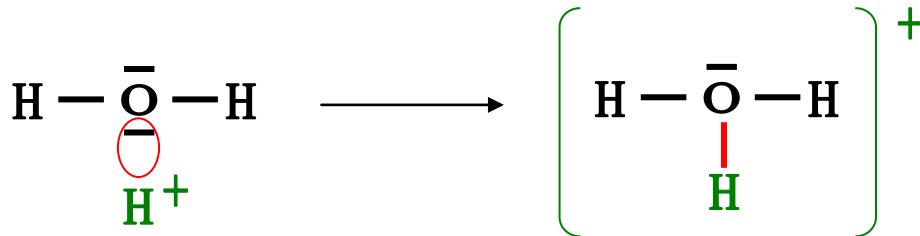
- Le fluorure de sodium (NaF) est un composé ionique constitué d'ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{F}^-$  : un  $e^-$  est fourni à un atome de fluor, par un atome de sodium.
- La molécule de dichlore est constituée par la mise en commun d'un doublet :



- Dans la molécule de trichlorure de phosphore, les liaisons sont dissymétriques ; d'où la formation de charges partielles sur les atomes ; les liaisons sont *polaires* :



- Dans l'ion hydronium ; l'ion  $\text{H}^+$  partage avec l'atome d'oxygène de la molécule d'eau l'un de ses doublets non liants, qui devient alors un doublet liant :


**Application**

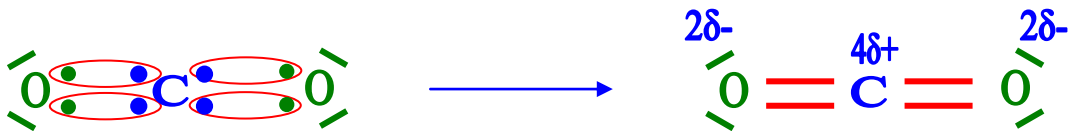
On donne :



- Le gaz carbonique est un composé covalent de formule moléculaire  $\text{CO}_2$  :
  - Donner le schéma de Lewis de formation de la molécule de dioxyde de carbone.
  - Indiquer les fractions de charges qui se forment sur les atomes de cette molécule.
- Donner le schéma de Lewis de formation de la molécule de dioxygène ; est ce qu'elle est polaire ?
- Le sel de cuisine est un composé ionique de formule  $\text{NaCl}$  ; expliquer sa formation.

1.

a)



b)

- 

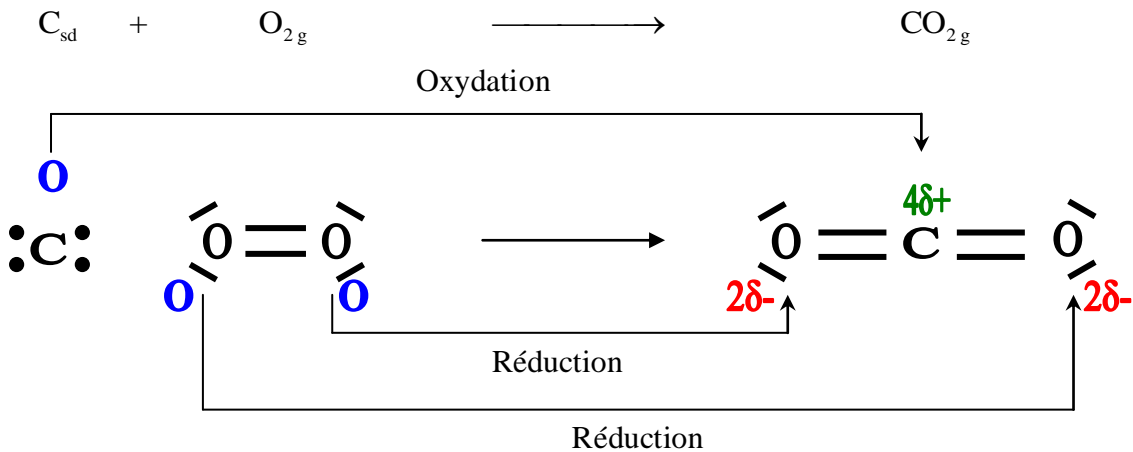
- Pour satisfaire la règle de l'octet, un atome Na fournit  $1 e^-$  à un atome Cl ; les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  qui en résultent se lient par attraction électrostatique, constituant un cristal.



## I- Vers une définition plus large des réactions redox

### 1) Exemple-1 : formation d'un composé covalent

La combustion du carbone (charbon) dans le dioxygène produit du  $\text{CO}_2$ , selon l'équation :

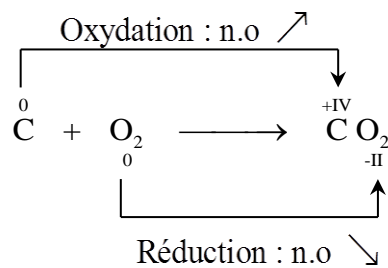


Bien qu'il n'y a pas un transfert évident d' $e^-$  lors de cette réaction, elle est considérée une réaction redox pour les raisons suivantes :

- \* L'oxygène a gagné partiellement des  $e^-$  : il est réduit ; couple redox  $\text{O}_2 / \text{CO}_2$
- \* Le carbone a perdu partiellement des  $e^-$  : il est oxydé ; couple redox  $\text{CO}_2 / \text{C}$

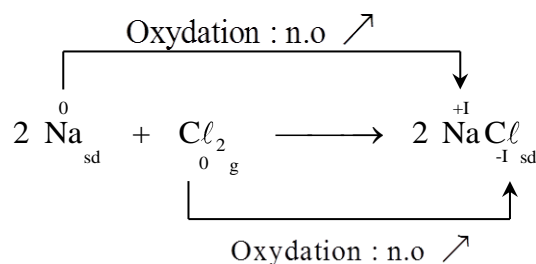
Si on imagine la rupture des liaisons dans la molécule  $\text{CO}_2$  et la capture des  $e^-$  de liaison par l'atome le plus EN (oxygène), chaque atome O aurait une charge  $(-2e)$  et l'atome C une charge  $(+4e)$  ; on dit que l'oxygène possède un nombre d'oxydation -II et le carbone +IV, ainsi :

- \* Lors de la réduction de l'oxygène, son nombre d'oxydation (n.o) diminue de  $0 \rightarrow -\text{II}$
- \* Lors de l'oxydation du carbone, son n.o augmente de  $0 \rightarrow +\text{IV}$



### 2) Exemple-2 : formation d'un composé ionique

Du sodium brûlé dans le dichlore produit du sel de cuisine selon l'équation :



Les couples redox mis en jeu sont :  $\text{Na}^+ / \text{Na}$  et  $\text{Cl}_2 / \text{Cl}^-$



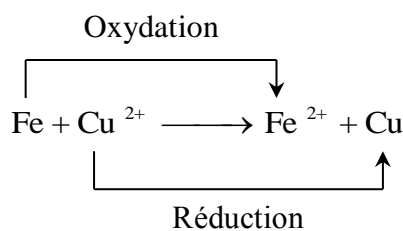
### 3) Définitions

- \* Le nombre d'oxydation (n.o) d'un atome dans un édifice polyatomique (molécule ou ion) est la charge électrique (exprimée en charge élémentaire e) qui reste sur cet atome après une coupure fictive de toutes les liaisons et la capture des électrons de chaque liaison par l'atome le plus électronégatif.
- \* L'oxydation d'un élément correspond à une augmentation de son n.o.
- \* La réduction d'un élément correspond à une diminution de son n.o.
- \* Une réaction au cours de laquelle il y a augmentation du n.o d'un élément et diminution de celui d'un autre, est une réaction redox.
- \* Un couple redox est formé de deux entités chimiques contenant un même élément sous deux degrés d'oxydation différents. La forme oxydée est celle correspondant à l'élément de plus grand n.o. La forme réduite est celle correspondant à l'élément de plus faible n.o.

**Remarque :** Ces deux exemples sont des réactions par voie sèche, car elles se déroulent en l'absence d'eau. Contrairement aux réactions étudiées au premier chapitre qui se déroulent en milieu aqueux : par voie humide.

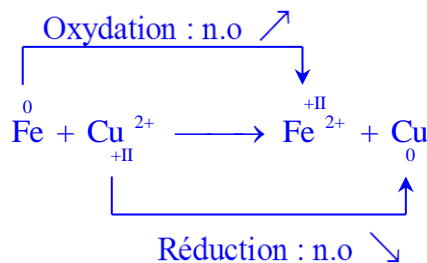
#### Application-1

Considérons l'une des réactions étudiées au premier chapitre, où il y a un transfert évident d'électrons :



Les couples redox mis en jeu étaient  $\text{Cu}^{2+} / \text{Cu}$  et  $\text{Fe}^{2+} / \text{Fe}$

Vérifier que les nouvelles définitions s'appliquent bien à ce type de réactions redox.



- \* Le fer est oxydé par perte d' $e^-$  : son n.o augmente
- \* Le cuivre est réduit par gain d' $e^-$  : son n.o diminue
- \* Il y a augmentation du n.o du fer et diminution de celui du cuivre : réaction redox
- \* D'après les valeurs des n.o, la forme oxydée et la forme réduite du fer sont  $\text{Fe}^{2+}$  et Fe respectivement : couple  $\text{Fe}^{2+} / \text{Fe}$
- \* D'après les valeurs des n.o, la forme oxydée et la forme réduite du cuivre sont  $\text{Cu}^{2+}$  et Cu respectivement : couple  $\text{Cu}^{2+} / \text{Cu}$

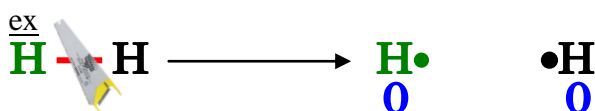
## II- Techniques de détermination du n.o

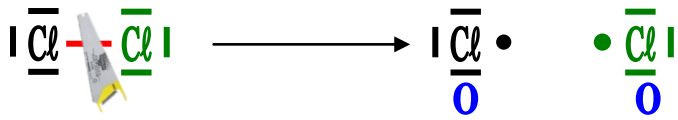
### 1) Cas d'un atome

n.o = 0

### 2) Cas d'un corps simple

n.o = 0 ; car si la liaison entre deux atomes identiques est rompue, chacun récupère ses électrons.

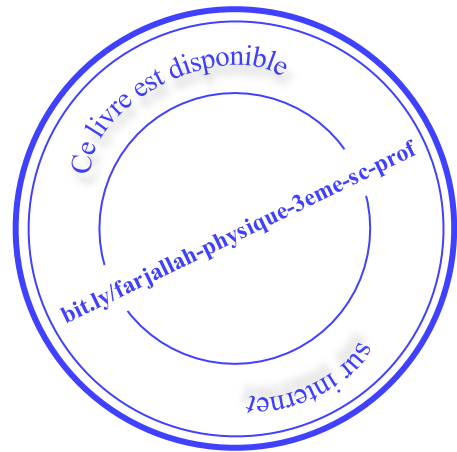
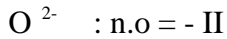
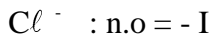
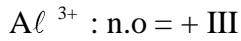
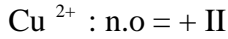
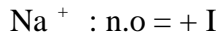




### 3) Cas d'un ion simple

n.o = charge de l'ion (exprimée en charge élémentaire e)

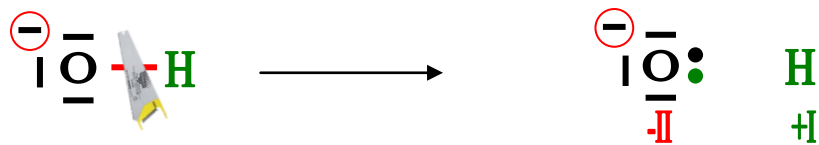
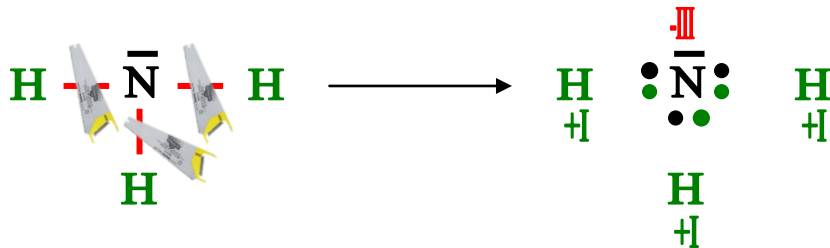
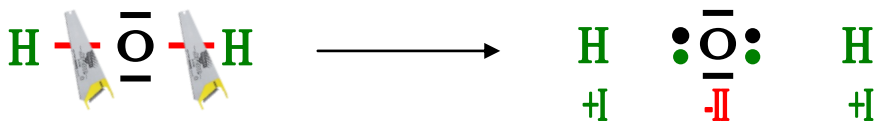
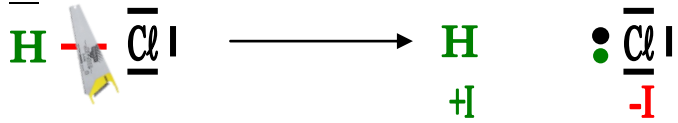
ex



### 4) Cas d'un corps composé ou un ion polyatomique

L'atome le plus EN récupère les électrons de liaison

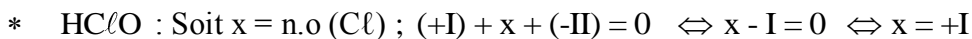
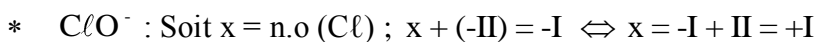
ex



### 5) Méthode pratique

- \* L'hydrogène est souvent associé à des atomes plus EN que lui : n.o (H) = +I généralement
- \* L'oxygène est souvent associé à des atomes moins EN que lui : n.o (O) = -II généralement
- \* La somme des n.o des atomes d'un édifice chimique est égale à sa charge (exprimée en charge élémentaire)

ex



### Application-2

- Déterminer le nombre d'oxydation de l'azote dans les édifices suivants  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NH}_4^+$  et  $\text{NO}_3^-$  ; en déduire les couples redox qu'on peut avoir avec ces entités.
- Déterminer le nombre d'oxydation du soufre dans les édifices suivants  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{HSO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ .

#### 1. Soit $x = \text{n.o (N)}$

- Dans  $\text{NH}_3$  :  $x + 3(+I) = 0 \Leftrightarrow x + \text{III} = 0 \Leftrightarrow x = -\text{III}$
- Dans  $\text{NH}_4^+$  :  $x + 4(+I) = +I \Leftrightarrow x + \text{IV} = +I \Leftrightarrow x = -\text{III}$
- Dans  $\text{NO}_3^-$  :  $x + 3(-\text{II}) = -I \Leftrightarrow x - \text{VI} + I = 0 \Leftrightarrow x - \text{V} = 0 \Leftrightarrow x = +\text{V}$

D'où les couples redox possibles :  $\text{NO}_3^- / \text{NH}_3$  et  $\text{NO}_3^- / \text{NH}_4^+$

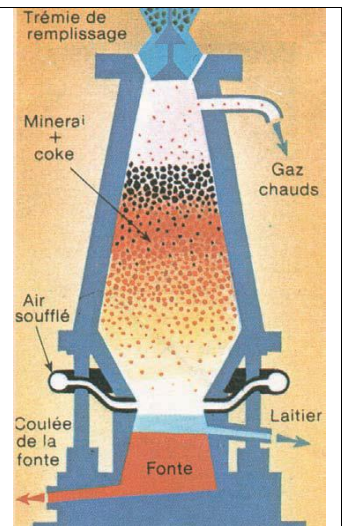
#### 2. Soit $x = \text{n.o (S)}$

- Dans  $\text{SO}_2$  :  $x + 2(-\text{II}) = 0 \Leftrightarrow x - \text{IV} = 0 \Leftrightarrow x = +\text{IV}$
- Dans  $\text{SO}_3$  :  $x + 3(-\text{II}) = 0 \Leftrightarrow x - \text{VI} = 0 \Leftrightarrow x = +\text{VI}$
- Dans  $\text{H}_2\text{S}$  :  $x + 2(+I) = 0 \Leftrightarrow x + \text{II} = 0 \Leftrightarrow x = -\text{II}$
- Dans  $\text{HSO}_3^-$  :  $(+I) + x + 3(-\text{II}) = -I \Leftrightarrow x - \text{V} = -I \Leftrightarrow x = -I + \text{V} = +\text{IV}$
- Dans  $\text{SO}_4^{2-}$  :  $x + 4(-\text{II}) = -II \Leftrightarrow x - \text{VIII} = -II \Leftrightarrow x = -II + \text{VIII} = +\text{VI}$

### Application-3

Le fer se trouve dans la nature sous forme de minerai à base d'oxyde de fer III, il est extrait dans des hauts fourneaux par une suite de réactions chimiques dont le bilan est  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{CO} \longrightarrow 2 \text{Fe} + 3 \text{CO}_2$

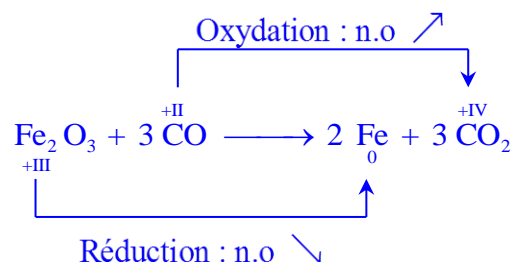
- Déterminer le nombre d'oxydation du fer et du carbone dans les différentes entités évoquées par la réaction.
- Vérifier qu'il s'agit d'une réaction redox ; indiquer l'oxydation et la réduction.
- Donner les couples redox mis en jeu ; quel est l'oxydant et quel est le réducteur ?



#### 1. Soient $x = \text{n.o (Fe)}$ et $y = \text{n.o (C)}$

- Dans  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  :  $2x + 3(-\text{II}) = 0 \Leftrightarrow 2x = \text{VI} \Rightarrow x = +\text{III}$
- Dans  $\text{Fe}$  :  $x = 0$
- Dans  $\text{CO}$  :  $y + (-\text{II}) = 0 \Leftrightarrow y = +\text{II}$
- Dans  $\text{CO}_2$  :  $y + 2(-\text{II}) = 0 \Leftrightarrow y = +\text{IV}$

#### 2.



Il y a augmentation du n.o (C) et diminution du n.o (Fe) : réaction redox

- Couples redox mis en jeu :  $\text{CO}_2 / \text{CO}$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{Fe}$ . Réducteur :  $\text{CO}$ . Oxydant  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

## TP 1 : Etude expérimentale de quelques réactions redox

### Objectifs :

- Réaliser quelques expériences d'oxydoréduction, et les interpréter.

### Matériel :

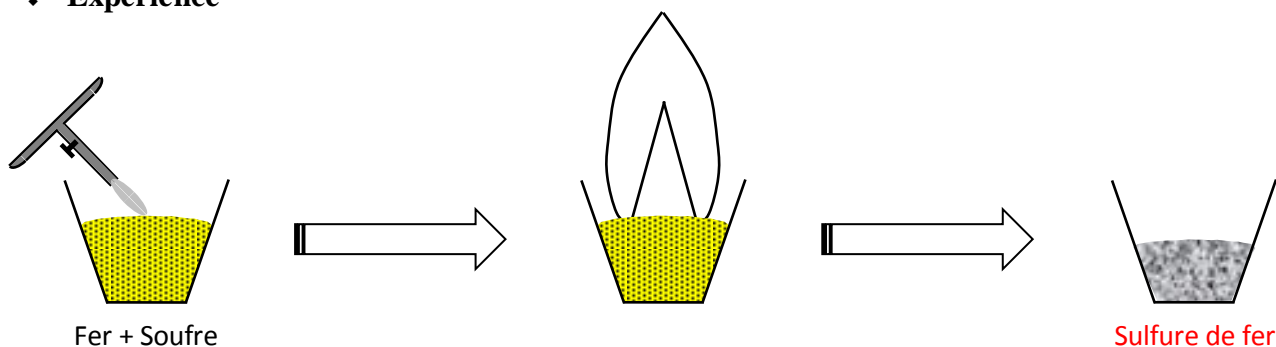
- |  |   |  |
|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Creuset.</li> <li>2 Tubes à essai.</li> <li>2 Bêchers.</li> <li>Tube effilé + Bouchon troué.</li> <li>Pince en bois.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Aimant droit.</li> <li>Bec Bunsen.</li> <li>Soufre.</li> <li>Poudre de fer.</li> <li>Oxyde de cuivre.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Carbone.</li> <li>Eau de chaux.</li> <li>Solution de <math>K_2S_2O_8</math>.</li> <li>Solution de KI.</li> <li><math>AgNO_3</math></li> </ul> |
|--|---|--|

### Manipulation :

#### 1. Réactions redox par voie sèche

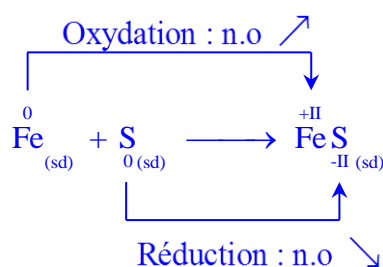
##### a) Réaction entre le fer (Fe) et le soufre (S)

##### ❖ Expérience



##### ❖ Interprétation

- Sachant que le sulfure de fer est un composé ionique ; vérifier qu'il s'agit d'une réaction redox, indiquer l'oxydation et la réduction.

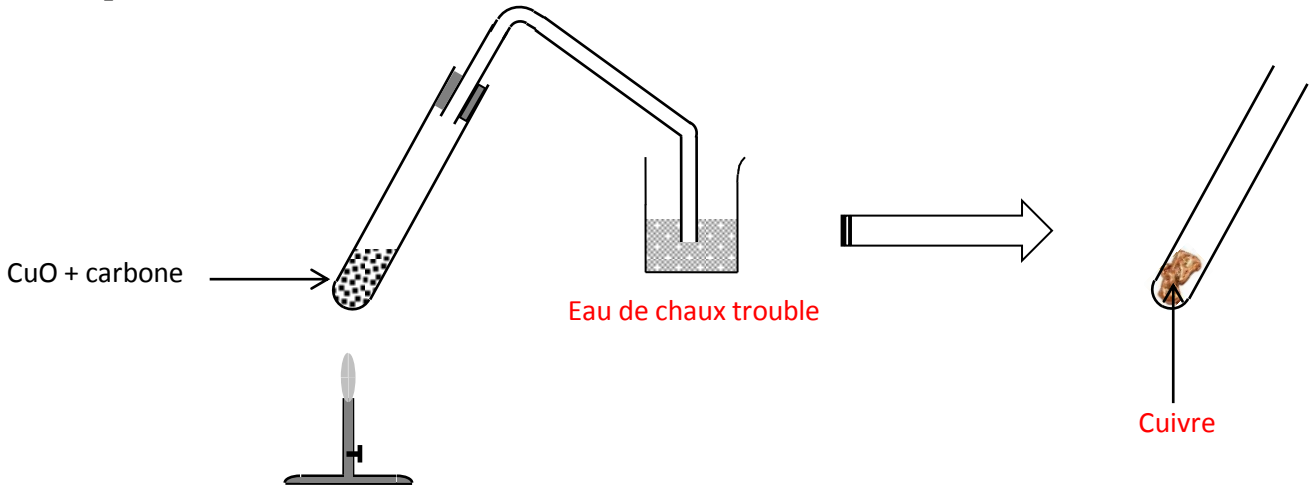


Il y a augmentation du n.o (Fe) et diminution du n.o (S) : réaction redox

- Donner les couples redox mis en jeu :  $FeS / Fe$  et  $S / FeS$ .
- Oxydant : S; Réducteur : Fe.

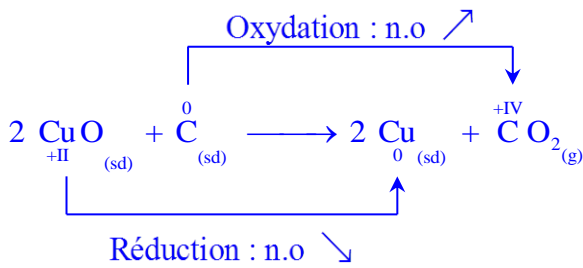
**b) Réaction entre le carbone (C) et l'oxyde de cuivre II (CuO)**

❖ **Expérience**



❖ **Interprétation**

- Vérifier qu'il s'agit d'une réaction redox, indiquer l'oxydation et la réduction.

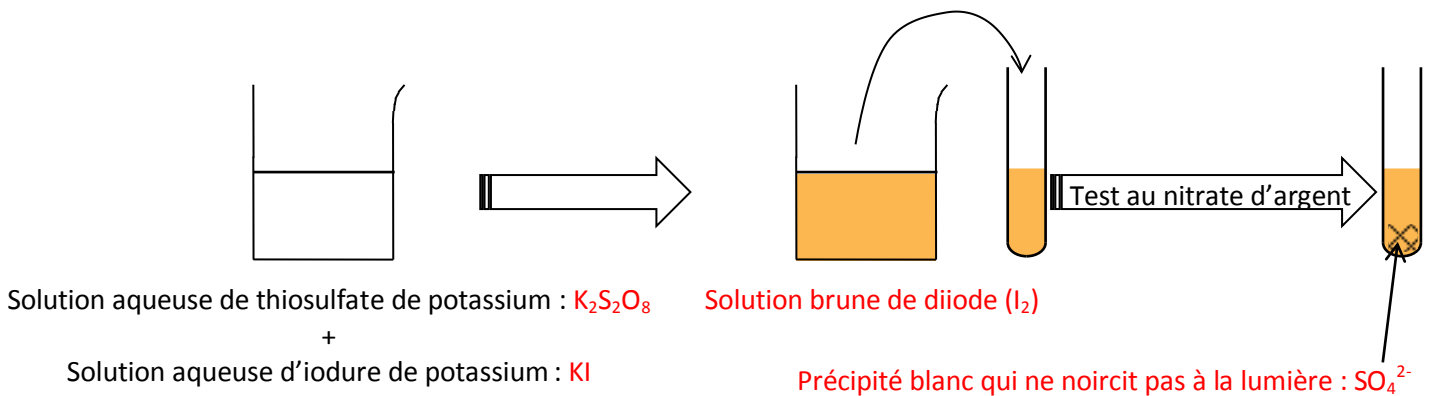


Il y a augmentation du n.o (C) et diminution du n.o (Cu) : réaction redox

- Donner les couples redox mis en jeu :  $\text{CO}_2 / \text{C}$  et  $\text{CuO} / \text{Cu}$ .
- Oxydant :  $\text{CuO}$ ; Réducteur :  $\text{C}$ .

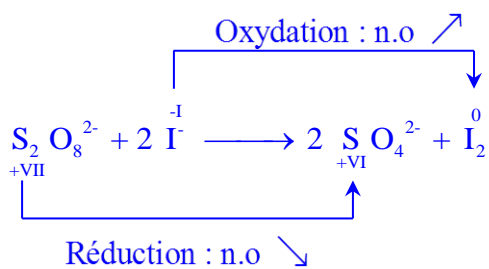
**2. Réaction redox par voie humide : Réaction entre le l'ion peroxodisulfate ( $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ ) et l'ion iodure ( $\text{I}^-$ )**

❖ **Expérience**



❖ **Interprétation**

- Vérifier qu'il s'agit d'une réaction redox, indiquer l'oxydation et la réduction.



Il y a augmentation du n.o (I) et diminution du n.o (S) : réaction redox

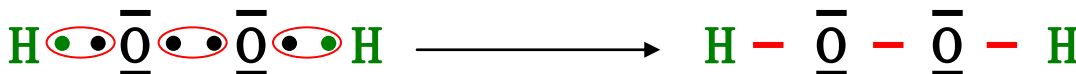
- Donner les couples redox mis en jeu :  $I_2 / I^-$  et  $S_2O_8^{2-} / SO_4^{2-}$ .
- Oxydant :  $S_2O_8^{2-}$ ; Réducteur :  $I^-$ .

**Application**

L'eau oxygénée vendue en pharmacie est une solution aqueuse de peroxyde de dihydrogène  $H_2O_2$ ; elle est utilisée par exemple pour le nettoyage des plaies.

1. Etablir le schéma de Lewis de la molécule de peroxyde de dihydrogène  $H_2O_2$ .
2. En déduire le nombre d'oxydation de l'élément oxygène dans  $H_2O_2$ .
3. Dans certaines conditions le peroxyde de dihydrogène se décompose en eau et en dioxygène :
  - a) Ecrire et équilibrer l'équation chimique de la réaction de décomposition de  $H_2O_2$ .
  - b) Montrer qu'il s'agit d'une réaction d'oxydoréduction; indiquer l'oxydation et la réduction.
  - c) Donner les couples redox mis en jeu; quel est l'oxydant et quel est le réducteur? : commenter.
  - d) Ecrire les équations formelles correspondant aux deux couples redox.
4. Dans un erlenmeyer contenant un volume  $V_1 = 75 \text{ mL}$  d'une solution aqueuse d'eau oxygénée  $H_2O_2$  de concentration molaire  $C_1 = 0,1 \text{ mol.L}^{-1}$ , on ajoute un volume  $V_2 = 50 \text{ mL}$  d'une solution aqueuse d'iodure de potassium KI de concentration molaire  $C_2 = 0,4 \text{ mol.L}^{-1}$  et un large excès d'acide sulfurique; il se forme du diiode ( $I_2$ ) reconnaissable par la couleur brune qu'il confère à la solution (ou la couleur bleue noire en présence d'empois d'amidon)
  - a) Ecrire la demi-équation de la transformation subie par l'ion iodure; écrire le couple redox mis en jeu.
  - b) Quel est l'autre couple redox mis en jeu; écrire l'équation de la réaction redox ayant lieu.
  - c) Est-ce que les réactifs sont mélangés dans les proportions stœchiométriques? Sinon, calculer la quantité restante, à la fin de la réaction, du réactif en excès.
  - d) Calculer la quantité de diiode formée à la fin de la réaction.

1.

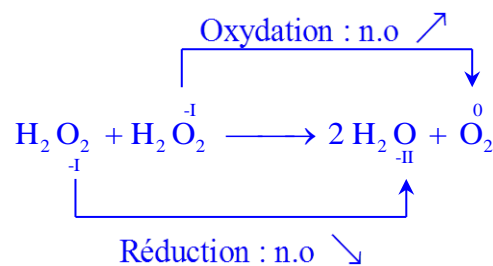


2. En imaginant la coupure fictive de toutes les liaisons, et la capture des  $e^-$  de liaison par les atomes O (plus EN que H), chaque atome O aurait une charge (-e) : n.o (O) = -I

3.



b)

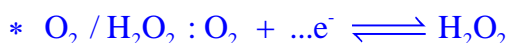


Il y a augmentation du n.o (O) de l'une des molécules  $H_2O_2$ , et diminution de celui de l'autre : réaction redox

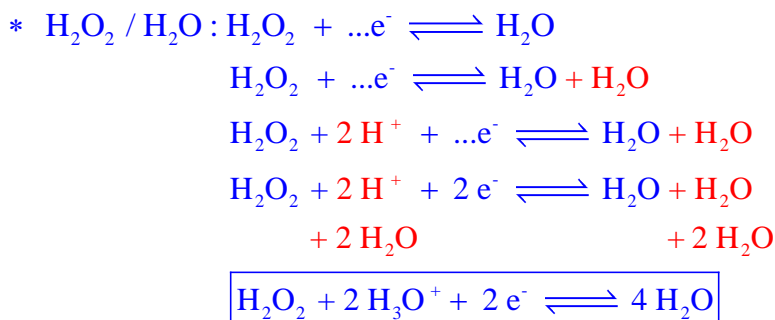
c) Couples redox mis en jeu :  $O_2 / H_2O_2$  et  $H_2O_2 / H_2O$ . Réducteur :  $H_2O_2$ . Oxydant :  $H_2O_2$  ;

$H_2O_2$  joue en même temps le rôle d'oxydant et de réducteur pendant sa réaction d'auto-décomposition.

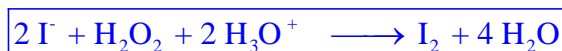
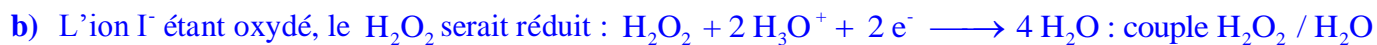
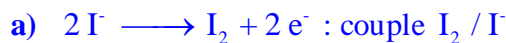
d)







4.



c) Quantités utilisées des réactifs :

\*  $n(\text{H}_2\text{O}_2) = C_1 \cdot V_1 = 0,1 \cdot 75 \cdot 10^{-3} \text{ L} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$

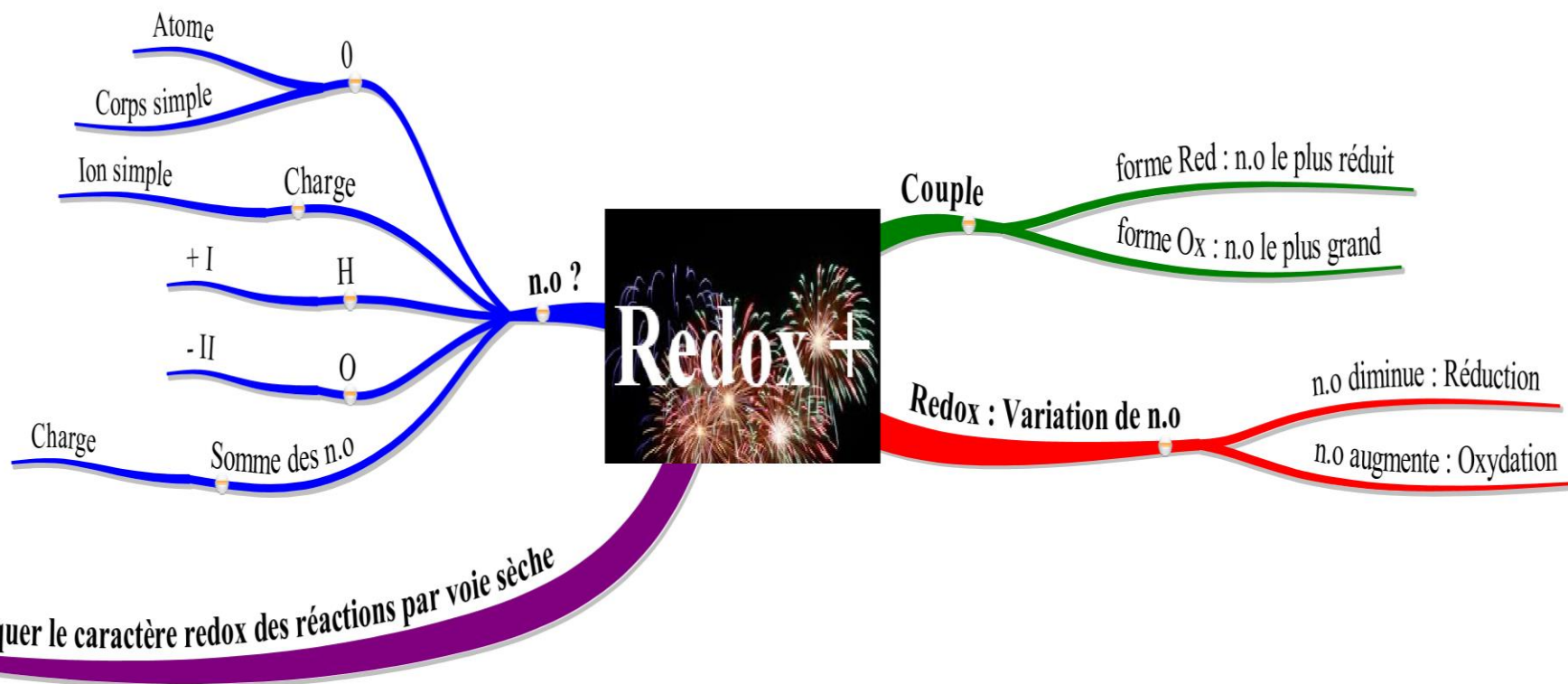
\*  $n(\text{I}^-) = n(\text{KI}) = C_2 \cdot V_2 = 0,4 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \text{ L} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$

D'après l'équation,  $7,5 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$  de  $\text{H}_2\text{O}_2$  nécessitent  $2 \times 7,5 \cdot 10^{-3} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$  de  $\text{I}^-$

Or on a utilisé  $20 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$  de  $\text{I}^- \Rightarrow$  le mélange n'est pas stœchiométrique : il y a  $5 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$  de  $\text{I}^-$  en

excès :  $n(\text{I}^-)_{\text{rest}} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$



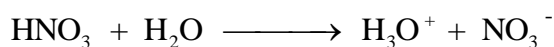
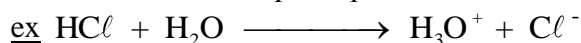


## Thème n°2 : Les acides et les bases

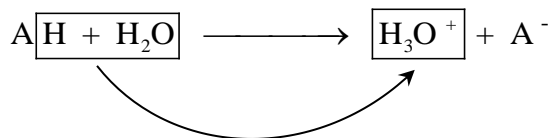
### Rappels

❖ Définitions des acides et des bases selon Arrhenius (1887/Suède)

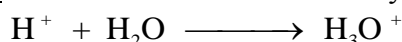
- Un **acide** est un composé qui s'ionise dans l'eau avec formation d'ions hydronium  $\text{H}_3\text{O}^+$



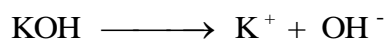
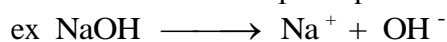
⋮



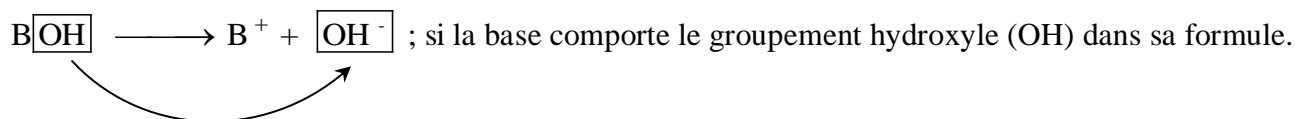
NB L'acide libère en fait un ion hydrogène  $\text{H}^+$ , mais qui est immédiatement hydraté :



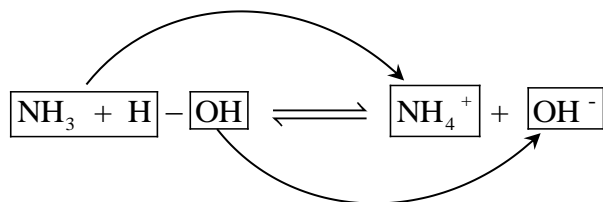
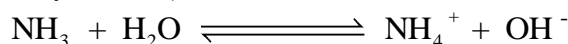
- Une **base** est un composé qui s'ionise dans l'eau avec formation d'ions hydroxyde  $\text{OH}^-$



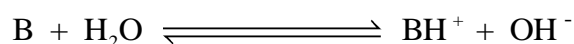
⋮



Si la base ne comporte pas le groupement hydroxyle dans sa formule, elle fait ressortir l'ion hydroxyde ( $\text{OH}^-$ ) d'une molécule d'eau ; les bases de ce type sont faibles (l'ionisation est partielle) :



⋮



Les bases de ce type ne sont pas couvertes par la définition d'Arrhenius

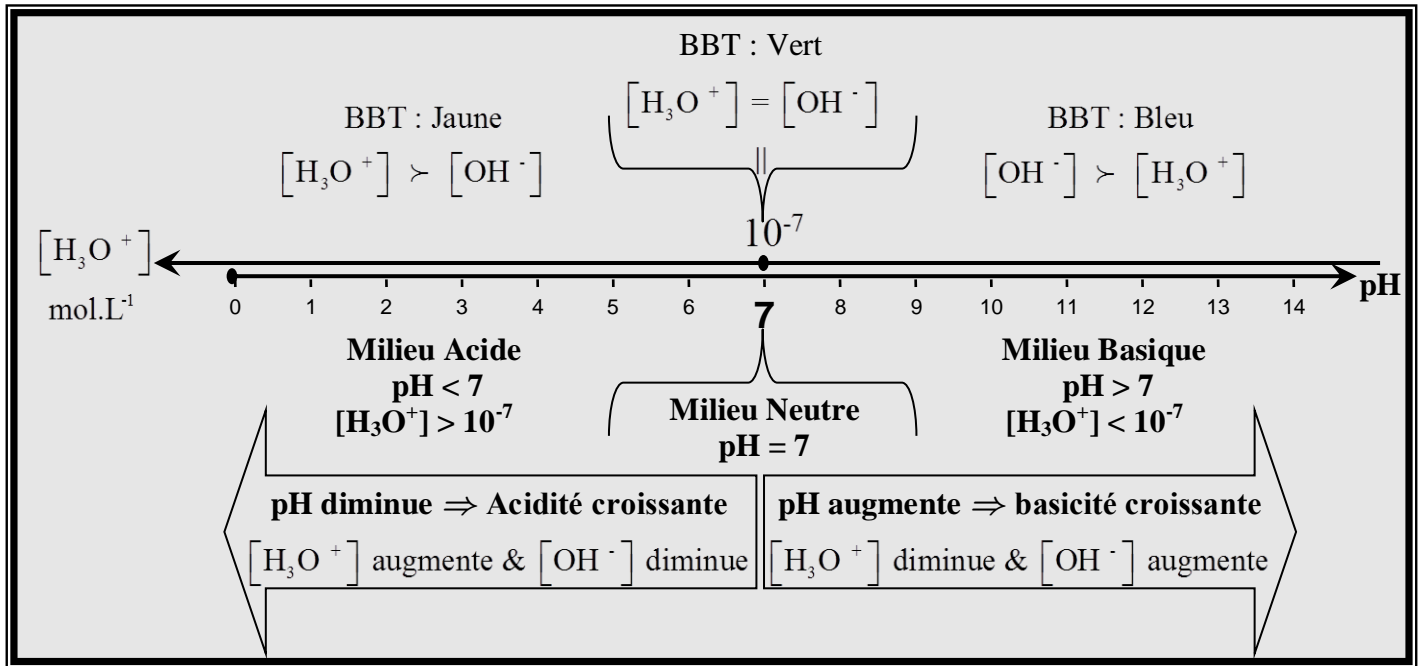
- ❖ On appelle pH (potentiel Hydrogène) d'une solution aqueuse, la grandeur définie par  $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}}$
- ❖ Lors d'une réaction entre un acide et une base en solution aqueuse, les ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  dus à l'acide et les ions  $\text{OH}^-$  dus à la base se neutralisent mutuellement selon l'équation :  $\text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^- \longrightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$
- ❖ L'eau possède un caractère amphotère (ou ampholyte) : il joue le rôle d'acide et de base simultanément, par son ionisation propre ;  $2 \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^-$ .

L'expérience montre que dans l'eau, ainsi que dans toute solution aqueuse :  $[\text{H}_3\text{O}^+] [\text{OH}^-] = K_e$  ;

avec  $K_e$  constante dont la valeur ne dépend que de la température ( $K_e = 10^{-14}$  à  $25^\circ\text{C}$ )

Ainsi ; à  $25^\circ\text{C}$  :

- Dans l'eau pure, ou une solution dont le soluté n'est ni acide ni une base :  
 $[H_3O^+] = [OH^-] = \sqrt{K_e} = 10^{-7} \text{ mol.L}^{-1} \Rightarrow \text{pH} = 7$ , et le BBT prend une teinte **verte** : milieu **neutre**
- Dans une solution aqueuse d'acide :  $[H_3O^+] > [OH^-] \Rightarrow \begin{cases} [H_3O^+] > 10^{-7} \text{ mol.L}^{-1} \Rightarrow \text{pH} < 7 \\ [OH^-] < 10^{-7} \text{ mol.L}^{-1} \end{cases}$ ,  
 et le BBT prend une teinte **jaune** caractéristique de l'excès d'ions  $H_3O^+$  : milieu **acide**.
- Dans une solution aqueuse de base :  $[OH^-] > [H_3O^+] \Rightarrow \begin{cases} [OH^-] > 10^{-7} \text{ mol.L}^{-1} \\ [H_3O^+] < 10^{-7} \text{ mol.L}^{-1} \Rightarrow \text{pH} > 7 \end{cases}$ ,  
 et le BBT prend une teinte **bleue** caractéristique de l'excès d'ions  $OH^-$  : milieu **basique**.



## Chapitre-1 : Définition des acides et des bases selon Bronsted

Objectifs	
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Définir un acide, une base et une réaction acide-base selon Bronsted.</li> <li>➤ Reconnaître un acide, une base et une réaction acide-base.</li> </ul>	
Prérequis	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Définitions des acides et des bases selon Arrhenius.</li> <li>▪ Test d'identification de l'ion Cl<sup>-</sup>.</li> <li>▪ Composés ioniques.</li> <li>▪ Dissolution du HCl gazeux dans l'eau.</li> </ul>	
Matériel	
<ul style="list-style-type: none"> <li>* 2 Baguettes de verre</li> <li>* 2 Tubes à essai</li> <li>* 1 Spatule</li> <li>* Pince en bois</li> <li>* Papier pH</li> <li>* Bec Bunsen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Solution concentrée de HCl</li> <li>* Solution concentrée de NH<sub>3</sub></li> <li>* NH<sub>4</sub>Cl</li> <li>* NaOH</li> <li>* Solution aqueuse de AgNO<sub>3</sub> (~ 0.1 M)</li> </ul>

### I- Insuffisance de la définition d'Arrhenius

Selon la définition d'Arrhenius ;

- \* Une base doit comporter le groupement hydroxyle (OH) dans sa formule, or plusieurs bases ne le sont pas : NH<sub>3</sub>, CH<sub>3</sub>NH<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ...
- \* Un acide ou une base est un composé (neutre), or plusieurs acides sont des ions (HSO<sub>4</sub><sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> ...), ainsi que plusieurs bases (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, CN<sup>-</sup> ...)
- \* Le caractère acide ou basique se manifeste en solution aqueuse, or il peut se manifester en solution non aqueuse, ou même par voie sèche : 
$$\underset{\substack{\uparrow \\ \text{Acide}}}{\text{HCl}}_{(g)} + \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Base}}}{\text{NH}_3}_{(g)} \longrightarrow \text{NH}_4\text{Cl}_{(sd)}$$

Pour pallier à ces insuffisances, Brønsted (1923/Danemark) proposa une définition plus large.

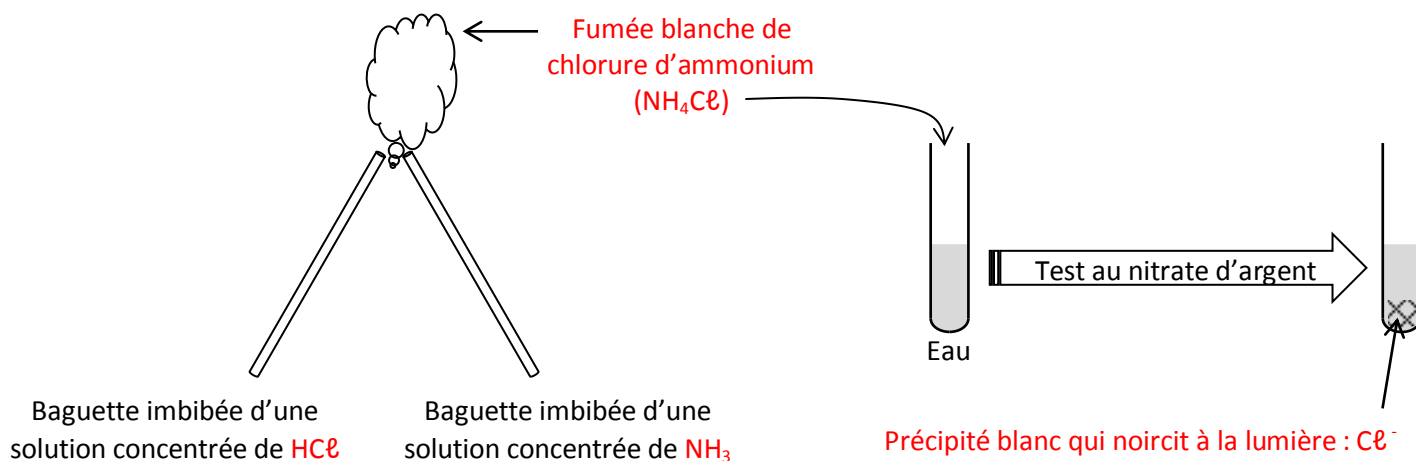
### II- Définition des acides et des bases selon Brønsted

#### 1) Exemples

a) Réaction entre le chlorure d'hydrogène (HCl : acide) et l'ammoniac (NH<sub>3</sub> : base)

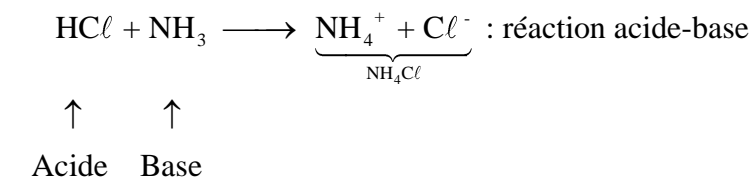
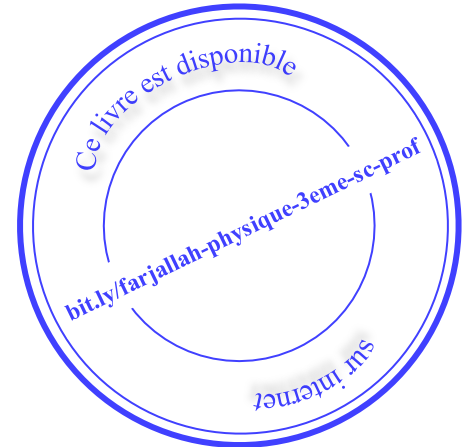
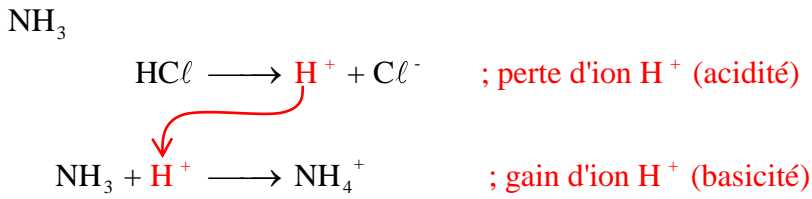
- \* Expérience (Fig-1)

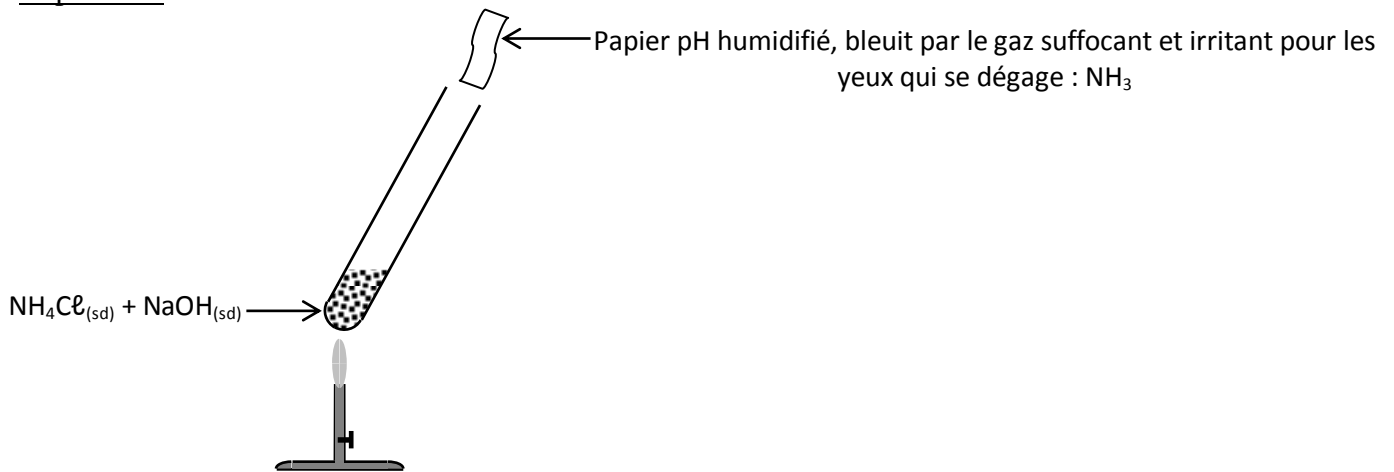
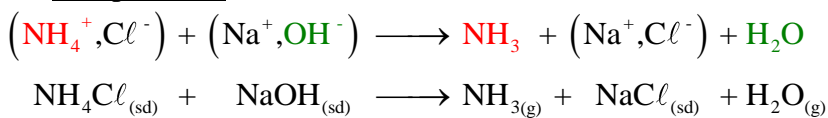
**Figure-1**



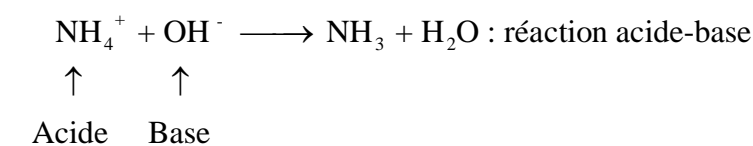
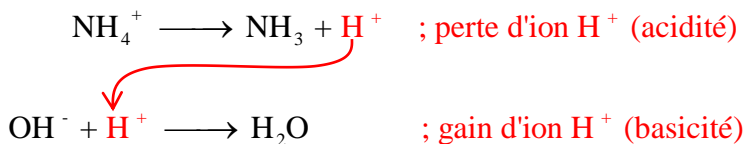
\* Interprétation

Le test au nitrate d'argent permet de déduire que  $\text{NH}_4\text{Cl}$  est un composé ionique :  $(\text{NH}_4^+, \text{Cl}^-)$ , il s'est formé depuis  $\text{NH}_3$  et  $\text{HCl}$  selon l'équation  $\text{NH}_{3(g)} + \text{HCl}_{(g)} \longrightarrow \underbrace{\text{NH}_4\text{Cl}_{(sd)}}_{(\text{NH}_4^+, \text{Cl}^-)}$  : un ion  $\text{H}^+$  est transféré de  $\text{HCl} \rightarrow$


**b) Réaction entre le chlorure d'ammonium et la soude**

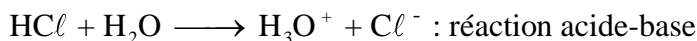
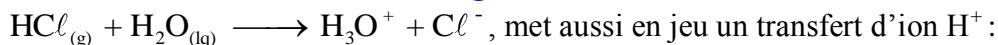
 \* Expérience

 \* Interprétation


Il y a aussi transfert d'ion  $\text{H}^+$  de  $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{OH}^-$  ;





### c) Dissolution du HCl gazeux dans l'eau



## 2) Généralisation

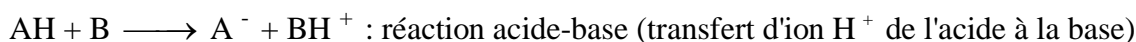
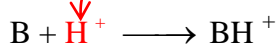
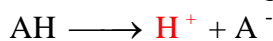
- \* Un acide est une entité chimique capable de libérer un ion hydrogène  $\text{H}^+$  au cours d'une réaction chimique ( $\text{AH} \longrightarrow \text{H}^+ + \text{A}^-$ ).

Il peut être neutre :  $\text{HCl}$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  ... ou chargé :  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{HSO}_4^-$  ...

- \* Une base est une entité chimique capable de capturer un ion hydrogène  $\text{H}^+$  au cours d'une réaction chimique ( $\text{B} + \text{H}^+ \longrightarrow \text{BH}^+$ ).

Elle peut être neutre :  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_3\text{NH}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  ... ou chargé :  $\text{OH}^-$ ,  $\text{CH}_3\text{CO}_2^-$  ...

Rq L'ion  $\text{H}^+$  n'est libéré par un acide que s'il y a une base capable de l'arracher (il n'existe pas à l'état libre)



### Application-1

Pour chacune des réactions suivantes, dire s'il s'agit d'une réaction acide-base ; dans l'affirmative, préciser l'acide et la base de Brønsted évoqués :

- $\text{HF} + \text{NH}_3 \longrightarrow \text{NH}_4^+ + \text{F}^-$
- $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$
- $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{CH}_3\text{CO}_2^-$
- $\text{HNO}_3 + \text{OH}^- \longrightarrow \text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$
- $\text{HSO}_4^- + \text{OH}^- \longrightarrow \text{SO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{O}$
- $\text{CH}_3\text{CO}_2^- + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{CO}_2\text{H} + \text{OH}^-$
- $4 \text{HCl} + \text{O}_2 \longrightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{Cl}_2$







- Oui ; acide :  $\text{HF}$ , base :  $\text{NH}_3$
- Non
- Oui ; acide :  $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$ , base :  $\text{H}_2\text{O}$
- Oui ; acide :  $\text{HNO}_3$ , base :  $\text{OH}^-$
- Oui ; acide :  $\text{HSO}_4^-$ , base :  $\text{OH}^-$
- Oui ; acide :  $\text{H}_2\text{O}$ , base :  $\text{CH}_3\text{CO}_2^-$
- Non

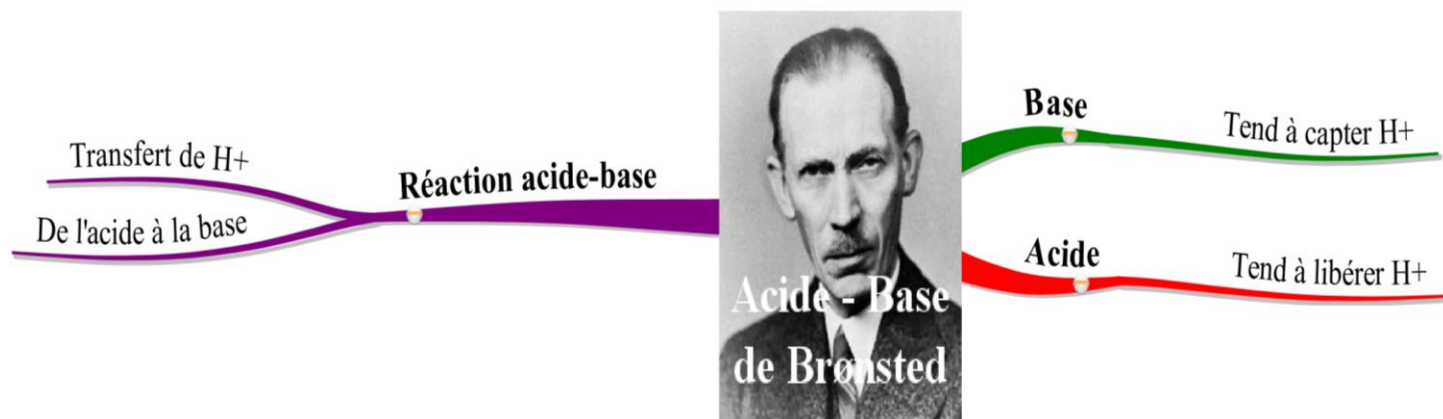
### Application-2

1. L'ion anilinium  $C_6H_5NH_3^+$  est un acide selon Bronsted.
  - a) Ecrire la demi-équation correspondante.
  - b) Ecrire l'équation chimique de la réaction qui peut avoir lieu entre cet acide et l'ion hydroxyde  $OH^-$ .
2. L'ion phénolate  $C_6H_5O^-$  est une base selon Bronsted.
  - a) Ecrire la demi-équation correspondante.
  - b) Ecrire l'équation chimique de la réaction qui peut avoir lieu entre cette base et l'acide éthanóique  $CH_3CO_2H$ .

1.
  - a)  $C_6H_5NH_3^+ \longrightarrow H^+ + C_6H_5NH_2$
  - b)  $C_6H_5NH_3^+ + OH^- \longrightarrow H_2O + C_6H_5NH_2$
2.
  - a)  $C_6H_5O^- + H^+ \longrightarrow C_6H_5OH$
  - b)  $C_6H_5O^- + CH_3CO_2H \longrightarrow C_6H_5OH + CH_3CO_2^-$

### Exemples d'acides et de bases dans la vie courante

Acides	Bases
<p><b>Détartrant de cafetière</b></p> <p>Contient essentiellement ; l'acide phosphorique <math>H_3PO_4</math> ou l'acide sulfamique <math>NH_2SO_3H</math></p> 	<p><b>Déboucheur de canalisations</b></p> <p>Pastilles de soude NaOH</p> 
<p><b>Vinaigre</b></p> <p>Contient 6 % en volume d'acide éthanóique (acétique) <math>CH_3COOH</math></p> 	<p><b>Lessive de soude</b></p> <p>Solution aqueuse de soude contenant 30 % en masse de soude</p> 
<p><b>Jus de citron</b></p> <p>Contient 6 % en masse d'acide citrique <math>C_6H_8O_7</math></p> 	<p><b>Eau de Javel</b></p> <p>Contient l'ion hypochlorite <math>ClO^-</math> responsable de sa basicité</p> 



## Chapitre-2 : Couples Acide / Base & réactions acido-basiques

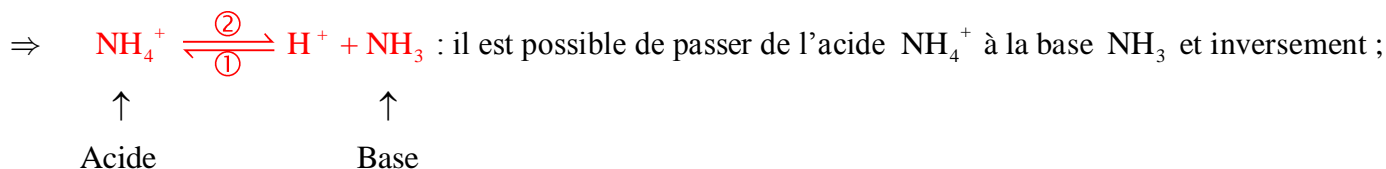
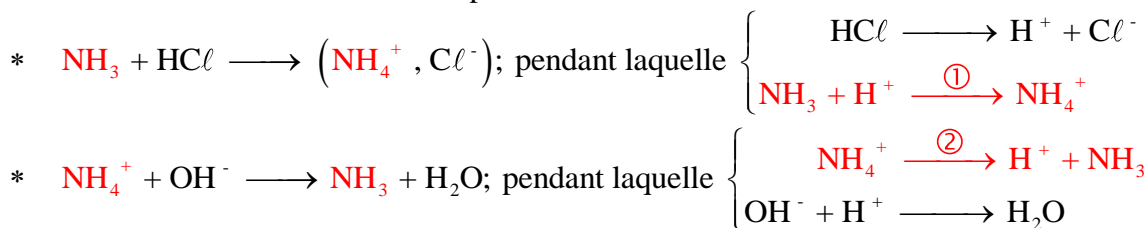
Objectifs	
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Définir un couple Acide / Base.</li> <li>➤ Représenter un couple Acide / Base par son symbole et son équation formelle.</li> <li>➤ Ecrire l'équation chimique d'une réaction acido-basique connaissant les couples Acide / Base mis en jeu.</li> <li>➤ Retrouver les couples Acide / Base mis en jeu dans une réaction acido-basique.</li> </ul>	
Prérequis	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Définitions des acides et des bases selon Brønsted.</li> <li>▪ Réaction entre acide et base de Brønsted.</li> <li>▪ Ionisation propre de l'eau.</li> <li>▪ Neutralisation lors d'une réaction acido-basique en solution aqueuse.</li> </ul>	
Matériel	
<ul style="list-style-type: none"> <li>* 1 Bécher</li> <li>* 2 Tubes à essai</li> <li>* 1 Spatule</li> <li>* Agitateur magnétique + Barreau magnétique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Pissette d'eau distillée</li> <li>* Acide benzoïque</li> <li>* BBT</li> <li>* Solution aqueuse de HCl (~ 0.1 M)</li> </ul>

### I- Notion de couple Acide / Base conjugués

#### 1) Exemples

##### a) Couple Ion ammonium / Ammoniac

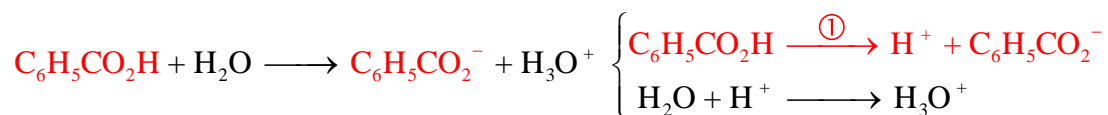
Les deux réactions suivantes étant possibles :



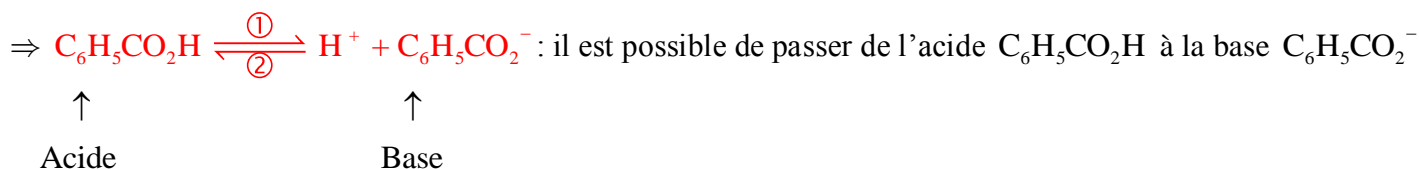
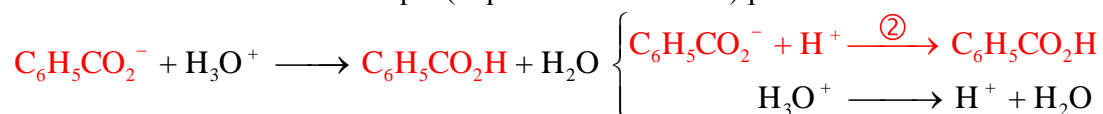
ils constituent un couple Acide / Base conjugués, représenté par le symbole  $\text{NH}_4^+ / \text{NH}_3$  ou par l'équation formelle  $\text{NH}_4^+ \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{NH}_3$

##### b) Couple Acide benzoïque / Ion benzoate (Fig-1)

① : L'acide benzoïque se dissout dans l'eau avec formation d'ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  ;



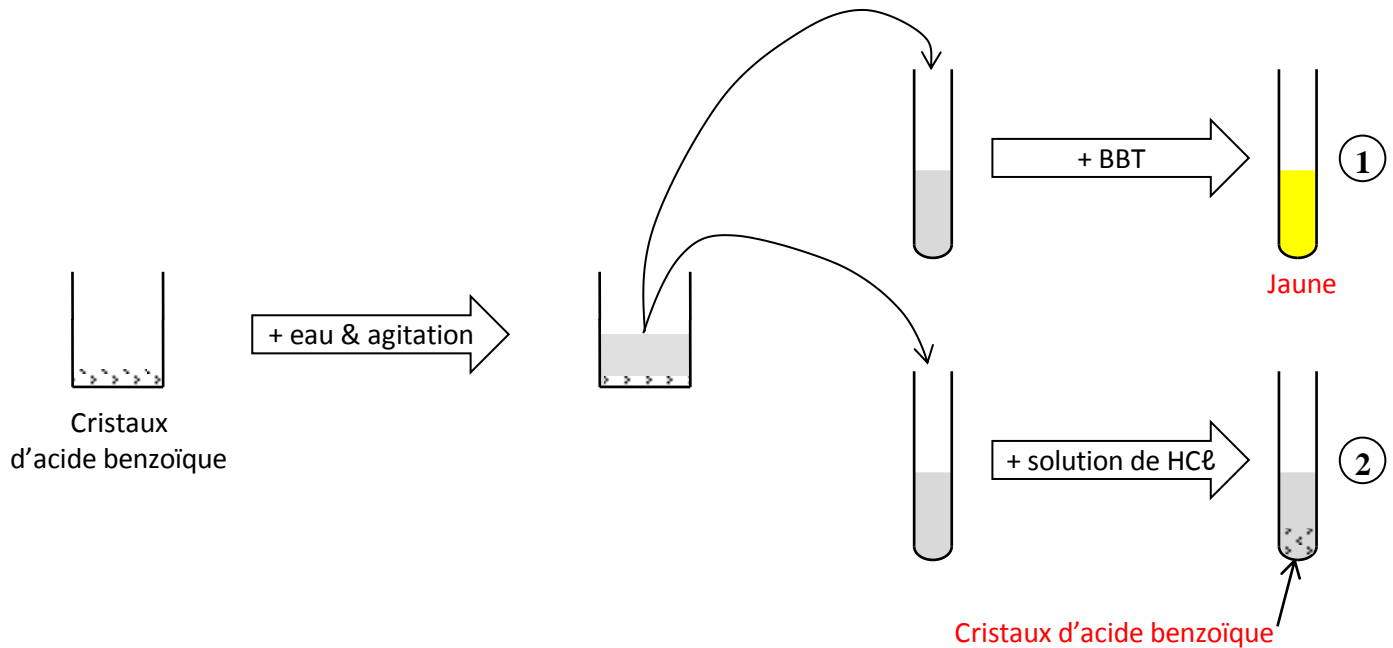
② : Formation d'acide benzoïque (depuis l'ion benzoate) par réaction avec la solution de HCl;



et inversement ; ils constituent un couple Acide / Base conjugués, représenté par le symbole



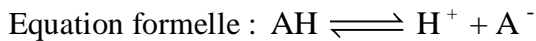
Figure-1



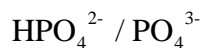
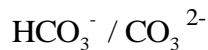
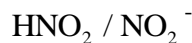
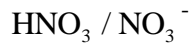
## 2) Généralisation

Un couple Acide / Base est constitué de deux entités chimiques jouant l'une le rôle d'acide et l'autre le rôle de base conjuguée tel qu'il est possible de passer de l'une à l'autre par perte ou gain d'un ion  $\text{H}^+$ .

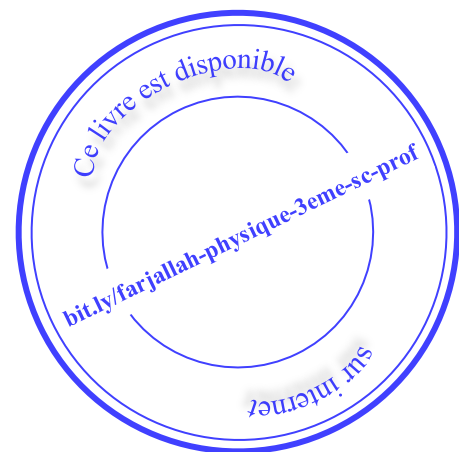
Symbole :  $\text{AH} / \text{A}^-$



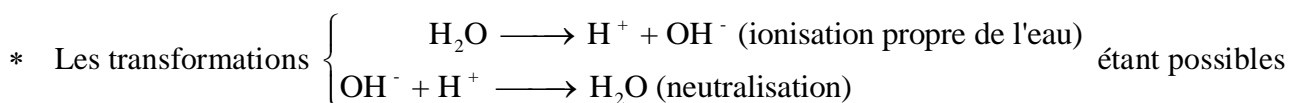
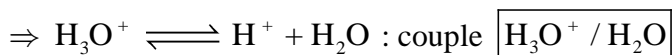
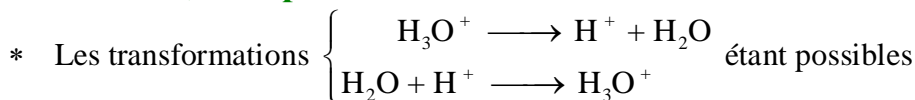
ex



· ·  
· ·



## 3) Couples de l'eau



Rq  $\text{H}_2\text{O}$  est la base du couple  $\text{H}_3\text{O}^+ / \text{H}_2\text{O}$ , et l'acide du couple  $\text{H}_2\text{O} / \text{OH}^-$  : caractère amphotère (ampholyte)

Def

Une entité chimique est dite à caractère amphotère (ou ampholyte) si elle est la forme acide d'un couple Acide / Base et la forme basique d'un autre couple.

ex

- \*  $\text{NH}_3$  :  $\begin{cases} \text{forme acide du couple } \underline{\text{NH}_3} / \text{NH}_2^- \\ \text{forme basique du couple } \text{NH}_4^+ / \underline{\text{NH}_3} \end{cases}$
- \*  $\text{HSO}_4^-$  :  $\begin{cases} \text{forme acide du couple } \underline{\text{HSO}_4^-} / \text{SO}_4^{2-} \\ \text{forme basique du couple } \text{H}_2\text{SO}_4 / \underline{\text{HSO}_4^-} \end{cases}$

Application-1

1. Pour chacun des acides de Brønsted suivants ;

- Trouver sa base conjuguée ;
- Ecrire le symbole du couple Acide / Base correspondant;
- Ecrire l'équation formelle du couple.

- a)  $\text{HClO}_4$
- b)  $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$
- c)  $\text{HS}^-$
- d)  $\text{H}_3\text{O}^+$
- e)  $\text{H}_2\text{O}$

2. Pour chacun des bases de Brønsted suivantes ;

- Trouver son acide conjugué ;
- Ecrire le symbole du couple Acide / Base correspondant;
- Ecrire l'équation formelle du couple.

- a)  $\text{F}^-$
- b)  $\text{ClO}^-$
- c)  $\text{CH}_3\text{NH}_2$
- d)  $\text{OH}^-$
- e)  $\text{H}_2\text{O}$

1.

- a)
  - $\text{ClO}_4^-$
  - $\text{HClO}_4 / \text{ClO}_4^-$
  - $\text{HClO}_4 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{ClO}_4^-$
- b)
  - $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}^-$
  - $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH} / \text{C}_6\text{H}_5\text{O}^-$
  - $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{C}_6\text{H}_5\text{O}^-$
- c)
  - $\text{S}^{2-}$
  - $\text{HS}^- / \text{S}^{2-}$
  - $\text{HS}^- \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{S}^{2-}$

d)

- $\text{H}_2\text{O}$
- $\text{H}_3\text{O}^+ / \text{H}_2\text{O}$
- $\text{H}_3\text{O}^+ \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$

e)

- $\text{OH}^-$
- $\text{H}_2\text{O} / \text{OH}^-$
- $\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{OH}^-$

2.

a)

- $\text{HF}$
- $\text{HF} / \text{F}^-$
- $\text{HF} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{F}^-$

b)

- $\text{HClO}$
- $\text{HClO} / \text{ClO}^-$
- $\text{HClO} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{ClO}^-$

c)

- $\text{CH}_3\text{NH}_3^+$
- $\text{CH}_3\text{NH}_3^+ / \text{CH}_3\text{NH}_2$
- $\text{CH}_3\text{NH}_3^+ \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{CH}_3\text{NH}_2$

d)

- $\text{H}_2\text{O}$
- $\text{H}_2\text{O} / \text{OH}^-$
- $\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{OH}^-$

e)

- $\text{H}_3\text{O}^+$
- $\text{H}_3\text{O}^+ / \text{H}_2\text{O}$
- $\text{H}_3\text{O}^+ \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$

## II- Réaction acide-base

### 1) Exemples

\* La réaction :  $\text{NH}_4^+ + \text{OH}^- \longrightarrow \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ ,

met en jeu les couples  $\left\{ \begin{array}{l} \text{NH}_4^+ / \text{NH}_3 : \quad \text{NH}_4^+ \longrightarrow \text{H}^+ + \text{NH}_3 \\ \text{H}_2\text{O} / \text{OH}^- : \quad \text{OH}^- + \text{H}^+ \longrightarrow \text{H}_2\text{O} \end{array} \right.$

\* La réaction :  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{PO}_4^{3-} \longrightarrow \text{HSO}_4^- + \text{HPO}_4^{2-}$ ,

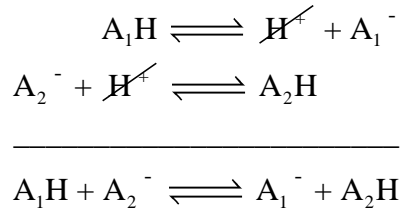
met en jeu les couples  $\left\{ \begin{array}{l} \text{H}_2\text{SO}_4 / \text{HSO}_4^- : \quad \text{H}_2\text{SO}_4 \longrightarrow \text{H}^+ + \text{HSO}_4^- \\ \text{HPO}_4^{2-} / \text{PO}_4^{3-} : \quad \text{PO}_4^{3-} + \text{H}^+ \longrightarrow \text{HPO}_4^{2-} \end{array} \right.$

### 2) Généralisation

Une réaction acido-basique consiste en un transfert d'ion  $\text{H}^+$  de la forme acide d'un couple vers la forme basique d'un autre couple.

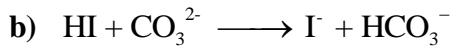
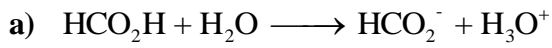


Soient  $A_1H / A_1^-$  et  $A_2H / A_2^-$  deux couples Acide / Base participant à une réaction acido-basique ; son équation formelle s'obtient en additionnant les équations formelles des deux couples :

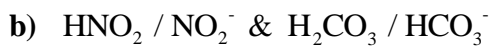
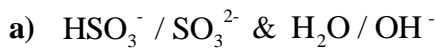


### Application-2

1. Identifier les couples Acide / Base mis en jeu dans les équations suivantes; écrire leurs équations formelles.

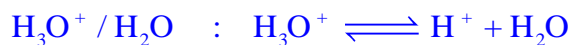


2. Ecrire les équations formelles des réactions acido-basiques mettant en jeu les couples suivants :

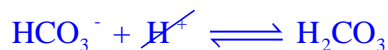
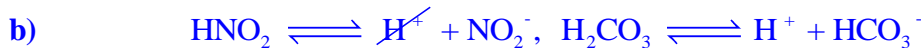
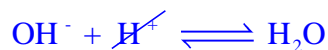
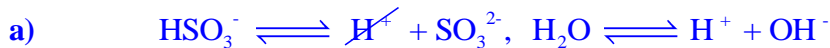


3. Quelles sont les entités ampholytes parmi les couples évoqués dans les questions précédentes ?

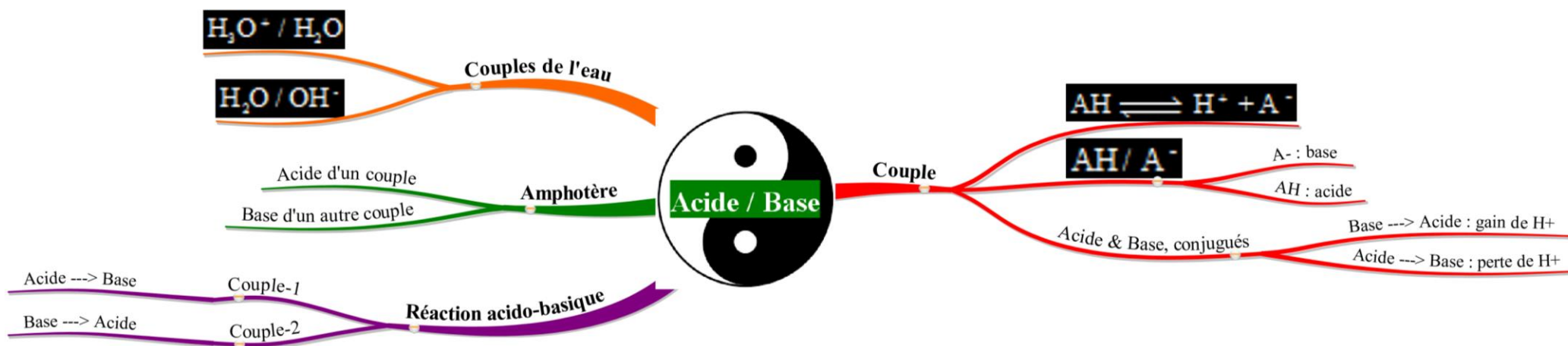
1.



2.



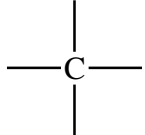
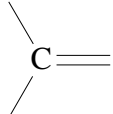
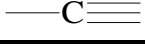
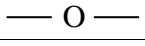

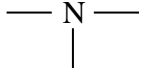
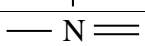

3.  $H_2O$  et  $HCO_3^-$



## Thème n°3 : Chimie organique

### Rappels, et généralités

- ❖ Les composés chimiques sont partagés en 2 grandes catégories :
  - Les composés **organiques** : tous contiennent le **carbone**, et certains autres éléments tels que l'**hydrogène** (pour la plupart), l'**oxygène** et l'**azote** (pour un grand nombre), le phosphore, le soufre et les halogènes (pour d'autres), et des métaux (pour certains).
  - Les composés **inorganiques** : ne contiennent pas le carbone, excepté quelques-uns tel que le graphite, les oxydes de carbone, les carbonates.
- ❖ La **chimie organique** ; est la branche de la chimie se limitant à l'étude des composés organiques, naturels (d'origine végétale et animale) ou synthétiques.
- ❖ Pour satisfaire les règles du duet et de l'octet, les éléments chimiques présents dans les composés organiques s'engagent dans des liaisons covalentes :

Hydrogène	1 liaison covalente simple	H —	
<b>Carbone</b>	4 liaisons covalentes	4 liaisons simples	
		1 liaison double & 2 liaisons simples	
		1 liaison triple & 1 liaison simple	
<b>Oxygène</b>	2 liaisons covalentes	2 liaisons simples	
		1 liaison double	
<b>Azote</b>	3 liaisons covalentes	3 liaisons simples	
		1 liaison double & 1 liaison simple	
		1 liaison triple	

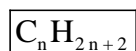
- ❖ Les composés organiques sont partagés en plusieurs familles; les plus simples d'entre elles constituent les **hydrocarbures**, dont les principales sources sont le pétrole et le gaz naturel :
  - Un hydrocarbure est un composé formé uniquement de carbone et d'hydrogène; sa formule brute générale est  $C_xH_y$ , avec  $x, y \in \mathbb{N}^*$
  - Leur principale utilisation est la production d'énergie par combustion (réaction avec le dioxygène) :
    - Si l'oxygène est suffisant ; la combustion est complète, et elle produit le  $CO_2$  et le  $H_2O$   
 ex gaz de ville :  $CH_{4(g)} + 2 O_{2(g)} \longrightarrow CO_{2(g)} + 2 H_2O_{(g)}$
    - Si l'oxygène est insuffisant ; la combustion est incomplète, et elle produit le C et le  $H_2O$   
 ex gaz de ville :  $CH_{4(g)} + O_{2(g)} \longrightarrow C_{(sd)} + 2 H_2O_{(g)}$
  - On se limite aux hydrocarbures aliphatiques : dont la chaîne carbonée est ouverte.



- Les hydrocarbures se partagent en 3 familles :

- o Les **alcane**s :

- Toutes les liaisons Carbone-Carbone sont simples ; la formule brute est de la forme



avec  $n \in \mathbb{N}^*$ , la chaîne carbonée peut être linéaire ou ramifiée.

ex

Formule brute	$C_4H_{10}$	
Formules développées (Schéma de Lewis)	$\begin{array}{cccc} H & H & H & H \\   &   &   &   \\ H-C & -C & -C & -C-H \\   &   &   &   \\ H & H & H & H \end{array}$	$\begin{array}{c} H \\   \\ H-C-H \\   \\ H-C-C-H \\   \quad   \\ H \quad H \end{array}$
Formules semi-développées	$H_3C-CH_2-CH_2-CH_3$	$\begin{array}{c} H_3C \\   \\ H_3C-CH-CH_3 \end{array}$
Nom	butane	2-méthylpropane

Ces deux alcanes de même formule brute, mais qui diffèrent par leur chaîne carbonée sont dits isomères de chaîne. Ce sont deux alcanes différents, bien qu'ils ont la même formule brute  $C_4H_{10}$  : pour cela il faut leur attribuer des noms différents, selon les règles conventionnelles de l'IUPAC ci-dessous. (International Union of Pure and Applied Chemistry)

- Les alcanes sont dits saturés, car il leur est impossible d'établir de nouvelles liaisons avec de nouveaux atomes.

- **Règles de nomenclature**

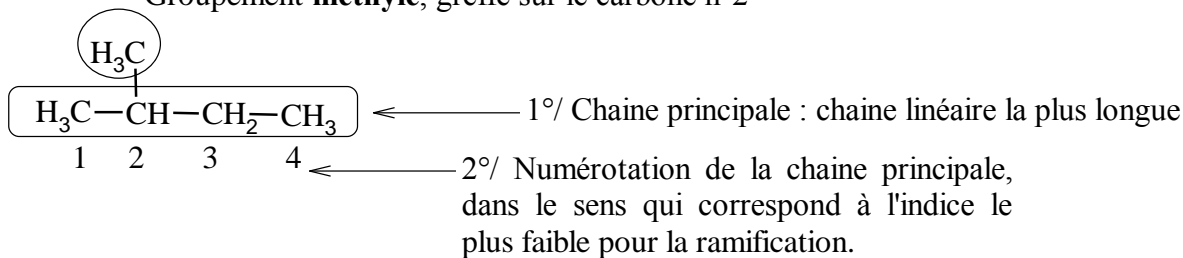
- *Alcane*s à chaîne linéaire

n	Formule brute	Formule semi-développée	Nom
1	$CH_4$	$CH_4$	<b>méthane</b>
2	$C_2H_6$	$H_3C-CH_3$	<b>éthane</b>
3	$C_3H_8$	$H_3C-CH_2-CH_3$	<b>propane</b>
4	$C_4H_{10}$	$H_3C-CH_2-CH_2-CH_3$	<b>butane</b>
5	$C_5H_{12}$	$H_3C-CH_2-CH_2-CH_2-CH_3$	<b>pentane</b>
6	$C_6H_{14}$	$H_3C-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-CH_3$	<b>hexane</b>
7	$C_7H_{16}$	$H_3C-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-CH_3$	<b>heptane</b>
8	$C_8H_{18}$	$H_3C-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-CH_3$	<b>octane</b>

- *Alcane*s à chaîne ramifiée

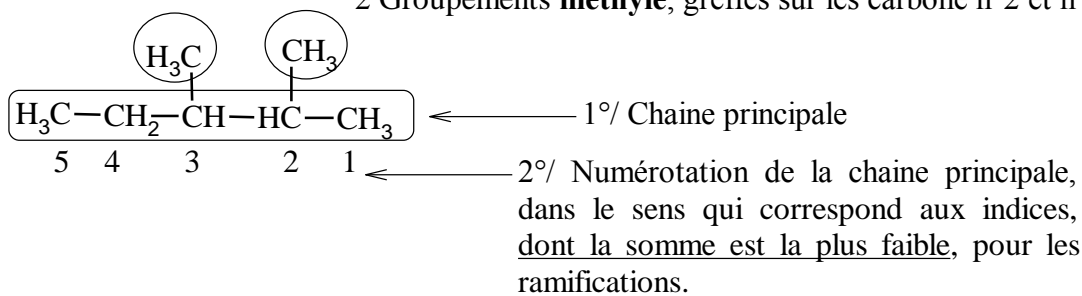
- Exemple-1

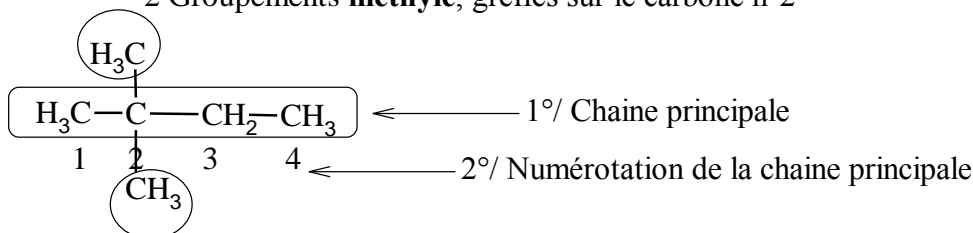
Groupe(m)ent **méthyle**, greffé sur le carbone n°2

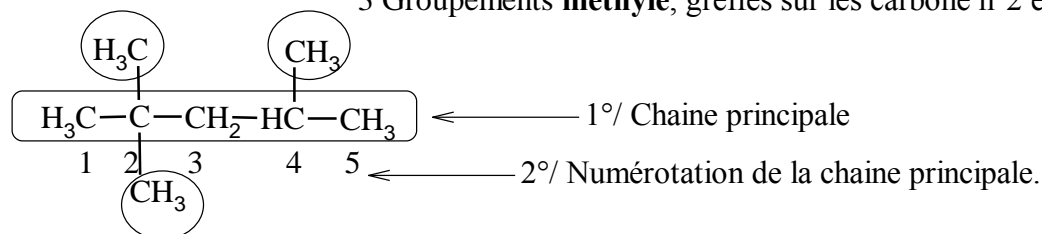


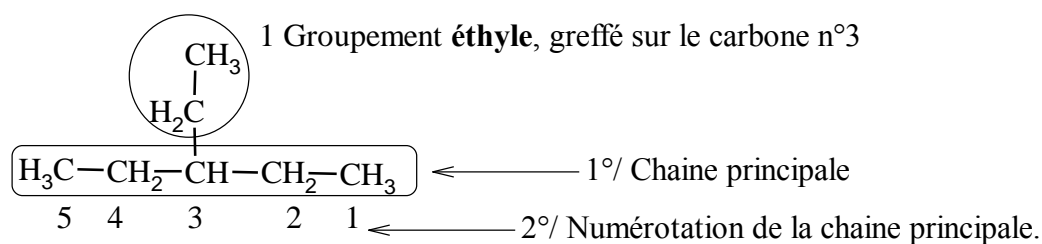
⇒ **2-méthylbutane**

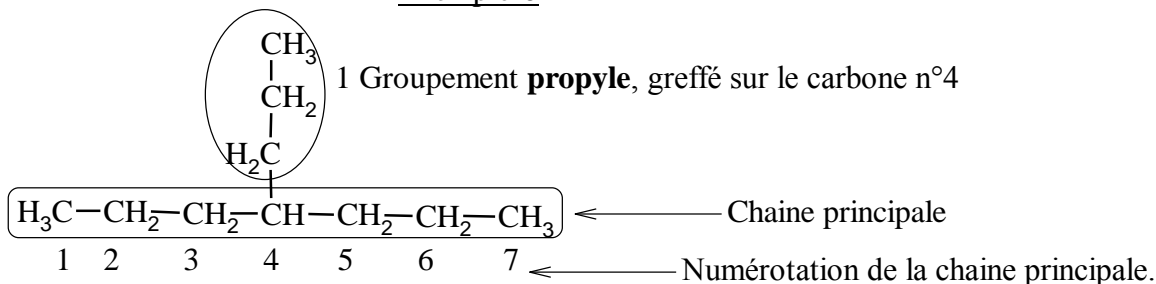
Exemple-2

 2 Groupements **méthyle**, greffés sur les carbone n°2 et n°3

 ⇒ **2,3-diméthylpentane**
Exemple-3

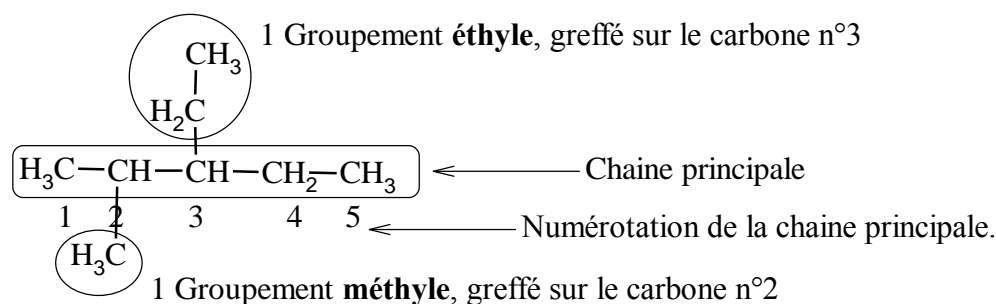
 2 Groupements **méthyle**, greffés sur le carbone n°2

 ⇒ **2,2-diméthylbutane**
Exemple-4

 3 Groupements **méthyle**, greffés sur les carbone n°2 et n°4

 ⇒ **2,2,4-triméthylpentane**
Exemple-5

 1 Groupement **éthyle**, greffé sur le carbone n°3

 ⇒ **3-éthylpentane**

**Exemple-6**


⇒ **4-propylheptane**

**Exemple-7**


⇒ **3-éthyl, 2-méthylpentane**

**D'où les règles de nomenclature :**

- 1) Commencer par déterminer la chaîne principale : chaîne carbonée linéaire la plus longue.
- 2) Numéroté la chaîne principale dans le sens qui donne aux ramifications, les indices dont la somme est la plus petite.
- 3) Écrire le nom, selon le schéma suivant :

↔ Si les groupements en ramification sont identiques :

Indices de position des groupements, séparés par des virgules et ordonnés

Nom des groupements, précédé du préfixe indiquant leur nombre

Nom de l'alcane linéaire au même nombre de carbones que la chaîne principale

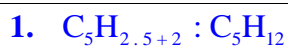
↔ Si les groupements en ramification sont différents : on les présente dans l'ordre alphabétique selon le schéma précédent, en les séparant par des virgules. (dernier exemple)

Rq : Les noms des groupements constituant des ramifications sont dérivés de ceux des alcanes correspondants, en remplaçant le suffixe « -ane » par le suffixe « -yle »

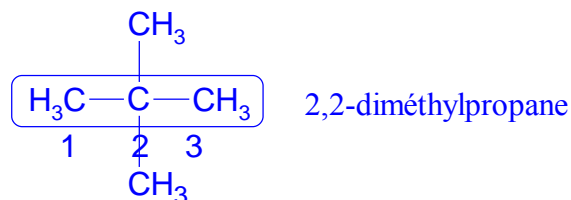
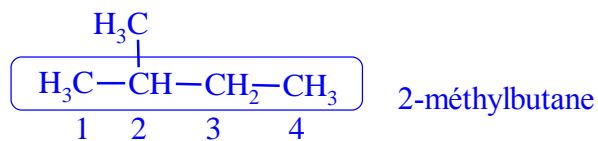
**Application-1**

1. Donner la formule brute des alcanes à 5 carbones.
2. Donner toutes les formules semi-développées possibles des alcanes à 5 carbones, ainsi que leurs noms.
3. Que dit-on de ces alcanes.
4. Écrire les formules semi-développées des hydrocarbures suivants :
  - a) 3-méthylpentane.
  - b) 2,2,3,4-tétraméthylpentane
  - c) 4-éthyl, 2-méthylhexane





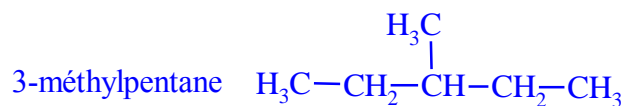
2.



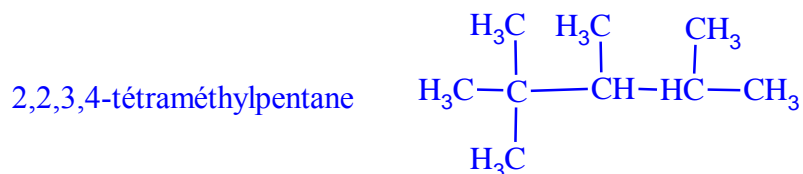
3. Isomères de chaîne.

4.

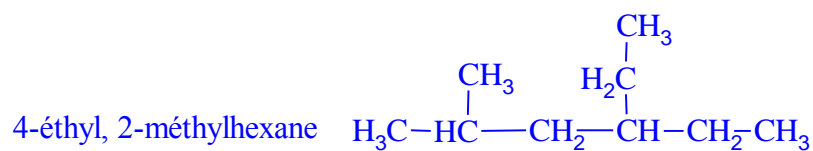
a)



b)



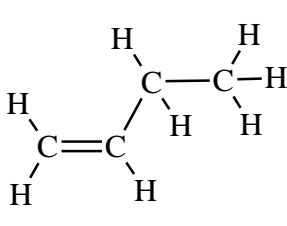
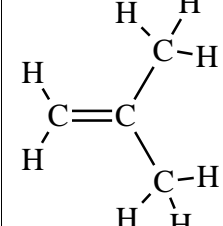
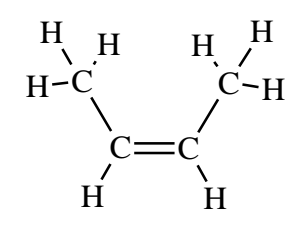
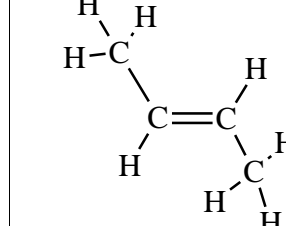
c)



○ Les **alcènes (éthènes)**:

- Il y a au moins une double liaison Carbone-Carbone; on se limite aux cas d'une seule double liaison : la formule brute est de la forme  $C_nH_{2n}$  avec  $\begin{cases} n \in \mathbb{N} \\ n \geq 2 \end{cases}$ , la chaîne carbonée peut être linéaire ou ramifiée.

ex

Formule brute	$C_4H_8$			
	(a)	(b)	(c)	(d)
Formules développées				
Formules semi-développées	$H_2C=CH-CH_2-CH_3$	$\begin{array}{c} CH_3 \\   \\ H_2C=C-CH_3 \end{array}$	$H_3C-CH=CH-CH_3$	$H_3C-CH=CH-CH_3$
Nom	but-1-ène	2-méthylprop-1-ène	(Z) but-2-ène	(E) but-2-ène

Ces quatre alcènes de même formule brute sont des isomères :

- ↪ La chaîne carbonée des alcènes (a), (c) et (d) est linéaire, alors que celle de l'alcène (b) est ramifiée ; L'alcène (b) est un isomère de chaîne pour chacun des alcènes (a), (c) et (d).
- ↪ Les alcènes (a) et (c), ou (a) et (d) ; ont, non seulement la même formule brute, mais aussi la même chaîne carbonée : cependant ils diffèrent par la position de la double liaison ; ce sont des isomères de position.
- ↪ Les alcènes (c) et (d) ; ont, non seulement la même formule brute, mais aussi la même chaîne carbonée et la même position de la double liaison : cependant ils diffèrent par la position relative dans l'espace des groupes méthyles et des hydrogènes; ce sont des isomères géométriques.
  - (c) est l'isomère **Z** (initiale du mot allemand **Z**usammen  $\Leftrightarrow$  ensemble)
  - (d) est l'isomère **E** (initiale du mot allemand **E**ntgegen  $\Leftrightarrow$  opposé)

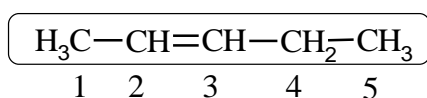
- Les alcènes sont dits insaturés ; car il leur est possible d'établir de nouvelles liaisons avec de nouveaux atomes, par rupture de la double liaison.

- Règles de nomenclature**

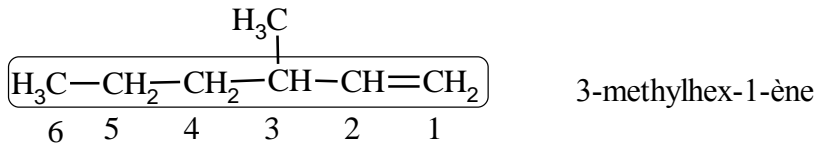
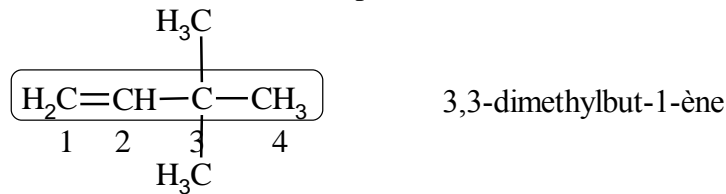
Sont les mêmes utilisées avec les alcanes, sauf que :

- ↪ La chaîne principale doit contenir la double liaison, et son sens de numérotation est celui donnant le plus faible indice pour la double liaison (indice du 1<sup>ère</sup> carbone de la double liaison), puis les indices dont la somme est la plus petite pour les ramifications (s'il y en a).
- ↪ Le nom est dérivé de celui de l'alcane correspondant, en remplaçant le suffixe « -ane » par le suffixe « -ène » précédé de l'indice de position de la double liaison entre deux tirets.

Exemple-1



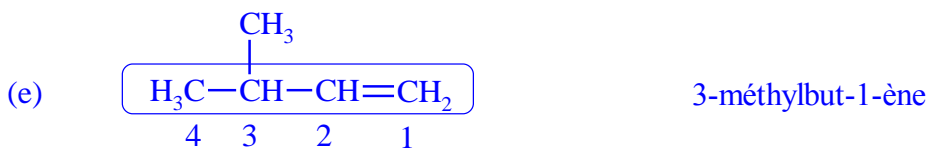
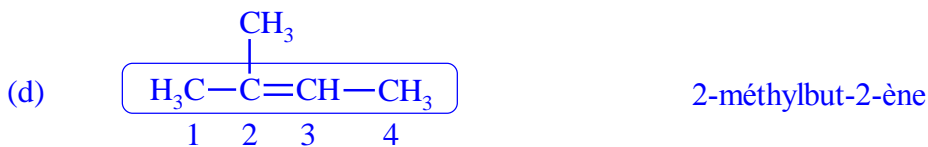
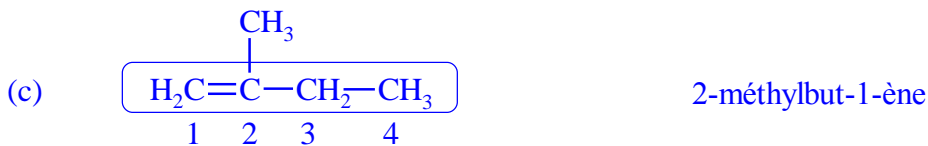
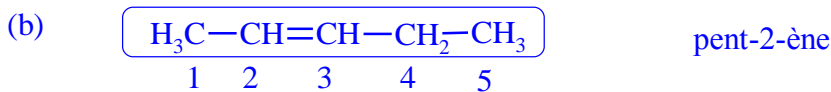
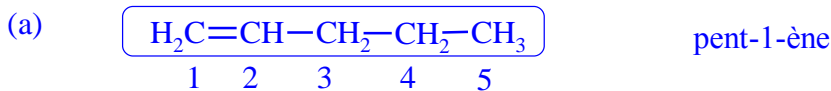
pent-2-ène

**Exemple-2**

**Exemple-3**

**Application-2**

- Donner la formule brute des alcènes à 5 carbones.
- Donner toutes les formules semi-développées possibles des alcènes à 5 carbones, ainsi que leurs noms.
- Identifier les isomères de chaîne, et les isomères de position.
- Écrire les formules semi-développées des hydrocarbures suivants :
  - \* 2,3,3-triméthylbut-1-ène
  - \* 5-éthyl, 3-méthylhept-2-ène

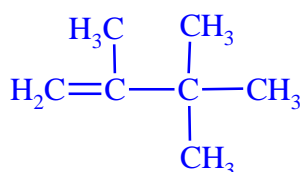
1.  $\text{C}_5\text{H}_{2.5} : \text{C}_5\text{H}_{10}$

2.

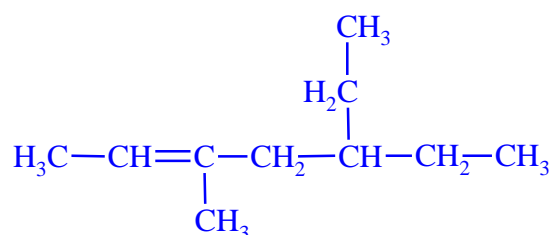


3. Isomères de chaîne : (a) et (c) / (a) et (d) / (a) et (e) / (b) et (c) / (b) et (d) / (b) et (e)  
 Isomères de position : (a) et (b) / (c), (d) et (e)

4.



2,3,3-triméthylbut-1-ène



5-éthyl, 3-méthylhept-2-ène

○ Les **alcynes (éthynes)**:

- Il y a au moins une triple liaison Carbone-Carbone; on se limite aux cas d'une seule

triple liaison : la formule brute est de la forme  $C_nH_{2n-2}$  avec  $\begin{cases} n \in \mathbb{N} \\ n \geq 2 \end{cases}$ ,

la chaîne carbonée peut être linéaire ou ramifiée.

ex

Formule brute	$C_5H_8$		
	(a)	(b)	(c)
Formules développées	$  \begin{array}{ccccccc}  & H & H & H & & & \\  &   &   &   & & & \\  H & -C \equiv C & -C & -C & -C & -H \\  & &   &   &   & & \\  & & H & H & H & &   \end{array}  $	$  \begin{array}{ccccccc}  & H & & H & H & & \\  &   & &   &   & & \\  H & -C & -C \equiv C & -C & -C & -H \\  &   & &   &   & & \\  & H & & H & H & &   \end{array}  $	$  \begin{array}{ccccccc}  & & H & & & & \\  & &   & & H & & \\  & & H-C-H & &   & & \\  & &   & &   & & \\  H & -C \equiv C & -C & -C & -H \\  & &   & &   & & \\  & & H & & H & &   \end{array}  $
Formules semi-développées	$HC \equiv C - CH_2 - CH_2 - CH_3$	$H_3C - C \equiv C - CH_2 - CH_3$	$  \begin{array}{c}  H_3C \\    \\  HC \equiv C - CH - CH_3  \end{array}  $
Nom	pent-1-yne	pent-2-yne	3-méthylbut-1-yne

Ces trois alcynes de même formule brute sont des isomères :

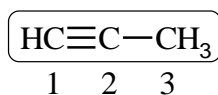
- ↪ La chaîne carbonée des alcynes (a) et (b) est linéaire, alors que celle de l'alcyne (c) est ramifiée ; L'alcyne (c) est un isomère de chaîne pour chacun des alcynes (a) et (b).
- ↪ Les alcynes (a) et (b) ; ont, non seulement la même formule brute, mais aussi la même chaîne carbonée : cependant ils diffèrent par la position de la triple liaison ; ce sont des isomères de position.

- Les alcynes sont dits insaturés ; car il leur est possible d'établir de nouvelles liaisons avec de nouveaux atomes, par rupture de la triple liaison.

- Règles de nomenclature**

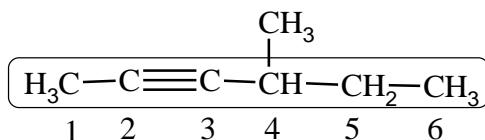
Les règles de nomenclature sont analogues à celles utilisées avec les alcènes, en remplaçant le suffixe « -ène » par le suffixe « -yne ».

Exemple-1

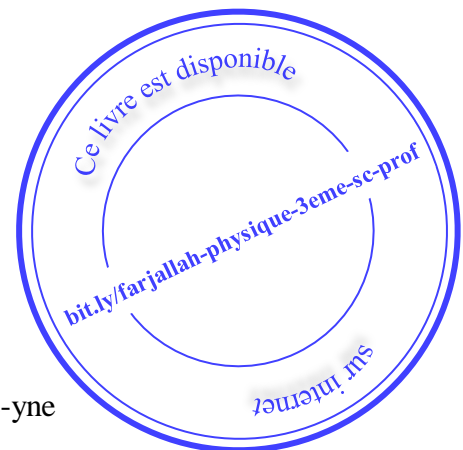


prop-1-yne

Exemple-2



4-méthylhex-2-yne



## Chapitre-1 : Analyse des composés organiques

### Objectifs

- Réaliser des expériences simples d'analyse qualitative d'un composé organique.
- Retrouver la formule brute d'un composé à partir de la masse molaire et des résultats d'une étude quantitative.
- Trouver les différents isomères correspondant à une même formule brute.
- Distinguer un isomère de chaîne d'un isomère de position.

### Prérequis

- Composés organiques, composés inorganiques.
- Les hydrocarbures ; définition, et combustion.
- Familles des alcanes, alcènes, et des alcynes.
- Représentation d'un composé organique par une formule semi-développée.
- Isomérisation de chaîne, isomérisation de position.

### Matériel

* Bec Bunsen	* Eau de chaux
* Erlenmeyer	* Sucre
* Becher	* Sciure de bois
* 4 Tubes à essai	* CuO
* 2 Tubes à dégagement effilés avec bouchon troué	* Amidon
* Tube effilé coudé avec bouchon troué	* Urée
* Pince en bois	* Ca(OH) <sub>2</sub>
* Spatule	* NaOH
* Papier pH	

Le but est la détermination de la formule brute du composé; pour cela il faut :

- 1) Identifier les éléments dont est constitué le composé : analyse qualitative.
- 2) Déterminer la proportion en masse de chaque élément dans un échantillon du composé : analyse quantitative.
- 3) Déterminer sa masse molaire.

## I- Analyse qualitative

### 1) Recherche des éléments C et H

#### ex-1 : Combustion incomplète du butane

La réaction du butane avec le dioxygène en défaut produit une fumée noire de carbone  $\Rightarrow$  le butane contient l'élément C.

#### ex-2 : Combustion complète du butane

La réaction du butane avec le dioxygène en excès (ou suffisant) produit du CO<sub>2</sub> (qui trouble l'eau de chaux), et de la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O)  $\Rightarrow$  le butane contient les éléments C et H.

#### ex-3 : Pyrolyse du sucre alimentaire (saccharose)

- \* La pyrolyse d'une substance est sa décomposition sous l'action de la chaleur, sans combustion.
- \* Pour le sucre, cela donne :
  - Charbon de sucre  $\Rightarrow$  le sucre contient l'élément C.
  - Un gaz inflammable avec détonation (H<sub>2</sub>)  $\Rightarrow$  le sucre contient l'élément H.

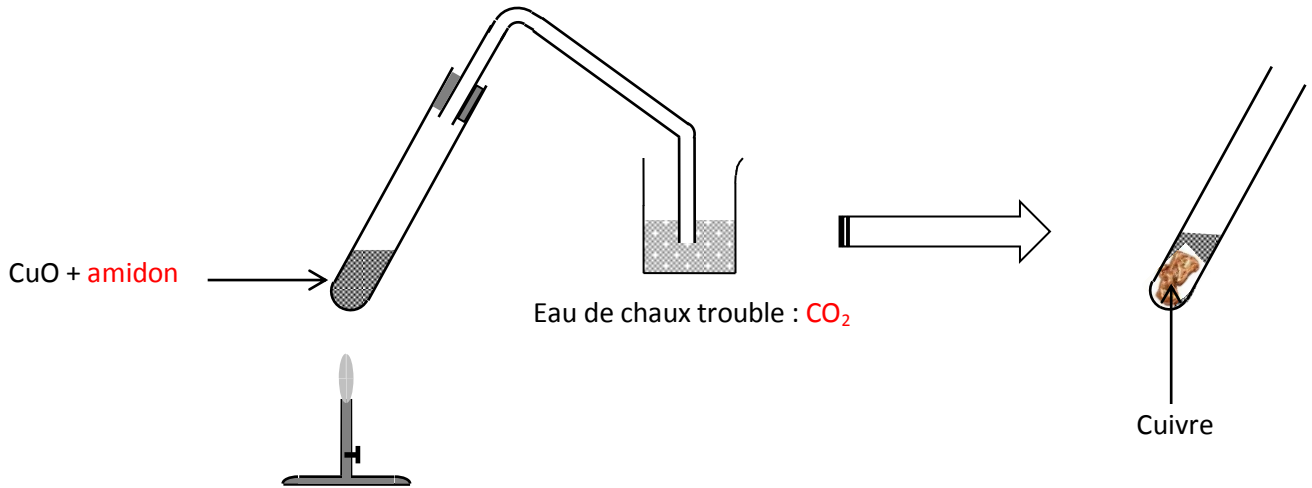
**ex-4 : Pyrolyse du bois**

Elle donne :

- \* Charbon de bois  $\Rightarrow$  le bois contient l'élément C.
- \*  $\left\{ \begin{array}{l} - \text{Un gaz inflammable avec détonation (H}_2) \\ - \text{Des gouttelettes d'eau (H}_2\text{O)} \end{array} \right. \Rightarrow$  le bois contient l'élément H.

**ex-5 : Oxydation de l'amidon par l'oxyde de cuivre II (CuO) (Fig-1)**

Figure-1

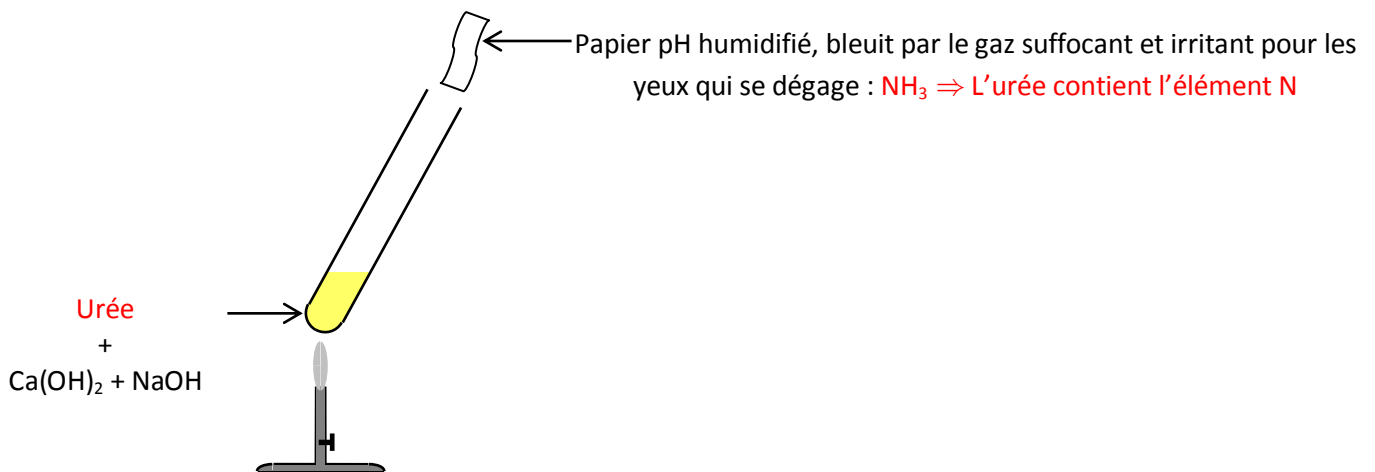


CuO est réduit en Cu, tout en oxydant l'amidon qui donne du  $\text{CO}_2 \Rightarrow$  l'amidon contient l'élément C

**2) Recherche de l'élément N**

**ex : Analyse de l'urée (Fig-2)**

Figure-2



## II- Analyse quantitative

### Activité

On considère un composé organique dont l'analyse qualitative montre qu'il est constitué des éléments carbone, hydrogène, oxygène, et azote; sa formule brute est alors de la forme  $C_xH_yO_zN_t$ , avec  $x, y, z$  et  $t \in \mathbb{N}^*$ .

On se propose de déterminer les valeurs de  $x, y, z$  et  $t$ , et par suite la formule du composé.

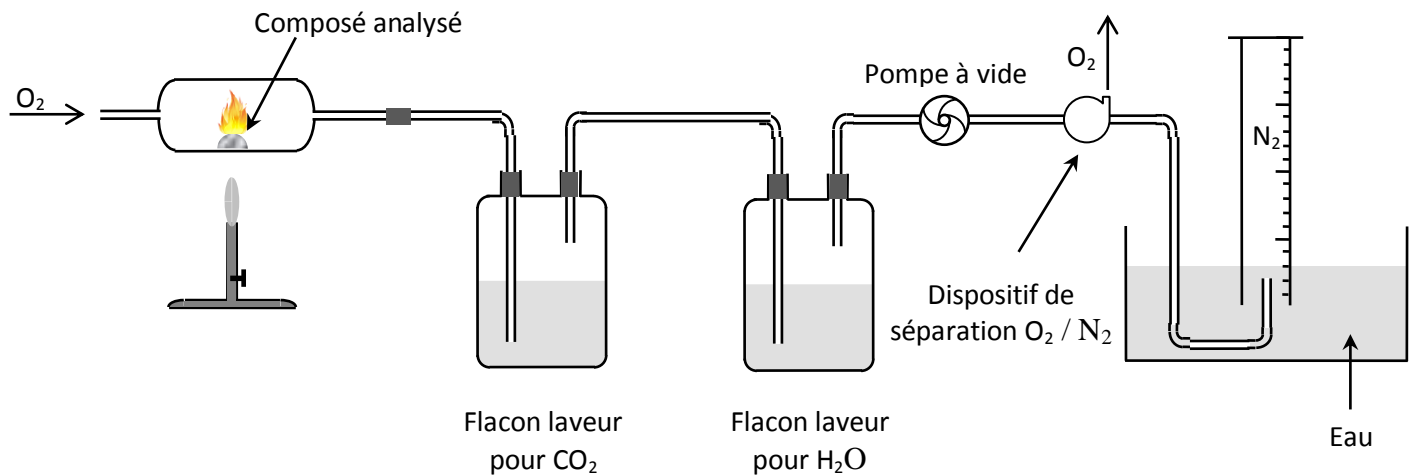
1. Soient %C, %H, %O et %N les pourcentages massiques de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote respectivement, dans un échantillon quelconque du composé. Et soit (M) sa masse molaire.

$$\text{Montrer que } x = \frac{\%C \cdot M}{1200}, y = \frac{\%H \cdot M}{100}, z = \frac{\%O \cdot M}{1600} \text{ et } t = \frac{\%N \cdot M}{1400}$$

$$\text{On donne } C = 12, H = 1, O = 16, N = 14$$

2. **Détermination des pourcentages massiques des éléments C, H, O et N**

C'est l'analyse quantitative à proprement dire ; la plus simple des méthodes est celle qui utilise la combustion complète d'un échantillon du composé pour déterminer la masse de carbone, la masse d'hydrogène et éventuellement la masse d'azote, contenues dans l'échantillon :



- \* Les produits de la combustion ( $CO_2, H_2O$  et  $N_2$ ), ainsi que le dioxygène en excès sont emmenés à traverser un premier flacon contenant une solution, tel que l'eau de chaux, qui fixe le  $CO_2$  : l'augmentation de la masse du flacon correspond à la masse de  $CO_2$  dégagé, d'où on peut déterminer la masse de carbone dans l'échantillon à l'origine du  $CO_2$  dégagé. Et par suite le %C.
- \* Le mélange gazeux issu du premier flacon ( $H_2O$  et  $N_2$ ), ainsi que le dioxygène en excès sont emmenés à traverser un deuxième flacon contenant une solution, tel que l'acide sulfurique concentré, qui fixe le  $H_2O$  : l'augmentation de la masse du flacon correspond à la masse de  $H_2O$  dégagé, d'où on peut déterminer la masse d'hydrogène dans l'échantillon à l'origine du  $H_2O$  dégagé. Et par suite le %H.
- \* Le mélange gazeux résiduel ( $N_2$ ), ainsi que le dioxygène en excès sont emmenés à traverser un dispositif qui sépare  $O_2$  et le conduit vers l'extérieur : le  $N_2$  restant est récupéré dans une éprouvette sous pression normale pour déterminer son volume et ainsi sa quantité de matière, d'où on peut déterminer la masse d'azote dans l'échantillon à l'origine du  $N_2$  dégagé. Et par suite le %N.

Soit  $\begin{cases} m : \text{masse de l'échantillon brûlé} \\ m(CO_2), \text{ et } m(H_2O) : \text{masses de } CO_2, \text{ et de } H_2O, \text{ retenues par les flacons laveurs ;} \\ V(N_2) : \text{volume de diazote dégagé} \end{cases}$

a) Montrer que  $\%C = \frac{1200}{M(CO_2)} \cdot \frac{m(CO_2)}{m}$ ,  $\%H = \frac{200}{M(H_2O)} \cdot \frac{m(H_2O)}{m}$  et  $\%N = \frac{2800}{V_m} \cdot \frac{V(N_2)}{m}$ .

b) En déduire le %O.



### 3. Détermination de la masse molaire

La méthode la plus simple consiste à vaporiser un échantillon de masse ( $m$ ) connue du composé, et mesurer la valeur du volume ( $V$ ) qu'il occupe à l'état gazeux : montrer que  $M = \frac{m}{V} \cdot V_m$

### 4. A.N :

- \* L'analyse qualitative d'un composé organique montre qu'il est constitué des éléments C, H, O et N.
- \* L'analyse quantitative d'un échantillon de masse  $m = 5,9 \text{ g}$  de ce composé par la méthode de la combustion complète donne  $8,8 \text{ g}$  de  $\text{CO}_2$ ,  $4,5 \text{ g}$  de  $\text{H}_2\text{O}$  et  $1,2 \text{ L}$  de  $\text{N}_2$  dans les conditions où le volume molaire gazeux est  $V_m = 24 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$ .
- \* Une même masse ( $5,9 \text{ g}$ ) de ce composé, portée à ébullition, occupe un volume  $V = 2,4 \text{ L}$  dans les conditions où le volume molaire gazeux est  $V_m = 24 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$

- a) Déterminer la masse molaire du composé.
- b) Calculer les pourcentages massiques des différents éléments présents dans le composé.

On donne C = 12, H = 1, O = 16, N = 14

- c) En déduire sa formule brute.

Rq Les méthodes d'analyse se compliquent pour les autres éléments, mais elles permettent d'analyser n'importe quelle substance... jusqu'à le corps humain.

Composition moyenne du corps humain (pour une personne qui pèse 100 kg)														
O	C	H	N	Ca	P	K	S	Na	Cl	Mg	I	Fe	Cu, Zn, Se, Mo, F, Mn, Co	Li, Sr, Al, Si, Pb, V, As, Br
65 kg	18 kg	10 kg	3 kg	1,5 kg	1 kg	0,4 kg	0,3 kg	0,2 kg	0,2 kg	0,1 kg	0,1 kg	0,1 kg	Traces	Traces infimes

Source : [bit.ly/taux-elements-corps-humain](http://bit.ly/taux-elements-corps-humain)

1.  $M = (x \cdot 12) + (y \cdot 1) + (z \cdot 16) + (t \cdot 14) \Rightarrow 1 \text{ mol du composé pèse } M \text{ (g), et contient :}$

$$\left\{ \begin{array}{l} (12x) \text{ g, Carbone} \\ (y) \text{ g, Hydrogène} \\ (16z) \text{ g, Oxygène} \\ (14t) \text{ g, Azote} \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \%C = \frac{12x}{M} \cdot 100 = \frac{1200}{M} \cdot x \\ \%H = \frac{y}{M} \cdot 100 = \frac{100}{M} \cdot y \\ \%O = \frac{16z}{M} \cdot 100 = \frac{1600}{M} \cdot z \\ \%N = \frac{14t}{M} \cdot 100 = \frac{1400}{M} \cdot t \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} x = \frac{\%C \cdot M}{1200} \\ y = \frac{\%H \cdot M}{100} \\ z = \frac{\%O \cdot M}{1600} \\ t = \frac{\%N \cdot M}{1400} \end{array} \right.$$

2.

a)

\* Soit  $m(\text{C})$  la masse de carbone dans l'échantillon :  $\%C = \frac{m(\text{C})}{m} \cdot 100 = \frac{n(\text{C}) \cdot M(\text{C})}{m} \cdot 100$

Or  $n(\text{C}) = n(\text{CO}_2)$ ; car chaque atome C de l'échantillon va se trouver dans une molécule  $\text{CO}_2$

$$= \frac{m(\text{CO}_2)}{M(\text{CO}_2)},$$

$$\text{alors : } \%C = \frac{m(\text{CO}_2)}{M(\text{CO}_2)} \cdot \frac{M(\text{C})}{m} \cdot 100 = \frac{m(\text{CO}_2)}{M(\text{CO}_2)} \cdot \frac{1200}{m} \Rightarrow \%C = \frac{1200}{M(\text{CO}_2)} \cdot \frac{m(\text{CO}_2)}{m}$$

$$* \text{ Soit } m(\text{H}) \text{ la masse d'hydrogène dans l'échantillon : } \% \text{H} = \frac{m(\text{H})}{m} \cdot 100 = \frac{n(\text{H}) \cdot M(\text{H})}{m} \cdot 100$$

Or  $n(\text{H}) = 2 n(\text{H}_2\text{O})$ ; car chaque 2 atomes H de l'échantillon vont se trouver dans une molécule  $\text{H}_2\text{O}$

$$= 2 \frac{m(\text{H}_2\text{O})}{M(\text{H}_2\text{O})},$$

$$\text{alors : } \% \text{H} = 2 \frac{m(\text{H}_2\text{O})}{M(\text{H}_2\text{O})} \cdot \frac{M(\text{H})}{m} \cdot 100 = \frac{m(\text{H}_2\text{O})}{M(\text{H}_2\text{O})} \cdot \frac{200}{m} \Rightarrow \boxed{\% \text{H} = \frac{200}{M(\text{H}_2\text{O})} \cdot \frac{m(\text{H}_2\text{O})}{m}}$$

$$* \text{ Soit } m(\text{N}) \text{ la masse d'azote dans l'échantillon : } \% \text{N} = \frac{m(\text{N})}{m} \cdot 100 = \frac{n(\text{N}) \cdot M(\text{N})}{m} \cdot 100$$

Or  $n(\text{N}) = 2 n(\text{N}_2)$ ; car chaque 2 atomes N de l'échantillon vont se trouver dans une molécule  $\text{N}_2$

$$= 2 \frac{V(\text{N}_2)}{V_m},$$

$$\text{alors : } \% \text{N} = 2 \frac{V(\text{N}_2)}{V_m} \cdot \frac{M(\text{N})}{m} \cdot 100 = \frac{V(\text{N}_2)}{V_m} \cdot \frac{2800}{m} \Rightarrow \boxed{\% \text{N} = \frac{2800}{V_m} \cdot \frac{V(\text{N}_2)}{m}}$$

$$\text{b) } \% \text{O} = 100 - (\% \text{C} + \% \text{H} + \% \text{N})$$

$$3. \quad n = \frac{m}{M} = \frac{V}{V_m} \Rightarrow M V = m V_m \Rightarrow M = \frac{m V_m}{V} = \frac{m}{V} \cdot V_m$$

4.

$$\text{a) } M = \frac{5,9}{2,4} \cdot 24 = 59 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

b)

$$* \% \text{C} = \frac{1200}{12 + 16 \cdot 2} \cdot \frac{8,8}{5,9} \approx 40,68$$

$$* \% \text{H} = \frac{200}{2 + 16} \cdot \frac{4,5}{5,9} \approx 8,47$$

$$* \% \text{N} = \frac{2800}{24} \cdot \frac{1,2}{5,9} \approx 23,73$$

$$* \% \text{O} = 100 - (40,68 + 8,47 + 23,73) = 27,12$$

$$\text{c) } x = \frac{40,68 \cdot 59}{1200} = 2; y = \frac{8,47 \cdot 59}{100} \approx 5; z = \frac{27,12 \cdot 59}{1600} = 1; t = \frac{23,73 \cdot 59}{1400} = 1 \Rightarrow \boxed{\text{C}_2\text{H}_5\text{ON}}$$

**Application**

- \* L'analyse qualitative d'un composé organique montre qu'il est constitué des éléments C, H, et N.
- \* L'analyse quantitative d'un échantillon de masse  $m = 0,9 \text{ g}$  de ce composé par la méthode de la combustion complète donne  $1,76 \text{ g}$  de  $\text{CO}_2$ ,  $1,26 \text{ g}$  de  $\text{H}_2\text{O}$  et  $240 \text{ mL}$  de  $\text{N}_2$  dans les conditions où le volume molaire gazeux est  $V_m = 24 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}$ .
- \* La mesure de sa masse molaire donne  $M = 45 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$

On donne  $C = 12$ ,  $H = 1$ ,  $N = 14$

1. Soit  $\text{C}_x\text{H}_y\text{N}_z$  la formule brute de ce composé ;

- \* Ecrire l'expression de  $x$  en fonction de  $M$ ,  $M(\text{CO}_2)$ ,  $m(\text{CO}_2)$ , et  $m$
- \* Ecrire l'expression de  $y$  en fonction de  $M$ ,  $M(\text{H}_2\text{O})$ ,  $m(\text{H}_2\text{O})$ , et  $m$
- \* Ecrire l'expression de  $z$  en fonction de  $M$ ,  $V_m$ ,  $V(\text{N}_2)$ , et  $m$

2. Déterminer la formule brute du composé.

1.

$$* \%C = \frac{12x}{M} \cdot 100 = \frac{1200}{M} \cdot x = \frac{1200}{M(\text{CO}_2)} \cdot \frac{m(\text{CO}_2)}{m} \Rightarrow x = \frac{M}{M(\text{CO}_2)} \cdot \frac{m(\text{CO}_2)}{m}$$

$$* \%H = \frac{y}{M} \cdot 100 = \frac{100}{M} \cdot y = \frac{200}{M(\text{H}_2\text{O})} \cdot \frac{m(\text{H}_2\text{O})}{m} \Rightarrow y = 2 \frac{M}{M(\text{H}_2\text{O})} \cdot \frac{m(\text{H}_2\text{O})}{m}$$

$$* \%N = \frac{14z}{M} \cdot 100 = \frac{1400}{M} \cdot z = \frac{2800}{V_m} \cdot \frac{V(\text{N}_2)}{m} \Rightarrow z = 2 \frac{M}{V_m} \cdot \frac{V(\text{N}_2)}{m}$$

2. .

$$\left. \begin{array}{l} * x = \frac{45}{12 + 16 \cdot 2} \cdot \frac{1,76}{0,9} = 2 \\ * y = 2 \frac{45}{2 + 16} \cdot \frac{1,26}{0,9} = 7 \\ * z = 2 \frac{45}{24} \cdot \frac{0,24 \text{ L}}{0,9} = 1 \end{array} \right\} \Rightarrow \boxed{\text{C}_2\text{H}_7\text{N}}$$

## TP 2 : Modélisation de quelques composés organiques

### Objectifs :

- Construire les modèles moléculaires de toutes les molécules possibles pour une formule brute donnée.
- Ecrire leurs formules semi-développées, et identifier les isomères de chaîne ainsi que les isomères de position.

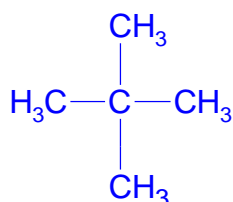
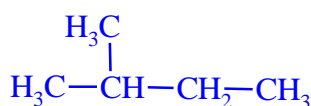
### Matériel :

- 1 Boite de modèles moléculaires

### Manipulation :

#### 1. On considère la formule brute $C_5H_{12}$

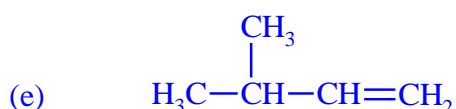
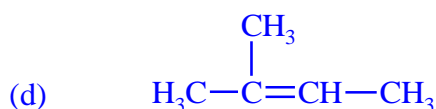
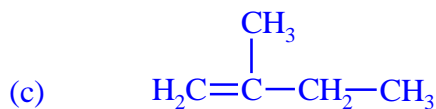
- a) A l'aide des modèles moléculaires, trouver les formules semi-développées de tous les composés aliphatiques correspondant à cette formule.



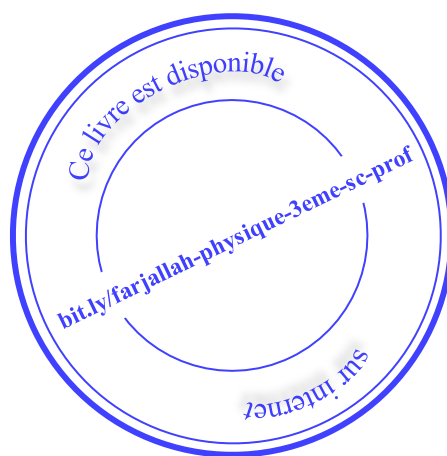
- b) Que peut-on dire de ces composés : **Isomères de chaîne**.  
c) Quelle est leur famille : **Alcanes**

#### 2. On considère la formule brute $C_5H_{10}$

- a) A l'aide des modèles moléculaires, trouver les formules semi-développées de tous les composés aliphatiques correspondant à cette formule.

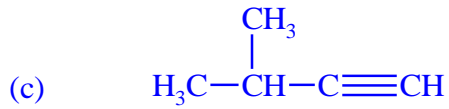
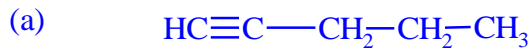


- b) Identifier les isomères de chaîne : (a) et (c) / (a) et (d) / (a) et (e) / (b) et (c) / (b) et (d) / (b) et (e)  
c) Identifier les isomères de position : (a) et (b) / (c), (d) et (e)  
d) Quelle est leur famille : **Alcènes**



**3. On considère la formule brute C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>**

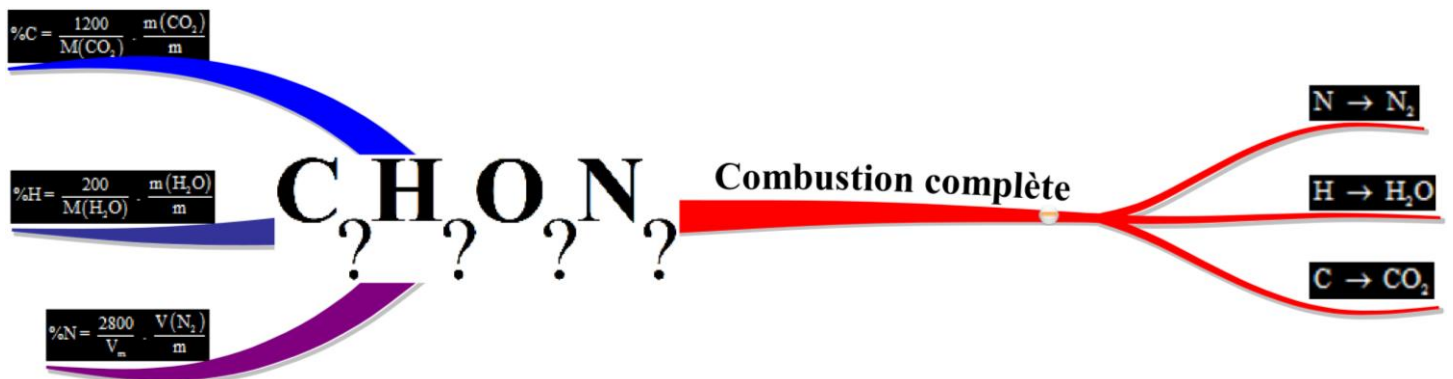
a) A l'aide des modèles moléculaires, trouver les formules semi-développées de tous les composés aliphatiques correspondant à cette formule.



b) Identifier les isomères de chaîne : (a) et (c) / (b) et (c)

c) Identifier les isomères de position : (a) et (b)

d) Quelle est leur famille : **Alcynes**



## Chapitre-2 : Les alcools aliphatiques saturés

### Objectifs

- Nommer un alcool.
- Réaliser des expériences simples communes aux alcools.
- Réaliser des expériences simples distinctives des trois classes d'alcools.
- Distinguer expérimentalement entre un aldéhyde et une cétone.
- Distinguer les trois classes d'alcools.
- Reconnaître des alcools isomères de chaîne, et des alcools isomères de position.

### Prérequis

- Représentation d'un composé organique par une formule semi-développée.
- Notion d'hydrocarbure aliphatique.
- Notion de chaîne carbonée saturée / insaturée.
- Nomenclature des alcanes et des alcènes.
- Isomérisation de chaîne, isomérisation de position.
- Notion de groupe alkyle.
- Identification d'un alcène par la décoloration de l'eau de brome.
- Définition d'un catalyseur.
- Notion de réaction redox, oxydation, réduction, nombre d'oxydation, couple redox.
- Techniques de détermination du nombre d'oxydation.
- Méthode pour écrire l'équation formelle d'un couple redox complexe.
- La combustion, en tant que réaction redox.

### Matériel

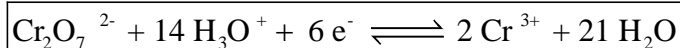
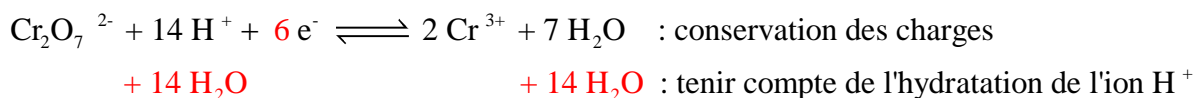
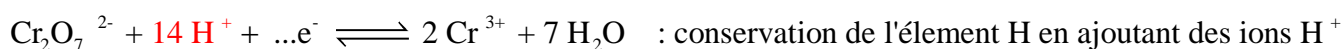
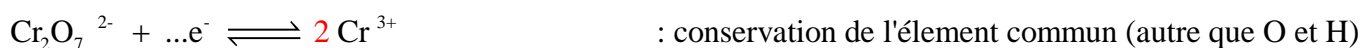
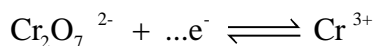
* Modèles moléculaires	* Pissette	* 3 Ampoules à décanter
* Chauffe-ballon	* Bec Bunsen + trépied	* Support pour ampoule à décanter
* Ballon avec tube à dégagement	* Plaque chauffante	* butan-1-ol
* Verre de montre	* 5 Erlenmeyers	* $\text{KMnO}_4$ (~ 0,05 M)
* Entonnoir + Tuyau	* Papier pH	* Cyclohexane
* 6 Bêchers	* Papier filtre	* Liqueur de Fehling (préalablement préparé !)
* Eau de chaux	* Réactif de schiff	* Réactif de Tollens (préalablement préparé !)
* éthanol	* 7 Tubes à essai sur support	* DNPH
* $\text{H}_2\text{SO}_4$ cc (~ 6 M)	* Bouchon pour tube à essai	* butan-2-ol
* Fil de cuivre	* 2 Bouchons pour erlenmeyer	* 2-méthylpropan-2-ol
* Papier abrasif	* 6 pipettes graduées	* Réfrigérant adaptable à un erlenmeyer
* Baguette en verre	* 3 pipettes de 10 mL	* Cristalliseur rempli d'eau
* Pince en bois		* Acide éthanoïque

### Rappels

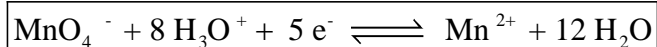
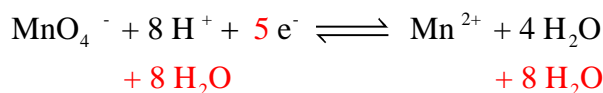
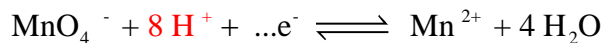
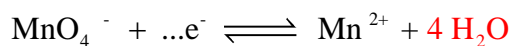
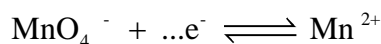
- ❖ Un alcène peut être identifié par la décoloration de l'eau de brome.
- ❖ Un catalyseur, est un corps qui accélère une réaction sans qu'il soit modifié.
- ❖ Réactions redox :
  - L'oxydation d'un élément correspond à une augmentation de son n.o. (par perte d' $e^-$  pour les réactions par voie humide)
  - La réduction d'un élément correspond à une diminution de son n.o. (par gain d' $e^-$  pour les réactions par voie humide)
  - Une réaction au cours de laquelle il y a augmentation du n.o d'un élément et diminution de celui d'un autre (par transfert d' $e^-$  pour les réactions par voie humide), est une réaction redox ; elle met en jeu deux couples redox, dont l'un subit l'oxydation et l'autre la réduction.

- Un couple Ox/Red est formé de deux entités chimiques contenant un même élément sous deux degrés d'oxydation différents :  
La forme oxydée est celle correspondant à l'élément ayant le n.o. le plus élevé. (ou ayant perdu des e<sup>-</sup>)  
La forme réduite est celle correspondant à l'élément ayant le n.o. le plus faible. (ou ayant gagné des e<sup>-</sup>)
- Pour déterminer le n.o d'un élément dans un corps composé ou un ion polyatomique :
  - n.o (H) = +I, généralement.
  - n.o (O) = -II, généralement.
  - La somme des n.o des atomes d'un édifice chimique est égale à sa charge (exprimée en charge élémentaire).
- La combustion est une oxydation par le dioxygène.
- Etapes à suivre pour écrire l'équation formelle associée à un couple complexe :

ex-1  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} / \text{Cr}^{3+}$



ex-2  $\text{MnO}_4^- / \text{Mn}^{2+}$



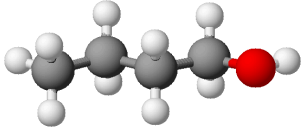
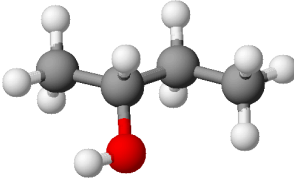
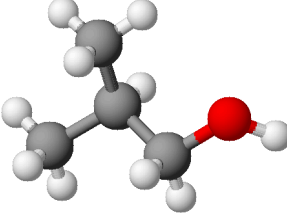
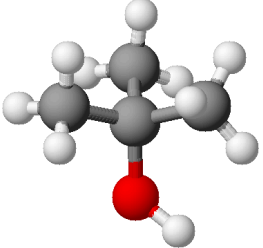


# 1<sup>ère</sup> partie : Propriétés moléculaires

## I- Etude d'un exemple

Soient les alcools à 4 atomes de carbone, de la Fig-1

Figure-1

	(a)	(b)	(c)	(d)
Modèle moléculaire				
Formule brute	$C_4H_{10}O$	$C_4H_{10}O$	$C_4H_{10}O$	$C_4H_{10}O$
Formule semi-développée	$H_3C-CH_2-CH_2-CH_2-OH$	$H_3C-\underset{\substack{  \\ OH}}{CH}-CH_2-CH_3$	$H_3C-\overset{\substack{CH_3 \\  }}{CH}-CH_2-OH$	$H_3C-\overset{\substack{CH_3 \\  }}{\underset{\substack{  \\ OH}}{C}}-CH_3$
Nom	butan-1-ol	butan-2-ol	2-méthylpropan-1-ol	2-méthylpropan-2-ol
Classe	Primaire	Secondaire	Primaire	Tertiaire

- \* Ces composés sont des alcools : ils ont tous un groupe hydroxyle ( $-OH$ ) greffé sur une chaîne carbonée ; pour en tenir compte, on les représente par la formule  $C_4H_9-OH$ .
- \* Ils ont la même formule brute  $C_4H_{10}O$ , mais des formules semi-développées différentes ; ce sont des isomères :
  - (a) et (b) / (c) et (d) : isomères de position.
  - (a) et (c) / (b) et (d) : isomères de chaîne.
- \* Ces alcools sont de différentes classes :
  - Pour les alcools (a) et (c), le carbone portant le groupe ( $-OH$ ) n'est lié qu'à un seul carbone : ils sont dits primaires.
  - Pour l'alcool (b), le carbone portant le groupe ( $-OH$ ) est lié à 2 carbones : il est dit secondaire.
  - Pour l'alcool (d), le carbone portant le groupe ( $-OH$ ) est lié à 3 carbones : il est dit tertiaire.

## II- Généralisation

### 1) Définition

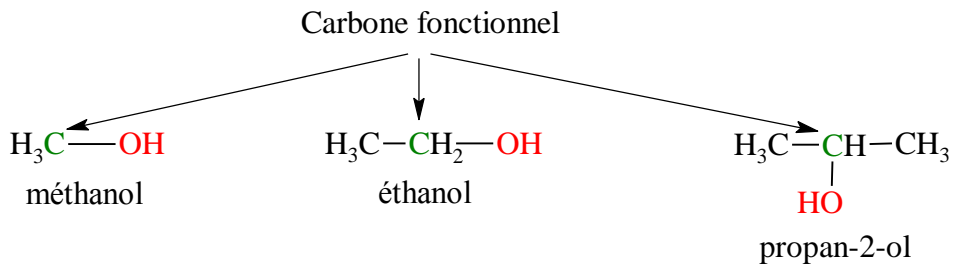
Un alcool est un composé organique dont la molécule comporte le groupe hydroxyle ( $-OH$ ), lié à un atome de carbone ne formant que des liaisons simples avec des atome C ou H (appelé carbone fonctionnel).

On se limitera aux alcools pour lesquels :

- \* Il y a un seul groupe ( $-OH$ ) : monoalcools.
- \* La chaîne carbonée est ouverte : aliphatiques.
- \* La chaîne carbonée ne comporte que des liaisons simples Carbone-Carbone : saturés.

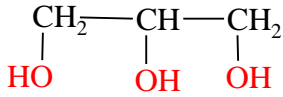
La formule générale d'un tel alcool est alors  $C_nH_{2n+1}-OH$ , ou  $R-OH$  avec R est un groupe alkyle (Radical). Pour  $n \leq 12$  les alcools sont liquides dans les conditions ordinaires, où ils sont de bons solvants organiques. Au-delà ils sont solides.

ex

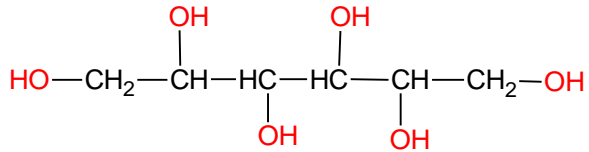


Rq Un polyalcool présente plusieurs groupes ( $-\text{OH}$ ) :

\* Le glycérol (additif alimentaire E422) :

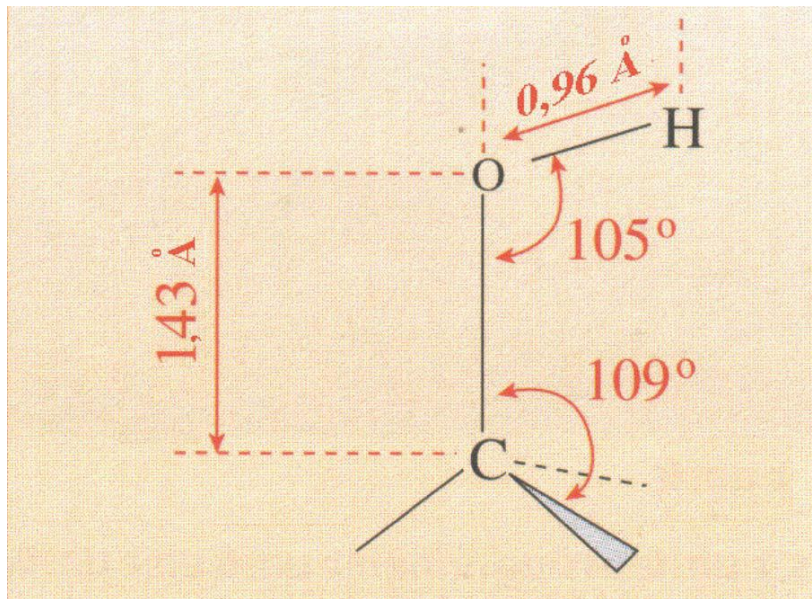


\* Le sorbitol (additif alimentaire E420) :



## 2) Structure du groupe hydroxyle (Fig-2)

Figure-2

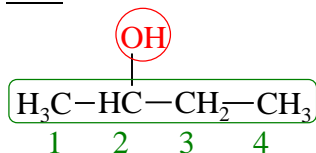


## 3) Nomenclature

ex-1

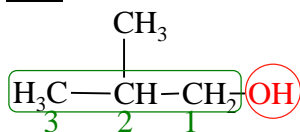


ex-2



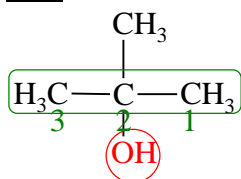
butan-2-ol

ex-3

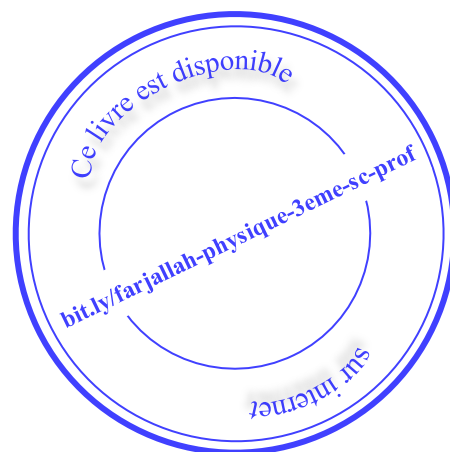


2-méthylpropan-1-ol

ex-4



2-méthylpropan-2-ol

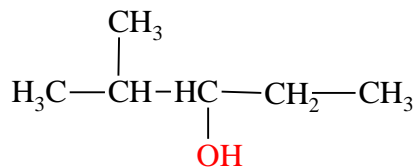


⇒ La chaîne principale doit contenir le carbone fonctionnel, et son sens de numérotation donne l'indice de position le plus faible au groupe (—OH) ; le nom de l'alcool s'obtient de celui de l'alcane correspondant en remplaçant le (e) final par le suffixe (ol) précédé de l'indice de position du groupe (—OH).

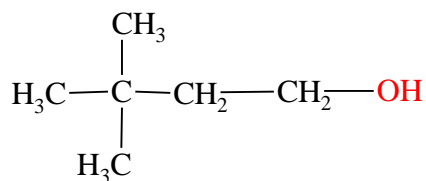
### Application-1

Donner les noms des alcools suivants :

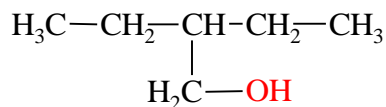
1.



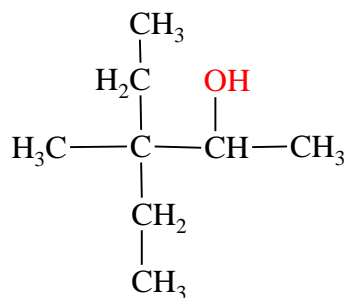
2.



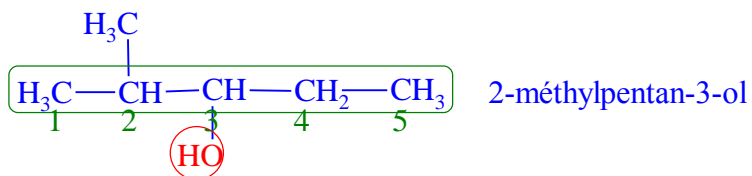
3.



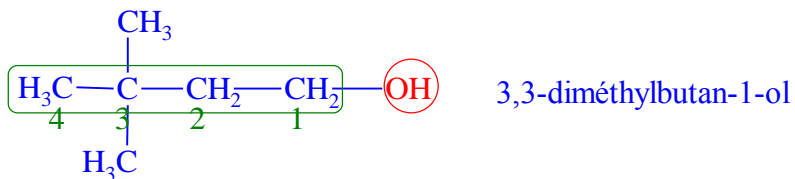
4.



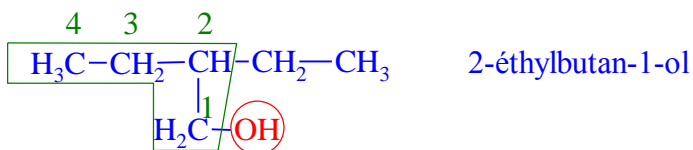
1.



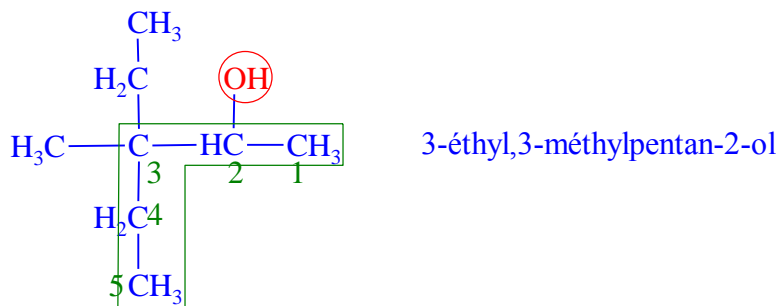
2.



3.



4.



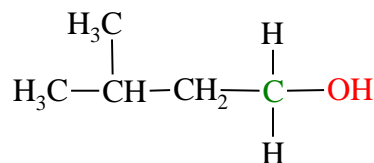
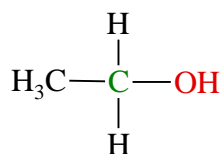
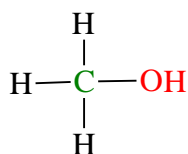
## 4) Classes et isométrie

### a. Les trois classes d'alcools

#### \* Alcools primaires :

Le C fonctionnel est lié à 1 C au maximum (donc à 2 H au moins)

ex

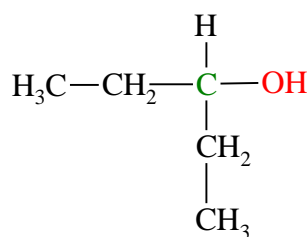
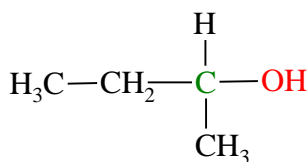


⇒ Ils sont de la forme  $\begin{array}{c} \text{H} \\ | \\ \text{R}-\text{C}-\text{OH} \\ | \\ \text{H} \end{array}$ , avec R : groupe alkyle ou atome H

#### \* Alcools secondaires :

Le C fonctionnel est lié à 2 C (donc à 1 H)

ex

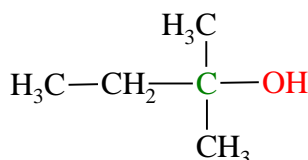
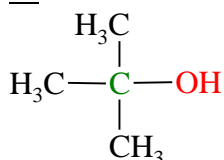


⇒ Ils sont de la forme  $\begin{array}{c} \text{H} \\ | \\ \text{R}_1-\text{C}-\text{OH} \\ | \\ \text{R}_2 \end{array}$ , avec R<sub>1</sub> et R<sub>2</sub> : groupes alkyle, différents ou identiques.

#### \* Alcools tertiaires :

Le C fonctionnel est lié à 3 C (donc à aucun H)

ex



⇒ Ils sont de la forme  $\begin{array}{c} \text{R}_3 \\ | \\ \text{R}_1-\text{C}-\text{OH} \\ | \\ \text{R}_2 \end{array}$ , avec R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> et R<sub>3</sub> : groupes alkyle, différents ou identiques.

### b. Isométrie

#### \* Isomères de position :

- Même formule brute.
- Même chaîne carbonée.
- Diffèrent par l'indice de position du groupe (—OH).

#### \* Isomères de chaîne :

- Même formule brute.
- Même indice de position du groupe (—OH).
- Diffèrent par la chaîne carbonée.

**Application-2**

1. Pour chacun des alcools suivants : écrire la formule semi-développée, préciser le carbone fonctionnel, donner la classe, et la formule brute.

- pentan-1-ol
- pentan-2-ol
- 2,2-diméthylpropan-1-ol
- 2-méthylbutan-2-ol

2. Identifier les isomères de chaîne, et les isomères de position.

1.

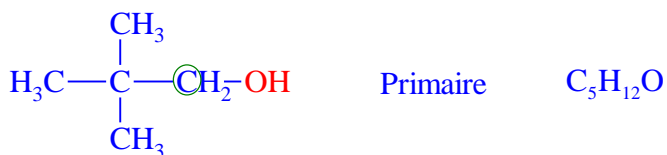
a)



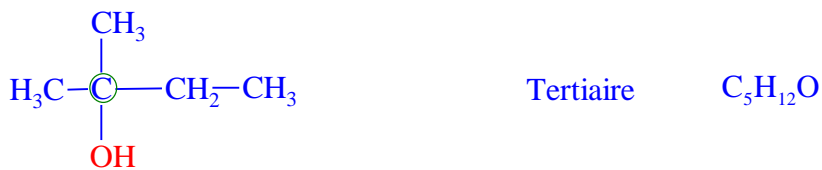
b)



c)



d)



2. Isomères de position : (a) et (b)

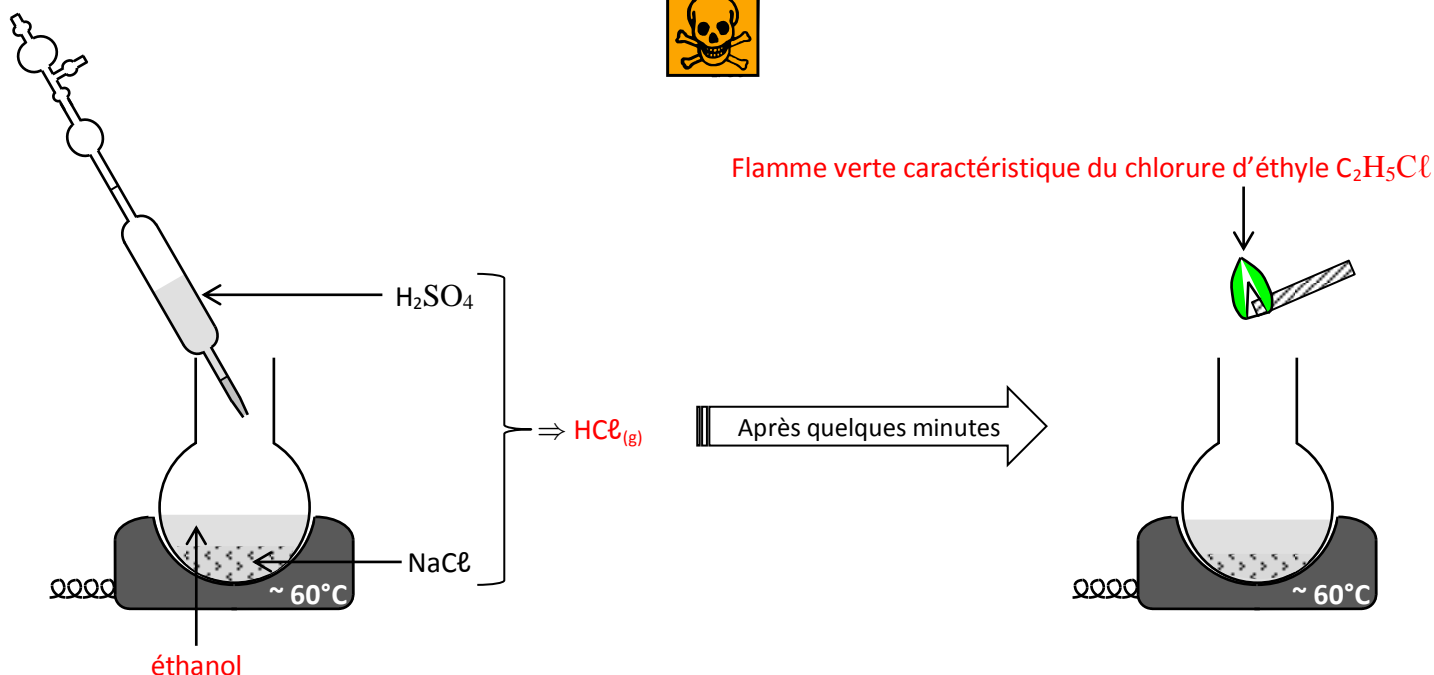
Isomères de chaîne : (a) et (c) / (b) et (d)

## 2<sup>ème</sup> partie : Propriétés chimiques

### I- Réaction avec les acides halogénés

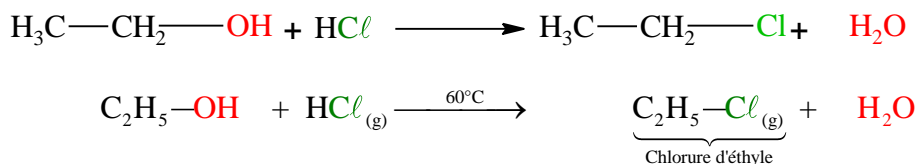
#### 1) Expérience (Fig-3)

Figure-3



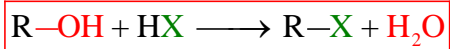
#### 2) Interprétation

L'acide chlorhydrique gazeux issu de l'attaque du sel de cuisine par une solution d'acide sulfurique concentrée, réagit avec l'éthanol en produisant du chlorure d'éthyle selon l'équation :



#### 3) Généralisation

Les alcools peuvent réagir avec les acides du type HX ( $HCl$ ,  $HBr$ ,  $HI$ ,  $HF$  : hydracides halogénés), quelle que soit leur classe, pour donner de l'eau et un halogénure d'alkyle :



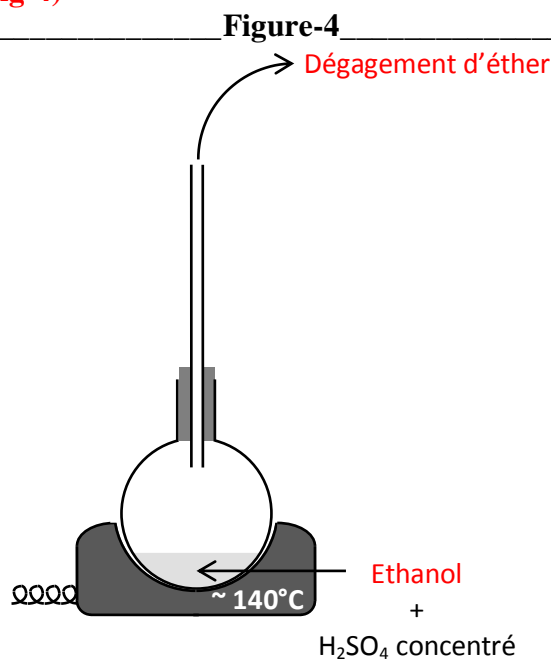
(l'alcool joue le rôle d'une base)



## II- La déshydratation

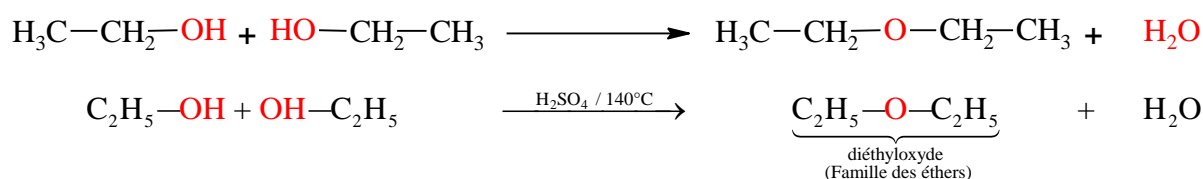
### 1) Déshydratation intermoléculaire

#### a) Expérience (Fig-4)



#### b) Interprétation

Le gaz dégagé est le diéthoxyde, formé selon l'équation :



Il y a élimination d'une molécule d'eau (déshydratation), entre 2 molécules du même alcool (intermoléculaire).

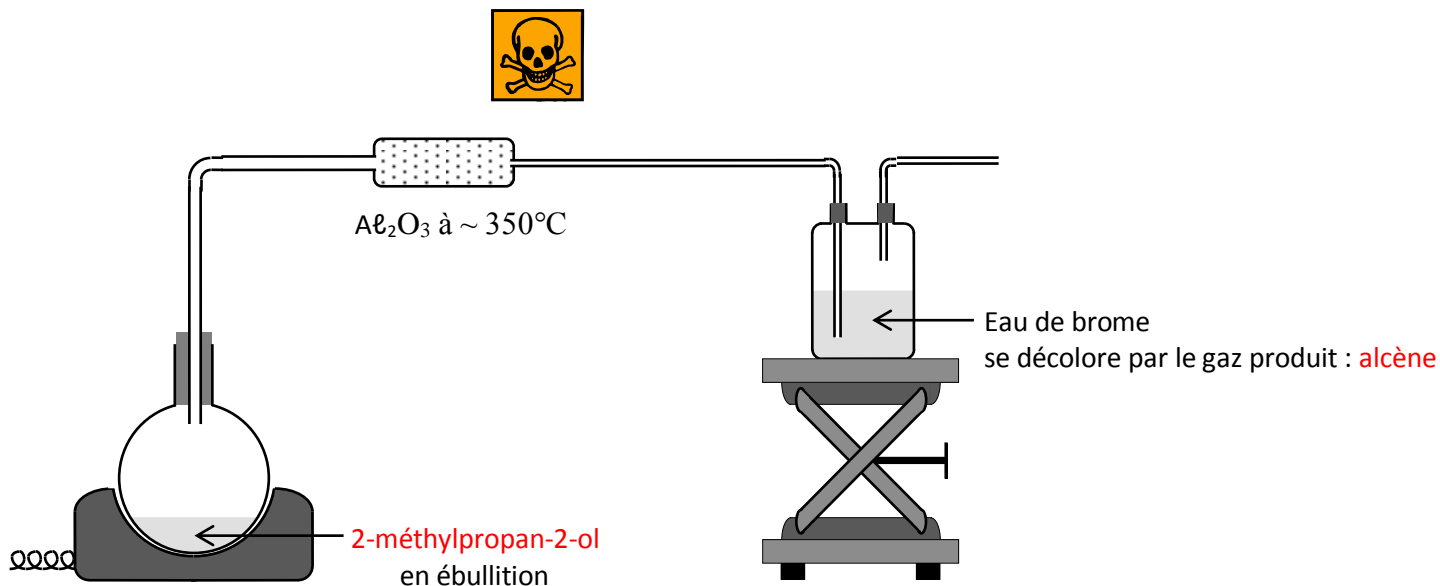
#### c) Généralisation

- \* Les **éthers** constituent la famille de formule générale  $\text{R}_1-\text{O}-\text{R}_2$
- \* Les alcools peuvent subir la déshydratation intermoléculaire, pour donner de l'eau et un éther :  
 $\text{R}-\text{OH} + \text{OH}-\text{R} \longrightarrow \text{R}-\text{O}-\text{R} + \text{H}_2\text{O}$ .
- \* Les alcools primaires sont plus faciles à subir cette réaction que les alcools secondaires, lesquels la subissent plus facilement que les alcools tertiaires.

## 2) Déshydratation intramoléculaire

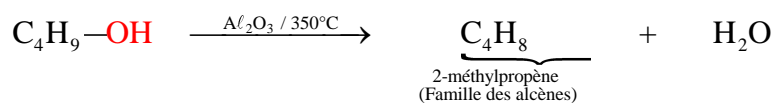
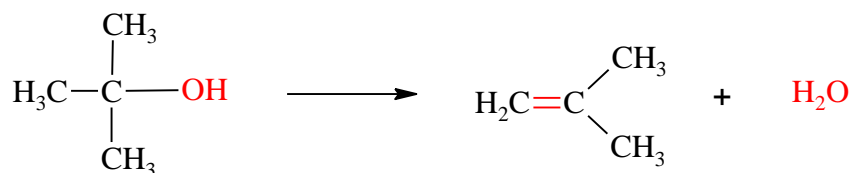
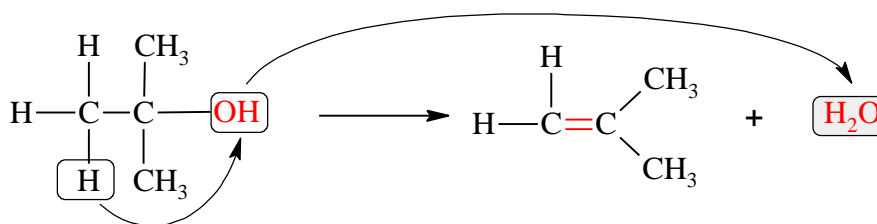
### a) Expérience (Fig-5)

Figure-5



### b) Interprétation

Le gaz dégagé est le 2-méthylpropène, formé selon l'équation :



$\text{H}_2\text{O}$  est éliminé d'une même molécule d'alcool : déshydratation intramoléculaire.

### c) Généralisation

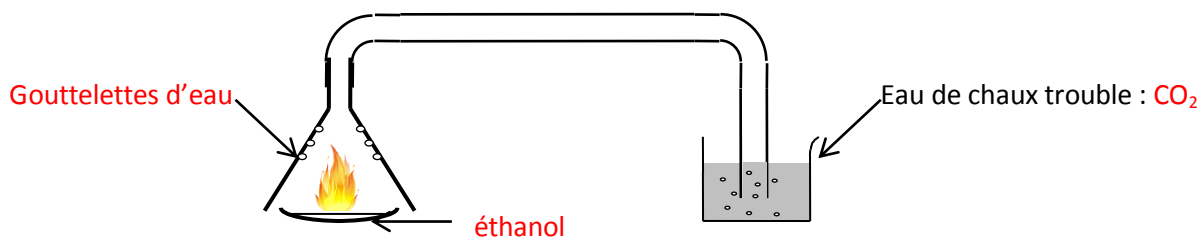
- \* Les alcools peuvent subir la déshydratation intramoléculaire, pour donner de l'eau et un alcène (qui décolore l'eau de brome) :  $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}-\text{OH} \longrightarrow \text{C}_n\text{H}_{2n} + \text{H}_2\text{O}$ .
- \* Les alcools tertiaires sont plus faciles à subir cette réaction.

### III- L'oxydation

#### 1) Oxydation destructive

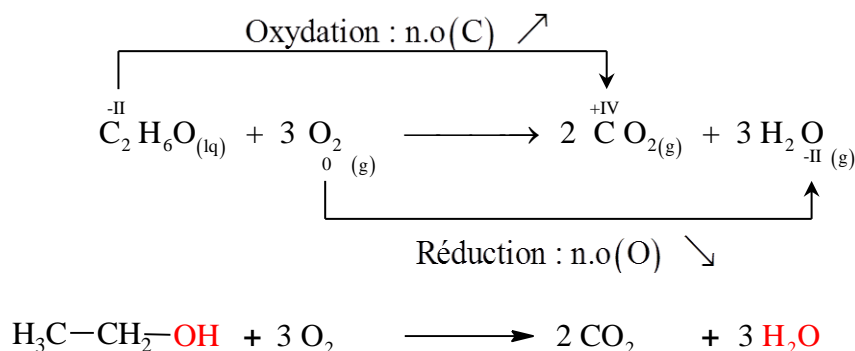
##### a) Expérience (Fig-6)

Figure-6



##### b) Interprétation

La combustion de l'éthanol est une réaction avec le dioxygène ( $O_2$ ) qui produit le ( $CO_2$ ) et la vapeur d'eau ( $H_2O$ ), selon l'équation :



C'est une réaction redox au cours de laquelle l'alcool est oxydé par l'oxygène, avec destruction de sa chaîne carbonée. La réaction est fortement exothermique, d'où l'utilisation des alcools comme carburants.

##### c) Généralisation

Les alcools de toutes les classes peuvent subir la combustion complète selon l'équation générale :



où l'alcool est oxydé avec destruction de sa chaîne carbonée.

Rq Si la combustion est incomplète, la réaction produirait du carbone (C) et éventuellement du monoxyde de carbone (CO) au lieu du dioxyde de carbone ( $CO_2$ ).

L'oxydation brutale des alcools n'est utile que pour la production de la chaleur ; dans ce qui suit, on oxydera des alcools de façon ménagée (sans détruire leur chaîne carbonée), dans le but de produire de nouveaux composés organiques.

## 2) Oxydation ménagée

Tests caractéristiques de quelques familles organiques (Fig-7)

Figure-7

R, R<sub>1</sub> et R<sub>2</sub> étant des chaînes hydrocarbonées

Famille	Formule générale	Tests caractéristiques	
Acides carboxyliques	$R-\overset{\text{O}}{\parallel}{C}-OH$	Papier pH rougit	
Aldéhydes	$R-\overset{\text{O}}{\parallel}{C}-H$	Test au réactif de <b>Schiff, positif</b> (virement au rose)	Convenable pour les aldéhydes à l'état gazeux
		Test à la liqueur de <b>Fehling, positif</b> (précipité rouge brique)	Convenables pour les aldéhydes à l'état liquide
		Test au réactif de <b>Tollens, positif</b> (formation d'un miroir d'argent)	
Cétones	$R_1-\overset{\text{O}}{\parallel}{C}-R_2$	<input checked="" type="checkbox"/> Test à la <b>DNPH, positif</b> (précipité jaune orangé) <input checked="" type="checkbox"/> L'un des tests caractéristiques d'aldéhydes, <u>négatif</u>	

Car la **DNPH** permet de mettre en évidence la présence du groupe **carbonyle**  $\overset{\text{O}}{\parallel}{C}$  présent à la fois dans les cétones et dans les aldéhydes.

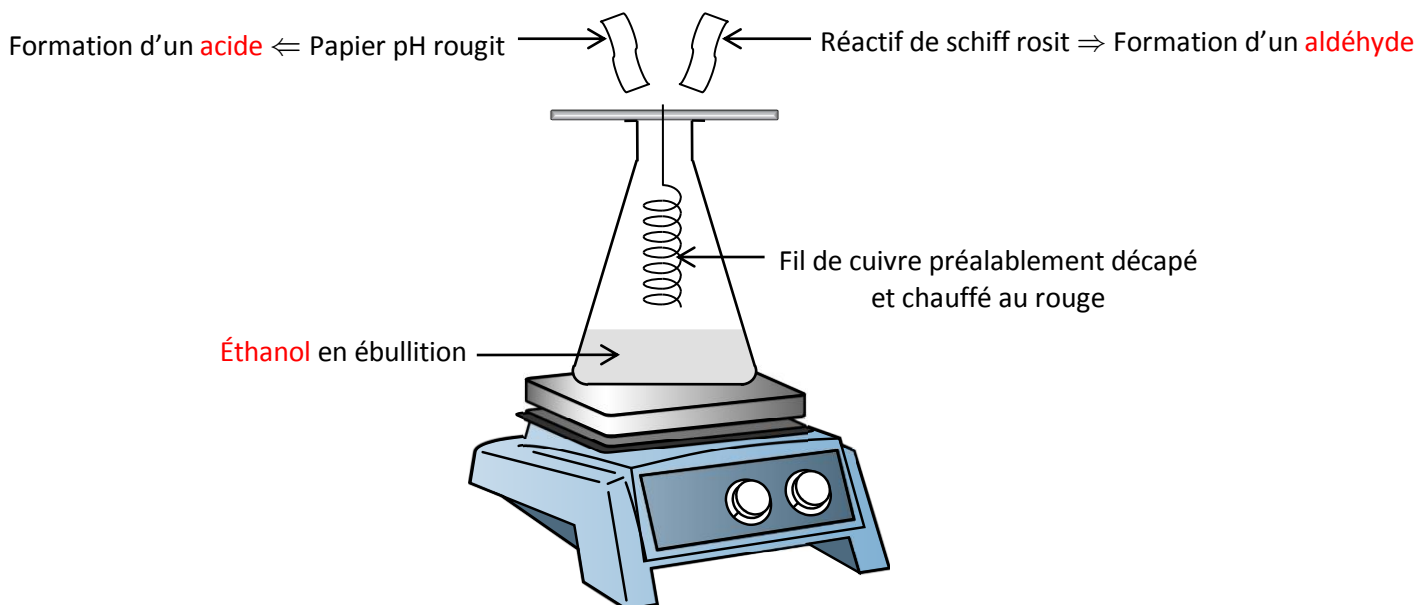
**DNPH** : 2,4-DiNitroPhénylHydrazine

### a) Cas des alcools primaires

#### i. Exemple-1 : Oxydation ménagée de l'éthanol par le dioxygène de l'air

\* Expérience (Fig-8)

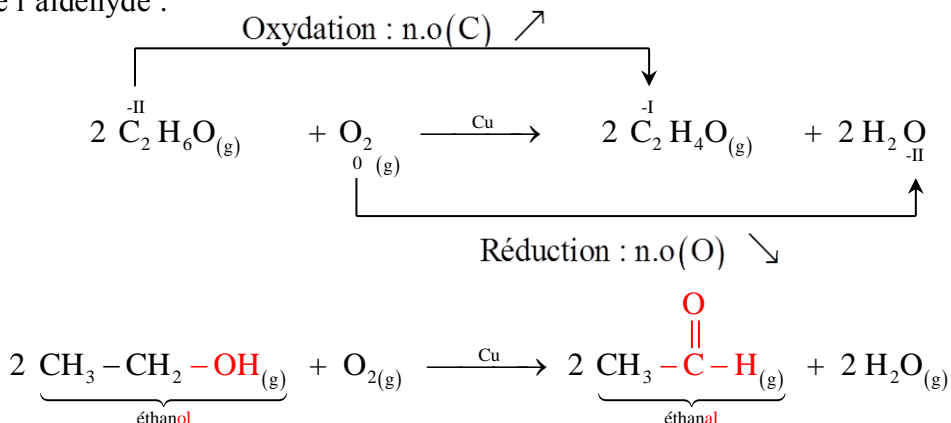
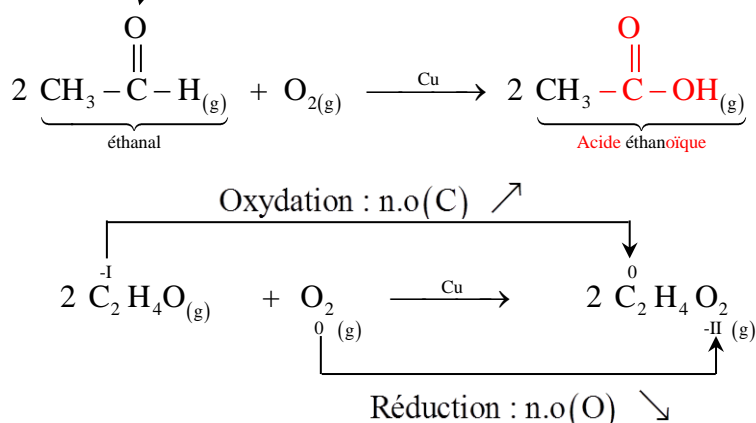
Figure-8



L'incandescence du fil de cuivre se poursuit, et une odeur de pomme se répand  
 En l'absence du cuivre, aucune transformation n'aurait lieu

\* **Interprétation**

- La persistance de l'incandescence du fil de cuivre prouve le déroulement d'une réaction exothermique entre la vapeur d'éthanol et le dioxygène de l'air, où le cuivre joue le rôle de catalyseur.
- Les produits de la réaction sont l'éthanal (aldéhyde ayant l'odeur de pomme), et l'acide éthanoïque (acide carboxylique) ; formés successivement selon les équations :

 ➤ 1<sup>ère</sup> étape; formation de l'aldéhyde :

 ➤ 2<sup>ème</sup> étape; formation de l'acide carboxylique :


C'est une réaction redox au cours de laquelle l'alcool est oxydé par l'oxygène en deux étapes se déroulant simultanément : l'éthanal produit par l'oxydation de l'éthanol est à son tour oxydé en acide éthanoïque sans, toutefois, détruire sa chaîne carbonée.

 ii. **Exemple-2 : Oxydation ménagée du butan-1-ol par le permanganate de potassium**

 \* **Expérience-1 : KMnO<sub>4</sub> en défaut (Fig-9)**
**Figure-9**

(2 mL) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (6 mol.L<sup>-1</sup>), puis  
 (1 mL) KMnO<sub>4</sub> (0,05 mol.L<sup>-1</sup>)

(1 mL) butan-1-ol

Agitation

Disparition de la couleur violette de KMnO<sub>4</sub>

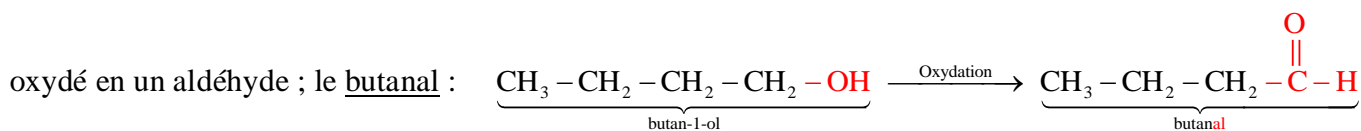
Test à la liqueur de Fehling → Précipité rouge brique

Test au réactif de Tollens → Miroir d'argent

Aldéhyde

\* Interprétation

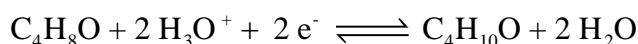
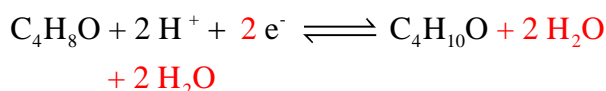
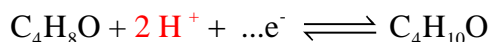
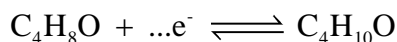
- Tous les ions  $\text{MnO}_4^-$  violets sont réduits en ions  $\text{Mn}^{2+}$  incolores, par le butan-1-ol qui vient alors d'être



sans, toutefois, détruire sa chaîne carbonée.

Le couple redox correspondant est butanal / butan-1-ol :  $\text{C}_4\text{H}_8\text{O} / \text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$

Son équation formelle associée est :



D'où la demi-équation d'oxydation :  $(\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O} + 2 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{C}_4\text{H}_8\text{O} + 2 \text{H}_3\text{O}^+ + 2 e^-) \times 5$

- La demi-équation de réduction étant :  $(\text{MnO}_4^- + 8 \text{H}_3\text{O}^+ + 5 e^- \longrightarrow \text{Mn}^{2+} + 12 \text{H}_2\text{O}) \times 2$

Alors l'équation bilan de la réaction est :

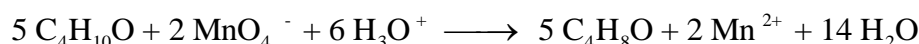
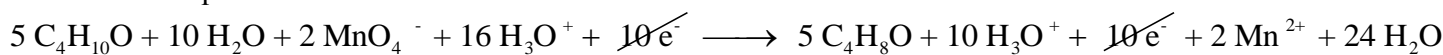

 \* Expérience-2 :  $\text{KMnO}_4$  en excès (Fig-10)

Figure-10

(10 mL)  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (6 mol.L<sup>-1</sup>), puis  
(10 mL)  $\text{KMnO}_4$  (0,05 mol.L<sup>-1</sup>)

(1 mL) butan-1-ol

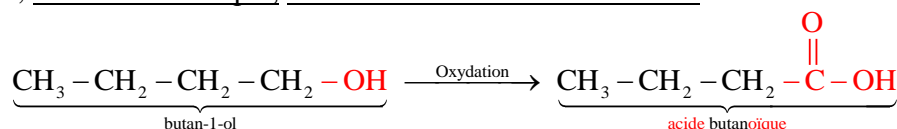
Agitation

Papier pH rougit  $\Rightarrow$  Formation d'un acide

Persistance de la couleur violette de  $\text{KMnO}_4$

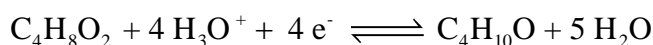
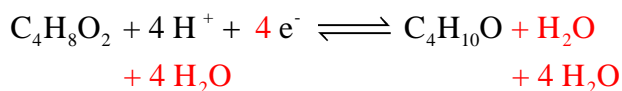
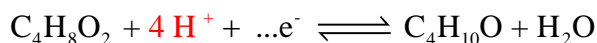
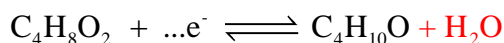
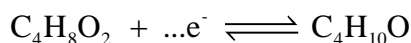
 \* Interprétation

- Les ions  $\text{MnO}_4^-$  sont réduits partiellement en ions  $\text{Mn}^{2+}$ , par le butan-1-ol qui vient d'être oxydé en acide carboxylique; l'acide butanoïque, sans détruire sa chaîne carbonée :



Le couple redox correspondant est acide butanoïque / butan-1-ol :  $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2 / \text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$

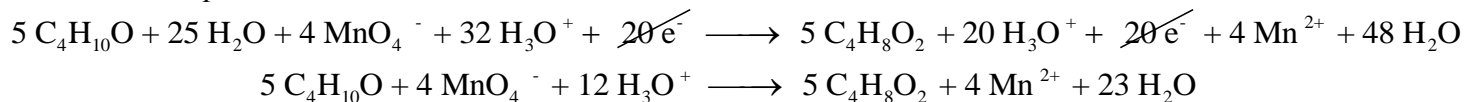
Son équation formelle associée est :



D'où la demi-équation d'oxydation :  $(C_4H_{10}O + 5 H_2O \longrightarrow C_4H_8O_2 + 4 H_3O^+ + 4 e^-) \times 5$

- La demi-équation de réduction étant :  $(MnO_4^- + 8 H_3O^+ + 5 e^- \longrightarrow Mn^{2+} + 12 H_2O) \times 4$

Alors l'équation bilan de la réaction est :

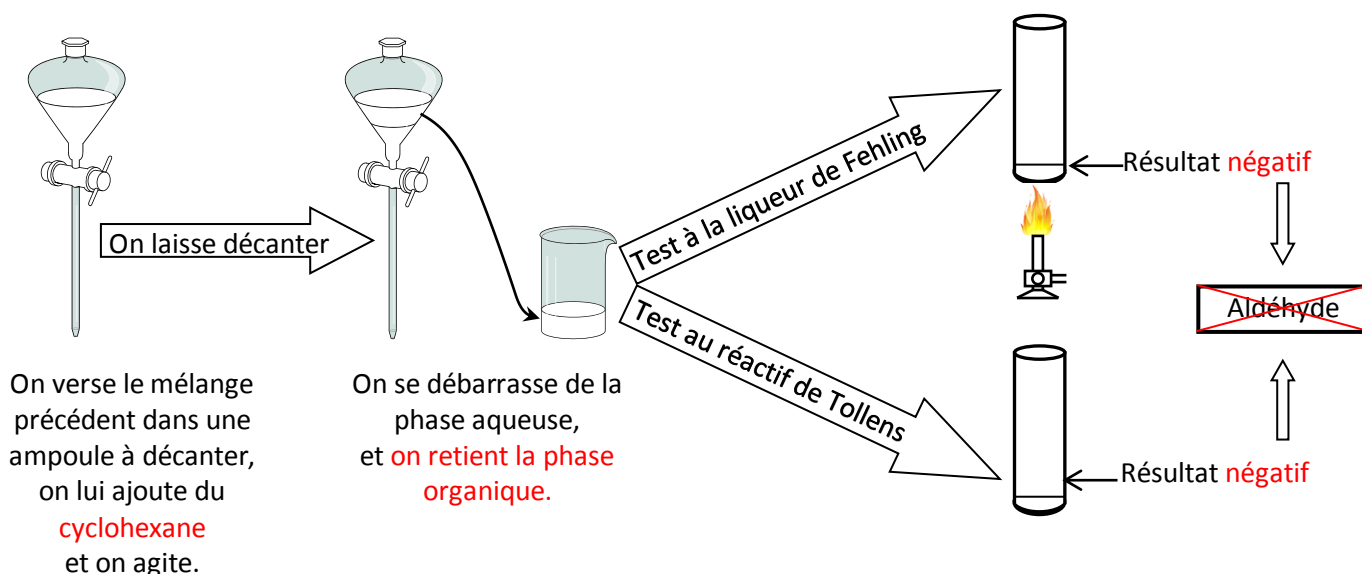


Rq L'alcool (butan-1-ol) est d'abord oxydé en aldéhyde (butanal) comme lors de l'expérience-1, mais vu que l'oxydant  $MnO_4^-$  est en excès, il pousse l'oxydation jusqu'à ce que toute la quantité d'aldéhyde formée soit à son tour oxydée en acide carboxylique (acide butanoïque).

Ainsi dans le mélange réactionnel final il n'y a pas d'aldéhyde, comme le montre l'expérience de la Fig-11.

Figure-11

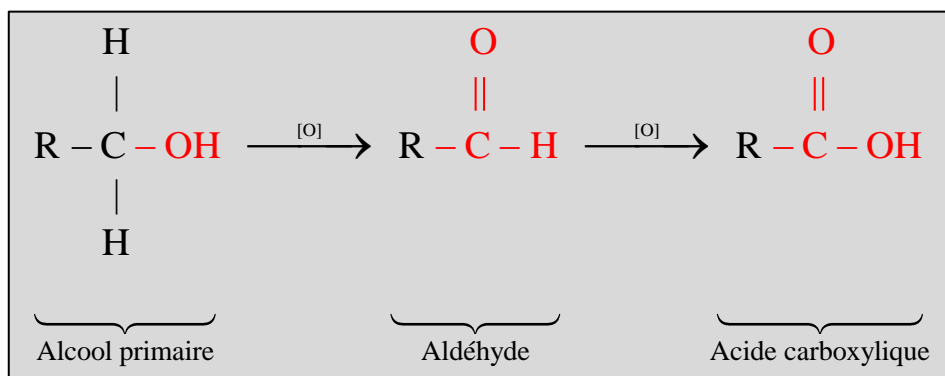
Pour pouvoir faire les tests d'aldéhyde; il faut commencer par **extraire les composés organiques présents dans le mélange réactionnel obtenu, en les dissolvant dans le cyclohexane ( $C_6H_{12}$ )**





### iii. Généralisation

L'oxydation ménagée d'un alcool primaire conduit dans une première étape à un aldéhyde, qui est éventuellement oxydé en acide carboxylique dans une seconde étape. Si l'oxydant est en excès tout l'aldéhyde formé est oxydé en acide carboxylique.



[O] désigne un oxydant tel que  $\text{O}_2$ ,  $\text{MnO}_4^-$  ...

### b) Cas des alcools secondaires

#### i. Expérience : Oxydation ménagée du butan-2-ol par le permanganate de potassium (Fig-12)

Figure-12

(10 mL)  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (6 mol.L<sup>-1</sup>), puis  
(10 mL)  $\text{KMnO}_4$  (0,05 mol.L<sup>-1</sup>)

(1 mL) butan-2-ol

Persistance de la couleur violette de  $\text{KMnO}_4$

On laisse décanter

On verse le mélange réactionnel dans une ampoule à décanter, on lui ajoute du cyclohexane pour dissoudre les produits de la réaction, et on agite.

On se débarrasse de la phase aqueuse, et on retient la phase organique.

Test à la liqueur de Fehling

Résultat négatif

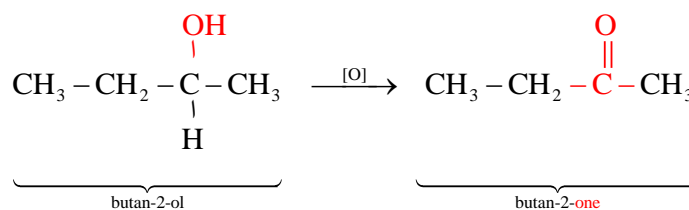
Test à la DNPH

Précipité jaune orangé

Cétone

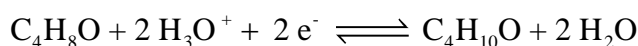
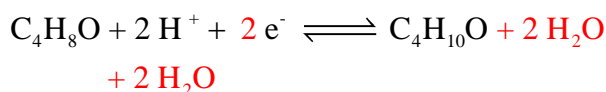
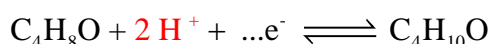
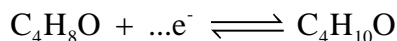
**ii. Interprétation**

- Les ions  $\text{MnO}_4^-$  sont réduits partiellement en ions  $\text{Mn}^{2+}$ , par le butan-2-ol qui vient d'être oxydé en une cétone; la butan-2-one, sans détruire sa chaîne carbonée :



Le couple redox correspondant est butan-2-one / butan-2-ol :  $\text{C}_4\text{H}_8\text{O} / \text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$

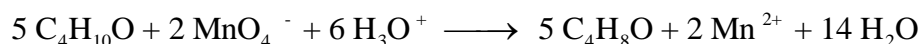
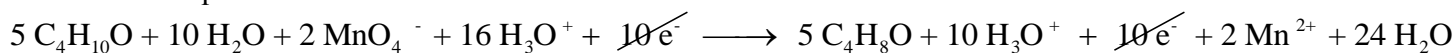
Son équation formelle associée est :



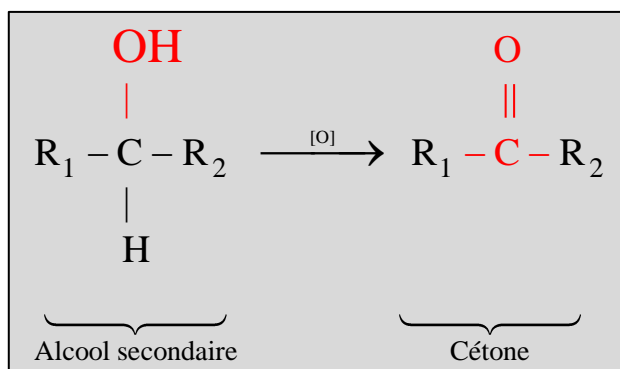
D'où la demi-équation d'oxydation :  $(\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O} + 2 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{C}_4\text{H}_8\text{O} + 2 \text{H}_3\text{O}^+ + 2 e^-) \times 5$

- La demi-équation de réduction étant :  $(\text{MnO}_4^- + 8 \text{H}_3\text{O}^+ + 5 e^- \longrightarrow \text{Mn}^{2+} + 12 \text{H}_2\text{O}) \times 2$

Alors l'équation bilan de la réaction est :

**iii. Généralisation**

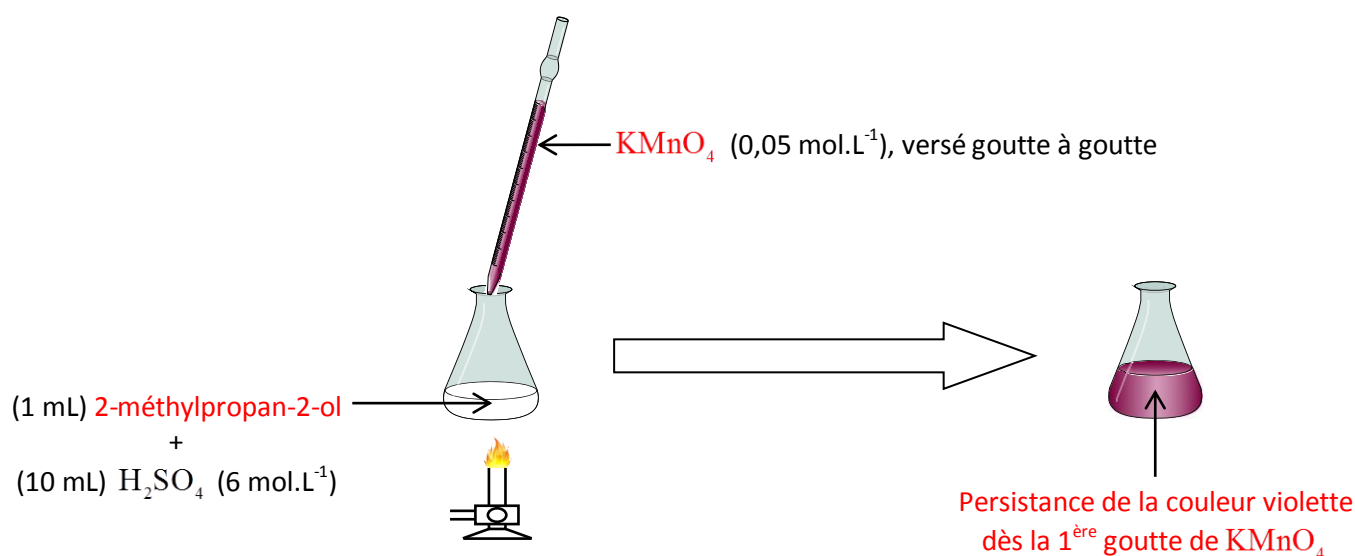
L'oxydation ménagée d'un alcool secondaire conduit directement à la cétone correspondante. (sans produire un aldéhyde)



## c) Cas des alcools tertiaires

i. Expérience : (Fig-13)

Figure-13

ii. Interprétation

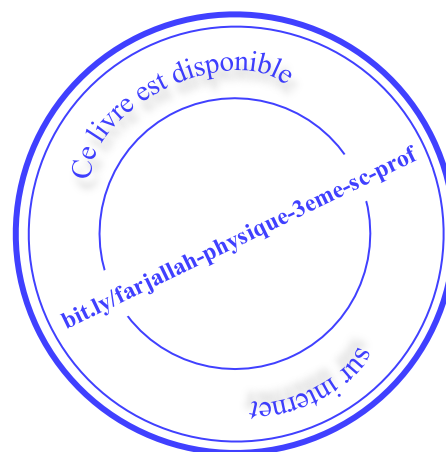
Les ions  $\text{MnO}_4^-$  n'ont pas oxydé le 2-méthylpropan-2-ol.

Des expériences similaires réalisées avec d'autres alcools tertiaires aboutissent au même résultat.

iii. Généralisation

Un alcool tertiaire ne subit pas l'oxydation ménagée

Rq selon le résultat de l'oxydation ménagée, il est possible de déduire la classe d'un alcool lorsque sa formule développée est inconnue.



**Application-3**

On considère les alcools : A : éthanol; B : propan-2-ol ; C : 2-méthylbutan-2-ol

- Donner la formule semi-développée de chaque alcool, et préciser sa classe.
- Lequel de ses alcools ne peut pas subir l'oxydation ménagée ?
- L'oxydation ménagée de l'un des deux autres alcools par une solution de permanganate de potassium en milieu acide; donne un composé (D) qui ne réagit pas avec le réactif de schiff, et qui donne un précipité jaune orangé avec la DNPH :
  - Quelle est la famille chimique du composé (D) ?
  - Identifier l'alcool qui a été utilisé, et écrire la formule semi-développée et le nom du composé (D).
- On réalise l'oxydation ménagée de l'alcool restant ;
  - Donner les formules semi-développées et les noms des produits de cette réaction.
  - Comment peut-on les identifier expérimentalement.
  - Que donnerait la réaction si l'oxydant était en excès ?

1.

A :  $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{OH}$  Primaire

B :  $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}-\text{CH}_3$  Secondaire

OH

CH<sub>3</sub>

C :  $\text{H}_3\text{C}-\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$  Tertiaire

OH

2. C

3.

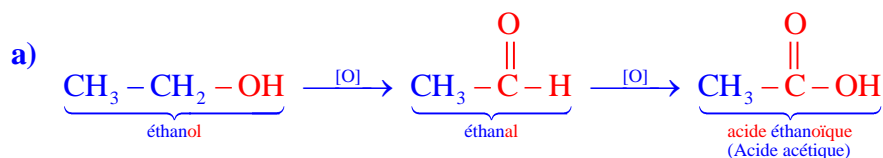
a) Cétones.

b) L'alcool utilisé est secondaire : B.

D :  $\text{H}_3\text{C}-\text{C}-\text{CH}_3$  propan-2-one

O

4. Alcool A



- b) {
- L'éthanal rosit le réactif de schiff,
  - donne un précipité rouge brique avec la liqueur de Fehling,
  - donne un miroir d'argent avec le réactif de Tollens.
  - L'acide éthanoïque rougit un papier pH.
- c) Seulement l'acide éthanoïque.

**Application-4 Métabolisme de l'alcool**

On considère que 95% de l'alcool ingéré est métabolisé essentiellement au niveau du foie. Le reste est éliminé par voie respiratoire et voie urinaire.

L'éthanol ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ), que nous appelons communément alcool, est oxydé suivant trois voies métaboliques : l'alcool déshydrogénase (ADH), le système microsomial d'oxydation de l'alcool (MEOS) et la catalase peroxisomale.

L'oxydation de l'alcool suivant la voie de l'ADH se fait avec la réaction suivante :



Cette voie [...] est responsable de nombreuses *anomalies métaboliques* telles que l'hyperlactacidémie, l'acidose, l'hyperuricémie, la cétonémie et l'hypoglycémie. [...].

L'acétaldéhyde produit par l'oxydation de l'éthanol inhibe la réparation des nucléoprotéines alkylées, réduit la consommation d'oxygène des mitochondries altérées par une consommation prolongée d'alcool et induit la peroxydation lipidique à l'origine des radicaux libres.

[bit.ly/métabolisme-alcool](http://bit.ly/métabolisme-alcool) 

1. Quel est l'alcool contenu dans les boissons alcooliques ; écrire sa formule semi-développée, et donner sa classe. Dans quel organe est-il métabolisé ?
2. On s'intéresse à la voie métabolique ADH :  
ADH est une enzyme qui catalyse la transformation chimique que subit l'alcool dans le foie, la transformation elle-même est due à une coenzyme notée  $\text{NAD}^+$  (Nicotinamide Adénine Dinucléotide);
  - a) Est-ce que la chaîne carbonée de l'alcool est préservée lors de cette transformation ; donner alors le nom de cette transformation, le nom du produit issu de l'alcool, ainsi que la famille à laquelle il appartient.
  - b) Donner les couples redox mis en jeu.
  - c) L'auteur désigne par "acétaldéhyde" le produit de la transformation subie par l'alcool : expliquer.
  - d) Est-ce que la transformation de l'alcool est poussée jusqu'au bout ; sinon qu'est-ce qu'elle produirait en plus de l'acétaldéhyde ?
3. Parmi les dommages du métabolisme de l'alcool pour l'organisme ; citer ceux qui vous sont familiers.

1.  
éthanol,  $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{OH}$ , primaire, métabolisé dans le foie
2.
  - a) La chaîne carbonée de l'alcool est préservée : oxydation ménagée, qui donne de l'éthanol un aldéhyde ; l'éthanal.
  - b)  $\text{CH}_3\text{COH} / \text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} \ \& \ \text{NAD}^+ / \text{NADH}$
  - c) Acétaldéhyde, est un autre nom de l'éthanal (nom usuel)
  - d) L'oxydation ménagée de l'éthanol n'est pas poussée jusqu'au bout, car il reste une 2<sup>ème</sup> étape où elle produirait l'acide éthanoïque (acétique).
3. Anomalies métaboliques, hypoglycémie, réduction de la consommation d'oxygène des mitochondries.

**Application-5 Principe de l'éthylotest**

L'éthylotest chimique permet de contrôler le taux d'alcool contenu dans l'air expiré d'un automobiliste.

Il est constitué d'un ballon en plastique de volume 1,0 L muni d'un embout transparent rempli d'un gel contenant des ions dichromate ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ) orange.


L'automobiliste souffle dans le ballon afin de le remplir totalement, celui-ci est ensuite adapté sur l'embout. Le ballon est entièrement vidé, l'air expiré par l'automobiliste passe ainsi par le gel contenant les ions dichromate. L'éthanol contenu dans l'air expiré est oxydé par les ions dichromate ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ), orange, pour former entre autre des ions chrome ( $\text{Cr}^{3+}$ ), vert.

L'équation de la réaction se produisant entre les ions dichromate et l'éthanol en milieu acide (les ions «  $\text{H}^+$  » sont en excès) est :  $3 \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 2 \text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 16 \text{H}^+ \rightarrow 3 \text{CH}_3\text{COOH} + 4 \text{Cr}^{3+} + 11 \text{H}_2\text{O}$ .

1. Écrire la formule développée de l'éthanol. Entourer le groupe caractéristique.
2. Donner les noms des molécules formées au cours de cette réaction.
3. Les deux couples redox mises en jeu lors de cette réaction sont :  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} / \text{Cr}^{3+}$  et  $\text{CH}_3\text{COOH} / \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 
  - 3.1. Les ions dichromate jouent-ils le rôle d'oxydant ou de réducteur dans cette réaction ? Proposer une explication.
  - 3.2. Au cours de la réaction, l'éthanol subit-il une oxydation ou une réduction ? Proposer une explication.
4. En France, la concentration massique d'éthanol dans le sang d'un automobiliste doit être inférieure à la valeur limite  $C_{\text{max}} = 0,50 \text{ g.L}^{-1}$ . La masse d'éthanol contenue dans un litre de sang est deux mille fois supérieure à celle contenue dans un litre d'air expiré.
 

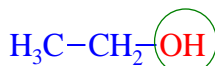
On considère un automobiliste ayant une concentration massique de  $4,0 \times 10^{-4} \text{ g.L}^{-1}$  d'éthanol dans l'air qu'il expire.

  - 4.1. Quelle est la concentration massique d'éthanol dans le sang de cet automobiliste ?
  - 4.2. Est-il en infraction ? Proposer une explication.
5. Le tube de l'éthylotest est conçu de telle façon que, pour une personne ayant un taux d'éthanol supérieur à la valeur maximale, les ions dichromate disparaissent totalement. Quelle est la couleur finale dans le tube lorsqu'une personne est contrôlée positive ? Proposer une explication.

Bac France – 2014 : [bit.ly/sujetdebac-fr](http://bit.ly/sujetdebac-fr) 



1.



2. L'acide éthanoïque, et l'eau.

3.

3.1. L'éthanol est la forme réduite du couple redox  $\text{CH}_3\text{COOH} / \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  ; il est transformé en acide éthanoïque (forme oxydée du couple) par les ions dichromate, qui jouent alors le rôle d'oxydant.

3.2. L'éthanol subit une oxydation, car il donne lieu à la forme oxydée ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) du couple.

4.

4.1.  $C = 2000 \cdot 4 \cdot 10^{-4} = 0,8 \text{ g.L}^{-1}$

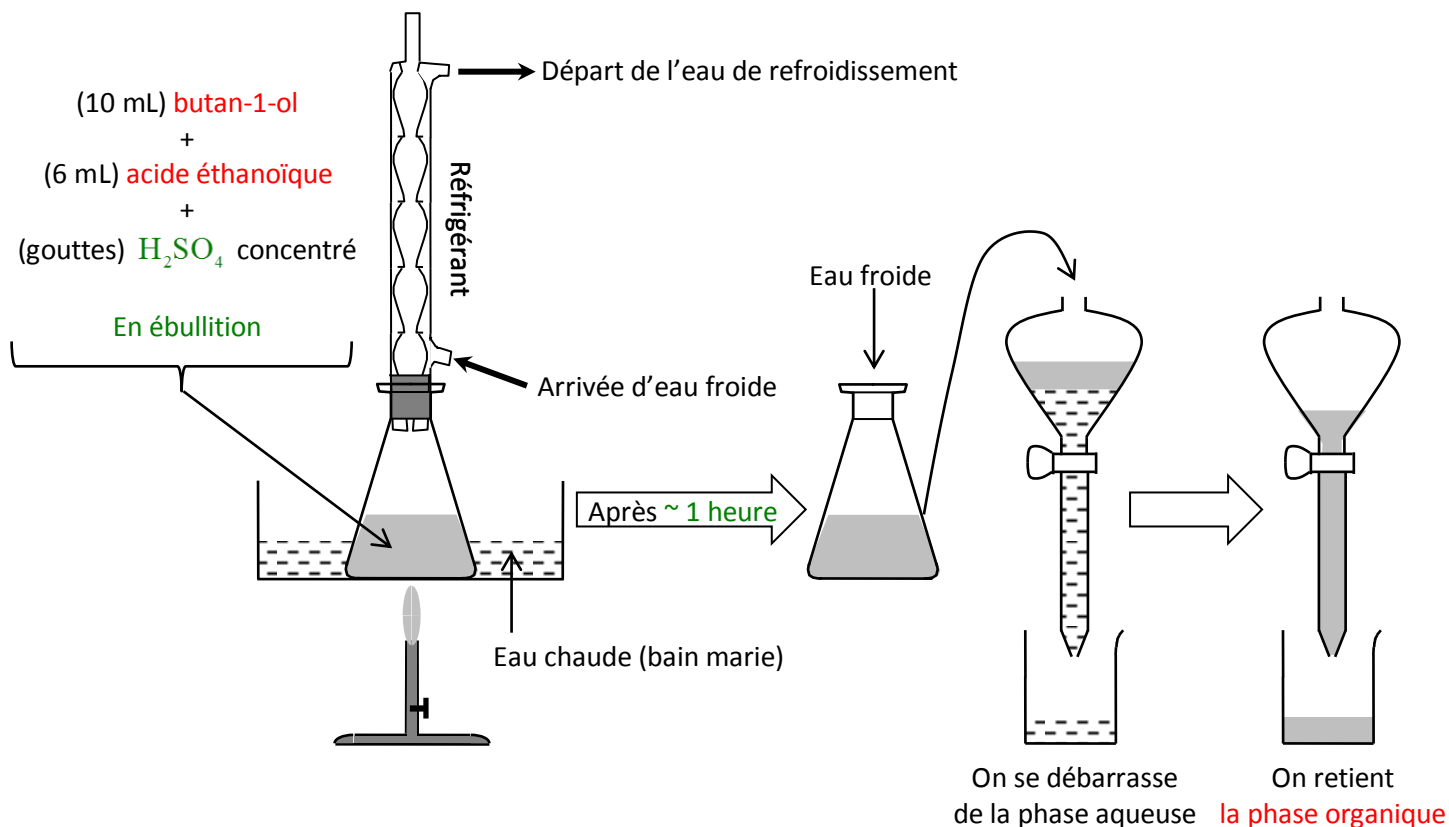
4.2.  $C > C_{\text{max}}$  : le conducteur est en infraction

5. Lorsqu'une personne est contrôlée positive ; la quantité d'éthanol dans 1 L d'air qu'elle expire est suffisante pour réduire toute la quantité d'ions  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  (orange) présente dans le tube de l'éthylotest, en ions  $\text{Cr}^{3+}$  (vert) : la couleur finale dans le tube serait verte.

## IV- Réaction avec l'acide éthanoïque

### 1) Expérience (Fig-14)

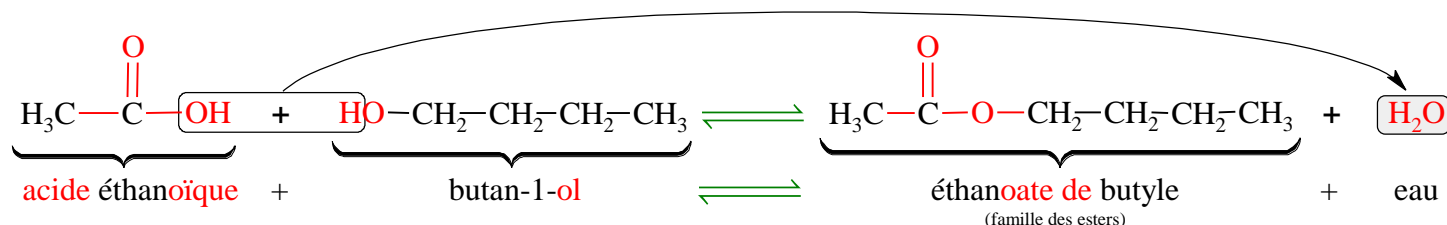
Figure-14



- Le rôle du réfrigérant est d'empêcher l'échappement du mélange réactionnel par vaporisation.
- La température, ainsi que le  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , étant nécessaires pour accélérer la réaction afin qu'elle atteigne l'état final dans une durée raisonnable (1 heure au lieu d'un mois en leur absence), sans toutefois changer son état final.
- Le  $\text{H}_2\text{SO}_4$  est un catalyseur pour cette réaction : Un catalyseur est une entité chimique qui, même en faibles proportions, accélère une réaction possible spontanément en son absence, sans être consommé par cette réaction.
- La phase organique contient le produit principal de la réaction : un composé peu soluble dans l'eau, à l'odeur de banane.

### 2) Interprétation

Le composé à l'odeur de banane obtenu est l'éthanoate de butyle, formé selon l'équation :

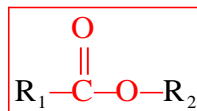


- Une étude approfondie a montré que, contrairement à ce qui est attendu, l'acide participe à la formation de la molécule d'eau par son groupe ( $-\text{OH}$ ), et non par un proton  $\text{H}^+$ .
- L'analyse du mélange réactionnel à la fin de la réaction, montre que la réaction atteint son état final sans épuiser aucun de ses réactifs : elle est limitée par la réaction inverse (hydrolyse), c'est pour cela qu'on la représente par une double flèche ( $\rightleftharpoons$ )

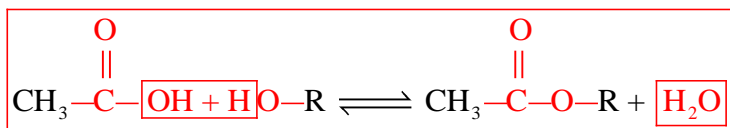


### 3) Généralisation

\* Les **esters** constituent la famille de formule générale



\* Les alcools peuvent réagir avec l'acide éthanoïque, pour donner de l'eau et un ester (estérification):



- \* La réaction est lente, et limitée par la réaction d'hydrolyse de l'ester formé.
- \* La réaction d'hydrolyse est aussi lente et limitée (par l'estérification) ; et peut être aussi accéléré par la température et le même catalyseur H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

### Récapitulation

#### Réactivité chimique des alcools

Réactions communes aux trois classes		
Réaction avec un hydracide halogéné		$\text{R}-\text{OH} + \text{HX} \longrightarrow \underbrace{\text{R}-\text{X}}_{\text{Halogénure d'alkyle}} + \text{H}_2\text{O}$
Déshydratation	Intermoléculaire	$\text{R}-\text{OH} + \text{OH}-\text{R} \longrightarrow \underbrace{\text{R}-\text{O}-\text{R}}_{\text{Ether}} + \text{H}_2\text{O}$
	Intramoléculaire	$\text{C}_n\text{H}_{2n+1}-\text{OH} \longrightarrow \underbrace{\text{C}_n\text{H}_{2n}}_{\text{Alcène}} + \text{H}_2\text{O}$
Réaction avec l'acide éthanoïque		$\text{CH}_3-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{OH} + \text{HO}-\text{R} \rightleftharpoons \underbrace{\text{CH}_3-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{O}-\text{R}}_{\text{Ester (éthanoate d'alkyle)}} + \text{H}_2\text{O}$
Destructive	Combustion	$\text{C}_n\text{H}_{2n+2}\text{O} + \frac{3n}{2} \text{O}_2 \longrightarrow n \text{CO}_2 + (n+1) \text{H}_2\text{O}$
Réaction distinctive des trois classes		
Oxydation	Ménagée	$\begin{array}{c} \text{H} \\   \\ \text{R}-\text{C}-\text{OH} \\   \end{array} \xrightarrow{[\text{O}]} \underbrace{\begin{array}{c} \text{O} \\    \\ \text{R}-\text{C}-\text{H} \end{array}}_{\text{Aldéhyde}} \xrightarrow{[\text{O}]} \underbrace{\begin{array}{c} \text{O} \\    \\ \text{R}-\text{C}-\text{OH} \end{array}}_{\text{Acide carboxylique}}$
	Alcool secondaire	$\begin{array}{c} \text{OH} \\   \\ \text{R}_1-\text{C}-\text{R}_2 \\   \\ \text{H} \end{array} \xrightarrow{[\text{O}]} \underbrace{\begin{array}{c} \text{O} \\    \\ \text{R}_1-\text{C}-\text{R}_2 \end{array}}_{\text{Cétone}}$
	Alcool Tertiaire	Rien

**Application-6**

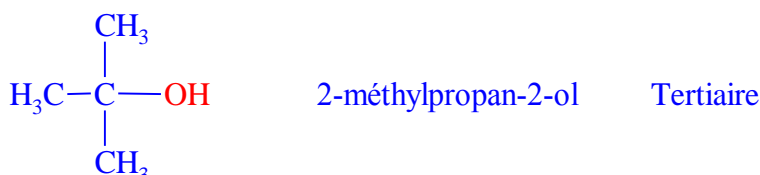
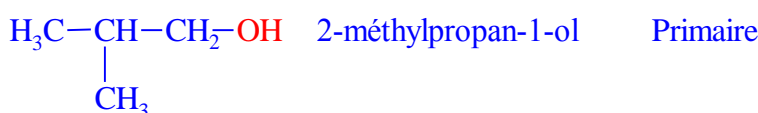
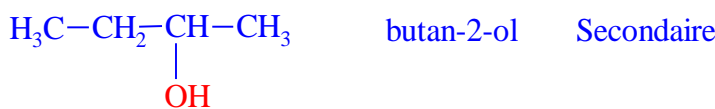
On s'intéresse aux **monoalcools aliphatiques saturés**, de même masse molaire  $M = 74 \text{ g.mol}^{-1}$ .

- Déterminer leur formule brute. On donne  $H = 1$ ,  $C = 12$  et  $O = 16$ .
- Ecrire les formules semi-développées possibles correspondant à cette formule; donner la classe et le nom de chaque alcool.
- L'un de ces alcools résiste à l'oxydation ménagée :
  - Identifier cet alcool.
  - Donner la formule semi-développée du produit de sa déshydratation intramoléculaire.
- Soient A, B et C les alcools restants ; ils subissent tous l'oxydation ménagée par le permanganate de potassium ( $\text{KMnO}_4$ ) en milieu acide, et donnent des produits  $A_1$ ,  $B_1$  et  $C_1$  respectivement :
  - \* Le test à la DNPH est positif pour les trois produits (précipité jaune orangé)
  - \* Le test au réactif de schiff est positif pour  $A_1$  et  $C_1$  (coloration rose), et négatif pour  $B_1$
  - A quelle famille appartient  $B_1$  ; identifier l'alcool B, et déduire la formule semi-développée et le nom du produit  $B_1$ .
  - Donner la formule semi-développée du produit de la réaction de l'alcool B avec l'acide chlorhydrique.
  - A quelle famille appartiennent  $A_1$  et  $C_1$  ; identifier les alcools A et C sachant que la chaîne carbonée est linéaire pour l'alcool A, et ramifiée pour l'alcool C.
  - En déduire les formules semi-développées et les noms des produits  $A_1$  et  $C_1$ .
- L'oxydation ménagée par un excès de permanganate de potassium en milieu acide, de l'alcool A donne un produit  $A_2$  qui rougit un papier pH :
  - Donner la formule semi-développée et le nom du produit  $A_2$ .
  - Ecrire la formule semi-développée du produit de la déshydratation intermoléculaire de l'alcool A.
- On prépare un mélange d'alcool C, d'acide éthanoïque et quelques gouttes d'acide sulfurique concentré ; on le porte à ébullition pendant 1 heure : il se forme un produit  $C_2$ .
  - Ecrire l'équation de la réaction, à quelle famille appartient le produit  $C_2$ .
  - Comment est appelée cette réaction, quelles sont ses propriétés ?

$$1. \quad M(\text{C}_n\text{H}_{2n+2}\text{O}) = 74 \text{ g.mol}^{-1} \Rightarrow 12n + 2n + 2 + 16 = 74 \Leftrightarrow 14n = 74 - 18 = 56 \Leftrightarrow n = \frac{56}{14} = 4$$

D'où la formule brute :  $\boxed{\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}}$

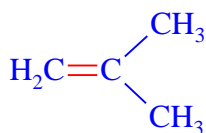
2.



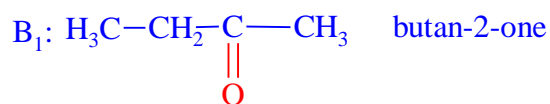
3.

a) C'est l'alcool tertiaire : 2-méthylpropan-2-ol.

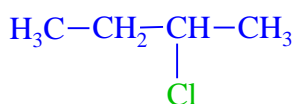
b)



4.

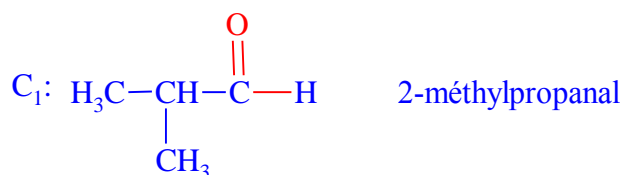
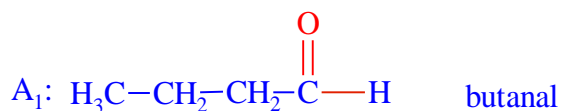
a) B<sub>1</sub> est une cétone ; elle provient de l'alcool secondaire ⇒ B : butan-2-ol ⇒

b)

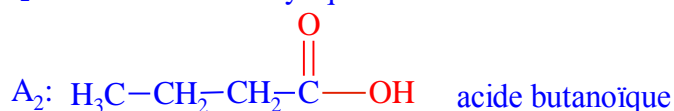
c) A<sub>1</sub> et C<sub>1</sub> sont des aldéhydes ; ils proviennent des alcools primaires

⇒ A : butan-1-ol, et C : 2-méthylpropan-1-ol

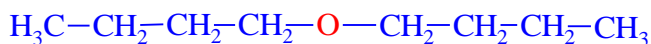
d)



5.

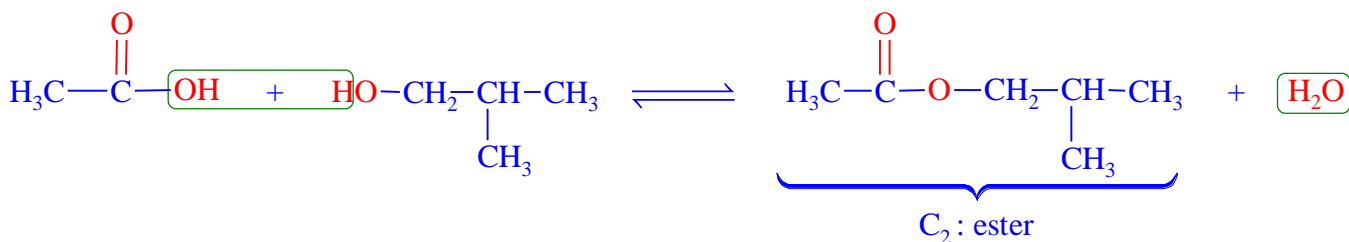
a) A<sub>2</sub> est un acide carboxylique.

b)



6.

a)



b) C'est une réaction d'estérification ; lente et limitée.

### TP 3 : Détermination expérimentale de la classe d'un alcool

#### Objectif :

- Déterminer la classe d'un alcool par recours à la réaction d'oxydation par le permanganate de potassium en milieu acide.

#### Matériel :

- |  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>3 Erlenmeyers avec bouchons (notés A, B, C au hasard) ;             <ul style="list-style-type: none"> <li>- L'un contient ~ 1 mL de butan-1-ol</li> <li>- L'un contient ~ 1 mL de butan-2-ol</li> <li>- L'un contient ~ 1 mL de 2-méthylpropan-2-ol</li> </ul> </li> <li>Solution de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (~ 1M).</li> <li>Solution de KMnO<sub>4</sub> (~ 0,1 M).</li> <li>Cyclohexane.</li> <li>Réactif de Tollens (préalablement préparé !)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>DNPH dans un compte-gouttes.</li> <li>Réactif de schiff dans un compte-gouttes.</li> <li>1 Pipette graduée, avec propipette.</li> <li>2 Pipettes de 10 mL, avec propipette</li> <li>1 Lampe à alcool.</li> <li>3 Ampoule à décanter + support.</li> <li>6 Bêchers.</li> <li>9 Tubes à essais sur support.</li> </ul> |
|--|---|

#### Manipulation :

Un échantillon de chacun des trois alcools suivants a été versé au hasard dans l'un des erlenmeyers A, B et C :  
**butan-1-ol ; butan-2-ol ; et 2-méthylpropan-2-ol.**

- Ecrire la formule semi-développée de chacun de ces alcools, et donner sa classe.

butan-1-ol :  $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$  Primaire

butan-2-ol :  $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\underset{\text{OH}}{\text{CH}}-\text{CH}_3$  Secondaire

2-méthylpropan-2-ol :  $\text{H}_3\text{C}-\underset{\text{CH}_3}{\overset{\text{CH}_3}{\text{C}}}-\text{OH}$  Tertiaire

- Donner la formule brute de chacun de ces alcools ; conclure en précisant les isomères de position et les isomères de chaîne.

$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$  ; C'est la même formule pour les 3 alcools

⇒ { - Isomères de position : butan-1-ol / butan-2-ol  
 - Isomères de chaîne : butan-2-ol / 2-méthylpropan-2-ol

3. Réaliser l'expérience suivante pour chacun des alcools A, B et C ;  
et noter le résultat positif (+) ou négatif (-), de chaque test dans le tableau ci-dessous :

The diagram illustrates the experimental procedure in several steps:

- An Erlenmeyer flask containing approximately 1 mL of alcohol is prepared.
- To this, approximately 2 mL of  $H_2SO_4$  and approximately 10 mL of  $KMnO_4$  are added.
- The mixture is heated and stirred over a Bunsen burner.
- The reaction mixture is transferred to a separating funnel.
- The mixture is allowed to settle (decantation).
- The aqueous phase is discarded into a beaker, and the organic phase is retained in another beaker.
- The organic phase is then subjected to three tests:
  - Test à la DNPH
  - Test au réactif de Schiff
  - Test au réactif de Tollens

On chauffe, et on agite

On laisse décanter

On verse le mélange réactionnel dans une ampoule à décanter, on lui ajoute ~ 10 mL de cyclohexane, et on agite vigoureusement.

On se débarrasse de la phase aqueuse dans un bécher, et on retient la phase organique dans un autre bécher.

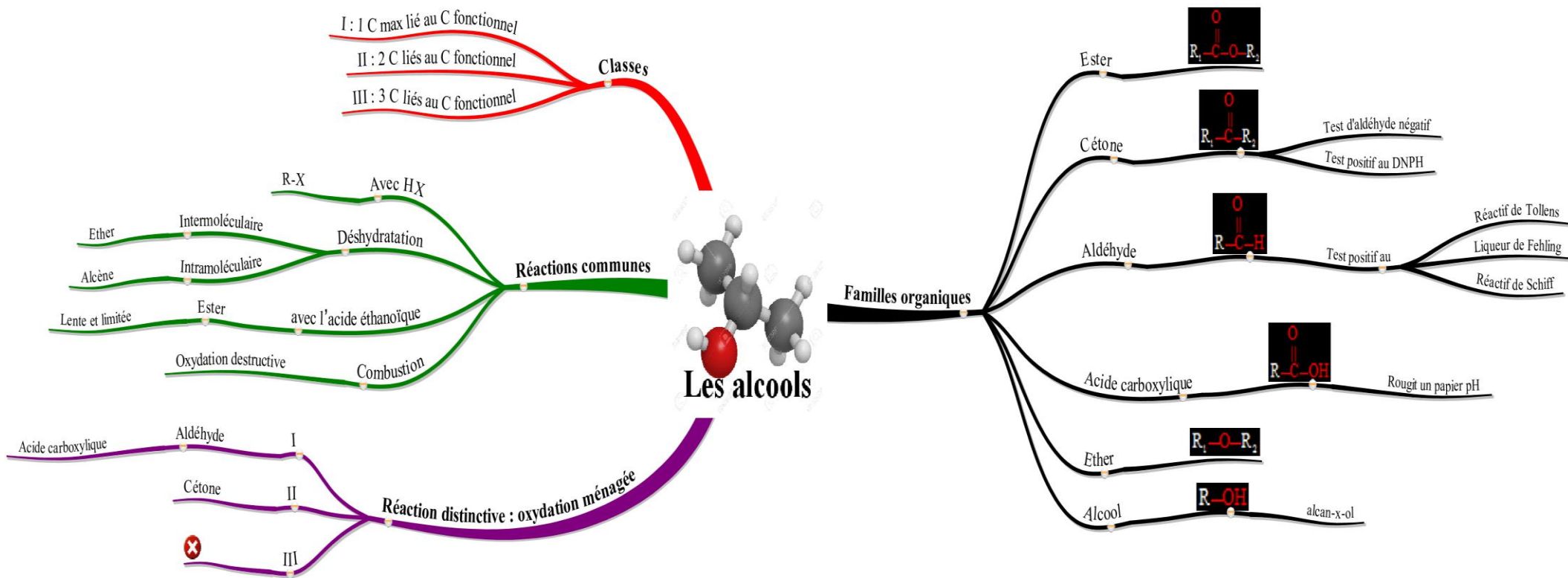
Phase organique	A'	B'	C'
Test à la DNPH	+	+	-
Test au réactif de schiff	-	+	-
Test au réactif de Tollens	-	+	-

A', B', et C' sont les phases organiques obtenues à partir des alcools A, B et C respectivement.

4. Compléter :

- L'oxydation ménagée de l'alcool contenu dans l'erenmeyer A **donne une cétone**  $\Rightarrow$  c'est un alcool **secondaire**  $\Rightarrow$  L'erenmeyer A contient le **butan-2-ol**.
- L'oxydation ménagée de l'alcool contenu dans l'erenmeyer B **donne un aldéhyde**  $\Rightarrow$  c'est un alcool **primaire**  $\Rightarrow$  L'erenmeyer B contient le **butan-1-ol**.
- L'oxydation ménagée de l'alcool contenu dans l'erenmeyer C **est impossible**  $\Rightarrow$  c'est un alcool **tertiaire**  $\Rightarrow$  L'erenmeyer C contient le **2-méthylpropan-2-ol**.

5. Rincer la verrerie utilisée, et arranger le matériel tel que vous l'avez trouvé.



## Chapitre-3 : Les acides carboxyliques aliphatiques saturés

### Objectifs

- Reconnaître et nommer un acide carboxylique.
- Reconnaître les principales propriétés chimiques d'un acide carboxylique.
- Reconnaître et nommer :
  - un ester,
  - un chlorure d'acyle,
  - un anhydride d'acide.
- Ecrire l'équation de la synthèse d'un dérivé d'acide à partir de l'acide ou à partir d'un autre dérivé.

### Prérequis

- Représentation d'un composé organique par une formule semi-développée.
- Notion d'hydrocarbure aliphatique.
- Notion de chaîne carbonée saturée, groupe alkyle.
- Nomenclature des alcanes.
- Isomérisation de chaîne.
- Estérification des alcools par l'acide éthanoïque, caractères de la réaction, notion d'ester.
- Définition d'un catalyseur.
- Tests d'identification des ions  $Fe^{2+}$  et  $Zn^{2+}$ .
- Réaction redox par voie humide ; oxydation, réduction, couples redox et comparaison de leurs pouvoirs.
- Notion d'électrolyte ; électrolyte fort, électrolyte faible.
- Acide d'Arrhenius ; action du BBT, acide fort, acide faible, action sur les métaux.

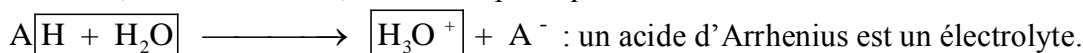
### Matériel

- |                               |                                 |
|-------------------------------|---------------------------------|
| * Modèles moléculaires        | * Acide formique dans un bécher |
| * Electrolyseur               | * Acide acétique dans un bécher |
| * Générateur                  | * Acide éthanoïque              |
| * Interrupteur                | * BBT                           |
| * Ampèremètre                 | * Limaille de fer               |
| * 4 Fils de connexion         | * Grenaille de zinc             |
| * Papier pH                   | * Solution aqueuse de soude     |
| * 5 Tubes à essai sur support | * Pissette                      |
| * 2 Spatules                  |                                 |

### Rappels

- ❖ Un électrolyte est un composé dont la solution aqueuse conduit le courant électrique nettement mieux que l'eau pure ;
  - Cette conduction électrique est due à la présence d'ions (cations et anions) provenant de la dissociation (ionisation) de l'électrolyte dans l'eau.
  - Si l'ionisation est totale, l'électrolyte est dit fort. Et si elle est partielle, il est dit faible.

- ❖ Un **acide**, selon Arrhenius, est un composé qui s'ionise dans l'eau avec formation d'ions hydronium  $H_3O^+$



- La présence des ions  $H_3O^+$ , confère à la solution d'acide une teinte **jaune** en présence de **BBT**.
- Une solution aqueuse d'acide est caractérisée par un pH ; grandeur définie par  $[H_3O^+] = 10^{-pH}$ .

- Si l'ionisation est totale, l'acide est dit fort ; et on a : 
$$\begin{cases} [H_3O^+] = C = 10^{-pH} \\ [A^-] = C \\ [AH] = 0 \end{cases},$$

Où C est la concentration molaire de la solution d'acide.



- Si l'ionisation est partielle, l'acide est dit faible ; et on a :
- $$\begin{cases} [\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}} \ll C \\ [\text{A}^-] \ll C \\ [\text{AH}] \neq 0 \end{cases},$$

Dans ce cas l'équation d'ionisation s'écrit :  $\text{AH} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{A}^-$ .

- Les ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  présents dans une solution d'acide peuvent oxyder les métaux des couples redox ayant un pouvoir oxydant inférieur à celui du couple  $\text{H}_3\text{O}^+/\text{H}_2$  (métal plus réducteur que  $\text{H}_2$ ) ; il se dégage du dihydrogène caractérisé par sa détonation en présence d'une flamme.

# 1<sup>ère</sup> partie : Propriétés moléculaires

## I- Etude d'un exemple

Soient les acides carboxyliques à 5 atomes de carbone, de la Fig-1

Figure-1

	(a)	(b)	(c)	(d)
Modèle moléculaire				
Formule brute	$C_5H_{10}O_2$	$C_5H_{10}O_2$	$C_5H_{10}O_2$	$C_5H_{10}O_2$
Formule semi-développée	$H_3C-CH_2-CH_2-CH_2-\overset{O}{\parallel}C-OH$	$H_3C-CH_2-\underset{CH_3}{\underset{ }{CH}}-\overset{O}{\parallel}C-OH$	$H_3C-\underset{CH_3}{\underset{ }{CH}}-CH_2-\overset{O}{\parallel}C-OH$	$H_3C-\underset{CH_3}{\underset{CH_3}{\underset{ }{ }{C}}}-\overset{O}{\parallel}C-OH$
Nom	acide pentanoïque	acide 2-méthylbutanoïque	acide 3-méthylbutanoïque	acide 2,2-diméthylpropanoïque

\* Ces composés sont des acides carboxyliques : ils ont tous un groupe carboxyle  $\left(\overset{O}{\parallel}C-OH\right)$  ;

pour en tenir compte, on les représente par la formule  $C_4H_9-\overset{O}{\parallel}C-OH$

ou, plus simplement, par la formule  $C_4H_9-COOH$  ou  $C_4H_9-CO_2H$ .

\* Ils ont la même formule brute  $C_5H_{10}O_2$ , mais des formules semi-développées différentes ; ce sont des isomères de chaîne.

## II- Généralisation

### 1) Définition

Un acide carboxylique est un composé organique dont la molécule comporte le groupe carboxyle  $\left(\overset{O}{\parallel}C-OH\right)$  lié à un atome d'hydrogène ou à une chaîne hydrocarbonée.

On se limitera aux acides carboxyliques pour lesquels :

- \* Il y a un seul groupe  $(-COOH)$  : monoacides.
- \* La chaîne carbonée est ouverte : aliphatiques.
- \* La chaîne carbonée ne comporte que des liaisons simples Carbone-Carbone : saturés.

La formule générale d'un tel acide est alors  $R-COOH$ , avec R est un atome H ou un groupe alkyle  $C_nH_{2n+1}$ .

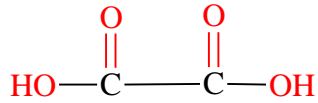
Soit  $C_nH_{2n+1}-COOH$ , avec  $n \in \mathbb{N}$ .

Pour  $n \leq 8$  les acides carboxyliques sont des liquides incolores dans les conditions ordinaires, d'odeur piquante, où ils sont miscibles à l'eau en toutes proportions pour ceux de faible masse molaire.

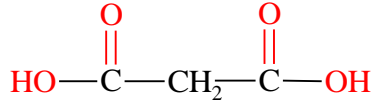
Au-delà ils sont solides.

Rq Un polyacide présente plusieurs groupes ( $-\text{COOH}$ ) :

- \* Acide oxalique (extrait de l'oseille)

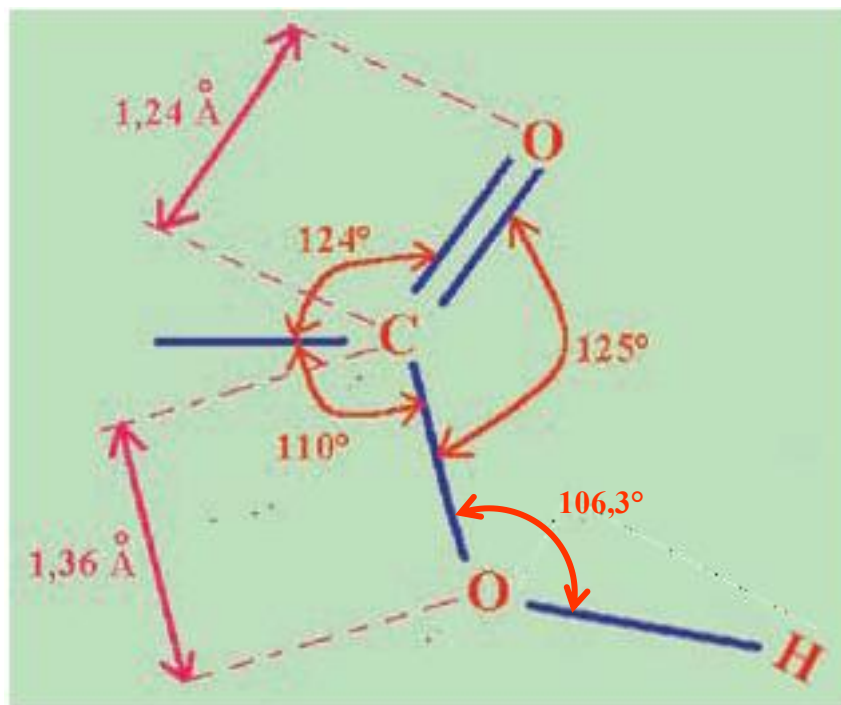


- \* Acide malonique (présent dans le suc de betterave à sucre, très demandé par l'industrie pharmaceutique)



## 2) Structure du groupe carboxyle (Fig-2)

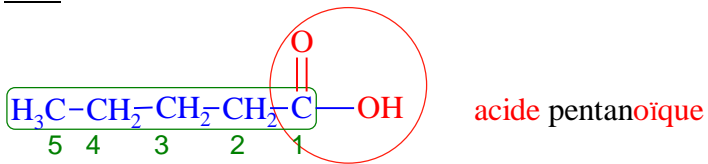
Figure-2



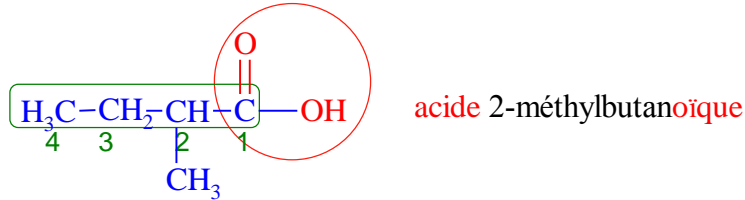
Le carbone du groupe carboxyle se trouve dans le même plan que les 3 atomes qui lui sont liés.

### 3) Nomenclature

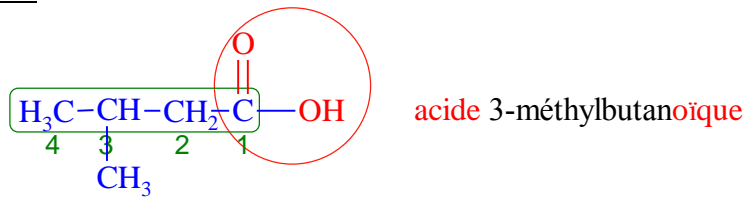
ex-1



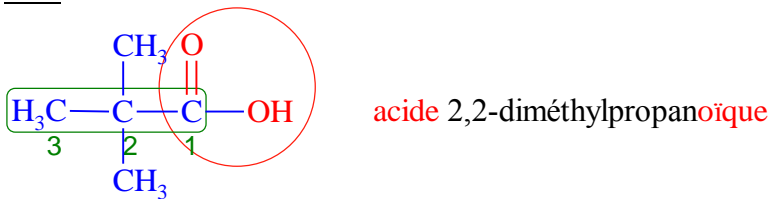
ex-2



ex-3



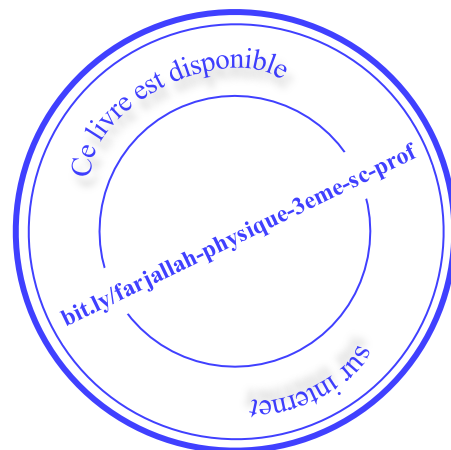
ex-4



⇒ La chaîne principale doit contenir le carbone du groupe carboxyle, à partir duquel on commence la numérotation ; le nom de l'acide s'obtient de celui de l'alcane correspondant en remplaçant le (e) final par le suffixe (oïque), et en le précédant du mot (acide).

### 4) Isomérisation

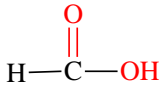
- \* Il n'y a pas d'isomérisation de position, car le carbone du groupe carboxyle est toujours à la position n°1.
- \* **Isomères de chaîne** :
  - Même formule brute.
  - Diffèrent par la chaîne carbonée.



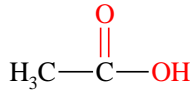
**Application-1**

1. Pour chacun des acides carboxyliques suivants, donner le nom et la formule brute :

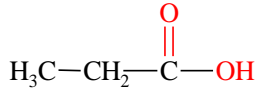
a)



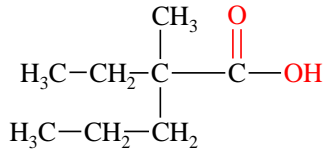
b)



c)



d)



2. Pour chacun des acides carboxyliques suivants, donner la formule semi-développée et la formule brute :

a) acide 2,2-diméthylbutanoïque.

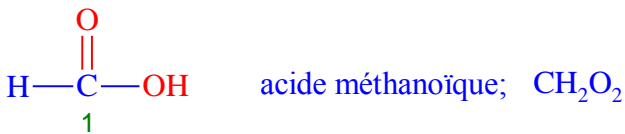
b) acide 2,2,4-triméthylpentanoïque.

3. En déduire une expression générale pour la formule brute d'un acide carboxylique aliphatique saturé.

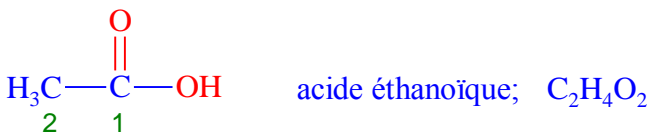
4. Lesquels parmi tous les acides précédents sont des isomères, préciser le type d'isométrie.

1.

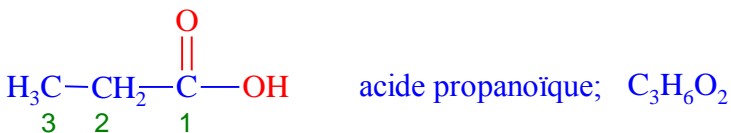
a)



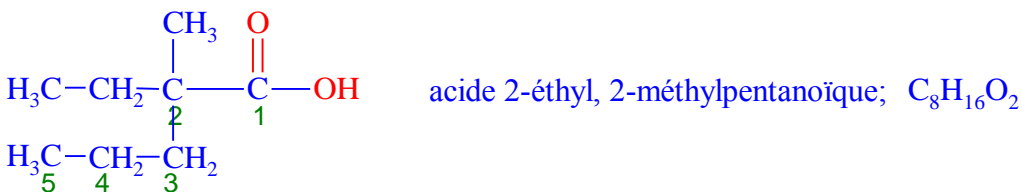
b)



c)

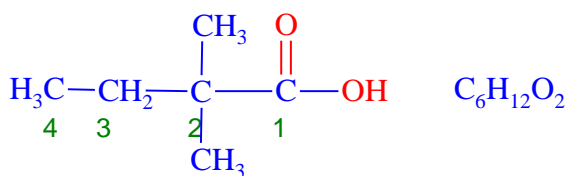


d)

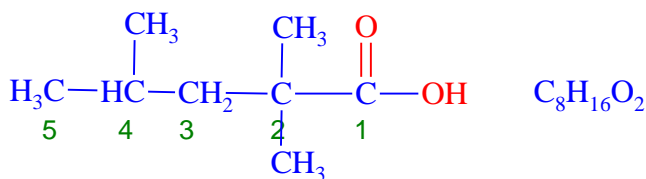


2.

a)








b)


 3.  $\text{C}_n\text{H}_{2n}\text{O}_2$ , avec  $n \in \mathbb{N}^*$ 

4. L'acide 2-éthyl, 2-méthylpentanoïque, et l'acide 2,2,4-triméthylpentanoïque : isomères de chaîne.

Rq Certains acides sont plus connus par leurs noms usuels (Fig-3)

Figure-3

Formule semi-développée	Nom IUPAC (systématique)	Nom usuel	Origine du nom usuel
$\text{H}-\text{COOH}$	acide méthanoïque	Acide <i>formique</i>	<i>Fourmis</i> 
$\text{CH}_3-\text{COOH}$	acide éthanoïque	Acide <i>acétique</i>	<i>Acetum</i> (Latin) Vinaigre 
$\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{COOH}$	acide propanoïque	Acide <i>propionique</i>	<i>Protos pion</i> (Grec) Premier gras 
$\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{COOH}$	acide butanoïque	Acide <i>butyrique</i>	<i>Butyrum</i> (Latin) Beurre 
$\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{COOH}$	acide pentanoïque	Acide <i>valérique</i>	<i>Valériane</i> 

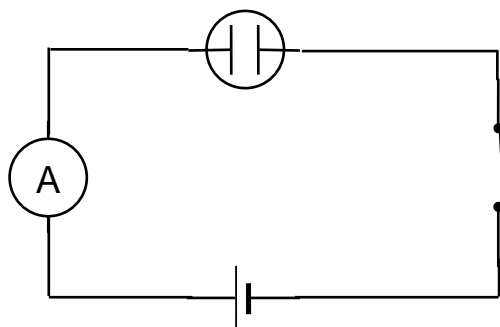
## 2<sup>ème</sup> partie : Propriétés chimiques

### I- En tant qu'acides

#### 1) Ionisation dans l'eau

##### a) Expérience (Fig-4)

Figure-4



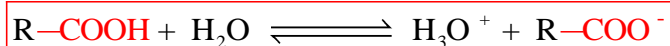
- \* L'électrolyseur contient une solution aqueuse d'acide éthanóïque de concentration molaire  $C = 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$  : l'ampèremètre indique le passage d'un courant.
- \* Du BBT ajouté à la solution, vire au **jaune**.
- \* La mesure du pH de la solution donne  $\sim 3,5$

##### b) Interprétation

- \* L'acide éthanóïque s'ionise dans l'eau avec formation d'ions  $\text{H}_3\text{O}^+$
- \* C'est un acide faible, car  $10^{-\text{pH}} < C$   
 $\Rightarrow \text{CH}_3\text{-COOH} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{CH}_3\text{-COO}^-$   
 $\Rightarrow$  La solution renferme des ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  et des ions éthanóate  $\text{CH}_3\text{-COO}^-$ , mais aussi des molécules  $\text{CH}_3\text{-COOH}$  non ionisé (ainsi que les ions  $\text{OH}^-$  de l'ionisation propre de l'eau)

##### c) Généralisation

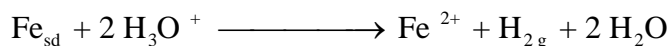
Les acides carboxyliques sont des acides faibles ; ils s'ionisent dans l'eau selon l'équation



### 2) Action sur les métaux

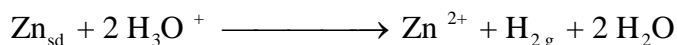
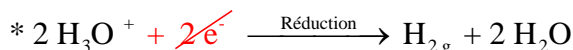
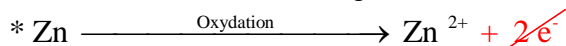
#### a) Action de l'acide éthanóïque sur le fer

- \* Dégagement d'un gaz qui détonne en présence d'une flamme :  $\text{H}_2$
- \* Le test à la soude prouve la formation d'ions  $\text{Fe}^{2+}$   
 $\Rightarrow$  Réaction entre Fe et  $\text{H}_3\text{O}^+$ , qui donne  $\text{Fe}^{2+}$  et  $\text{H}_2$
- \*  $\text{Fe} \xrightarrow{\text{Oxydation}} \text{Fe}^{2+} + 2e^-$
- \*  $2 \text{H}_3\text{O}^+ + 2e^- \xrightarrow{\text{Réduction}} \text{H}_{2g} + 2 \text{H}_2\text{O}$



- $$\Rightarrow \begin{cases} * \text{H}_3\text{O}^+ / \text{H}_2 \text{ possède un pouvoir oxydant plus fort que } \text{Fe}^{2+} / \text{Fe} : \text{H}_3\text{O}^+ \text{ est plus oxydant que } \text{Fe}^{2+} \\ * \text{Fe}^{2+} / \text{Fe} \text{ possède un pouvoir réducteur plus fort que } \text{H}_3\text{O}^+ / \text{H}_2 : \underline{\text{Fe est plus réducteur que } \text{H}_2} \end{cases}$$



**b) Action de l'acide éthanoïque sur le zinc**Mêmes observations, sauf que le test à la soude prouve la formation d'ions  $Zn^{2+}$ 

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} * H_3O^+ / H_2 \text{ possède un pouvoir oxydant plus fort que } Zn^{2+} / Zn : H_3O^+ \text{ est plus oxydant que } Zn^{2+} \\ * Zn^{2+} / Zn \text{ possède un pouvoir réducteur plus fort que } H_3O^+ / H_2 : \underline{Zn \text{ est plus réducteur que } H_2} \end{array} \right.$$
**c) Généralisation**

Les ions hydronium  $H_3O^+$  présents dans les solutions aqueuses d'acides carboxyliques réagissent avec les métaux plus réducteurs que  $H_2$ . Il se forme les ions métalliques correspondants, et du dihydrogène gaz.

**Application-2**

On réagit une solution aqueuse d'acide méthanoïque avec de l'aluminium métallique  $Al$ . Il se dégage un gaz.

1. Identifier le gaz dégagé.
2. Ecrire l'équation globale de la réaction qui se produit. (l'ion que peut donner l'aluminium est  $Al^{3+}$ )
3. Calculer la masse d'aluminium disparue sachant que le volume de gaz dégagé est égal à **1,2 L**.
4. Donner la formule du méthanoate d'aluminium obtenu, et calculer sa masse.

On donne :  $Al = 27$  ;  $C = 12$  ;  $O = 16$  ;  $V_m = 24 \text{ L.mol}^{-1}$  dans les conditions de l'expérience

1.  $H_2$ .

2.



L'acide méthanoïque s'ionise dans l'eau selon l'équation :  $HCOOH + H_2O \rightleftharpoons H_3O^+ + HCOO^-$

D'où l'équation globale :



$$3. m(Al)_{disparu} = n(Al)_{disparu} \cdot M(Al), \text{ avec } n(Al)_{disparu} = \frac{2}{3} n(H_2)_{formé} = \frac{2}{3} \frac{V(H_2)_{formé}}{V_m}$$

$$\Rightarrow m(Al)_{disparu} = \frac{2}{3} \frac{V(H_2)_{formé}}{V_m} \cdot M(Al) = \frac{2}{3} \frac{1,2}{24} \cdot 27 : \boxed{m(Al)_{disparu} = 0,9 \text{ g}}$$

4. Formule du méthanoate d'aluminium :  $Al(HCOO)_3$  ou  $Al(HCO_2)_3$

$$m(Al(HCO_2)_3) = n(Al(HCO_2)_3) \cdot M(Al(HCO_2)_3),$$

$$\text{avec } n(\text{Al}(\text{HCO}_2)_3) = \frac{2}{3} n(\text{H}_2)_{\text{formé}} = \frac{2}{3} \frac{V(\text{H}_2)_{\text{formé}}}{V_m}$$

$$\Rightarrow m(\text{Al}(\text{HCO}_2)_3) = \frac{2}{3} \frac{V(\text{H}_2)_{\text{formé}}}{V_m} \cdot M(\text{Al}(\text{HCO}_2)_3) = \frac{2}{3} \frac{1,2}{24} \cdot (27 + 3(1 + 12 + 2 \cdot 16)) :$$

$$m(\text{Al}(\text{HCO}_2)_3) = 5,4 \text{ g}$$

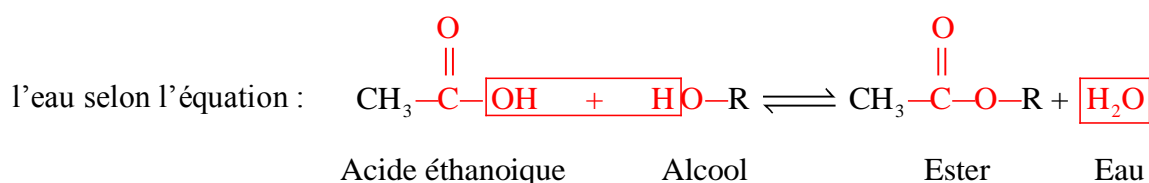
## II- En tant que composés organiques

### 1) Réaction avec les alcools : Estérification

#### a) Rappels

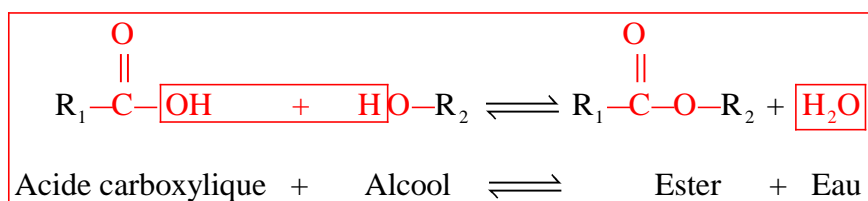
\* Les **esters** constituent la famille de formule générale  $\text{R}_1-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{O}-\text{R}_2$

\* L'acide éthanoïque réagit avec un alcool, selon une réaction lente et limitée, pour donner un ester et de



#### b) Généralisation

Tout acide carboxylique peut réagir avec un alcool, selon une réaction lente et limitée (par la réaction d'hydrolyse), pour donner un ester et de l'eau selon l'équation :

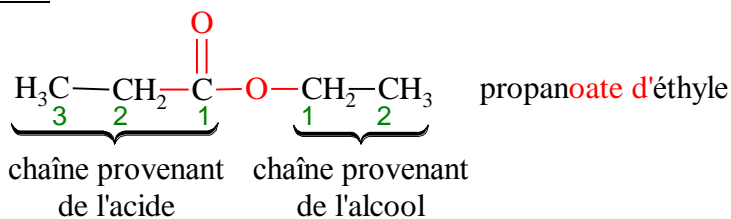


Où  $\text{R}_2$  est un groupe alkyle, et  $\text{R}_1$  un atome H ou un groupe alkyle.

La réaction peut être accélérée par un catalyseur tel que l'acide sulfurique et la température, sans toutefois changer son état final.

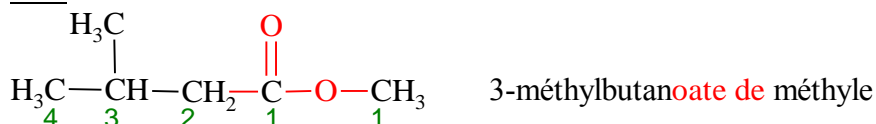
#### c) Nomenclature des esters

ex-1

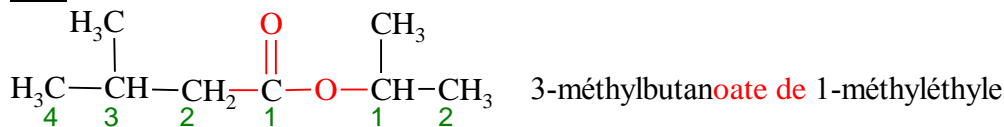


Les deux chaînes sont numérotées à partir du groupe caractéristique des esters  $-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{O}-$

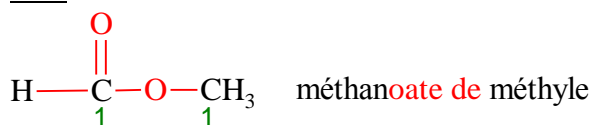
ex-2



ex-3






ex-4



**Rq** Les esters sont souvent caractérisés par leur odeur agréable et sont couramment employés dans l'industrie agroalimentaire comme arômes artificiels, dans la parfumerie... etc.

Voici quelques esters courants ainsi que les acides et les alcools qui permettent de les obtenir. (Fig-5)

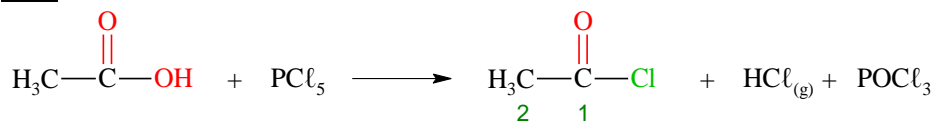
Figure-5

Acide	Alcool	Ester		Goût
butanoïque	éthanol	<i>butanoate d'éthyle</i>	$  \text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_3  $	 <i>Ananas</i>
éthanoïque	butan-1-ol	<i>éthanoate de butyle</i>	$  \text{H}_3\text{C}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3  $	 <i>Banane</i>
éthanoïque	pentan-1-ol	<i>éthanoate de pentyle</i>	$  \text{H}_3\text{C}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3  $	 <i>Poire</i>

## 2) Dérivation en chlorure d'acyle

### a) Exemples et nomenclature

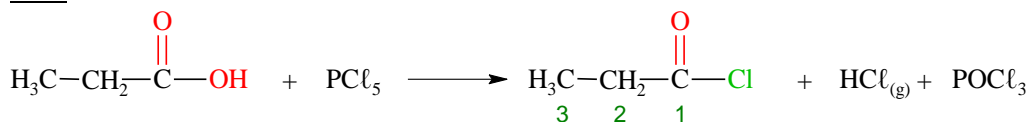
ex-1



acide éthanoïque

chlorure d'éthanoyle  
(Chlorure d'acyle)

ex-2



acide propnoïque

chlorure de propanoyle  
(Chlorure d'acyle)

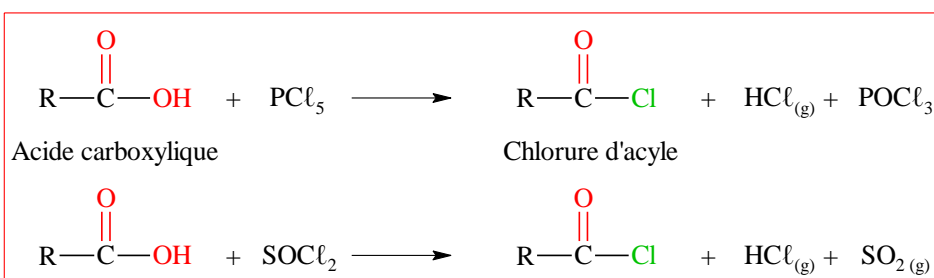
\* Le groupe ( $-\text{OH}$ ) est substitué par un atome  $\text{Cl}$ .

\* Le nom du chlorure d'acyle est dérivé de celui de l'acide carboxylique :  $\left\{ \begin{array}{l} \text{acide} \rightarrow \text{chlorure de} \\ \text{-oïque} \rightarrow \text{-oyle} \end{array} \right.$

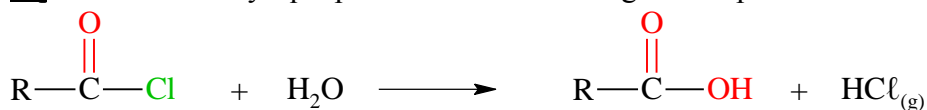
### b) Généralisation

Un chlorure d'acyle est obtenu, à partir de l'acide carboxylique, par réaction de substitution du groupe ( $-\text{OH}$ ) par un atome de chlore  $\text{Cl}$ .

On utilise un agent chlorurant tel que le pentachlorure de phosphore  $\text{PCl}_5$  ou le chlorure de thionyle  $\text{SOCl}_2$ .



Rq L'acide carboxylique peut être facilement régénéré à partir de son chlorure d'acyle, par hydrolyse :

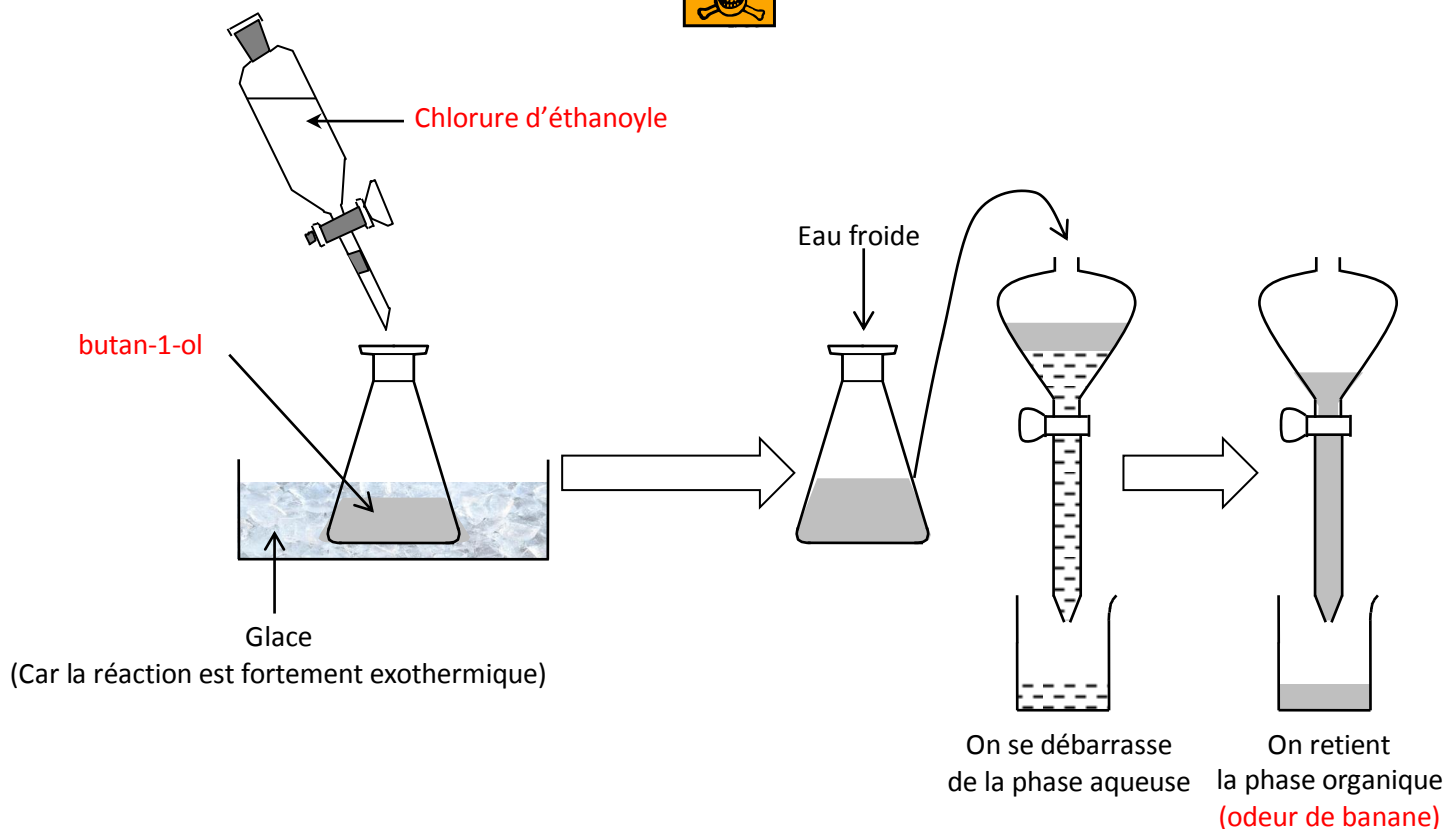


Cette réaction rapide, totale, exothermique et violente rend les chlorures d'acyle lacrymogènes.

**c) Intérêt : Préparation d'un ester par une réaction rapide et totale**

**i. Expérience (Fig-6)**

Figure-6



**ii. Interprétation**

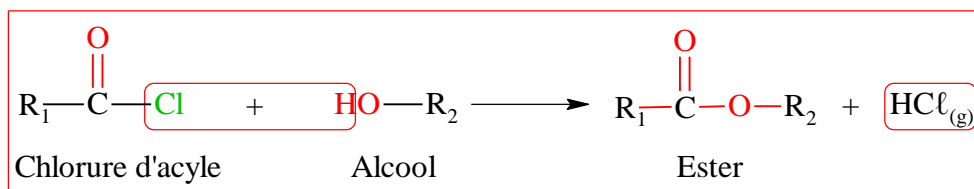
La phase organique à l'odeur de banane est un ester (éthanoate de butyle), formé selon la réaction suivante :



La réaction est rapide et totale, contrairement à la réaction d'estérification.

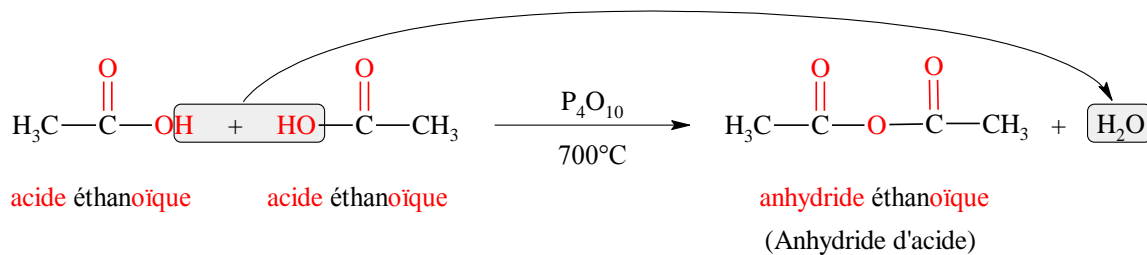
**iii. Généralisation**

La réaction entre un chlorure d'acyle et un alcool permet de préparer un ester rapidement et selon une réaction totale.



### 3) Dérivation en anhydride d'acide

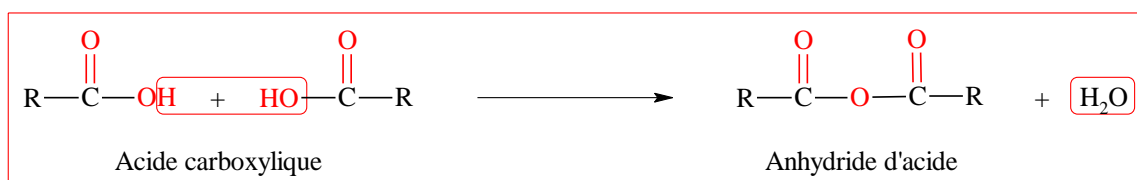
#### a) Exemple et nomenclature



- \* Une molécule d'eau est éliminée entre 2 molécules d'acide carboxylique, grâce à un déshydratant tel que le décaoxyde de tétraphosphore (P<sub>4</sub>O<sub>10</sub>) à 700°C.
- \* Le nom de l'anhydride d'acide est dérivé de celui de l'acide carboxylique : acide → anhydride

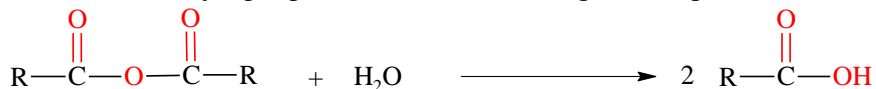
#### b) Généralisation

Un anhydride d'acide est obtenu, à partir de l'acide carboxylique, par déshydratation (intermoléculaire). On utilise un agent déshydratant à haute température.



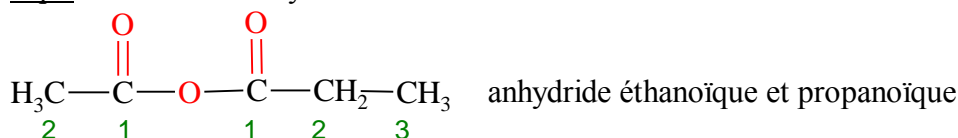
#### Rq-1

L'acide carboxylique peut être facilement régénéré à partir de son anhydride, par hydrolyse :

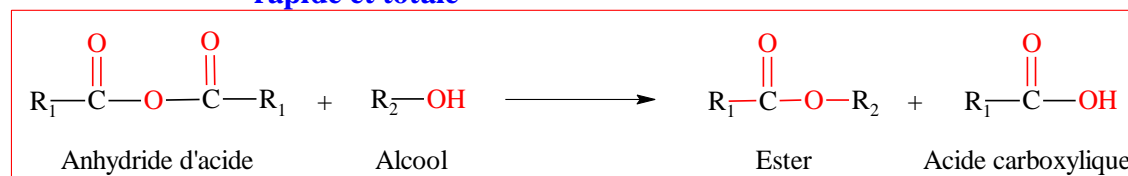


Cette réaction est moins rapide, et moins vive que celle de l'hydrolyse des chlorures d'acyle.

Rq-2 Il existe des anhydrides d'acides avec deux chaînes carbonées différentes (mixtes)



#### c) Intérêt : Préparation d'un ester et l'acide carboxylique dont il dérive, par une réaction rapide et totale



ex



En plus de cette utilisation, l'anhydride éthanoïque est très demandé par l'industrie pharmaceutique pour synthétiser le paracétamol (constituant de plusieurs médicaments : Efferalgan, Fervex, Doliprane... etc)

RécapitulationLes acides carboxyliques et leurs dérivés

Acide carboxylique		Dérivés d'acide	
$\text{R}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{OH}$	$\xrightarrow{\text{PCl}_5 \text{ ou } \text{SOCl}_2}$	$\text{R}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{Cl}$	Chlorure d'acyle
	$\xleftarrow{\text{H}_2\text{O}}$		
	$\xrightarrow{\text{Déshydratation}}$	$\text{R}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{O}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{R}$	Anhydride d'acide
	$\xleftarrow{\text{H}_2\text{O}}$ $\xleftarrow{\text{Alcool}}$		
	$\xrightarrow{\text{Alcool}}$	$\text{R}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{O}-\text{R}'$	Ester
	$\xleftarrow{\text{H}_2\text{O}}$		

Application-3

L'arôme de fraise synthétique est un ester de masse molaire  $M = 130 \text{ g.mol}^{-1}$ . On donne  $H = 1$ ,  $C = 12$ ,  $O = 16$

- Déterminer sa formule brute, sachant que ses chaînes carbonée sont ouvertes et saturées.
- L'hydrolyse de cet ester (A) en présence d'acide sulfurique concentré à  $60^\circ\text{C}$  donne deux composés organiques B et C.
  - Donner les caractères de cette réaction.
  - Sachant que le BBT vire au jaune dans une solution aqueuse du composé B ; donner la famille organique à laquelle il appartient.
  - Donner la famille organique à laquelle appartient le composé C.
- La réaction du composé B avec le pentachlorure de phosphore ( $\text{PCl}_5$ ) donne, entre autres, un composé organique D : le **chlorure de 2-méthylbutanoyle**.
  - Quelle est la famille organique du composé obtenu ; écrire sa formule semi-développée : pourquoi il est impératif d'éviter le contact des muqueuses avec ce type de composés, expliquer ?
  - En déduire la formule semi-développée et le nom du composé B.
  - Ecrire l'équation de la réaction.
- La réaction entre le composé D et l'**éthanol** donne l'ester A ; en déduire la formule semi-développée du composé C.
- L'ester A peut être obtenu à partir des composés B et C en présence d'acide sulfurique concentré à  $60^\circ\text{C}$  : Ecrire l'équation de la réaction, écrire le nom de l'ester A, et donner les caractères de la réaction.
- Un composé E, dérivé du composé B, donne par réaction avec le composé C les composés A et B :
  - Quelle est la famille organique du composé E.
  - Ecrire l'équation de la réaction permettant de l'obtenir, et donner son nom.



1. La formule générale d'un ester est  $R_1-\overset{\text{O}}{\parallel}{C}-O-R_2$

$R_1$  et  $R_2$  étant des groupes alkyles, la formule est  $C_{n_1}H_{2n_1+1}-\overset{\text{O}}{\parallel}{C}-O-C_{n_2}H_{2n_2+1}$

d'où la formule brute  $C_{n_1+n_2+1}H_{2n_1+2n_2+2}O_2 \Leftrightarrow C_{n_1+n_2+1}H_{2(n_1+n_2+1)}O_2 \Leftrightarrow C_nH_{2n}O_2$ , avec  $n \in \mathbb{N}^*$

⇒ Dans le cas de l'arôme de fraise :

$$M(C_nH_{2n}O_2) = 130 \text{ g.mol}^{-1} \Rightarrow 12n + 2n + 32 = 130 \Leftrightarrow 14n = 130 - 32 = 98 \Leftrightarrow n = \frac{98}{14} = 7$$

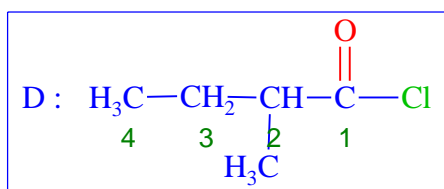
D'où la formule brute :  $C_7H_{14}O_2$

2.

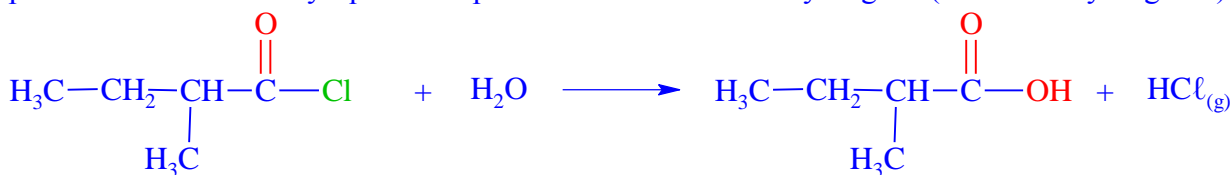
- Lente et limitée.
- B : acide carboxylique.
- C : alcool

3.

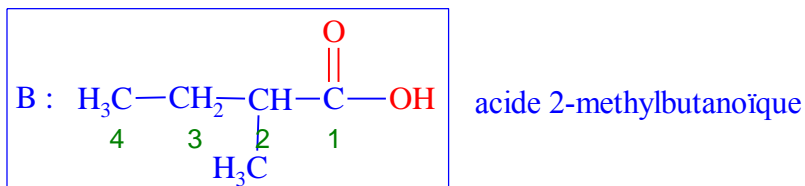
a) Chlorure d'acyle



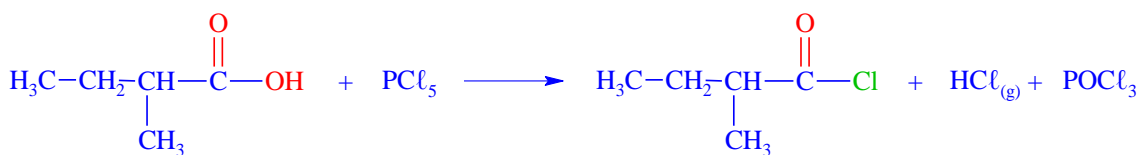
Les chlorures d'acyle sont très réactifs à l'eau ; leur contact avec les muqueuses les déshydrate pour produire l'acide carboxylique correspondant et le chlorure d'hydrogène (ils sont lacrymogènes) :



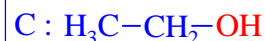
b)



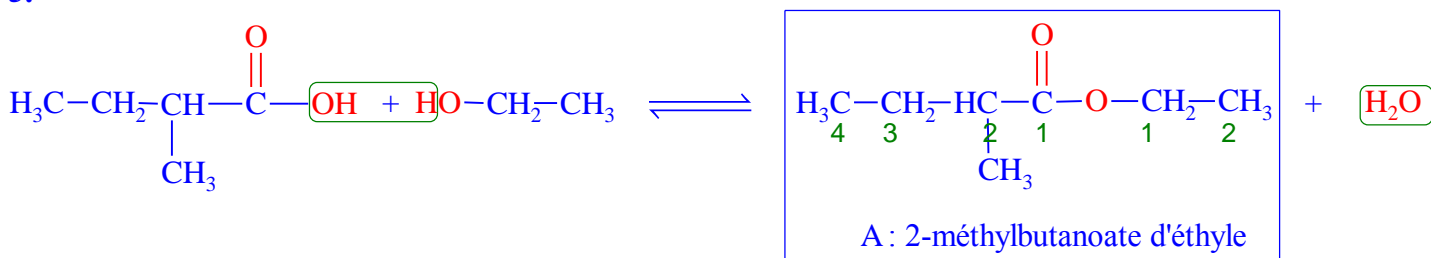
c)



4. L'ester A contient la chaîne carbonée de l'alcool C ; alors C est l'éthanol ⇒



5.

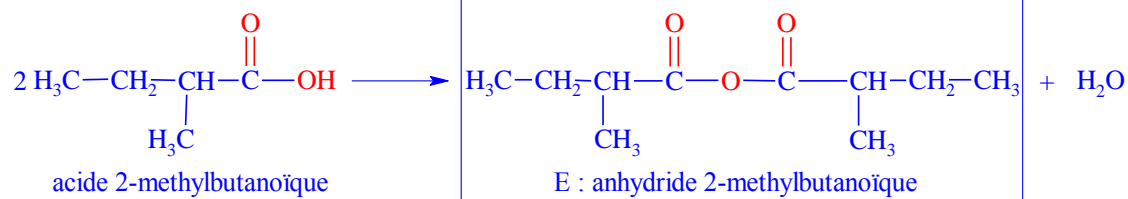


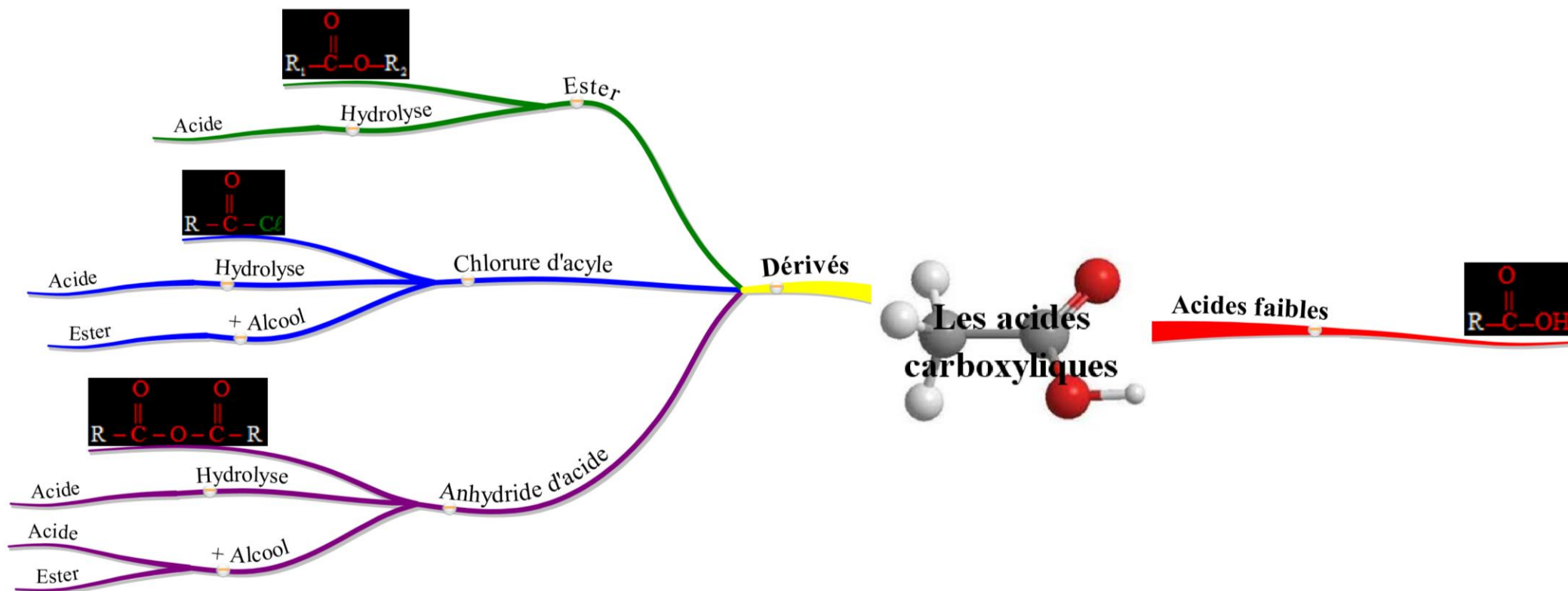
C'est une réaction d'estérification ; lente et limitée.

6.

a) E peut réagir avec l'alcool C pour donner l'ester A et l'acide carboxylique B : E est un anhydride de l'acide carboxylique B.

b)





## Chapitre-4 : Les amines aliphatiques saturées

### Objectifs

- Reconnaître et nommer une amine.
- Reconnaître la géométrie de l'azote dans une amine.
- Distinguer les trois classes d'amines.
- Réaliser des expériences simples communes aux amines.
- Réaliser des expériences simples distinctives des trois classes d'amines.

### Prérequis

- Représentation d'un composé organique par une formule semi-développée.
- Notion d'hydrocarbure aliphatique.
- Notion de chaîne carbonée saturée, groupe alkyle.
- Nomenclature des alcools.
- Notion d'isomérie.
- Atome d'azote : représentation de Lewis, formation de la molécule  $\text{NH}_3$ , et de l'ion  $\text{NH}_4^+$ .
- Notion d'électrolyte ; électrolyte fort, électrolyte faible.
- Acides et bases selon Brønsted.
- Solutions aqueuses de bases ; action du BBT, base forte, base faible, pH et basicité.
- Dosage acido-basique.
- Précipitation, par la soude, des ions  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  et  $\text{Al}^{3+}$ .

### Matériel

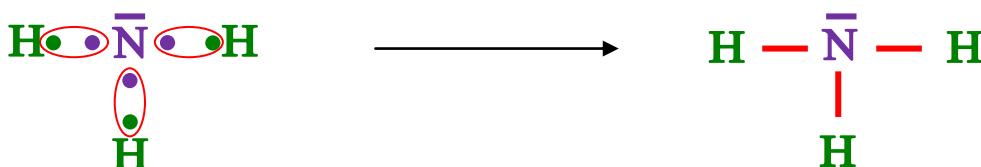
* Modèles moléculaires	* BBT
* Electrolyseur	* Pissette
* Générateur	* Solution aqueuse d'éthylamine ( $10^{-2}$ M)
* Interrupteur	* Solution aqueuse d'ammoniac ( $10^{-2}$ M)
* Ampèremètre	* Solution aqueuse de diméthylamine ( $10^{-2}$ M)
* 4 Fils de connexion	* Solution aqueuse de triméthylamine ( $10^{-2}$ M)
* pH-mètre	* Solution aqueuse de $\text{HNO}_3$ (~ 0,1 M)
* Papier filtre	* Solution concentrée de $\text{HCl}$
* 4 Tubes à essai sur support	* Solution concentrée de $\text{NH}_3$
* 5 Bêchers	* Solution aqueuse de $\text{CuSO}_4$
* 2 Baguettes de verre	* Solution aqueuse de $\text{FeSO}_4$
* Burette sur support	* Solution aqueuse de $\text{FeCl}_3$
* Agitateur magnétique + Barreau aimanté	* Solution aqueuse de $\text{AlCl}_3$

### Rappels

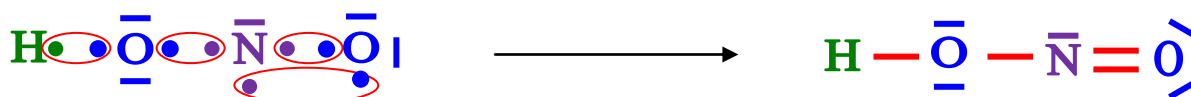
❖ La représentation de Lewis de l'atome d'azote est  $\cdot \bar{\text{N}} \cdot$  ;

- Grâce à ses 3  $e^-$  célibataires, il est susceptible de s'engager dans 3 liaisons covalentes :

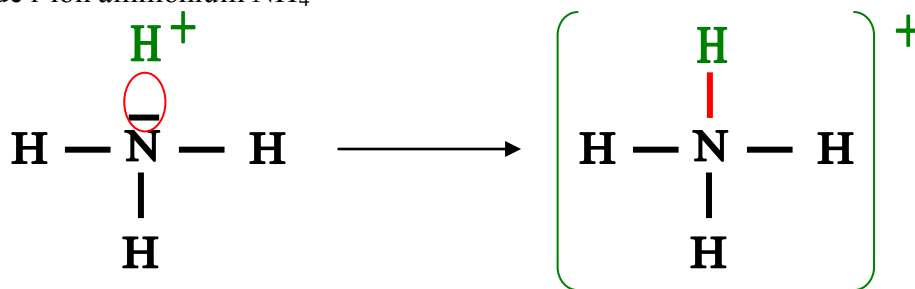
ex1 : molécule d'ammoniac  $\text{NH}_3$



ex2 : molécule d'acide nitreux  $\text{HNO}_2$



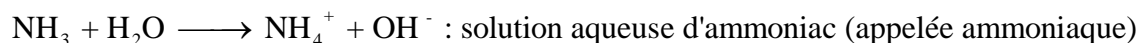
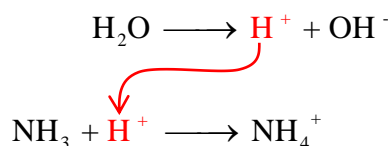
- Il possède un doublet non liant ; grâce auquel il peut s'engager dans une 4<sup>ème</sup> liaison covalente, en le partageant avec tout ce qui cherche à combler sa couche externe par un duet, tel qu'un proton  $H^+$  :  
ex : formation de l'ion ammonium  $NH_4^+$



❖ Définition des acides et des bases selon Brønsted :

- Un acide est une entité chimique capable de libérer un ion  $H^+$  au cours d'une réaction chimique  
( $AH \longrightarrow H^+ + A^-$ )
- Une base est une entité chimique capable de capter un ion  $H^+$  au cours d'une réaction chimique  
( $B + H^+ \longrightarrow BH^+$ )

ex



$\uparrow$        $\uparrow$   
 Base    Acide

❖ Une solution aqueuse de base renferme des ions  $OH^-$  qui lui confèrent une teinte **bleue** en présence de **BBT**.

- La molarité de la solution en ions hydroxydes est donnée par :  $[OH^-] = \frac{K_e}{[H_3O^+]} = \frac{K_e}{10^{-pH}}$

- Soit C la concentration molaire de la solution :  $\begin{cases} \text{Si } [OH^-] = C; \text{ la base est forte} \\ \text{Si } [OH^-] < C; \text{ la base est faible} \end{cases}$

- Un milieu est d'autant plus basique, que son pH est plus grand.
- En mélangeant une solution aqueuse de base, avec une solution aqueuse d'acide ; une réaction de neutralisation aurait lieu :  $H_3O^+ + OH^- \longrightarrow 2 H_2O$  .

Si les quantités d'ions  $H_3O^+$  et  $OH^-$  fournies par les deux solutions sont égales ; le mélange final serait neutre :  $pH = 7$  et teinte verte en présence de BBT (équivalence).

❖ Une solution aqueuse de soude versée sur une solution contenant des ions :

- $Cu^{2+}$ , donne un précipité bleu d'hydroxyde de cuivre  $Cu(OH)_2$
- $Fe^{2+}$ , donne un précipité vert d'hydroxyde de fer II  $Fe(OH)_2$
- $Fe^{3+}$ , donne un précipité rouille d'hydroxyde de fer III  $Fe(OH)_3$
- $Al^{3+}$ , donne un précipité blanc insoluble dans l'ammoniac d'hydroxyde d'aluminium  $Al(OH)_3$

## 1<sup>ère</sup> partie : Propriétés moléculaires

### I- Etude d'un exemple

Soient les amines à 3 atomes de carbone, de la Fig-1

Figure-1

	(a)	(b)	(c)	(d)
Modèle moléculaire				
Formule brute	$C_3H_9N$	$C_3H_9N$	$C_3H_9N$	$C_3H_9N$
Formule semi-développée	$H_3C-CH_2-CH_2-NH_2$	$\begin{array}{c} NH_2 \\   \\ H_3C-CH-CH_3 \end{array}$	$H_3C-NH-CH_2-CH_3$	$\begin{array}{c} CH_3 \\   \\ H_3C-N-CH_3 \end{array}$
Nom	propan-1-amine	propan-2-amine	N-méthyléthanamine	N,N-diméthylméthanamine
Classe	Primaire	Primaire	Secondaire	Tertiaire

- \* Ces composés sont des amines : ils ont tous un atome d'azote lié à 1, 2, ou 3 atomes de carbone.
- \* Ils ont la même formule brute, mais des formules semi-développées différentes ; ce sont des isomères.
- \* Ces amines sont de différentes classes :
  - Pour les amines (a) et (b), l'azote n'est lié qu'à 1 seul carbone : elles sont dites primaires.
  - Pour l'amine (c), l'azote est lié à 2 carbones : elle est dite secondaire.
  - Pour l'amine (d), l'azote est lié à 3 carbones : elle est dite tertiaire.

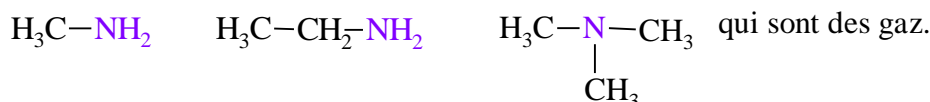
On se limitera aux amines, à un seul atome d'azote (monoamines), et dont toutes les chaînes carbonées sont ouvertes (aliphatiques) et ne comportent que des liaisons simples Carbone-Carbone (saturées)

## II- Généralisation

### 1) Définition

Une amine aliphatique saturée est un composé organique qui dérive de l'ammoniac ( $NH_3$ ) par remplacement d'un, de deux ou de trois hydrogènes par des groupes alkyles; sa formule brute est de la forme  $C_nH_{2n+3}N$

- \* Les amines sont facilement reconnues à leur odeur forte semblable à celle de l'ammoniac.
- \* Dans les conditions ordinaires ; la plupart sont des liquides, certains sont solides, sauf



- \* Celles ayant un faible nombre de carbones sont les plus solubles dans l'eau, cependant toutes les amines sont solubles dans des solvants organiques.

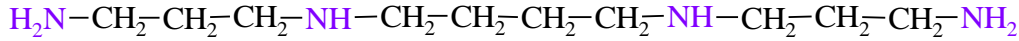
Rq Une polyamine présente plusieurs groupes  $(-\text{NH}_2)$ ,  $(-\text{NH}-)$  ou  $(-\text{N}-)$  : ex Fig-2

**Figure-2**

\* La cadavérine (produit, à odeur nauséabonde, de la putréfaction des cadavres) :



\* La spermine (stabilisatrice de la structure de l'ADN, synthétisée par les fabricants de produits cosmétiques antirides) :



## 2) Classes

\* **Amines primaires** :

De la forme  $\text{R}-\text{NH}_2$ , avec R : groupe alkyle. (Remplaçant 1 atome H dans la molécule d'ammoniac)

\* **Amines secondaires** :

De la forme  $\text{R}_1-\text{NH}-\text{R}_2$ , avec  $\text{R}_1$  et  $\text{R}_2$  : groupes alkyles. (Remplaçant 2 atome H dans la molécule d'ammoniac)

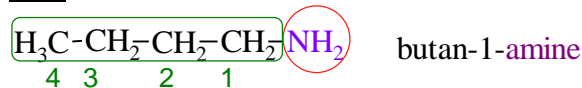
\* **Amines tertiaires** :

De la forme  $\text{R}_1-\overset{\text{R}_3}{\underset{|}{\text{N}}}-\text{R}_2$ , avec  $\text{R}_1$ ,  $\text{R}_2$  et  $\text{R}_3$  : groupes alkyles. (Remplaçant les 3 atome H dans la molécule d'ammoniac)

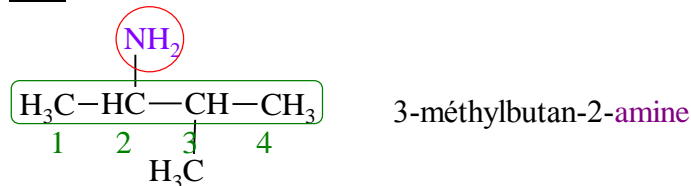
## 3) Nomenclature

### a) Amines primaires

ex-1



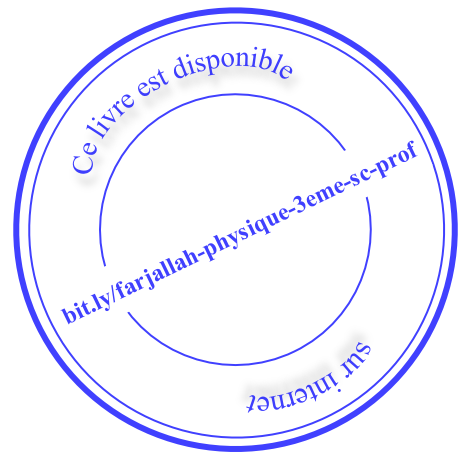
ex-2



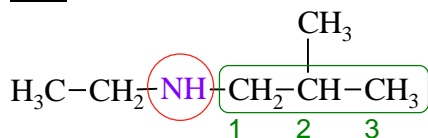
⇒ Mêmes règles que les alcools, en remplaçant la terminaison (-ol) par (-amine)

### b) Amines secondaires et tertiaires

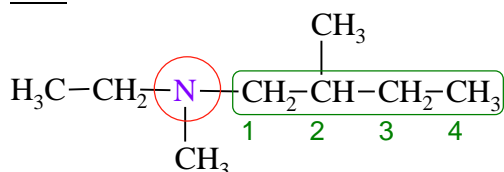
ex-1



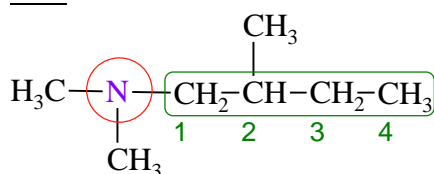
ex-2


*N*-éthyl-2-méthylpropan-1-amine

ex-3


*N*-éthyl-*N*, 2-diméthylbutan-1-amine

ex-4


*N, N*, 2-triméthylbutan-1-amine

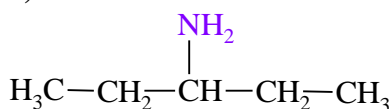
⇒ D'où les règles :

- \* Dans une 1<sup>ère</sup> étape, on écrit le nom de l'amine primaire correspondant à la chaîne principale (la plus longue dans un des radicaux greffés sur l'azote). Le, ou les autres radicaux sont considérés des ramifications d'indice de position (*N*), comme ceux de la chaîne principale ayant des indices de position numériques.
- \* Dans une 2<sup>ème</sup> étape on ajoute à gauche du nom écrit précédemment, les noms de toutes les ramifications dans l'ordre alphabétique et précédés de leurs indices de position et séparés par des tirets. Et lorsque les indices sont regroupés (ramifications identiques) on écrit les chiffres en dernier lieu, dans l'ordre. L'indice (*N*) est écrit en italique.

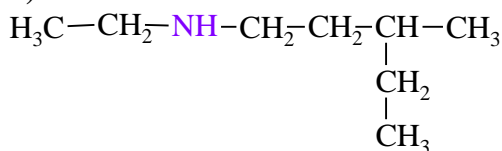
### Application-1

1. Donner la classe et le nom de chacune des amines suivantes :

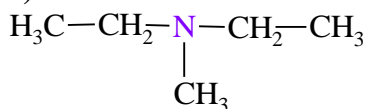
a)



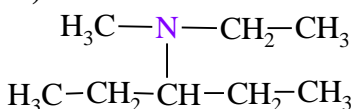
b)



c)



d)



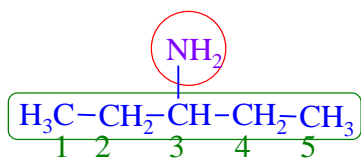


2. Ecrire la formule semi-développée de chacune des amines suivantes, et donner sa formule brute.

- a) butan-2-amine
  - b) *N, N*-diméthyléthanamine
  - c) *N, 2*-diméthylprpan-1-amine
- Qu'est-ce qu'on constate ?

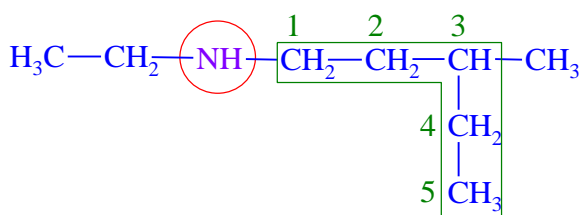
1.

a)



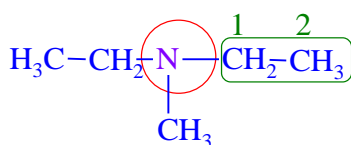
Primaire; pentan-3-amine

b)



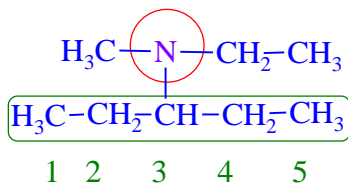
Secondaire; *N*-éthyl-3-méthylpentan-1-amine

c)



Tertiaire; *N*-éthyl-*N*-méthyléthanamine

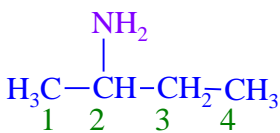
d)



Tertiaire; *N*-éthyl-*N*-méthylpentan-3-amine

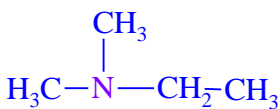
2.

a)



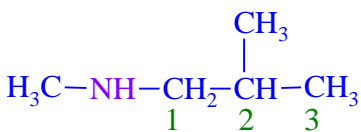
$\text{C}_4\text{H}_{11}\text{N}$

b)



$\text{C}_4\text{H}_{11}\text{N}$

c)



$\text{C}_5\text{H}_{13}\text{N}$

(a) et (b) sont isomères

Rq : Nomenclature usuelle (Fig-3)

Figure-3

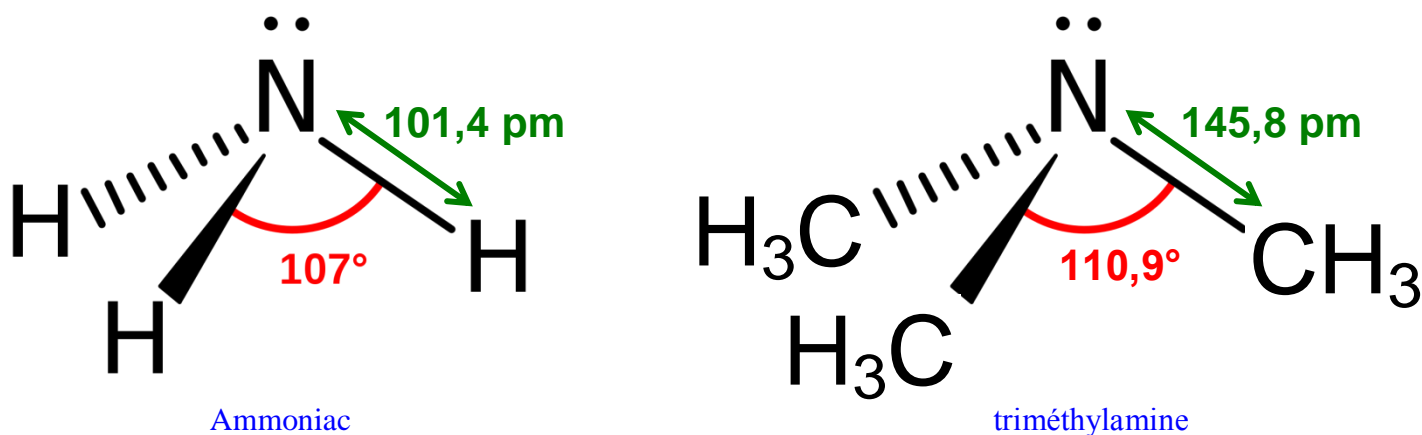
Amine	$\text{H}_3\text{C}-\text{NH}_2$	$\text{H}_3\text{C}-\text{NH}-\text{CH}_3$	$\begin{array}{c} \text{H}_3\text{C}-\text{N}-\text{CH}_3 \\   \\ \text{CH}_3 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{H}_3\text{C}-\text{N}-\text{CH}_2-\text{CH}_3 \\   \\ \text{CH}_3 \end{array}$
Nom IUPAC	méthanamine	<i>N</i> -méthylméthanamine	<i>N,N</i> -diméthylméthanamine	<i>N,N</i> -diméthyléthylamine
Nom usuel	méthylamine	diméthylamine	triméthylamine	éthyl diméthylamine
	Le mot « amine » est précédé des noms des groupes alkyles greffés sur l'azote, dans l'ordre alphabétique.			

#### 4) Géométrie de l'azote dans les amines (Fig-4)

Etant des dérivés de l'ammoniac, les amines ont comme lui une structure pyramidale au niveau de l'atome d'azote.

**NB** le doublet non liant de l'azote est à l'origine des principales propriétés chimiques des amines, puisqu'il peut être engagé dans une liaison covalente avec tout accepteur d'un doublet d'électrons.

Figure-4



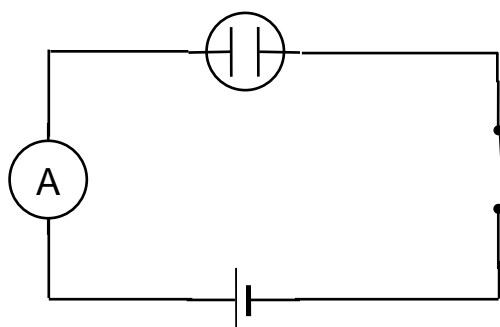
## 2<sup>ème</sup> partie : Propriétés chimiques

### I- Réactions communes aux trois classes

#### 1) Ionisation dans l'eau

##### a) Expérience (Fig-5)

Figure-5

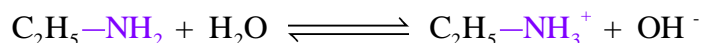
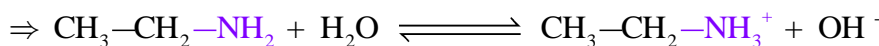


- \* L'électrolyseur contient une solution aqueuse d'éthylamine de concentration molaire  $C = 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$  : l'ampèremètre indique le passage d'un courant.
- \* Du BBT ajouté à la solution, vire au bleu.
- \* La mesure du pH de la solution donne  $\sim 11,3$

##### b) Interprétation

\* L'éthylamine s'ionise dans l'eau avec formation d'ions  $\text{OH}^-$  : c'est une base.

$$* [\text{OH}^-] = \frac{K_e}{[\text{H}_3\text{O}^+]} = \frac{K_e}{10^{-\text{pH}}} = \frac{10^{-14}}{10^{-11,3}} \approx 0,002 \quad (C : \text{c'est une base faible.})$$



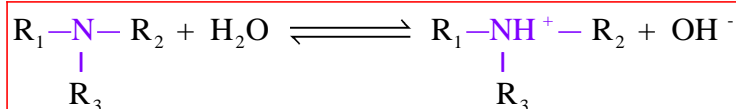
Comme l'ammoniac, l'éthylamine fait ressortir l'ion ( $\text{OH}^-$ ) d'une molécule d'eau en lui arrachant un proton  $\text{H}^+$  grâce au doublet non liant de l'azote.

$\Rightarrow$  La solution renferme des ions  $\text{OH}^-$  et des ions  $\text{C}_2\text{H}_5\text{-NH}_3^+$ , mais aussi des molécules  $\text{C}_2\text{H}_5\text{-NH}_2$  non ionisé (ainsi que les ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  de l'ionisation propre de l'eau)

Rq Une solution d'ammoniac de même concentration  $10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$  possède un  $\text{pH} = 10,6$  : elle est moins basique que la solution d'éthylamine.

##### c) Généralisation

Les amines sont des bases faibles (mais plus fortes que l'ammoniac) ; elles s'ionisent dans l'eau en fixant un ion  $\text{H}^+$  par le doublet non liant de l'azote, selon l'équation générale :



##### d) La basicité des amines selon leurs classes (Fig-6)

Figure-6

Solution aqueuse d'amine	triméthylamine	éthylamine	diméthylamine
Formule semi-développée	$\text{H}_3\text{C-N(CH}_3\text{)-CH}_3$	$\text{H}_3\text{C-CH}_2\text{-NH}_2$	$\text{H}_3\text{C-NH-CH}_3$
Classe	III	I	II
C (mol.L <sup>-1</sup> )	$10^{-2}$	$10^{-2}$	$10^{-2}$
pH	10,9	11,3	11,4

La mesure du pH de solutions aqueuses de même concentration, d'amines de différentes classes ; montre qu'on passant d'une amine I à une amine II, la basicité croit : on s'attend alors à ce que les amines III soient les plus basiques, cependant ce n'est pas le cas ; elles sont les plus faibles. Cela est dû à l'encombrement autour de l'atome N qui rend son doublet non liant difficilement accessible.

## **Application-2 Le comportement acido-basique des amines : Définition & Structure**

### C'est quoi les acides et les bases

Les chimistes utilisent trois définitions pour les acides et les bases :

- La définition d'Arrhenius
- La définition de Brønsted-Lowry
- La définition de Lewis

La définition d'Arrhenius définit les acides comme des molécules pouvant donner un ion d'hydrogène et les bases comme des molécules pouvant donner un ion hydroxyde.

Deuxièmement, selon la définition de Brønsted-Lowry, les acides peuvent donner un ion hydrogène et les bases acceptent un ion hydrogène.

Enfin, dans la définition de Lewis, les acides de Lewis sont des accepteurs de doublets d'électrons alors que les bases de Lewis sont des donneurs de doublets d'électrons.

Examinons maintenant de plus près les amines se comportant en tant que bases.

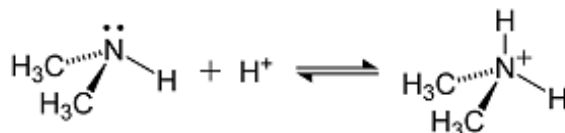
### Les amines en tant que bases

[...]

Les amines peuvent se comporter comme bases selon la définition de Brønsted-Lowry ou selon la définition de Lewis. [...]

Les amines ont un atome d'azote, lié à une combinaison d'atomes de carbone et d'hydrogène, et il est capable de former trois liaisons au total. Les amines réagissent avec les acides pour accepter un ion hydrogène, ce qui en fait une base selon la définition de Brønsted-Lowry. Cela donne à l'amine une charge positive.

Les amines sont également une base selon la définition de Lewis. Un groupe amine a un doublet d'électrons non liants lorsqu'il forme trois liaisons. Il peut donner ces électrons à d'autres entités, ce qui en fait également une base selon la définition de Lewis.



*Les amines peuvent accepter un atome d'hydrogène pour se comporter comme bases de Brønsted-Lowry*

**Les amines sont des bases faibles en général, mais leur basicité dépend des groupes auxquels ils sont liés.**

[bit.ly/acid-base-behavior-of-amines](http://bit.ly/acid-base-behavior-of-amines)

1. Est-ce que la définition d'Arrhenius permet d'expliquer le caractère basique des amines ?
2. Parmi les deux autres définitions des acides et des bases, il y en a une que vous connaissez déjà ; laquelle ?
3. Expliquer l'origine du caractère basique des amines dans le cadre de la définition de Brønsted ; à quelle nouvelle définition des acides et des bases cela conduit.
4. On s'intéresse à l'amine citée à la fin du document :
  - a) Ecrire sa formule semi-développée, et donner son nom usuel.
  - b) Ecrire l'équation de sa réaction avec le chlorure d'hydrogène, en mettant en évidence son caractère basique selon la définition de Brønsted.
  - c) Ecrire le symbole du couple Acide / Base de cette amine.
5. Apporter plus d'éclairages à la dernière phrase du document.

1. Non.
2. Définition de Brønsted.
3. Selon la définition de Brønsted, une base est toute entité capable de capter un ion  $H^+$  au cours d'une réaction chimique ; une amine en est capable grâce au doublet non liant de son atome N, qu'il partage avec un ion  $H^+$  cherchant à satisfaire la règle du duet. Cela conduit à la définition de Lewis.
4.
  - a)  $H_3C-NH-CH_3$  diméthylamine
  - b)
 
$$HCl \longrightarrow H^+ + Cl^-$$

$$C_2H_6NH + H^+ \longrightarrow C_2H_6NH_2^+ \quad ; \text{ gain d'ion } H^+ : \text{ base de Brønsted}$$


---


$$C_2H_6NH + HCl \longrightarrow C_2H_6NH_2^+ + Cl^-$$
  - c)  $C_2H_6NH_2^+ / C_2H_6NH$
5.
  - \* Si l'amine comporte 3 groupes alkyles ; elle est tertiaire, et elle est la moins basique à cause de l'encombrement autour de l'atome N qui rend son doublet non liant difficilement accessible.
  - \* Si elle comporte 2 groupes alkyles ; elle est secondaire, et elle est la plus basique.
  - \* Avec un seul groupe alkyle ; elle est primaire, et sa basicité est intermédiaire entre celles des amines III et II.

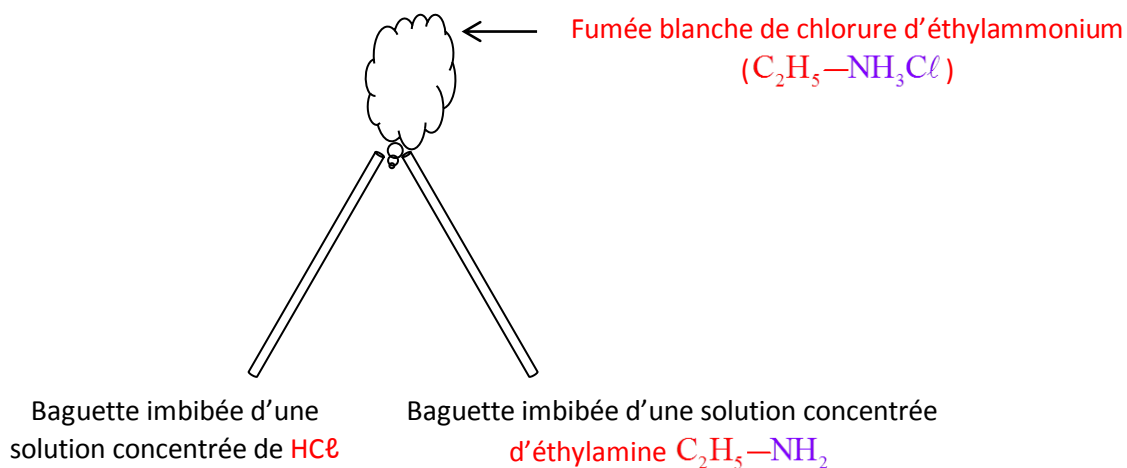
## 2) Action sur les acides

En tant que bases, les amines peuvent réagir avec des acides :

### a) Exemple-1

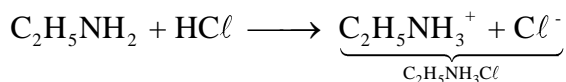
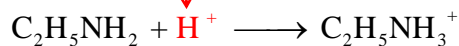
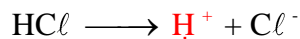
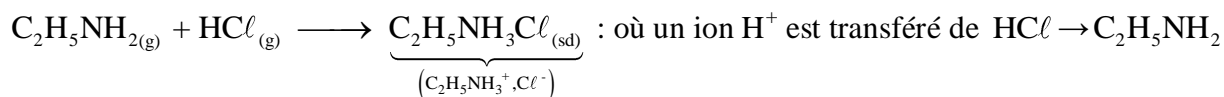
- \* Expérience (Fig-7)

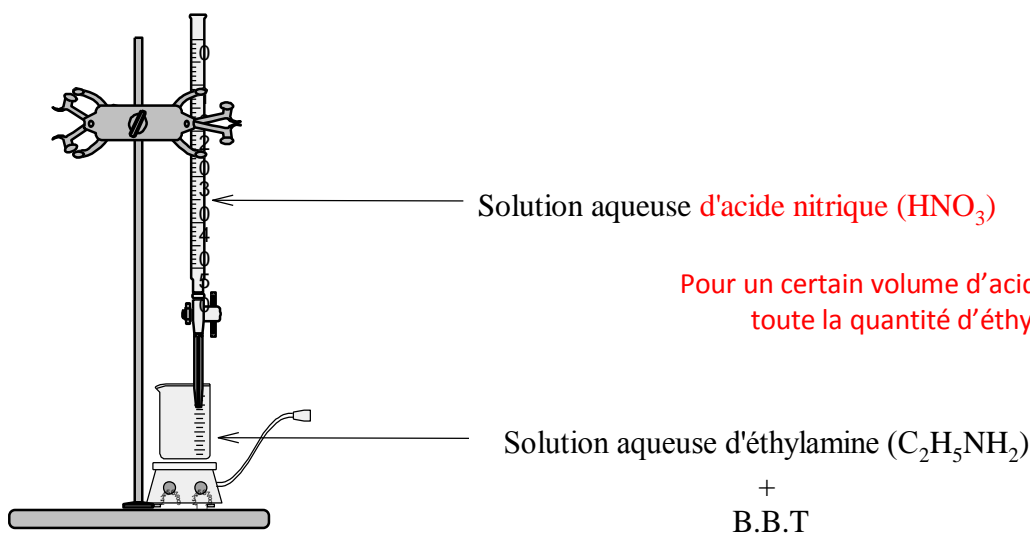
Figure-7



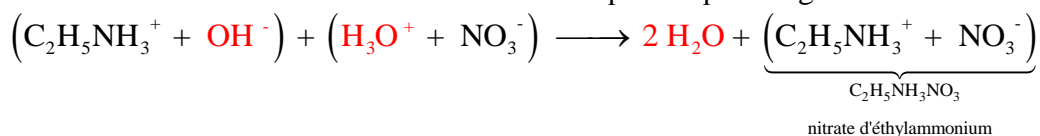
\* Interprétation

Le  $C_2H_5NH_3Cl$  est un composé ionique, il s'est formé selon l'équation


**b) Exemple-2**

 \* Expérience (Fig-8)
**Figure-8**

 \* Interprétation

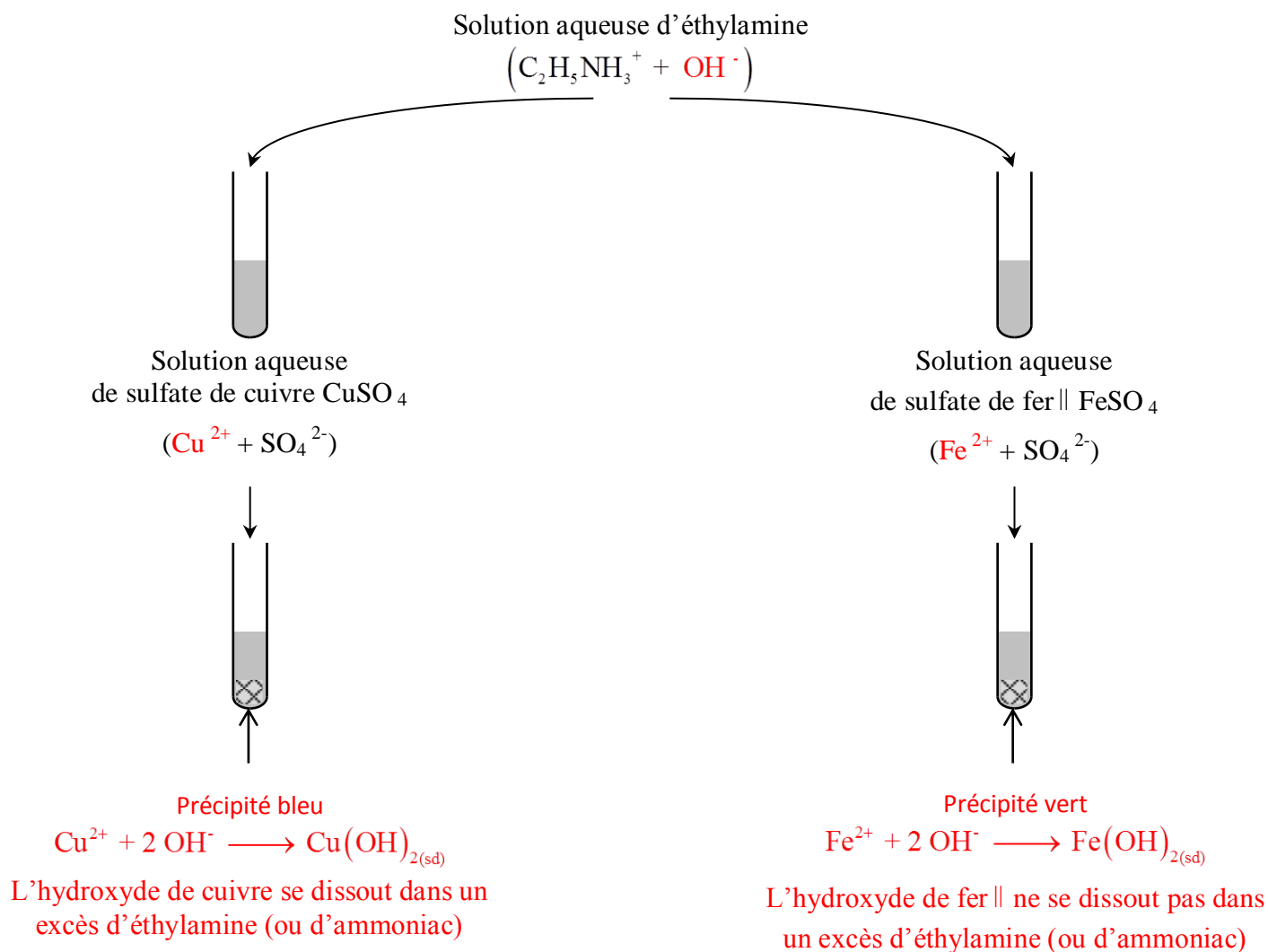
C'est une réaction de neutralisation acido-basique d'équation globale :



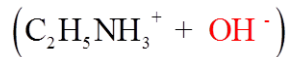
### 3) Action sur les cations métalliques

En tant que bases, les amines peuvent précipiter des cations métalliques ; exemples : (Fig-9)

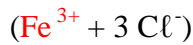
Figure-9



## Solution aqueuse d'éthylamine



Solution aqueuse  
de chlorure de fer III  $\text{FeCl}_3$

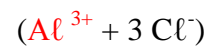


Précipité rouille



L'hydroxyde de fer III ne se dissout pas dans un excès d'éthylamine (ou d'ammoniac)

Solution aqueuse  
de chlorure d'aluminium  $\text{AlCl}_3$



Précipité blanc insoluble dans l'ammoniac



L'hydroxyde d'aluminium ne se dissout pas dans un excès d'éthylamine

## II- Réaction distinctive des trois classes d'amines : réaction avec l'acide nitreux ( $\text{HNO}_2$ )

### 1) Cas des amines primaires

#### a) Exemple

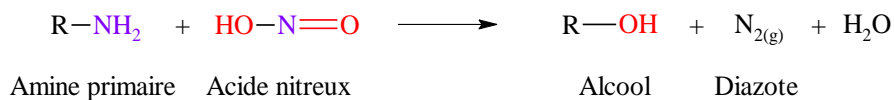


méthylamine      Acide nitreux                      méthanol

Le groupe ( $-\text{NH}_2$ ) est substitué en fin par un groupe ( $-\text{OH}$ ).

#### b) Généralisation

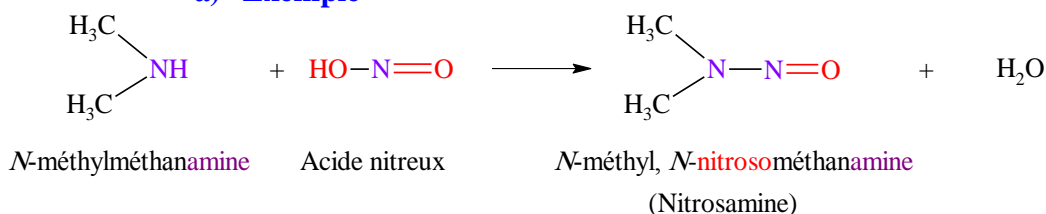
Une amine primaire  $\text{R}-\text{NH}_2$  réagit avec l'acide nitreux pour donner un alcool  $\text{R}-\text{OH}$ , un dégagement de diazote, et de l'eau.





## 2) Cas des amines secondaires

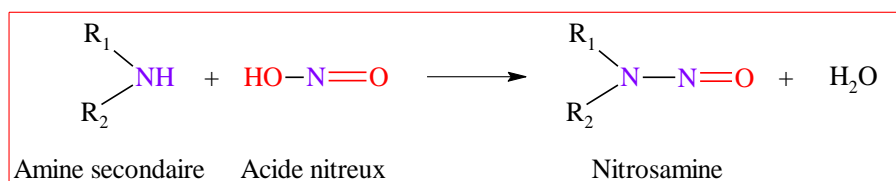
### a) Exemple



L'atome H unique sur l'azote est substitué en fin par un groupe nitroso (—N = O).

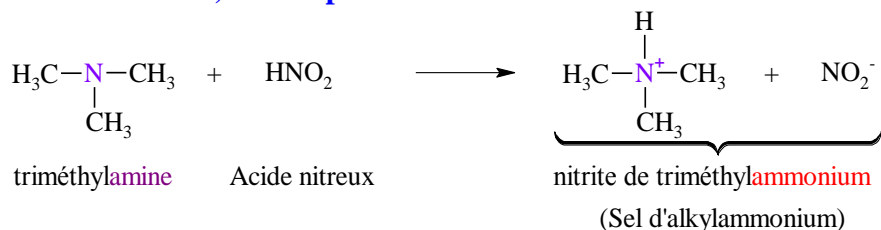
### b) Généralisation

Une amine secondaire  $\text{R}_1-\text{NH}_2-\text{R}_2$  réagit avec l'acide nitreux pour donner de l'eau et une nitrosamine : précipité ou couche huileuse jaune.



## 3) Cas des amines tertiaires

### a) Exemple



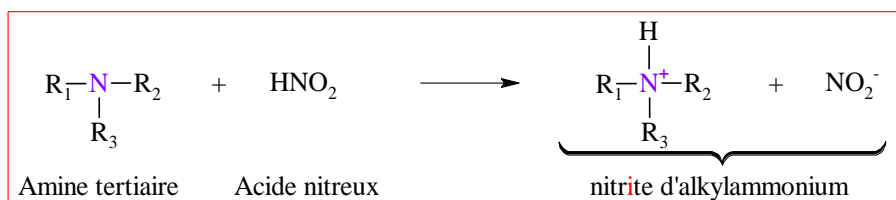
Un proton  $\text{H}^+$  est fixé en fin sur l'atome d'azote.

### b) Généralisation

Une amine tertiaire  $\text{R}_1-\text{N}-\text{R}_2$  réagit avec l'acide nitreux pour donner un sel l'alkylammonium :

$\text{R}_3$

Visuellement, rien n'est observé.



**Récapitulation****Réactivité chimique des amines**

Ionisation dans l'eau		
		$R-NH_2 + H_2O \rightleftharpoons R-NH_3^+ + OH^-$
		$R_1-NH-R_2 + H_2O \rightleftharpoons R_1-NH_2^+-R_2 + OH^-$
		$R_1-\underset{\substack{  \\ R_3}}{N}-R_2 + H_2O \rightleftharpoons R_1-\underset{\substack{  \\ R_3}}{NH^+}-R_2 + OH^-$
Réaction distinctive des trois classes (avec l'acide nitreux)		
Amine primaire	Dégagement gazeux de diazote	$R-NH_2 + HO-N=O \longrightarrow R-OH + N_{2(g)} + H_2O$ Diazote
Amine secondaire	Précipité ou couche huileuse jaune de Nitrosamine	$\begin{array}{c} R_1 \\ \diagdown \\ NH \\ \diagup \\ R_2 \end{array} + HO-N=O \longrightarrow \begin{array}{c} R_1 \\ \diagdown \\ N-N=O \\ \diagup \\ R_2 \end{array} + H_2O$ Nitrosamine
Amine Tertiaire	Rien n'est observé visuellement	$R_1-\underset{\substack{  \\ R_3}}{N}-R_2 + HNO_2 \longrightarrow \underbrace{\begin{array}{c} H \\   \\ R_1-\overset{+}{N}-R_2 \\   \\ R_3 \end{array}} + NO_2^-$ nitrite d'alkylammonium

**Application-3**

On s'intéresse aux **monoamines aliphatiques saturées**, de même masse molaire  $M = 59 \text{ g.mol}^{-1}$ .

- Déterminer leur formule brute. On donne  $H = 1$ ,  $C = 12$  et  $N = 14$ .
- Ecrire les formules semi-développées possibles correspondant à cette formule; donner la classe et le nom (systématique & usuel) de chaque amine.
- L'une de ces amines réagit avec l'acide nitreux, sans que l'on observe quoi que ce soit visuellement :
  - Identifier cette amine.
  - Ecrire l'équation de la réaction.
- Parmi les amines restantes, il y en a une qui donne une couche huileuse jaune par réaction avec l'acide nitreux :
  - Identifier cette amine.
  - A quelle famille appartient ce produit huileux jaune ; donner sa formule semi-développée, et son nom.
- Soient A et B les amines restantes ; elles réagissent avec l'acide nitreux, en donnant des produits A' et B' respectivement :
  - Sachant que B' est un alcool secondaire ; identifier l'amine B, et écrire l'équation de la réaction.
  - Identifier l'amine A.
- On prépare une solution aqueuse de l'amine A, de concentration  $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$  :
  - Un pH-mètre dont la sonde est plongée dans la solution indique  $\text{pH} = 11,8$  : vérifier que cette amine est une base faible. On donne  $K_e = 10^{-14}$ , à la température de l'expérience.
  - Ecrire l'équation d'ionisation de l'amine A dans l'eau.

$$1. M(C_nH_{2n+3}N) = 59 \text{ g.mol}^{-1} \Rightarrow 12n + 2n + 3 + 14 = 59 \Leftrightarrow 14n = 59 - 17 = 42 \Leftrightarrow n = \frac{42}{14} = 3$$

D'où la formule brute :  $C_3H_9N$

2.

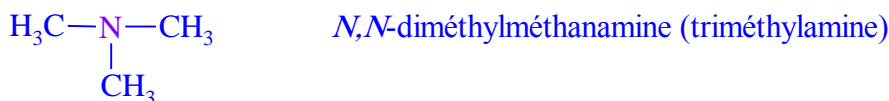
\* Classe I :



\* Classe II :



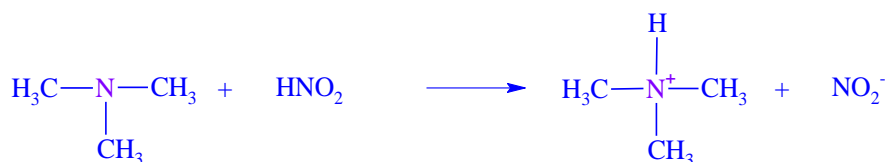
\* Classe III :



3.

a) C'est l'amine tertiaire : triméthylamine.

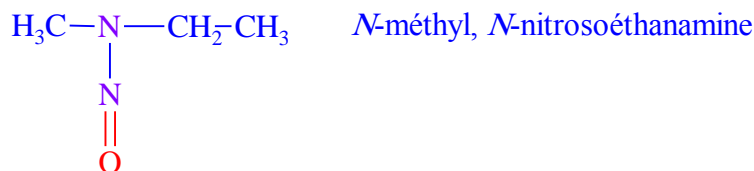
b)



4.

a) C'est l'amine secondaire : éthylméthylamine

b) Le produit de la réaction est une nitrosamine :



5. Les amines restantes sont I ; elles donnent des alcools avec l'acide nitreux :

La propylamine donne  $H_3C-CH_2-CH_2-OH$  : alcool I

L'isopropylamine donne  $\begin{array}{c} OH \\ | \\ H_3C-CH-CH_3 \end{array}$  : alcool II (B')

a) B est l'isopropylamine :



b) A est la propylamine.

6.

$$a) [OH^-] = \frac{K_e}{[H_3O^+]} = \frac{K_e}{10^{-pH}} = \frac{10^{-14}}{10^{-11,8}} \approx 0,006 < C : \text{c'est une base faible.}$$



## TP 4 : Détermination expérimentale de la classe d'une amine

### Objectif :

- Déterminer la classe d'une amine par recours à la réaction avec l'acide nitreux.

### Matériel :

- 3 Erlenmeyers (notés A, B, C au hasard) ;
  - L'un contient ~ 1 mL d'éthylamine
  - L'un contient ~ 1 mL de diméthylamine
  - L'un contient ~ 1 mL de triméthylamine
- HCl concentré.
- NaNO<sub>2</sub>.
- Papier amidon-ioduré
- 1 Pissette d'eau distillée.
- 1 Cristalliseur, rempli de glace.
- 4 Erlenmeyers.
- 1 Eprouvette de 25 mL.
- 1 Ampoule de coulée.
- 1 Pipette graduée, avec propipette.
- 1 Spatule.
- 1 Balance électronique.
- 1 Thermomètre

### Manipulation :

Un échantillon de chacune des amines suivantes a été versé au hasard dans l'un des erlenmeyers A, B et C :  
**éthylamine ; diméthylamine ; et triméthylamine.**

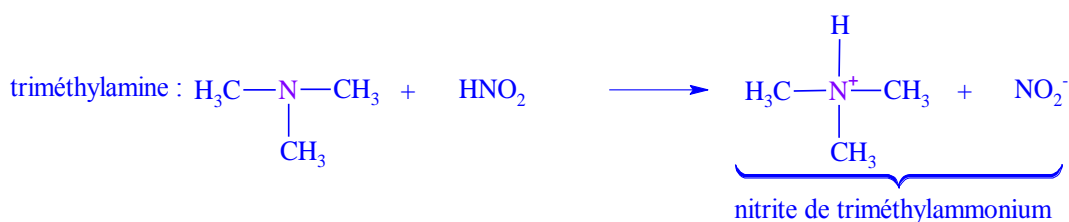
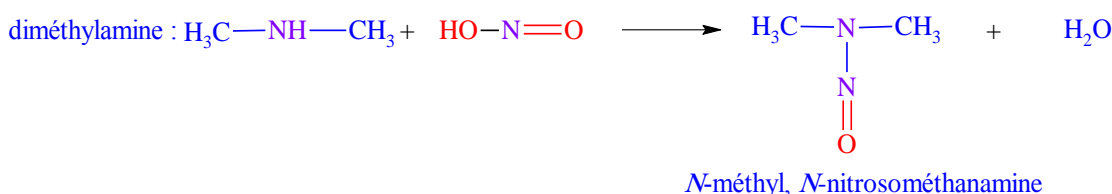
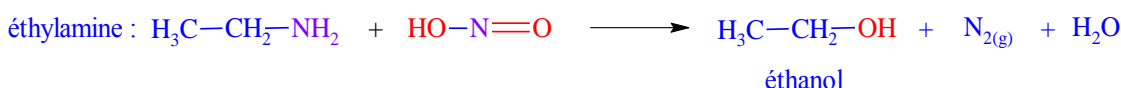
- Ecrire la formule semi-développée de chacune de ces amines, et donner sa classe.

éthylamine :  $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{NH}_2$  Primaire

diméthylamine :  $\text{H}_3\text{C}-\text{NH}-\text{CH}_3$  Secondaire

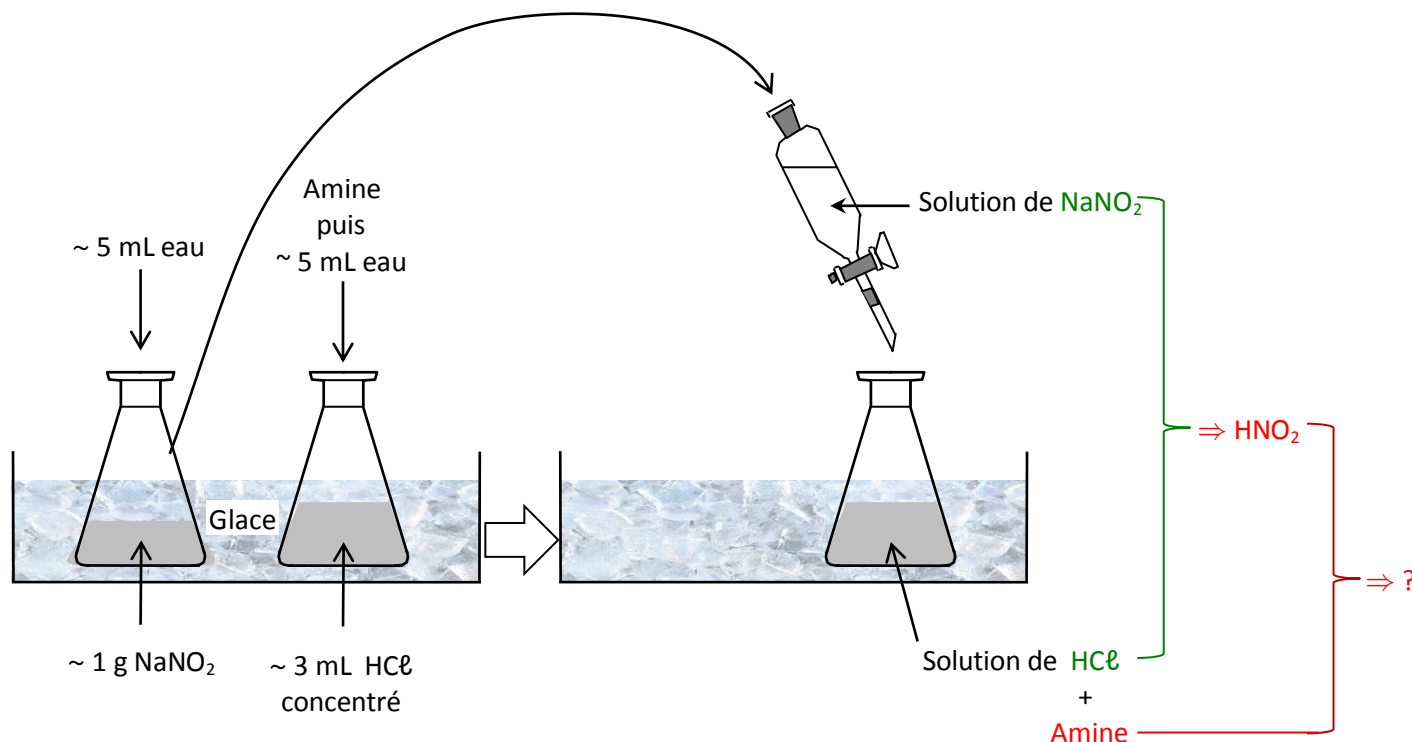
triméthylamine :  $\text{H}_3\text{C}-\underset{\text{CH}_3}{\text{N}}-\text{CH}_3$  Tertiaire

- Ecrire l'équation de la réaction de chaque amine avec l'acide nitreux, et donner le nom du produit principal



3. Réaliser l'expérience de la figure ci-dessous pour chacune des amines A, B et C ; et noter le résultat observé, dans le tableau suivant:

Amine	A	B	C
Résultat de la réaction avec $\text{HNO}_2$			
Dégagement d'un gaz		×	
Formation d'une nouvelle phase	×		
Rien n'est observé			×



Attendre que les mélanges se refroidissent  
Vérifier au thermomètre, que leur température est proche de  $0^\circ\text{C}$

### Principe

- \* L'acide nitreux  $\text{HNO}_2$  est un composé instable ; on le prépare donc au sein du milieu réactionnel (in situ), en réagissant une solution aqueuse de nitrite de sodium ( $\text{NaNO}_2$ ) avec une solution aqueuse d'acide fort ( $\text{HCl}$ ) à une température proche de  $0^\circ\text{C}$ .
- \* Le  $\text{HNO}_2$  ainsi produit, réagit avec l'amine déjà dissoute dans la solution d'acide chlorhydrique.

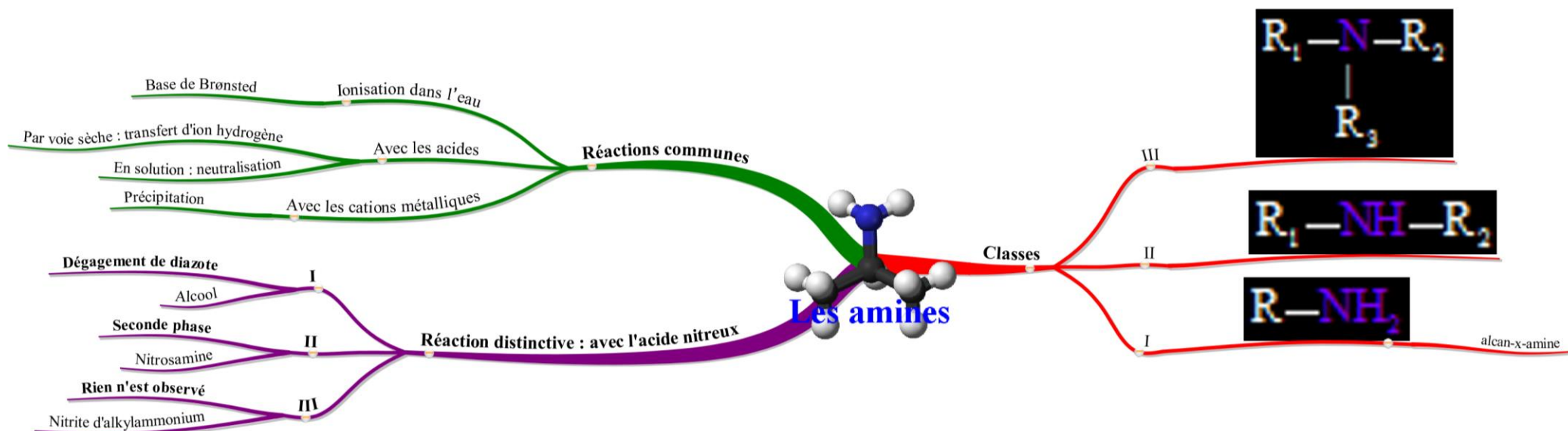
### Mode opératoire

- \* Verser la solution glacée de  $\text{NaNO}_2$  goutte à goutte, puis attendre près de 5 min avant d'examiner le résultat.
- \* Entre-temps ; vérifier, à l'aide d'un papier amidon-ioduré, que la quantité ajoutée de  $\text{NaNO}_2$  était suffisante (virage immédiat au bleu du papier).  
Si ce n'est pas le cas ; ajouter un peu d'une nouvelle solution de  $\text{NaNO}_2$  et vérifier de nouveau.
- \* NB malgré toutes ces précautions, il se peut qu'une quantité de  $\text{HNO}_2$  se décompose en dégageant une vapeur rousse de dioxyde d'azote ; n'y faire aucun cas.

4. Compléter :

- L'amine A, a donné une nouvelle phase de nitrosamine ; c'est une amine II  $\Rightarrow$  A : diméthylamine.
- L'amine B, a donné un dégagement de gaz  $\text{N}_2$  ; c'est une amine I  $\Rightarrow$  B : éthylamine.
- L'amine C, n'a donné rien d'observable visuellement ; c'est une amine III  $\Rightarrow$  C : triméthylamine.

5. Rincer la verrerie utilisée, et arranger le matériel tel que vous l'avez trouvé.



**Chapitre-5 : Les acides aminés aliphatiques saturés & les protéines****Objectifs**

- Distinguer par leurs structures, entre un acide  $\alpha$  aminé, un acide  $\beta$  aminé et un acide  $\gamma$  aminé.
- Reconnaître et nommer un acide  $\alpha$  aminé.
- Reconnaître un carbone asymétrique et définir une molécule chirale.
- Distinguer entre les isomères optiques L et D d'un acide  $\alpha$ -aminé.
- Reconnaître le caractère amphotère d'un acide  $\alpha$ -aminé.
- Décrire la liaison peptidique.
- Distinguer entre polypeptides et protéines.
- Distinguer entre une structure primaire, secondaire, tertiaire et quaternaire d'une protéine.

**Prérequis**

- Représentation d'un composé organique par une formule semi-développée.
- Notion d'hydrocarbure aliphatique.
- Notion de chaîne carbonée saturée, groupe alkyle.
- Les acides carboxyliques, nomenclature et propriétés du groupe carboxyle.
- Les amines, propriétés du groupe amine.
- Notion d'électrolyte ; électrolyte fort, électrolyte faible.
- Acides et bases selon Brønsted, entité amphotère.
- Solutions aqueuses d'acide; action du BBT, pH et acidité.

**Matériel**

- |                        |                            |
|------------------------|----------------------------|
| * Modèles moléculaires | * 4 Fils de connexion      |
| * Miroir               | * pH-mètre                 |
| * Générateur           | * Papier filtre            |
| * Interrupteur         | * Pissette d'eau distillée |
| * Electrolyseur        | * BBT                      |
| * Ampèremètre          | * Glycine                  |

# I- Les acides aminés

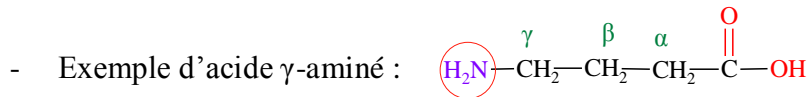
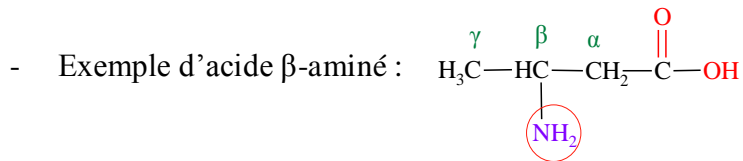
## 1) Exemples (Fig-1)

Figure-1

	(a)	(a')	(b)	(b')	(c)	(c')
<b>Modèle moléculaire</b>						
<b>Formule semi-développée</b>	$\begin{array}{c} \alpha \\ \text{H}-\text{HC}-\text{C}-\text{OH} \\   \quad   \\ \text{NH}_2 \quad 1 \end{array}$		$\begin{array}{c} \beta \quad \alpha \\ \text{H}_3\text{C}-\text{HC}-\text{C}-\text{OH} \\   \quad   \\ \text{NH}_2 \quad 1 \end{array}$		$\begin{array}{c} \gamma \quad \beta \quad \alpha \\ \text{H}_3\text{C}-\text{HC}-\text{HC}-\text{C}-\text{OH} \\   \quad   \quad   \\ \text{CH}_3 \quad \text{NH}_2 \quad 1 \end{array}$	
<b>Représentation de Cram</b>						
<b>Représentation de Fischer</b>						
<b>Nom IUPAC</b>	acide aminoéthanoïque		acide L-2-aminoprpanoïque	acide D-2-aminoprpanoïque	acide L-2-amino-3-méthyl butanoïque	acide D-2-amino-3-méthyl butanoïque
<b>Nom usuel</b>	Glycine (glycocolle)		L-alanine	D-alanine	L-valine	D-valine
<b>Code</b>	Gly		Ala		Val	



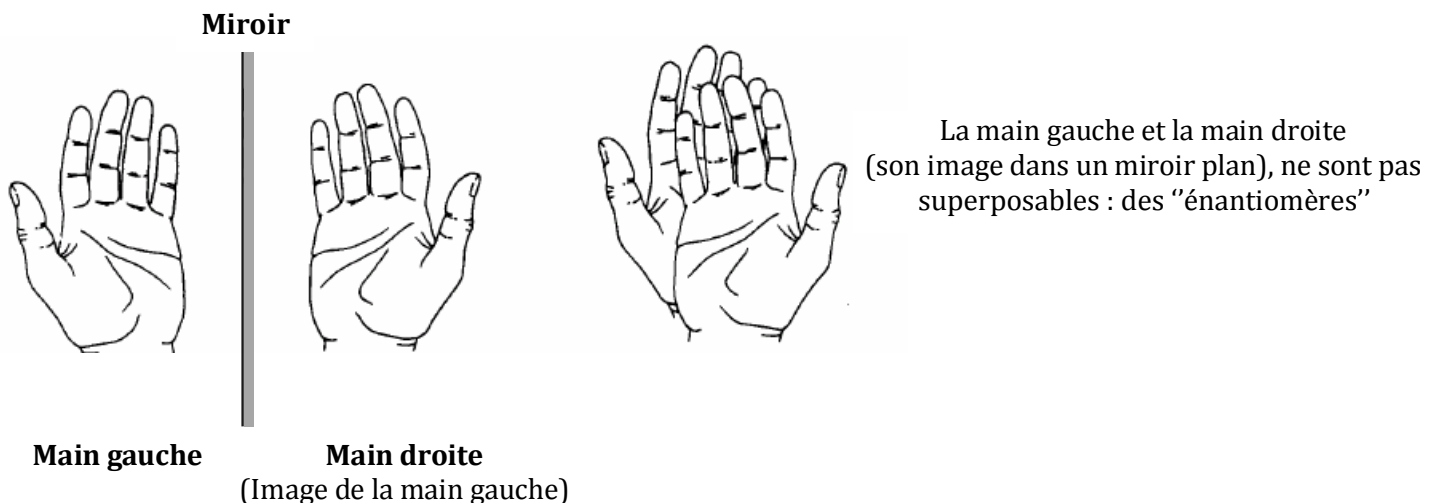
- \* Ces composés sont des acides aminés : ils ont tous un groupe carboxyle ( $-\text{COOH}$ ), et un groupe amine ( $-\text{NH}_2$ ).
- \* Ils ont tous, le groupe amine sur le carbone le plus proche du groupe carboxyle (carbone en  $\alpha$ ) ; ils sont dits acides  $\alpha$ -aminés. En s'éloignant du groupe carboxyle, les carbones sont notés dans l'ordre  $\beta$ ,  $\gamma$ ... etc



- \* Excepté l'acide  $\alpha$ -aminé le plus simple (a/a'), les autres ont leur carbone  $\alpha$  lié à 4 groupes différents ; il est asymétrique ( $\text{C}^*$ ) : la molécule n'est pas superposable à son image dans un miroir plan (b/b' et c/c'), elle est dite chirale. Elle constitue avec son image des isomères optiques, ou énantiomères. (Fig-2)

Figure-2

Une main est un objet "chiral"



- \* La représentation de Fischer permet de représenter simplement une molécule chirale d'acide  $\alpha$ -aminé :
  - Le carbone asymétrique est à l'intersection des deux lignes, et n'est pas représenté.
  - La ligne verticale porte en haut le groupe ( $-\text{COOH}$ ), et représente les liaisons du  $\text{C}^*$  qui sont derrière le plan de la figure.
  - La ligne horizontale porte le groupe ( $-\text{NH}_2$ ), et représente les liaisons du  $\text{C}^*$  qui sont en avant du plan de la figure.

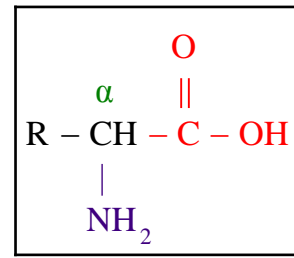
On se limitera aux acides  $\alpha$ -aminés, dont la chaîne carbonée est ouverte (aliphatiques) et ne comporte que des liaisons simples Carbone-Carbone (saturés).

## 2) Généralisation

### a) Définition

Un acide aminé aliphatique saturé est un composé organique qui renferme à la fois le groupe carboxyle ( $-\text{COOH}$ ) et le groupe amine ( $-\text{NH}_2$ ); si ce dernier est greffé sur le carbone en  $\alpha$  (voisin du groupe

carboxyle), l'acide est dit  $\alpha$ -aminé : sa formule générale est de la forme



, où R est un

radical alkyle (ou un atome H).

Dans les conditions ordinaires ; la plupart des acides  $\alpha$ -aminés sont des solides incolores, solubles dans l'eau. Leur solubilité dépend du radical R.

### b) Chiralité et isomérisation optique

Excepté l'acide aminoéthanoïque (R est un H), toutes les molécules d'acide  $\alpha$ -aminé ont leur carbone  $\alpha$  asymétrique ; elles sont donc chirales.

Ainsi à une même formule semi-développée correspondent 2 configurations spatiales différentes, l'une est l'image de l'autre dans un miroir plan, et qui ne sont pas superposables : énantiomères, ou isomères optiques

- \* L'énantiomère dont le groupe amine est à gauche dans la représentation de Fischer, est noté L (Lévogyre) ; la molécule possède une configuration L.
- \* L'énantiomère dont le groupe amine est à droite dans la représentation de Fischer, est noté D (Dextrogyre) ; la molécule possède une configuration D.

(Astuce : L-Left, D-Droit)

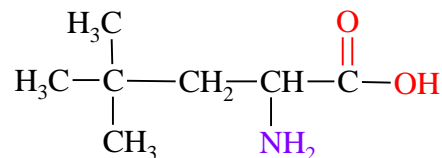
Rq Deux énantiomères ont les mêmes propriétés physiques et chimiques, sauf celles qui font intervenir la chiralité comme certaines propriétés optiques et les réactions enzymatiques. Tous les acides  $\alpha$ -aminés présents dans les êtres vivants ont la configuration L.

### c) Nomenclature

Le nom dérive de celui de l'acide carboxylique correspondant, en désignant le groupe amine par le préfixe « amino » précédé de son indice de position sur la chaîne principale. Et si la configuration L ou D de la molécule est connue, on l'indique dans le nom à la suite du mot "acide".

#### Application-1

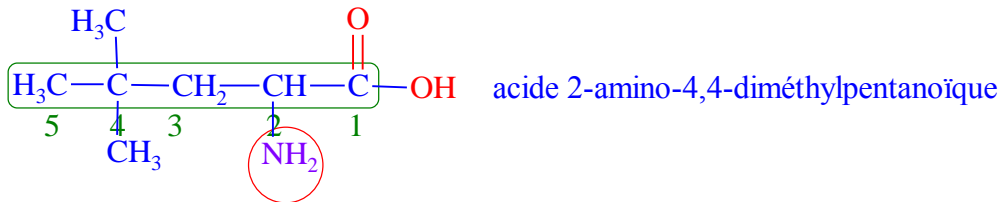
1. On considère l'acide  $\alpha$ -aminé dont la formule semi-développée est la suivante :



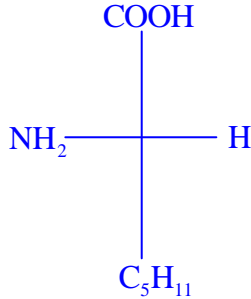
- a) Ecrire son nom.
  - b) Faire la représentation de Fischer de ses énantiomères, et écrire leurs noms.
2. La L-leucine (Leu) est l'un des acides  $\alpha$ -aminés essentiels pour la santé, dont un adulte de 70 kg a besoin d'au moins 2,94 g par jour ; on l'obtient de différents aliments : lait, œufs, viande, maïs, riz, blé... Son nom systématique est : **acide L-2-amino-4-méthylpentanoïque**
- a) Ecrire la formule semi-développée de la leucine.
  - b) Faire la représentation de Fischer de la L-leucine.

1.

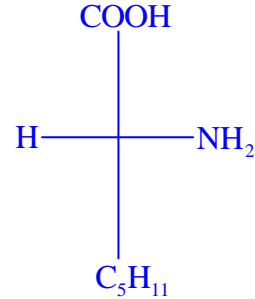
a)



b)



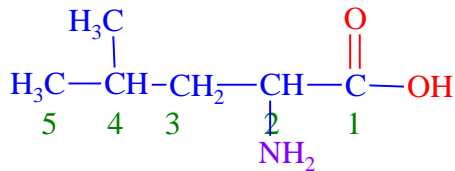
acide L-2-amino-4,4-diméthylpentanoïque



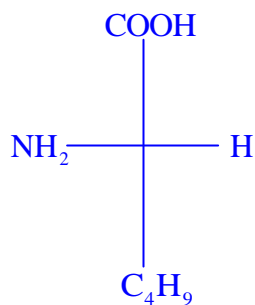
acide D-2-amino-4,4-diméthylpentanoïque

2.

a)



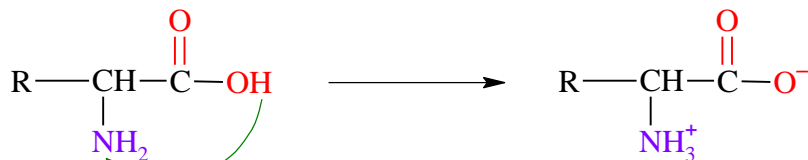
b)



### 3) Propriétés chimiques des acides $\alpha$ -aminés

#### a) Nature zwitterionique des acides $\alpha$ -aminés

Un acide  $\alpha$ -aminé renferme un groupe acide ( $-\text{COOH}$ ) et un groupe basique ( $-\text{NH}_2$ ) ; un proton  $\text{H}^+$  tend à se transférer du groupe carboxyle au groupe amine :

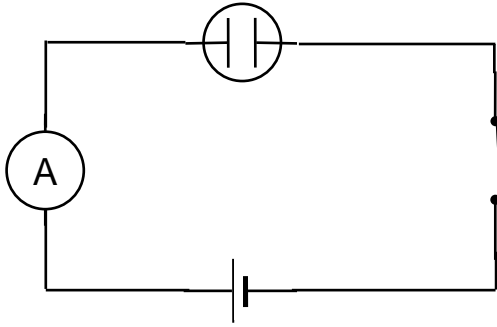


Zwitterion (amphion)

Le zwitterion est globalement neutre, mais il porte des charges opposées à ses extrémités : ion dipolaire.

En fait, à l'état solide, les acides  $\alpha$ -aminés se présentent uniquement sous forme de zwitterion.

Cela explique leur température de fusion élevée, de l'ordre de celles des composés ioniques ( $> 200^\circ\text{C}$ ).

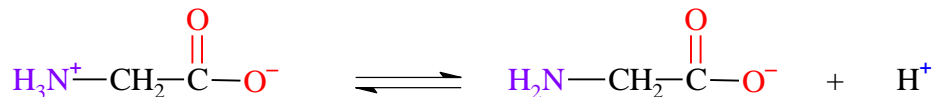
**b) Ionisation dans l'eau, et propriétés acido-basiques****i. Expérience (Fig-3)****Figure-3**

- \* L'électrolyseur contient de l'eau distillée : l'ampèremètre indique le passage d'un courant très faible.
- \* On y ajoute de la glycine (additif alimentaire E640) : elle se dissout, et l'indication de l'ampèremètre augmente légèrement.
- \* Du BBT ajouté à la solution, vire au jaune verdâtre.
- \* La mesure du pH de la solution donne ~ 6

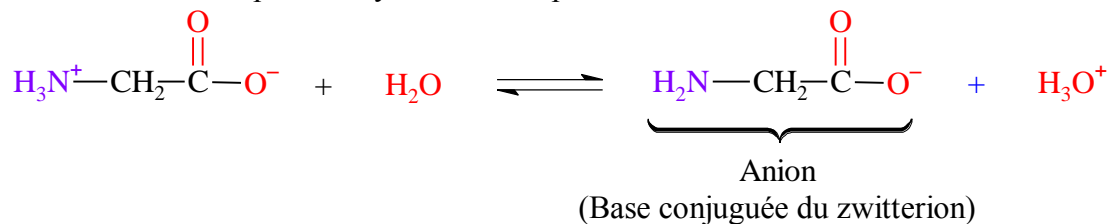
**ii. Interprétation**

- \* La conduction électrique d'une solution nécessite qu'elle contienne des anions et des cations ; les zwitterions ne sont ni anions ni cations, ils ne peuvent assurer la conduction électrique de la solution de glycine  $\Rightarrow$  il y a des anions et des cations formés, en très faible quantité, à partir des zwitterions lorsque la glycine est dissoute dans l'eau :

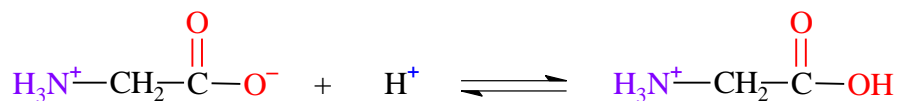
- Le zwitterion manifeste un caractère acide de Brønsted par son groupe ( $-\text{NH}_3^+$ )



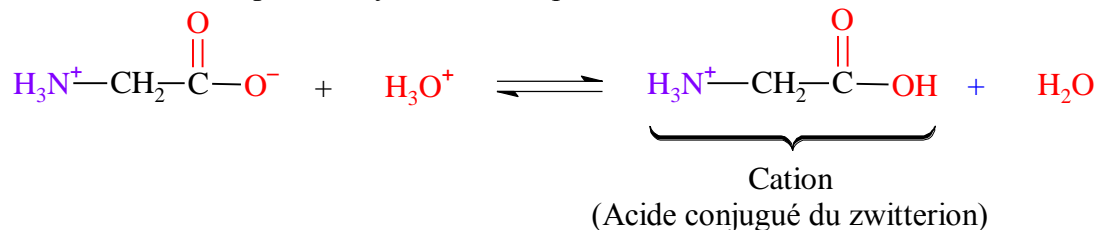
soit, en tenant compte de l'hydratation du proton  $\text{H}^+$  ;



- Le zwitterion manifeste un caractère basique de Brønsted par son groupe ( $-\text{COO}^-$ )



soit, en tenant compte de l'hydratation du proton  $\text{H}^+$  ;



$\Rightarrow$  La glycine est un amphotère.

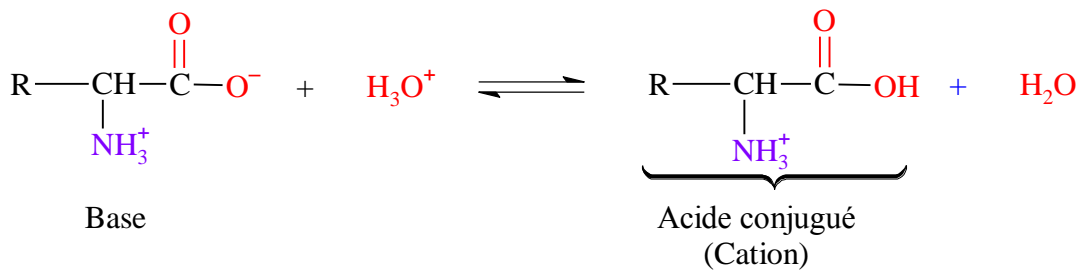
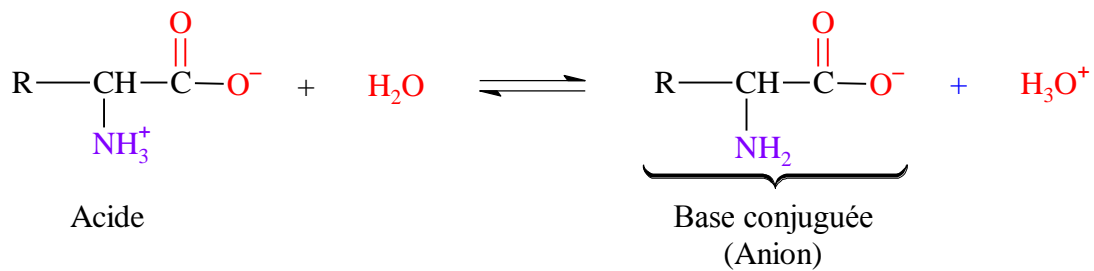
- \* La très faible conductibilité électrique de la solution prouve que ces réactions sont très limitées ; par suite la glycine continue à exister en solution aqueuse sous forme de zwitterions majoritairement.
- \* Le caractère légèrement acide de la solution est due au fait que le caractère acide du zwitterion l'emporte légèrement sur son caractère basique (la 1<sup>ère</sup> réaction est moins limitée que la seconde).

### iii. Généralisation

\* En solution aqueuse, un acide  $\alpha$ -aminé  $\text{R}-\underset{\text{NH}_2}{\text{CH}}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{OH}$  continue à exister pratiquement sous

forme de zwitterion  $\text{R}-\underset{\text{NH}_3^+}{\text{CH}}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{O}^-$  ; c'est un amphotère qui donne lieu à de très faibles quantités

d'anions et de cations :



Le pH de la solution dépend de laquelle de ces réactions est moins limitée.

\* Si l'acide  $\alpha$ -aminé est dissout dans un milieu très acide ( $\text{pH} \ll \text{pI}$ ) ; il se comporte comme une base,

et il se trouvera majoritairement sous forme de cations :  $\text{R}-\underset{\text{NH}_3^+}{\text{CH}}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{OH}$

\* Pour chaque acide  $\alpha$ -aminé, il y a une valeur particulière de pH du milieu dans lequel il est dissout, où il se comporte aussi bien comme acide et comme base, mais de façon très limitée :

il se trouve majoritairement sous forme zwitterionique :  $\text{R}-\underset{\text{NH}_3^+}{\text{CH}}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{O}^-$

Ce pH est son point isoélectrique. ( $\text{pI}$ ) (Fig-4)

\* Si l'acide  $\alpha$ -aminé est dissout dans un milieu très basique ( $\text{pH} \gg \text{pI}$ ) ; il se comporte comme un acide,

et il se trouvera majoritairement sous forme d'anions :  $\text{R}-\underset{\text{NH}_2}{\text{CH}}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{O}^-$

Figure-4

Acide $\alpha$ -aminé	Formule semi-développée	pI
Glycine	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{H}-\text{CH}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{NH}_2 \end{array}$	5,97
Alanine	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{H}_3\text{C}-\text{CH}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{NH}_2 \end{array}$	6,02
Valine	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{H}_3\text{C}-\text{CH}-\text{CH}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{NH}_2 \end{array}$	5,97
Leucine	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{H}_3\text{C}-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{NH}_2 \end{array}$	5,98
Isoleucine	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{NH}_2 \end{array}$	6,02

**Application-2**

La masse molaire d'un acide  $\alpha$ -aminé est  $M = 89 \text{ g.mol}^{-1}$ .

- Déterminer sa formule semi-développée, et écrire son nom systématique.  
On donne C = 12, O = 16, N = 14, H = 1
- On dissout cet acide  $\alpha$ -aminé dans un milieu de  $\text{pH} = 6,02$  ; il se présente majoritairement sous forme de zwitterion :
  - Que dit-on de cette valeur de pH.
  - Donner la formule du zwitterion correspondant à cet acide  $\alpha$ -aminé.
  - Donner les couples Acide / Base de ce zwitterion.
- Donner la forme prépondérante de cet acide  $\alpha$ -aminé dans un milieu de  $\text{pH} = 1$ .
- Donner la forme prépondérante de cet acide  $\alpha$ -aminé dans un milieu de  $\text{pH} = 12$ .

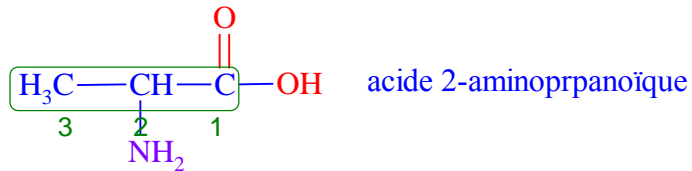
- La formule générale d'un acide  $\alpha$ -aminé étant
 
$$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{R}-\text{CH}-\text{C}-\text{OH} \\ | \\ \text{NH}_2 \end{array}$$

où R est un groupe alkyle  $-\text{C}_n\text{H}_{2n+1}$  :

$$M = M(\text{R}) + (12 \cdot 2) + (16 \cdot 2) + (14) + (4) = M(\text{R}) + 74 \Rightarrow M(\text{R}) = M - 74 = 89 - 74 = 15 \text{ g.mol}^{-1}$$

$$\text{Or } M(\text{R}) = (12 \cdot n) + (2n + 1) = 14n + 1, \text{ alors } 14n + 1 = 15 \Leftrightarrow 14n = 14 \Leftrightarrow n = 1$$

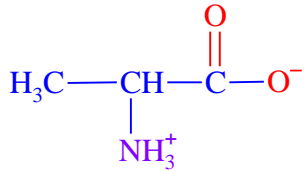
D'où la formule semi-développée :



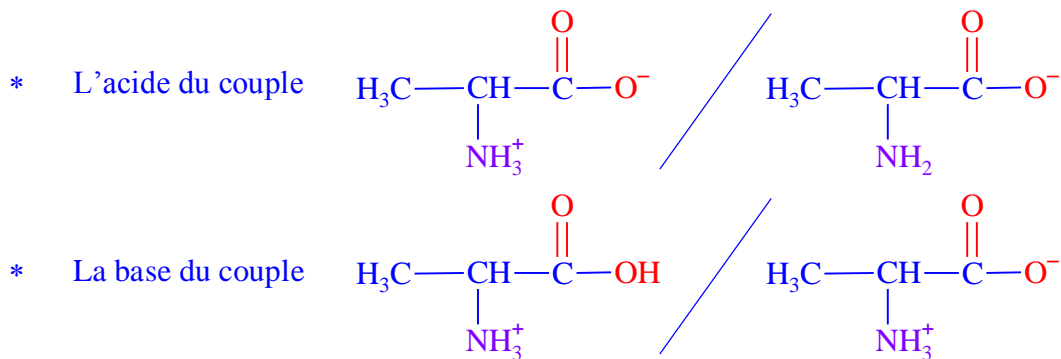
2.

a) 6,02 est le point isoélectrique (pI) de l'acide 2-aminopropanoïque

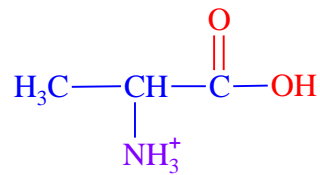
b)



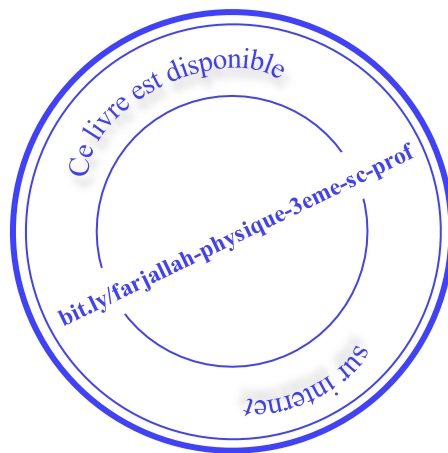
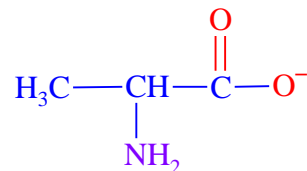
c) Ce zwitterion est un amphotère, il est :



3.  $\text{pH} \ll \text{pI}$  : le milieu est très acide; la forme prépondérante est



4.  $\text{pH} \gg \text{pI}$  : le milieu est très basique; la forme prépondérante est



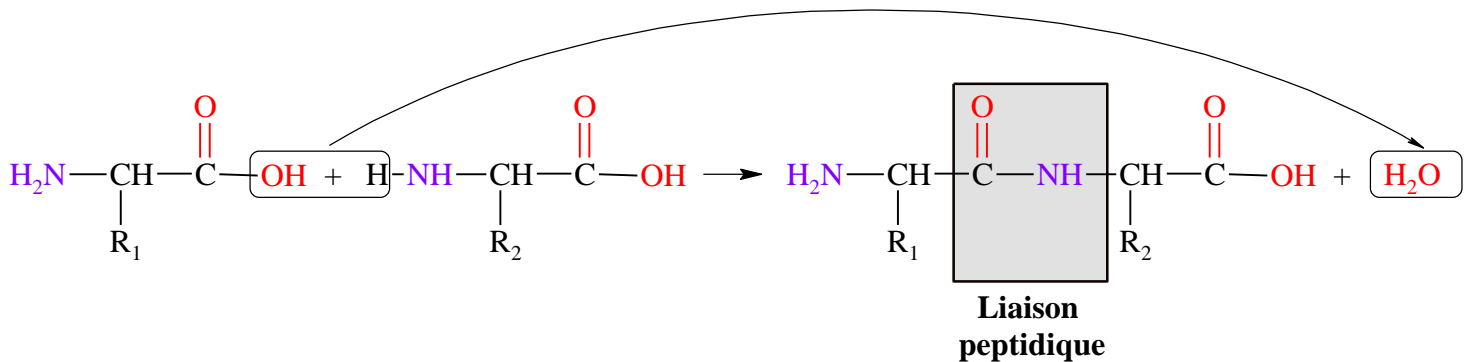
## II- Des acides $\alpha$ -aminés aux protéines

Parmi plus de 300 acides aminés naturels, l'organisme utilise une vingtaine pour ses différentes activités ; en particulier pour synthétiser des protéines.

On connaît aujourd'hui plus de 100 000 protéines différentes; ce sont des macromolécules synthétisées dans les cellules par association d'acides aminés, pour différentes fins telles que la catalyse enzymatique, le transport de matière (hémoglobine), la transmission de messages, la reconnaissance des intrus (immunoglobuline)...etc Il y a des protéines qui ne sont pas formées seulement d'acides aminés, elles sont dites hétéroprotéines.

### 1) La liaison peptidique

L'association d'acides  $\alpha$ -aminés se fait par liaison peptidique (amide) : union de deux acides aminés par liaison covalente entre le groupe carboxyle d'un acide  $\alpha$ -aminé et le groupe amine d'un autre acide  $\alpha$ -aminé, en éliminant une molécule d'eau. Les acides peuvent être identiques ou différents.



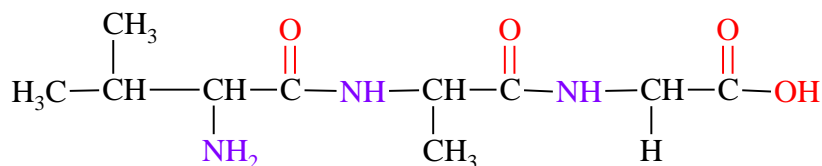
Le dipeptide formé porte un groupe carboxyle et un groupe amine libres à ses extrémités ; il peut ainsi s'engager dans une nouvelle liaison peptidique pour donner un tripeptide...etc. la chaîne ainsi construite est appelée :

- \* Peptide, si le nombre d'acides  $\alpha$ -aminés < 20
- \* Polypeptide, si le nombre d'acides  $\alpha$ -aminés est entre 20 et 100
- \* Protéine, s'il dépasse 100.

Plusieurs peptides sont synthétisés par l'organisme, et un grand nombre d'antibiotiques sont des peptides.

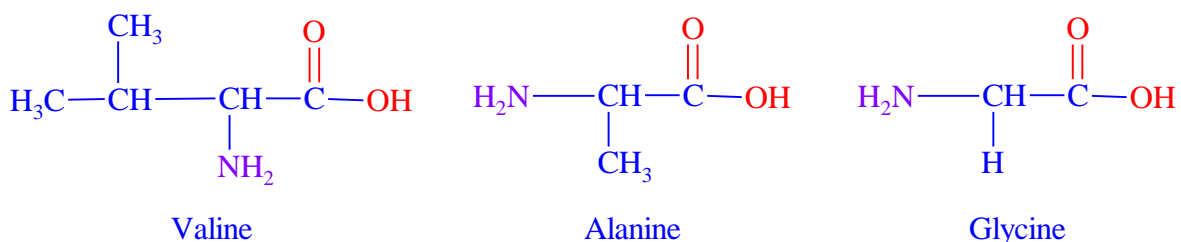
#### Application-3

On considère le peptide suivant :



1. Identifier les acides aminés dont est constitué ce peptide, et donner leurs noms usuels.
2. Ecrire la séquence de ce peptide avec les codes de ses acides aminés.

1.



2. Val-Ala-Gly



## 2) Structure des protéines

Lors de la synthèse des protéines :

- \* Des acides  $\alpha$ -aminés sont enchainés par liaisons peptidiques dans une séquence bien déterminée : c'est sa structure primaire.

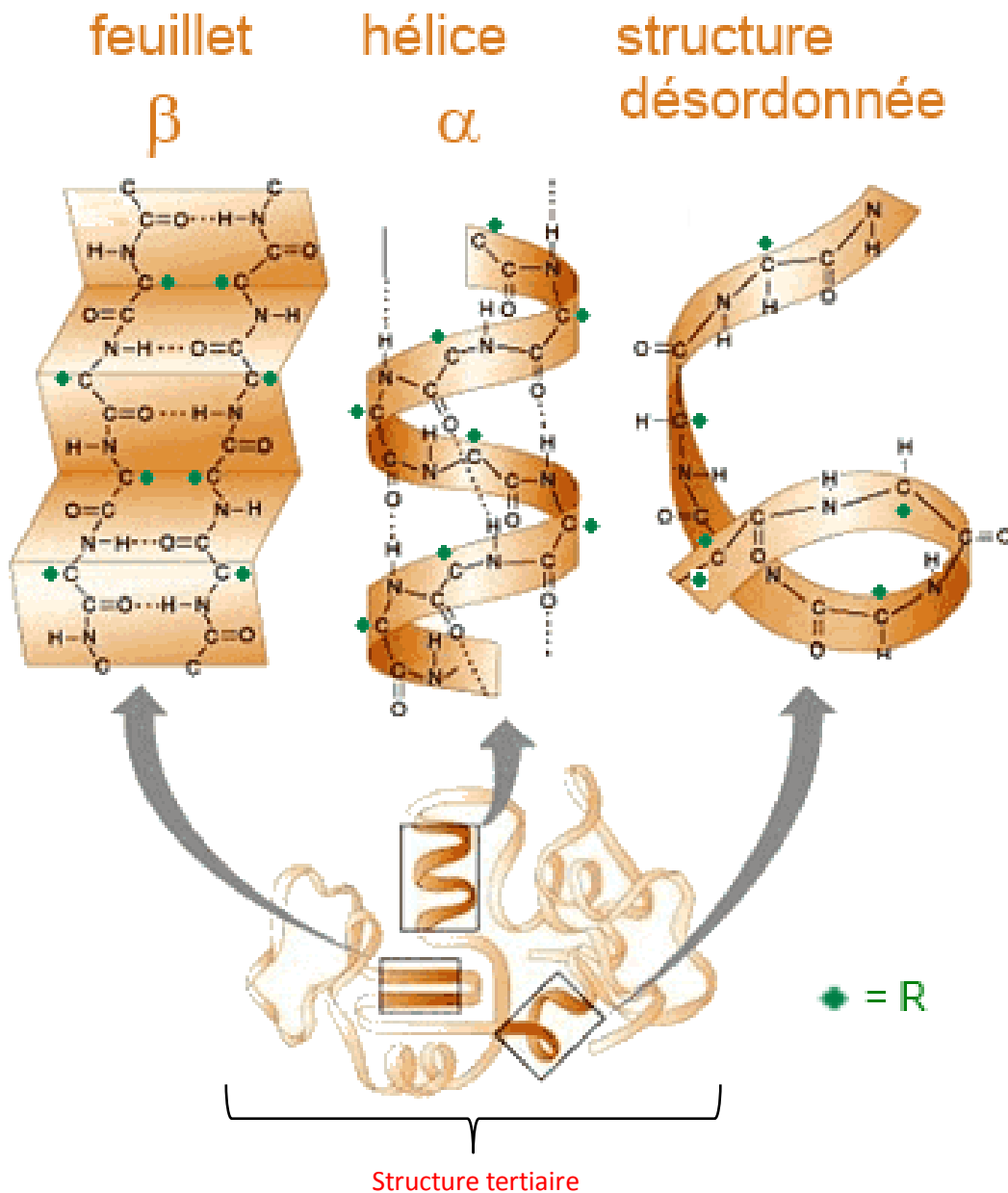
ex : His – Leu – Thr – Pro – Gly – Lys - ... : une séquence de 146 acides  $\alpha$ -aminés, qui constitue la structure primaire de la globine (protéine de l'hémoglobine)

- \* Les interactions qui se manifestent entre les composants d'une longue chaîne peptidique ; provoquent l'enroulement local de la chaîne en hélice- $\alpha$ , et moins fréquemment le repliement en feuillet plissé- $\beta$  : c'est la structure secondaire de la protéine. (Fig-5)

Ces dispositions particulières dans l'espace de portions de la chaîne, sont assurées par des attractions

entre atomes O des groupes  $\left( \begin{array}{c} \text{O} \\ || \\ -\text{C}- \end{array} \right)$  et atomes H des groupes  $\left( \begin{array}{c} \text{H} \\ | \\ -\text{N}- \end{array} \right)$  . (liaison hydrogène)

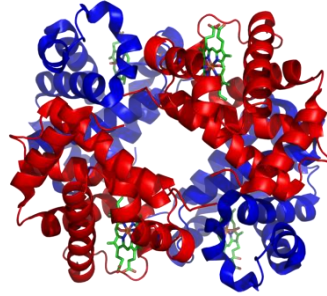
Figure-5



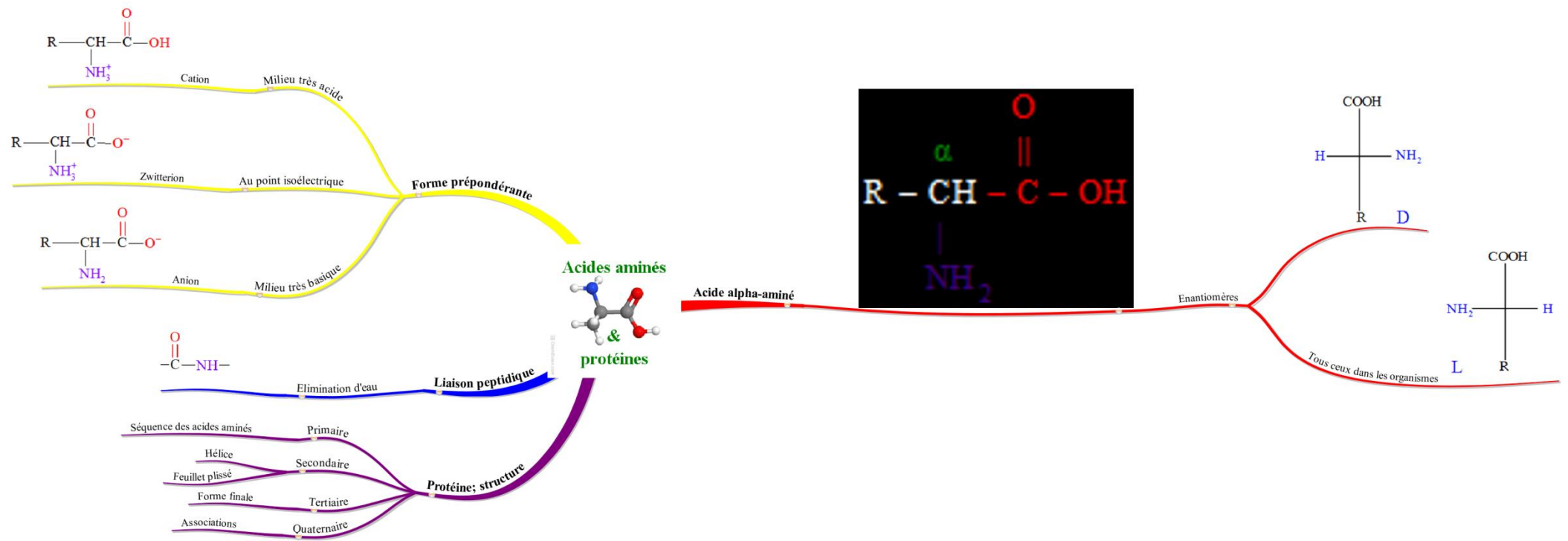
- \* La disposition de la chaîne toute entière dans l'espace constitue sa structure tertiaire; les repliements de la chaîne sont maintenus par différentes liaisons faibles tel que la liaison hydrogène, et parfois des ponts disulfure ( $-S-S-$ ).
- C'est essentiellement cette structure tertiaire qui est à l'origine des propriétés biologiques de la protéine, et qui une fois altérée la rend dénaturée engendrant de graves maladies.
- \* Enfin certaines chaînes peptidiques, identiques ou différentes, peuvent s'associer par différentes liaisons faibles tel que la liaison hydrogène et parfois des ponts disulfure ( $-S-S-$ ), pour constituer un complexe stable et actif. C'est leur structure quaternaire (Fig-6)

**Figure-6**

Structure quaternaire de l'hémoglobine Humaine

**Dossier à préparer pour TP2*****Les acides aminés dans l'organisme Humain******Enigme de l'homochiralité des acides aminés naturels******Les types d'interactions stabilisant les structures des protéines******Maladies dues à l'altération de la structure des protéines***

A envoyer par e-mail ([farjallaha@gmail.com](mailto:farjallaha@gmail.com)) avant le **08/03/2020**, *précédé d'un résumé*  
*Tout dossier envoyé après le 08/03/2020 ne sera pas pris en considération, et l'élève aura un zéro*



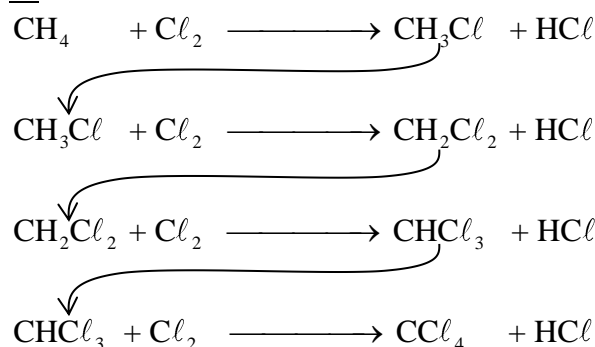
## Chapitre-6 : Vue d'ensemble de la chimie organique; notion de fonction organique

Objectifs
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Reconnaître une fonction organique.</li> <li>➤ Distinguer quelques fonctions organiques.</li> <li>➤ Reconnaître des isomères de fonction.</li> <li>➤ Retrouver quelques transformations chimiques permettant de passer d'une fonction organique à une autre.</li> </ul>
Prérequis
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Représentation d'un composé organique par une formule semi-développée.</li> <li>▪ Notion d'hydrocarbure aliphatique.</li> <li>▪ Notion de chaîne carbonée saturée, groupe alkyle.</li> <li>▪ Notion d'isomérie.</li> <li>▪ Définition, nomenclature et propriétés chimiques des alcanes, alcènes, alcynes, alcools, éthers, aldéhydes, cétones, acides carboxyliques, esters et amines.</li> </ul>
Matériel
Rien

### Rappels

- ❖ La principale réaction chimique spécifique aux alcanes est la **substitution** ; elle consiste à remplacer un ou plusieurs atomes H par un ou plusieurs atomes monovalents, halogènes le plus souvent (Cl, Br, F...). Cela se déroule sans modification de la chaîne carbonée, et donne lieu à un mélange de plusieurs hydrocarbures halogénés selon le nombre d'atomes H substitués.

ex

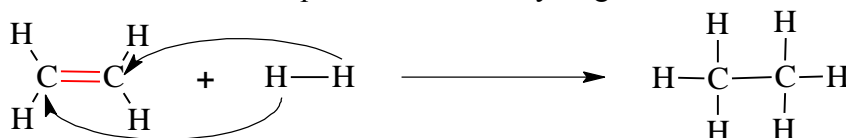


- ❖ La principale réaction chimique spécifique aux alcènes et aux alcynes est l'**addition** ; elle consiste à la fixation d'atomes monovalents (Cl, Br, H...) ou un groupement d'atomes (—OH) sur les carbones de la liaison multiple après rupture de celle-ci; cela provoque une modification de la structure la chaîne carbonée.

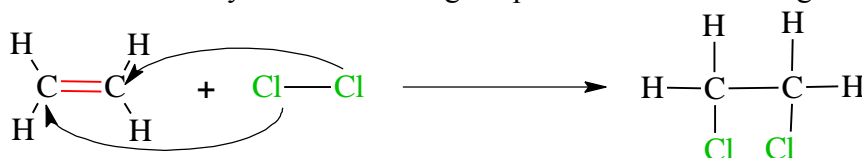
ex

- **Addition sur un alcène :**

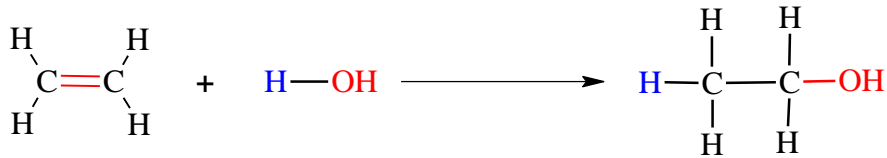
- Obtention d'un alcane par addition de l'hydrogène



- Obtention d'un hydrocarbure halogéné par addition d'un halogène

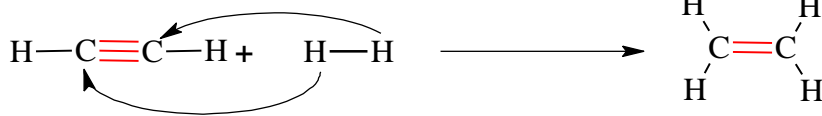


- Obtention d'un alcool par addition de l'eau

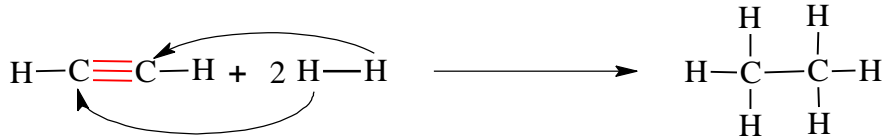


○ **Addition sur un alcyne**

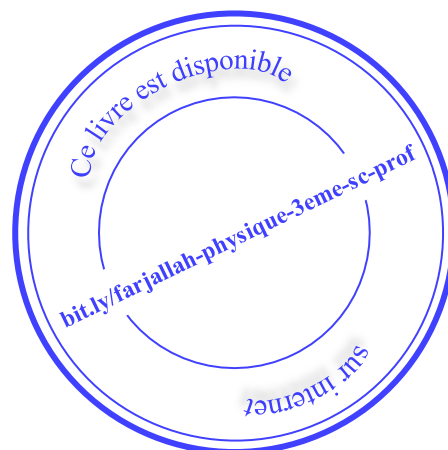
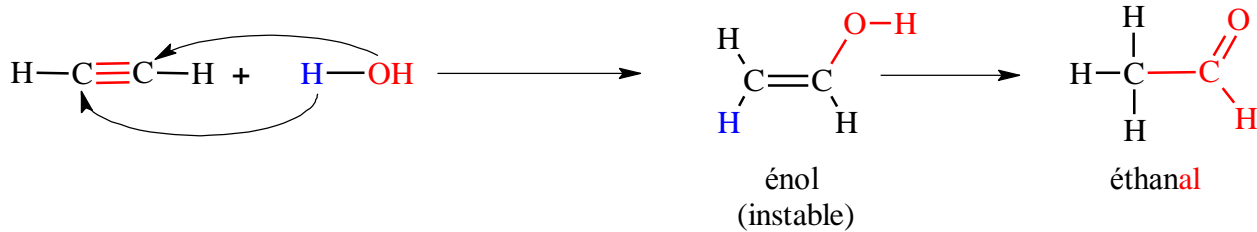
- Obtention d'un alcène par addition de l'hydrogène



- Obtention d'un alcane par addition de l'hydrogène

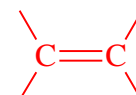
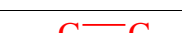
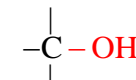
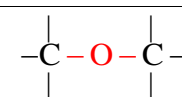
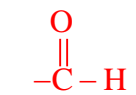
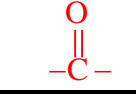
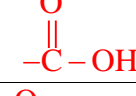
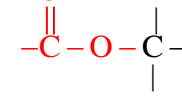



- Obtention d'un aldéhyde par addition de l'eau sur l'éthyne



**I- Principales familles organiques (Fig-1)**

Figure-1

	Famille	Exemple	Nom	Formule générale	Formule brute	Groupe fonctionnel
Hydrocarbures	Alcane	$\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$	propane	X	$\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$	X
	Alcène	$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{CH}_3$	prop-1-ène		$\text{C}_n\text{H}_{2n}$	
	Alcyne	$\text{HC}\equiv\text{C}-\text{CH}_3$	prop-1-yne		$\text{C}_n\text{H}_{2n-2}$	
Composés oxygénés	Alcool	$\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$	butan-1-ol	$\text{R}-\text{OH}$	$\text{C}_n\text{H}_{2n+2}\text{O}$	
	Ether	$\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$	diéthoxyde	$\text{R}_1-\text{O}-\text{R}_2$		
	Aldéhyde	$\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{H}$	butanal	$\text{R}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{H}$	$\text{C}_n\text{H}_{2n}\text{O}$	
	Cétone	$\text{CH}_3-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$	butan-2-one	$\text{R}_1-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{R}_2$		
	Acide carboxylique	$\text{CH}_3-\text{CH}_2-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{OH}$	acide propanoïque	$\text{R}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{OH}$	$\text{C}_n\text{H}_{2n}\text{O}_2$	
	Ester	$\text{CH}_3-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$	éthanoate d'éthyle	$\text{R}_1-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{O}-\text{R}_2$		
Composés azotés	Amine	$\text{CH}_3-\text{NH}-\text{CH}_3$	diméthylamine	$\text{R}-\text{NH}_2$ $\text{R}_1-\text{NH}-\text{R}_2$ $\text{R}_3$ $\text{R}_1-\text{N}-\text{R}_2$	$\text{C}_n\text{H}_{2n+3}\text{N}$	

**NB** : La formule générale et la formule brute des composés autres que les hydrocarbures, sont écrites dans le cas où ils sont aliphatiques saturés.

## 1) Le groupe fonctionnel

Une famille organique est constituée de composés organiques ayant le même groupe fonctionnel (excepté la famille des alcanes)

Le groupe fonctionnel (ou fonction organique) consiste en un ensemble d'atomes qui confèrent, à des molécules de structures différentes, des propriétés chimiques similaires.

ex

- \* La double liaison Carbone-Carbone, confère aux alcènes la propriété de subir des réactions d'addition.
- \* Le groupe hydroxyle des alcools, leur permet de subir l'oxydation en aldéhydes ou en cétones.
- \* Le groupe carboxyle des acides carboxyliques leur confère leurs propriétés acides.
- \* L'atome N et son doublet non liant confère aux amines leurs propriétés basiques.

## 2) Isomérisation de fonction

### a) Exemples

- \* Le butan-1-ol et le diéthoxyde ont la même formule brute  $C_4H_{10}O$ , et des chaînes carbonées de même nature, mais ont des fonctions organiques différentes : Isomères de fonction.
- \* Le butanal et la butan-2-one ont la même formule brute  $C_4H_8O$ , et des chaînes carbonées de même nature, mais ont des fonctions organiques différentes : Isomères de fonction.

### b) Définition

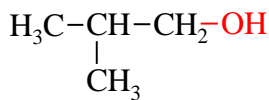
Des isomères de fonction sont des composés organiques de même formule brute, qui présentent des groupes fonctionnels différents greffés sur des chaînes carbonées de même nature (même nombre d'atomes C et H avec le même type d'enchaînement).

### Application-1

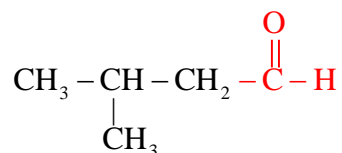
1. Donner la famille et la formule brute, pour chacun des composés suivants.

Identifier les isomères de fonction.

a)



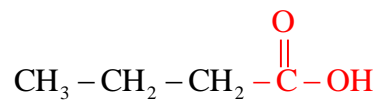
b)



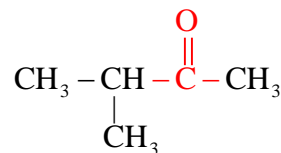
c)



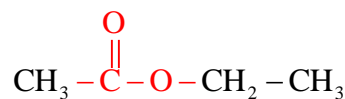
d)



e)



f)



2. La masse molaire d'un composé organique aliphatique saturé ne contenant que du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène est  $M = 74 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ . Sa molécule contient **deux atomes d'oxygène**.

- a) De quelle famille pourrait être ce composé ?
- b) Déterminer sa formule brute.
- c) Ecrire les formules semi-développées des composés correspondant à cette formule, en les classant par famille.
- d) Que dit-on de ces composés ?

1.

- a) Alcool ;  $C_4H_{10}O$
- b) Aldéhyde ;  $C_5H_{10}O$
- c) Ether ;  $C_4H_{10}O$
- d) Acide carboxylique ;  $C_4H_8O_2$
- e) Cétone ;  $C_5H_{10}O$
- f) Ester ;  $C_4H_8O_2$

Isomères de fonction : (b) et (e) / (d) et (f).

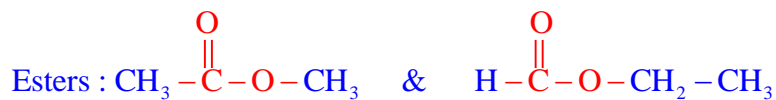
2.

- a) Acide carboxylique ou ester :  $C_nH_{2n}O_2$ .

$$b) M = (n \cdot 12) + 2 \cdot n + (2 \cdot 16) \Rightarrow 14 \cdot n + 32 = 74 \Leftrightarrow 14 \cdot n = 42 \Leftrightarrow n = \frac{42}{14} = 3$$

D'où la formule  $C_3H_6O_2$

- c) Acide carboxylique :  $CH_3 - CH_2 - \overset{O}{\parallel}C - OH$

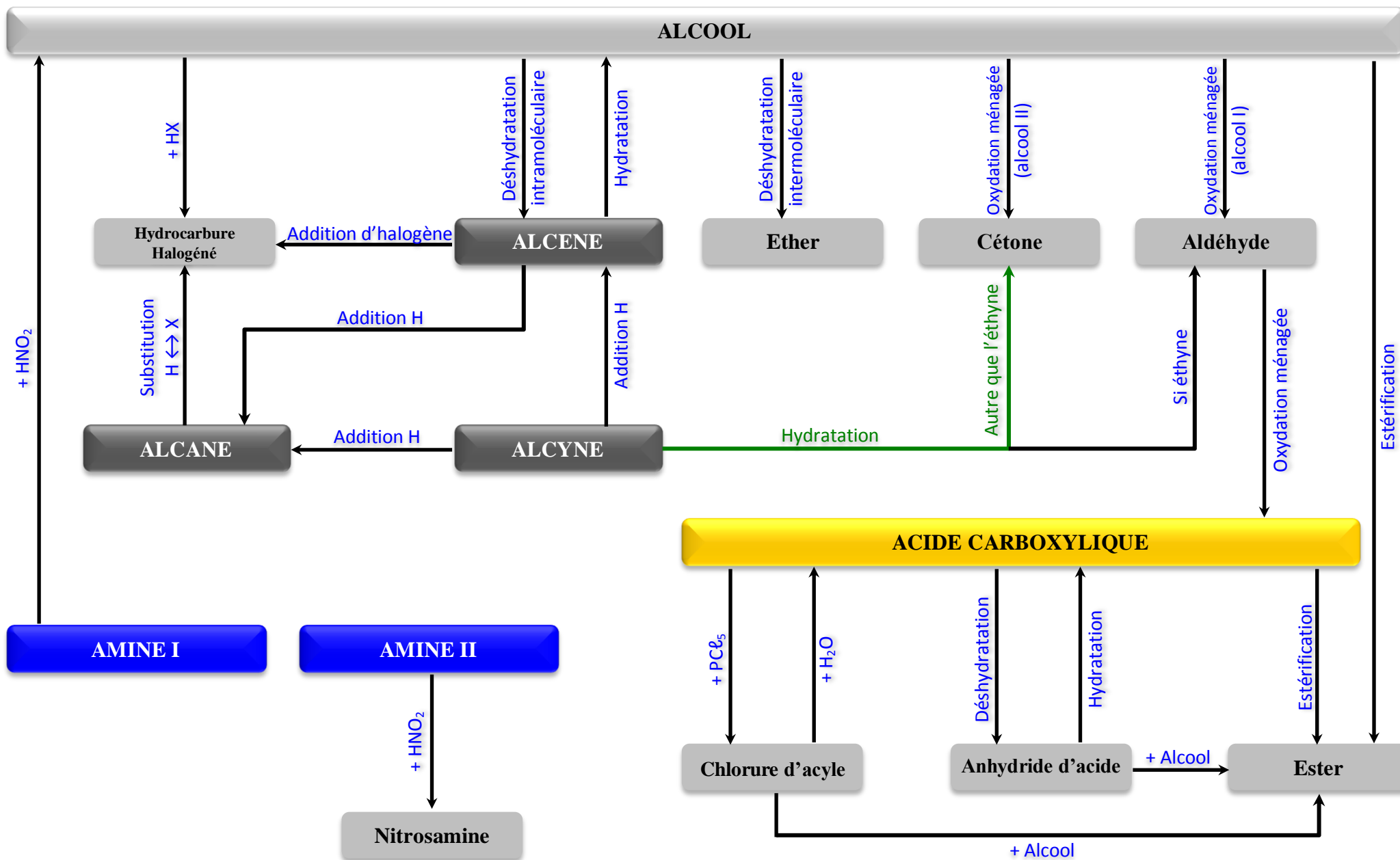


- d) L'acide est un isomère de fonction pour chacun des esters.



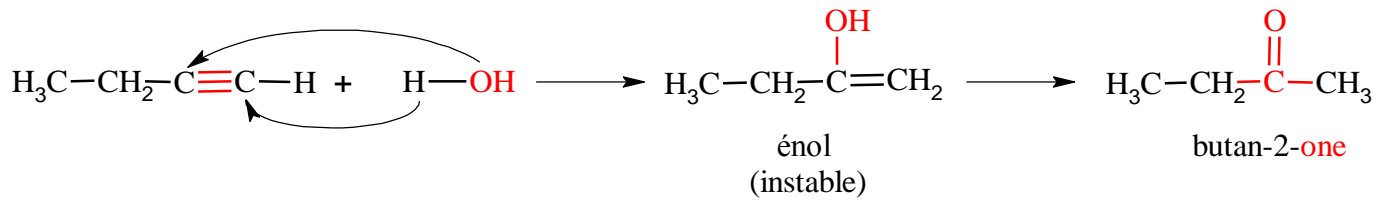
## II- Principales réactions chimiques permettant de passer d'une fonction organique à une autre (Fig-2)

Figure-2



Les aldéhydes et les cétones sont des dérivés carbonylés ; ils ont en commun groupe carbonyle  $\left( \begin{array}{c} \text{O} \\ || \\ -\text{C}- \end{array} \right)$  qui peut être obtenu à partir des alcynes par addition d'eau :

- Seul le 1<sup>er</sup> alcène (éthyne) donne un aldéhyde.
  - Le reste donne des cétones selon l'équation générale  $\text{C}_n\text{H}_{2n-2}\text{O} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{C}_n\text{H}_{2n}\text{O}$
- ex

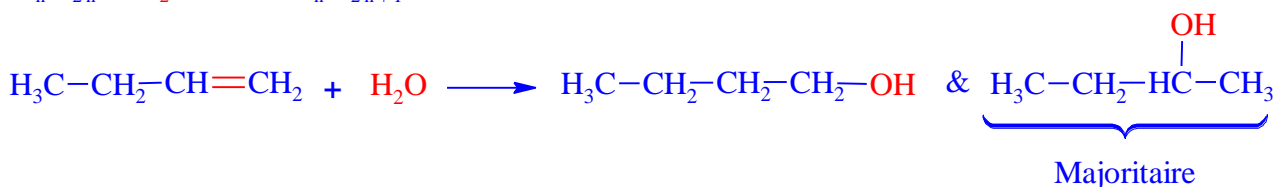
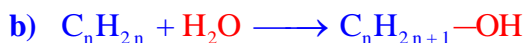


### Application-2

1. Un **alcène** aliphatique peut donner un **alcool** aliphatique saturé :
  - a) Par quelle transformation ?
  - b) Ecrire l'équation de la réaction dans le cas d'un alcène quelconque, puis dans le cas du but-1-ène.
2. Un **alcool** aliphatique saturé peut être obtenu à partir d'une **amine** :
  - a) Par quelle transformation, et pour quelle classe d'amines ?
  - b) Ecrire l'équation de la réaction dans le cas d'une amine quelconque, puis dans le cas de la méthylamine.
3. Un **acide carboxylique** aliphatique saturé peut être converti en **anhydride d'acide** :
  - a) Par quelle transformation ?
  - b) Ecrire l'équation de la réaction dans le cas d'un acide carboxylique quelconque.
4. Un **acide carboxylique** aliphatique saturé peut être converti en **chlorure d'acyle** :
  - a) Par quelle transformation ?
  - b) Ecrire l'équation de la réaction dans le cas d'un acide carboxylique quelconque.
5. Un **ester** peut être obtenu à partir d'un **chlorure d'acyle** aliphatique saturé, par une réaction rapide et totale :
  - a) Quelle est cette réaction ?
  - b) Ecrire l'équation de la réaction dans le cas général.

1.

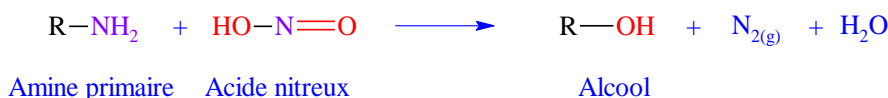
a) Par addition d'eau.



2.

a) Par réaction d'une amine I avec l'acide nitreux .

b)



3.

a) Par déshydratation intermoléculaire.

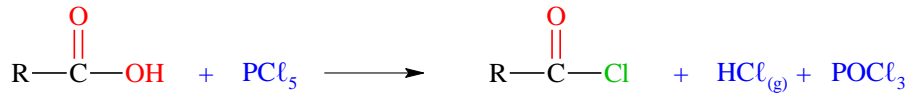
b)



4.

a) Par réaction avec un agent chlorurant tel que le  $\text{PCl}_5$ 

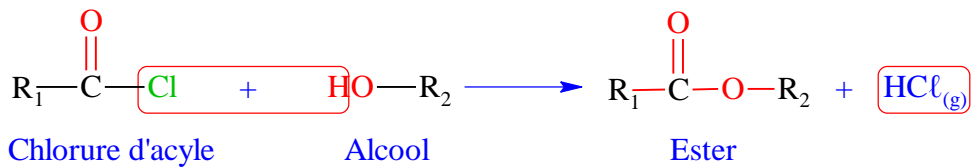
b)



5.

a) Réaction avec un alcool.

b)



## TP 5 : Modélisation de quelques fonctions organiques

### Objectifs :

- Construire les modèles moléculaires de toutes les molécules possibles pour une formule brute donnée.
- Ecrire leurs formules semi-développées, et identifier les isomères de fonction.

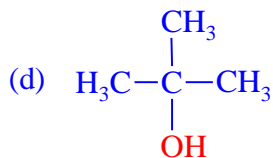
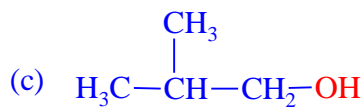
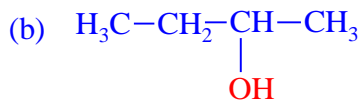
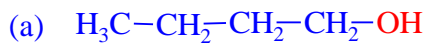
### Matériel :

- 1 Boite de modèles moléculaires

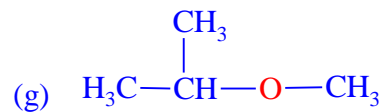
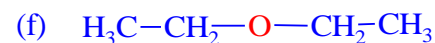
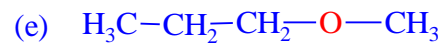
### Manipulation :

- On s'intéresse aux composés aliphatiques saturés de formule brute  $C_4H_{10}O$  :
  - De quelle famille pourrait être un composé ayant cette formule brute :  $C_4H_{2 \cdot 4 + 2}O \Rightarrow$  Alcool ou éther.
  - A l'aide des modèles moléculaires ; trouver les formules semi-développées de tous les composés aliphatiques saturés correspondant à cette formule, et les classer par famille.

#### Alcools



#### Ethers

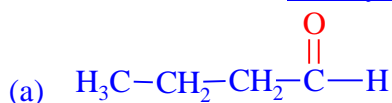


- c) Identifier les isomères de fonction : (a) / (e), (a) / (f), (b) / (e), (b) / (f), (c) / (g) et (d) / (g)

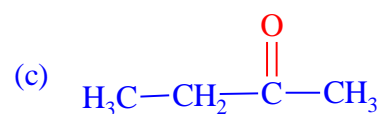
- On s'intéresse aux composés aliphatiques saturés de formule brute  $C_4H_8O$  :

- De quelle famille pourrait être un composé ayant cette formule brute :  $C_4H_{2 \cdot 4}O \Rightarrow$  Aldéhyde ou cétone.
- A l'aide des modèles moléculaires ; trouver les formules semi-développées de tous les composés aliphatiques saturés correspondant à cette formule, et les classer par famille.

#### Aldéhydes



#### Cétones



- c) Identifier les isomères de fonction : (a) / (c)

**Application**

- Un **alcool** aliphatique saturé peut être converti en **éther** :
  - Par quelle transformation ?
  - Ecrire l'équation de la réaction dans le cas d'un alcool quelconque, puis dans le cas du butan-1-ol.
- Un **alcool** aliphatique saturé peut être converti en **aldéhyde** :
  - Par quelle transformation, et pour quelle classe d'alcools ?
  - Représenter cette transformation dans le cas d'un alcool quelconque, puis dans le cas du butan-1-ol.
- Un **alcool** aliphatique saturé peut être converti en **cétone** :
  - Par quelle transformation, et pour quelle classe d'alcools ?
  - Représenter cette transformation dans le cas d'un alcool quelconque, puis dans le cas du butan-2-ol.
- Un **alcool** aliphatique saturé peut être converti en **acide carboxylique** :
  - Par quelle transformation, et pour quelle classe d'alcools ?
  - Représenter cette transformation dans le cas d'un alcool quelconque, puis dans le cas du butan-1-ol.
- Un **alcool** aliphatique saturé peut réagir avec un **acide carboxylique** aliphatique saturé :
  - Par quelle transformation ?
  - Ecrire l'équation de la réaction dans le cas général, puis dans le cas du butan-1-ol et l'acide éthanoïque
- Un **alcool** aliphatique saturé peut être converti en **alcène** :
  - Par quelle transformation ?
  - Ecrire l'équation de la réaction dans le cas d'un alcool quelconque, puis dans le cas du butan-1-ol.

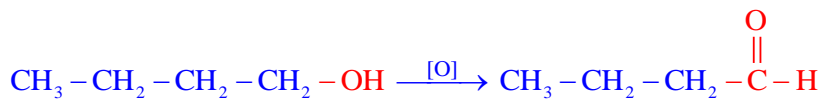
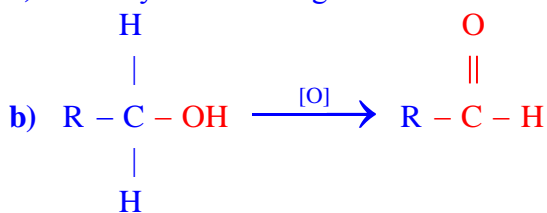
1.

a) Par déshydratation intermoléculaire.



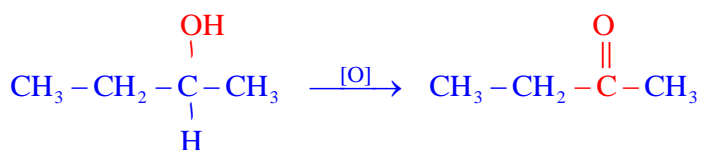
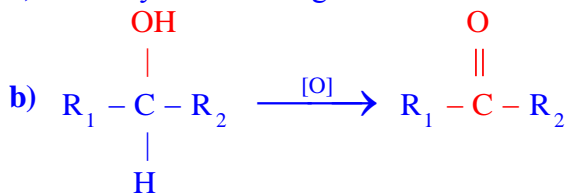
2.

a) Par oxydation ménagée d'un alcool I.



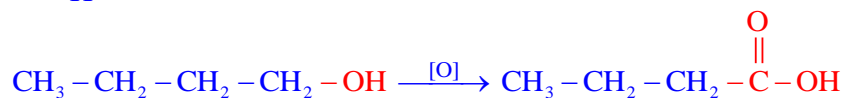
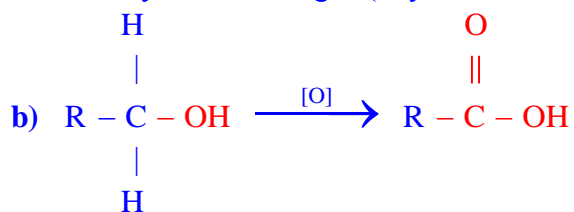
3.

a) Par oxydation ménagée d'un alcool II.



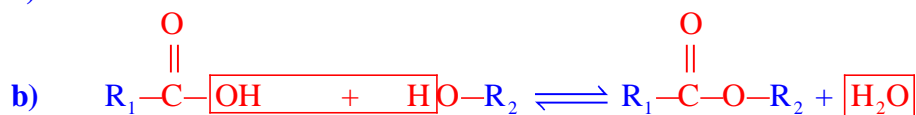
4.

a) Par oxydation ménagée (oxydant en excès) d'un alcool I.



5.

a) Par estérification.

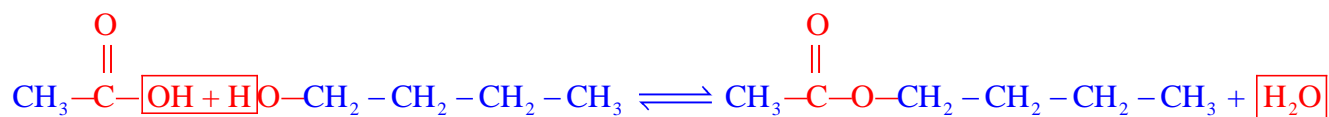


Acide carboxylique

Alcool

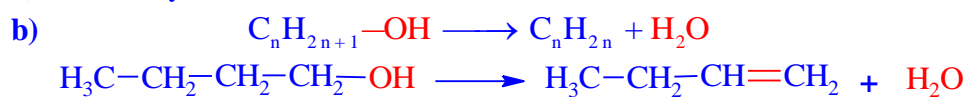
Ester

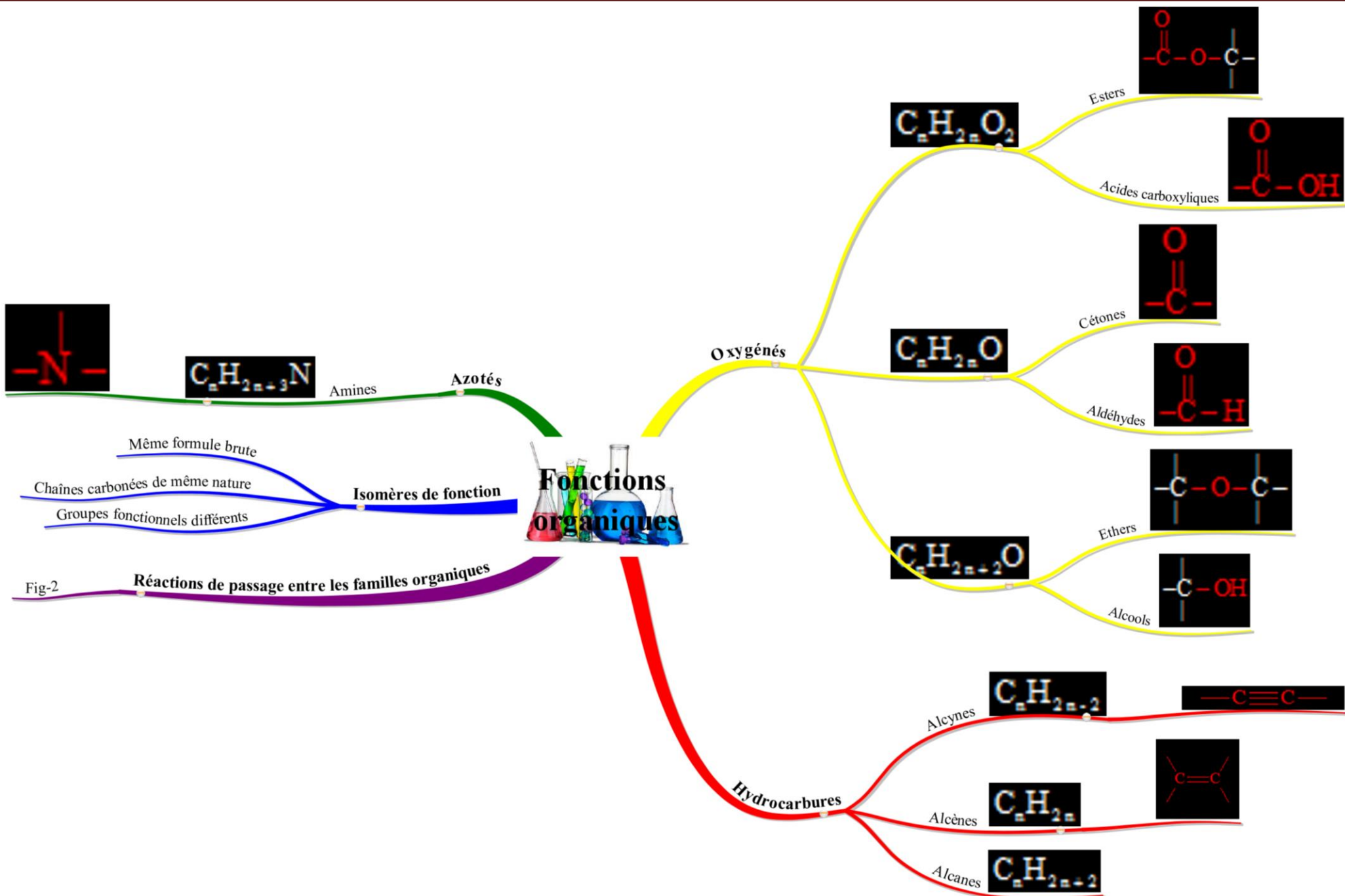
Eau



6.

a) Par déshydratation intramoléculaire.





# Thème n°4 : La mesure en chimie

## Chapitre : Détermination d'une quantité de matière

### Objectifs

- Titrer une solution aqueuse par réaction acide-base ou par réaction redox.
- Calculer la conductance (G) d'une solution électrolytique.
- Tracer la courbe d'étalonnage  $G = f(C)$  à partir de la mesure de la conductance de solutions titrées.
- Exploiter la courbe d'étalonnage pour déterminer la concentration molaire inconnue d'une solution.

### Prérequis

- Unité de quantité de matière.
- Définition de la masse molaire et du volume molaire d'un corps pur.
- Calcul de quantité de matière.
- Masse volumique, densité.
- Concentration d'une solution, calcul de quantité de matière de soluté dissoute.
- Dilution d'une solution.
- Solutions d'acide et de bases, acide fort et acide faible, base forte et base faible; action du BBT, pH.
- Notion de réaction redox, oxydation, réduction, oxydant, réducteur, couple redox, couples complexes.
- Chaîne carbonée insaturée, réactions d'addition sur les alcènes.
- Notion d'électrolyte.
- Courant alternatif sinusoïdal, valeurs efficaces de la tension et de l'intensité.
- Loi d'Ohm en courant alternatif sinusoïdal, résistance électrique.

### Matériel

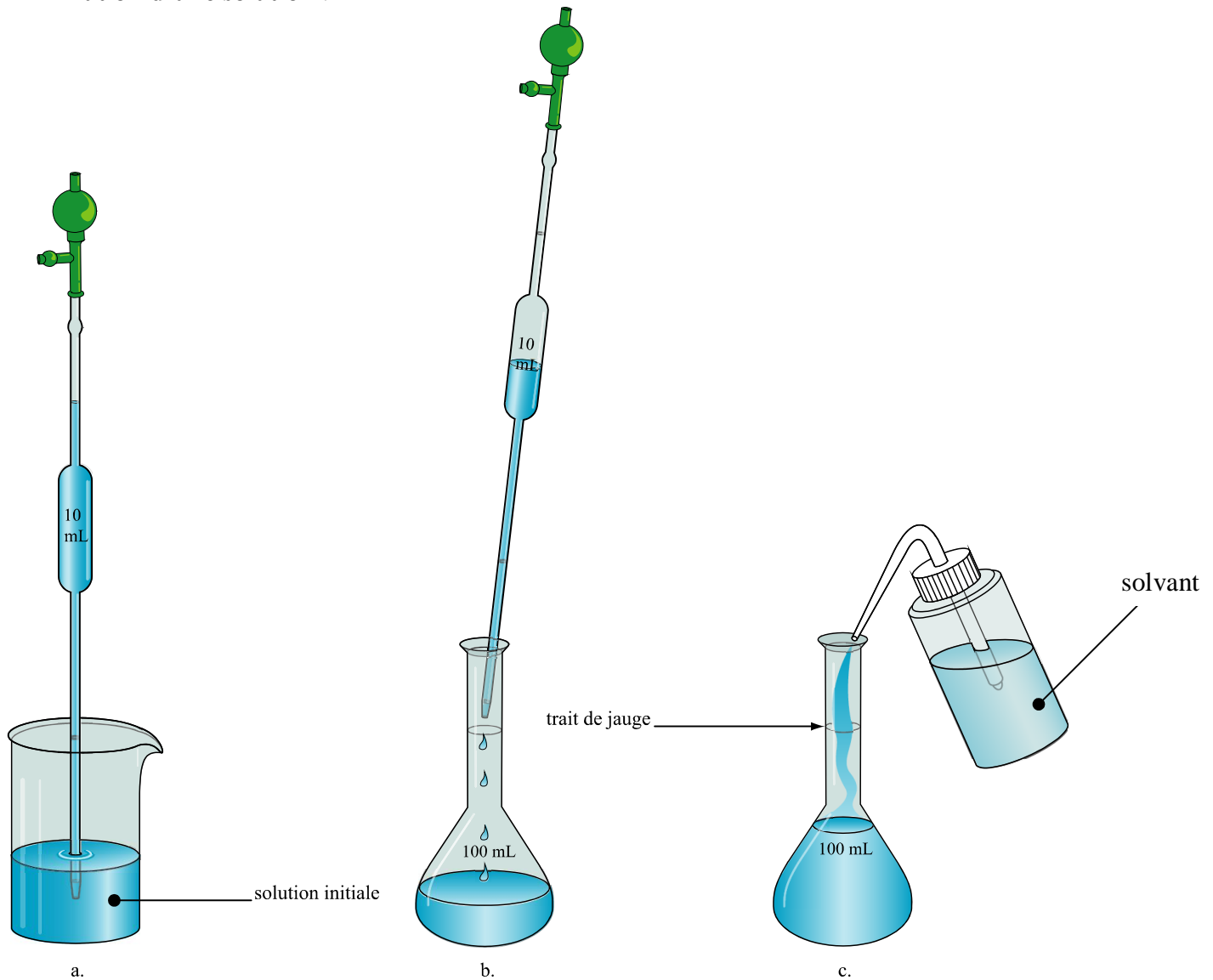
* 2 Béchers	* Pissette d'eau distillée
* Pipette de 20 mL + propipette	* Solution aqueuse de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (0,1 M)
* Burette sur potence ( $\geq 50$ mL)	* Solution aqueuse de $\text{I}_2$ (0,1 M) : Réactif de Lugol
* Agitateur magnétique + Barreau aimanté	

### Rappels

- ❖ Soit  $M$  la masse molaire d'une espèce chimique (en  $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ), et  $V_m$  son volume molaire (en  $\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}$ ). Soit  $m$  la masse (en g) d'un échantillon de cette espèce, et  $V$  son volume (en L).
  - La quantité de matière  $n$  (en mol) contenue dans l'échantillon, s'écrit :
    - $n = \frac{m}{M}$  : on mesure la masse de l'échantillon (plus convenable pour les solides et les liquides)
    - $n = \frac{V}{V_m}$  : on mesure le volume de l'échantillon dans les mêmes conditions de température et de pression que  $V_m$  (plus convenable pour les gaz, dont le volume molaire est le même quel que soit le gaz dans les mêmes conditions de température et de pression)
  - Pour les liquides et les solides ; la masse et le volume, à une température donnée, sont reliés par la relation  $\rho = \frac{m}{V}$  (masse volumique de l'espèce chimique)  $\Rightarrow m = \rho \cdot V \Rightarrow n = \frac{\rho \cdot V}{M}$  : la quantité de matière est déterminée par mesure du volume.
- Si on dispose de la valeur de la densité de l'espèce chimique  $d = \frac{\rho}{\rho_{\text{eau}}}$  ;  $\rho = d \cdot \rho_{\text{eau}} \Rightarrow n = \frac{d \cdot \rho_{\text{eau}} \cdot V}{M}$
- ❖ Dans une solution de concentration molaire  $C$  (en  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) et de volume  $V$  (en L), la quantité de matière de soluté dissoute s'écrit  $n = C \cdot V$



## ❖ Dilution d'une solution :



Soit  $C$  la concentration molaire de la solution initiale, et  $C'$  la concentration molaire de la solution finale ;  
 Le volume ( $V_0$ ) prélevé de la solution initiale, contient une quantité de soluté dissoute  $n_0 = C \cdot V_0$ .  
 La solution finale (de volume  $V'$ ) contient une quantité de soluté dissoute  $n' = C' \cdot V'$ .

$$n' = n_0 \Rightarrow C' \cdot V' = C \cdot V_0 \Rightarrow C' = \frac{V_0}{V'} \cdot C.$$

Dans cet exemple :  $C' = \frac{10 \text{ mL}}{100 \text{ mL}} \cdot C \Rightarrow C' = \frac{C}{10}$  ; on dit que la solution est diluée 10 fois.

**Application**

Sur l'étiquette d'un flacon d'acide chlorhydrique commercial sont portées les indications suivantes :  $d = 1,12$   $\text{HCl} = 25\%$   $M = 36,5$

Le préparateur a été chargé par l'un des professeurs de préparer une solution aqueuse d'acide chlorhydrique de concentration molaire  $C = 0,1 \text{ mol.L}^{-1}$  et de volume  $V = 100 \text{ mL}$  ;

Pour ce faire, il a prélevé un volume ( $v$ ) du flacon à l'aide d'une pipette munie d'une propipette, il l'a versé dans une fiole jaugée de 100 mL, enfin il a complété par l'eau distillée jusqu'au trait de jauge via une pissette.



- Calculer, en mL, la valeur du volume ( $v$ ), sachant que 25 % c'est le pourcentage en masse d'acide chlorhydrique dans le liquide contenu dans le flacon.  
On donne  $\rho_{\text{eau}} = 1 \text{ g.cm}^{-3}$
- Calculer (en mL) le volume qu'occuperait cette quantité dissoute de HCl, si elle se trouvait à l'état gazeux dans les CNTP. On donne  $V_m = 22,4 \text{ L.mol}^{-1}$  dans les CNTP.
- On se propose de diluer cette solution 5 fois, pour obtenir une solution finale de volume  $V' = 50 \text{ mL}$ .
  - Donner la valeur de la concentration  $C'$  de la solution finale.
  - Calculer la valeur du volume ( $V_0$ ) qu'il faut prélever de la solution initiale.
  - Décrire la démarche expérimentale à suivre.

1.

\* Soit ( $n$ ) la quantité d'acide que doit contenir la solution :  $n = C.V = 0,1 \cdot 0,1 \text{ L} = 0,01 \text{ mol}$

\* Soit ( $m$ ) la masse correspondante :  $n = \frac{m}{M(\text{HCl})} \Rightarrow m = n.M = 0,01 \cdot 36,5 = 0,365 \text{ g}$

\* Soit ( $m'$ ) la masse qu'il faut prélever du flacon :  $\frac{m}{m'} = 25\% = 0,25 \Rightarrow m' = \frac{m}{0,25} = \frac{0,365}{0,25} = 1,46 \text{ g}$

\* Le volume ( $v$ ) qu'il faut prélever est tel que  $\frac{m'}{v} = \rho$  : masse volumique du liquide dans le flacon

$$\text{On a } d = \frac{\rho}{\rho_{\text{eau}}} \Rightarrow \rho = d \cdot \rho_{\text{eau}} = 1,12 \text{ g.cm}^{-3}, \text{ d'où } v = \frac{m'}{\rho} = \frac{1,46 \text{ g}}{1,12 \text{ g.cm}^{-3}} = 1,3 \text{ cm}^3 : \boxed{v = 1,3 \text{ mL}}$$

2.  $V(\text{HCl})_g = n \cdot V_m = 0,01 \cdot 22,4 = 0,224 \text{ L} = 224 \text{ mL}$

3.

a)  $C' = \frac{C}{5} = \frac{0,1}{5} = 0,02 \text{ mol.L}^{-1}$

b) Soit  $n_0 = C \cdot V_0$  la quantité de HCl dissoute dans le volume prélevé, et  $n' = C' \cdot V'$  la quantité de HCl dissoute dans la solution finale :  $n_0 = n' \Rightarrow C \cdot V_0 = C' \cdot V'$

$$\Rightarrow V_0 = \frac{C'}{C} \cdot V' = \frac{0,02}{0,1} \cdot 50 \text{ mL} : \boxed{V_0 = 10 \text{ mL}}$$

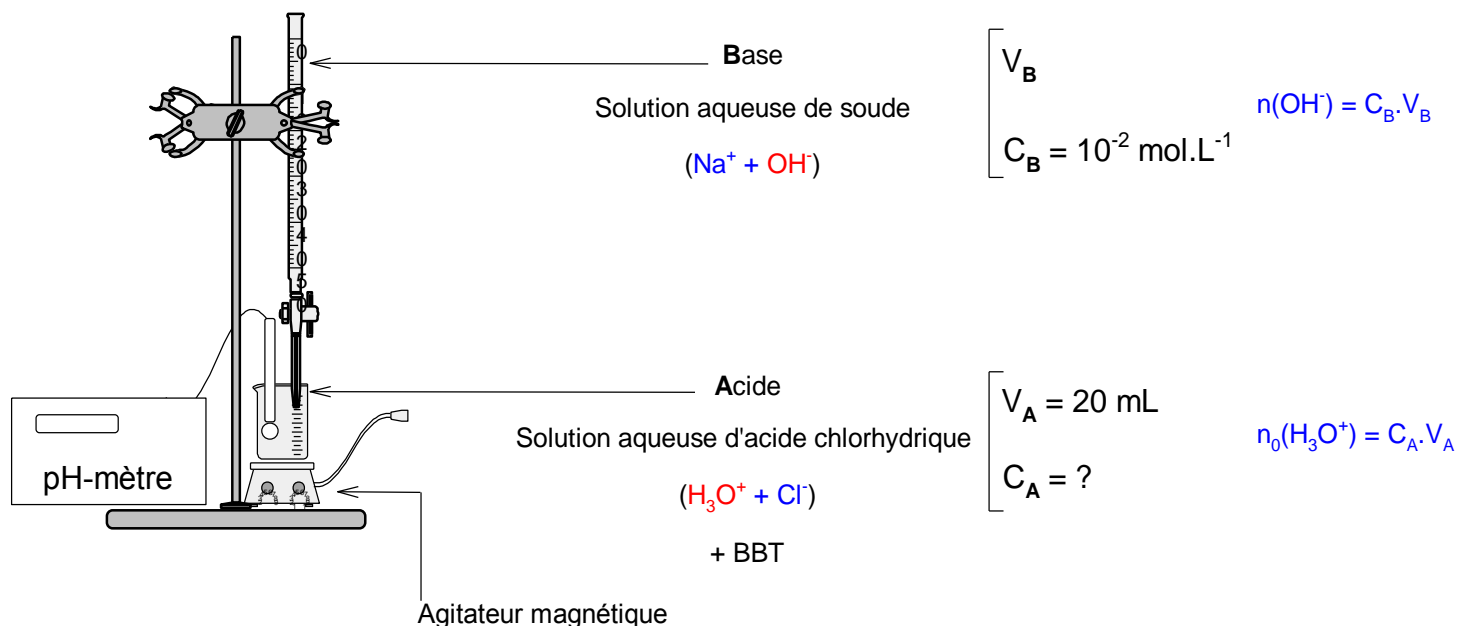
c) On prélève 10 mL de la solution initiale via une pipette, on les met dans une fiole jaugée de 50 mL, puis on complète par l'eau distillée jusqu'au trait de jauge via une pissette.

# I- Détermination d'une quantité de matière à l'aide d'une réaction chimique.

## 1) Dosage acido-basique (Rappel)

### a) Exemple (Fig-1)

Figure-1



Le milieu réactionnel (bêcher), est continuellement agité par un barreau aimanté.

On ouvre le robinet de la burette pour verser lentement la solution de soude dans le bêcher.

Un pH-mètre dont la sonde est plongée dans le milieu réactionnel, permet de suivre l'évolution du pH.

Cette expérience permet de déterminer la concentration  $C_A$  de la solution acide par mesure d'un **volume** ( $V_B$ ); c'est un **dosage volumétrique** de la solution acide par la solution basique de concentration  $C_B$  connue.

Réciproquement ; doser une solution basique de concentration  $C_B$  inconnue par une solution acide de concentration  $C_A$  connue, revient à déterminer sa concentration  $C_B$ .

En arrêtant le versement de la soude au moment de l'**E**quivalence (couleur verte du BBT, et pH =7) :

$$C_A \cdot V_A = C_B \cdot V_{BE}, \text{ avec } V_{BE} \text{ volume de base versé à l'équivalence} \Rightarrow C_A = \frac{V_{BE}}{V_A} \cdot C_B$$

Pour  $V_{BE} = 40 \text{ mL}$ ,  $C_A = \frac{40}{20} \cdot 10^{-2} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$ . D'où la quantité de matière d'ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  présente initialement dans le bêcher :  $n_0(\text{H}_3\text{O}^+) = 2 \cdot 10^{-2} \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ mol}$

### b) Notion d'équivalence acido-basique

Les ions  $\text{OH}^-$  apportés par la solution de base réagissent avec les ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  de la solution d'acide selon l'équation  $\text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^- \longrightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$  ; appelée réaction de neutralisation. Elle est totale et rapide.

On se limitera aux **monoacides** et **monobases fortes** ; l'équivalence est obtenue lorsque la quantité d'ions  $\text{OH}^-$  fournie par la solution basique est égale à la quantité d'ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  fournie par la solution acide.

- \* Avant d'atteindre l'équivalence ( $V_B < V_{BE}$ ) : La quantité d'ions  $\text{OH}^-$  versée  $n(\text{OH}^-) = C_B \cdot V_B$  n'est pas suffisante pour neutraliser toute la quantité d'ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  initialement présente dans le bécher; tous les ions  $\text{OH}^-$  versés disparaissent, et il-y-en a encore des ions  $\text{H}_3\text{O}^+ \Rightarrow$  le milieu reste acide (couleur jaune du BBT, et  $\text{pH} < 7$ ).
- \* Au moment de l'équivalence ( $V_B = V_{BE}$ ) : La quantité d'ions  $\text{OH}^-$  versée  $n_E(\text{OH}^-) = C_B \cdot V_{BE}$  permet de neutraliser toute la quantité d'ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  initiale; les ions  $\text{OH}^-$  versés disparaissent, mais aussi tous les ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  provenant de l'acide  $\Rightarrow$  le milieu est neutre (couleur verte du BBT, et  $\text{pH} = 7$ ).  

$$n_E(\text{OH}^-) = n_0(\text{H}_3\text{O}^+) \Rightarrow \boxed{C_B \cdot V_{BE} = C_A \cdot V_A}$$
- \* Au-delà de l'équivalence ( $V_B > V_{BE}$ ) : Les ions  $\text{OH}^-$  versés après l'équivalence ne trouvent plus des ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  de l'acide pour réagir avec ; ils restent dans le milieu réactionnel et lui confèrent le caractère basique (couleur bleue du BBT, et  $\text{pH} > 7$ ).

### Rq

Le point d'équivalence est difficile à repérer du 1<sup>er</sup> coup ; le pH qui au début augmente lentement, saute ensuite brutalement aux alentours de  $V_{BE}$ , d'une valeur nettement acide à une valeur nettement basique en passant rapidement par la valeur 7. Et le BBT vire brutalement de la teinte jaune à la teinte bleue en passant rapidement par le vert. Il convient de refaire le dosage 2 à 3 fois en ralentissant considérablement le versement de la base à l'approche de  $V_{BE}$ .

### Application-1

Un déboucheur d'évier liquide, est une solution aqueuse concentrée de soude. On se propose de déterminer la masse de soude dissoute dans une bouteille de volume  $V = 1 \text{ L}$  de déboucheur.

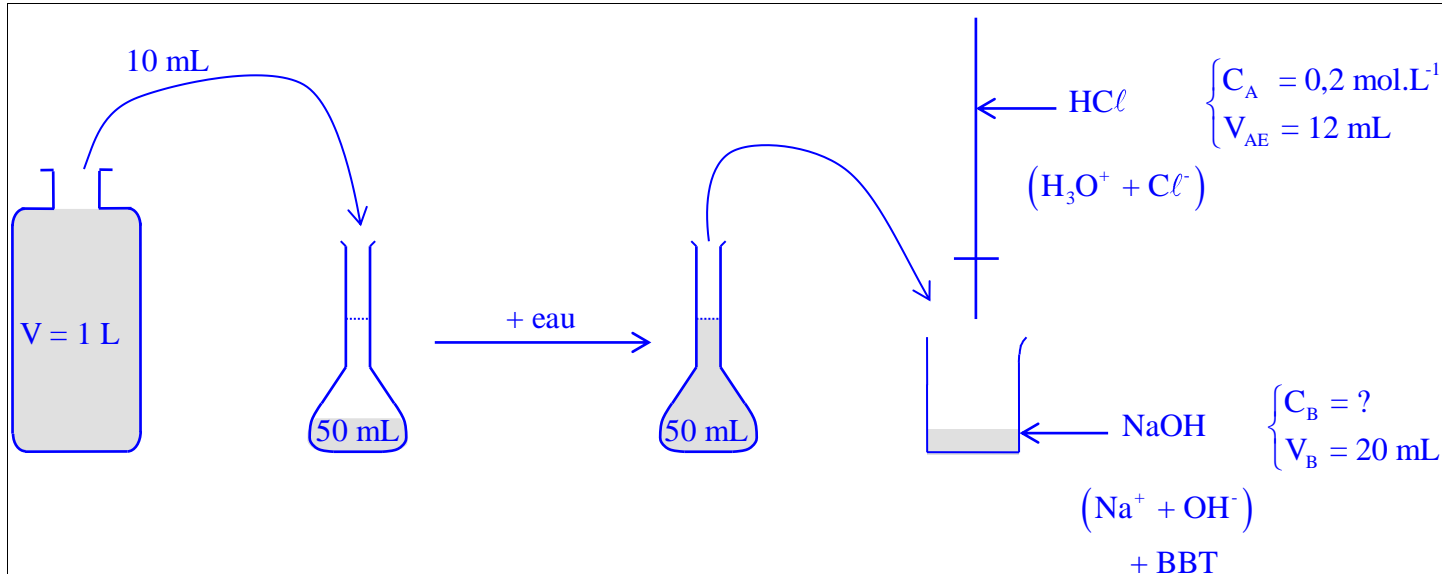
Avec une pipette munie d'une propipette, on prélève **10 mL** de déboucheur, qu'on met dans une fiole jaugée de **50 mL** et on complète par l'eau distillée jusqu'au trait de jauge : on obtient une solution diluée de concentration molaire  $C_B$ .

Ensuite on dose un volume  $V_B = 20 \text{ mL}$  de la solution diluée obtenue, par une solution aqueuse d'acide chlorhydrique de concentration molaire  $C_A = 0,2 \text{ mol.L}^{-1}$  en présence de quelques gouttes de BBT comme indicateur coloré; l'équivalence est obtenue pour  $V_{AE} = 12 \text{ mL}$ .

1. Quelle est la couleur du BBT dans le milieu réactionnel avant de commencer le dosage ?
2. Ecrire l'équation simplifiée de la réaction de dosage.
3. En déduire le sens de variation du pH du milieu réactionnel au cours de l'expérience.
4. A l'équivalence ;
  - a) Quelle est la couleur du BBT, la valeur du pH et le caractère du milieu.
  - b) Quelles sont les espèces chimiques présentes dans le milieu réactionnel.
  - c) Ecrire l'équation complète de la réaction ayant lieu, et donner la formule du sel obtenu à l'équivalence.
  - d) Calculer la valeur de  $C_B$ ; en déduire la masse (m) de soude dissoute dans la bouteille de déboucheur.
5. Que devient la couleur du milieu réactionnel et son pH, si on continue à verser la solution acide.



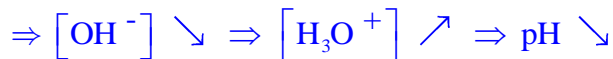
On donne  $M(\text{NaOH}) = 40 \text{ g.mol}^{-1}$



1. Bleu.



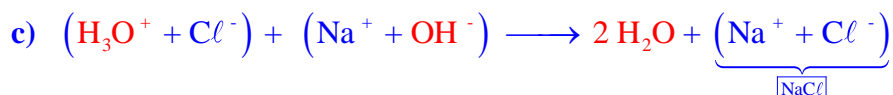
3.  $n(\text{OH}^-)$  diminue dans le milieu réactionnel dont le volume augmente



4.

a) Vert,  $\text{pH} = 7$ , milieu neutre.

b)  $\text{H}_3\text{O}^+$  et  $\text{OH}^-$  provenant de l'ionisation propre de l'eau,  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  (ions spectateurs).



d)

\*  $C_A \cdot V_{AE} = C_B \cdot V_B \Rightarrow C_B = \frac{V_{AE}}{V_B} \cdot C_A = \frac{12}{20} \cdot 0,2 = 0,12 \text{ mol.L}^{-1}$

\*  $m = n \cdot M(\text{NaOH})$ , avec  $n = C \cdot V$  ( $C$  étant la concentration de soude dans la bouteille).

La solution prélevée de la bouteille étant diluée 5 fois ( $50 / 10 = 5$ ), alors  $C = 5 \cdot C_B$

$\Rightarrow n = 5 \cdot C_B \cdot V \Rightarrow m = 5 \cdot C_B \cdot V \cdot M(\text{NaOH}) = 5 \cdot 0,12 \cdot 1 \cdot 40 : \boxed{m = 24 \text{ g}}$

5. Jaune,  $\text{pH} < 7$

## 2) Dosage redox

### a) Exemple : dosage iodométrique

#### i. Expérience (Fig-2)

Figure-2

**Reducteur**  
Solution aqueuse de thiosulfate de sodium  
 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$   
 $(2 \text{Na}^+ + \text{S}_2\text{O}_3^{2-})$

$V_{\text{Red}}$   
 $C_{\text{Red}} = 0,1 \text{ mol.L}^{-1}$   
 $n(\text{S}_2\text{O}_3^{2-}) = C_{\text{Red}} \cdot V_{\text{Red}}$

**Oxydant**  
Solution aqueuse de diiode  
 $(\text{I}_2)$   
+ empis d'amidon

$V_{\text{Ox}} = 20 \text{ mL}$   
 $C_{\text{Ox}} = ?$   
 $n_0(\text{I}_2) = C_{\text{Ox}} \cdot V_{\text{Ox}}$

Agitateur magnétique

#### Protocole expérimentale

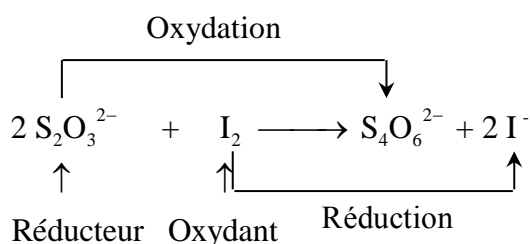
- ☑ Rincer la burette avec la solution aqueuse de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , puis la remplir jusqu'au trait zéro par cette solution de concentration connue.
- ☑ Mettre un barreau aimanté dans le bécher, puis introduire (20 mL, mesurés à la pipette) de la solution aqueuse de  $\text{I}_2$  à doser, puis quelques gouttes d'empis d'amidon, et actionner l'agitateur.
- ☑ Ouvrir le robinet de la burette pour verser lentement la solution de thiosulfate de sodium dans le bécher, tout en surveillant la couleur du milieu réactionnel : fermer le robinet au moment où le milieu réactionnel se décolore.
- ☑ Noter le volume versé de la solution de thiosulfate de sodium : 40 mL
- ☑ Vider la verrerie utilisée et la rincer, ainsi que le barreau aimanté, à l'eau distillée.

#### ii. Interprétation

- \* La couleur bleue-noire de l'empis d'amidon en présence de  $\text{I}_2$  vient de disparaître  $\Rightarrow \text{I}_2$  est transformé en ions  $\text{I}^-$  incolores :  $\text{I}_2 + 2 \text{e}^- \xrightarrow{\text{réduction}} 2 \text{I}^-$ , couple redox :  $\text{I}_2 / \text{I}^-$

L'entité susceptible de fournir des  $\text{e}^-$  étant  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$  (ion thiosulfate, appartenant au couple redox  $\text{S}_4\text{O}_6^{2-} / \text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ) :  $2 \text{S}_2\text{O}_3^{2-} \xrightarrow{\text{oxydation}} \text{S}_4\text{O}_6^{2-} + 2 \text{e}^-$

D'où l'équation bilan de la réaction redox (totale et rapide) :



⇒ Lorsqu'on aurait versé une quantité d'ions thiosulfates telle que  $n(\text{S}_2\text{O}_3^{2-}) = 2 \cdot n_0(\text{I}_2)$  ;

toute la quantité initiale de diiode est oxydée, c'est l'équivalence : soit  $V_{\text{Red E}}$  le volume ainsi versé,

$$C_{\text{Red}} \cdot V_{\text{Red E}} = 2 C_{\text{Ox}} \cdot V_{\text{Ox}} \Rightarrow C_{\text{Ox}} = \frac{V_{\text{Red E}}}{2 V_{\text{Ox}}} C_{\text{Red}} = \frac{40}{2 \cdot 20} \cdot 0,1 = 0,1 \text{ mol.L}^{-1}$$

\* Par conséquent

- Pour  $V_{\text{Red}} < V_{\text{Red E}}$  : Toute la quantité d'ions  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$  versée est oxydée, en réduisant seulement une partie de la quantité initiale de  $\text{I}_2 \Rightarrow$  persistance de la couleur bleue de l'empois d'amidon.
- Pour  $V_{\text{Red}} = V_{\text{Red E}}$  : Toute la quantité d'ions  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$  versée est oxydée, en réduisant toute la quantité initiale de  $\text{I}_2 \Rightarrow$  disparition de la couleur bleue de l'empois d'amidon.
- Pour  $V_{\text{Red}} > V_{\text{Red E}}$  : Les ions  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$  versés ne trouvent plus du diiode  $\text{I}_2$  pour réagir avec.

Cette expérience permet de déterminer la concentration  $C_{\text{Ox}}$  de la solution oxydante, par mesure d'un **volume** ( $V_{\text{Red}}$ ) de la solution réductrice titrée; c'est un dosage volumétrique. Pour une meilleure précision, il convient de refaire le dosage 2 à 3 fois en ralentissant considérablement le versement de la solution titrante à l'approche de  $V_{\text{Red E}}$ .

### Rq

On aurait pu se passer de l'empois d'amidon, puisque  $\text{I}_2$  confère au milieu réactionnel une couleur brune à jaune pâle qui disparaît à l'équivalence ; cependant il sera difficile de repérer l'équivalence avec précision.

### Application-2

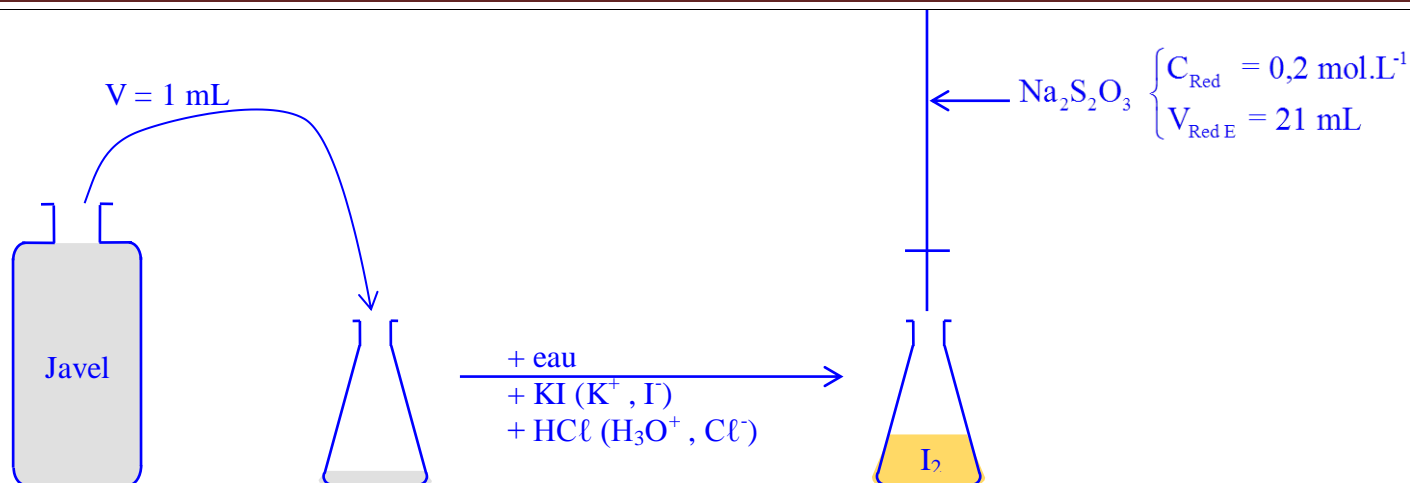
On se propose de doser les ions hypochlorite  $\text{ClO}^-$ , principal constituant d'une eau de Javel.

On prélève  $V = 1 \text{ mL}$  d'une bouteille d'eau de javel, qu'on dilue environ 10 fois dans un erlenmeyer ; puis on lui ajoute une solution d'iodure de potassium et une solution d'acide chlorhydrique de concentrations et de volumes suffisants pour que toute la quantité d'ions  $\text{ClO}^-$  réagisse : Il se forme du diiode qui confère à la solution une couleur brune.

La quantité de diiode formée est ensuite dosée par une solution aqueuse de thiosulfate de sodium  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  de titre  $C_{\text{Red}} = 0,2 \text{ mol.L}^{-1}$  ; l'équivalence est atteinte pour un volume  $V_{\text{Red E}} = 21 \text{ mL}$



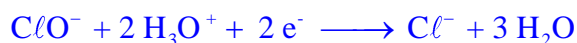
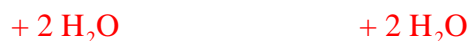
1. Ecrire l'équation de la réaction de formation du diiode (considérée totale), sachant que les couples redox mis en jeu sont :  $\text{ClO}^- / \text{Cl}^-$  et  $\text{I}_2 / \text{I}^-$ .
2. les couples redox mis en jeu lors du dosage étant  $\text{I}_2 / \text{I}^-$  et  $\text{S}_4\text{O}_6^{2-} / \text{S}_2\text{O}_3^{2-}$  :
  - a) Ecrire l'équation de la réaction de dosage, et calculer la quantité de matière de  $\text{I}_2$  qu'on vient de doser.
  - b) Déduire la concentration en ions hypochlorite de l'eau de Javel.



$$[\text{ClO}^-] = ?$$

1. Formation de  $\text{I}_2$  par oxydation du couple  $\text{I}_2 / \text{I}^-$  :  $2 \text{I}^- \longrightarrow \text{I}_2 + 2 \text{e}^-$

$\Rightarrow$  Réduction du couple  $\text{ClO}^- / \text{Cl}^-$  :  $\text{ClO}^- + \dots \text{e}^- \longrightarrow \text{Cl}^-$



D'où l'équation bilan :  $2 \text{I}^- + \text{ClO}^- + 2 \text{H}_3\text{O}^+ \longrightarrow \text{I}_2 + \text{Cl}^- + 3 \text{H}_2\text{O}$

2.



$$\Rightarrow n(\text{I}_2) = \frac{1}{2} \cdot n_E(\text{S}_2\text{O}_3^{2-}) = \frac{1}{2} \cdot C_{\text{Red}} V_{\text{RedE}} = \frac{1}{2} \cdot 0,2 \cdot 21 \cdot 10^{-3} = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$$

b)  $[\text{ClO}^-] = \frac{n(\text{ClO}^-)}{V}$  ; d'après l'équation de la réaction de formation du diiode,  $n(\text{ClO}^-) = n(\text{I}_2)$

$$\text{d'où } [\text{ClO}^-] = \frac{2,1 \cdot 10^{-3} \text{ mol}}{10^{-3} \text{ L}} : \boxed{[\text{ClO}^-] = 2,1 \text{ mol.L}^{-1}}$$



**Application-3**

On dispose d'une solution aqueuse de permanganate de potassium ( $\text{KMnO}_4$ ) de titre  $C_{\text{Ox}} = 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$ , et d'une solution aqueuse de chlorure de fer II ( $\text{FeCl}_2$ ) de titre  $C_{\text{Red}}$  inconnu; on se propose de déterminer la valeur de  $C_{\text{Red}}$  par dosage redox.

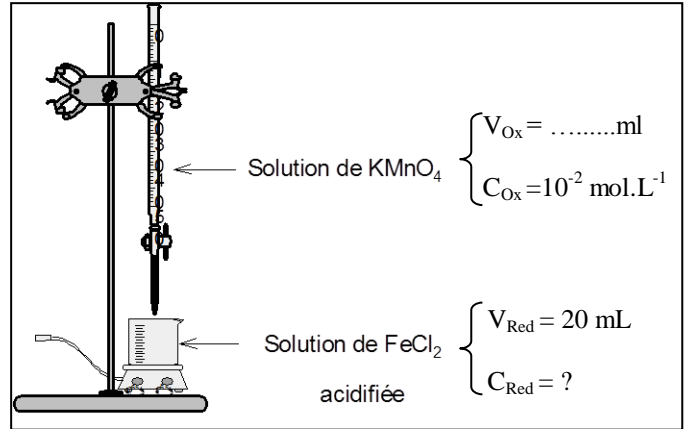
On verse la solution de permanganate de potassium sur la solution de chlorure de fer II en présence de quelques millilitres d'acide sulfurique ;

- \* Avant d'atteindre l'équivalence, la couleur violette due aux ions  $\text{MnO}_4^-$  disparaît

immédiatement tout en atténuant la couleur verdâtre de la solution de chlorure de fer II due aux ions

ferreux  $\text{Fe}^{2+}$ , et la nuancant progressivement d'une teinte rouille clair caractéristique de la formation d'ions ferriques  $\text{Fe}^{3+}$ .

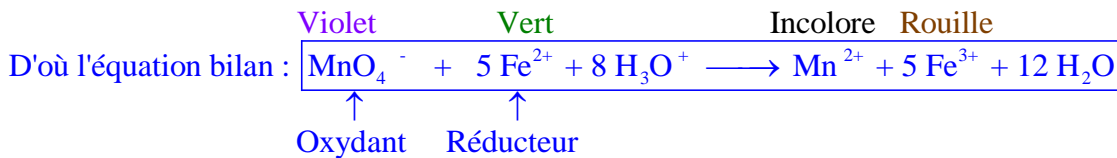
- \* A la première goutte dont la couleur persiste (sous forme de violet nuancé de rouille clair : rose), on arrête le dosage : c'est l'équivalence,  $V_{\text{Ox E}} = 32 \text{ mL}$ .



1. Sachant que les couples redox mis en jeu sont :  $\text{MnO}_4^- / \text{Mn}^{2+}$  et  $\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{2+}$  ; écrire l'équation de la réaction de ce dosage (manganométrique), et indiquer l'oxydant et le réducteur.
2. Donner les caractères de la réaction de dosage, et expliquer les changements de couleur observés.
3. Calculer la concentration de la solution de chlorure de fer II.
4. Comment devient la couleur du milieu réactionnel si on continue à verser la solution de permanganate de potassium au-delà de l'équivalence ?

1. Oxydation des ions  $\text{Fe}^{2+}$  en ions  $\text{Fe}^{3+}$  :  $(\text{Fe}^{2+} \longrightarrow \text{Fe}^{3+} + e^-) \times 5$

$\Rightarrow$  Réduction des ions  $\text{MnO}_4^-$  en ions  $\text{Mn}^{2+}$  :  $\text{MnO}_4^- + 8 \text{H}_3\text{O}^+ + 5 e^- \longrightarrow \text{Mn}^{2+} + 12 \text{H}_2\text{O}$



2. Réaction rapide et totale ;

- \* Pour  $V_{\text{Ox}} < V_{\text{Ox E}}$  : Toute la quantité d'ions  $\text{MnO}_4^-$  versée est réduite en ions  $\text{Mn}^{2+}$  incolores, en oxydant seulement une partie de la quantité initiale d'ions  $\text{Fe}^{2+}$  en ions  $\text{Fe}^{3+} \Rightarrow$  disparition de la couleur violette, atténuation de la couleur verte, et apparition de la couleur rouille.

- \* Pour  $V_{\text{Ox}} = V_{\text{Ox E}}$  : Toute la quantité d'ions  $\text{MnO}_4^-$  versée est réduite, en oxydant toute la quantité initiale d'ions  $\text{Fe}^{2+} \Rightarrow$  il n'y a que la couleur rouille claire des ions  $\text{Fe}^{3+}$ , mais il faut dépasser l'équivalence d'une goutte pour la détecter : cette goutte verra sa couleur violette persister, et se mélanger à la couleur rouille (rose)

3.  $n_0(\text{Fe}^{2+}) = 5 \cdot n_E(\text{MnO}_4^-) \Rightarrow n_0(\text{FeCl}_2) = 5 \cdot n_E(\text{KMnO}_4) \Rightarrow C_{\text{Red}} \cdot V_{\text{Red}} = 5 \cdot C_{\text{Ox}} \cdot V_{\text{Ox E}}$

$$\Rightarrow C_{\text{Red}} = 5 \cdot \frac{V_{\text{Ox E}}}{V_{\text{Red}}} \cdot C_{\text{Ox}} = 5 \cdot \frac{32}{20} \cdot 10^{-2} : \boxed{C_{\text{Red}} = 8 \cdot 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}}$$

4. Pour  $V_{\text{Ox}} > V_{\text{Ox E}}$  : Les ions  $\text{MnO}_4^-$  versées ne trouvent plus des ions  $\text{Fe}^{2+}$  pour réagir avec  $\Rightarrow$  ils restent en solution et lui confèrent une teinte de plus en plus violette nuancée de rouille.

## TP 6 : Dosage iodométrique : application à la détermination du taux d'insaturation d'une huile d'olive

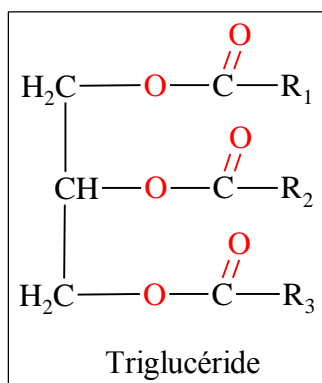
### Objectifs :

- Déterminer l'indice d'iode d'une huile d'olive au moyen d'un dosage iodométrique.
- Calculer son taux d'insaturation.

### Matériel :

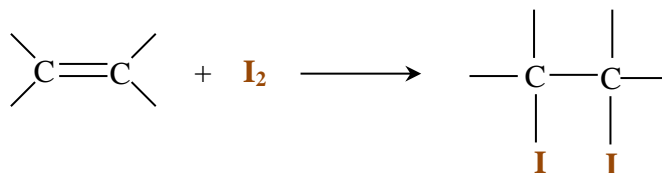
- |  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 Erlenmeyers de 250 mL + Bouchons</li> <li>• 1 Bécher</li> <li>• 1 Eprouvette graduée (<math>\geq 100</math> mL)</li> <li>• 1 Propipette</li> <li>• 2 Pipettes graduées</li> <li>• 2 Pipettes de 10 mL</li> <li>• 1 Pipette de 20 mL</li> <li>• 1 Burette sur potence (<math>\geq 50</math> mL)</li> <li>• 1 Balance de précision</li> <li>• 1 Agitateur magnétique + Barreau aimanté</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 Pissettes d'eau distillée</li> <li>• Empois d'amidon</li> <li>• Huile d'olive dans un compte-gouttes</li> <li>• Chloroforme (<math>\text{CHCl}_3</math>)</li> <li>• Solution aqueuse de KI (10 %)</li> <li>• Solution aqueuse de <math>\text{Hg}(\text{CH}_3\text{COO})_2</math> (~ 0,1 M)</li> <li>• Solution aqueuse de <math>\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3</math> (0,25 M)</li> </ul> |
|--|---|
- |   |                            |
|---|----------------------------|
| } | 12,7 g, $\text{I}_2$       |
| } | 8 g, $\text{Br}_2$         |
| } | 500 mL, acide acétique pur |

### Notions de taux d'insaturation et d'indice d'iode d'une huile :



L'huile d'olive est constituée à 99 % de triglycérides ; la qualité de l'huile d'olive (ainsi que toute autre huile) dépend du nombre de doubles liaisons ( $\text{C}=\text{C}$ ) dans les groupes  $\text{R}_1$ ,  $\text{R}_2$  et  $\text{R}_3$  : moins il y a d'insaturations, plus l'huile rancit moins pendant la conservation.

Dans l'industrie agroalimentaire, on utilise comme indicateur du taux d'insaturation d'une huile ; la masse (en g) de diiode ( $\text{I}_2$ ) pouvant être fixée sur **100 g** d'huile, par addition sur ses doubles liaisons ( $\text{C}=\text{C}$ ) : il est appelé **indice d'iode ( $\text{I}_i$ )**.



Quant au **taux d'insaturation**, il est défini comme étant le nombre de mol de double liaisons ( $\text{C}=\text{C}$ ) se trouvant dans **100 g** d'huile : puisque chaque double liaison fixe une molécule  $\text{I}_2$  ;

$$n(\text{C}=\text{C}) = n(\text{I}_2)_{\text{fixé par } 100 \text{ g}} = \frac{\text{I}_i}{M(\text{I}_2)}, \text{ avec } M(\text{I}_2) = 2.M(\text{I}) = 2.127 = 254 \text{ g.mol}^{-1}$$

Exemples		$\text{I}_i$ (g)	Taux d'insaturation (mol)
	<b>Huile d'olive</b>	78 - 88	0,3 - 0,35
	<b>Huile d'arachide</b>	83 - 98	0,33 - 0,38
	<b>Huile de tournesol</b>	120 - 132	0,47 - 0,52

Source des valeurs de  $\text{I}_i$  : [bit.ly/olivierdeprovence](http://bit.ly/olivierdeprovence)

Cependant l'addition de l'iode sur les carbones des doubles liaisons d'une huile est irréalisable à partir de l'iode moléculaire ( $I_2$ ) ; pour déterminer l'indice d'iode d'une huile, certaines méthodes ont été mises au point telle que la méthode de Hanus ou la méthode de Wijs.

Dans ce qui suit ; on se propose de déterminer l'indice d'iode d'une huile d'olive, et par suite son taux d'insaturation, par la méthode de Hanus.

## Manipulation :

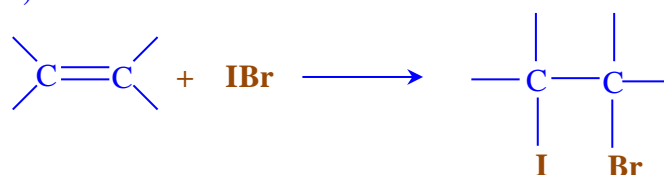
### 1. Dissolution de l'huile dans le chloroforme ( $CHCl_3$ )

- Mettre l'erenmeyer sur la balance, et la ramener à zéro.
- Y introduire une dizaine de gouttes d'huile, et noter la valeur de leur masse :  $m = 0,2 \text{ g}$ .
- Ajouter, à la pipette, 10 mL de chloroforme.
- Introduire un barreau aimanté dans l'erenmeyer, le poser sur l'agitateur magnétique et actionner ce dernier jusqu'à dissolution totale de l'huile.

### 2. Réaction d'addition du réactif de Hanus sur les doubles liaisons ( $C = C$ ) de l'huile

- Ajouter, à la pipette, 25 mL de réactif de Hanus et immédiatement après 10 mL de la solution d'acétate de mercure II, prélevés aussi à la pipette. (catalyseur)
- Boucher l'erenmeyer, et actionner l'agitateur quelques secondes ; laisser ensuite le mélange reposer pendant 3 min environ.

Le réactif de Hanus est une solution de bromure d'iode ( $I\text{Br}$ ) dans l'acide éthanoïque pur : l' $I\text{Br}$  s'additionne sur les doubles liaisons ( $C = C$ ) de l'huile selon le schéma :



L' $I\text{Br}$  étant en excès, et la réaction totale ; tous les carbones insaturés seront halogénés (iodé ou bromé)

### 3. Détermination de la quantité de réactif de Hanus restante

#### a) Transformation de l' $I\text{Br}$ restant en diiode

- Ajouter dans l'erenmeyer 15 mL de la solution d'iodure de potassium ( $\text{KI}$ ), prélevés à la pipette, puis 100 mL d'eau distillée mesurés à l'éprouvette.
- Agiter et noter l'apparition de la couleur brune caractéristique du diiode ( $I_2$ ).

$\text{KI}$  étant en excès, et la réaction totale ; toute la quantité d'  $I\text{Br}$  qui n'a pas réagi est transformée en ( $I_2$ ) :



#### b) Dosage du diiode formé

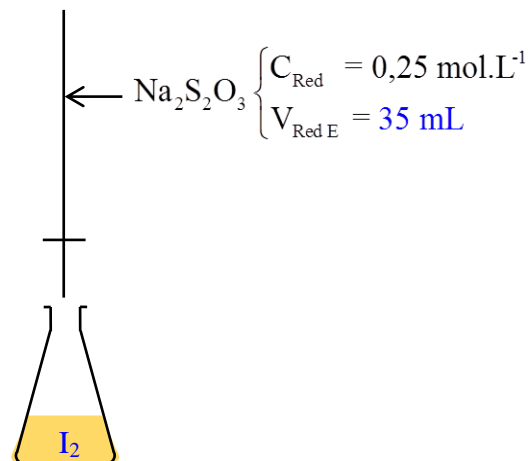
Doser le diiode formé, par la solution de thiosulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) en présence d'empois d'amidon, selon le protocole décrit dans le cours. Noter le volume versé à l'équivalence.

\* L'équation de la réaction du dosage étant :



$$\text{alors } n(\text{I}_2) = \frac{1}{2} \cdot n_E(\text{S}_2\text{O}_3^{2-}) = \frac{1}{2} \cdot C_{\text{Red}} V_{\text{Red E}}$$

\* Or  $n(\text{IBr})_{\text{rest}} = n(\text{I}_2)$ , alors  $n(\text{IBr})_{\text{rest}} = \frac{1}{2} \cdot C_{\text{Red}} V_{\text{Red E}}$



**4. Détermination de la quantité de réactif de Hanus utilisée**

Refaire la procédure précédente à blanc ; c.-à-d. en ignorant l'ajout d'huile et les opérations qui lui sont inhérentes. Noter enfin le volume de thiosulfate de sodium versé à l'équivalence :  $V_{\text{Red E}}^0 = 40 \text{ mL}$

$$n(\text{IBr})_0 = \frac{1}{2} \cdot C_{\text{Red}} \cdot V_{\text{Red E}}^0$$

**5. Exploitation des résultats**

a) Ecrire l'expression de la quantité d'IBr fixée par l'huile :

$$n(\text{IBr})_{\text{fixé}} = n(\text{IBr})_0 - n(\text{IBr})_{\text{rest}} = \frac{1}{2} \cdot C_{\text{Red}} \cdot (V_{\text{Red E}}^0 - V_{\text{Red E}})$$

b) Supposons qu'il est possible de fixer du diiode ( $\text{I}_2$ ) sur l'huile, à la place de l'IBr ; écrire l'expression de la quantité de diiode équivalente à la quantité de réactif de Hanus fixée par la masse d'huile utilisée :

$$n(\text{I}_2)_{\text{fixé}} = n(\text{IBr})_{\text{fixé}} = \frac{1}{2} \cdot C_{\text{Red}} \cdot (V_{\text{Red E}}^0 - V_{\text{Red E}})$$

c) En déduire la masse de diiode pouvant être fixée par cette masse d'huile :

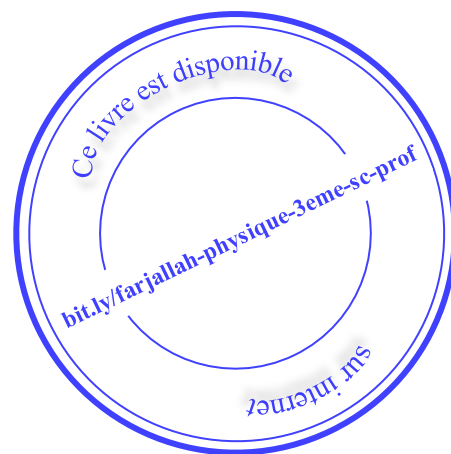
$$m(\text{I}_2)_{\text{fixé}} = n(\text{I}_2)_{\text{fixé}} \cdot M(\text{I}_2) = \frac{1}{2} M(\text{I}_2) C_{\text{Red}} (V_{\text{Red E}}^0 - V_{\text{Red E}})$$

d) En déduire de l'indice d'iode de cette huile :

$$I_i = \frac{100}{m} \cdot m(\text{I}_2)_{\text{fixé}} = \frac{100}{m} \cdot \frac{1}{2} M(\text{I}_2) C_{\text{Red}} (V_{\text{Red E}}^0 - V_{\text{Red E}}) = \frac{100}{0,2} \cdot \frac{1}{2} \cdot 2540,25 (40 - 35) \cdot 10^3$$

$$I_i \approx 80 \text{ g}$$

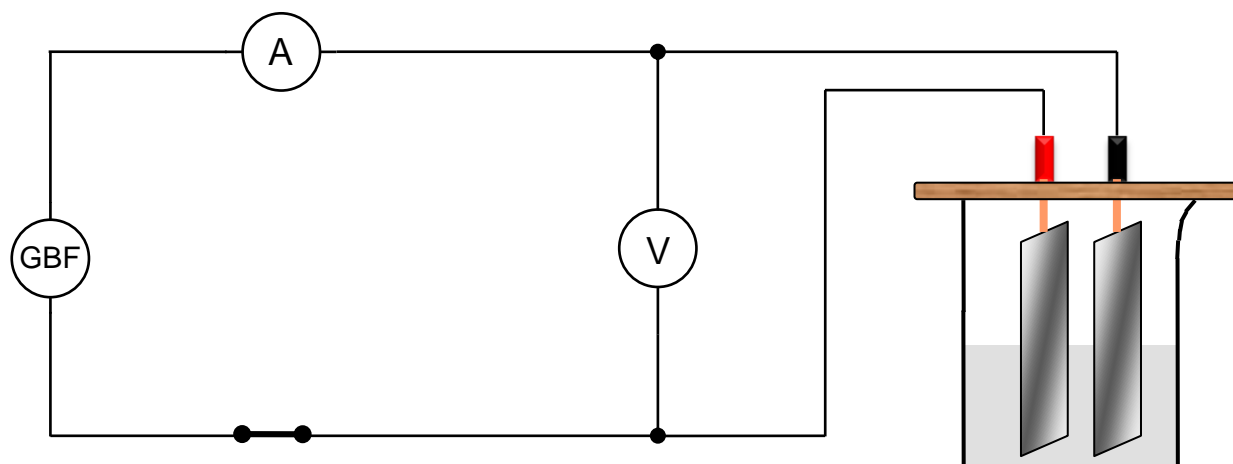
e) En déduire le taux d'insaturation de cette huile :  $n(\text{C}=\text{C}) = \frac{I_i}{M(\text{I}_2)} = \frac{80}{254} \approx 0,3 \text{ mo}$



## II- Détermination d'une quantité de matière par mesure d'une grandeur physique : la conductance électrique.

### 1) Principe (Fig-3)

Figure-3



- \* Le bécher contient une solution d'électrolyte.
- \* Deux électrodes identiques planes en platine, sont maintenues en regard à une distance fixe (cellule conductimétrique).
- \* Le GBF applique entre les électrodes une tension alternative sinusoïdale de fréquence  $N$ , dont la valeur efficace  $U$  est mesurée par le voltmètre (en mode AC).
- \* L'ampèremètre (en mode AC) mesure la valeur efficace  $I$  de l'intensité du courant dans le circuit.

- \* En négligeant la résistance des électrodes, et en admettant que la portion de solution entre les électrodes obéit à la loi d'Ohm :  $U = R \cdot I$ , avec  $R$  : résistance électrique de la portion de solution (en  $\Omega$ ).

Soit  $G = \frac{1}{R}$ , on aura  $U = \frac{1}{G} \cdot I$ , ou  $I = G U$  :  $G$  est appelée **conductance** électrique de la portion de solution, exprimée en Siemens (S) dans le S.I.

- \* Si on détermine la valeur de  $G$  dans les mêmes conditions, pour des solutions du même électrolyte, à différentes concentrations  $C$  ; on aura une courbe  $G = f(C)$  qui permet de déterminer la concentration de toute autre solution du même électrolyte dont la valeur de  $G$  est mesurée dans les mêmes conditions.

### 2) Exemple : solutions de NaCl

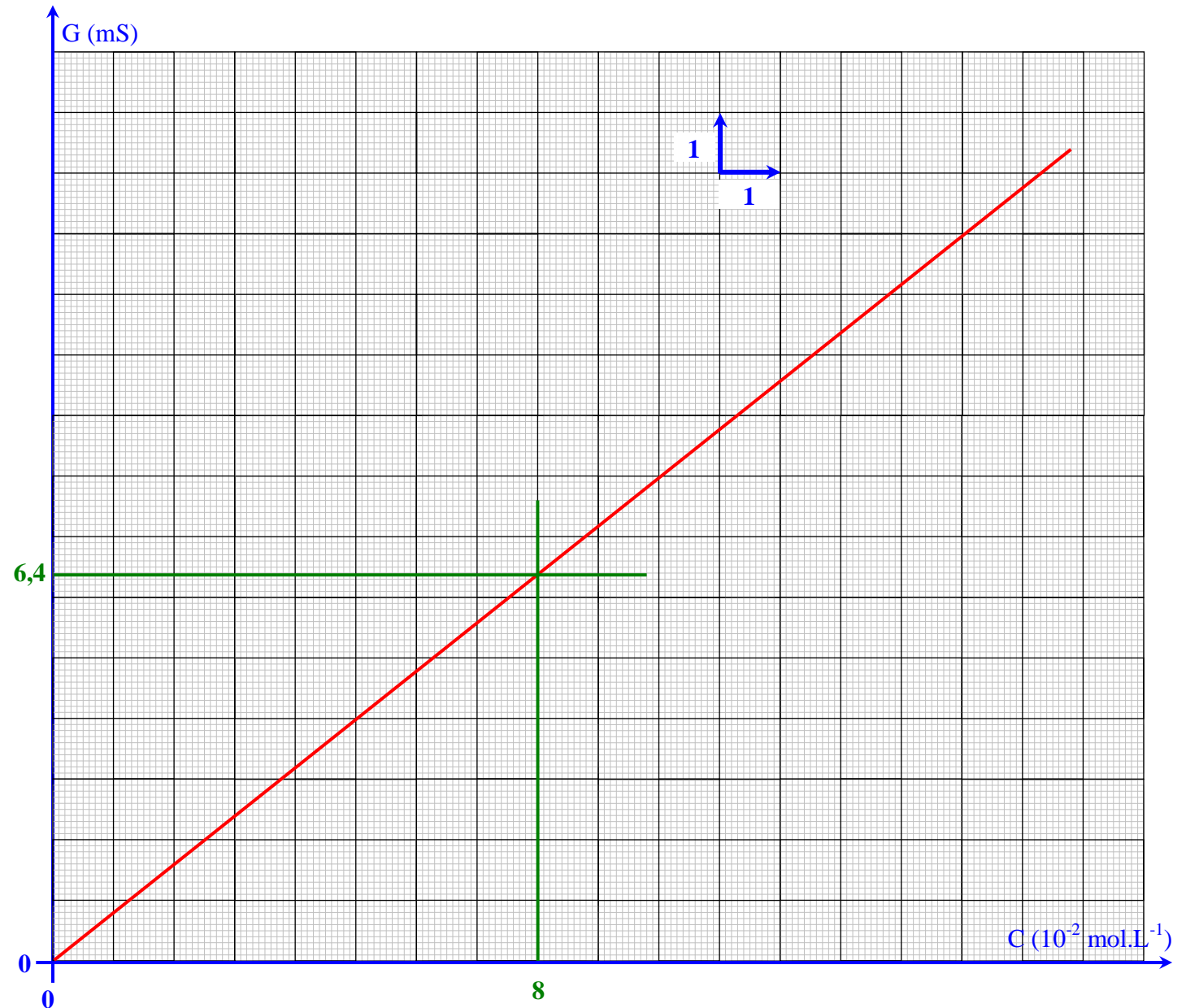
#### a) Traçage de la courbe d'étalonnage $G = f(C)$ (Fig-4)

- \* On prépare des solutions aqueuses de NaCl de différentes concentrations, mais de même volume et dans des béchers identiques (pour que la surface immergée des électrodes soit la même à chaque fois)
- \* On fixe  $N = 500$  Hz,  $U = 2$  V ; et on mesure l'intensité  $I$  pour chaque solution.

Figure-4

$C$ (mol.L <sup>-1</sup> )	0	$1 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$10 \cdot 10^{-2}$	$15 \cdot 10^{-2}$
$I$ (mA)	0	1,62	4,04	8,02	16,06	24,04
$G$ (mS) = $\frac{I}{U}$	0	0,81	2,02	4,01	8,03	12,02

→ Courbe  $G = f(C)$



On constate que  $G$  augmente avec l'augmentation de  $C$

**b) Utilisation de la courbe d'étalonnage pour déterminer la concentration inconnue d'une solution de NaCl**

Mesure de la conductance dans les mêmes conditions :  $I = 12,8 \text{ mA} \Rightarrow G = 6,4 \text{ mS} \Rightarrow C = 8 \cdot 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$

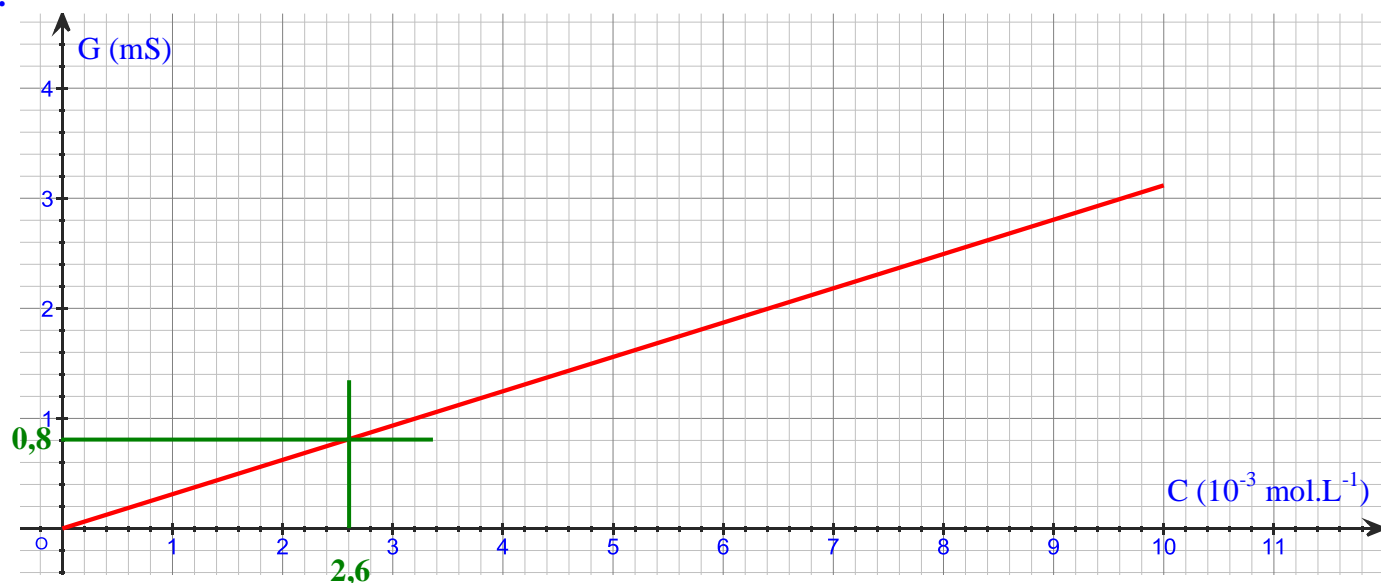
**Application-4**

Pour déterminer, par conductimétrie, la concentration d'une solution aqueuse de chlorure d'ammonium ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) ; on dispose d'une courbe d'étalonnage pour solutions aqueuses de chlorure d'ammonium, et du matériel nécessaire pour mesurer la conductance de la solution dans les mêmes conditions que lors de l'élaboration de la courbe d'étalonnage.



1. La mesure de la conductance de la solution donne  $G = 8,1 \text{ mS}$  ; est-il possible de déterminer la concentration de la solution via cette courbe d'étalonnage ?
2. Pour pouvoir utiliser cette courbe d'étalonnage ; on dilue la solution **10 fois**, et on mesure de nouveau sa conductance :  $G' = 0,8 \text{ mS}$ .
  - a) Déterminer la concentration  $C'$  de la solution diluée.
  - b) En déduire la concentration  $C$  de la solution initiale.

1. Non, car la valeur de  $G$  est en dehors de l'intervalle de conductances de la courbe d'étalonnage.
- 2.



- a)  $C' = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$
- b)  $C = 10 \cdot C' = 2,6 \cdot 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$



## TP 7 : Détermination de la concentration d'un sérum physiologique, par conductimétrie

### Objectifs :

- Elaborer une courbe d'étalonnage, permettant de titrer un sérum physiologique.
- Exploiter la courbe d'étalonnage pour déterminer la concentration molaire du sérum.

### Matériel :

- |  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 GBF</li> <li>• 2 Multimètres numériques</li> <li>• 1 Interrupteur</li> <li>• 6 Fils de connexion</li> <li>• 1 Cellule conductimétrique</li> <li>• 6 Fioles jaugées (50 mL) + Bouchons</li> <li>• 1 Propipette</li> <li>• 2 Pipettes graduées</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 Pipette de 10 mL</li> <li>• 1 Pipette de 20 mL</li> <li>• 9 Bêchers (100 mL)</li> <li>• 1 Pissette d'eau distillée</li> <li>• Papier filtre</li> <li>• Sérum physiologique</li> <li>• Solution aqueuse de NaCl (S<sub>0</sub>) <math>\left\{ \begin{array}{l} 10^{-2} \text{ M} \\ 200 \text{ mL} \end{array} \right.</math></li> </ul> |
|--|--|

### Manipulation :

Le sérum physiologique est une solution aqueuse de chlorure de sodium (NaCl), administrée à certains malades par voie intraveineuse. On se propose de vérifier, par conductimétrie, la valeur de sa concentration (C) indiquée par le laboratoire pharmaceutique l'ayant préparé.

#### 1. Elaboration de la courbe d'étalonnage

##### a) Préparation des solutions de NaCl

A partir de la solution mère S<sub>0</sub> de concentration C<sub>0</sub> = 1. 10<sup>-2</sup> mol.L<sup>-1</sup> ; préparer, par dilution, quatre solutions filles de même volume V = 50 mL, comme l'indique le tableau ci-dessous.

Pour préparer une solution fille S<sub>i</sub>, de concentration C<sub>i</sub> :

- Prélever, à la pipette, le volume V<sub>i</sub> de la solution mère.
- Le mettre dans une fiole jaugée de 50 mL, puis compléter par l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.
- Homogénéiser le contenu de la fiole, puis le verser dans un bécher de 100 mL : marquer le bécher du nom de la solution S<sub>i</sub>.

↪ Calculer la valeur de la concentration C<sub>i</sub> de chaque solution S<sub>i</sub> :

La quantité de soluté dans le volume prélevé est n<sub>i</sub> = C<sub>0</sub>.V<sub>i</sub>, sa valeur après dilution s'écrit n<sub>i</sub> = C<sub>i</sub>.V

$$\Rightarrow C_i \cdot V = C_0 \cdot V_i \Rightarrow C_i = \frac{V_i}{V} \cdot C_0 = \frac{V_i (\text{mL})}{50} \cdot 1 \cdot 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1} \Rightarrow C_i (10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}) = \frac{V_i (\text{mL})}{50}$$

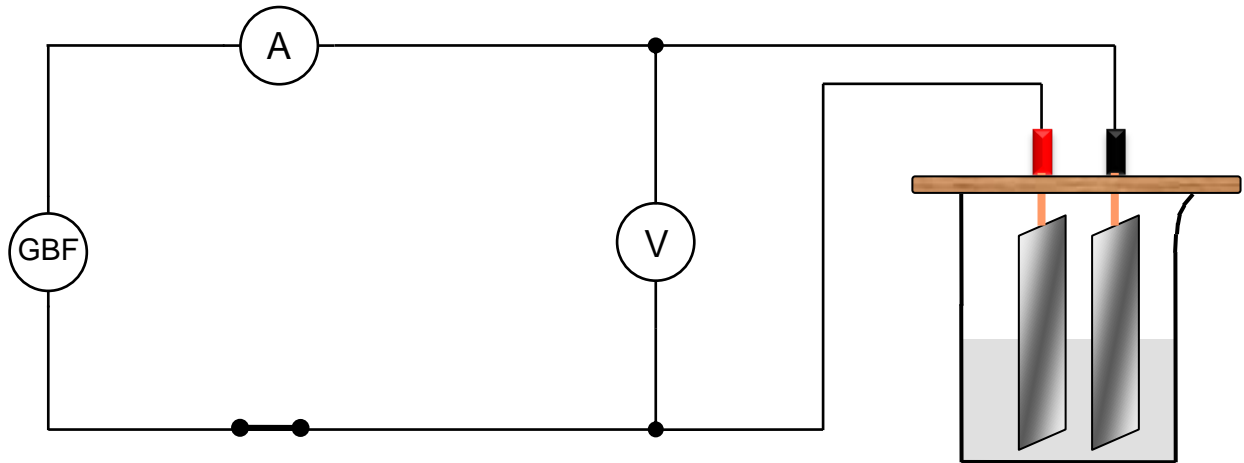
Solution	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>0</sub>
V <sub>i</sub> (mL)	5	12,5	25	37,5	
C <sub>i</sub> (10 <sup>-2</sup> mol.L <sup>-1</sup> )	0,1	0,25	0,5	0,75	1
I (mA)	0,16	0,4	0,8	1,2	1,6
G (mS)	0,08	0,2	0,4	0,6	0,8





**b) Mesure de la conductance, et traçage de la courbe d'étalonnage**

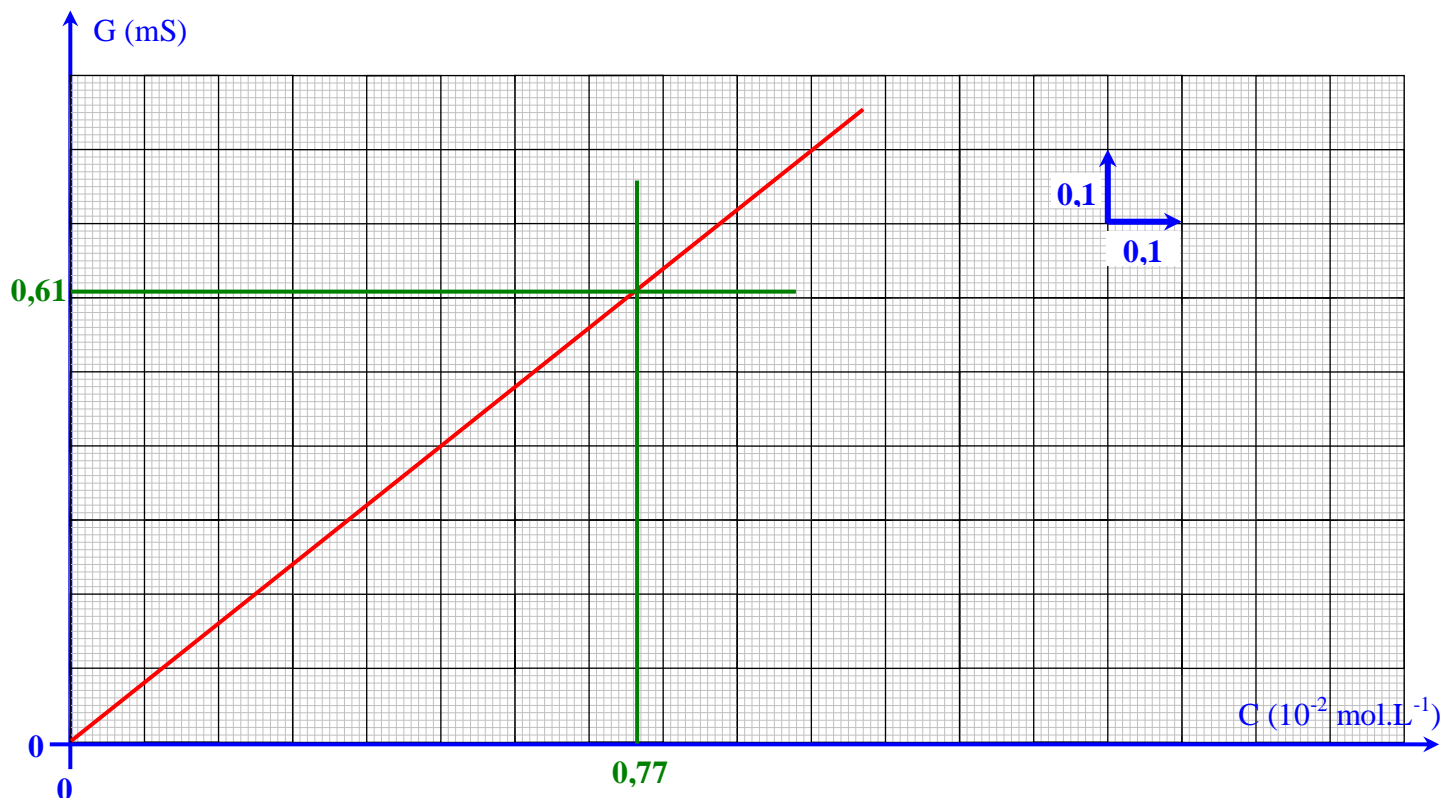
- Réaliser le montage de la figure ci-dessous avec la solution  $S_1$  :



- Régler la tension délivrée par le GBF sur le mode sinusoïdal avec une fréquence de 500 Hz, et une valeur efficace de 2 V ; mesurer la valeur efficace de l'intensité du courant.
- Refaire le même travail avec chacune des autres solutions ; avant chaque mesure :
- Rincer les électrodes à l'eau distillée, et les essuyer avec un papier filtre.
  - Veiller à garder les mêmes valeurs de fréquence et de tension efficace.
- (Pour la solution  $S_0$ , utiliser 50 mL prélevés à la pipette dans un bécher de 100 mL)

↪ Calculer la valeur de la conductance de chaque solution :  $G = \frac{I}{U} \Rightarrow G(S) = \frac{I(A)}{2V} \Rightarrow G(mS) = \frac{I(mA)}{2}$

↪ Tracer la courbe  $G = f(C)$



**2. Exploitation de la courbe d'étalonnage pour la détermination de la concentration du sérum**

**a) Par mesure de la conductance du sérum**

↳ Verser 50 mL de sérum dans une fiole jaugée de 50 mL ; les introduire dans un bécher de 100 mL, et mesurer sa conductance dans les mêmes conditions que précédemment :  $I = 24,6 \text{ mA} \Rightarrow G = 12,3 \text{ mS}$

↳ Est-ce que la courbe d'étalonnage permet de déterminer la concentration du sérum ; sinon, proposer une solution : **non, la conductance du sérum est largement en dehors de l'intervalle de conductances de la courbe d'étalonnage : il faut diluer le sérum considérablement.**

**b) Par mesure de la conductance du sérum dilué**

↳ Dilution du sérum 20 fois :

- Calculer la valeur du volume (v) qu'il faut prélever du sérum, afin d'obtenir une solution diluée 20 fois, et de volume  $V = 50 \text{ mL}$ .

Soit  $C'$  la concentration du sérum après dilution, et  $C$  sa concentration avant la dilution ;

$$C.v = C'.V \Rightarrow \frac{C}{C'}.v = V \Rightarrow 20.v = V \Rightarrow v = \frac{V}{20} = \frac{50 \text{ mL}}{20} = 2,5 \text{ mL}$$

- Prélever, à la pipette, **2,5 mL** de sérum, les introduire dans une fiole jaugée de 50 mL, puis compléter par l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. Homogénéiser le contenu de la fiole, puis le verser dans un bécher de 100 mL.

↳ Mesurer la conductance du sérum dilué, dans les mêmes conditions que précédemment :

$$I' = 1,23 \text{ mA} \Rightarrow G' = 0,61 \text{ mS}$$

↳ Déterminer la concentration  $C'$  du sérum dilué :

D'après la courbe d'étalonnage  $C' \approx 0,77 \cdot 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$

↳ En déduire la concentration molaire du sérum :  $C = 20.C' = 15,4 \cdot 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$

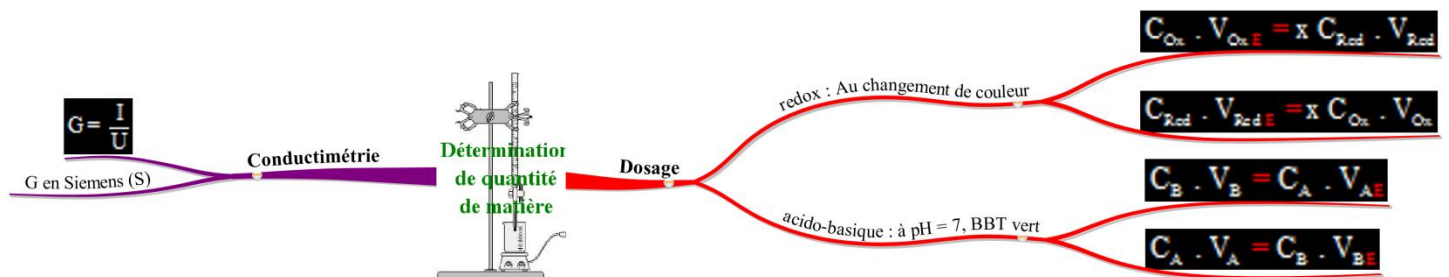
↳ En déduire la concentration massique du sérum : on donne  $M(\text{NaCl}) = 58,5 \text{ g.mol}^{-1}$

$$C_{\text{massique}} = C.M(\text{NaCl}) = 15,4 \cdot 10^{-2} \cdot 58,5 \approx 9 \text{ g.L}^{-1}$$

↳ Est-ce que ce résultat coïncide avec la concentration indiquée sur le flacon de sérum ?

Sur le flacon, est indiqué  $C_{\text{massique}} = 0,9 \% = 0,9 \text{ g}/100 \text{ mL} = \frac{0,9 \text{ g}}{100 \text{ mL}} = \frac{0,9 \text{ g}}{0,1 \text{ L}} = 9 \text{ g.L}^{-1}$  :

$C'$  est pratiquement le résultat obtenu par conductimétrie.



# Thème n°5 : Evolution d'un système chimique

## Chapitre : Avancement d'une réaction chimique, transformation totale et transformation limitée

### Objectifs

- Définir un système chimique.
- Calculer l'avancement d'une réaction chimique.
- Calculer l'avancement final d'une réaction chimique.
- Calculer l'avancement maximal d'une réaction chimique.
- Calculer le taux d'avancement final d'une réaction chimique.
- Déterminer le caractère total ou limité d'une réaction chimique.

### Prérequis

- Stœchiométrie, et réactif limitant.
- Réaction totale, réaction limitée.
- Notion de réaction redox, oxydation, réduction, oxydant, réducteur, couple redox.
- Dosage iodométrique.

### Matériel

Rien

### Rappels

- ❖ Une réaction qui atteint son état final sans épuiser aucun de ses réactifs, est dite **limitée**.  
ex la réaction d'estérification.
- ❖ Une réaction qui ne s'arrête que lorsque l'un de ses réactifs est épuisé, est dite **totale** :
  - Si les réactifs sont mélangés dans les proportions stœchiométriques, ils disparaissent tous complètement à la fin de la réaction.
  - Si les réactifs ne sont pas mélangés dans les proportions stœchiométriques, le réactif en défaut disparaît complètement à la fin de la réaction : *réactif limitant*. Les autres réactifs sont en excès, ils ne disparaissent pas complètement.

### Application

On brûle **57,5 g** de sodium (solide) dans **12 L** de dioxygène; une réaction totale se déroule, donnant lieu à la formation de **62 g** d'oxyde de sodium Na<sub>2</sub>O (solide)

1. Écrire et équilibrer l'équation de la réaction.
2. Calculer la quantité utilisée de chaque réactif.
3. Les réactifs sont-ils mélangés dans les proportions stœchiométriques ? sinon, quel est le réactif limitant et quel est le réactif en excès ?
4. Pour le réactif en excès ; calculer la masse ou le volume, restant à la fin de la réaction.
5. Calculer la masse de produit formé, de deux manières différentes.

On donne : Na = 23 , V<sub>m</sub> = 24 L.mol<sup>-1</sup> et M(Na<sub>2</sub>O) = 55 g.mol<sup>-1</sup>



2.

$$* \quad n(\text{Na})_{\text{utilisé}} = \frac{57,5}{23} = 2,5 \text{ mol}$$

$$* \quad n(\text{O}_2)_{\text{utilisé}} = \frac{12}{24} = 0,5 \text{ mol}$$

3. D'après l'équation de la réaction ; 0,5 mol de  $O_2$  nécessitent  $4 \cdot 0,5 = 2$  mol de Na : ayant utilisé 2,5 mol, il y a 0,5 mol de Na en excès  $\Rightarrow O_2$  est le réactif en défaut (limitant) : le mélange n'est pas stoechiométrique.

$$\left( \frac{n(\text{Na})_{\text{utilisé}}}{n(\text{O}_2)_{\text{utilisé}}} = \frac{2,5}{0,5} = 5 \neq \frac{4}{1} : \text{mélange non stoechiométrique} \right)$$

4.  $m(\text{Na})_{\text{rest}} = n(\text{Na})_{\text{rest}} \cdot M(\text{Na}) = 0,5 \cdot 23 = 11,5$  g

5.  $m(\text{NaO}_2) = n(\text{NaO}_2) \cdot M(\text{NaO}_2)$ ;  $n(\text{NaO}_2) = ?$

$$* \quad n(\text{NaO}_2) = 2 \cdot n(\text{O}_2)_{\text{réagi}} = 2 \cdot n(\text{O}_2)_{\text{utilisé}} = 2 \cdot 0,5 = 1 \text{ mol}$$

$$* \quad n(\text{NaO}_2) = \frac{1}{2} \cdot n(\text{Na})_{\text{réagi}} = \frac{1}{2} \cdot [n(\text{Na})_{\text{utilisé}} - n(\text{Na})_{\text{rest}}] = \frac{1}{2} \cdot [2,5 - 0,5] = 1 \text{ mol}$$

$$\Rightarrow m(\text{NaO}_2) = 55 \text{ g}.$$

## I- Notion de système chimique, évolution de sa composition

### 1) Exemple (Activité)

#### Activité

On considère l'expérience de la figure ci-contre :

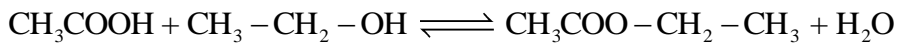
on mélange initialement **0,3 mol** d'acide éthanóïque,

**0,3 mol** d'éthanol, et quelques millilitres d'acide sulfurique (catalyseur).

Le mélange est plongé immédiatement dans le bain marie, tout en déclenchant un chronomètre.

Le réfrigérant empêche la vaporisation du contenu de l'erenmeyer ;

une réaction d'estérification aurait lieu selon l'équation :



1. Rappeler les propriétés de la réaction d'estérification.

2. On considère comme système chimique, le contenu de l'erenmeyer ;

a) Quelles sont les frontières de ce système ?

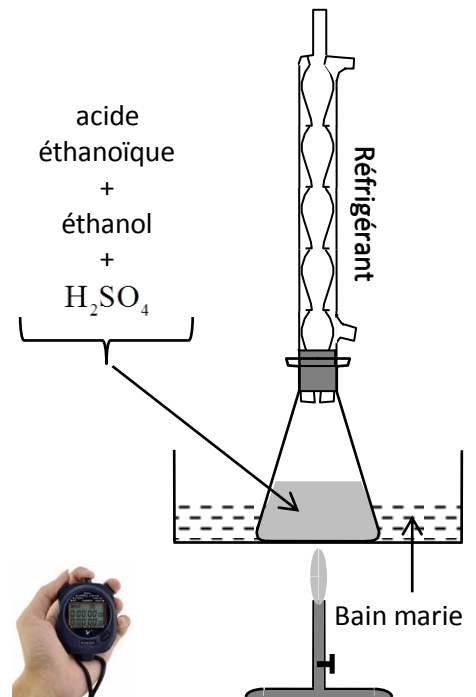
b) Quels sont ses constituants ; à l'état initial ( $t = 0$ ), et à un instant ultérieur ( $t$ ) quelconque.

c) Est-ce que ce système reste identique à lui-même au cours du temps, ou bien il évolue ? Expliquer.

3. La composition du système peut être déterminée à tout instant,

par dosage acido-basique de la quantité d'acide n'ayant pas encore réagi : à un instant donné, on dit que la réaction a avancé de ( $x$  mol) depuis l'état initial ; si ( $x$  mol) d'acide et ( $x$  mol) d'alcool ont disparu, pour donner ( $x$  mol) d'ester et ( $x$  mol) d'eau. Après environ 1 h, l'avancement de la réaction demeure constant à la valeur finale  $x_f = 0,2$  mol ;

a) Compléter le remplissage du tableau suivant (appelé tableau d'avancement).



		Equation de la réaction			
Etat du système	Avancement (.....)	Quantités de matière (mol)			
Initial					
Intermédiaire	x				
Final	= 0,2				

- b) Est-ce que le système évolue encore au-delà de 1 h ? Expliquer, et vérifier que la réaction est limitée.
4. Soit  $x_{\max}$  la valeur qu'aurait l'avancement final de la réaction si elle était totale ;
- Donner la valeur de  $x_{\max}$ .
  - La réaction n'étant pas totale en réalité; calculer son taux d'avancement final :  $\tau_f$
5. Le système étant constitué d'une seule phase (liquide), de volume pratiquement constant  $V = 40 \text{ mL}$  ; on peut décrire son état par l'avancement volumique  $y = \frac{x}{V}$  :
- Compléter le remplissage du tableau suivant.

		Equation de la réaction			
		$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	+ $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	$\rightleftharpoons$	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ + $\text{H}_2\text{O}$
Etat du système	Avancement volumique (.....)	.....			
Initial					
Intermédiaire					
Final					

- b) Vérifier que le taux d'avancement final de la réaction peut s'écrire aussi :  $\tau_f = \frac{y_f}{y_{\max}}$ .

- Lente et limitée.
- Paroi interne de l'erenmeyer (frontière réelle), et surface de contact avec l'air (frontière fictive).
  - \* A  $t = 0$  : acide éthanoïque, et éthanol.
    - \* A  $t > 0$  : acide éthanoïque, éthanol, éthanoate d'éthyle, et eau.
  - Le système évolue au cours du temps, car sa composition change suite à la réaction d'estérification : diminution des quantités d'acide éthanoïque et d'éthanol, et augmentation des quantités d'éthanoate d'éthyle et d'eau.

3.

a)

		Equation de la réaction			
		$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	+ $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	$\rightleftharpoons$	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ + $\text{H}_2\text{O}$
Etat du système	Avancement (mol)	Quantités de matière (mol)			
Initial	0	0,3	0,3	0	0
Intermédiaire	x	0,3 - x	0,3 - x	x	x
Final	$x_f$ = 0,2	0,3 - $x_f$ = 0,1	0,3 - $x_f$ = 0,1	$x_f$ = 0,2	$x_f$ = 0,2

- b) Au-delà de 1 h, le système cesse d'évoluer car sa composition demeure constante. Et puisque aucun des réactifs n'est épuisé, la réaction est limitée.

4.

- a)  $x_{\max} = 0,3 \text{ mol}$ .

b)  $\tau_f = \frac{x_f}{x_{\max}} = \frac{0,2}{0,3} \approx 0,67 = 67 \%$

5.

a)

		Equation de la réaction						
		$C_2H_4O_2$	+	$C_2H_6O$	$\rightleftharpoons$	$C_4H_8O_2$	+	$H_2O$
Etat du système	Avancement volumique (mol.L <sup>-1</sup> )	Concentrations (mol.L <sup>-1</sup> )						
Initial	0	7,5		7,5		0		0
Intermédiaire	y	7,5 - y		7,5 - y		y		y
Final	y <sub>f</sub> = 5	7,5 - y <sub>f</sub> = 2,5		7,5 - y <sub>f</sub> = 2,5		y <sub>f</sub> = 5		y <sub>f</sub> = 5

$$b) \tau_f = \frac{x_f}{x_{\max}} = \frac{\frac{x_f}{V}}{\frac{x_{\max}}{V}} = \frac{y_f}{y_{\max}} = \frac{5}{7,5} \approx 0,67$$

## 2) Généralisation

### a) Système chimique, transformation chimique

- \* Un système est une portion de l'Univers séparée du milieu extérieur (environnement) par des frontières réelles ou fictives bien définies. Le contenu d'un système chimique est décrit par la liste des entités chimiques dont il est constitué.
- \* Un système évolue lorsqu'il est le siège d'une transformation chimique : tout processus provoquant la modification de sa composition ; qu'on modélise par une réaction chimique, symbolisée par une équation.

### b) Avancement d'une réaction chimique

Soit  $a A + b B \longrightarrow c C + d D$ , l'équation de la réaction se déroulant dans un système contenant initialement les quantités de réactifs  $n_0(A)$  et  $n_0(B)$  :

- \* On dit que la réaction a avancé de 1 mol (ou 1 fois) depuis l'état initial, si a mol de A et b mol de B ont disparu et c mol de C et d mol de D sont apparues.
- \* Par suite, à un état quelconque pendant l'évolution du système ; la réaction aurait avancé de (x mol) depuis l'état initial, si (a.x mol) de A et (b.x mol) de B ont disparu et (c.x mol) de C et (d.x mol) de D sont apparues.
- \* Le tableau d'avancement permet de décrire l'état du système à tout instant de son évolution (Fig-1)

Figure-1

		Equation de la réaction						
		a A	+	b B	$\longrightarrow$	c C	+	d D
Etat du système	Avancement (mol)	Quantités de matière (mol)						
Initial	0	$n_0(A)$		$n_0(B)$		0		0
Intermédiaire	x	$n_0(A) - a x$		$n_0(B) - b x$		c.x		d.x
Final	x <sub>f</sub>	$n_0(A) - a x_f$		$n_0(B) - b x_f$		c.x <sub>f</sub>		d.x <sub>f</sub>

$$\rightarrow \text{A un instant quelconque, la composition du système est : } \begin{cases} n(\text{A}) = n_0(\text{A}) - a x \\ n(\text{B}) = n_0(\text{B}) - b x \\ n(\text{C}) = c x \\ n(\text{D}) = d x \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x = \frac{n_0(\text{A}) - n(\text{A})}{a} \\ x = \frac{n_0(\text{B}) - n(\text{B})}{b} \\ x = \frac{n(\text{C})}{c} \\ x = \frac{n(\text{D})}{d} \end{cases}$$

→ A l'état final ; l'avancement atteint sa valeur finale ( $x_f$ ), et la composition du système demeure constante : macroscopiquement, le système n'évolue plus.

### Rq

Pour un système constitué d'une seule phase de volume constant ; on peut décrire son état par l'avancement

volumique  $y = \frac{x}{V}$ ,  $x$  étant en mol  $\Rightarrow y$  en mol.L<sup>-1</sup>.

### c) Etat final : réaction totale et réaction limitée

#### Définition

On appelle avancement maximal ( $x_{\max}$ ) d'une réaction chimique ; la valeur de son avancement final si le système où elle se déroule évolue jusqu'à disparition du réactif limitant (et cela qu'il disparaisse réellement ou non). Par suite :

- \* Si à l'état final, aucun des réactif ne disparaît complètement ;  $x_f < x_{\max}$ , la réaction est limitée.

Son taux d'avancement final  $\tau_f = \frac{x_f}{x_{\max}} < 1$  (ou  $< 100\%$ ).

- \* Si à l'état final, l'un au moins des réactifs disparaît complètement ;  $x_f = x_{\max}$ , la réaction est totale.

Son taux d'avancement final  $\tau_f = \frac{x_f}{x_{\max}} = 1$  (ou  $= 100\%$ ).

#### Application-1

Dans un bécher contenant un volume  $V = 100 \text{ mL}$  d'une solution aqueuse d'acide chlorhydrique de concentration  $C = 0,2 \text{ mol.L}^{-1}$ , on introduit  $1,3 \text{ g}$  de grenaille de zinc ( $Zn = 65$ ).

Ce mélange constitue un système chimique dans lequel se déroule une réaction redox.

1. Ecrire l'équation de la réaction, sachant que les couples redox mis en jeu sont :  $Zn^{2+} / Zn$  et  $H_3O^+ / H_2$ .
2. Déterminer les quantités de matière des réactifs mis en présence initialement, et remplir le tableau d'avancement du système ci-dessous :

		Equation de la réaction			
Etat du système	Avancement (mol)	Quantités de matière (mol)			

3. Déterminer l'avancement maximal de la réaction ; quel est le réactif limitant ?
4. Cette réaction est, en fait, totale :
  - a) Donner la valeur de son avancement final, et son taux d'avancement final.
  - b) Remplir de nouveau le tableau d'avancement, avec les valeurs numériques des quantités de matière des différentes espèces dans l'état final.

		Equation de la réaction				
		+	→	+	+	
Etat du système	Avancement (mol)	Quantités de matière (mol)				
						excès
						excès
						excès



2.

$$* n_0(\text{Zn}) = \frac{1,3}{65} = 0,02 \text{ mol}$$

$$* n_0(\text{H}_3\text{O}^+) = n_0(\text{HCl}) = C.V = 0,2.0,1 \text{ L} = 0,02 \text{ mol}$$

		Equation de la réaction					
		Zn	+ 2 H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	→	Zn <sup>2+</sup>	+ H <sub>2</sub>	+ 2 H <sub>2</sub> O
Etat du système	Avancement (mol)	Quantités de matière (mol)					
Initial	0	0,02	0,02		0	0	excès
Intermédiaire	x	0,02 - x	0,02 - 2 x		x	x	excès
Final	x <sub>f</sub>	0,02 - x <sub>f</sub>	0,02 - 2 x <sub>f</sub>		x <sub>f</sub>	x <sub>f</sub>	excès

L'eau étant le solvant, il est largement en excès : la modification de sa quantité par la réaction, est négligeable.

3. A l'état final, on a dans tous les cas :

$$\begin{cases} n_f(\text{Zn}) \geq 0 \\ n_f(\text{H}_3\text{O}^+) \geq 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} 0,02 - x_f \geq 0 \\ 0,02 - 2 x_f \geq 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_f \leq 0,02 \text{ mol} \\ 2 x_f \leq 0,02 \text{ mol} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_f \leq 0,02 \text{ mol} \\ x_f \leq 0,01 \text{ mol} \end{cases} \Rightarrow x_f \leq 0,01 \text{ mol} \Rightarrow \boxed{x_{\max} = 0,01 \text{ mol}}$$

D'où  $\text{H}_3\text{O}^+$  est le réactif limitant.

4.

a)  $x_f = x_{\max} = 0,01 \text{ mol}$ ,  $\tau_f = 1 = 100 \%$

b)

		Equation de la réaction					
		Zn	+ 2 H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	→	Zn <sup>2+</sup>	+ H <sub>2</sub>	+ 2 H <sub>2</sub> O
Etat du système	Avancement (mol)	Quantités de matière (mol)					
Initial	0	0,02	0,02		0	0	excès
Intermédiaire	x	0,02 - x	0,02 - 2 x		x	x	excès
Final	0,01	0,01	0		0,01	0,01	excès



**Application-2**

On considère comme système chimique, une solution aqueuse d'acide méthanoïque  $\text{HCO}_2\text{H}$  obtenue par dissolution de  $5.10^{-3}$  mol de cet acide dans  $V = 1$  L d'eau : la mesure du pH de la solution donne  $\text{pH} = 3,06$ . On négligera les ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  provenant de l'ionisation propre de l'eau, devant ceux provenant de la réaction d'ionisation de l'acide.

1. Remplir le tableau d'avancement du système, ci-dessous :

		Equation de la réaction						
		$\text{HCO}_2\text{H}$	+	$\text{H}_2\text{O}$	$\longrightarrow$	$\text{HCO}_2^-$	+	$\text{H}_3\text{O}^+$
Etat du système	Avancement (mol)	Quantités de matière (mol)						
Initial	0	$5.10^{-3}$		excès		0		0
Intermédiaire	x	$5.10^{-3} - x$		excès		x		x
Final	$x_f$	$5.10^{-3} - x_f$		excès		$x_f$		$x_f$

- Quel est le réactif limitant ; déterminer l'avancement maximal de la réaction.
- Déterminer la valeur de l'avancement final de la réaction, et son taux d'avancement final : conclure.
- Dresser un nouveau le tableau d'avancement, avec les valeurs numériques des quantités de matière des différentes espèces dans l'état final.

1.

		Equation de la réaction						
		$\text{HCO}_2\text{H}$	+	$\text{H}_2\text{O}$	$\longrightarrow$	$\text{HCO}_2^-$	+	$\text{H}_3\text{O}^+$
Etat du système	Avancement (mol)	Quantités de matière (mol)						
Initial	0	$5.10^{-3}$		excès		0		0
Intermédiaire	x	$5.10^{-3} - x$		excès		x		x
Final	$x_f$	$5.10^{-3} - x_f$		excès		$x_f$		$x_f$

2.  $\text{H}_2\text{O}$  étant largement en excès (solvant)  $\Rightarrow \text{HCO}_2\text{H}$  est nécessairement le réactif limitant : l'avancement maximal est atteint si le réactif limitant à entièrement disparu  $\Rightarrow 5.10^{-3} - x_{\max} = 0 \Leftrightarrow x_{\max} = 5.10^{-3}$  mol

3.  $x_f = n_f(\text{H}_3\text{O}^+) = [\text{H}_3\text{O}^+].V = 10^{-\text{pH}}.V = 10^{-3,06}.1 : x_f = 8,71.10^{-4}$  mol  
 $\Rightarrow \tau_f = \frac{x_f}{x_{\max}} = \frac{8,71.10^{-4}}{5.10^{-3}} \approx 0,17 : \tau_f = 17\%$  : la réaction est limitée.

4.

		Equation de la réaction						
		$\text{HCO}_2\text{H}$	+	$\text{H}_2\text{O}$	$\longrightarrow$	$\text{HCO}_2^-$	+	$\text{H}_3\text{O}^+$
Etat du système	Avancement (mol)	Quantités de matière (mol)						
Initial	0	$5.10^{-3}$		excès		0		0
Intermédiaire	x	$5.10^{-3} - x$		excès		x		x
Final	$8,71.10^{-4}$	$4,13.10^{-3}$		excès		$8,71.10^{-4}$		$8,71.10^{-4}$

**Application-3**

On considère comme système chimique, un mélange de  $V_1 = 100 \text{ mL}$  d'une solution de nitrate de plomb  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  de concentration  $C_1 = 6.10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$  avec  $V_2 = 100 \text{ mL}$  d'une solution de chlorure de potassium  $\text{KCl}$  de concentration  $C_2 = 0,1 \text{ mol.L}^{-1}$ ; il se forme un précipité blanc de chlorure de plomb  $\text{PbCl}_2$  dont la masse est  $m = 0,62 \text{ g}$ .

1. Remplir le tableau d'avancement du système, ci-dessous;  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  et  $\text{KCl}$  étant des électrolytes forts :

		Equation de la réaction		
Etat du système	Avancement (mol)	Quantités de matière (mol)		
Initial				
Intermédiaire				
Final				

2. Quel est le réactif limitant ; déterminer l'avancement maximal de la réaction.  
 3. Déterminer la valeur de l'avancement final de la réaction, et son taux d'avancement final : conclure.

On donne  $M(\text{PbCl}_2) = 278,2 \text{ g.mol}^{-1}$

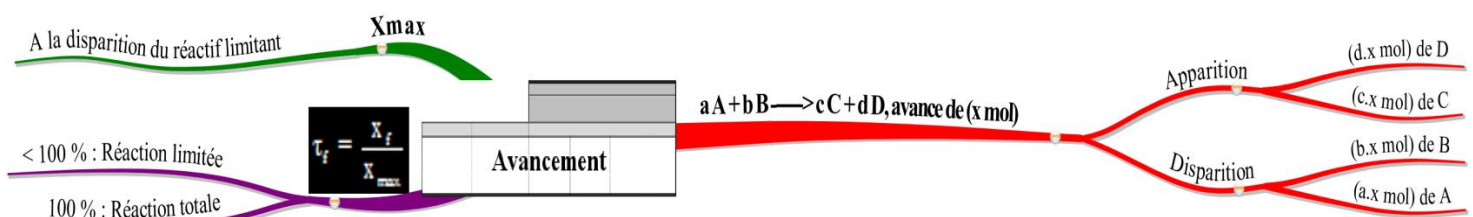
- 1.
- \*  $n_0(\text{Pb}^{2+}) = n_0(\text{Pb}(\text{NO}_3)_2) = C_1 \cdot V_1 = 6.10^{-2} \cdot 0,1 = 0,6.10^{-2} \text{ mol}$
  - \*  $n_0(\text{Cl}^-) = n_0(\text{KCl}) = C_2 \cdot V_2 = 0,1 \cdot 0,1 = 10^{-2} \text{ mol}$

		Equation de la réaction				
		$\text{Pb}^{2+}$	+	$2 \text{Cl}^-$	$\longrightarrow$	$\text{PbCl}_2(\text{sd})$
Etat du système	Avancement (mol)	Quantités de matière (mol)				
Initial	0	$0,6.10^{-2}$		$10^{-2}$		0
Intermédiaire	x	$0,6.10^{-2} - x$		$10^{-2} - 2x$		x
Final	$x_f$	$0,6.10^{-2} - x_f$		$10^{-2} - 2x_f$		$x_f$

2. D'après l'équation de la réaction ;  $0,6.10^{-2} \text{ mol}$  de  $\text{Pb}^{2+}$  nécessitent  $2 \cdot 0,6.10^{-2} = 1,2.10^{-2} \text{ mol}$  de  $\text{Cl}^-$  ; n'ayant utilisé que  $10^{-2} \text{ mol}$ ,  $\text{Cl}^-$  est en défaut (limitant). L'avancement maximal est atteint si le réactif limitant a entièrement disparu  $\Rightarrow 10^{-2} - 2x_{\text{max}} = 0 \Leftrightarrow x_{\text{max}} = 5.10^{-3} \text{ mol}$

3.  $x_f = n_f(\text{PbCl}_2) = \frac{m}{M(\text{PbCl}_2)} = \frac{0,62}{278,2} : x_f = 2,23.10^{-3} \text{ mol}$

$\Rightarrow \tau_f = \frac{x_f}{x_{\text{max}}} = \frac{2,23.10^{-3}}{5.10^{-3}} \approx 0,45 : \tau_f = 45 \% : \text{la réaction est limitée.}$



## TP 8 : Etude expérimentale de l'oxydation des ions iodure par les ions peroxydisulfate

### Objectifs :

- Réaliser la réaction d'oxydation des ions iodure par les ions peroxydisulfate, et déterminer expérimentalement son avancement à différentes dates.
- Tracer la courbe d'évolution de l'avancement de la réaction au cours du temps, et déterminer graphiquement son avancement final.
- Déterminer le taux d'avancement final de la réaction.

### Matériel :

- |  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 Bécher</li> <li>• 1 Bécher (250 mL)</li> <li>• 1 Eprouvette graduée (50 mL)</li> <li>• 1 Propipette</li> <li>• 1 Pipette de 10 mL</li> <li>• 1 Pipette de 20 mL</li> <li>• 1 Burette sur potence</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 Chronomètre</li> <li>• 1 Agitateur magnétique + Barreau aimanté</li> <li>• 1 Pissette d'eau distillée</li> <li>• Empois d'amidon</li> <li>• Solution aqueuse de <math>\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3</math> (0,2 M)</li> <li>• Solution aqueuse de KI (0,5 M)</li> <li>• Solution aqueuse de <math>\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8</math> (0,05 M)</li> </ul> |
|--|--|

### Manipulation :

#### 1. Expérience

Solution aqueuse de thiosulfate de sodium  
 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$   
 $(2 \text{Na}^+ + \text{S}_2\text{O}_3^{2-})$   
versée par fractions de  $V_0 = 0,5 \text{ mL}$

Formation de diiode ( $\text{I}_2$ ),  
immédiatement réduit  
en  $\text{I}^-$  par  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$

Agitateur magnétique

$p \cdot V_0$

$n_p(\text{S}_2\text{O}_3^{2-}) = p \cdot C_0 \cdot V_0$

$C_0 = 0,2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

Solution aqueuse d'iodure de potassium KI  
 $(\text{K}^+ + \text{I}^-)$   $\left[ \begin{array}{l} V_1 = 40 \text{ mL} \\ C_1 = 0,5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \end{array} \right.$

&

Solution aqueuse de peroxydisulfate de potassium  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$   $\left[ \begin{array}{l} V_2 = 10 \text{ mL} \\ C_2 = 0,05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \end{array} \right.$

+ empois d'amidon

- ☑ Rincer la burette avec la solution aqueuse de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , puis la remplir jusqu'au trait zéro par cette même solution.
- ☑ Mettre un barreau aimanté dans le bécher, le poser sur l'agitateur magnétique, puis ouvrir le robinet pour verser une 1<sup>ère</sup> fraction de 0,5 mL ( $p = 1$ ) : actionner l'agitateur.
- ☑ introduire dans le bécher environ 10 mL d'empois d'amidon (mesurés à l'éprouvette), puis leur ajouter 40 mL (mesurés à la pipette) de la solution de KI.

⚠ Tout en déclenchant le chronomètre, ajouter dans le bécher 10 mL (mesurés à la pipette) de la solution de  $K_2S_2O_8$  : **Ne plus toucher au chronomètre par la suite** 

- ☑ Dès qu'une coloration bleu-noire apparaît dans le bécher; noter le temps écoulé, tout en versant une 2<sup>ème</sup> fraction de 0,5 mL de la solution de  $Na_2S_2O_3$  ( $p = 2$ ). Ecrire la valeur du temps écoulé, ci-dessous.
- ☑ Dès que la coloration bleu-noire réapparaît de nouveau; noter le temps écoulé, tout en versant une 3<sup>ème</sup> fraction de 0,5 mL de la solution de  $Na_2S_2O_3$  ( $p = 3$ ). Ecrire la valeur du temps écoulé, ci-dessous.
- ☑ .
- ☑ .
- ☑ .
- ☑ Poursuivre de la sorte jusqu'à ce que la coloration bleu-noire ne réapparaît plus.
- ☑ Vider la verrerie utilisée et la rincer, ainsi que le barreau aimanté, à l'eau distillée.

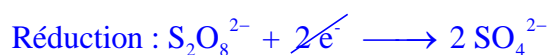
p		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V( $Na_2S_2O_3$ )		$V_0$	$2 V_0$	$3 V_0$	$4 V_0$	$5 V_0$	$6 V_0$	$7 V_0$	$8 V_0$	$9 V_0$	$10 V_0$
t (min)	0	0,8	2	3	4,1	6	7,8	10	13	17,3	25,2
x ( $10^{-4}$ mol)	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5

## 2. Interprétation, et détermination de l'avancement (x)

On considère comme système chimique, le contenu du bécher.

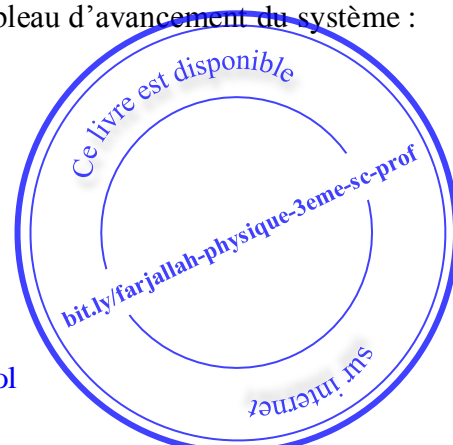
### a) Réaction de formation du diiode

Sachant que  $I_2 / I^-$  et  $S_2O_8^{2-} / SO_4^{2-}$ , sont les couples redox mis en jeu lors de la réaction conduisant à la formation du diiode ; écrire l'équation de la réaction, et dresser un tableau d'avancement du système :



\*  $n_0(I^-) = n_0(KI) = C_1 \cdot V_1 = 0,5 \cdot 40 \cdot 10^{-3} = 0,02 \text{ mol}$

\*  $n_0(S_2O_8^{2-}) = n_0(K_2S_2O_8) = C_2 \cdot V_2 = 0,05 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ mol}$

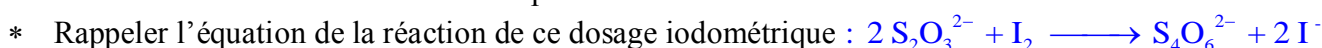


Equation de la réaction					
$2 I^-$	+	$S_2O_8^{2-}$	$\longrightarrow$	$I_2$	+ $2 SO_4^{2-}$

Etat du système	Avancement (mol)	Quantités de matière (mol)			
		$I_2$	$S_2O_8^{2-}$	$I^-$	$SO_4^{2-}$
Initial	0	0,02	$5 \cdot 10^{-4}$	0	0
Intermédiaire	x	$0,02 - 2x$	$5 \cdot 10^{-4} - x$	x	2x
Final	$x_f$	$0,02 - 2x_f$	$5 \cdot 10^{-4} - x_f$	$x_f$	2 $x_f$

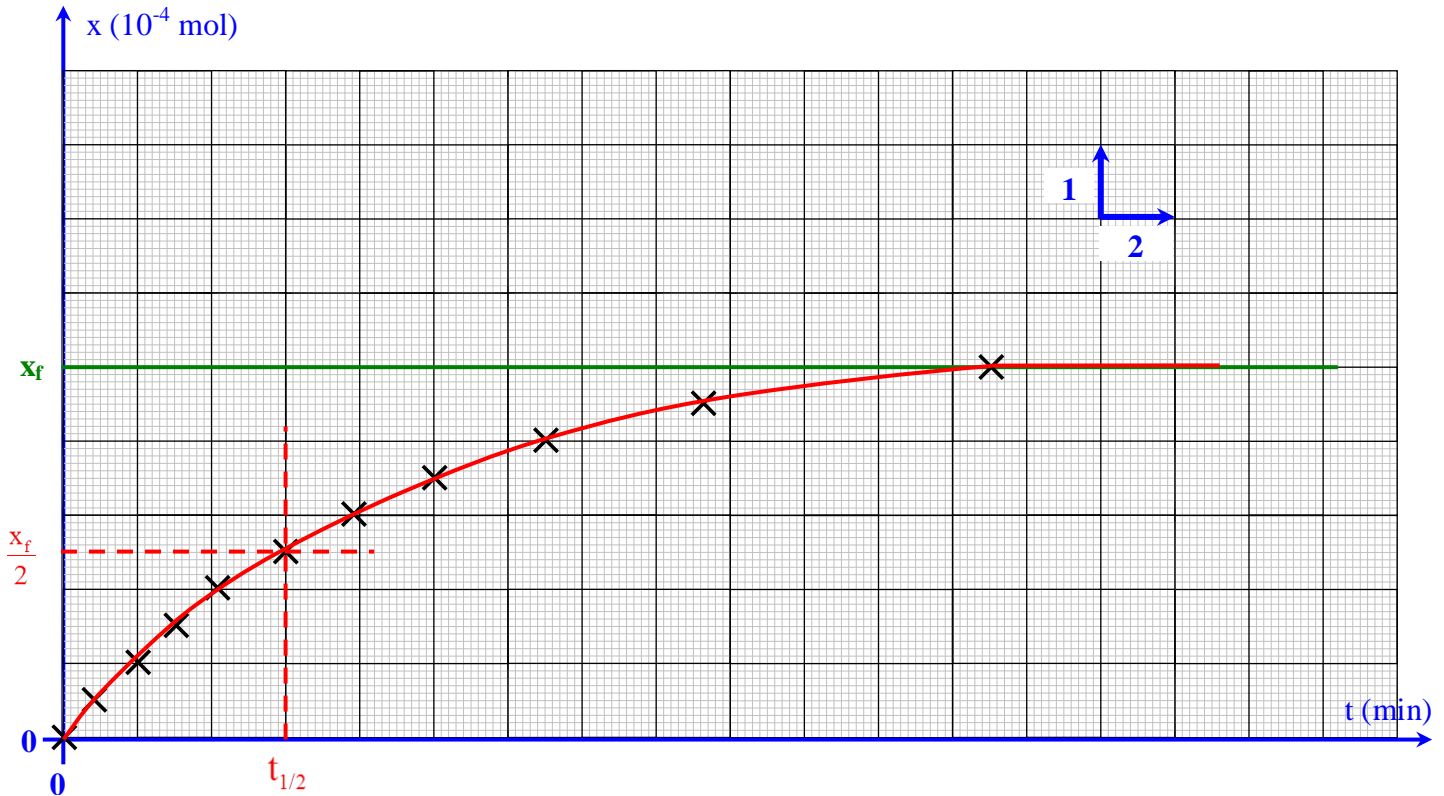
### b) Dosage du diiode formé

Le diiode ainsi formé dans le milieu réactionnel ne se manifeste pas au début par une coloration bleu-noire de l'empois d'amidon, car il est immédiatement réduit en ions iodure par la solution de thiosulfate de sodium ( $Na_2S_2O_3$ ) versée au préalable ; ce n'est que lorsque la quantité d'ions  $S_2O_3^{2-}$  est épuisée, que le diiode apparaît dans le milieu réactionnel et confère à l'empois d'amidon la coloration bleu-noire :



- \* En déduire la relation entre la quantité d'ions  $S_2O_3^{2-}$  apportée par (p) fractions, et la quantité de  $(I_2)$  ainsi dosée :  $n_p(S_2O_3^{2-}) = 2 n(I_2)$
- \* En déduire l'expression de l'avancement (x) de la réaction correspondant à la p<sup>ème</sup> fraction, en fonction de p,  $C_0$ , et  $V_0$  :  $x = n(I_2) = \frac{1}{2} n_p(S_2O_3^{2-}) = \frac{1}{2} p C_0 V_0$
- \* Compléter le remplissage du tableau de mesures précédent, et tracer la courbe  $x = f(t)$

$$x = p \frac{C_0 V_0}{2} = p \frac{0,2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}}{2} = p \cdot 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ mol} \Rightarrow x(10^{-4} \text{ mol}) = 0,5 \cdot p$$



### 3. Exploitation des résultats

- Indiquer sur le graphe l'avancement final de la réaction ; déterminer sa valeur :  $x_f = 5 \cdot 10^{-4} \text{ mol}$
- Déterminer la valeur de l'avancement maximal de la réaction, et son taux d'avancement final : conclure.

D'après l'équation de la réaction ; 0,02 mol de  $I^-$  nécessitent  $\frac{1}{2} \cdot 0,02 = 0,01 \text{ mol}$  de  $S_2O_8^{2-}$  : n'ayant utilisé que  $5 \cdot 10^{-4} \text{ mol}$ ,  $S_2O_8^{2-}$  est en défaut (limitant). L'avancement maximal est atteint si le réactif limitant à entièrement disparu  $\Rightarrow 5 \cdot 10^{-4} - x_{\max} = 0 \Leftrightarrow x_{\max} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ mol}$ , d'où :

$$\tau_f = \frac{x_f}{x_{\max}} = 1 : \boxed{\tau_f = 100\%} : \text{Réaction totale.}$$

- Décrire la variation de l'avancement de la réaction au cours du temps.

$x$  augmente au cours du temps, et au bout de 25 min environ il tend vers sa limite  $x_f$ . Son augmentation est plus rapide au début de la réaction, puis il continue à augmenter mais de plus en plus lentement.

- On appelle temps de demi-réaction ( $t_{1/2}$ ), la durée au bout de laquelle l'avancement atteint la moitié de sa valeur finale :

- \* L'indiquer sur le graphe, et donner sa valeur :  $t_{1/2} \approx 6 \text{ min}$
- \* Est-ce que le temps de demi-réaction est égal à la moitié du temps de fin de réaction : **Non**










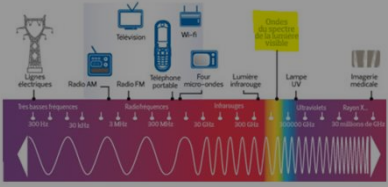





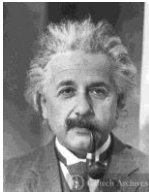







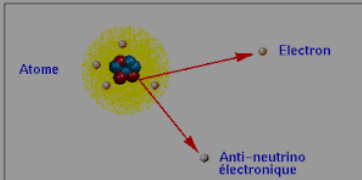

Sur quoi il renseigne alors : la valeur de ( $t_{1/2}$ ) renseigne sur la rapidité de la réaction.



# Physique

## Thème n°1 : Les interactions dans l'Univers

Tous les processus physiques ou chimiques, dans tout l'Univers, peuvent être expliqués à l'aide de seulement quatre interactions fondamentales.

<b>Electromagnétique</b>	<b>Electrique</b>	  <p>Foudre Cohésion de l'atome ...etc</p>	 <p>Charles-Augustin de Coulomb</p>
	<b>Magnétique</b>	   <p>Aimant Boussole Moteur électrique ...etc</p>	   <p>Nikola Tesla Michael Faraday Pierre Laplace</p>
		 <p>Télécommunication &amp; lumière ...etc</p>	  <p>James Clerk Maxwell Heinrich Hertz</p>
<b>Gravitationnelle</b>	  <p>Pesanteur Mouvement des astres</p>	  <p>Isaak Newton Albert Einstein</p>	
	 <p>Les marées ...etc</p>		
<b>Forte</b>	   <p>Cohésion du noyau Energie nucléaire</p>	  <p>Murray Gell-Mann George zweig</p>	
	 <p>Rayonnement solaire ...etc</p>		
<b>Faible</b>	 <p>Rayonnement d'e- par certains noyaux ...etc</p>	 <p>Enrico Fermi</p>	

## Chapitre-1 : Interaction électrique

### 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.

### Prérequis

- Notion de charge électrique.
- Interaction entre les charges électriques.
- 3<sup>ème</sup> loi de Newton.
- Condition d'équilibre d'un solide soumis à trois forces.

### Matériel

* 2 Bâtons en plexiglas	* 1 Machine électrostatique
* 1 Bâton en simili-ambre	* 2 Fils conducteurs
* 2 Pendules à boule graphitée (ou aluminée)	* 1 Cristalliseur
* 1 Electroscope	* Huile de paraffine (à défaut, huile ordinaire)
* Sachet en polyéthylène	* Grains de semoule

### Rappels

- ❖ Un corps s'électrise par frottement, par contact, ou par influence.
- ❖ Un corps électrisé porte une charge électrique (q), dont l'unité dans le S.I est le Coulomb (C). Elle peut être positive ou négative.
- ❖ Une charge négative est un excès d'électrons, et une charge positive est un défaut d'électrons ; ainsi toute charge est nécessairement un multiple entier de la charge élémentaire  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .
- ❖ Il y a toujours interaction entre deux charges voisines :
  - Deux charges de même signe se repoussent
  - Deux charges de signe opposé s'attirent
 Cette interaction se fait par des forces à distance, appelées forces électriques ou électrostatiques ou forces de Coulomb.
- ❖ 3<sup>ème</sup> loi de Newton : Si un corps A exerce une action ( $\vec{F}_{A/B}$ ) sur un corps B ; ce dernier fait une réaction ( $\vec{F}_{B/A}$ ) sur A, telle que  $\vec{F}_{B/A} = -\vec{F}_{A/B}$ .  $\vec{F}_{A/B}$  et  $\vec{F}_{B/A}$  sont les éléments de l'interaction entre A et B.
- ❖ Un solide soumis à trois forces  $\vec{F}_1$ ,  $\vec{F}_2$  et  $\vec{F}_3$  est en équilibre dans un repère donné si  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = \vec{0}$

## I- Loi de Coulomb

### 1) Enoncé de la loi de Coulomb

Entre deux objets ponctuels A et B, immobiles, portant respectivement les charges électriques  $q_A$  et  $q_B$ , s'établit une interaction électrique répulsive si les deux charges sont de même signes et attractive si les deux charges sont de signes contraires.

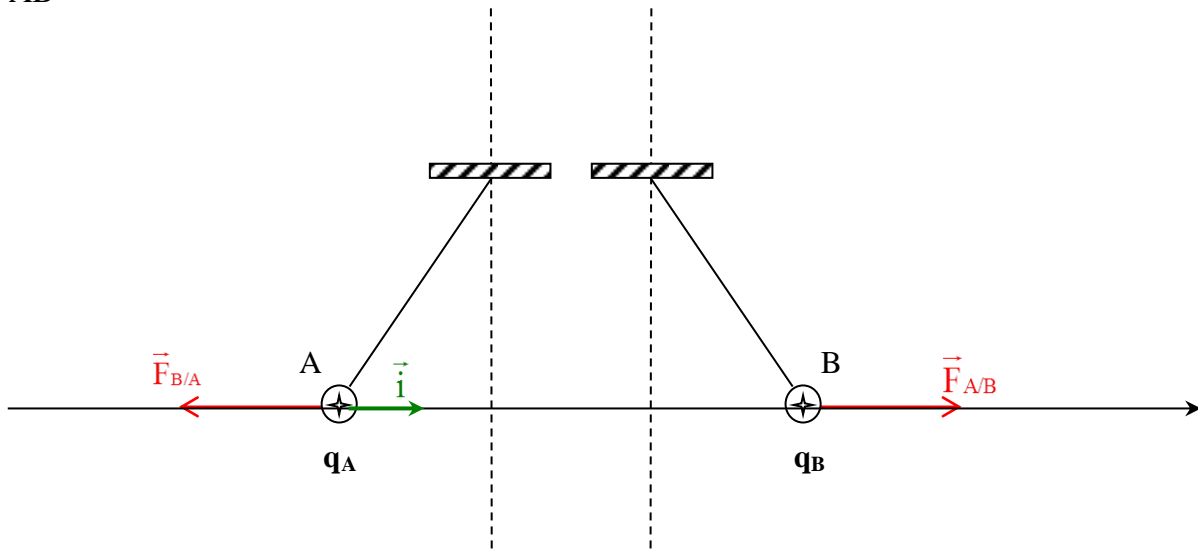
Les éléments de l'interaction sont :  $\left\{ \begin{array}{l} \vec{F}_{A/B} : \text{Force exercée par } q_A \text{ sur } q_B \\ \vec{F}_{B/A} : \text{Force exercée par } q_B \text{ sur } q_A \end{array} \right.$ , elles sont portées par la droite (AB)

et leur valeur commune est :  $\|\vec{F}_{A/B}\| = \|\vec{F}_{B/A}\| = K \frac{|q_A| \cdot |q_B|}{AB^2}$ , où K est une constante dont la valeur ne dépend

que de la nature du milieu dans lequel se trouvent les charges ;  $K = 9 \cdot 10^9 \text{ S.I}$  dans le vide ou dans l'air (approximativement)

## 2) Expression vectorielle de la loi de Coulomb

Soit  $\vec{i} = \frac{\overline{AB}}{AB}$ ; le vecteur unitaire porté par la droite (AB) et orienté de A → B :

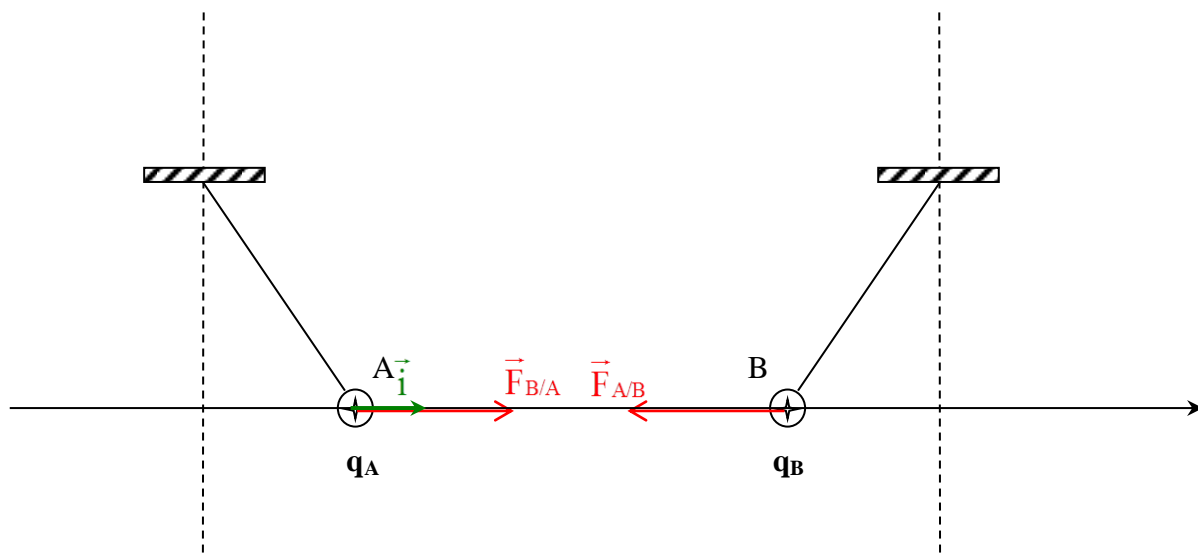


Deux charges de même signe : répulsion

$$q_A \cdot q_B > 0 \Rightarrow |q_A| \cdot |q_B| = q_A \cdot q_B$$

$$\vec{F}_{B/A} = - \|\vec{F}_{B/A}\| \cdot \vec{i} = -K \frac{|q_A| \cdot |q_B|}{AB^2} \cdot \vec{i} = -K \frac{q_A \cdot q_B}{AB^2} \cdot \vec{i}$$

$$\vec{F}_{A/B} = \|\vec{F}_{A/B}\| \cdot \vec{i} = K \frac{|q_A| \cdot |q_B|}{AB^2} \cdot \vec{i} = K \frac{q_A \cdot q_B}{AB^2} \cdot \vec{i} = -\vec{F}_{B/A}$$



Deux charges de signes opposés : attraction

$$q_A \cdot q_B < 0 \Rightarrow |q_A| \cdot |q_B| = -q_A \cdot q_B$$

$$\vec{F}_{B/A} = \|\vec{F}_{B/A}\| \cdot \vec{i} = K \frac{|q_A| \cdot |q_B|}{AB^2} \cdot \vec{i} = -K \frac{q_A \cdot q_B}{AB^2} \cdot \vec{i}$$

$$\vec{F}_{A/B} = -\|\vec{F}_{A/B}\| \cdot \vec{i} = -K \frac{|q_A| \cdot |q_B|}{AB^2} \cdot \vec{i} = K \frac{q_A \cdot q_B}{AB^2} \cdot \vec{i} = -\vec{F}_{B/A}$$

⇒ Dans tous les cas  $\vec{F}_{A/B} = K \frac{q_A \cdot q_B}{AB^2} \cdot \vec{i} = -\vec{F}_{B/A}$ , avec  $\vec{i} = \frac{\overline{AB}}{AB}$

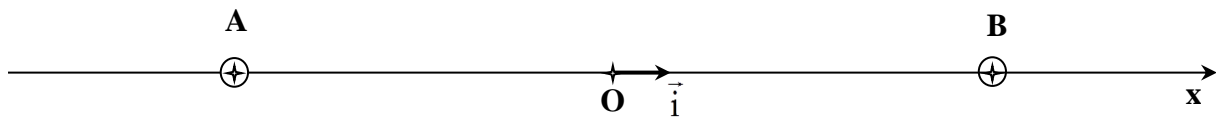


**Application-1**

Toutes les charges électriques sont placées dans l'air où  $K = 9 \cdot 10^9$  S.I. On donne  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C

Deux boules ponctuelles portant des charges  $q_A = -3 \mu\text{C}$  et  $q_B = 3 \mu\text{C}$  sont fixées respectivement en A et en B comme le montre la figure ci-dessous.

- La charge  $q_A$  a été créée par perte ou par gain d'électrons ?  
Calculer le nombre d'électrons perdus ou gagnés.
- La charge  $q_B$  a été créée par perte ou par gain d'électrons ?  
Donner le nombre d'électrons perdus ou gagnés.
- Représenter les deux éléments de l'interaction électrostatique entre les deux charges.
- Sachant que ces deux charges interagissent par des forces d'intensité **8,1 N** ;
  - Donner l'expression vectorielle de chaque force.
  - Calculer, en cm, la valeur de la distance **d = AB**.

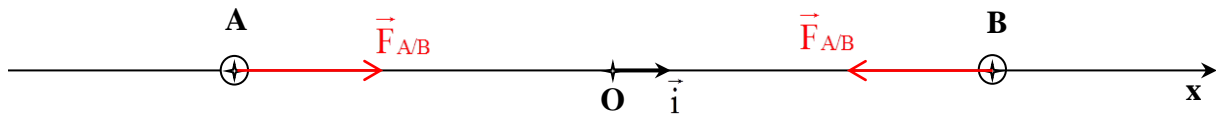


- $q_A < 0$  : charge créée par gain d' $e^-$ . Soit n leur nombre :  $q_A = n \cdot q_e$ , avec  $q_e = -e$

$$\Rightarrow n = \frac{q_A}{-e} = \frac{-3 \mu\text{C}}{-e} = \frac{-3 \cdot 10^{-6} \text{ C}}{-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 1,875 \cdot 10^{13}$$

- $q_B > 0$  : charge créée par perte d' $e^-$ . Soit n leur nombre :  $q_B = -q_A \Rightarrow n = 1,875 \cdot 10^{13}$

3.



4.

$$\text{a) } \vec{F}_{A/B} = K \frac{q_A \cdot q_B}{AB^2} \cdot \vec{i}$$

$$\vec{F}_{B/A} = -K \frac{q_A \cdot q_B}{AB^2} \cdot \vec{i}$$

$$\text{b) } \|\vec{F}_{A/B}\| = K \frac{|q_A| \cdot |q_B|}{d^2} \Rightarrow d^2 = \frac{K \cdot |q_A| \cdot |q_B|}{\|\vec{F}_{A/B}\|} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{K \cdot |q_A| \cdot |q_B|}{\|\vec{F}_{A/B}\|}}$$

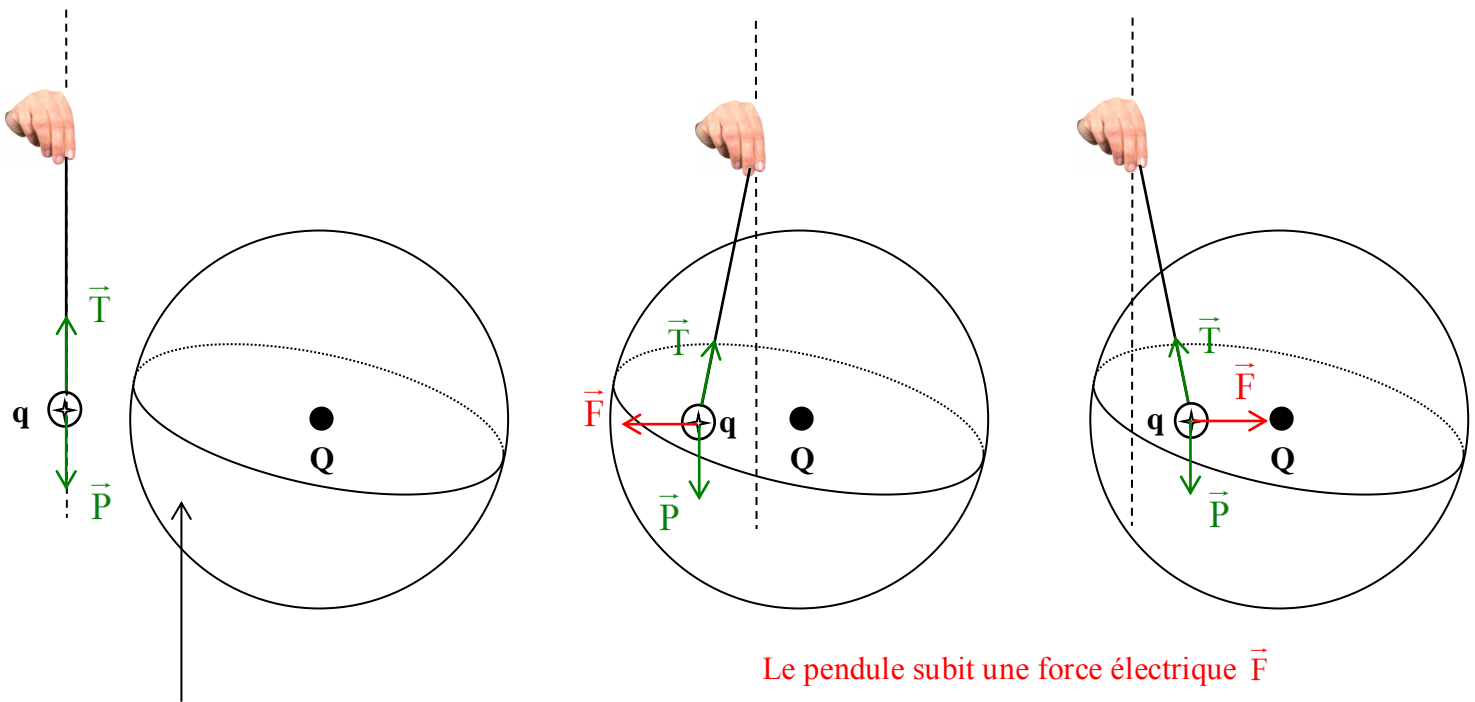
$$\text{AN : } d = \sqrt{\frac{9 \cdot 10^9 \cdot 3 \cdot 10^{-6} \text{ C} \cdot 3 \cdot 10^{-6} \text{ C}}{8,1 \text{ N}}} = 0,1 \text{ m} = 10 \text{ cm}$$

## II- Notion de champ électrique

### 1) Mise en évidence (Fig-1)

Si on se promène avec un pendule électrostatique dont la boule porte une charge (q) ; là où le pendule dévie, il y a une charge (Q) à proximité : on dit que le pendule vient de pénétrer dans le champ électrique de la charge Q.

Figure-1



Le pendule subit une force électrique  $\vec{F}$

Région de l'espace dont les propriétés électriques sont modifiées par la charge Q : on dit qu'un champ électrique, créé par la charge Q, règne dans cette région

#### Définition

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

### 2) Vecteur champ électrique (Fig-2)

Soit M un point quelconque de la région de l'espace où règne un champ électrique créé par une charge ponctuelle Q placée au point O : toute charge (ponctuelle) q placée en M subit une force électrique

$$\vec{F} = K \frac{Q \cdot q}{OM^2} \cdot \vec{i}, \text{ avec } \vec{i} = \frac{\vec{OM}}{OM}$$

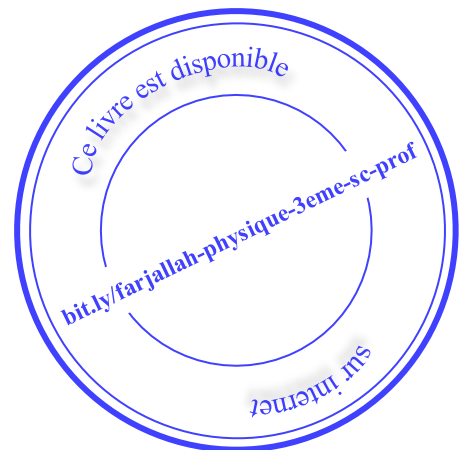
$$= q \cdot \left( K \frac{Q}{OM^2} \cdot \vec{i} \right)$$

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}(M); \text{ avec } \vec{E}(M) = K \frac{Q}{OM^2} \cdot \vec{i}$$

Une autre charge q' placée en M subit une force  $\vec{F}' = q' \cdot \vec{E}(M)$

Une autre charge q'' placée en M subit une force  $\vec{F}'' = q'' \cdot \vec{E}(M)$

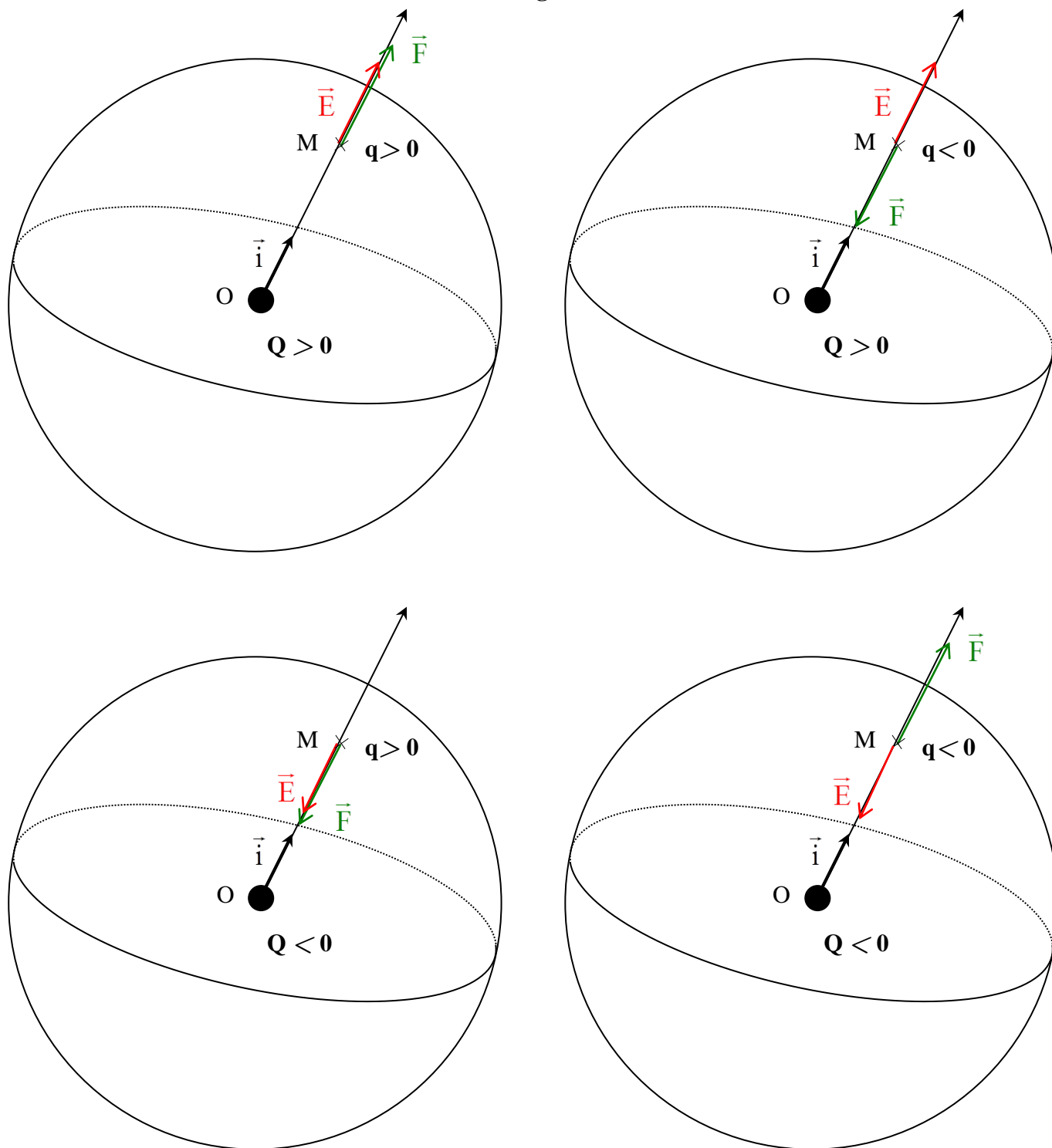
·  
·  
·  
etc



$\Rightarrow$  La charge change et la force électrique qu'elle subit change, mais le vecteur  $\vec{E}$  (M) est toujours le même : il ne dépend que de la charge Q et la position M dans le champ électrique ; on l'appelle vecteur champ électrique en M, il existe indépendamment des charges q, q', q''...etc qui ne font que le mettre en évidence.

$$\text{Rq } \frac{\vec{F}}{q} = \frac{\vec{F}'}{q'} = \frac{\vec{F}''}{q''} = \dots = \vec{E} \Rightarrow \|\vec{E}\| = \frac{\|\vec{F}\|}{|q|} ; \text{ d'où l'unité de } \|\vec{E}\| \text{ est le N.C}^{-1} \text{ dans le S.I (ou V.m}^{-1}\text{)}$$

Figure-2



On constate que :

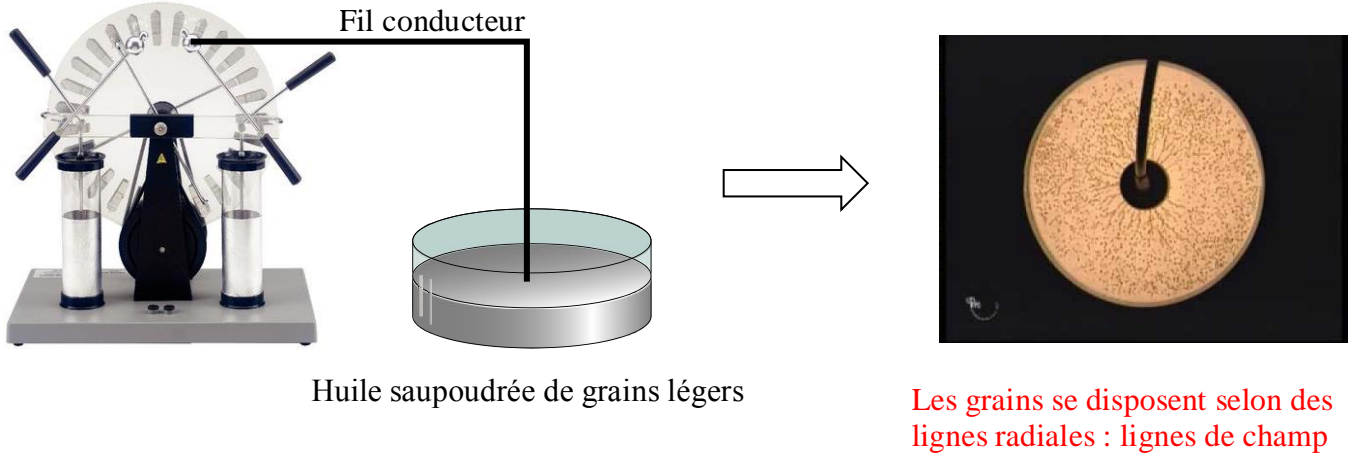
- si  $Q > 0$  ;  $\vec{E}$  est centrifuge, et si  $Q < 0$  ;  $\vec{E}$  est centripète.
- Quelle que soit Q ; si  $q > 0$ ,  $\vec{E}$  et  $\vec{F}$  sont de même sens, sinon ils sont opposés.

### 3) Le spectre électrique (Fig-3)

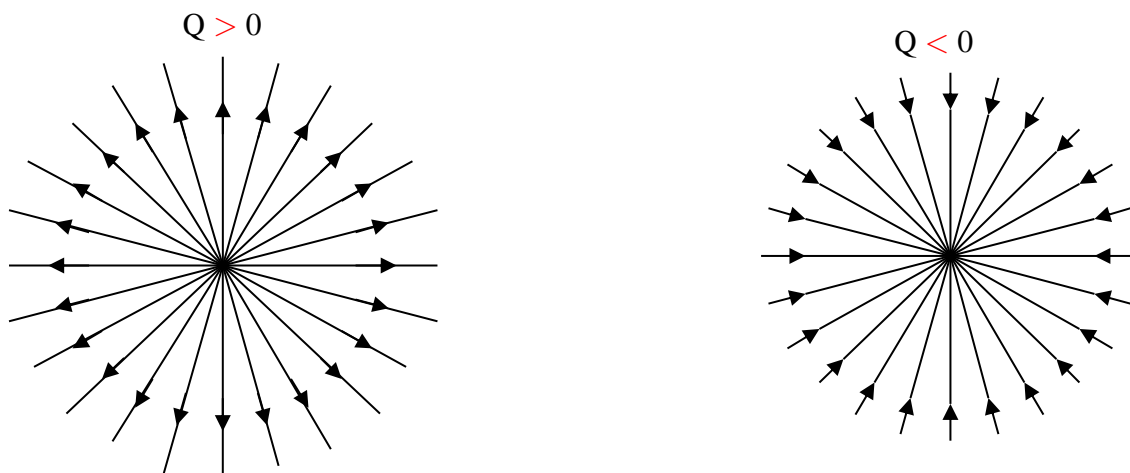
L'expérience de la Figure-3 permet de matérialiser les lignes de champ électrique : chaque ligne est tangente en chacun de ses points au vecteur champ électrique  $\vec{E}$  et orientée dans son sens. L'ensemble des lignes de champ constitue le spectre électrique.

Rq on vient de matérialiser une coupe du spectre, lequel est en réalité tridimensionnel : les lignes de champ sont des droites issues du point où se trouve la charge créatrice du champ, et dirigées dans toutes les directions de l'espace (Fig-4)

Figure-3

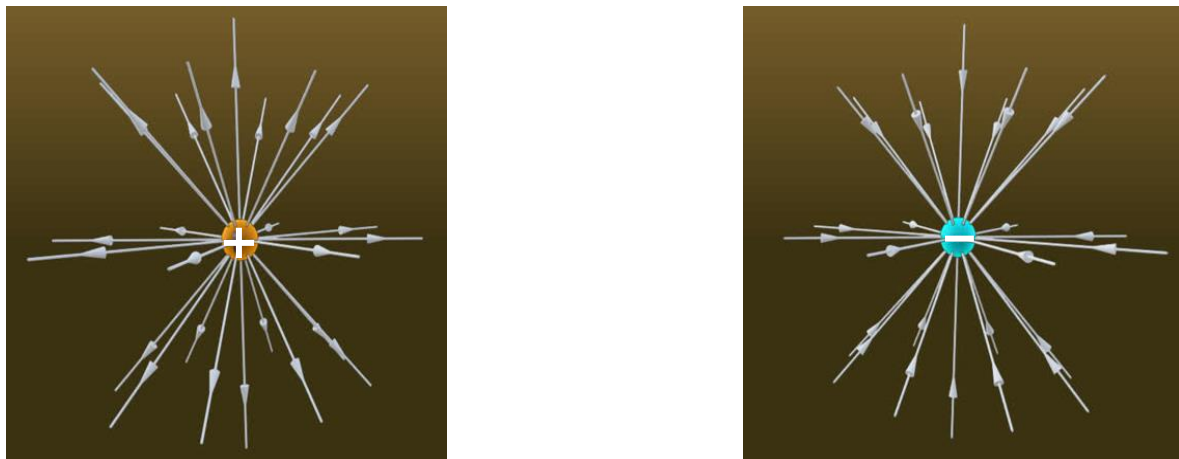


Les grains se disposent selon des lignes radiales : lignes de champ



Représentation schématique des lignes de champ : par convention on les oriente dans le sens de  $\vec{E}$

Figure-4

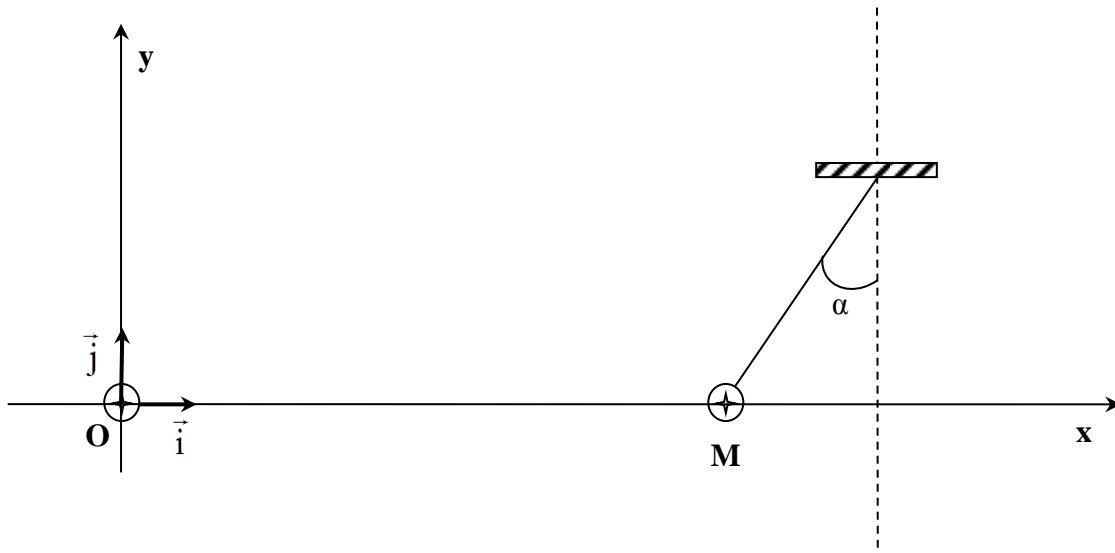


**Application-2**

Toutes les charges électriques sont placées dans l'air où  $K = 9 \cdot 10^9$  S.I. On donne  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C,  $g = 9,8$  N.kg<sup>-1</sup>

Une boule (supposée ponctuelle) est fixée en un point O, elle porte une charge  $Q = -6,4$  nC; figure ci-dessous.

1. Cette charge a été créée sur la boule par perte ou par gain d'électrons ? Calculer le nombre d'électrons perdus ou gagnés.
2. Représenter le spectre électrique créé par cette charge.
3. Donner l'expression du vecteur champ électrique créé par Q au point M situé à une distance  $OM = d = 8$  cm, le représenter (Echelle :  $3 \cdot 10^3$  N.C<sup>-1</sup>  $\rightarrow$  1 cm)
4. Un pendule électrostatique dont la boule, supposée ponctuelle, porte une charge  $q$  est placé dans le champ électrique créé par la charge Q; La boule du pendule prend une position d'équilibre au point M, où le fil du pendule fait un angle  $\alpha = 30^\circ$  avec la verticale :
  - a) Quel est le signe de la charge  $q$  ?
  - b) Sachant que la boule du pendule pèse  $m = 16$  mg; calculer la valeur de la force électrique exercée par la charge Q sur la charge  $q$ , représenter cette force selon l'échelle :  $4,5 \cdot 10^{-5}$  N  $\rightarrow$  1 cm
  - c) En déduire la valeur de la charge  $q$ . (en nC)
  - d) En déduire le vecteur force exercé par  $q$  sur la boule portant la charge Q, le représenter à la même échelle.



1.  $Q < 0$  : charge créée par gain d'e<sup>-</sup> : Soit  $n$  leur nombre;  $Q = n \cdot (-e) \Rightarrow$

$$n = \frac{Q}{-e} = \frac{-6,4 \cdot 10^{-9} \text{ C}}{-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 4 \cdot 10^{10} = 40 \cdot 10^9$$

2.

3.  $\vec{E}(M) = K \cdot \frac{Q}{d^2} \vec{i}$ , avec  $\vec{i} = \frac{\overline{OM}}{OM}$

$$\Rightarrow \vec{E}(M) : \begin{cases} \text{Direction : Droite (O,M)} \\ \text{Sens : L'inverse du sens de } \vec{i} \text{ (Car } Q < 0) \\ \text{Intensité : } \|\vec{E}(M)\| = K \cdot \frac{|Q|}{d^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{6,4 \cdot 10^{-9} \text{ C}}{(8 \cdot 10^{-2} \text{ m})^2} = 9 \cdot 10^3 \text{ N.C}^{-1} \longrightarrow 3 \text{ cm} \end{cases}$$

4.

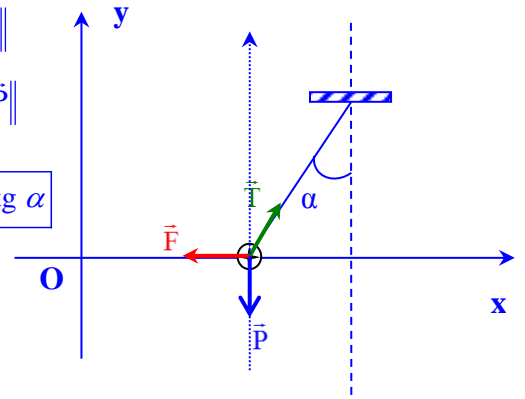
- a) Les charges Q et q s'attirent  $\Rightarrow$  elles sont de signes opposés :  $q > 0$ .

b) Condition d'équilibre de la boule du pendule :  $\vec{P} + \vec{T} + \vec{F} = \vec{0}$

$$\begin{cases} \text{Projection sur (Ox)} : 0 + \|\vec{T}\| \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) - \|\vec{F}\| = 0 \Leftrightarrow \|\vec{T}\| \sin \alpha = \|\vec{F}\| \\ \text{Projection sur (Oy)} : -\|\vec{P}\| + \|\vec{T}\| \cos \alpha + 0 = 0 \Leftrightarrow \|\vec{T}\| \cos \alpha = \|\vec{P}\| \end{cases}$$

$$\Rightarrow \frac{\|\vec{T}\| \sin \alpha}{\|\vec{T}\| \cos \alpha} = \frac{\|\vec{F}\|}{\|\vec{P}\|} \Leftrightarrow \text{tg } \alpha = \frac{\|\vec{F}\|}{\|\vec{P}\|} \Leftrightarrow \|\vec{F}\| = \|\vec{P}\| \cdot \text{tg } \alpha \Rightarrow \boxed{\|\vec{F}\| = m \cdot g \cdot \text{tg } \alpha}$$

A.N  $\|\vec{F}\| = 16 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 9,8 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{tg } 30^\circ \approx 9 \cdot 10^{-5} \text{ N} \longrightarrow 2 \text{ cm}$

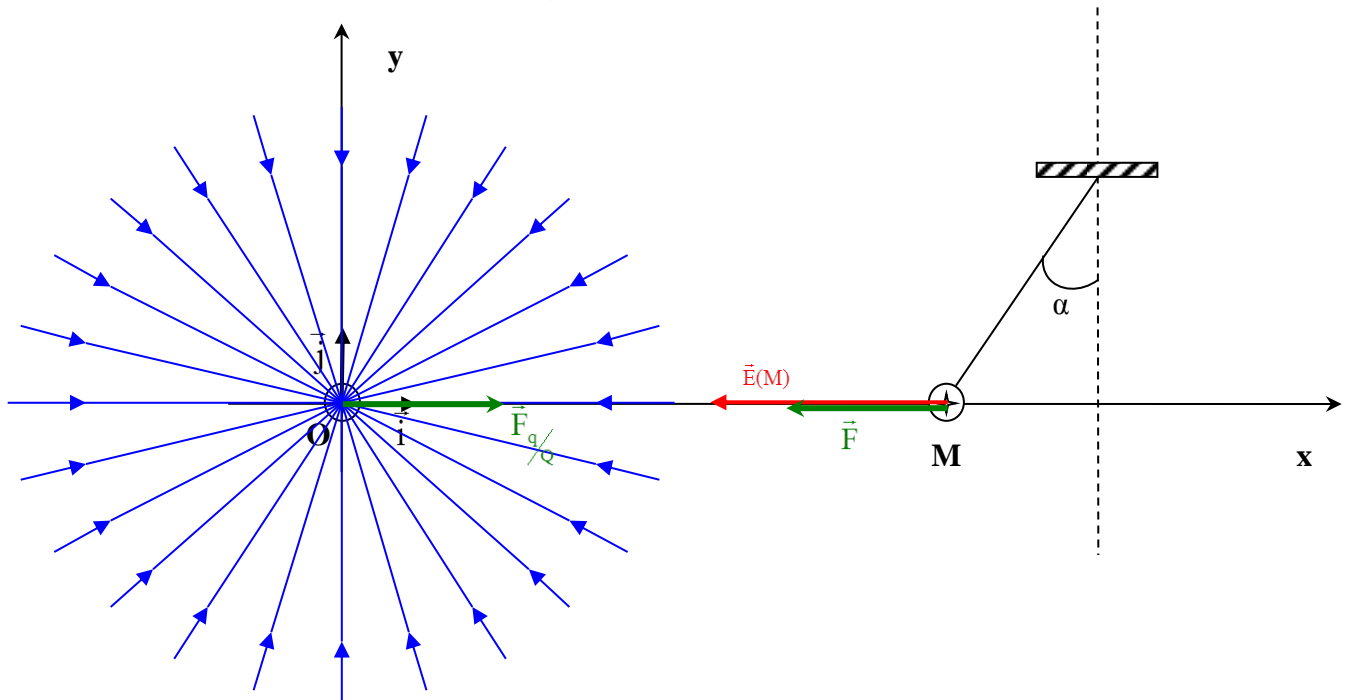


c) Valeur de la charge de la boule du pendule :

On a :  $\vec{F} = q \vec{E}(M) \Rightarrow \|\vec{F}\| = |q| \|\vec{E}(M)\| \Rightarrow |q| = \frac{\|\vec{F}\|}{\|\vec{E}(M)\|} = \frac{9 \cdot 10^{-5} \text{ N}}{9 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{C}^{-1}} = 10^{-8} \text{ C} = 10 \text{ nC}$

Or  $q > 0$ ; Alors  $\boxed{q = +10 \text{ nC}}$

d) D'après la loi de Coulomb;  $\vec{F}_{q/Q} = -\vec{F}_{Q/q} = -\vec{F}$  D'où sa représentation.



#### 4) Champ électrique créé par deux charges ponctuelles (Fig-5)

Une charge  $q$  placée en un point  $M$  où se chevauchent les champs électriques de deux charges  $Q_1$  et  $Q_2$ , subit simultanément les forces électriques  $\vec{F}_1 = q \cdot \vec{E}_1(M)$  et  $\vec{F}_2 = q \cdot \vec{E}_2(M)$  dont la résultante est  $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = q \cdot \vec{E}_1(M) + q \cdot \vec{E}_2(M) = q \cdot (\vec{E}_1(M) + \vec{E}_2(M))$   
 $\Rightarrow \vec{F} = q \cdot \vec{E}(M)$ , avec  $\vec{E}(M) = \vec{E}_1(M) + \vec{E}_2(M)$  : vecteur champ électrique résultant ; la figure-6 montre la matérialisation du spectre de ce champ.

Figure-5

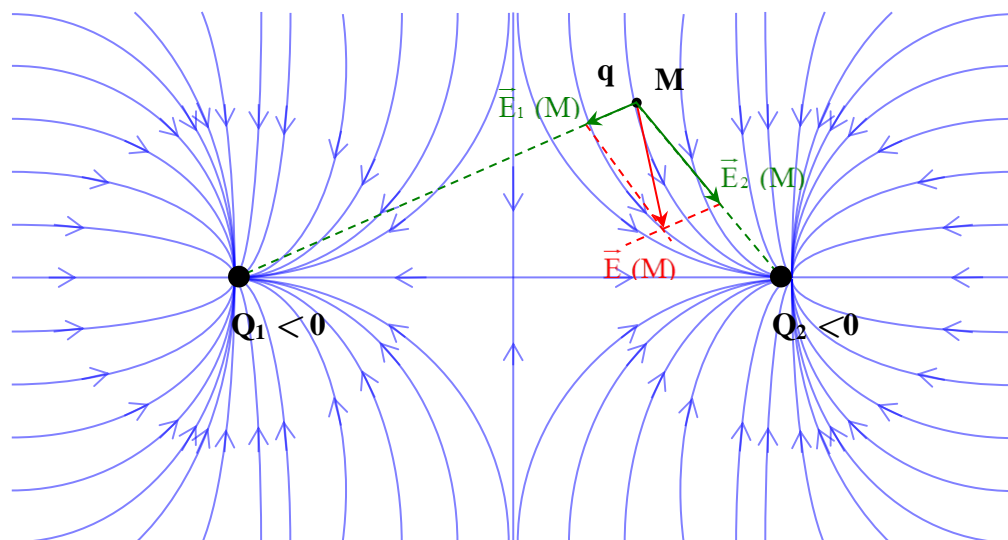
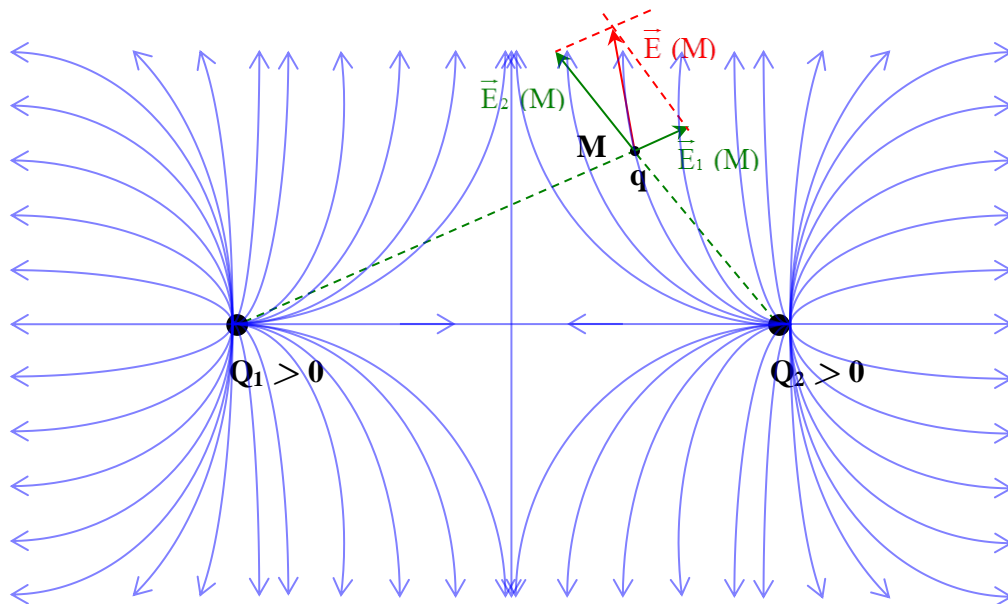
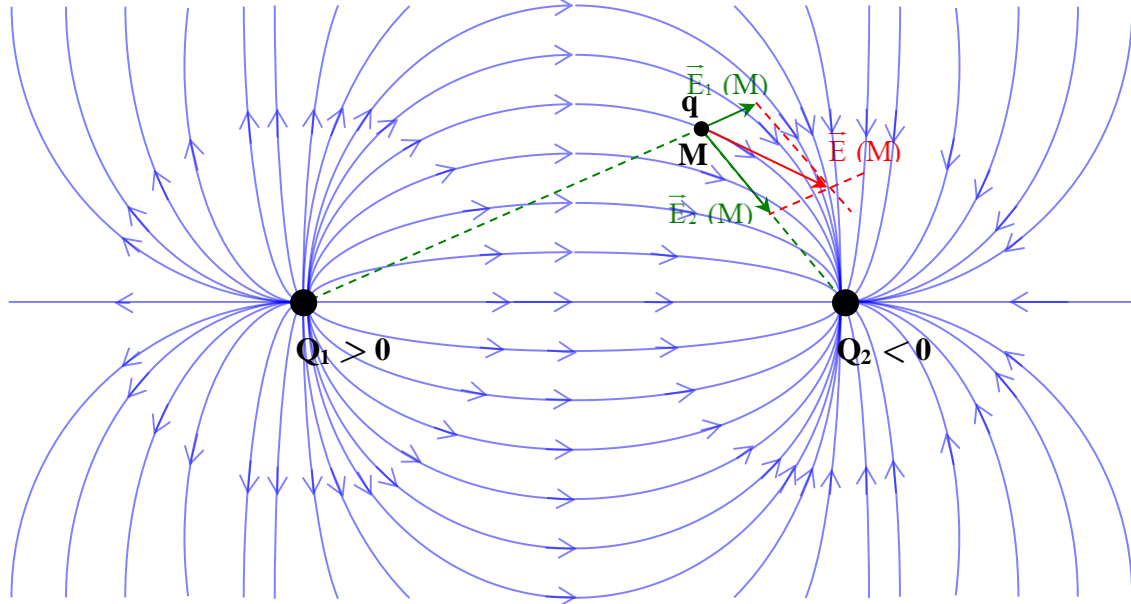
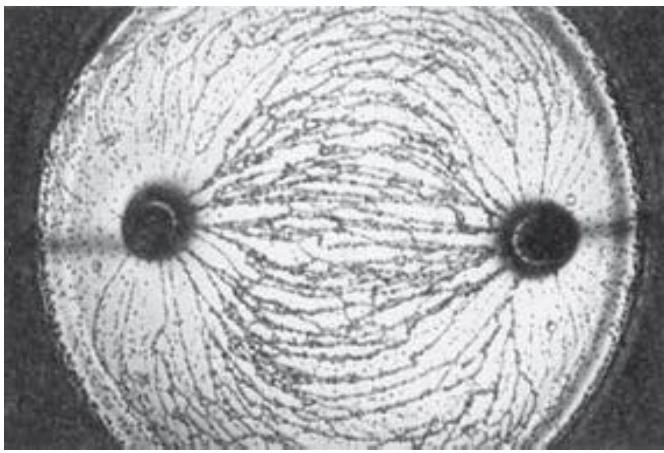
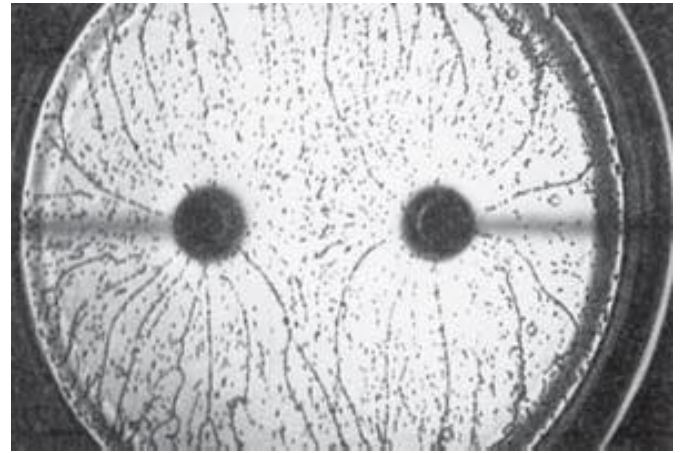




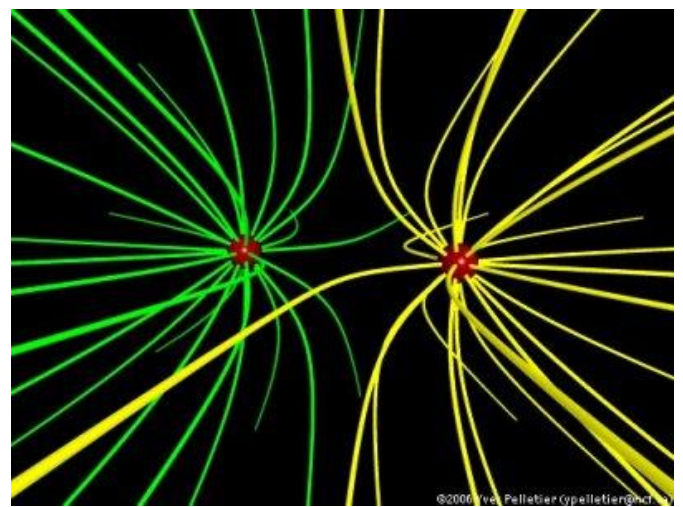
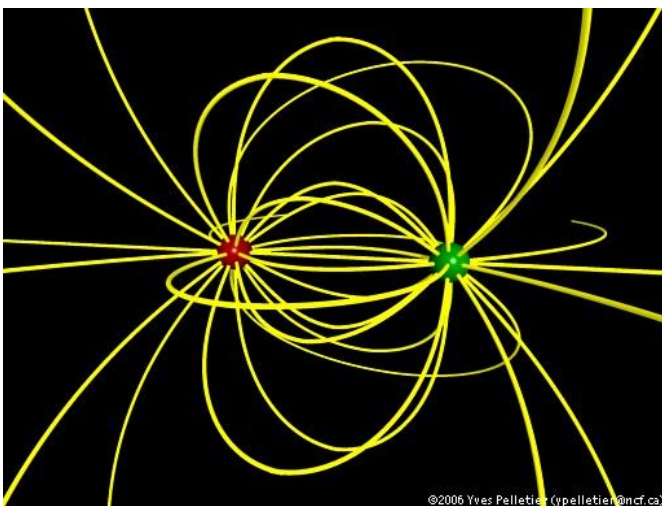
Figure-6



Charges de **signes opposés**



Charges de **même signe**



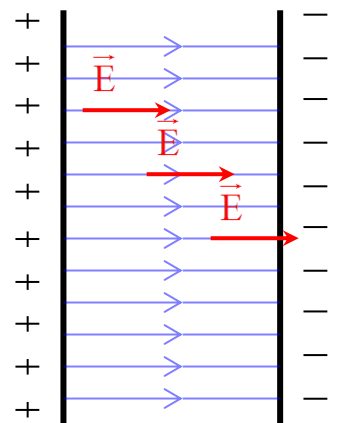
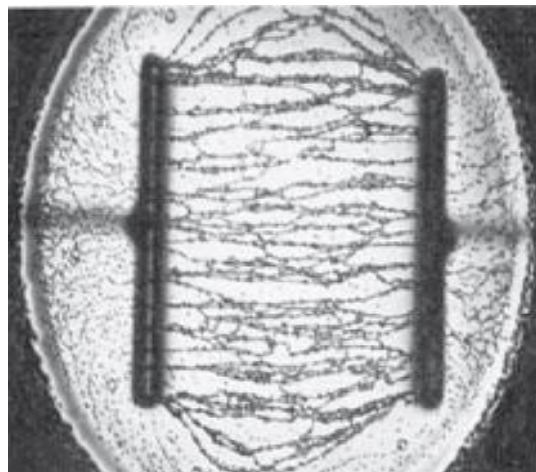
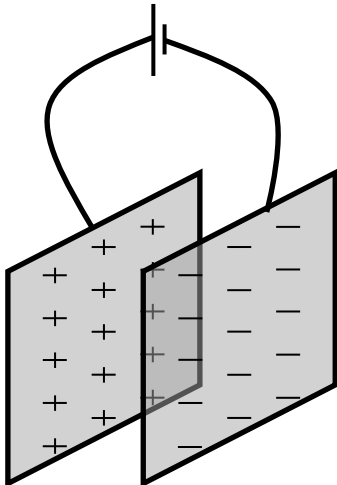
Les spectres sont en fait tridimensionnels

### 5) Champ électrique uniforme (Fig-7)

La matérialisation du spectre du champ électrique créé entre 2 plaques en regard, l'une chargée positivement et l'autre négativement, montre qu'il a la même direction en tout point. Il a aussi le même sens, et on montre qu'il a la même valeur en tout point : il est uniforme ( $\vec{E}$  constant).

Figure-7

Générateur Très Haute Tension





**Rq**

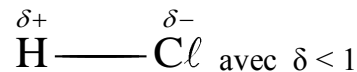
On mq dans un milieu isolant (diélectrique)  $K = \frac{1}{4 \pi \epsilon}$ , où  $\epsilon$  est la constante diélectrique du milieu

(permittivité). Soit  $\epsilon_0$  la permittivité du vide, on mq  $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$  avec  $\epsilon_r$  : permittivité relative du milieu.

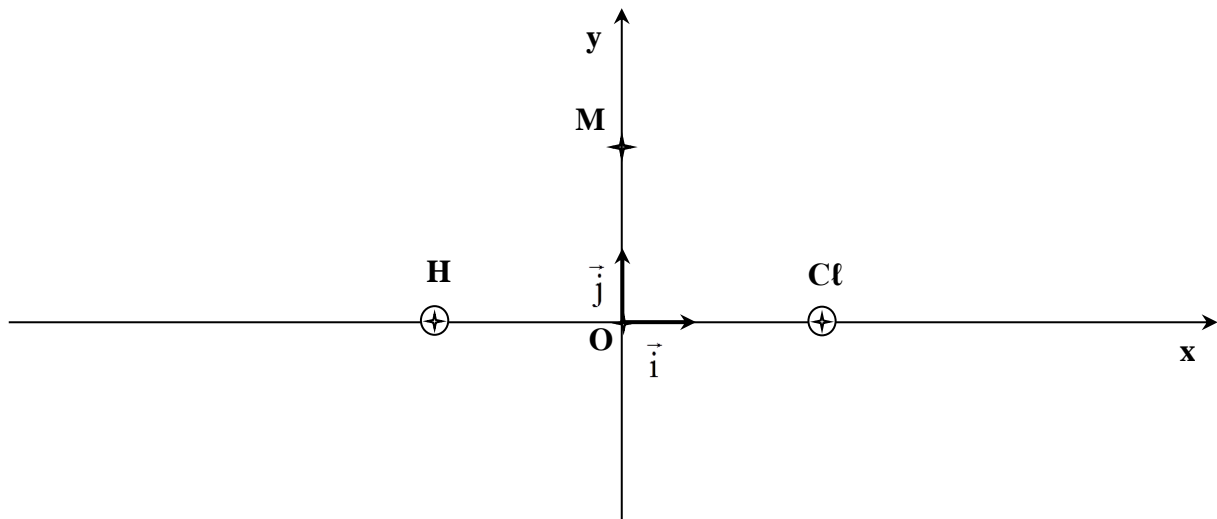
**Application-3**

On donne  $K = 9 \cdot 10^9 \text{ S.I}$  dans le vide ;  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Dans une molécule de chlorure d'hydrogène HCl, l'atome d'hydrogène et l'atome de chlore sont liés par une liaison covalente dissymétrique du fait que le chlore est plus électronégatif que l'hydrogène ; l'électron unique de l'atome d'hydrogène est plus proche de l'atome de chlore : en conséquence, l'atome de chlore possède une fraction de charge négative, et l'atome d'hydrogène possède une fraction de charge positive :



- Sachant que l'atome de chlore ne s'empare de l'électron de l'atome d'hydrogène qu'à 17,3 % : calculer les valeurs des charges  $Q_H$  et  $Q_{Cl}$  portées respectivement par les atomes d'hydrogène et de chlore dans la molécule.
- On assimile les atomes d'hydrogène et de chlore à des charges ponctuelles; les mesures ont montré que la distance qui les sépare est  $2r = 1,27 \text{ \AA}$  :



- a) Montrer que l'expression du vecteur champ électrique créé par ces deux charges en un point M

d'ordonnée y quelconque et d'abscisse  $x = 0$ , est :  $\vec{E}(M) = 2 K e \frac{\delta r}{\sqrt{(r^2 + y^2)^3}} \vec{i}$

- b) Pour  $y = r$  ;

- Donner les caractéristiques de  $\vec{E}$  et le représenter à l'échelle :  $1,1 \cdot 10^{10} \text{ N.C}^{-1} \rightarrow 2 \text{ cm}$ .
- Donner l'expression de la force électrique qui s'exerce sur un électron à son passage par le point M et la représenter à l'échelle :  $7 \cdot 10^{-9} \text{ N} \rightarrow 2 \text{ cm}$

- c) Schématiser le spectre électrique créé par  $Q_H$  et  $Q_{Cl}$ .

1. L'atome de chlore s'empare de l'électron de l'atome d'hydrogène à 17,3 %  $\Rightarrow \delta = 17,3 \% = 0,173$  ;

$$\text{ainsi } \begin{cases} Q_{Cl} = \delta \cdot q_e = -\delta \cdot e = -0,173 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C} = -2,768 \cdot 10^{-20} \text{C} \\ Q_H = \delta \cdot (-q_e) = \delta \cdot e = +0,173 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C} = +2,768 \cdot 10^{-20} \text{C} \end{cases}$$

2.

a)  $\vec{E}(M) = \vec{E}_H(M) + \vec{E}_{Cl}(M)$

$$= K \cdot \frac{Q_H}{HM^2} \frac{\vec{HM}}{HM} + K \cdot \frac{Q_{Cl}}{ClM^2} \frac{\vec{ClM}}{ClM} = K \cdot \frac{\delta e}{r^2 + y^2} \frac{\vec{HM}}{\sqrt{r^2 + y^2}} + K \cdot \frac{-\delta e}{r^2 + y^2} \frac{\vec{ClM}}{\sqrt{r^2 + y^2}}$$

$$= K \cdot \frac{\delta e}{r^2 + y^2} \frac{1}{\sqrt{r^2 + y^2}} (\vec{HM} - \vec{ClM}) = K \cdot \delta e \frac{1}{\sqrt{(r^2 + y^2)^2} (r^2 + y^2)} (\vec{HM} + \vec{MCl})$$

$$= K \cdot \delta e \frac{1}{\sqrt{(r^2 + y^2)^3}} (\vec{HCl}) = K \cdot \delta e \frac{1}{\sqrt{(r^2 + y^2)^3}} \left( \frac{\vec{HCl}}{2r} \right) \cdot 2r = K \cdot \delta e \frac{1}{\sqrt{(r^2 + y^2)^3}} \vec{i} \cdot 2r$$

$$\vec{E}(M) = 2 K e \frac{\delta r}{\sqrt{(r^2 + y^2)^3}} \vec{i}$$

b) Pour  $y = r$  :

$$\bullet \vec{E}(M) = 2 K e \frac{\delta r}{\sqrt{(r^2 + r^2)^3}} \vec{i} = 2 K e \frac{\delta r}{\sqrt{(2r^2)^3}} \vec{i} = 2 K e \frac{\delta r}{\sqrt{8r^3}} \vec{i} = 2 K e \frac{\delta r}{\sqrt{8} \cdot r^3} \vec{i}$$

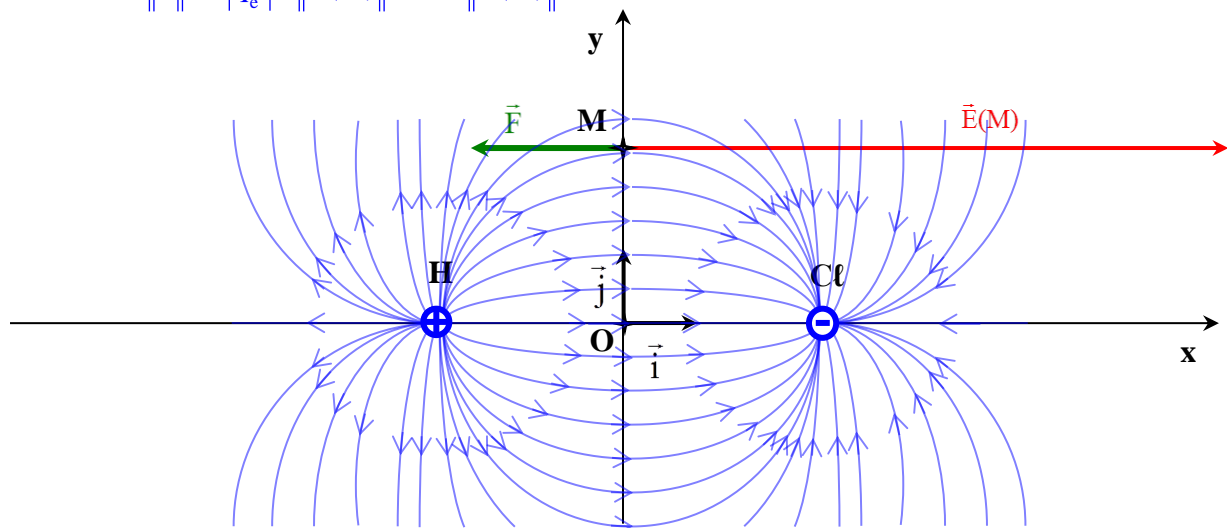
$$\vec{E}(M) = 2 K e \frac{\delta}{\sqrt{8} \cdot r^2} \vec{i} \Rightarrow \|\vec{E}(M)\| = 2 K e \frac{\delta}{\sqrt{8} \cdot r^2}$$

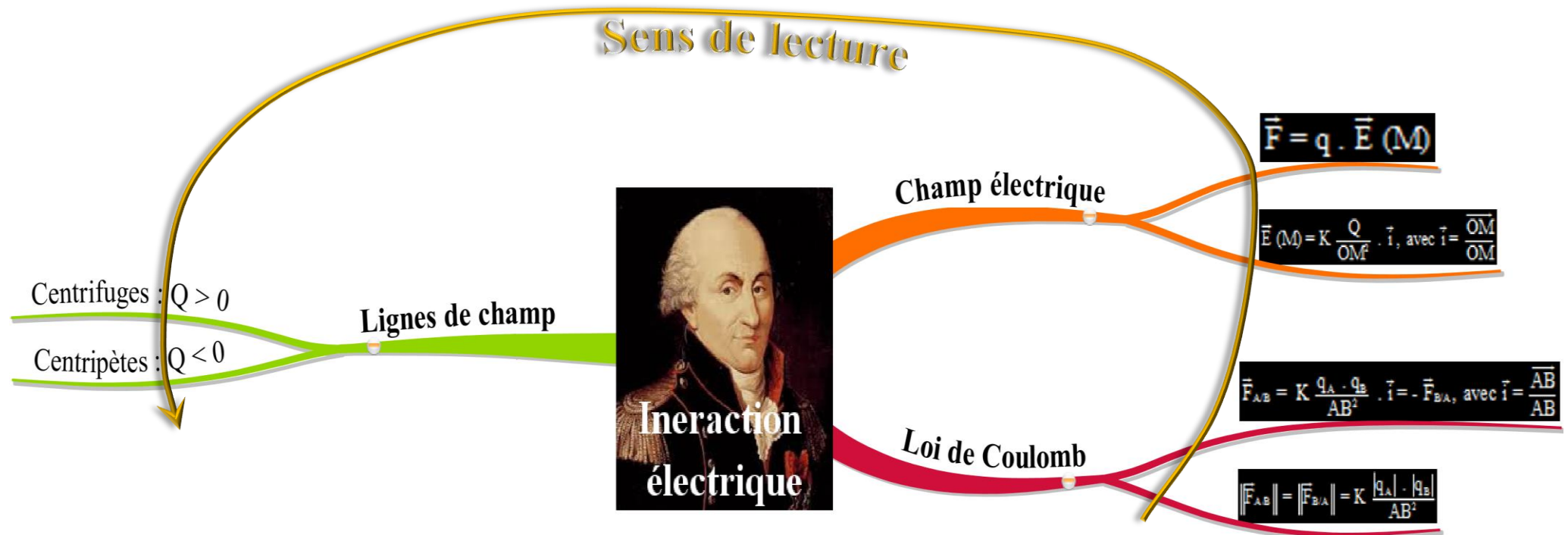
$$\vec{E}(M) : \begin{cases} \text{Direction : droite } (M, \vec{i}) \\ \text{Sens : celui de } \vec{i} \\ \text{Intensité : } \|\vec{E}(M)\| = 2 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot \frac{0,173}{\sqrt{8} \left( \frac{1,27}{2} \cdot 10^{-10} \right)^2} \approx 4,37 \cdot 10^{10} \text{ N.C}^{-1} \longrightarrow 8 \text{ cm} \end{cases}$$

$$\bullet \vec{F} = q_e \cdot \vec{E}(M) = -e \cdot 2 K e \frac{\delta}{\sqrt{8} \cdot r^2} \vec{i} = -2 K e^2 \frac{\delta}{\sqrt{8} \cdot r^2} \vec{i}$$

$$\|\vec{F}\| = |q_e| \cdot \|\vec{E}(M)\| = e \cdot \|\vec{E}(M)\| = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4,37 \cdot 10^{10} \approx 7 \cdot 10^{-9} \text{ N} \longrightarrow 2 \text{ cm}$$

c)





C'est une **Mind Map** (carte mentale), qui récapitule l'essentiel de ce cours.

**NB : cette Mind Map n'est qu'une suggestion, l'élève retient mieux avec celle qu'il prépare lui-même.**

### Pourquoi utiliser les Mind Maps ?

Basée sur les avancées dans le domaine des **neurosciences**, la méthode a été mise au point par le psychologue anglais [Tony Buzan](#). Elle est censée faciliter la mémorisation, la pensée logique et la créativité en assurant un fonctionnement conjoint, harmonieux et optimal des deux hémisphères du cerveau. D'ailleurs, son arborescence est similaire la structure du tissu cérébral.



- Pour télécharger le livre "Organisez vos idées avec le Mind Mapping" : [bit.ly/organisez-vos-idees-avec-le-mind-mapping](http://bit.ly/organisez-vos-idees-avec-le-mind-mapping)
- Pour télécharger le logiciel phare de création de cartes mentales "Buzan's iMindMap" : [bit.ly/buzan-imindmap](http://bit.ly/buzan-imindmap)
- Pour télécharger le logiciel libre de création de cartes mentales "Freemind" (gratuit, mais moins performant) : [bit.ly/my-freemind](http://bit.ly/my-freemind)

Cette Mind Map, ainsi que celles relatives aux autres chapitres, sont téléchargeables dans un seul dossier ici : [bit.ly/farjallah-physique-3eme-sc-mind-maps](http://bit.ly/farjallah-physique-3eme-sc-mind-maps)

Que vous pouvez d'ailleurs partager avec vos amis sur Facebook :



## Chapitre-2 : Interaction magnétique

### 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.

### Prérequis

- Effet magnétique du courant électrique.
- Moment d'une force par rapport à un axe.
- Théorème des moments.
- Couple de forces.

### Matériel

* Objets en fer	* 1 Potence	* 1 Dispositif d'étude de la force de Laplace
* 2 Aimants droits	* 3 Noix de serrage	* 1 Rhéostat
* 1 Aimant en U	* 3 Pincettes	* 1 Ampèremètre
* 1 Boussole	* 1 Plaque de plexiglas trouée	* 1 Générateur de courant
* Aiguilles aimantées (max)	* 2 Bobines	* 1 Boîte de Pétri
* Aiguilles aimantées minuscules (max)	* 1 Générateur de tension	* Solution concentrée de $\text{CuSO}_4$
* 1 Aiguille aimantée sur axe horizontal	* 1 Interrupteur	* 1 Moteur électrique démonté
* 1 Plaque de plexiglas (ou de verre)	* 6 Fils de connexion	
* 1 Teslamètre	* 2 pinces crocodile	
* Limaille de fer	* 1 Lampe 12 V	
* Poudre de fer	* 1 Fil long en cuivre	

### I- Introduction

- \* Un aimant est un matériau qui attire le fer ; il possède un pôle nord (N), peint en rouge généralement, et un pôle sud (S). Ils sont appelés ainsi car si l'aimant est très léger et peut s'orienter librement, il pointe par son pôle (N) vers le nord de la Terre (et par son pôle (S) vers le sud de la Terre) : un tel aimant est appelé aiguille aimantée (ou boussole) **(Fig-1)**

Figure-1



Une aiguille aimantée (ou boussole) est un aimant léger qui peut s'orienter librement dans toutes les directions.

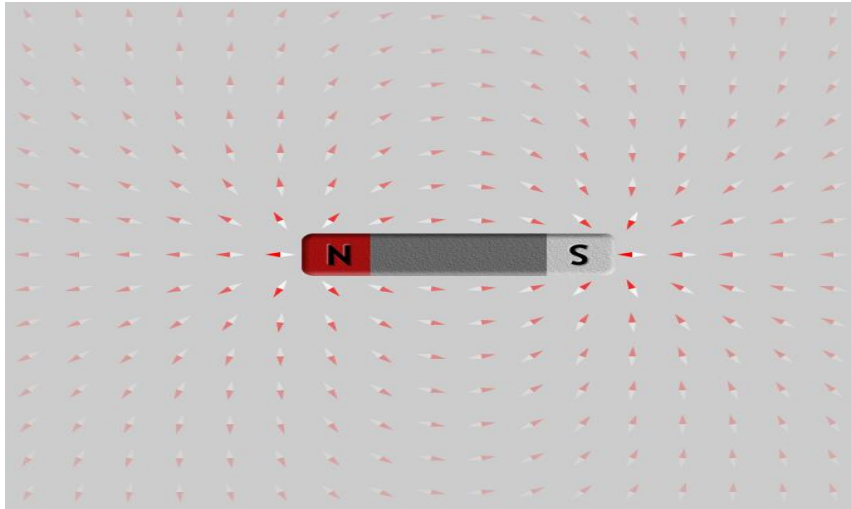
- \* Si on rapproche les deux pôles de deux aimants :
  - 2 pôles N ou 2 pôles S se repoussent.
  - un pôle N et un pôle S s'attirent.
 C'est l'interaction magnétique.

## II- Le champ magnétique

### 1) Mise en évidence

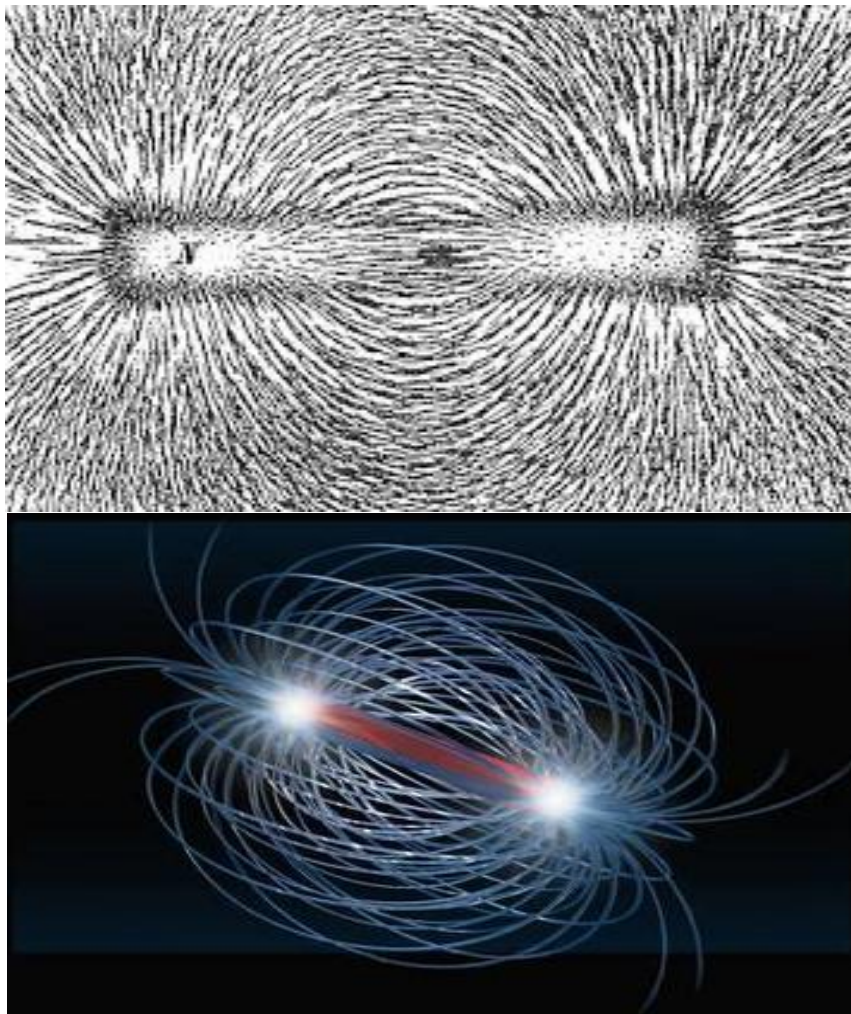
- \* Si on rapproche une aiguille aimantée d'un aimant, elle subit une force qui l'oriente dans une direction particulière : elle vient de pénétrer dans le champ magnétique créé par l'aimant (région de l'espace dont les propriétés magnétiques sont modifiées par la présence de l'aimant)
- \* Si on place un grand nombre d'aiguilles aimantées minuscules autour d'un aimant, elles s'orientent dans différentes directions en dessinant des lignes : lignes de champ, dont l'ensemble constitue le spectre magnétique de l'aimant (**Fig-2**)

Figure-2



La Fig-3 est une matérialisation du spectre par la limaille de fer.

Figure-3



NB : le spectre est en réalité tridimensionnel



## 2) Le vecteur champ magnétique $\vec{B}$ (Fig-4)

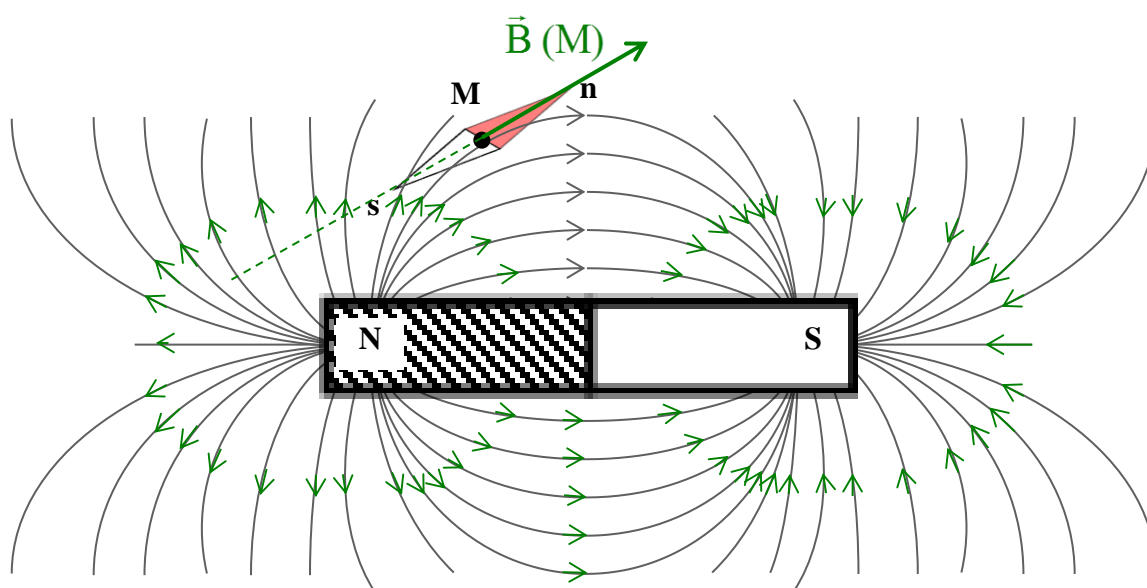
Une aiguille aimantée placée en un point M du champ magnétique s'oriente tangentielle à la ligne de champ passant par M dans un sens particulier, d'où les caractéristiques de  $\vec{B}(M)$  :

- Direction : celle de l'axe d'une aiguille aimantée placée en M.
- Sens : par convention, du pôle (s)  $\rightarrow$  pôle (n) de l'aiguille
- Intensité : donnée par un teslamètre dont la sonde est placée en M (exprimée en Tesla T dans le S.I)

Rq : D'après la Fig-2, les lignes de champ sortent du pôle N de l'aimant et retournent par le pôle S, en traversant les aiguilles dans le sens s $\rightarrow$ n.

Def : Une ligne de champ est une courbe qui est tangente au vecteur champ magnétique  $\vec{B}$  en chacun de ses points, et orientée dans le sens de  $\vec{B}$ .

Figure-4

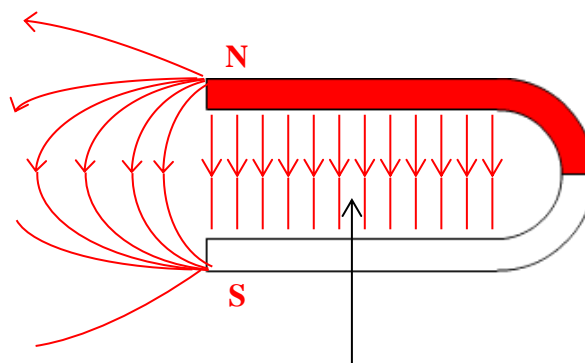
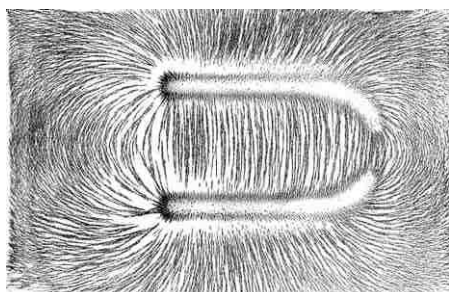


## 3) Champ magnétique uniforme

C'est un champ dont le vecteur  $\vec{B}$  est le même en tout point du champ.

ex entre les branches d'un aimant en U (Fig-5)

Figure-5



Dans cette région ;  $\vec{B}$  à la même direction, même sens, et même intensité (un teslamètre affiche la même valeur en tout point de cette région)

### III- Etude de quelques champs magnétiques

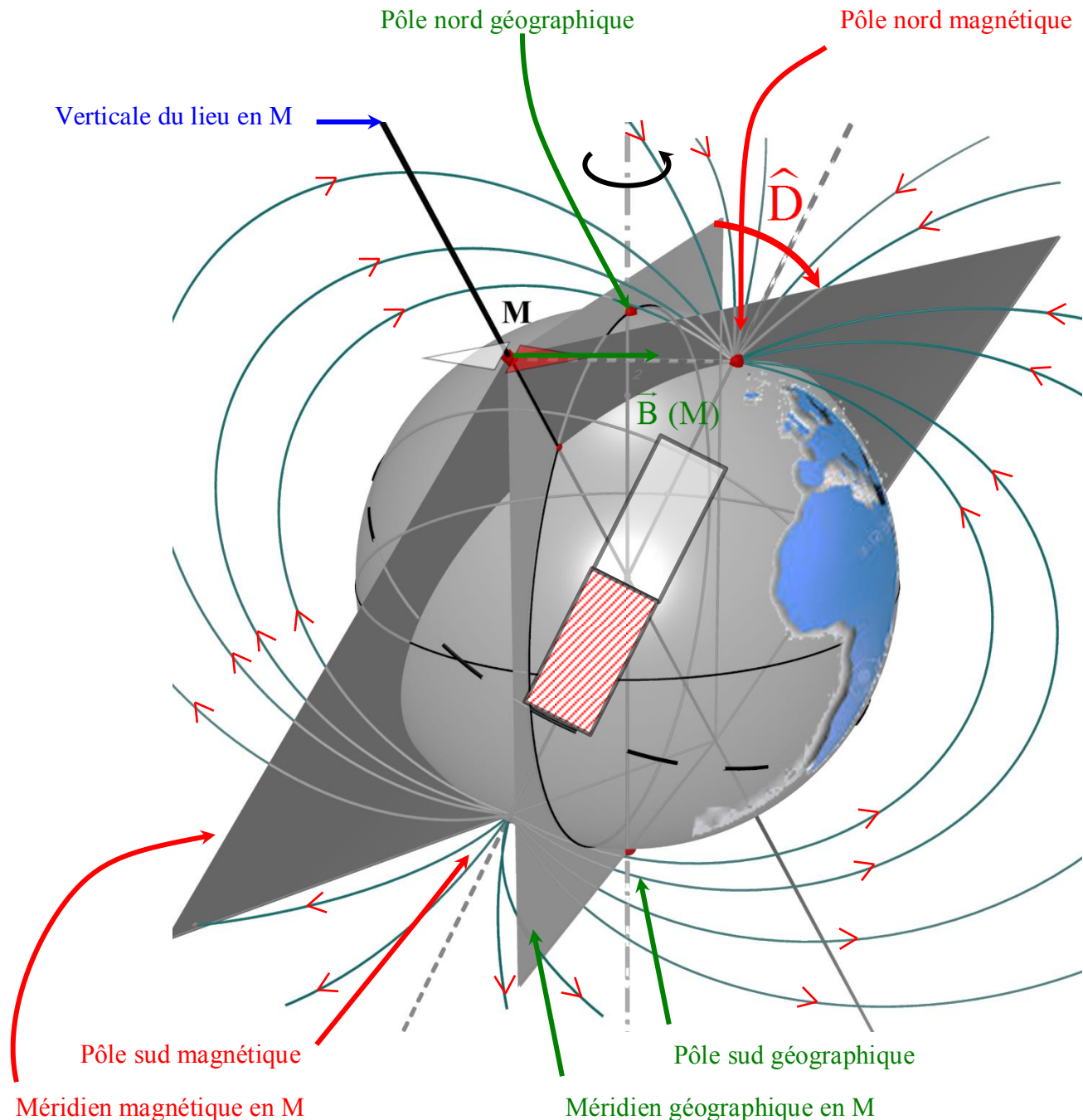
#### 1) Champ magnétique terrestre

##### a) Mise en évidence

Dans un endroit peu étendu, loin de toute source de champ magnétique ou des objets en fer, un ensemble d'aiguilles aimantées s'orientent identiquement indiquant l'existence d'un champ magnétique créé par le globe terrestre ; il est uniforme sur une faible étendue.

⇒ La Terre se présente comme un gigantesque aimant (**Fig-6**)

Figure-6



Les aiguilles aimantées ne pointent pas exactement vers le pôle nord géographique, mais vers un point proche d'environ 500 km appelé pôle nord magnétique ; la valeur de l'angle  $D$  (déclinaison) change d'un endroit à l'autre.

Le site gouvernemental Américain du "National Oceanic and Atmospheric Administration" offre un calculateur de la déclinaison magnétique en tout point de la Terre (ainsi que d'autres caractéristiques du champ magnétique terrestre) : [bit.ly/Magnetic-Field-Calculators](https://www.nmfs.gov/magnetic-field-calculator)

Exemples

A La Hencha : D = 2° 28' E (orientale)

A Tokyo (Japon) : D = 7° 31' W (occidentale)

NOAA NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION  
 NOAA > NESDIS > NCEI (formerly NGDC) > Geomagnetism

### Magnetic Field Calculators

Declination: U.S. Historic Dec

Model Used: WMM2015  
 Latitude: 35° 07' 22" N  
 Longitude: 10° 44' 29" E  
 Date: 2018-10-18  
**Declination: 2° 28' E ± 0° 18' changing by 0° 6' E per year**

Calculate Declination

Latitude: 35° 07' 22"  
 Longitude: 10° 44' 29"  
 Model: WMM (2014-2019)  
 Date: Year 2018  
 Result format: HTML XML

Calculate

NOAA NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION  
 NOAA > NESDIS > NCEI (formerly NGDC) > Geomagnetism

### Magnetic Field Calculators

Declination: U.S. Historic Dec

Model Used: WMM2015  
 Latitude: 35° 40' 59" N  
 Longitude: 139° 48' 32" E  
 Date: 2018-10-18  
**Declination: 7° 31' W ± 0° 4' W per year**

Calculate Declination

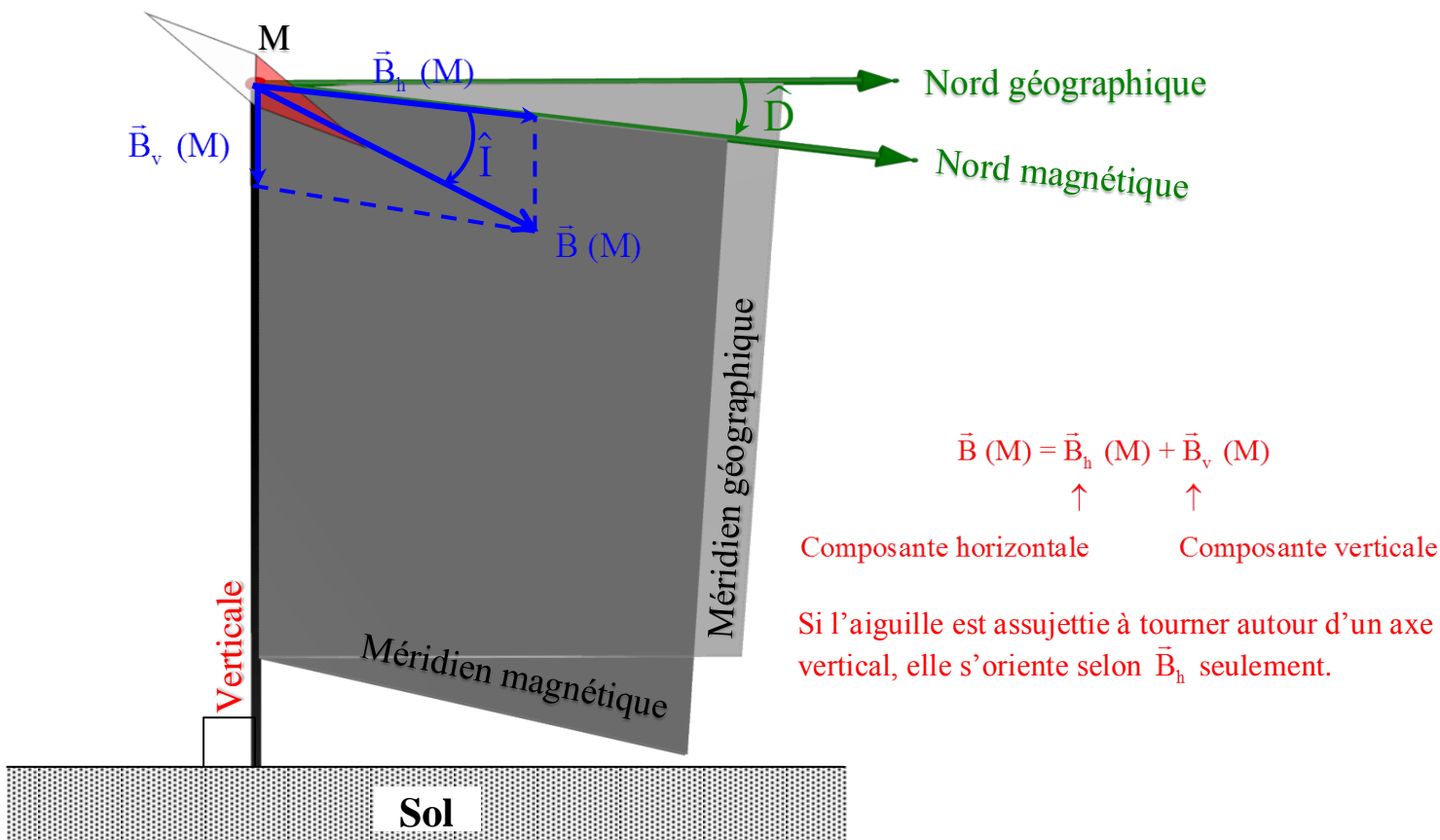
Latitude: 35° 40' 59"  
 Longitude: 139° 48' 32"  
 Model: WMM (2014-2019)  
 Date: Year 2018  
 Result format: HTML XML

Calculate

b) Déclinaison et inclinaison magnétiques (Fig-7)

- Le plan vertical contenant un point M et le vecteur champ magnétique terrestre  $\vec{B}$  (M) en ce point est appelé méridien magnétique en M ; il fait un angle D avec le méridien géographique en M (plan vertical contenant un point M et l'axe de rotation de la Terre)

Figure-7





- On appelle inclinaison magnétique en M, l'angle  $\hat{I}$  que fait  $\vec{B}(M)$  avec l'horizontale en M ; il est compté positivement dans l'hémisphère nord (les aiguilles aimantées pointent vers le bas), et négativement dans l'hémisphère sud (les aiguilles aimantées pointent vers le haut)

$\hat{I}$  se mesure avec une aiguille aimantée assujettie à tourner autour d'un axe horizontal : à la Hencha  $\hat{I} = 35^\circ$   
 Rq : L'intensité du champ magnétique terrestre est très faible devant celle d'un aimant :

- Terre :  $\sim 6 \cdot 10^{-5}$  T
- Aimant droit : 0,01 T  $\sim$  0,1 T
- Lune, Mars : 0
- Jupiter :  $\sim 4 \cdot 10^{-4}$  T
- Soleil :  $10^{-4} \sim 0,3$  T
- Etoile neutronique :  $\sim 10^{11}$  T

### Dossier à préparer pour TP1

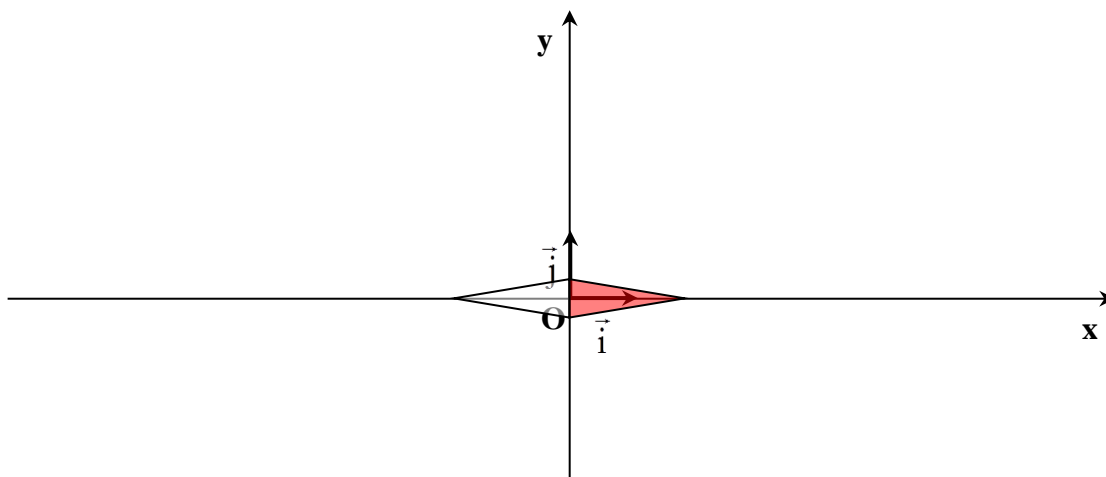
#### *Le champ magnétique Terrestre : origine et propriétés, histoire et évolution, applications, rôle dans le maintien de la vie, instabilité*

A envoyer par e-mail ([farjallaha@gmail.com](mailto:farjallaha@gmail.com)) avant le 28/11/2019, précédé d'un résumé

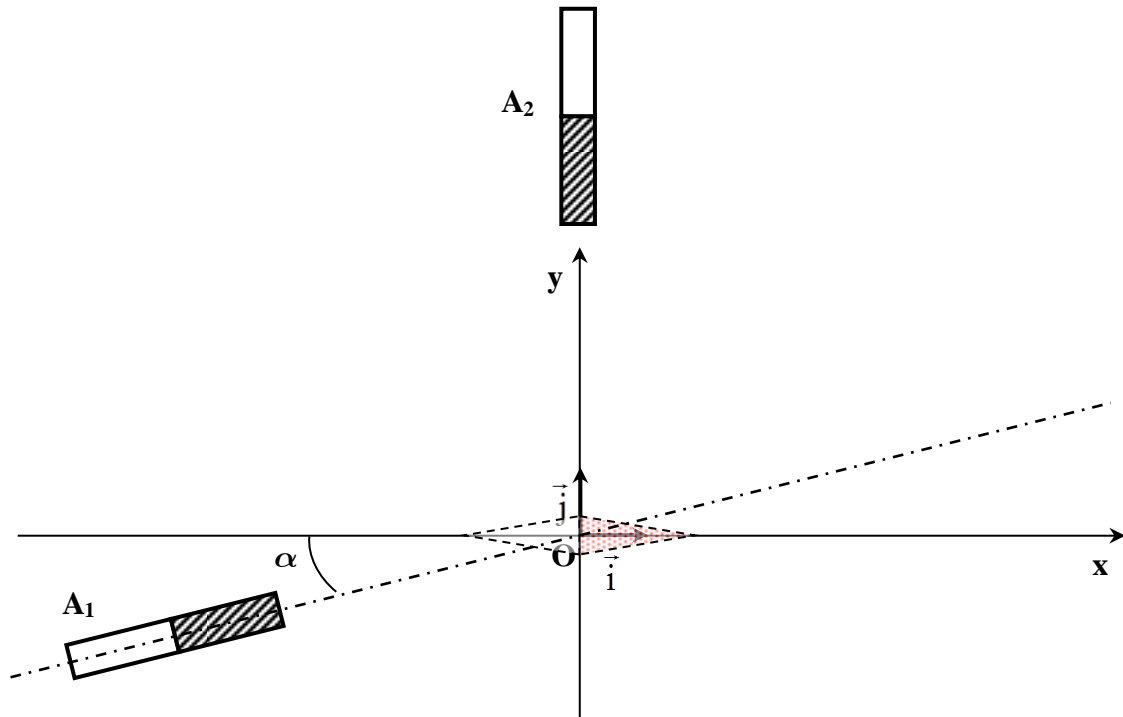
Tout dossier envoyé après le 28/11/2019 ne sera pas pris en considération, et l'élève aura un zéro

#### Application-1

1. Une aiguille aimantée assujettie à tourner autour d'un axe vertical est placée sur une table horizontale en un point O, comme le montre la figure ci-dessous : indiquer la direction du nord magnétique, et représenter la composante horizontale  $\vec{B}_h(O)$  du vecteur champ magnétique terrestre en O.

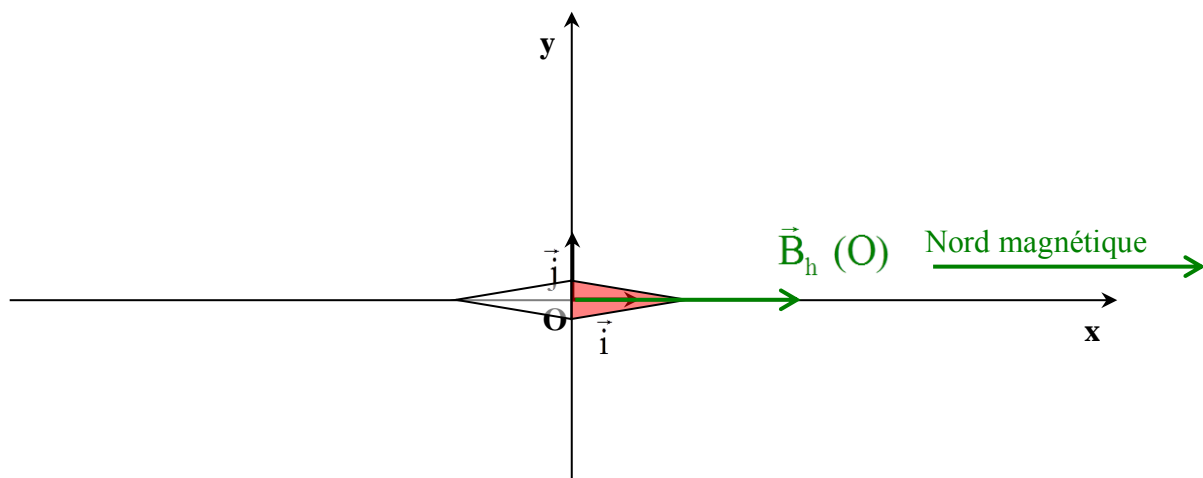


2. On place sur la table deux aimants droits identiques  $A_1$  et  $A_2$ , à une même distance du point O, comme le montre la figure ci-dessous : un teslamètre dont la sonde est placée en O affiche  $\|\vec{B}\| = 8 \cdot 10^{-5}$  T lorsque chaque aimant est tout seul sur la table ; *on négligera le champ magnétique terrestre.*



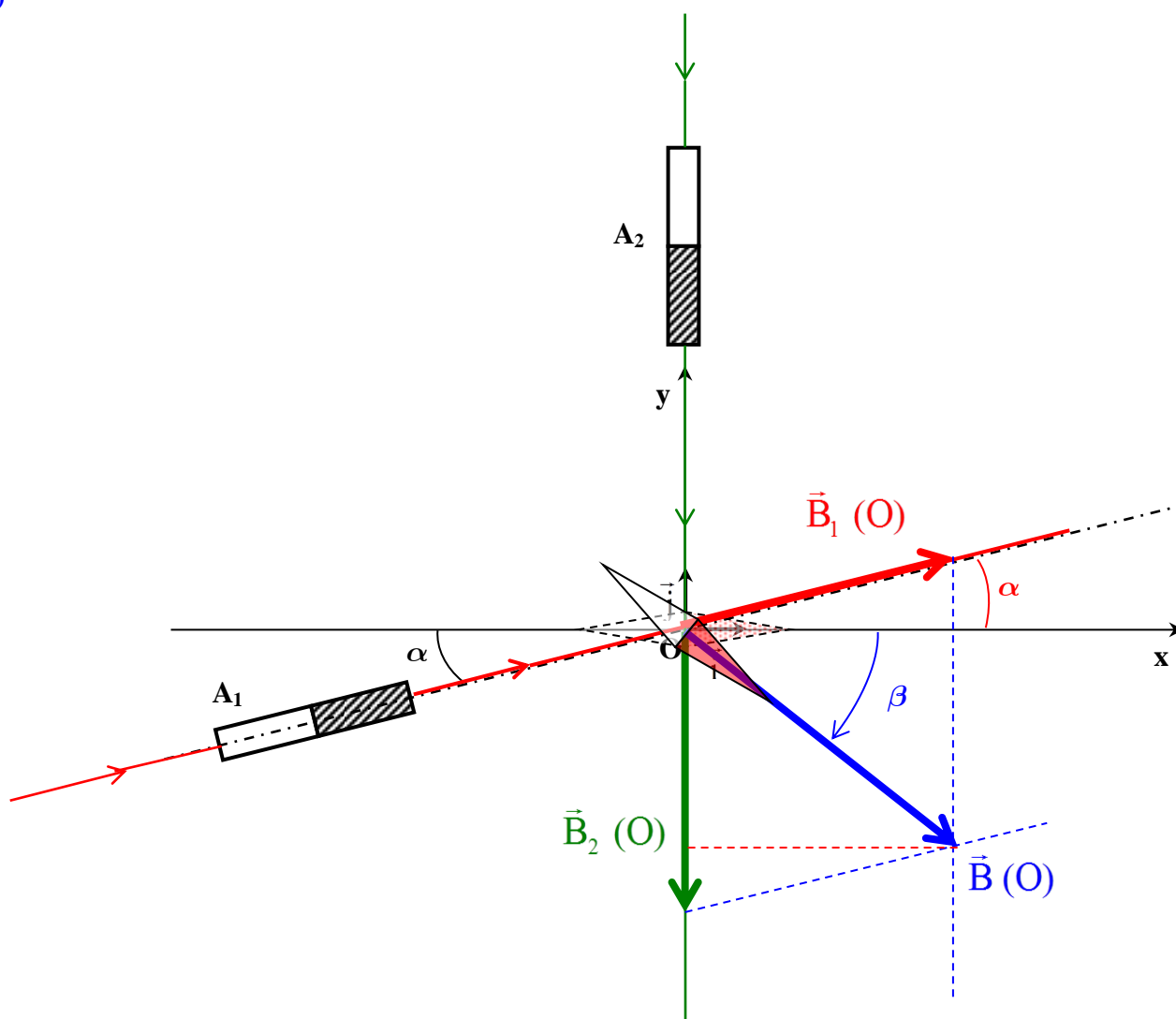
- Représenter les lignes de champ magnétique passant par le point O.
  - Représenter le vecteur champ magnétique  $\vec{B}_1(O)$  créé par  $A_1$  au point O, et le vecteur champ magnétique  $\vec{B}_2(O)$  créé par  $A_2$  au point O.
  - Représenter le vecteur champ magnétique résultant  $\vec{B}(O)$  créé par  $A_1$  et  $A_2$ , ainsi que l'aiguille aimantée.
  - Montrer que  $\vec{B}(O) = \|\vec{B}\| [\cos \alpha \cdot \vec{i} + (\sin \alpha - 1) \cdot \vec{j}]$ 
    - Calculer  $\|\vec{B}(O)\|$  si  $\alpha = 30^\circ$ .
    - Calculer la valeur de l'angle  $\beta$  dont vient de tourner l'aiguille.
3. Retrouver l'expression de  $\vec{B}(O)$ , la valeur de  $\|\vec{B}(O)\|$ , et celle de  $\beta$  si on tient compte du champ magnétique terrestre. On donne  $\|\vec{B}_h\| = 2 \cdot 10^{-5} \text{ T}$  au point O.

1.



2.

a)



b)

c)

d)  $\vec{B}(O) = \vec{B}_1(O) + \vec{B}_2(O)$

$$= (\|\vec{B}_1\| \cos \alpha \cdot \vec{i} + \|\vec{B}_1\| \sin \alpha \cdot \vec{j}) + (-\|\vec{B}_2\| \cdot \vec{j})$$

$$= \|\vec{B}\| \cos \alpha \cdot \vec{i} + \|\vec{B}\| \sin \alpha \cdot \vec{j} - \|\vec{B}\| \cdot \vec{j}$$

$$= \|\vec{B}\| \cos \alpha \cdot \vec{i} + \|\vec{B}\| (\sin \alpha - 1) \cdot \vec{j}$$

$$= \|\vec{B}\| [\cos \alpha \cdot \vec{i} + (\sin \alpha - 1) \cdot \vec{j}]$$

$$\begin{aligned} \bullet \quad \|\vec{B}(O)\| &= \|\vec{B}\| \|\cos \alpha \cdot \vec{i} + (\sin \alpha - 1) \cdot \vec{j}\| = \|\vec{B}\| \sqrt{\cos^2 \alpha + (\sin \alpha - 1)^2} \\ &= 8 \cdot 10^{-5} \sqrt{\cos^2 30^\circ + (\sin 30^\circ - 1)^2} \\ &= 8 \cdot 10^{-5} \text{ T} \end{aligned}$$

$$\bullet \quad \text{tg } \beta = \frac{B_y(O)}{B_x(O)} = \frac{\|\vec{B}\| (\sin \alpha - 1)}{\|\vec{B}\| \cos \alpha} = \frac{\sin 30^\circ - 1}{\cos 30^\circ} = 0,577 \Rightarrow \beta = 30^\circ$$

$$\begin{aligned}
 3. \quad \vec{B}(\text{O}) &= \vec{B}_1(\text{O}) + \vec{B}_2(\text{O}) + \vec{B}_h(\text{O}) \\
 &= \|\vec{B}\| \cos \alpha \cdot \vec{i} + \|\vec{B}\| (\sin \alpha - 1) \cdot \vec{j} + \|\vec{B}_h\| \cdot \vec{i} \\
 &= (\|\vec{B}\| \cos \alpha + \|\vec{B}_h\|) \cdot \vec{i} + \|\vec{B}\| (\sin \alpha - 1) \cdot \vec{j}
 \end{aligned}$$

D'où :

- $$\begin{aligned}
 \|\vec{B}(\text{O})\| &= \sqrt{B_x(\text{O})^2 + B_y(\text{O})^2} \\
 &= \sqrt{(\|\vec{B}\| \cos \alpha + \|\vec{B}_h\|)^2 + (\|\vec{B}\| (\sin \alpha - 1))^2} \\
 &= \sqrt{(8 \cdot 10^{-5} \cos 30^\circ + 2 \cdot 10^{-5})^2 + (8 \cdot 10^{-5} (\sin 30^\circ - 1))^2} \\
 &= 9,78 \cdot 10^{-5} \text{ T}
 \end{aligned}$$
- $$\text{tg } \beta = \frac{B_y(\text{O})}{B_x(\text{O})} = \frac{\|\vec{B}\| (\sin \alpha - 1)}{\|\vec{B}\| \cos \alpha + \|\vec{B}_h\|} = \frac{8 \cdot 10^{-5} (\sin 30^\circ - 1)}{8 \cdot 10^{-5} \cos 30^\circ + 2 \cdot 10^{-5}} = 0,448 \Rightarrow \beta \approx 24^\circ$$

## 2) Champ magnétique créé par un courant continu

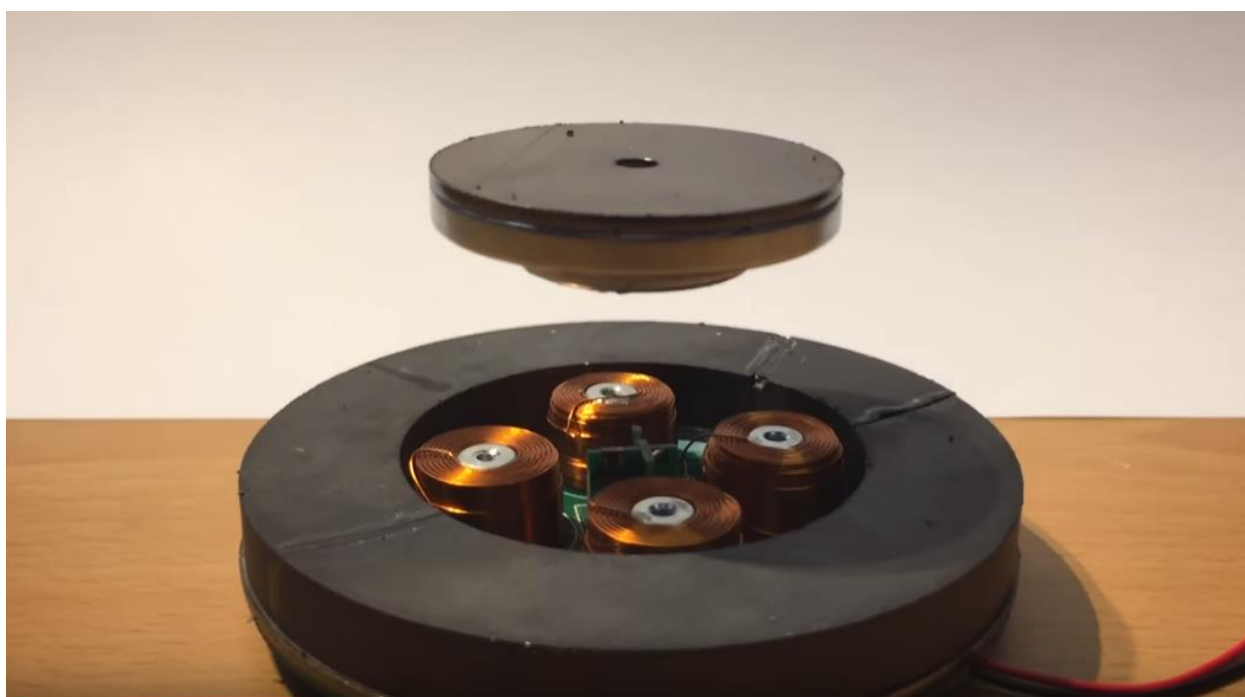
### a) Mise en évidence

Une bobine parcourue par un courant continu interagit avec un aimant, comme si elle même était un aimant ; l'inversion de l'interaction suite à l'inversion du sens du courant ou des pôles de l'aimant prouve que la bobine possède une face nord (N) et une face sud (S).

⇒ Le courant électrique circulant dans une bobine crée un champ magnétique qui peut interagir avec le champ magnétique d'un aimant ou d'une autre bobine.

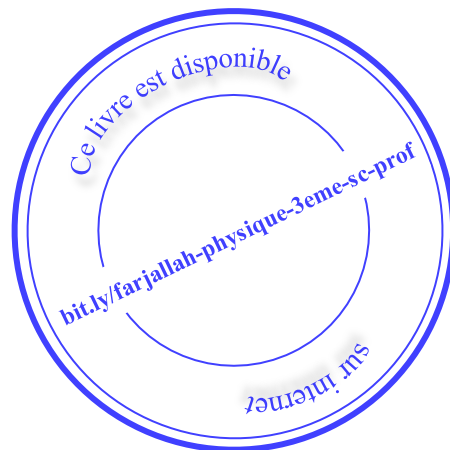
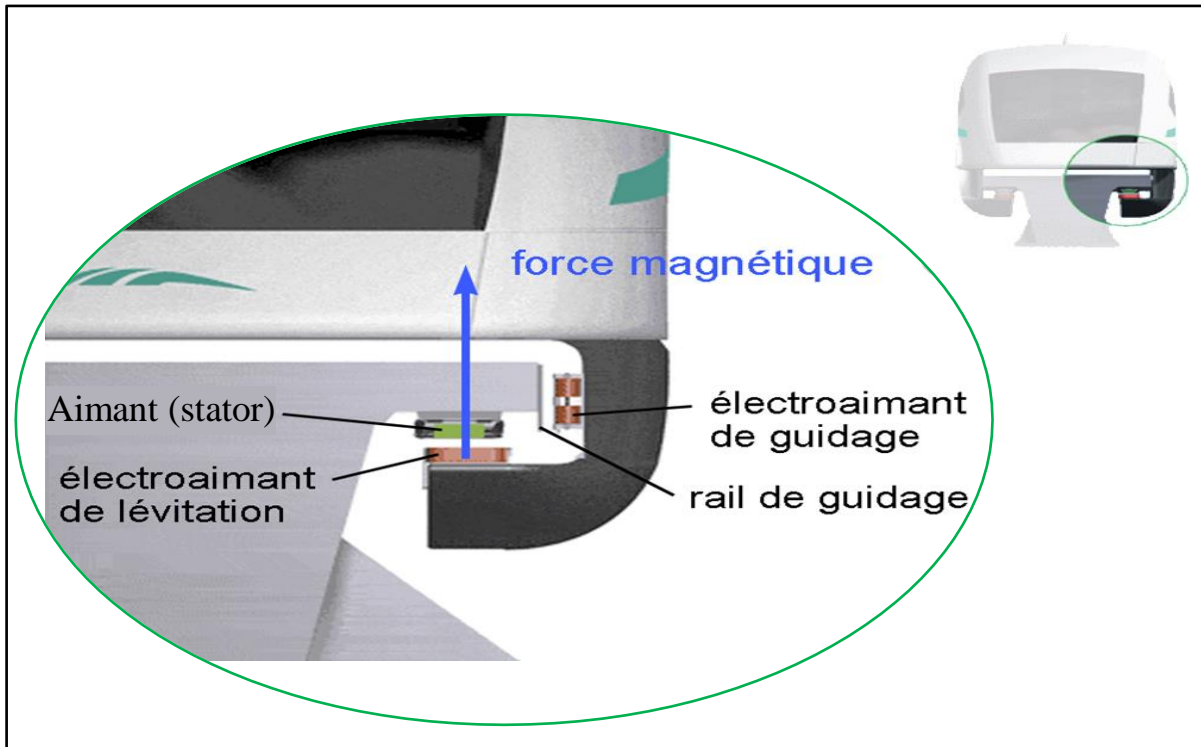
Son intensité est de l'ordre du mT, mais avec une bobine supraconductrice il peut atteindre plusieurs teslas. La lévitation magnétique est une application fascinante de l'interaction magnétique courant-aimant ou courant-courant. (Fig-8)

Figure-8



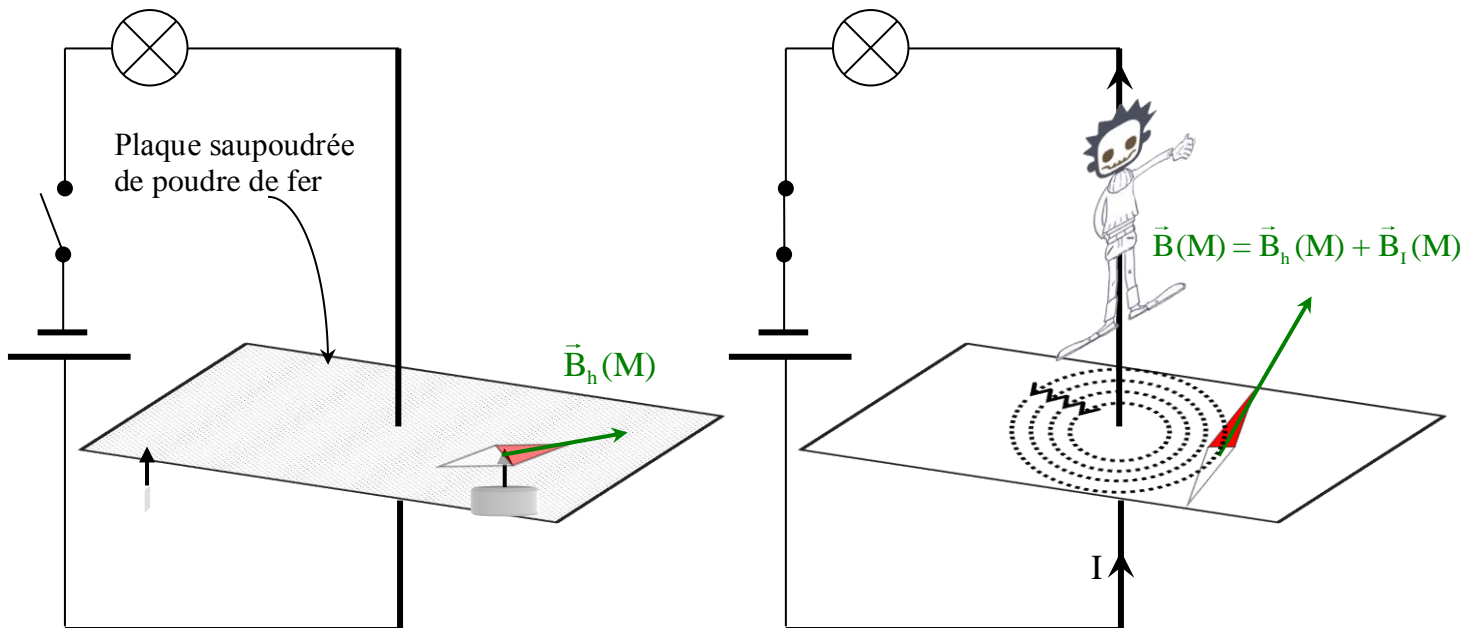
L'aimant flotte au-dessus des bobines grâce à l'interaction aimant-courant

Le **Magnetic Levitation train (Maglev)** du Japon se soulève de quelques centimètres au-dessus des rails grâce à la lévitation magnétique se produisant entre des aimants et des électroaimants très puissants (bobines supraconductrices). Le frottement avec les rails ainsi éliminé, permet au train d'atteindre un record de vitesse **603 Km.h<sup>-1</sup>**



**b) Cas d'un courant rectiligne (Fig-9)**

**Figure-9**



$I = 0$  : l'aiguille, assujettie à tourner autour d'un axe vertical, est orientée selon  $\vec{B}_h$

$I \neq 0$  : l'aiguille s'oriente selon le champ magnétique résultant de la terre et du courant  $I$

Si on inverse le sens du courant, l'aiguille dévie dans le sens opposé ; dans les deux cas, les lignes de champ sont des cercles concentriques sur le fil.

En négligeant le champ magnétique de la terre, le sens du vecteur champ magnétique créé par le courant en M est donné par la main gauche d'un observateur placé sur le fil, regardant le point M, et traversé par le courant des pieds  $\rightarrow$  la tête. (Observateur d'Ampère).

**c) Cas d'un courant circulaire (TP1)**

## TP 1 : Etude expérimentale du champ magnétique créé par un solénoïde

### Objectifs :

- Matérialiser le spectre magnétique d'un solénoïde.
- Déterminer les faces nord et sud d'un solénoïde, connaissant le sens du courant qui le traverse.
- Déterminer les caractéristiques du champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde, connaissant le sens et l'intensité du courant qui le traverse, et son nombre de spires par unité de longueur.

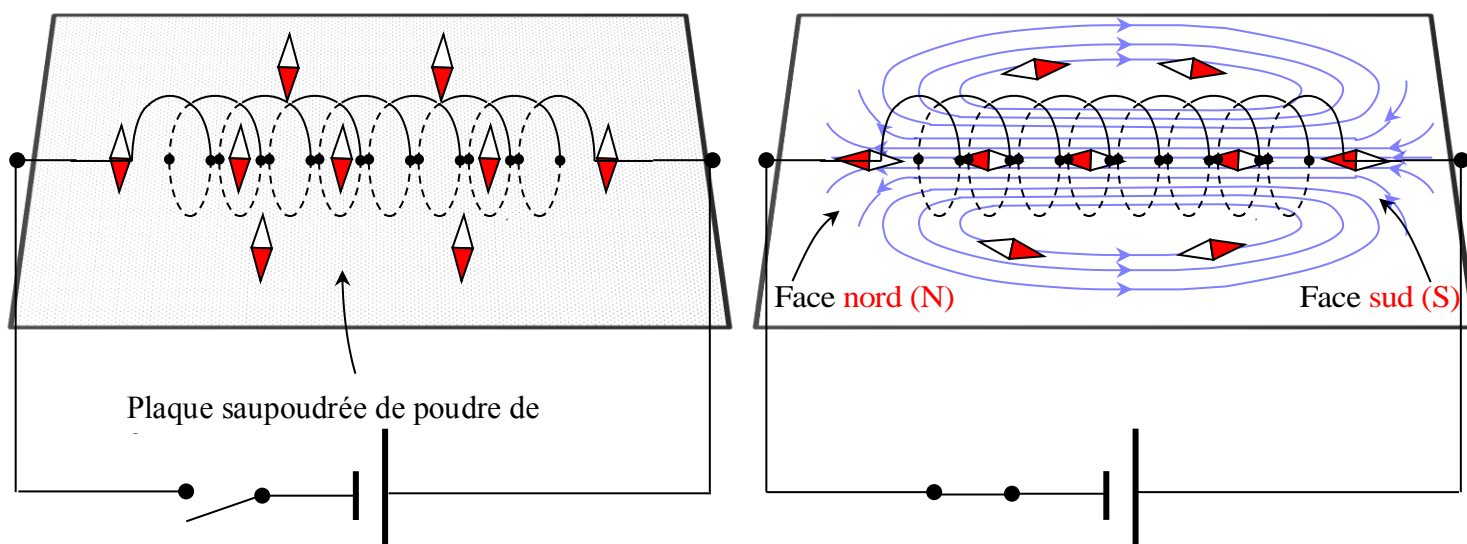
### Matériel :

- |                                      |                                     |                            |
|--------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| • Solénoïde sur plaque de plexiglas. | • 1 Générateur de tension réglable. | • 1 Ampèremètre numérique. |
| • Poudre de fer.                     | • 1 Interrupteur.                   | • 1 Teslamètre.            |
| • 9 Aiguilles aimantées minuscules.  | • 4 Fils de connexion               | • 1 Solénoïde.             |

### Manipulation :

#### 1. Matérialisation du spectre du champ magnétique créé par un courant circulant dans un solénoïde

##### a) Expérience

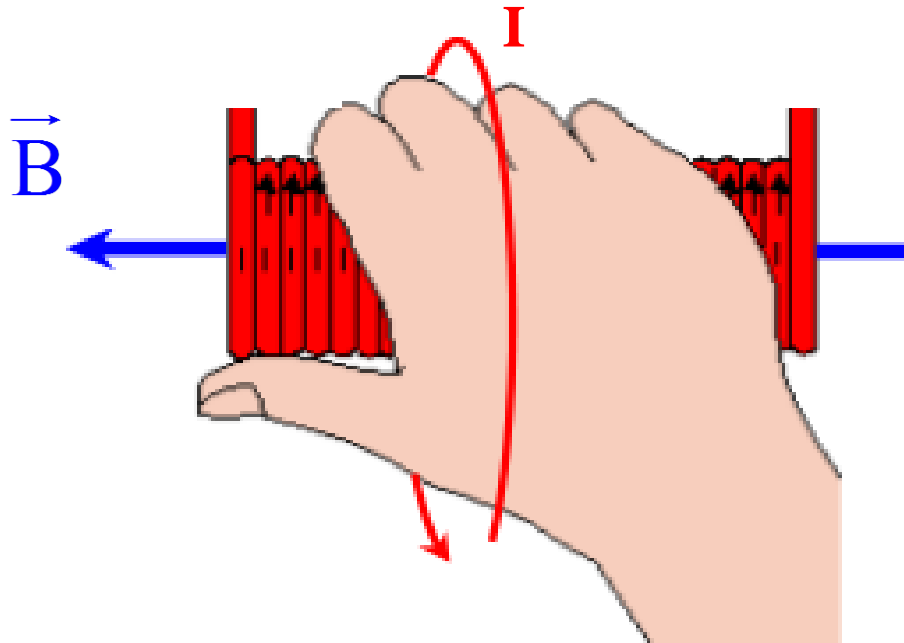


- \* Représenter les lignes de champ, et les orienter.
- \* En déduire la face nord et la face sud du solénoïde.
- \* On inverse le sens du courant : **les faces nord et sud du solénoïde sont inversées.**
- \* Un teslamètre dont la sonde est placée n'importe où à l'intérieur du solénoïde **affiche la même valeur du champ magnétique.**

##### b) Interprétation

- \* A l'extérieur du solénoïde : la forme du spectre magnétique est analogue à celle d'un aimant droit ; un solénoïde parcouru par un courant continu se comporte comme un aimant droit de même dimensions, il possède une face N et une face S analogues aux pôles N et S d'un aimant.
- \* A l'intérieur du solénoïde : Le spectre est constitué de lignes droites parallèles à l'axe du solénoïde, et orientées dans le même sens ; le champ magnétique est uniforme.
  - Direction : **axe du solénoïde.**
  - Sens : **lié au sens du courant (I) par la règle suivante ;**

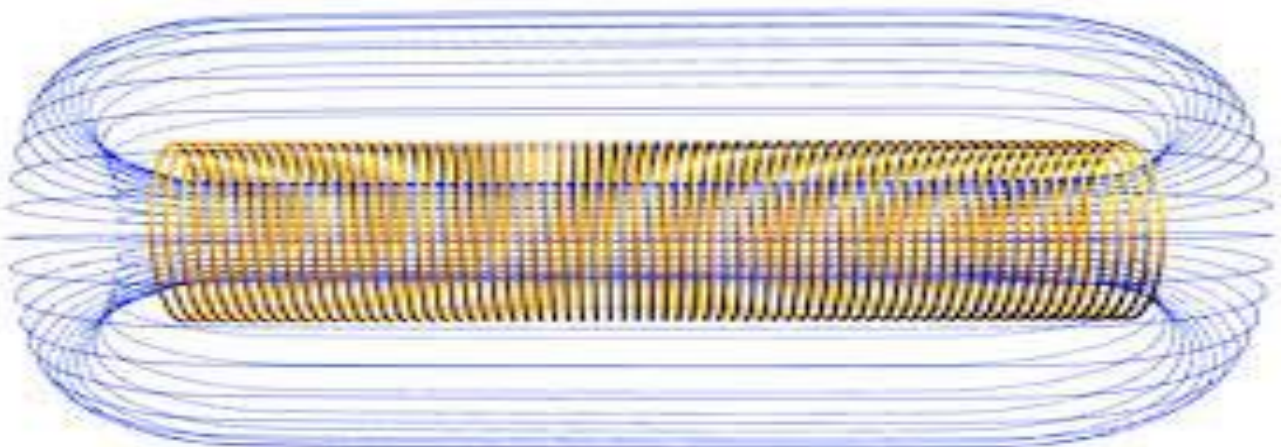




### Règle de la main droite

- Intensité : On montre que  $\|\vec{B}\| = \mu n I$ , avec ;
  - $n = \frac{N}{L}$  ; où N est le nombre de spires, et L la longueur du solénoïde (n est alors le nombre de spires par unité de longueur)
  - $\mu$  la perméabilité magnétique de la matière remplissant le solénoïde (généralement l'air, dont la perméabilité est pratiquement égale à celle du vide  $\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$  SI)

Remarque : le spectre magnétique d'un solénoïde est en fait tridimensionnel

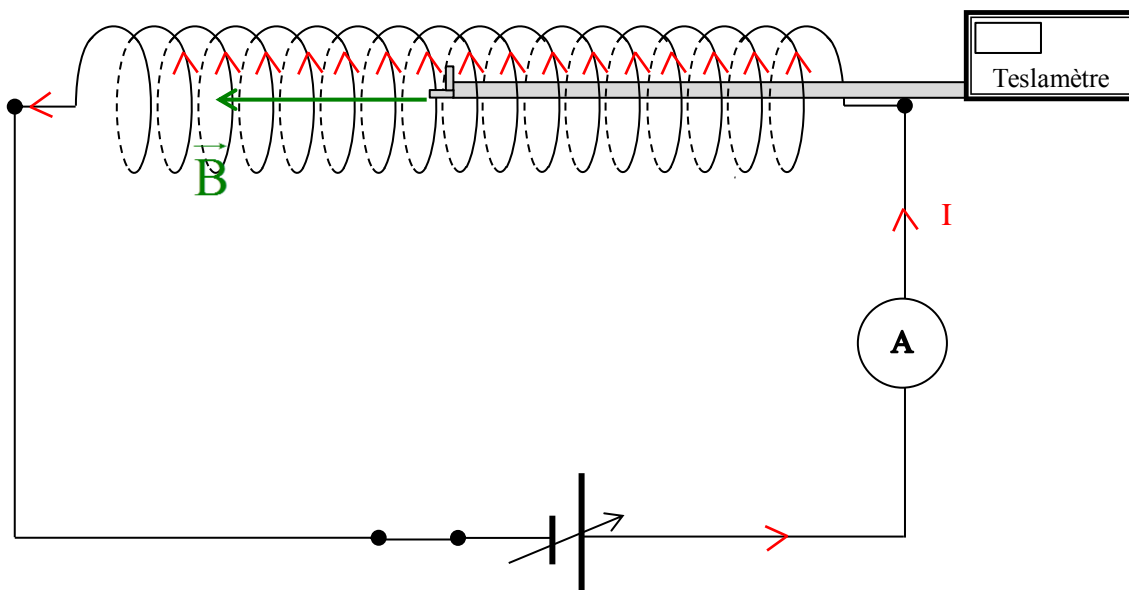




## 2. Vérification expérimentale de l'expression de la valeur du vecteur champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde

### a) Expérience

- Indiquer le sens du courant (I), et représenter le vecteur champ magnétique ( $\vec{B}$ ) à l'intérieur du solénoïde :



- Faire le réglage du teslamètre, et remplir les tableaux de mesure suivants :

- $N = 200$  spires, et  $L = 40$  cm ;  $n = \frac{N}{L} = \frac{200}{0,4 \text{ m}} = 500 \text{ m}^{-1}$  constante

I (A)	0	1	2	3	4
$\ \vec{B}\ $ (mT)	0	0,628	1,256	1,885	2,513
$4 \pi 10^{-7} \cdot n \cdot I$	0	$0,628 \cdot 10^{-3}$	$1,256 \cdot 10^{-3}$	$1,885 \cdot 10^{-3}$	$2,513 \cdot 10^{-3}$

- $I = 1$  A constante, et  $L = 40$  cm

N	400	200	0
$n$ ( $\text{m}^{-1}$ )	1000	500	0
$\ \vec{B}\ $ (mT)	1,256	0,628	0
$4 \pi 10^{-7} \cdot n \cdot I$	$1,256 \cdot 10^{-3}$	$0,628 \cdot 10^{-3}$	0

### b) Conclusion

Quelle que soient I et n,  $\|\vec{B}\| = 4 \pi 10^{-7} n I$

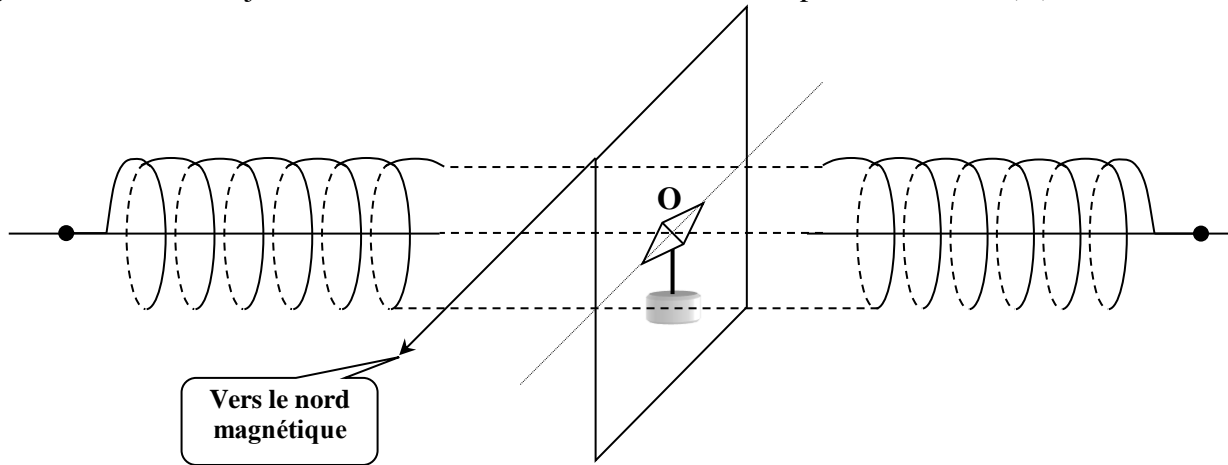
$\Rightarrow \|\vec{B}\| = \mu n I$ , avec  $\mu = 4 \pi 10^{-7}$  SI : perméabilité magnétique de l'air (celle du vide  $\mu_0$ )

**Application-2**

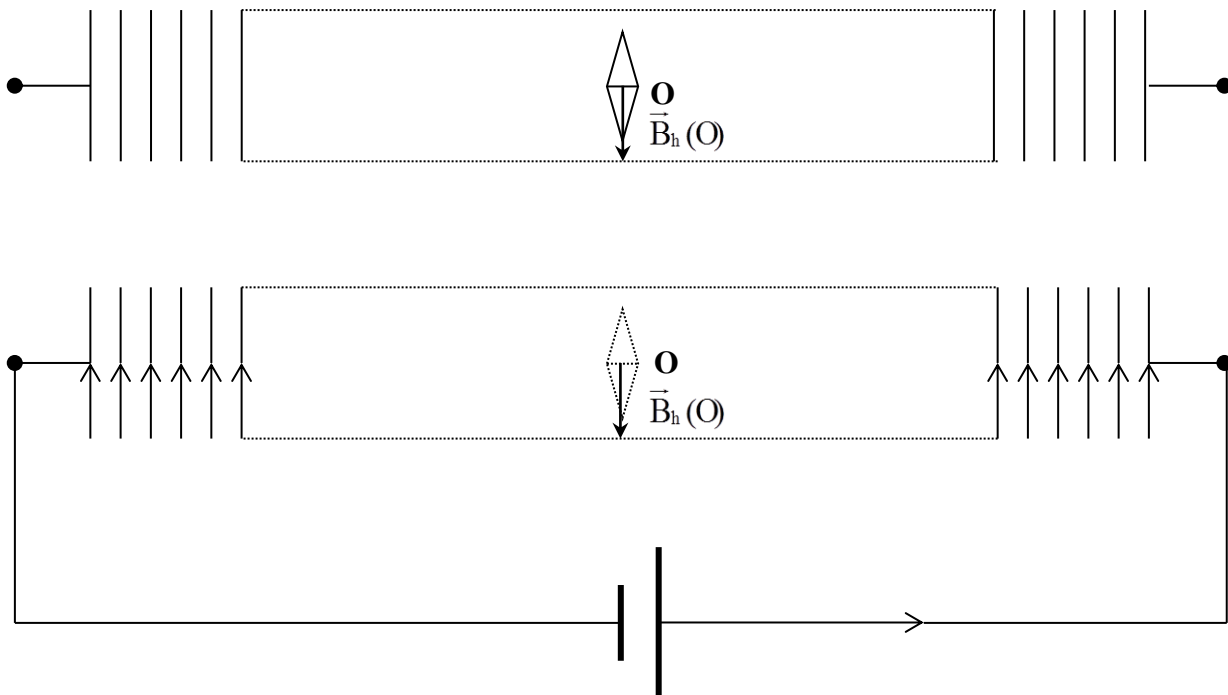
Dans un lieu où la composante horizontale du vecteur champ magnétique terrestre est de valeur :

$\|\vec{B}_h\| = 2 \cdot 10^{-5} \text{ T}$  ; on pose un solénoïde, sur une table horizontale tel que son axe soit perpendiculaire au plan méridien magnétique du lieu. (figure ci-dessous).

Une aiguille aimantée assujettie à tourner autour d'un axe vertical est posée au milieu (O) du solénoïde.

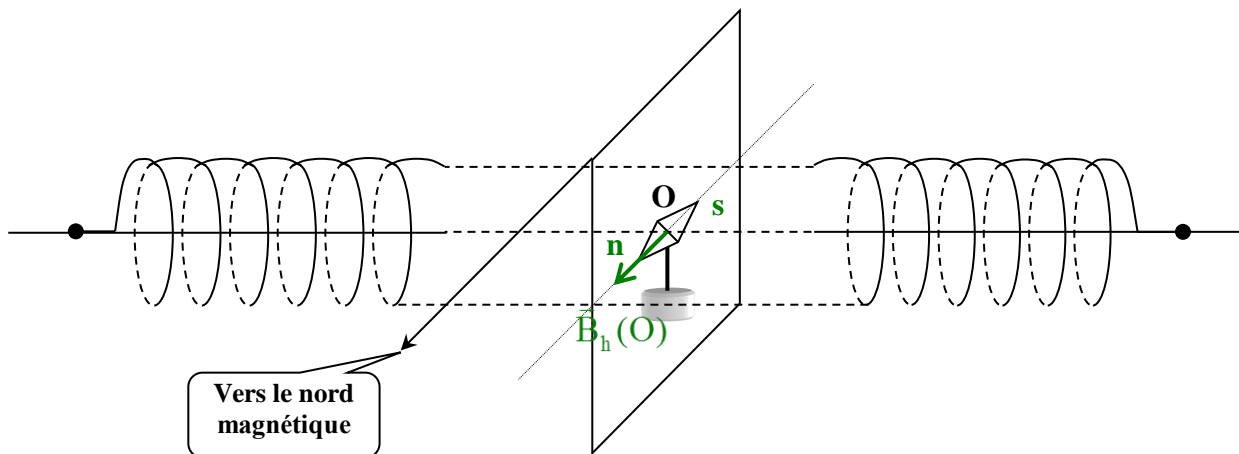


1. Quel angle fait l'axe (s,n) de l'aiguille avec l'axe du solénoïde ? Justifier
2. Indiquer les pôles s et n de l'aiguille, et représenter  $\vec{B}_h(O)$  : la composante horizontale du vecteur champ magnétique terrestre au point O. (Echelle :  $2 \cdot 10^{-5} \text{ T} \rightarrow 1\text{cm}$ ).
3. On branche un générateur aux bornes du solénoïde ; un courant continu d'intensité  $I = 0,1 \text{ A}$  circule dans le solénoïde : la figure ci-dessous représente le dispositif *vu de dessus*, avant et après le branchement du générateur.



- a) Sachant que le solénoïde comporte  $n = 800 \text{ spires/m}$  ;
  - Calculer la valeur du champ magnétique  $\vec{B}_s(O)$  créé par le solénoïde en son milieu O. (On donne  $\mu = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ S.I}$ )
  - Le représenter selon l'échelle précédente.
- b) Représenter  $\vec{B}(O)$  le champ magnétique résultant au point O, et calculer sa valeur ; commenter.
- c) Représenter l'aiguille aimantée dans sa nouvelle orientation ; indiquer ses pôles.
- d) Calculer la valeur de l'angle duquel a tourné l'aiguille à partir de son orientation initiale.

1. Angle droit ; car l'axe de l'aiguille se trouve dans le méridien magnétique, qui est  $\perp$  à l'axe du solénoïde.  
2.

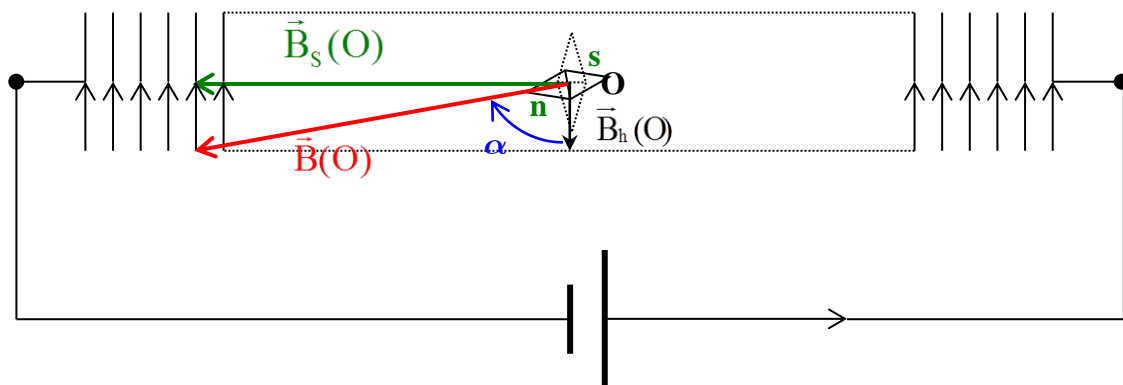
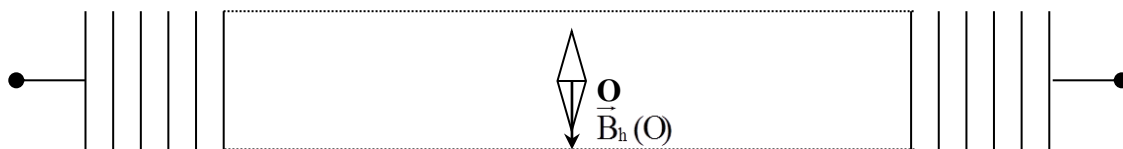


3.

a)

- $\|\vec{B}_s(O)\| = \mu n I = 4 \pi 10^{-7} \cdot 800 \cdot 0,1 = 10^{-4} \text{ T} \longrightarrow 5 \text{ cm} \left( = \frac{10^{-4} \text{ T}}{2 \cdot 10^{-5} \text{ T}} \right)$

•



b)

- $\vec{B}(O) = \vec{B}_s(O) + \vec{B}_h(O)$

- $\|\vec{B}(O)\|^2 = \|\vec{B}_s(O)\|^2 + \|\vec{B}_h(O)\|^2 \Rightarrow \|\vec{B}(O)\| = \sqrt{\|\vec{B}_s(O)\|^2 + \|\vec{B}_h(O)\|^2} = \sqrt{(10^{-4})^2 + (2 \cdot 10^{-5})^2}$

$$\|\vec{B}(O)\| = 1,02 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

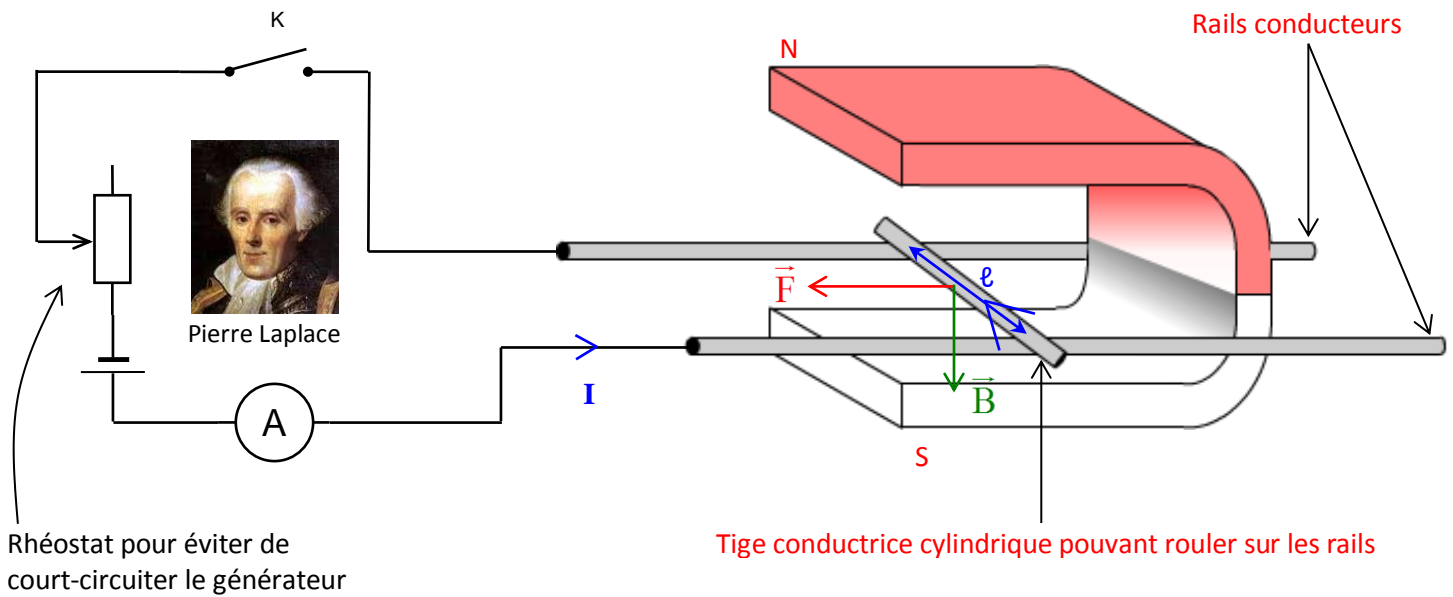
- $\|\vec{B}(O)\| \approx \|\vec{B}_s(O)\|$  : le champ magnétique terrestre est négligeable devant celui du solénoïde.

c)

d)  $\text{tg } \alpha = \frac{\|\vec{B}_s(O)\|}{\|\vec{B}_h(O)\|} = \frac{10^{-4}}{2 \cdot 10^{-5}} = 5 \Rightarrow \alpha \approx 78,7^\circ$

## IV- Force de Laplace (Fig-10)

Figure-10



Une portion (de longueur  $\ell$ ) de la tige baigne dans le champ magnétique uniforme  $\vec{B}$  créé par l'aimant en U.

- \* K ouvert ( $I = 0$ ), ou aimant absent ( $\vec{B} = \vec{0}$ ) : La tige reste immobile.
- \* K fermé ( $I \neq 0$ ), et aimant présent ( $\vec{B} \neq \vec{0}$ ) : La tige se meut sous l'action d'une force  $\vec{F}$

### 1) Mise en évidence

Un conducteur parcouru par un courant électrique, et placé dans un champ magnétique ; subit une force magnétique appelée force de Laplace.

### 2) Caractéristiques

#### a) Point d'application

La force de Laplace s'exerce en tous les points de la partie du conducteur ( $\ell$ ) qui baigne dans le champ magnétique ; le vecteur  $\vec{F}$  qui la représente part du milieu de cette partie.

#### b) Direction

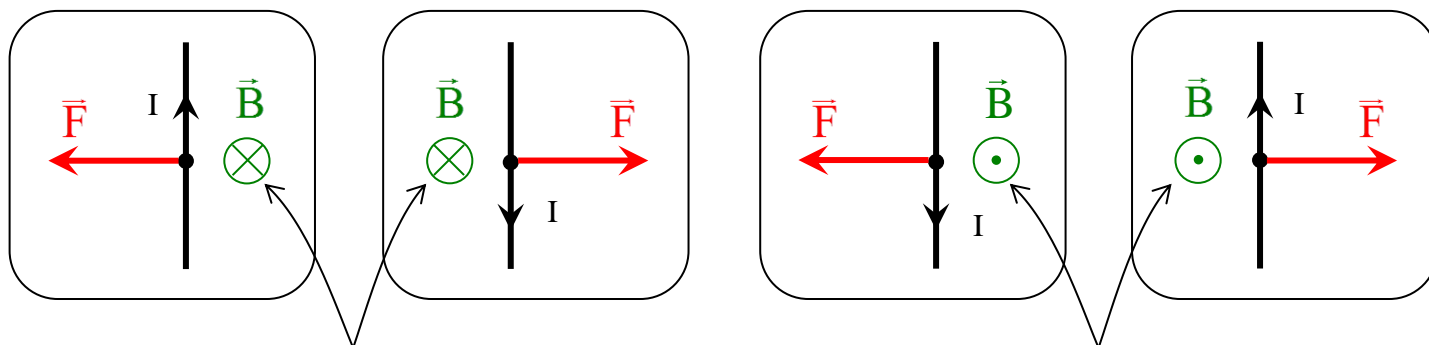
$\perp$  au plan contenant ( $\vec{B}$ ) et la portion du conducteur de longueur ( $\ell$ ).

**c) Sens**

Si on inverse le sens de (I) ou de ( $\vec{B}$ ) ; le sens de  $\vec{F}$  est inversé (Fig-11)

**Figure-11**

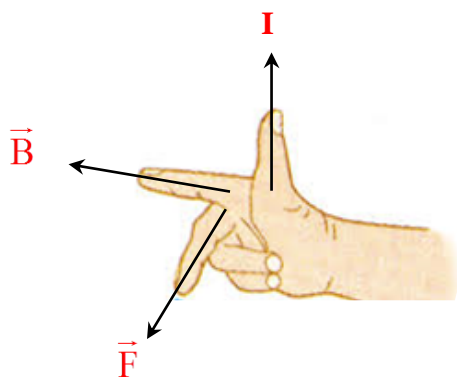
La tige du dispositif précédent, vue de dessus



Vecteur rentrant (dans le plan de la figure)

Vecteur sortant (du plan de la figure)

Dans tous les cas, le sens de  $\vec{F}$  est lié au sens de  $\vec{B}$  et de I par la règle des 3 doigts de la main droite

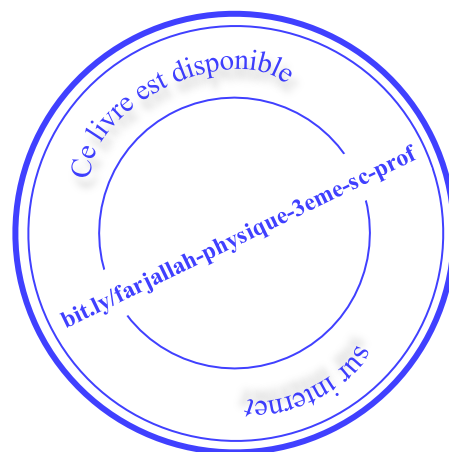


**d) Intensité**

Pour  $\vec{B}$  uniforme, on montre que  $\|\vec{F}\| = I \cdot \ell \cdot \|\vec{B}\| \cdot \sin \alpha$ , avec  $\alpha =$  (conducteur,  $\vec{B}$ )

$\uparrow$       $\uparrow$       $\uparrow$       $\uparrow$   
 N     A     m     T

Ainsi  $\|\vec{F}\|$  est maximale pour  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  rad, et nulle pour  $\alpha = 0$



**Application-3**

 On donne  $g = 9,8 \text{ N.kg}^{-1}$ .

On négligera le champ magnétique terrestre.

La figure ci-contre représente une tige conductrice pouvant rouler sur deux rails conducteurs horizontaux ; une partie de longueur  $\ell = 10 \text{ cm}$  de la tige baigne dans le champ magnétique uniforme régnant entre les branches d'un aimant en U, dont l'intensité est  $\|\vec{B}\| = 0,2 \text{ T}$  et la direction  $\perp$  au plan des rails.

1. On fait circuler un courant continu d'intensité  $I$  dans la tige ; elle se déplace vers la gauche : représenter la force de Laplace, indiquer le sens du courant et les pôles du générateur.

2. Un solide de masse  $m = 10 \text{ g}$  suspendu à un fil inextensible et de masse négligeable permet de maintenir la tige en équilibre comme le montre la figure ci-contre : calculer la valeur de l'intensité  $I$  du courant.

3. On remplace l'aimant précédent par un autre aimant en U qui crée un champ magnétique de même direction verticale, de même sens et de même largeur ; mais de valeur  $\|\vec{B}'\| > \|\vec{B}\|$  : la masse qu'il faut suspendre au fil pour maintenir la tige en équilibre est  $m' = 10,5 \text{ g}$  :

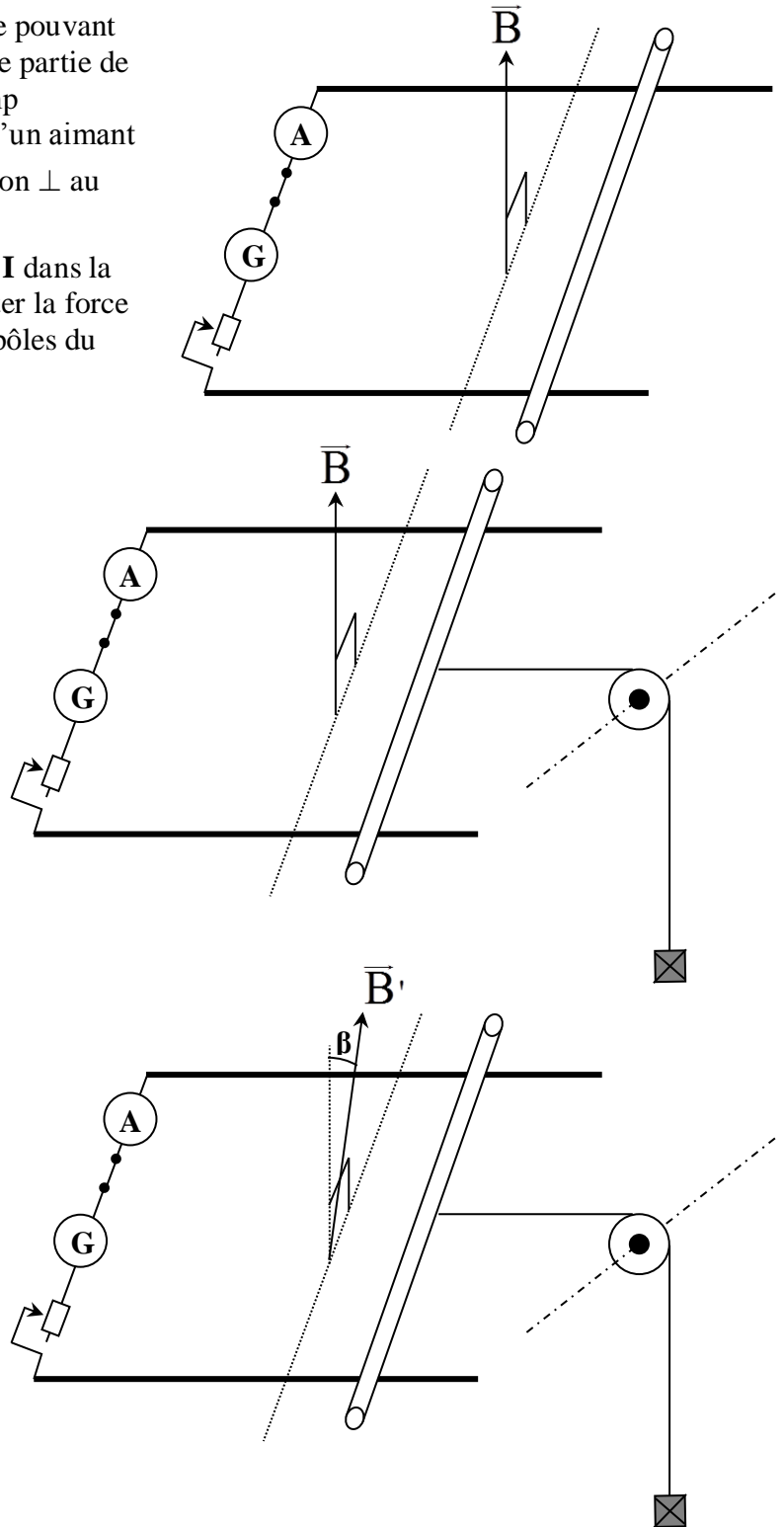
a) Etablir l'expression de  $\|\vec{B}'\|$  en fonction de  $\|\vec{B}\|$  ; calculer sa valeur.

b) On veut que la tige reste en équilibre sans remplacer la masse  $m$  par  $m'$  ; pour cela on déplace le curseur du rhéostat jusqu'à donner à l'intensité du courant la valeur  $I'$  :

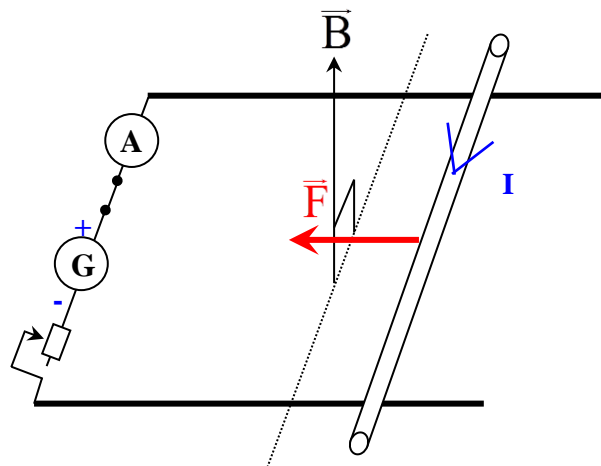
- Comparer, en justifiant,  $I'$  à  $I$ .
- Calculer la valeur de  $I'$ .

c) On peut aussi maintenir l'équilibre de la tige avec la même masse ( $m$ ) sans modifier l'intensité ( $I$ ) du courant ; pour cela on fait incliner l'aimant en U pour que la direction du vecteur champ magnétique  $\vec{B}'$  fasse un angle ( $\beta$ ) avec la verticale comme le montre la figure ci-dessus : calculer la valeur de  $\beta$ . (on supposera que la portion de la tige baignant dans le champ magnétique n'est pas sensiblement modifiée)

4. On enlève l'aimant créant le champ  $\vec{B}'$ , et on ramène l'aimant de départ créant le champ  $\vec{B}$  ; un 2<sup>ème</sup> aimant en U, qui lui est identique, est placé à son côté de telle sorte que le champ magnétique garde les mêmes caractéristiques mais que la longueur de la tige plongée dans le champ magnétique devient  $\ell' = 20 \text{ cm}$  : calculer la valeur de la masse  $m$  qui permet de maintenir la tige en équilibre.

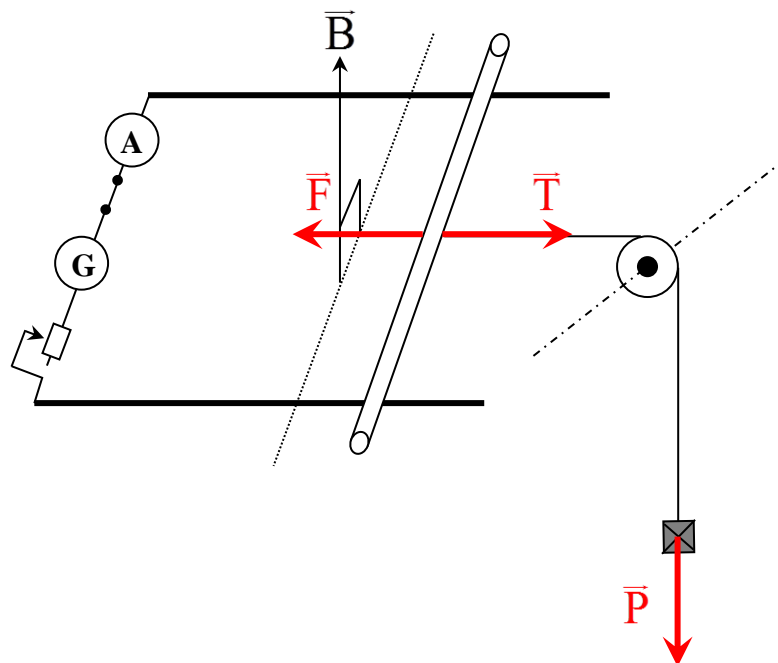


1.



2. Pour que la tige reste en équilibre; il faut que :  $\vec{T} = -\vec{F} \Rightarrow \|\vec{F}\| = \|\vec{T}\| = \|\vec{P}\| = m g \Rightarrow \|\vec{F}\| = m g$

$$\Rightarrow \ell I \|\vec{B}\| \sin \alpha = m g, \text{ avec } \alpha = 90^\circ; \Rightarrow \ell I \|\vec{B}\| = m g \Rightarrow I = \frac{m g}{\ell \|\vec{B}\|} = \frac{10 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 9,8}{0,1 \text{ m} \cdot 0,2} : \boxed{I = 4,9 \text{ A}}$$



3.

a) Soit  $\|\vec{F}'\|$  la nouvelle valeur de la force de Laplace ;  $\|\vec{F}'\| = m' g \Rightarrow \ell I \|\vec{B}'\| = m' g \Rightarrow \|\vec{B}'\| = \frac{m' g}{\ell I}$

Or  $\frac{g}{\ell I} = \frac{\|\vec{B}\|}{m}$ , alors  $\|\vec{B}'\| = m' \frac{\|\vec{B}\|}{m} \Rightarrow \|\vec{B}'\| = \frac{m'}{m} \|\vec{B}\| = \frac{10,5 \text{ g}}{10 \text{ g}} \cdot 0,2 \text{ T} : \boxed{\|\vec{B}'\| = 0,21 \text{ T}}$

b)

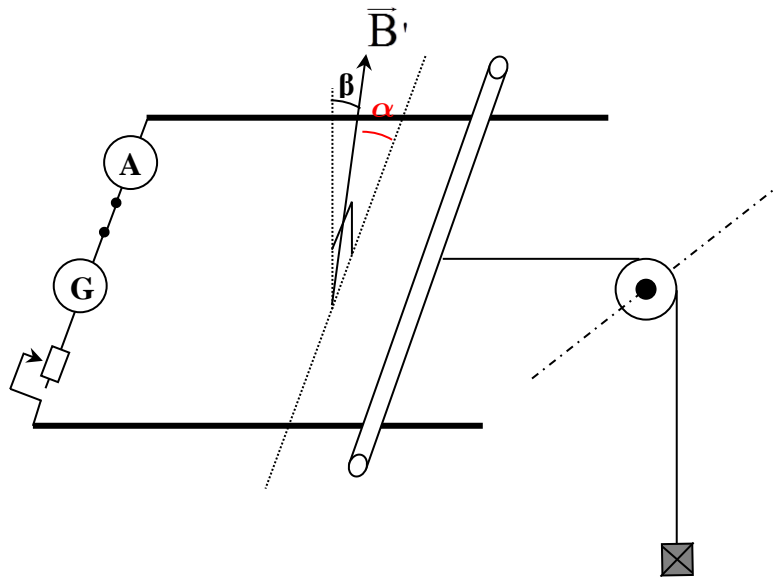
- Le champ magnétique est devenu plus intense ; la force de Laplace est devenue plus intense : pour la ramener à sa valeur de départ, il faut abaisser l'intensité du courant  $\Rightarrow I' < I$ .

- $\|\vec{F}'\| = \|\vec{F}\| \Rightarrow \ell I' \|\vec{B}'\| = \ell I \|\vec{B}\| \Rightarrow I' = \frac{\|\vec{B}\|}{\|\vec{B}'\|} I = \frac{0,2}{0,21} \cdot 4,9 \text{ A} : \boxed{I' \approx 4,67 \text{ A}}$

c) Soit  $\alpha$  l'angle entre la tige et le vecteur  $\vec{B}'$  ;

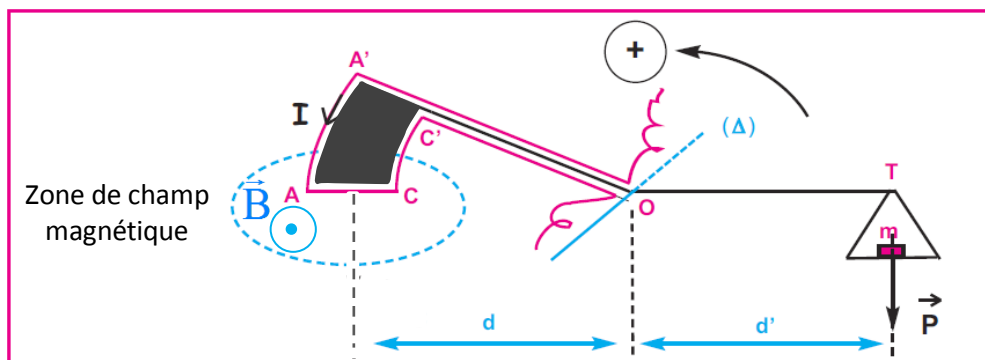
$$\|\vec{F}'\| = \ell I \|\vec{B}'\| \sin \alpha = \|\vec{F}\| = \ell I \|\vec{B}\| \Rightarrow \cancel{\ell I} \|\vec{B}'\| \sin \alpha = \cancel{\ell I} \|\vec{B}\| \Rightarrow \sin \alpha = \frac{\|\vec{B}\|}{\|\vec{B}'\|} = \frac{0,2}{0,21} \approx 0,95$$

$$\Rightarrow \alpha \approx 72^\circ. \text{ D'où } \beta = 90^\circ - \alpha = 90^\circ - 72^\circ : \boxed{\beta \approx 18^\circ}$$



$$4. \ell' I \|\vec{B}\| = m' g \Rightarrow m' = \frac{\ell' I \|\vec{B}\|}{g} = \frac{0,2 \text{ m} \cdot 4,9 \cdot 0,2}{9,8} = 0,02 \text{ kg} : \boxed{m' = 20 \text{ g}}$$

#### Application-4 La balance de Cotton, ancêtre du teslamètre.



En 1900, Aimé Auguste Cotton invente une balance pour mesurer la valeur d'un champ magnétique. Cette balance est constituée d'un fléau (TOA') assujéti à tourner en (O) autour d'un axe fixe ( $\Delta$ ) : l'un de ses bras porte un plateau où l'on peut mettre des masses marquées, et l'autre porte une plaquette isolante (A'ACC') ; un fil conducteur (OA'ACC'O) dont les parties AA' et CC' sont des arcs de cercles de centre O, est enroulé sur le fléau comme le montre la figure ci-dessus. Le brin (AC), rectiligne et de longueur ( $\ell$ ), baigne dans un champ magnétique uniforme, disposé de façon à être horizontal, sortant, et normal à (AC); en l'absence de courant dans le fil (OA'ACC'O), aucune masse n'est nécessaire pour équilibrer le fléau, cependant dès qu'un courant  $I$  circule dans le fil dans le sens (O  $\rightarrow$  A'  $\rightarrow$  A  $\rightarrow$  C  $\rightarrow$  C'  $\rightarrow$  O), une masse  $m$  est nécessaire pour rétablir l'équilibre.

1. Expliquer, et représenter la force responsable de la rupture de l'équilibre du fléau.
2. Justifier que les forces de Laplace exercées sur les brins AA' et CC' n'ont aucun effet sur l'équilibre du fléau.



3. Écrire la condition d'équilibre du fléau, et montrer que  $\|\vec{B}\| = \left( \frac{g d'}{\ell I d} \right) \cdot m$

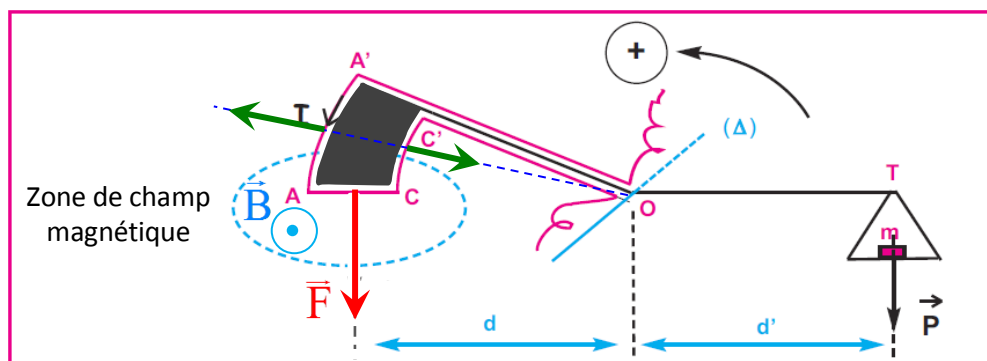
4. A.N : on donne  $d = d'$ ,  $\ell = 10 \text{ cm}$ ,  $I = 5 \text{ A}$ , et  $g = 9,8 \text{ N.kg}^{-1}$

a) Vérifier que  $\|\vec{B}\| \text{ (T)} = 19,6 \cdot m \text{ (kg)}$

b) Calculer la valeur de  $\|\vec{B}\|$  dans le cas où  $m = 10,2 \text{ g}$ .

5. Conclure.

1. La partie du fil plongée dans le champ magnétique subit des forces de Laplace, en particulier la force ( $\vec{F}$ ) exercée sur le brin (AC) fait basculer le bras (OA') vers le bas ; ce qui nécessite la mise d'une masse (m) dans le plateau porté par l'autre bras (OT) pour rétablir l'équilibre.



2. La direction de la force de Laplace exercée sur le brin AA' ou CC' étant  $\perp$  au plan contenant ( $\vec{B}$ ) et le brin ; cependant le brin est un arc de cercle, mais si on le décompose en des éléments infiniment petits de longueur ( $\delta\ell$ ), chacun serait assimilé à un segment  $\perp$  à un rayon du cercle de centre (O), d'où la force de Laplace est portée par un rayon du cercle en chaque point du brin. Son moment par rapport à ( $\Delta$ ) est nul, donc n'a aucun effet sur l'équilibre du fléau.

3.  $\mathfrak{M}_{\Delta}(\vec{F}) + \mathfrak{M}_{\Delta}(\vec{P}) = 0$  (Les moments du poids du fléau et de la réaction de l'axe étant nuls)

$$\|\vec{F}\| \cdot d - \|\vec{P}\| \cdot d' = 0 \Rightarrow \|\vec{F}\| \cdot d = \|\vec{P}\| \cdot d' \Rightarrow \ell I \|\vec{B}\| \cdot d = m g \cdot d' \Rightarrow \|\vec{B}\| = \frac{m g d'}{\ell I d} = \left( \frac{g d'}{\ell I d} \right) \cdot m$$

4.

a)  $\|\vec{B}\| = \left( \frac{9,8 \text{ } \cancel{d'}}{0,1 \text{ m} \cdot 5 \cancel{A}} \right) \cdot m = 19,6 \cdot m$

b)  $\|\vec{B}\| = 19,6 \cdot 10,2 \cdot 10^{-3} \text{ kg} = 0,2 \text{ T}$

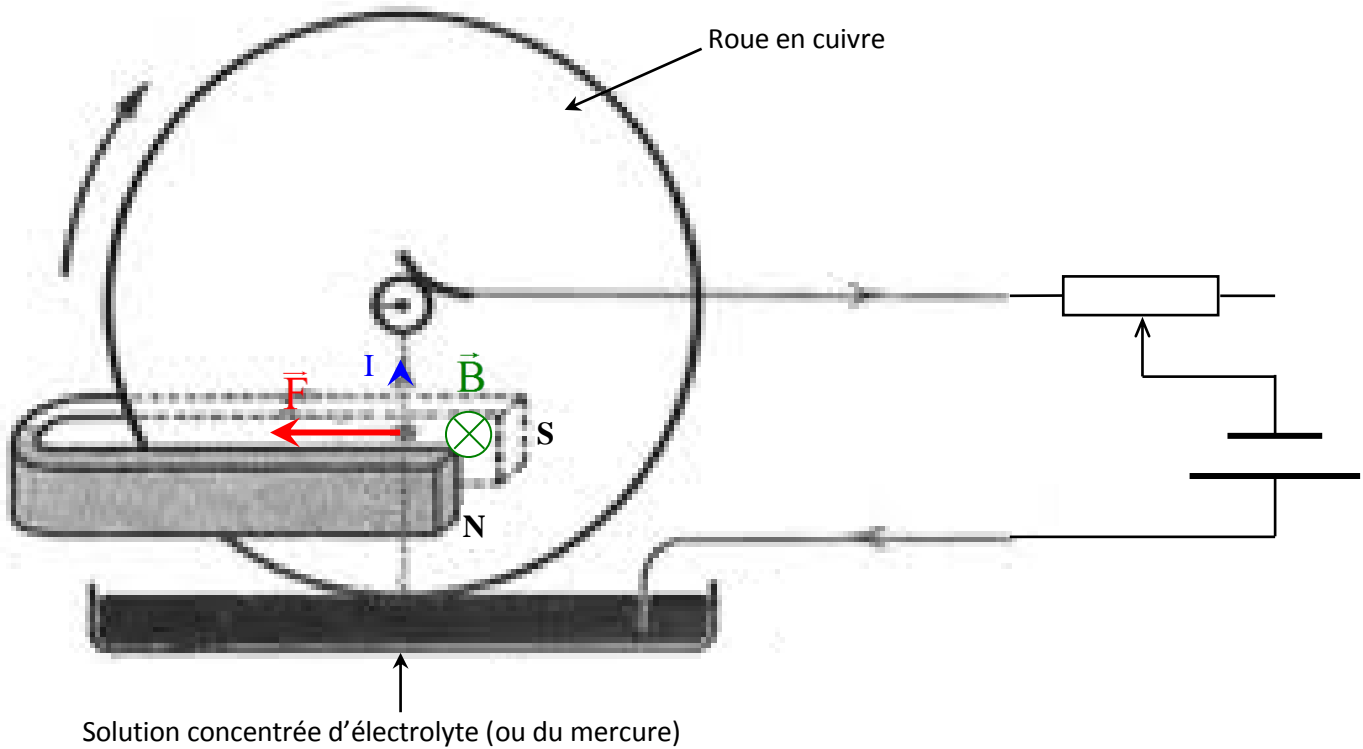
5. La balance de Cotton permet de déterminer l'intensité d'un champ magnétique uniforme à partir de la valeur de la masse marquée réalisant son équilibre.

### 3) Application industrielle de la force de Laplace : le moteur à courant continu

#### a) La roue de Barlow (Peter): ancêtre du moteur électrique (Fig-12)

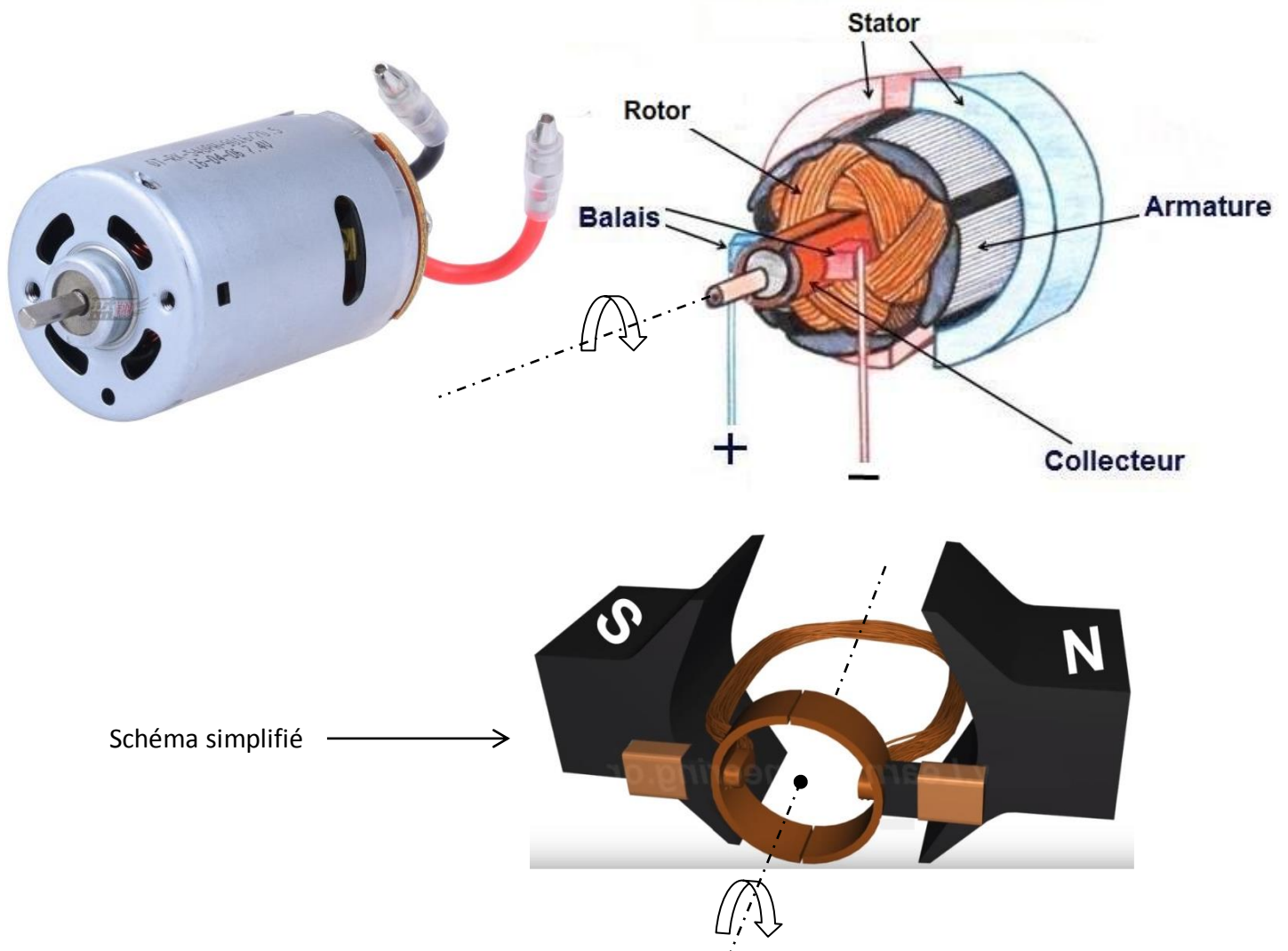
A chaque instant ; un rayon de la roue est parcouru par un courant  $I$ , et il baigne dans un champ magnétique uniforme qui lui est  $\perp$  : il subit une force de Laplace maximale, dont le moment par rapport à l'axe de la roue provoque sa rotation. Si on inverse le sens de  $I$  ou de  $\vec{B}$ , le sens de rotation est inversé.

Figure-12



## b) Principe du moteur à courant continu (Fig-13)

Figure-13

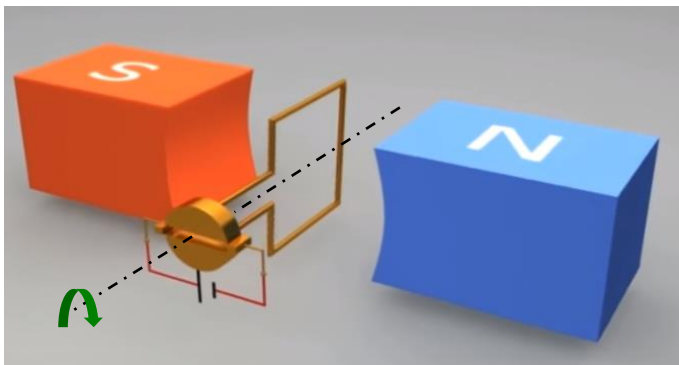
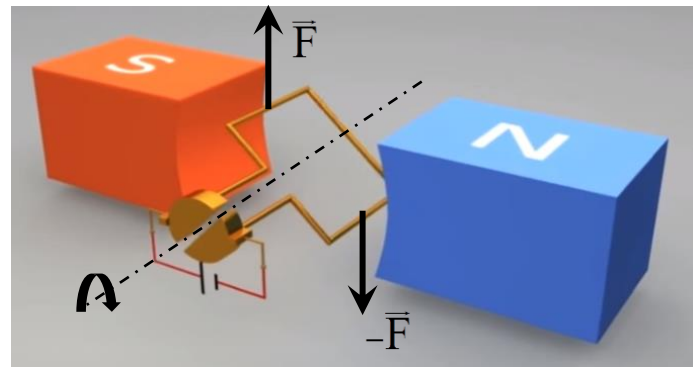
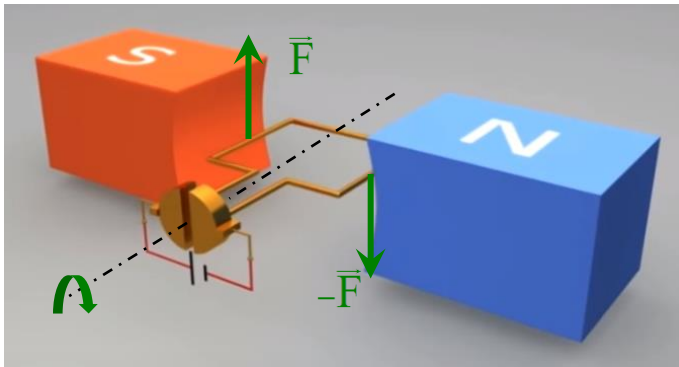


Il repose sur le principe de la roue de Barlow ;

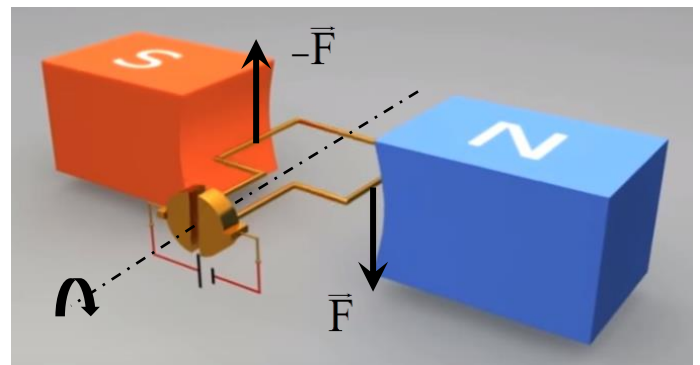
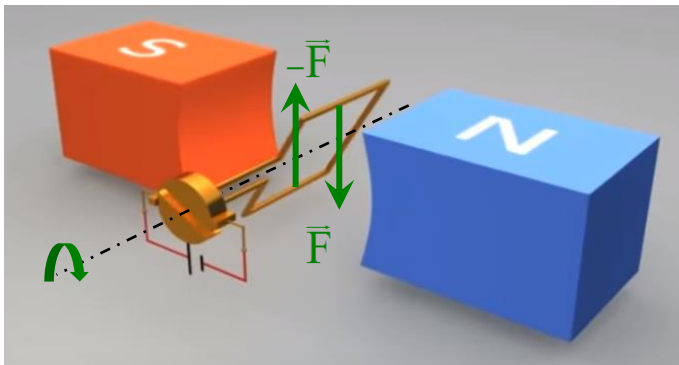
- \* Le champ magnétique uniforme est créé par un aimant fixe (stator), qui peut être aussi un électroaimant.
- \* La partie mobile (rotor) est constituée d'un grand nombre de boucles de fil conducteur montés sur une armature, et dont les extrémités sont reliées à deux demi-cylindres conducteurs électriquement séparés appelés lames du collecteur. Le rotor peut tourner librement autour d'un axe fixe.
- \* Le contact électrique avec les pôles du générateur est assuré par deux balais en contact permanent avec les lames du collecteur.

Considérons une seule spire du rotor : (Fig-14)

Figure-14



A cette position le courant ne passe pas dans le rotor : les forces de Laplace s'annulent, mais le rotor continue à tourner grâce à son inertie.



A chaque instant, le moment du couple de forces de Laplace ( $\vec{F}$ ,  $-\vec{F}$ ) par rapport à l'axe du rotor est de même signe (grâce au collecteur), cela provoque la rotation de la spire autour de son axe.

Rq

L'interaction électrique fait intervenir des charges électriques statiques, et l'interaction magnétique fait intervenir des charges électriques en mouvement (courants) : il s'agit de deux formes d'une même interaction ; électromagnétique.

## TP 2 : Vérification qualitative de l'expression de la force de Laplace

### Objectifs :

Vérifier l'augmentation de la valeur de la force de Laplace exercée sur un conducteur, avec l'augmentation de :

- l'intensité du courant qui le parcourt.
- l'intensité du vecteur champ magnétique dans lequel il baigne.
- la longueur de sa portion plongée dans le champ magnétique.
- $0 \rightarrow 90^\circ$ , de l'angle entre le vecteur champ magnétique et la portion du conducteur plongée dans le champ magnétique.

### Matériel :

- |   |                            |   |
|---|----------------------------|---|
| • 1 Dispositif pour l'étude de la force de Laplace. | • 1 Rhéostat.              | • 3 Aimants en U, dont deux identiques.                                 |
| • 1 Générateur de courant réglable.                 | • 1 Ampèremètre numérique. | • 1 Boite de Petri contenant une solution concentrée de $\text{CuSO}_4$ |
| • 1 Interrupteur.                                   | • 5 Fils de connexion.     |   |

### Manipulation :

#### 1. Effet de l'intensité du courant sur la valeur de la force de Laplace

##### a) Expérience

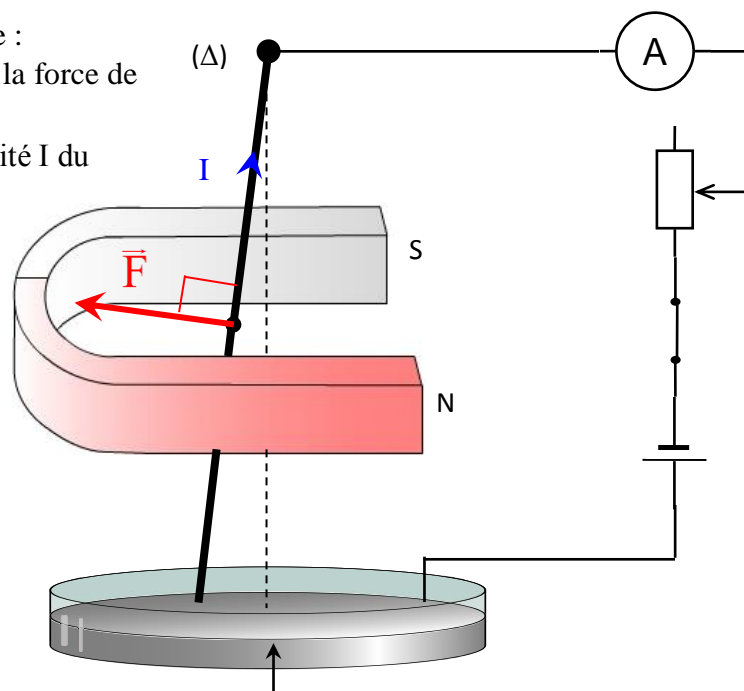
On considère le montage de la figure ci-contre :

- Indiquer le sens du courant, et représenter la force de Laplace  $\vec{F}$  exercée sur le fil.
- Réaliser le montage, et augmenter l'intensité  $I$  du courant.

##### b) Observation

L'inclinaison du fil augmente  $\Rightarrow$

$\|\vec{F}\|$  augmente avec l'augmentation de  $I$ .



Solution concentrée d'électrolyte (ou du mercure)

#### 2. Effet de l'intensité du vecteur champ magnétique sur la valeur de la force de Laplace

##### a) Expérience

Dans le montage précédent ; mettre à la place de l'aimant en U un autre aimant en U de même largeur, mais générant un champ magnétique plus intense, tout en gardant la même intensité du courant.

##### b) Observation

L'inclinaison du fil augmente  $\Rightarrow \|\vec{F}\|$  augmente avec l'augmentation de  $\|\vec{B}\|$ .

### 3. Effet de la longueur de la portion du conducteur plongée dans le champ magnétique sur la valeur de la force de Laplace

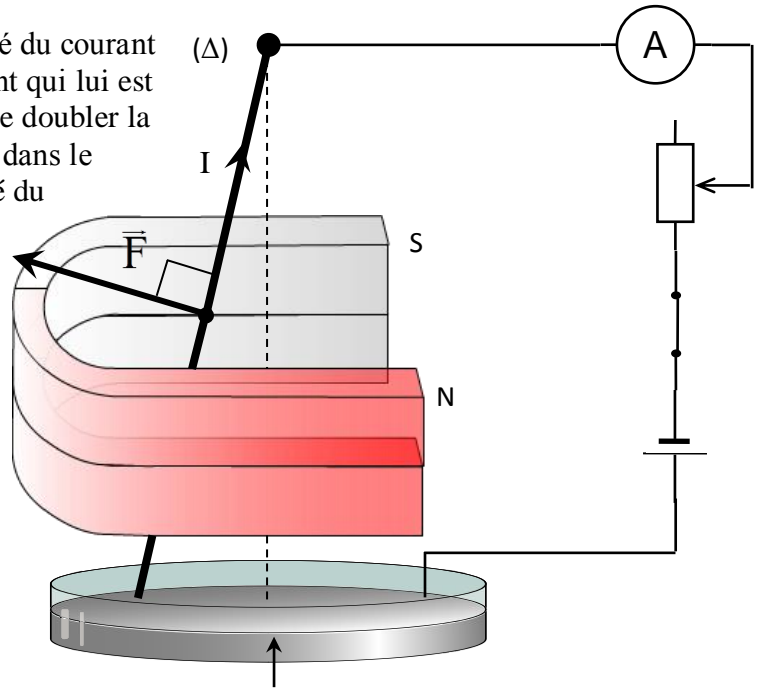
#### a) Expérience

Dans le montage précédent, tout en gardant l'intensité du courant constante ; superposer à l'aimant en U un autre aimant qui lui est identique comme le montre la figure ci-contre, afin de doubler la longueur  $\ell$  de la portion de fil conducteur qui baigne dans le champ magnétique, tout en gardant la même intensité du vecteur champ magnétique.

#### b) Observation

L'inclinaison du fil augmente  $\Rightarrow$

$\|\vec{F}\|$  augmente avec l'augmentation de  $\ell$ .



Solution concentrée d'électrolyte (ou du mercure)

### 4. Effet de l'angle entre le vecteur champ magnétique et la portion du conducteur plongée dans le champ magnétique sur la valeur de la force de Laplace

#### a) Expérience

On considère le montage de la figure ci-contre :

- Représenter le vecteur champ magnétique  $\vec{B}$  entre les branches de l'aimant.
- Indiquer le sens du courant, et représenter

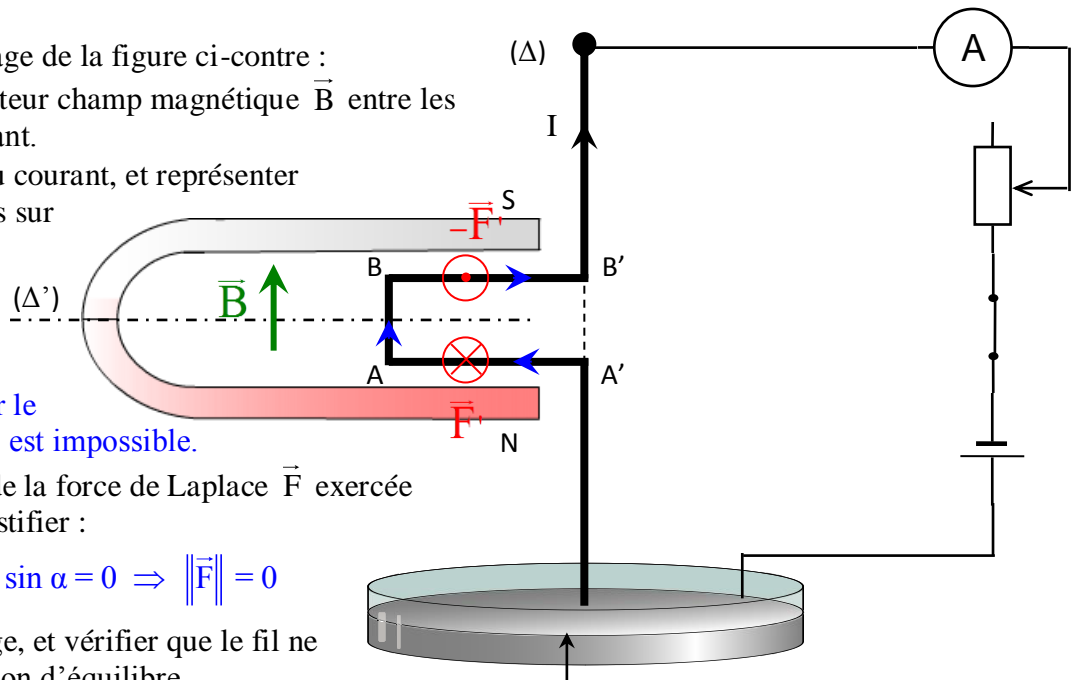
les forces de Laplace exercées sur les brins AA' et BB' ; dire pourquoi elles n'ont aucun effet sur le fil :

$\vec{F}'$  et  $-\vec{F}'$  constituent un couple qui tend à faire tourner le fil autour de l'axe  $(\Delta')$ , ce qui est impossible.

- Donner la valeur de la force de Laplace  $\vec{F}$  exercée sur le brin AB ; justifier :

$$\alpha = (\vec{B}, \vec{AB}) = 0 \Rightarrow \sin \alpha = 0 \Rightarrow \|\vec{F}\| = 0$$

- Réaliser le montage, et vérifier que le fil ne quitte pas sa position d'équilibre.
- Faire tourner lentement l'aimant en U autour de son axe de rotation  $(\Delta')$



Solution concentrée d'électrolyte (ou du mercure)

#### b) Observation

En tournant l'aimant autour de son axe ; le fil commence à s'incliner, et atteint le maximum après une rotation de  $90^\circ$  de l'aimant  $\Rightarrow \|\vec{F}\|$  augmente de 0 à sa valeur maximale avec l'augmentation de  $\alpha$  de  $0 \rightarrow 90^\circ$ , donc avec l'augmentation de  $\sin \alpha$  de  $0 \rightarrow 1$

## 5. Conclusion

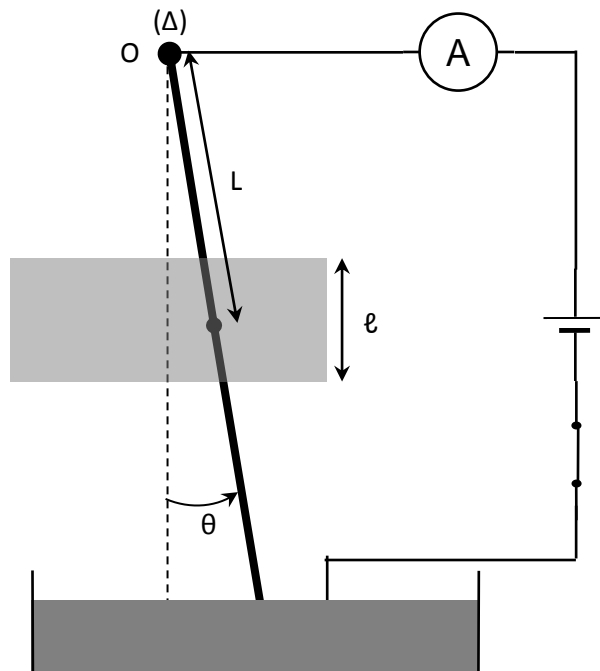
On sait que  $\|\vec{F}\| = I \cdot \ell \cdot \|\vec{B}\| \cdot \sin \alpha$  ; on vient de vérifier qualitativement l'augmentation de  $\|\vec{F}\|$  avec l'augmentation de  $I$ ,  $\ell$ ,  $\|\vec{B}\|$  et  $\sin \alpha$

### Application-5

Un fil homogène en cuivre de masse  $m = 10 \text{ g}$  et de longueur  $2L$  est assujéti à tourner autour d'un axe fixe horizontal  $(\Delta)$  passant par son extrémité  $O$ , comme le montre la figure ci-contre ; son autre extrémité est plongée dans une solution concentrée d'électrolyte, et sa partie centrale baigne dans un champ magnétique uniforme et horizontal de largeur  $\ell = 5 \text{ cm}$ .

Un générateur fait circuler dans le fil un courant d'intensité  $I = 3,8 \text{ A}$  : à l'équilibre, le fil fait un angle  $\theta = 11^\circ$  avec la verticale passant par  $O$ .  $\theta$  est suffisamment faible pour que la longueur de la portion du fil plongée dans le champ reste sensiblement la même qu'à la position verticale.

1. Représenter la force de Laplace exercée sur le fil.
2. Représenter le vecteur champ magnétique.
3. Représenter toutes les forces agissant sur le fil à l'équilibre, et écrire la condition d'équilibre.
4. Calculer la valeur du vecteur champ magnétique.  
On donne  $g = 10 \text{ N.kg}^{-1}$



- 1.
- 2.

$$3. \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}) + \mathcal{M}_\Delta(\vec{P}) + \underbrace{\mathcal{M}_\Delta(\vec{R})}_0 = 0 \Rightarrow$$

$$\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}) + \mathcal{M}_\Delta(\vec{P}) = 0$$

$$4. \|\vec{F}\| \cdot L - \|\vec{P}\| \cdot d = 0 \Rightarrow \|\vec{F}\| \cdot L = \|\vec{P}\| \cdot d$$

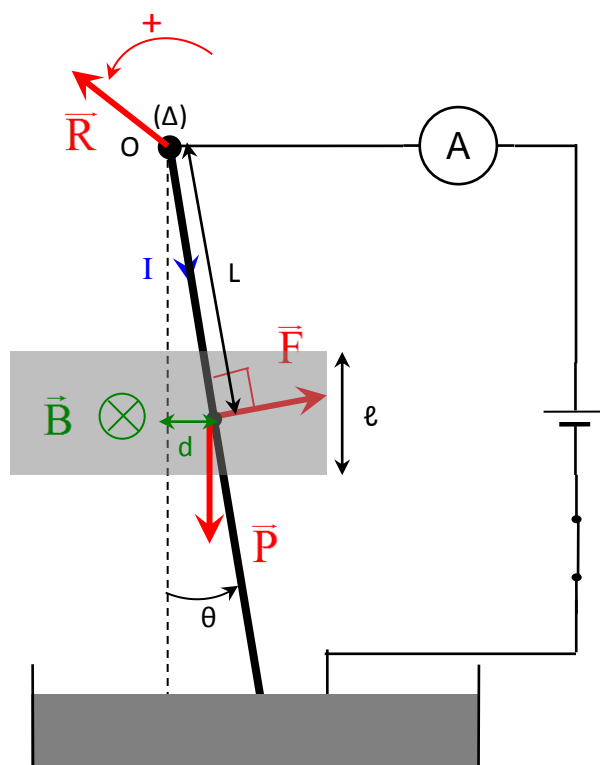
$$\Rightarrow \ell I \|\vec{B}\| \sin \frac{\pi}{2} \cdot L = m g \cdot d$$

$$\text{On a } \sin \theta = \frac{d}{L} \Rightarrow d = L \sin \theta, \text{ alors}$$

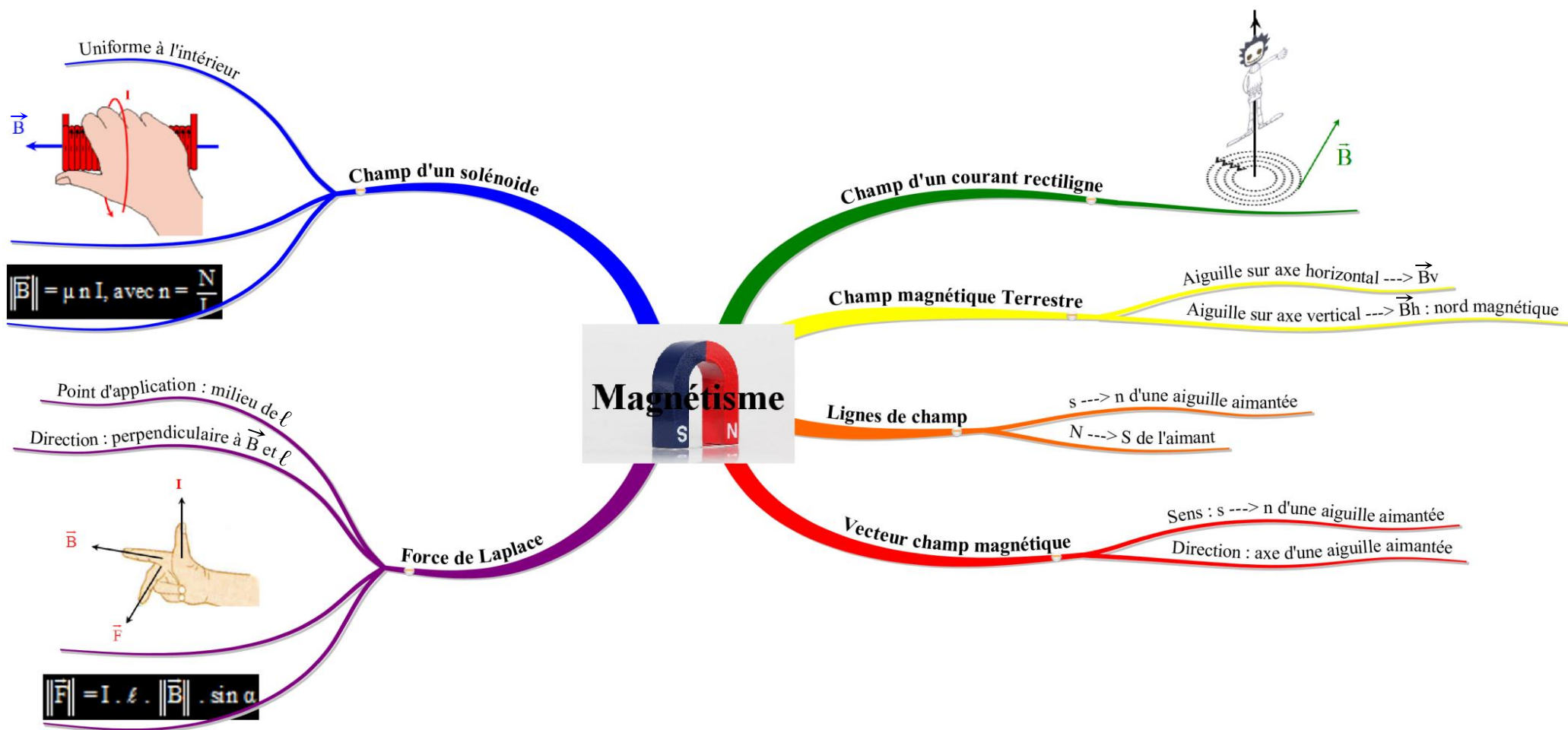
$$\ell I \|\vec{B}\| \cdot \mathcal{L} = m g \cdot \mathcal{L} \sin \theta$$

$$\Rightarrow \|\vec{B}\| = \frac{m g \sin \theta}{\ell I} = \frac{10 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot \sin 11^\circ}{5 \cdot 10^{-2} \cdot 3,8}$$

$$\boxed{\|\vec{B}\| = 0,1 \text{ T}}$$









## Chapitre-3 : Interaction gravitationnelle

### Objectifs

- Appliquer la loi de gravitation universelle.
- Faire une analogie formelle entre les interactions newtonienne et coulombienne.
- 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.

### Prérequis

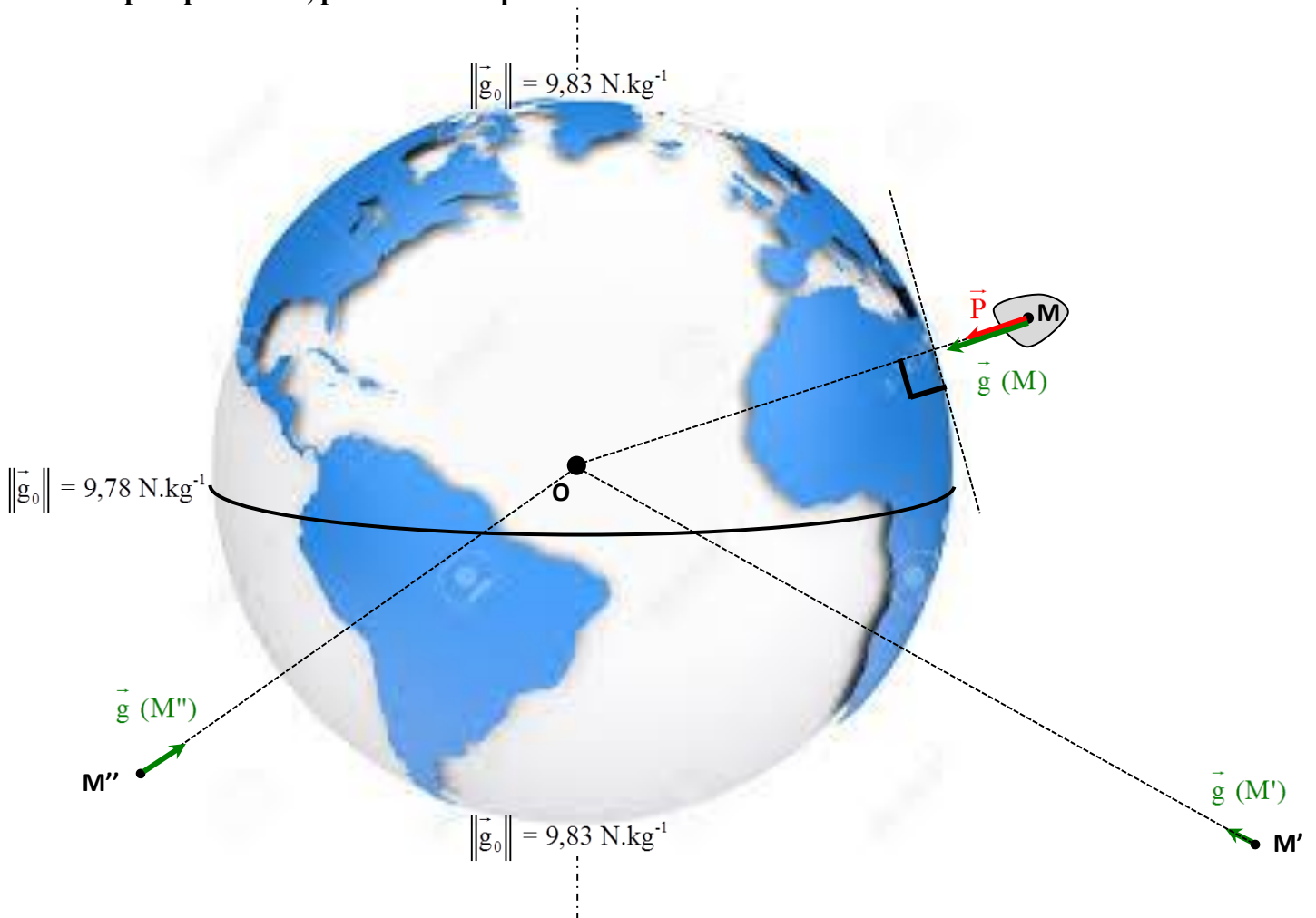
- 3<sup>ème</sup> loi de Newton.
- Loi de Coulomb.
- Champ de pesanteur, vecteur champ de pesanteur.
- Expression vectorielle du poids.
- Le système solaire.
- 1<sup>ère</sup> loi de Newton.

### Matériel

Rien

### Rappels

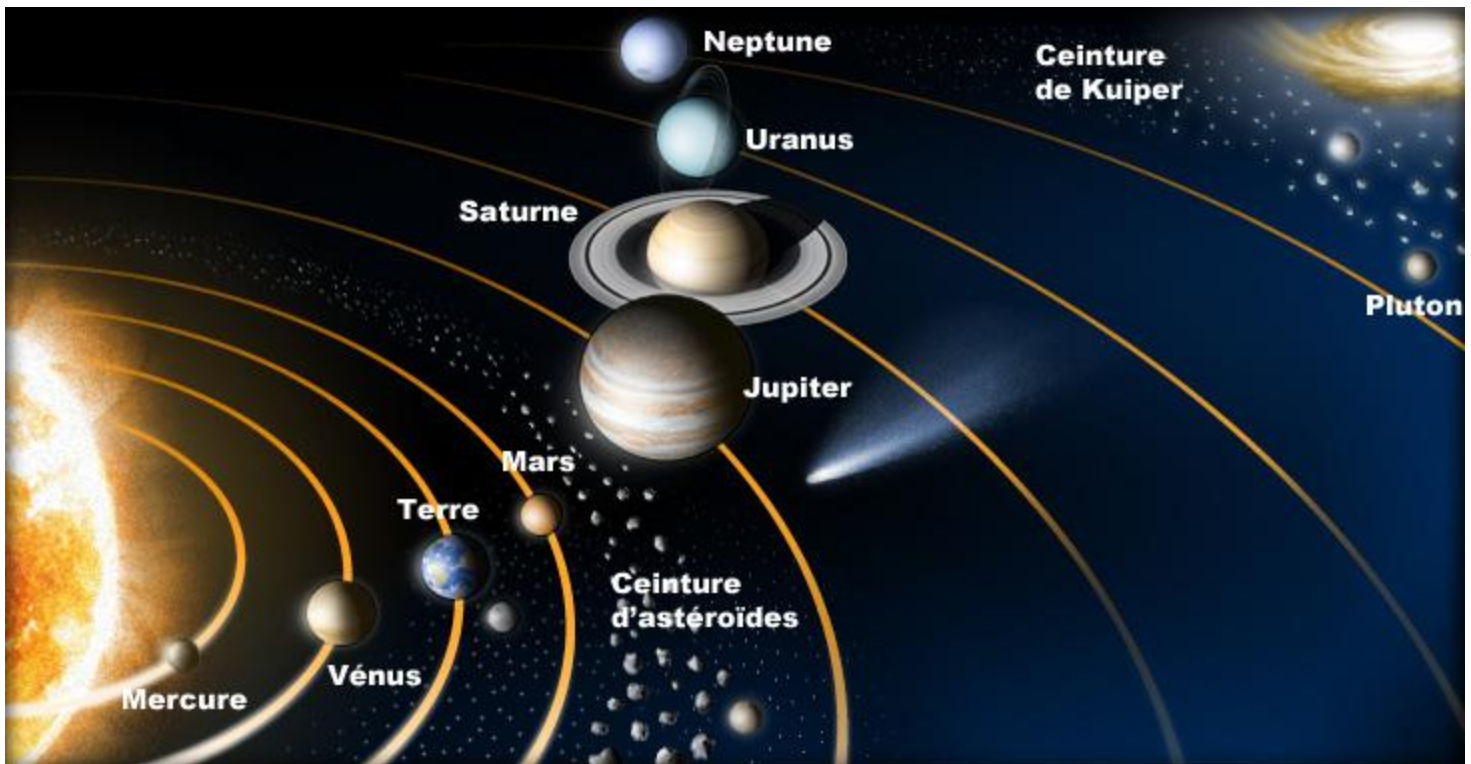
❖ Champ de pesanteur, poids d'un corps :



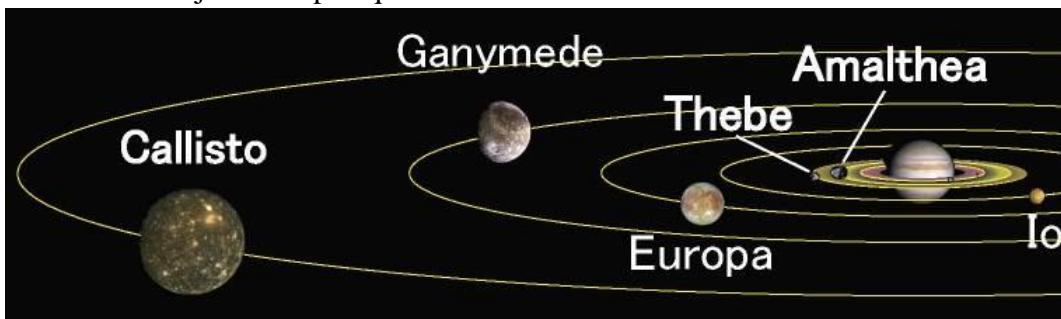
- Dans le voisinage de la Terre, règne le champ de pesanteur ; il se manifeste par une force attractive exercée par la Terre sur tout objet se trouvant dans ce champ, pouvant provoquer sa chute libre : poids  $\vec{P}$
- Pour un corps de masse (m) ;  $\vec{P} = m \cdot \vec{g} (M)$ , où  $\vec{g} (M)$  est le vecteur champ de pesanteur au point (M) où se trouve le centre de gravité du corps considéré :  $\vec{g}$  est approximativement radial, dirigé vers la Terre, et son intensité diminue avec l'altitude.
- Soit  $\|\vec{g}_0\|$  l'intensité du champ de pesanteur au niveau de la surface de la mer (altitude zéro) ; les mesures montrent qu'elle varie légèrement d'un endroit à l'autre : elle est minimale à l'équateur, et augmente légèrement en allant vers les pôles.

❖ **Le système solaire :**

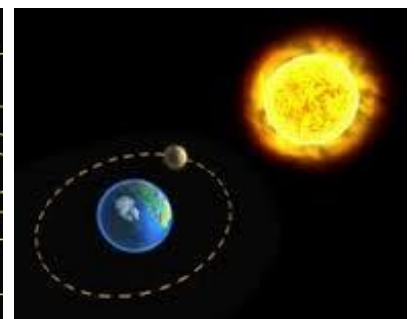
- Il est constitué d'une étoile (le soleil), autour de laquelle gravitent des planètes selon des trajectoires presque circulaires (orbites). Ainsi que des millions d'astéroïdes, dont la plupart gravite autour du soleil au sein de la ceinture d'astéroïdes (ceinture principale) et la ceinture de Kuiper à la limite du système solaire. Il y en a aussi des comètes et des météoroïdes.



- Certaines planètes possèdent un ou plusieurs satellites naturels (des lunes), gravitant autour d'elles selon des trajectoires presque circulaires.



Jupiter et ses 16 lunes



La Terre et sa Lune ; la Terre possède un satellite naturel unique (la Lune), et plusieurs satellites artificiels placés sur orbite par l'Homme.



En étudiant les mouvements des astres du système solaire (et, selon la légende, en recevant un coup de pomme sur la tête) ;  
Isaac Newton énonça la loi de gravitation universelle en 1687.  
En particulier ; puisque la Terre attire la Lune (ou la pomme), d'après la 3<sup>ème</sup> loi de Newton la Lune (ou la pomme) attire la Terre à son tour.

## I- Loi de gravitation universelle

### 1) Enoncé de la loi de gravitation

Entre deux corps ponctuels A et B, de masses respectives  $m_A$  et  $m_B$  ; s'établit une interaction, toujours attractive, appelée interaction gravitationnelle.

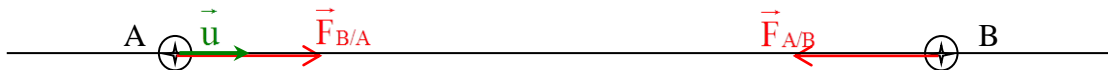
Les éléments de l'interaction sont :  $\begin{cases} \vec{F}_{A/B} : \text{Force exercée par A sur B} \\ \vec{F}_{B/A} : \text{Force exercée par B sur A} \end{cases}$ , elles sont portées par la droite (AB) et

leur valeur commune est :  $\|\vec{F}_{A/B}\| = \|\vec{F}_{B/A}\| = G \frac{m_A \cdot m_B}{AB^2}$ , où G est une constante appelée constante de Gravitation universelle ;  $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$  S.I.

### 2) Expression vectorielle de la loi de gravitation

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

D'après la 3<sup>ème</sup> loi de Newton  $\vec{F}_{B/A} = - \vec{F}_{A/B} = G \frac{m_A \cdot m_B}{AB^2} \cdot \vec{u}$

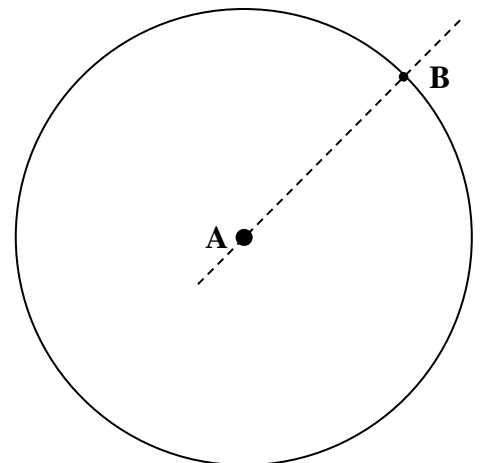


#### Application-1

Un atome d'hydrogène est constitué d'un noyau (A) contenant un proton, autour duquel se meut un électron (B) sur une trajectoire supposée circulaire de rayon  $r = 5,3 \cdot 10^{-11}$  m.

On donne ; pour le proton  $\begin{cases} m_A = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \\ q_A = e \end{cases}$ , et pour l'électron  $\begin{cases} m_B = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \\ q_B = -e \end{cases}$   
 $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$  S.I.,  $K = 9 \cdot 10^9$  S.I.,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C

- Soient  $\vec{F}_{A/B}$  et  $\vec{F}_{B/A}$  les éléments de l'interaction gravitationnelle entre le proton et l'électron :
  - Donne leurs expressions vectorielles, et les représenter.
  - Calculer leur valeur.
- Soient  $\vec{F}'_{A/B}$  et  $\vec{F}'_{B/A}$  les éléments de l'interaction électrostatique entre le proton et l'électron :
  - Calculer leur valeur.
  - Comparer à la valeur des forces de l'interaction gravitationnelle ; laquelle de ces interactions assure, en fait, la cohésion de l'atome.
- Faire une analogie formelle entre les interactions gravitationnelle et électrostatique.



1.

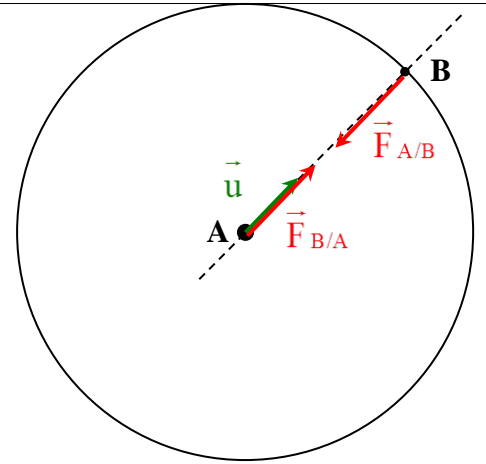
a) Soit  $\vec{u} = \frac{\vec{AB}}{AB}$

$$\vec{F}_{A/B} = - \|\vec{F}_{A/B}\| \cdot \vec{u} = -G \frac{m_A \cdot m_B}{r^2} \cdot \vec{u}$$

$$\vec{F}_{B/A} = \|\vec{F}_{B/A}\| \cdot \vec{u} = G \frac{m_A \cdot m_B}{r^2} \cdot \vec{u}$$

b) 
$$\|\vec{F}_{A/B}\| = \|\vec{F}_{B/A}\| = G \frac{m_A \cdot m_B}{r^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}{(5,3 \cdot 10^{-11})^2}$$

$$= 3,6 \cdot 10^{-47} \text{ N}$$



2.

a) 
$$\|\vec{F}'_{A/B}\| = \|\vec{F}'_{B/A}\| = K \frac{|q_A| \cdot |q_B|}{r^2} = K \frac{e^2}{r^2} = K \left(\frac{e}{r}\right)^2 = 9 \cdot 10^9 \left(\frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{5,3 \cdot 10^{-11}}\right)^2 = 8,2 \cdot 10^{-8} \text{ N}$$

b) 
$$\frac{\|\vec{F}_{A/B}\|}{\|\vec{F}'_{A/B}\|} = \frac{3,6 \cdot 10^{-47} \text{ N}}{8,2 \cdot 10^{-8} \text{ N}} = 4,4 \cdot 10^{-40} \approx 0 : \text{l'interaction gravitationnelle est négligeable devant}$$

l'interaction électrostatique  $\Rightarrow$  C'est l'attraction électrostatique qui assure, en fait, la cohésion de l'atome.

 3. La force de gravitation de valeur  $\|\vec{F}_{A/B}\| = G \frac{m_A \cdot m_B}{r^2}$ , et la force électrostatique de valeur

$$\|\vec{F}'_{A/B}\| = K \frac{|q_A| \cdot |q_B|}{r^2} \text{ présentent les similitudes suivantes :}$$

- \* L'intensité est inversement proportionnelle au carré de la distance séparant les deux corps ou les deux charges.
- \* La direction est dans les deux cas la droite passant par les deux corps ponctuels ou les deux charges ponctuelles.

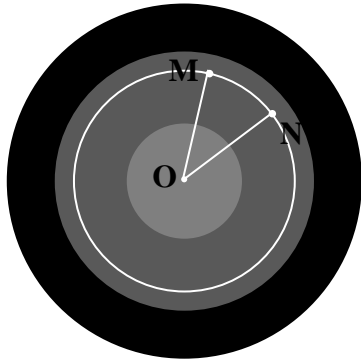
Elles présentent les différences suivantes :

- \* La source de l'interaction est la masse pour l'une, et la charge pour l'autre.
- \* La masse étant toujours positive ; l'interaction gravitationnelle est toujours attractive, alors que l'interaction électrostatique peut être attractive ou répulsive selon les signes des charges.

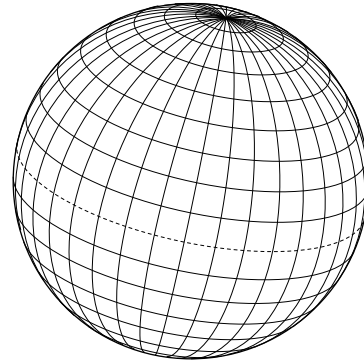
### 3) Cas d'un corps non ponctuel, mais à répartition de masse à symétrie sphérique

C'est un corps sphérique dont la densité est la même pour tous les points situés à une même distance de son centre (O) (Fig-1)

Figure-1



OM = ON : la densité est la même en M et en N



Une sphère homogène, en est l'exemple le plus simple



La Terre, ainsi que les autres planètes, le Soleil, et la plupart des satellites naturels sont des corps presque à répartition de masse à symétrie sphérique.

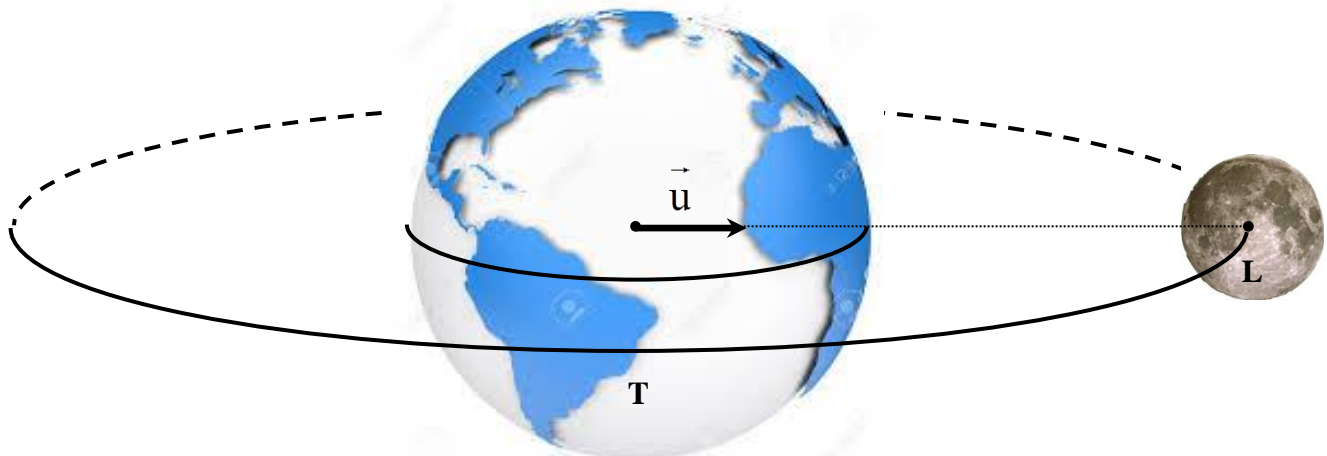
Un tel corps interagit gravitationnellement comme un corps ponctuel (O) possédant toute sa masse (M).

#### Application-2

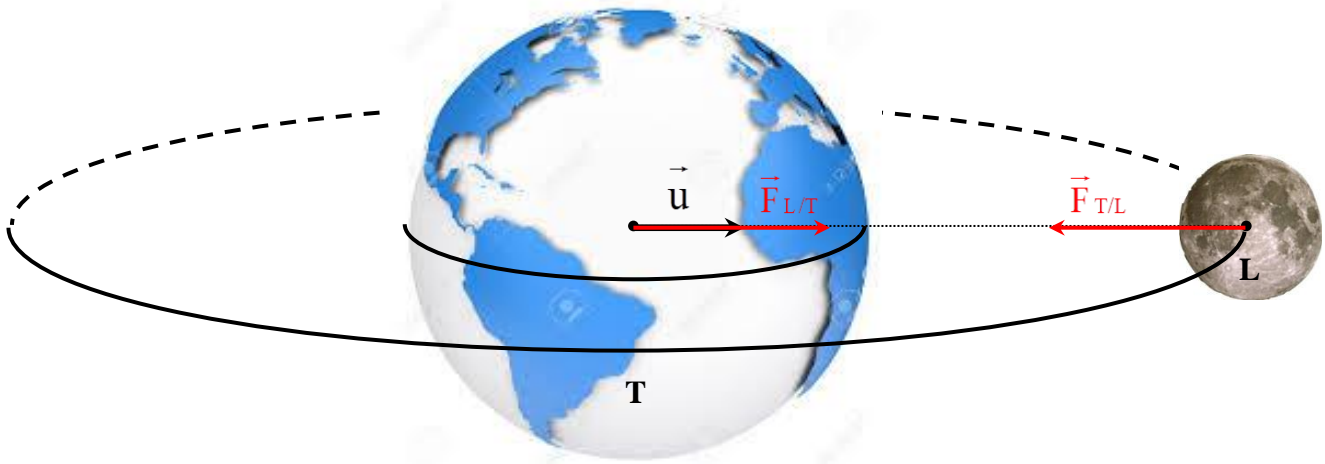
Représenter les éléments de l'interaction gravitationnelle entre la Terre et la Lune, écrire leurs expressions vectorielles, et calculer leur valeur.

On donne :

$$\begin{cases} M_T = 6.10^{24} \text{ kg} : \text{masse de la Terre} \\ M_L = \frac{M_T}{81} : \text{masse de la Lune} \\ r = 380000 \text{ Km} : \text{distance du centre de la Terre au centre de la Lune} \\ G = 6,67.10^{-11} \text{ S.I} \end{cases}$$







$$* \vec{F}_{TL} = -G \frac{M_T \cdot M_L}{r^2} \cdot \vec{u} = -\vec{F}_{LT}$$

$$* \|\vec{F}_{TL}\| = \|\vec{F}_{LT}\| = G \frac{M_T \cdot M_L}{r^2} = G \frac{M_T \cdot \frac{M_T}{81}}{r^2} = G \frac{M_T^2}{81r^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{(6 \cdot 10^{24})^2}{81(3,8 \cdot 10^5 \cdot 10^3 \text{ m})^2} \approx 2 \cdot 10^{20} \text{ N}$$

## II- Le champ de gravitation (Fig-2)

### 1) Mise en évidence

Considérons un météoroïde de masse (m) ; ses dimensions négligeables devant l'espace dans lequel il évolue permettent de le considérer ponctuel. Là où son mouvement change brusquement, il y a un corps de masse gigantesque (M) à proximité, tel qu'une planète (la Terre par exemple) : on dit qu'il vient de pénétrer dans le champ de gravitation de cette planète.

#### Définition

Un champ de gravitation règne dans une région de l'espace si, dans cette région, tout corps subit une force de gravitation.

### 2) Vecteur champ de gravitation

Soit P une position quelconque de la région de l'espace où règne un champ de gravitation créé par un corps de masse M à répartition de masse à symétrie sphérique de centre O et de rayon R; soit h l'altitude de la position P: tout corps (ponctuel) de masse m se trouvant en P subit une force de gravitation

$$\vec{F} = -G \frac{M \cdot m}{OP^2} \cdot \vec{u}, \text{ avec } \vec{u} = \frac{\vec{OP}}{OP}$$

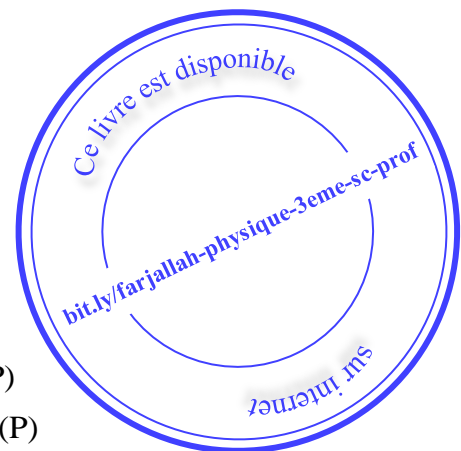
$$= m \cdot \left( -G \frac{M}{(R+h)^2} \cdot \vec{u} \right)$$

$$\boxed{\vec{F} = m \cdot \vec{G}(P)}; \text{ avec } \boxed{\vec{G}(P) = -G \frac{M}{(R+h)^2} \cdot \vec{u}}$$

Un autre corps de masse m' placée en P subit une force  $\vec{F}' = m' \cdot \vec{G}(P)$

Un autre corps de masse m'' placée en P subit une force  $\vec{F}'' = m'' \cdot \vec{G}(P)$

.  
.
   
etc

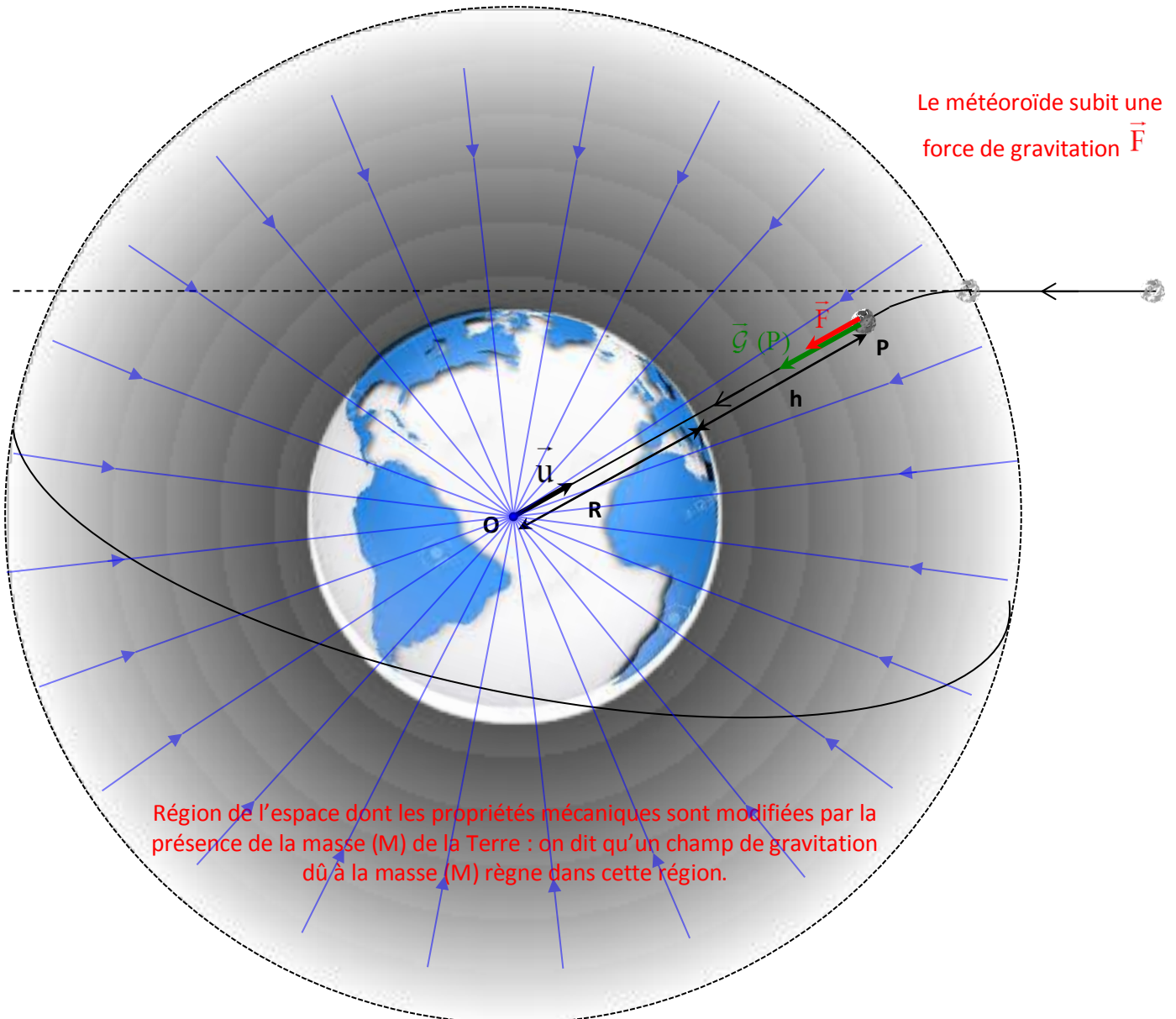


$\Rightarrow$  La masse change et la force de gravitation subie change, mais le vecteur  $\vec{G}$  (P) est toujours le même : il ne dépend que de la masse M et la position P dans le champ de gravitation ; on l'appelle vecteur champ de gravitation en P, il existe indépendamment des masses m, m', m''...etc qui ne font que le mettre en évidence.

$$\text{Rq } \frac{\vec{F}}{m} = \frac{\vec{F}'}{m'} = \frac{\vec{F}''}{m''} = \dots = \vec{G} \Rightarrow \|\vec{G}\| = \frac{\|\vec{F}\|}{m} ; \text{ d'où l'unité de } \|\vec{G}\| \text{ est le } \text{N.kg}^{-1} \text{ dans le S.I}$$

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

Figure-2





Un météoroïde se rapprochant de la Terre



Le météoroïde s'enflamme et se consume au contact de l'atmosphère (météore)



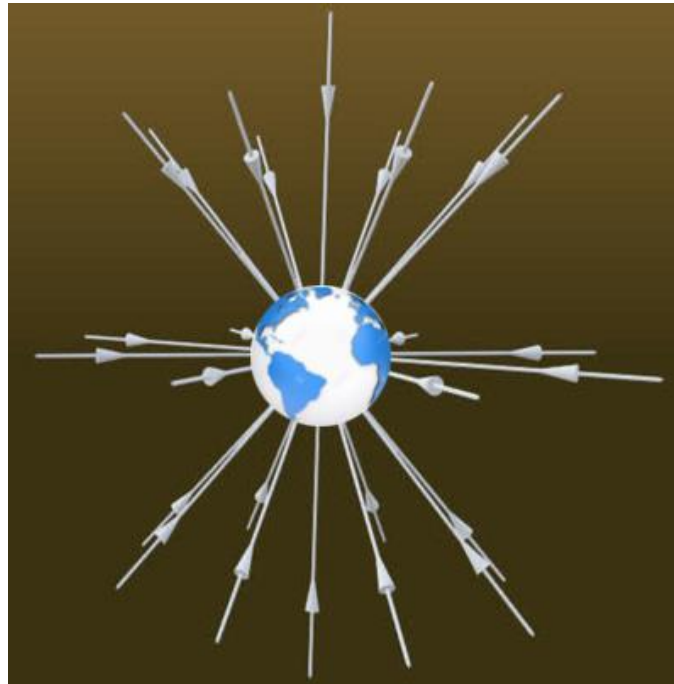
Parfois, des débris du météore atteignent le sol (météorite).  
Tel que ceci, tombant sur [Tcheliabinsk](#) (Russie), le 15/02/2013, provoquant des dégâts de 1200 blessés et  $33.10^6$  \$.

### 3) Lignes de champ de gravitation

Ce sont les lignes dont chacune est tangente en chacun de ses points au vecteur champ de gravitation  $\vec{G}$  et orientée dans son sens : droites radiales et centripètes.

Rq : Les lignes de champ de gravitation sont en réalité dirigées dans toutes les directions de l'espace (Fig-3)

Figure-3



### 4) Cas d'un corps ponctuel (Fig-4)

Un corps ponctuel de masse  $M$  placé en un point  $O$ , crée en tout point  $P$  de l'espace un champ de gravitation

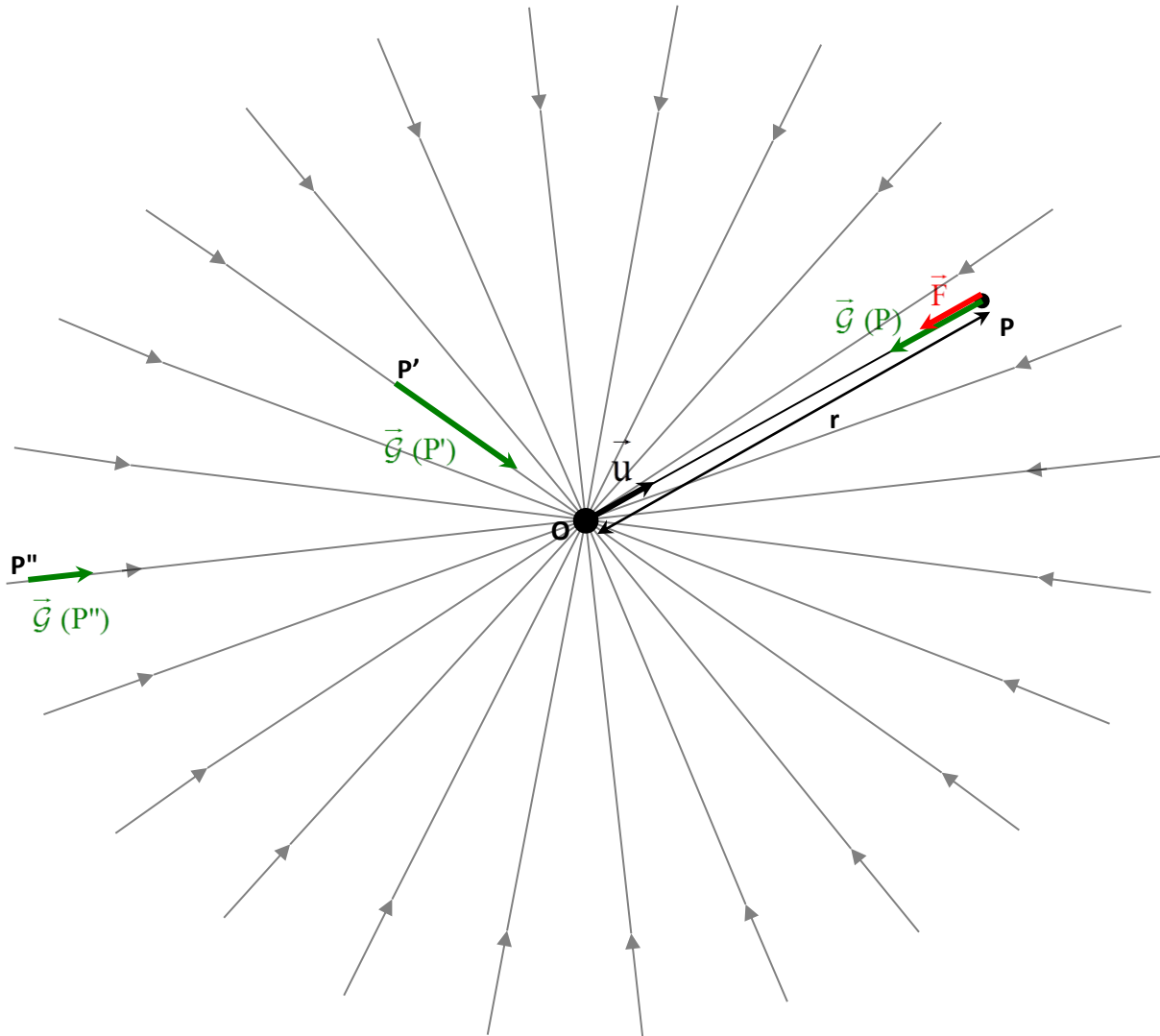
$$\text{centripète } \vec{G}(P) = -G \frac{M}{r^2} \cdot \vec{u}, \text{ avec } \vec{u} = \frac{\overrightarrow{OP}}{OP}.$$

Si un corps ponctuel de masse  $m$  est placé en  $P$ , il subit une force de gravitation  $\vec{F} = m \cdot \vec{G}(P)$

Rq Que le corps placé en  $P$  soit ponctuel ou à répartition de masse à symétrie sphérique de centre  $P$ , il subit la même force de gravitation  $\vec{F} = m \cdot \vec{G}(P)$



Figure-4



### Application-3

On assimile le globe terrestre à un corps à répartition de masse à symétrie sphérique, de centre (O), de rayon  $R_T = 6390 \text{ Km}$ , et de masse  $M_T = 6.10^{24} \text{ kg}$  ; tout point à la surface de la terre est considéré d'altitude  $h = 0$ , tout autre point de l'espace possède une altitude  $h > 0$ .

On donne  $G = 6,67.10^{-11} \text{ S.I.}$

1. Donner l'expression du vecteur champ de gravitation  $\vec{G}(P)$ , créé par la Terre en un point (P) quelconque d'altitude (h).
  - a) Calculer sa valeur  $\|\vec{G}_0\|$  à la surface de la Terre.
  - b) Ecrire sa valeur  $\|\vec{G}_h\|$  à une altitude (h), en fonction de  $\|\vec{G}_0\|$ .
  - c) Etablir l'expression de la variation relative de l'intensité du champ gravitationnel terrestre, entre le sol et une altitude (h).
  - d) AN :  $\begin{cases} h = 32 \text{ Km} ; \text{ commenter} \\ h = 9.R_T ; \text{ commenter} \end{cases}$

2. Une pomme, assimilée à un point matériel (A) de masse  $m_p = 100 \text{ g}$ , se trouve à son pommier à une hauteur négligeable au-dessus du sol (Figure ci-dessous) :
- Calculer la valeur des forces d'interaction gravitationnelle  $\vec{F}_{TP}$  et  $\vec{F}_{PT}$  s'exerçant entre la Terre et la Pomme, et les représenter à l'échelle  $0,98 \text{ N} \rightarrow 1 \text{ cm}$ .
  - Donner la valeur du vecteur champ de gravitation  $\vec{G}(A)$  créé par la Terre au point (A) ; le représenter à l'échelle  $9,8 \text{ N.kg}^{-1} \rightarrow 2 \text{ cm}$
  - Donner l'expression du vecteur champ de gravitation  $\vec{G}_p(O)$  créé par la pomme au centre (O) de la Terre ; calculer sa valeur, et le représenter à la même échelle  $9,8 \text{ N.kg}^{-1} \rightarrow 2 \text{ cm}$
  - On sait que si la pomme se détache du pommier, c'est elle qui se déplace en chute libre vers la Terre, et non l'inverse malgré que les forces s'exerçant entre la Terre et la pomme sont de même intensité : quelle raison peut expliquer cela ?
3. Un satellite géostationnaire (immobile par rapport à la surface de la Terre), est assimilée à un point matériel (B) de masse  $m_s = 1500 \text{ kg}$  se trouvant à une altitude  $h_s = 36000 \text{ Km}$  ( $\sim 5,6.R_T$ ) au-dessus du sol (Figure ci-dessous) :
- Représenter la ligne de champ de gravitation passant par B.
  - Donner les caractéristiques du vecteur champ de gravitation  $\vec{G}(B)$  créé par la Terre au point B.
  - En déduire la valeur de la force de gravitation  $\vec{F}_{TS}$  exercée par la Terre sur le satellite.
  - Calculer la variation relative de l'intensité du champ gravitationnel terrestre entre le sol et la position B
4. La lune est assimilée à un corps à répartition de masse à symétrie sphérique de masse  $M_L = 7,4.10^{22} \text{ kg}$  ( $\sim \frac{M_T}{81}$ ), et de centre (C) se trouvant à une altitude  $h_L = 373610 \text{ Km}$  ( $\sim 58,5.R_T$ ) (Figure ci-dessous) :
- Représenter la ligne de champ de gravitation passant par C.
  - Donner les caractéristiques du vecteur champ de gravitation  $\vec{G}(C)$  créé par la Terre au point C.
  - En déduire la valeur de la force de gravitation  $\vec{F}_{TL}$  exercée par la Terre sur la Lune.
  - Calculer la variation relative de l'intensité du champ gravitationnel terrestre entre le sol et la position C



$$1. \vec{g}(P) = -G \frac{M_T}{(R_T + h)^2} \cdot \vec{u}, \text{ avec } \vec{u} = \frac{\overrightarrow{OP}}{OP}$$

$$a) \|\vec{g}(P)\| = G \frac{M_T}{(R_T + h)^2} \Rightarrow \|\vec{g}_0\| = G \frac{M_T}{R_T^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{6 \cdot 10^{24}}{(6390 \cdot 10^3 \text{ m})^2}$$

$$\boxed{\|\vec{g}_0\| = 9,8 \text{ N.kg}^{-1}}$$

$$b) \|\vec{g}_h\| = \|\vec{g}(P)\| = G \frac{M_T}{(R_T + h)^2} \cdot \frac{R_T^2}{R_T^2} = G \frac{M_T}{R_T^2} \cdot \frac{R_T^2}{(R_T + h)^2}$$

$$\Rightarrow \boxed{\|\vec{g}_h\| = \|\vec{g}_0\| \cdot \left(\frac{R_T}{R_T + h}\right)^2}$$

$$c) \frac{\Delta \|\vec{g}\|}{\|\vec{g}_0\|} = \frac{\|\vec{g}_0\| - \|\vec{g}_h\|}{\|\vec{g}_0\|} = \frac{\|\vec{g}_0\| - \|\vec{g}_0\| \cdot \left(\frac{R_T}{R_T + h}\right)^2}{\|\vec{g}_0\|} = \cancel{\|\vec{g}_0\|} \cdot \frac{1 - \left(\frac{R_T}{R_T + h}\right)^2}{\cancel{\|\vec{g}_0\|}} = \boxed{1 - \left(\frac{R_T}{R_T + h}\right)^2}$$

d)

$$* h = 32 \text{ Km} : \frac{\Delta \|\vec{g}\|}{\|\vec{g}_0\|} = 1 - \left(\frac{6390 \text{ Km}}{6390 \text{ Km} + 32 \text{ Km}}\right)^2 \approx 0,01 = 1 \% : \text{Jusqu'à } 32 \text{ Km d'altitude, le champ de gravitation terrestre ne perd que } 1 \% \text{ de sa valeur au sol.}$$

$$* h = 9 \cdot R_T : \frac{\Delta \|\vec{g}\|}{\|\vec{g}_0\|} = 1 - \left(\frac{R_T}{R_T + 9R_T}\right)^2 = 1 - \left(\frac{\cancel{R_T}}{10 \cancel{R_T}}\right)^2 = 1 - \left(\frac{1}{10}\right)^2 = 0,99 = 99 \% : \text{Il faut monter à une altitude } 9 \text{ fois le rayon de la Terre pour que le champ de gravitation terrestre perde } 99 \% \text{ de sa valeur au sol.}$$

2.

$$a) \|\vec{F}_{TP}\| = \|\vec{F}_{PT}\| = G \frac{M_T \cdot m_P}{R_T^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{6 \cdot 10^{24} \cdot 0,1 \text{ kg}}{(6390 \cdot 10^3 \text{ m})^2} = 0,98 \text{ N} \rightarrow 1 \text{ cm}$$

$$b) \|\vec{g}(A)\| = \|\vec{g}_0\| = 9,8 \text{ N.kg}^{-1} \rightarrow 2 \text{ cm}$$

$$c) \vec{g}_P(O) = -G \frac{m_P}{R_T^2} \cdot \frac{\overrightarrow{AO}}{AO} \Rightarrow \|\vec{g}_P(O)\| = G \frac{m_P}{R_T^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{0,1 \text{ kg}}{(6390 \cdot 10^3 \text{ m})^2} = 1,63 \cdot 10^{-25} \text{ N.kg}^{-1} \approx 0 !$$

d) Le champ de gravitation créé par la pomme au niveau de la Terre est négligeable devant celui créé par la Terre au niveau de la pomme :  $\frac{\|\vec{g}(A)\|}{\|\vec{g}_P(O)\|} = \frac{9,8}{1,63 \cdot 10^{-25}} = 6 \cdot 10^{25} ! ;$  c'est la raison pour laquelle la pomme

se déplace vers la Terre, et non l'inverse. On constate aussi que  $6 \cdot 10^{25} = \frac{M_T}{m_P}$  : la pomme de masse négligeable se déplace vers la Terre, et non l'inverse.

3.

a)

b)  $\vec{G}(B) :$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{Direction : Droite (O,B)} \\ \text{Sens : B} \rightarrow \text{O} \\ \text{Intensité : } \|\vec{G}(B)\| = \|\vec{G}_{hs}\| = \|\vec{G}_0\| \cdot \left(\frac{R_T}{R_T + h_s}\right)^2 = 9,8 \cdot \left(\frac{6390}{6390 + 36000}\right)^2 = 0,22 \text{ N.kg}^{-1} \end{array} \right.$

c)  $\vec{F}_{T/S} = m_s \cdot \vec{G}(B) \Rightarrow \|\vec{F}_{T/S}\| = m_s \cdot \|\vec{G}(B)\| = 1500 \cdot 0,22 = 330 \text{ N}$

d)  $\frac{\Delta\|\vec{G}\|}{\|\vec{G}_0\|} = \frac{\|\vec{G}_0\| - \|\vec{G}_{hs}\|}{\|\vec{G}_0\|} = \frac{9,8 - 0,22}{9,8} \approx 0,98 = 98 \%$

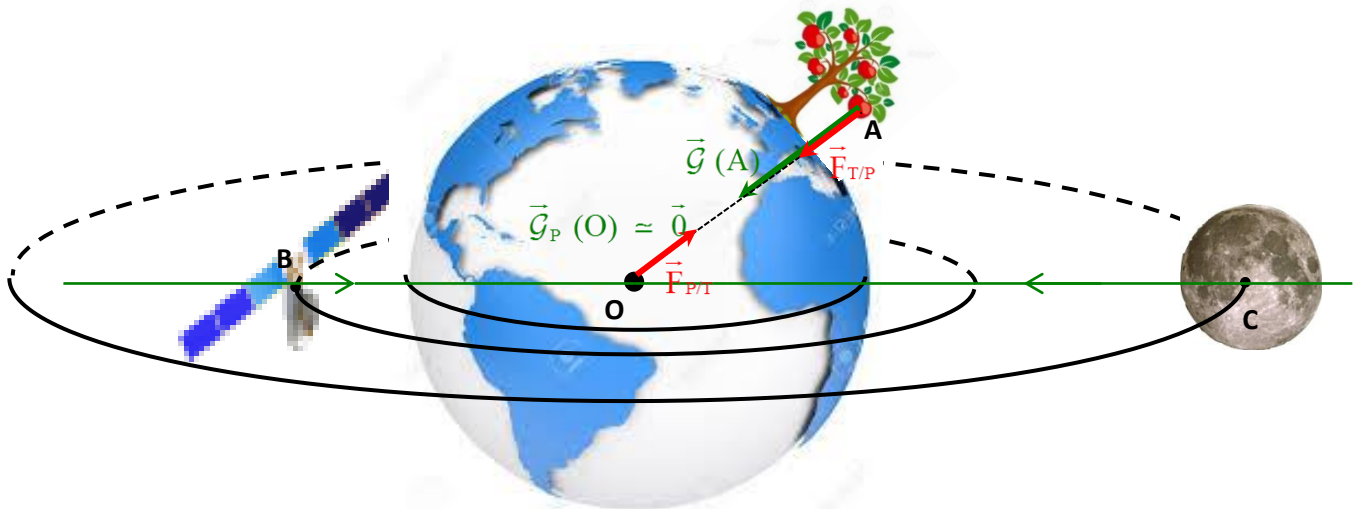
4.

a)

b)  $\vec{G}(C) :$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{Direction : Droite (O,C)} \\ \text{Sens : C} \rightarrow \text{O} \\ \text{Intensité : } \|\vec{G}(C)\| = \|\vec{G}_{hl}\| = \|\vec{G}_0\| \cdot \left(\frac{R_T}{R_T + h_L}\right)^2 = 9,8 \cdot \left(\frac{6390}{6390 + 373610}\right)^2 = 0,0027 \text{ N.kg}^{-1} \end{array} \right.$

c)  $\vec{F}_{T/L} = m_L \cdot \vec{G}(C) \Rightarrow \|\vec{F}_{T/L}\| = m_L \cdot \|\vec{G}(C)\| = 7,4 \cdot 10^{22} \cdot 0,0027 \approx 2 \cdot 10^{20} \text{ N}$

d)  $\frac{\Delta\|\vec{G}\|}{\|\vec{G}_0\|} = \frac{\|\vec{G}_0\| - \|\vec{G}_{hl}\|}{\|\vec{G}_0\|} = \frac{9,8 - 0,0027}{9,8} \approx 0,999 = 99,9 \%$



### III- Le champ de pesanteur (Fig-5)

#### 1) Relation entre le champ de pesanteur et le champ de gravitation

Soit un corps ponctuel de masse  $m$  (ou à répartition de masse à symétrie sphérique de centre  $P$ ), situé en un point  $P$  au voisinage de la Terre, à une altitude  $h$  par rapport à la surface de la mer :

- \* Le vecteur champ de pesanteur en  $P$  est donné par  $\vec{g}(P) = \frac{\vec{P}}{m}$ , avec  $\vec{P}$  le poids du corps.
- \* Le vecteur champ de gravitation en  $P$  est donné par  $\vec{G}(P) = \frac{\vec{F}}{m}$ , avec  $\vec{F}$  la force de gravitation subie par le corps de la part de la Terre.

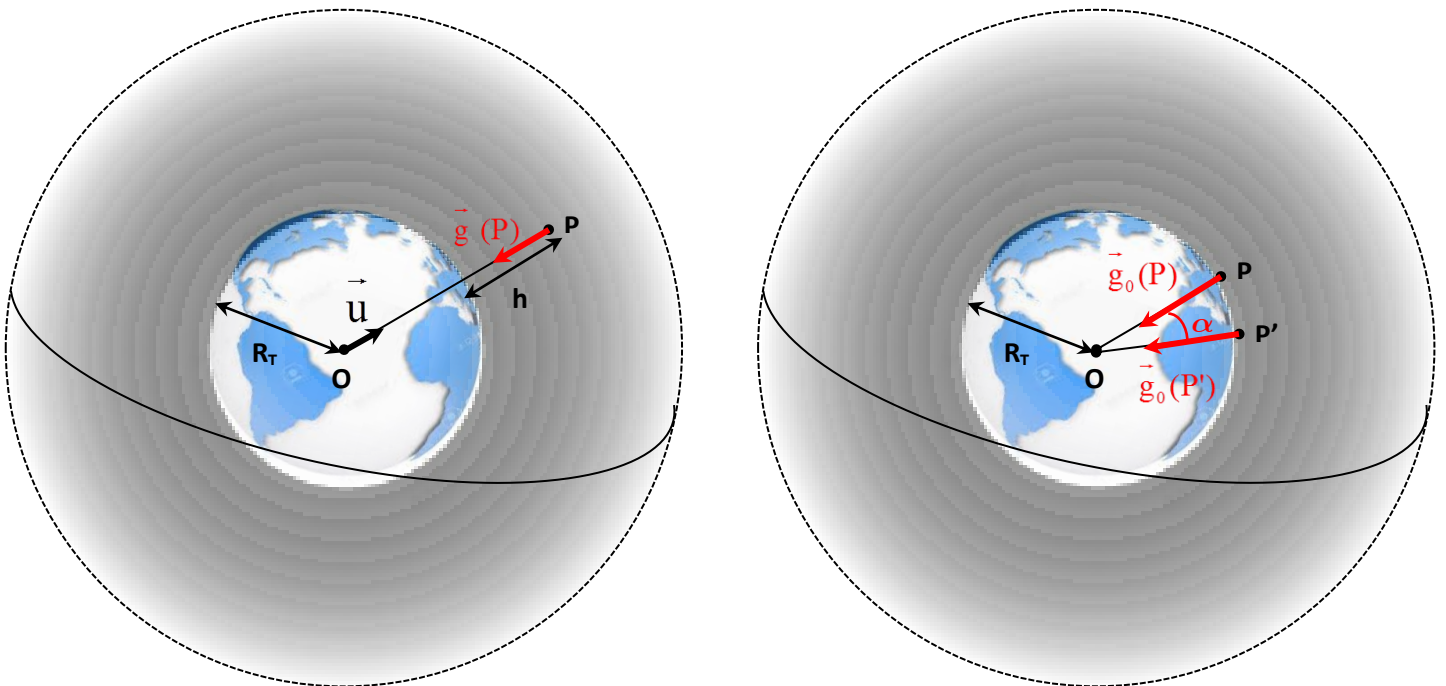
En négligeant l'effet de rotation de la Terre autour de son axe polaire :  $\vec{P} = \vec{F} \Rightarrow$

$$\vec{g}(P) = \vec{G}(P) = -G \frac{M_T}{(R_T + h)^2} \cdot \vec{u}, \text{ avec } \vec{u} = \frac{\overrightarrow{OP}}{OP} \text{ et } M_T \text{ masse de la Terre.}$$

$$\Rightarrow \|\vec{g}_h\| = G \frac{M_T}{(R_T + h)^2} \Rightarrow \boxed{\|\vec{g}_0\| = G \frac{M_T}{R_T^2}} = 9,8 \text{ N.kg}^{-1} : \text{ Intensité du champ de pesanteur au niveau de la mer (} h = 0 \text{)}$$

$$\underline{\text{Rq}} \text{ A une altitude } h > 0 : \|\vec{g}_h\| = G \frac{M_T}{(R_T + h)^2} \cdot \frac{R_T^2}{R_T^2} = G \frac{M_T}{R_T^2} \cdot \frac{R_T^2}{(R_T + h)^2} = \|\vec{g}_0\| \cdot \left( \frac{R_T}{R_T + h} \right)^2 < \|\vec{g}_0\|$$

Figure-5



## 2) Uniformité du champ de pesanteur

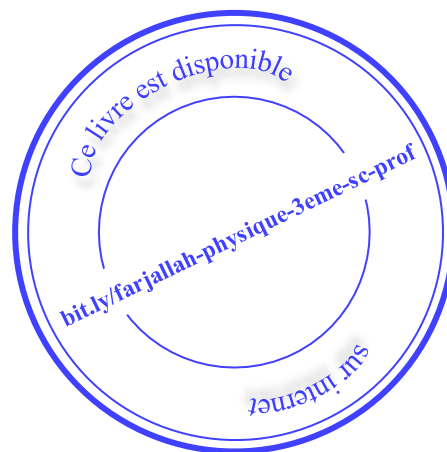
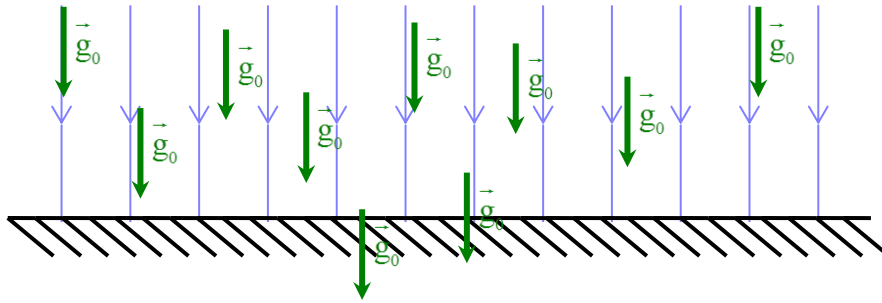
\* Jusqu'à une hauteur de 32 Km,  $\|\vec{g}\|$  ne perd que 1 % de sa valeur au niveau de la mer.

\* L'angle correspondant à un arc de longueur  $PP' = 111$  Km à la surface de la Terre est

$$\alpha = \frac{PP'}{R_T} = \frac{111}{6390} = 0,017 \text{ rad} \approx 1^\circ \Rightarrow \text{Sur une distance de 111 Km à la surface de la Terre, la direction}$$

de  $\vec{g}$  ne change que de  $1^\circ$ .

$\Rightarrow$  Sur un domaine restreint au voisinage de la Terre  $\vec{g}$  est pratiquement uniforme : même direction verticale, même sens vers le bas, et même intensité  $\|\vec{g}_0\| = 9,8 \text{ N.kg}^{-1}$ .



**Application-4**

1. La Terre est considérée un corps à répartition de masse à symétrie sphérique, de masse  $M_T$  et de rayon  $R_T = 6390 \text{ Km}$ . A un endroit de la surface de la Terre, on mesure le poids d'un corps supposé ponctuel de masse  $m = 100 \text{ g}$  à l'aide d'un dynamomètre :  $\|\vec{P}\| = 0,98 \text{ N}$ .
- Donner les caractéristiques du vecteur champ de pesanteur  $\vec{g}$  en cet endroit.
  - Calculer la valeur de la masse de la Terre. On donne  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ S.I.}$
2. Supposons que ce corps est emmené sur la Lune, qui est considérée un corps à répartition de masse à symétrie sphérique de masse  $M_L = 7,4 \cdot 10^{22} \text{ kg}$  et de rayon  $R_L = 1743 \text{ Km}$  :
- Calculer l'intensité du champ de gravitation lunaire  $\vec{G}_{L_0}$  en un point de sa surface.
  - Calculer la valeur de la force de gravitation  $\vec{F}$  exercée par la Lune sur ce corps ; la comparer à la valeur de son poids sur la Terre.
  - Que vous allez sentir, si jamais vous êtes sur la Lune ?

1.

- a)  $\vec{g}$  étant pratiquement uniforme sur une faible étendue au voisinage de la Terre :

$$\vec{g} : \begin{cases} \text{Direction : verticale du lieu} \\ \text{Sens : vers le bas} \\ \text{Intensité : } \|\vec{g}\| = \frac{\|\vec{P}\|}{m} = \frac{0,98}{0,1 \text{ kg}} = 9,8 \text{ N.kg}^{-1} \end{cases}$$

b)  $\|\vec{g}\| = \|\vec{g}_0\| = G \frac{M_T}{R_T^2} \Rightarrow G M_T = \|\vec{g}\| R_T^2 \Rightarrow M_T = \frac{\|\vec{g}\| R_T^2}{G} = \frac{9,8 (6390 \cdot 10^3 \text{ m})^2}{6,67 \cdot 10^{-11}} \approx 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

2.

a)  $\|\vec{G}_{L_0}\| = G \frac{M_L}{R_L^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{7,4 \cdot 10^{22}}{(1743 \cdot 10^3 \text{ m})^2} = 1,62 \text{ N.kg}^{-1}$

b)

- $\|\vec{F}\| = m \|\vec{G}_{L_0}\| = 0,1 \text{ kg} \cdot 1,62 = 0,162 \text{ N}$
- $\frac{\|\vec{P}\|}{\|\vec{F}\|} = \frac{0,98}{0,162} \approx 6$  : Ce corps est 6 fois plus attiré sur la Terre que sur la Lune.

c) On se sent 6 fois plus "légers", bien qu'ayant la même masse.

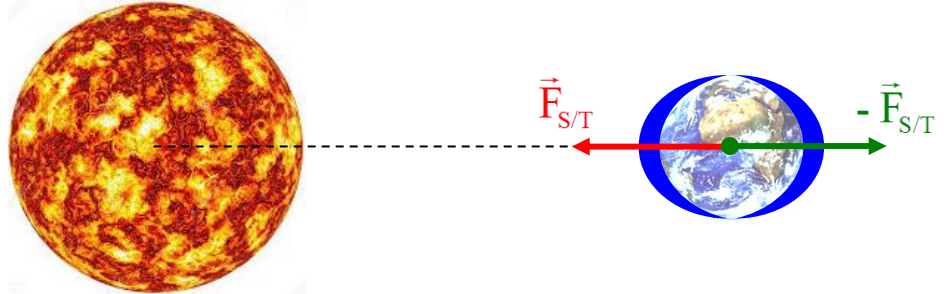
## IV- Phénomènes expliqués par l'interaction gravitationnelle

### 1) Le phénomène des marées (Fig-6)

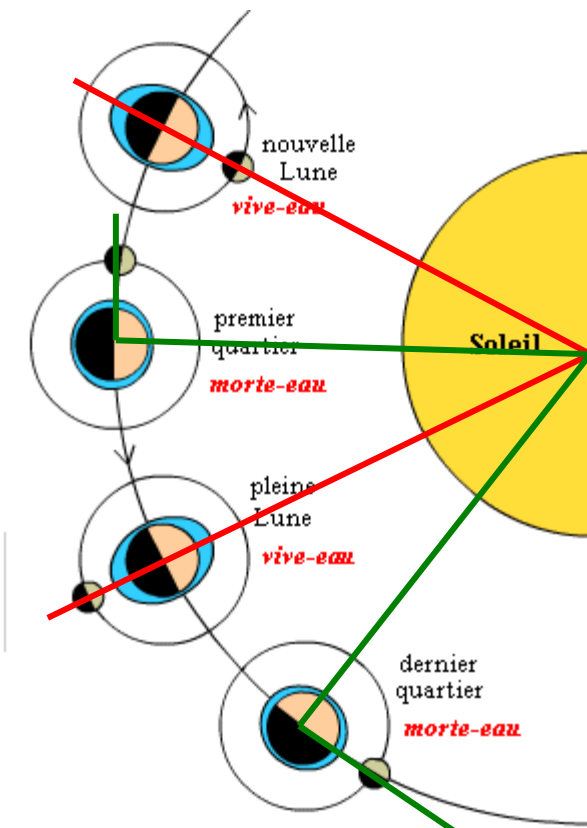
C'est le flux et le reflux périodiques de l'eau de la mer : le niveau de l'eau en un endroit donné monte et descend périodiquement sous l'action de l'attraction gravitationnelle combinée de la Lune et du Soleil.

Figure-6

- ❖ La Terre est en mouvement presque circulaire uniforme autour du soleil : si on considère ce mouvement pendant une durée très courte, on peut l'assimiler à un MRU ; d'après la 1<sup>ère</sup> loi de Newton la somme des forces exercées sur la Terre doit être nulle  $\Rightarrow$  à chaque instant il y a une autre force exercée sur la terre directement opposée à la force d'attraction solaire, appelée force centrifuge ; les forces  $\vec{F}_{S/T}$  et  $-\vec{F}_{S/T}$  étant exercées sur chaque point de la Terre, en particulier elles provoquent la déformation de la surface des mers en bourrelets.



- ❖ A cela vient s'ajouter une déformation similaire due à l'attraction lunaire, qui selon la phase qu'elle traverse accentue ou atténue la déformation provoquée par le Soleil ; il en résulte une oscillation du niveau de la mer plusieurs fois à chaque cycle lunaire :



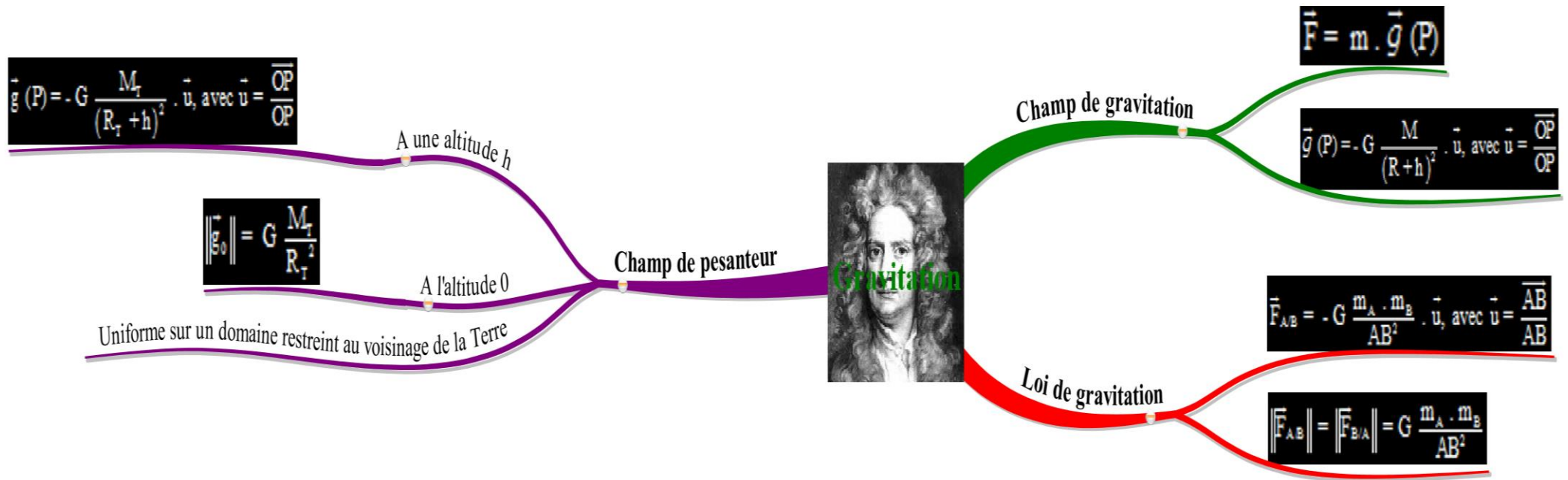
- A la nouvelle Lune et à la pleine Lune ; l'effet de la Lune s'ajoute à celui du Soleil : marée de vive-eau.
- Au 1<sup>er</sup> quartier et au dernier quartier ; l'effet de la Lune s'oppose à celui du Soleil : marée de morte-eau.
- Les marées sont hautes dans les endroits situés sur l'axe Terre-Lune.
- Les marées sont basses dans les endroits situés sur l'axe perpendiculaire à l'axe Terre-Lune.

### 2) La chute des astéroïdes et des météoroïdes

Les astéroïdes et les météoroïdes errant dans l'espace interplanétaire finissent parfois par être captifs du champ gravitationnel d'une planète (ou de son satellite) ; selon la vitesse avec laquelle ils pénètrent dans le champ gravitationnel il peuvent tomber ou non.

Le plus dévastateur pour la Terre était celui de 1908 à Tunguska (Sibérie) : 2000 Km<sup>2</sup> de forêt partirent en poussière.

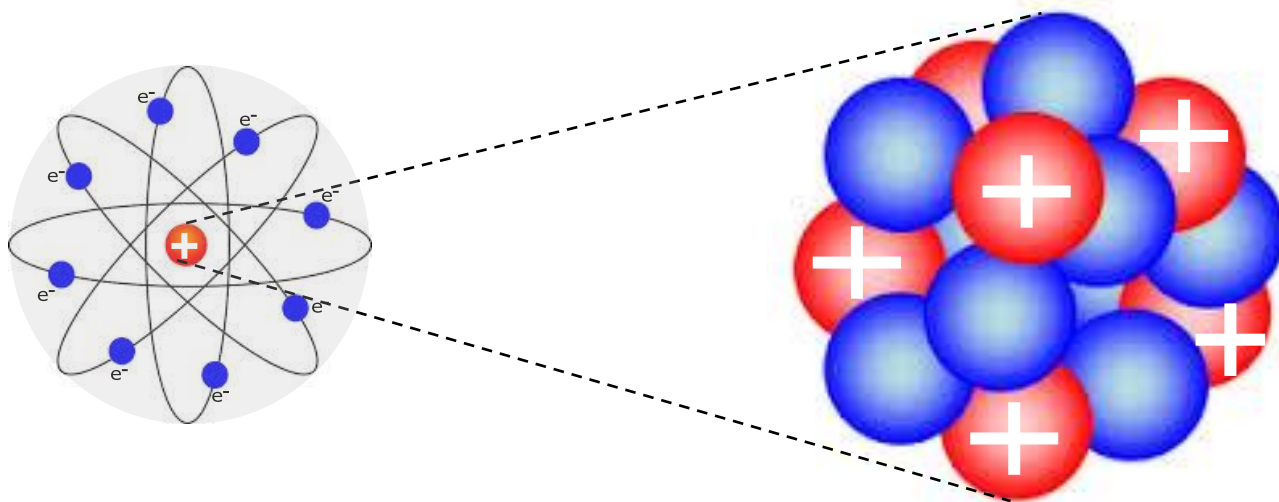




## Chapitre-4 : Interaction forte

Objectifs
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Expliquer la cohésion du noyau atomique.</li> <li>➤ Interpréter la cohésion de la matière :               <ul style="list-style-type: none"> <li>• à l'échelle du noyau,</li> <li>• à l'échelle des atomes, <del>des molécules</del> et à notre échelle,</li> <li>• à l'échelle astronomique.</li> </ul> </li> </ul>
Prérequis
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Composition et dimensions du noyau atomique, nombre de charge, nombre de masse.</li> <li>▪ Interaction électrique.</li> <li>▪ Interaction gravitationnelle.</li> </ul>
Matériel
Rien

### Rappels



Le noyau atomique est constitué de deux types de particules, pratiquement de même masse, mais de charges

différentes : \* Protons :  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Charge : } q_p = +e = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \\ \text{Masse : } m_p \approx 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \end{array} \right.$  ; \* Neutrons :  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Charge : } q_n = 0 \\ \text{Masse : } m_n \approx 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \end{array} \right.$

Tous les deux sont appelés nucléons.

Dans un noyau donné ; le nombre de protons est noté Z (nombre de charge), et le nombre total de nucléons est noté A (nombre de masse) : on le représente par le symbole  ${}^A_Z X$ .

### I- Mise en évidence

#### 1) Exemple (Activité)

##### Activité

Un noyau d'hélium  ${}^4_2\text{He}$  contient 2 protons et 2 neutrons ; les protons sont assimilés à des points matériels distants d'environ  $d = 4,8 \cdot 10^{-15} \text{ m}$  :

1. Calculer la valeur de la force de répulsion électrique  $\vec{F}_{p/p}$  entre les protons.
2. Calculer la valeur de la force d'attraction gravitationnelle  $\vec{F}'_{p/p}$  entre les protons.
3. Commenter.

On donne  $K = 9 \cdot 10^9 \text{ S.I.}$ ,  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ S.I.}$ ,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ,  $m_p \approx 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  : masse du proton.

1.  $\|\vec{F}_{p/p}\| = K \frac{|q_p| \cdot |q_p|}{d^2} = K \frac{e^2}{d^2} = K \left(\frac{e}{d}\right)^2 = 9 \cdot 10^9 \left(\frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{4,8 \cdot 10^{-15}}\right)^2 = 10 \text{ N}$
2.  $\|\vec{F}'_{p/p}\| = G \frac{m_p \cdot m_p}{d^2} = G \left(\frac{m_p}{d}\right)^2 = 6,67 \cdot 10^{-11} \left(\frac{1,67 \cdot 10^{-27}}{4,8 \cdot 10^{-15}}\right)^2 = 8 \cdot 10^{-36} \text{ N}$
3. L'attraction gravitationnelle est négligeable devant la répulsion électrique entre les protons  $\Rightarrow$  ils ne peuvent pas rester ensemble dans le noyau ; or cela est contradictoire avec la réalité de la forte cohésion du noyau !

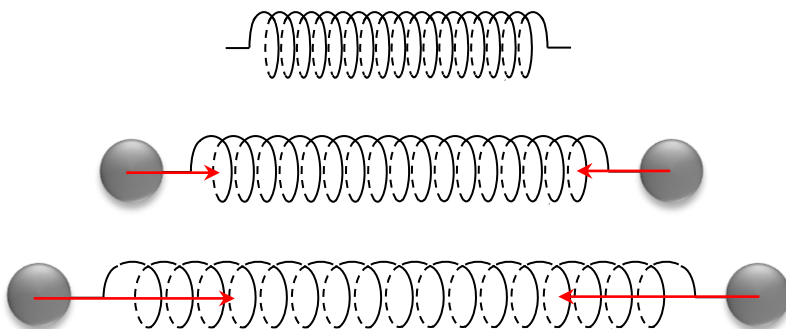
## 2) Conclusion

L'attraction gravitationnelle est loin de compenser la répulsion électrique très forte entre les protons, il n'y a pas non plus d'attraction magnétique, à cela s'ajoute le fait que les nucléons (protons et neutrons) sont en mouvement extrêmement rapide dans leur noyau ( $30000 \text{ Km} \cdot \text{s}^{-1}$ ), ce qui rend l'attraction gravitationnelle loin de les garder ensemble ; il est indispensable d'admettre l'existence d'un 4<sup>ème</sup> type d'interaction qui explique la cohésion du noyau : l'interaction forte.

## II- Propriétés de l'interaction forte

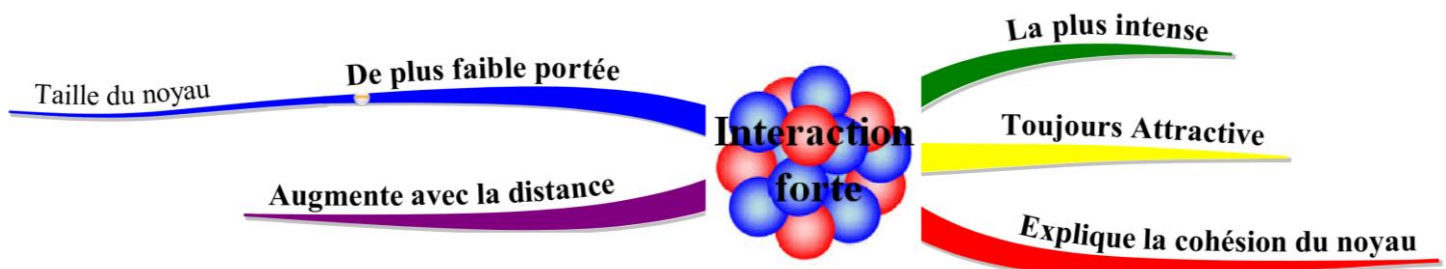
- \* Attractive seulement, et s'exerce entre tous les nucléons indifféremment.
- \* La plus intense de toutes les interactions ( $\sim 1000$  fois plus intense que l'interaction électrique)
- \* Sa portée est très courte; de l'ordre de la taille du noyau ( $\sim 10^{-15} \text{ m}$ )
- \* On montre que, contrairement aux autres interactions, son intensité augmente avec l'augmentation de la distance. (Fig-1)

Figure-1



L'interaction forte entre deux nucléons est similaire aux tensions exercées par le ressort sur les deux billes : plus elles s'éloignent, plus le ressort exerce des tensions plus fortes pour les retenir.

Rq Pour les noyaux lourds ( $Z > 83$ ), tel que l'Uranium, la taille du noyau dépasse la portée de l'interaction forte : la répulsion électrique prend le pas et provoque leur instabilité.



## Récapitulation des interactions fondamentales

	Propriétés			Ce qu'elle explique	Domaine de prédominance
	Portée	Effet de l'augmentation de la distance	Particularité		
Interaction <b>Electromagnétique</b>	Infinie (En théorie)	Diminution	Attractive ou Répulsive	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Electricité</li> <li>• Magnétisme</li> <li>• Cohésion de la matière par attraction électrique entre noyau et e<sup>-</sup>, ou entre les ions</li> <li>• .</li> </ul>	De l'échelle atomique à l'échelle Humaine
Interaction <b>Gravitationnelle</b>	Infinie	Diminution	N'est perceptible qu'avec des corps trop massifs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pesanteur</li> <li>• Les marées</li> <li>• Mouvement des astres</li> <li>• Cohésion du système solaire</li> <li>• .</li> </ul>	Echelle astronomique
Interaction <b>Forte</b>	~ 10 <sup>-15</sup> m	Augmentation	La plus intense	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cohésion du noyau</li> <li>• Energie nucléaire</li> <li>• .</li> </ul>	Echelle nucléaire (pour Z < 83)

### Application Les interactions fondamentales

Du noyau de l'atome à la galaxie, de nombreux *édifices organisés*, de toutes tailles, peuvent être observés. Quatre interactions, appelées « interactions fondamentales » **permettent de comprendre leur cohésion**. Quelles sont ces interactions fondamentales ? A quelle(s) échelle(s) chaque interaction prédomine-t-elle ? [...]

Les forces, en apparence, sont au nombre de quatre : forte, faible, électromagnétique et gravitationnelle. Elles sont hiérarchisées en portée et en intensité.

A l'échelle du noyau atomique, l'interaction forte domine en intensité toutes les autres, dont l'interaction électromagnétique, laquelle surpasse l'interaction faible, qui elle-même laisse très loin derrière la minuscule interaction gravitationnelle.

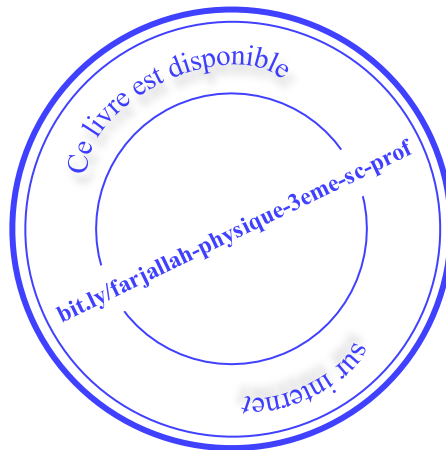
Pourtant, il ne faut pas s'y méprendre, cette hiérarchie microscopique ne reflète en rien l'influence des forces à grande échelle.

- La **gravitation** est sans conteste la force dominante à l'échelle *cosmique*, parce qu'elle n'est contrebalancée par aucune antigravitation, et que son intensité, bien que déclinante, *s'exerce sans limite de distance* [...].
- Les interactions **forte** et *faible*, 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 dans les grandes structures, les charges positives et négatives [...], partout se neutralisent. Cette interaction, attractive ou répulsive, n'est pas pour autant [...] négligeable : elle 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.

D'après *Nostalgie de la lumière*, Michel Cassé

1. Citer les interactions fondamentales par ordre d'intensité décroissante à l'échelle nucléaire.
2. Laquelle parmi ces interactions nous n'avons pas étudié; quel est son domaine de prédominance ?
3. Concernant l'interaction gravitationnelle :
  - a) A quelle échelle elle est dominante, quelle est sa portée (prélever une justification du document) ?
  - b) Donner un exemple d'édifice organisé qu'elle permet de comprendre sa cohésion.
4. Concernant l'interaction forte :
  - a) A quelle échelle elle est dominante et quelle est sa portée (prélever une justification du document) ?
  - b) Quel édifice organisé elle permet de comprendre sa cohésion.
5. Concernant l'interaction électromagnétique :
  - a) Quelle est sa portée ?
  - b) A quelle échelle elle est dominante; cela correspond-il à toute sa portée, justifier à partir du texte ?
  - c) Donner un exemple d'édifice organisé qu'elle permet de comprendre sa cohésion.

1. Interactions : forte / électromagnétique / faible / gravitationnelle.
2. Interaction faible, prédominante au niveau du noyau (avec l'interaction forte).
3.
  - a) Echelle cosmique, sa portée est infinie : « s'exerce sans limite de distance ».
  - b) Système solaire.
4.
  - a) Echelle nucléaire, sa portée se limite au noyau : « Les interactions forte [...], se sont fait un royaume du noyau de l'atome ».
  - b) Le noyau.
5.
  - a) Portée infinie. (illimitée)
  - b) Echelle atomique et Humain ; cela ne correspond pas à toute sa portée infinie, puisqu' « elle ne saurait gouverner le vaste Cosmos car dans les grandes structures, les charges positives et négatives [...], partout se neutralisent »
  - c) L'atome.



# Thème n°2 : Mécanique

## Chapitre-1 : Cinématique du solide en mouvement de translation

### Objectifs

- Reconnaître un solide en mouvement de translation.
- Représenter les vecteurs : position, vitesse et accélération d'un mobile.
- Reconnaître la nature du mouvement d'un mobile par recours à l'expérience.
- 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 ( $a + \omega^2 x = 0$ ) entre l'accélération  $a$  et l'élongation  $x$  d'un mobile en mouvement rectiligne sinusoïdal.

### Prérequis

- Relativité du mouvement, nécessité d'un solide de référence.
- Trajectoire d'un point mobile, types de trajectoires.
- Centre de gravité d'un solide.
- Repère d'espace, repère de temps.
- Vitesse moyenne, vitesse instantanée ; notions de MRU, MRUA, MRUR, et MCU.
- Chronophotographie.

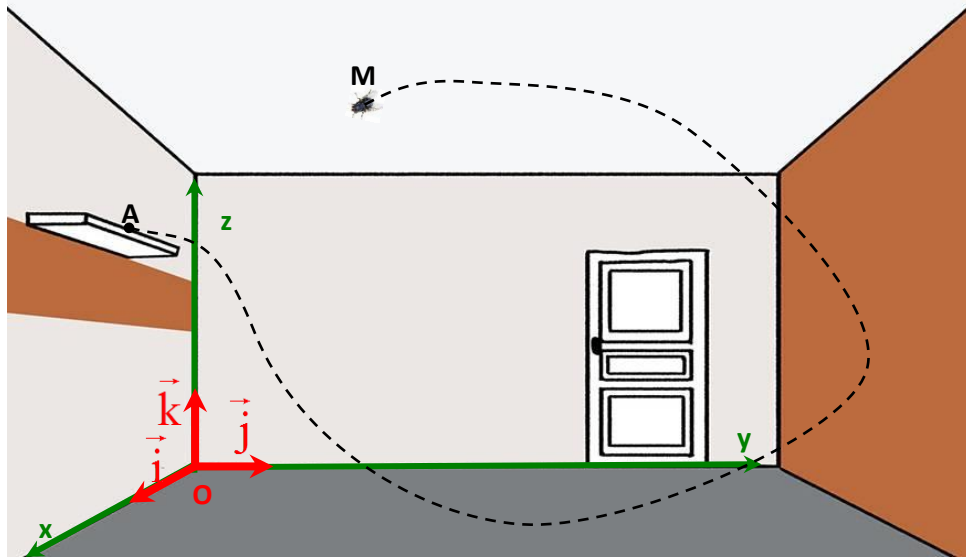
### Matériel

- |                     |  |
|---------------------|--|
| * Bille métallique. | * Stroboscope.                           |
| * Chronomètre.      | * Appareil pour oscillations mécaniques. |
| * Pendule élastique |  |

### Rappels, et généralités

- ❖ La cinématique est l'étude mathématique des mouvements des corps au cours du temps, sans tenir compte ni de leurs causes (les forces) ni des masses des corps; on se limitera à la cinématique du point matériel et du solide en mouvement de translation.
- ❖ 3 éléments doivent être précisés clairement avant toute étude cinématique :
  - ↪ Le **Mobile** : point matériel ou solide, objet de l'étude.
  - ↪ Un **Repère d'espace** : un point origine, et un système d'axes fixe par rapport à un solide de référence ; selon que la trajectoire soit rectiligne, plane ou spatiale ; un repère à un seul axe  $(O, \vec{i})$  serait suffisant, sinon à deux axes  $(O, \vec{i}, \vec{j})$ , et au besoin trois axes  $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ .  
Pour les mouvements se déroulant à la surface de la Terre, le solide de référence le plus adéquat est la Terre elle-même; une origine et un système d'axes fixes par rapport à la surface de la Terre, est appelé repère de laboratoire (ou repère terrestre).
  - ↪ Un **Repère de temps** : choix d'une origine pour le temps (événement auquel on attribue la date  $t = 0$ ), et une horloge (chronomètre) ; chaque instant aurait ainsi une date ( $t$ ), positive ou négative selon qu'il procède ou précède l'instant choisi comme origine du temps.
- ❖ Un ensemble { Solide de référence, Repère d'espace, Repère de temps } constitue un **Référentiel**; lorsque le repère d'espace est le repère de laboratoire, le référentiel correspondant est appelé Référentiel de laboratoire (ou terrestre).  
Exemple : pour étudier le mouvement d'une mouche assimilée à un point matériel (M) se déambulant dans la salle, on utilise le référentiel de laboratoire suivant :
  - Solide de référence : **la Terre**
  - Repère d'espace :  $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ ; **orthonormé de préférence.**
  - Repère de temps :  **$t = 0$  à l'instant de début du mouvement en A, et un chronomètre.**





❖ Dans un référentiel donné, la position d'un point mobile est repérée à chaque instant par ses coordonnées cartésiennes  $x(t)$ ,  $y(t)$  et  $z(t)$  ; selon la trajectoire, 1 ou 2 coordonnées peuvent suffire.

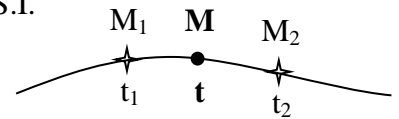
❖ La vitesse moyenne d'un point mobile M entre deux instants de dates  $t_1$  et  $t_2$  est définie par :

$$v_m(M) = \frac{d}{\Delta t} ; \text{ avec } \begin{cases} d = M_1M_2 : \text{ distance parcourue par le mobile entre } t_1 \text{ et } t_2, \text{ en (m) dans le S.I} \\ \Delta t = t_2 - t_1, \text{ en (s) dans le S.I} \end{cases}$$

❖ La vitesse instantanée d'un point mobile M à un instant de date (t) donnée, est la vitesse du mobile à cet instant :  $v_M(t)$ , exprimée comme la vitesse moyenne en  $\text{m.s}^{-1}$  dans le S.I.

*Elle correspond à sa vitesse moyenne entre  $t_1$  et  $t_2$  lorsque  $\Delta t \rightarrow 0$ .*

Elle décrit le mouvement mieux que la vitesse moyenne (...).



$$1 \text{ Km.h}^{-1} = \frac{1}{3,6} \text{ m.s}^{-1} \Leftrightarrow 1 \text{ m.s}^{-1} = 3,6 \text{ Km.h}^{-1}$$

❖  $\begin{cases} \text{Si la valeur de la vitesse reste constante au cours du temps : le mouvement est dit uniforme} \\ \text{Si la valeur de la vitesse augmente au cours du temps : le mouvement est dit accéléré} \\ \text{Si la valeur de la vitesse diminue au cours du temps : le mouvement est dit décéléré (freiné ou retardé)} \end{cases}$

❖ La chronophotographie est une technique d'étude du mouvement : c'est une photo obtenue lorsque, sur une même pellicule, un appareil photo dont l'objectif est maintenu ouvert enregistre le mobile à des intervalles de temps égaux  $T$  ; l'endroit doit être obscurci, puis éclairé par une lumière discontinue émise par un stroboscope.



- Pendant la montée de la bille ; son mouvement est **retardé**.
- Pendant la descente de la bille ; son mouvement est **accéléré**.

❖ Un point mobile de trajectoire rectiligne et dont la valeur de la vitesse, dans un référentiel donné, s'écrit  $v = a.t + v_0$  est dit en mouvement rectiligne uniformément varié dans ce référentiel ; avec  $v_0 = v(t=0)$  sa vitesse initiale, et (a) une constante :

- Si  $a > 0$ , le Mouvement est **Rectiligne Uniformément Accéléré (MRUA)**.
- Si  $a < 0$ , le Mouvement est **Rectiligne Uniformément Retardé (MRUR)**.



❖ Un point mobile (M) est dit en **Mouvement Circulaire Uniforme (MCU)**, dans un référentiel donné, si ;

- ⎧ Sa trajectoire est un cercle d'axe  $\perp$  plan du cercle
- ⎩ La valeur de sa vitesse est constante

pour l'étudier :

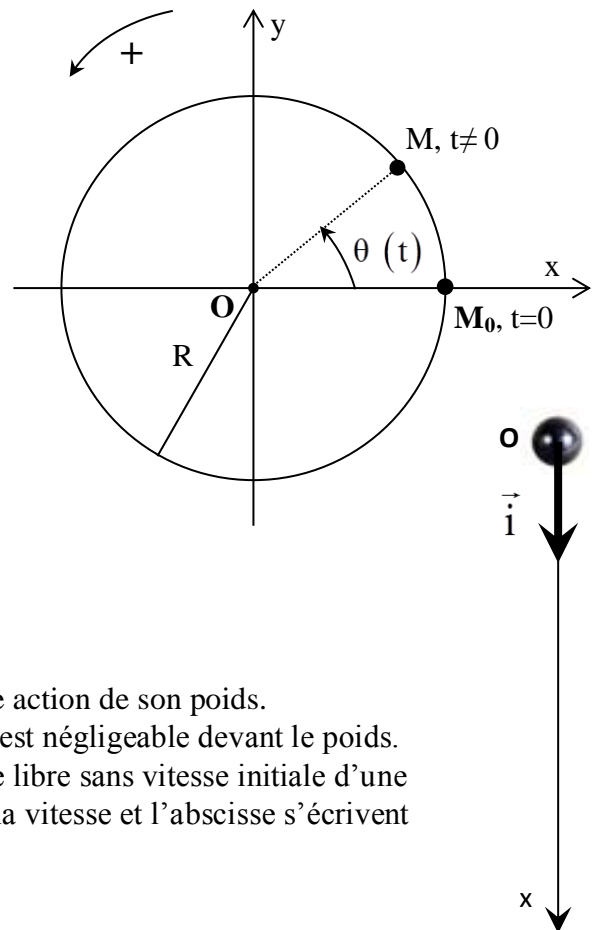
- On choisit une position ( $M_0$ ) par laquelle passe le mobile à l'origine des dates, et un sens positif de rotation.
- A un instant (t) quelconque, la position du mobile est repérée par son abscisse angulaire  $\theta(t)$  (en rad). Ou par son abscisse curviligne  $s(t) = M_0M = R \cdot \theta(t)$  (en m)

- Sa rapidité est caractérisée par sa vitesse angulaire

$$\omega = \frac{|\dot{\theta}|}{t} \text{ (en rad.s}^{-1}\text{)}$$

- $V = \left| \frac{M_0M}{t} \right|$ , étant sa vitesse linéaire ; on montre que

$$V = R \cdot \omega$$



❖ On appelle chute libre, le mouvement d'un corps sous la seule action de son poids.

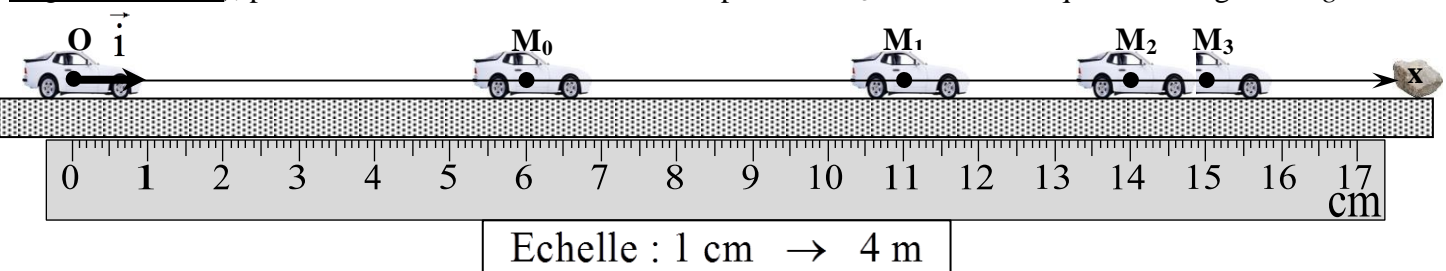
- Dans l'air, cela n'est possible que si la résistance de l'air est négligeable devant le poids.
- Dans un référentiel de laboratoire, on montre que la chute libre sans vitesse initiale d'une bille ponctuelle est un MRUA vertical, dont la valeur de la vitesse et l'abscisse s'écrivent

respectivement :  $v = g \cdot t$  et  $x = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$

### Application

La figure ci-dessous, représente la chronophotographie du mouvement d'une voiture sur une route horizontale; on s'intéresse au mouvement d'un point **M** de la voiture, par rapport au repère d'espace  $(O, \vec{i})$  fixe par rapport à la route.

La voiture roule à une vitesse  $v_0 = 108 \text{ Km.h}^{-1}$  jusqu'à la position O, où le conducteur s'aperçoit que la route est barrée par des pierres ! ; il n'arrive à actionner ses freins qu'au niveau de la position  $M_0$  (choisie comme origine des dates), pour s'arrêter en fin au niveau de la position  $M_3$ . On admettra que le freinage est régulier.



1. Donner les éléments du référentiel utilisé pour l'étude du mouvement du point M ; comment il est appelé ?
2. Donner la nature du mouvement :
  - a) De la position O à la position  $M_0$ , calculer sa durée  $\Delta t$ .
  - b) De la position  $M_0$  à la position  $M_3$ .
3. La chronophotographie étant réalisée avec un stroboscope qui émet des éclairs à des intervalles de temps égaux  $T = 0,8 \text{ s}$  : donner les dates de passage du mobile par les différentes positions.
4. On s'intéresse au mouvement du mobile M de la position  $M_0$  à la position  $M_3$  ;
  - a) Déterminer l'expression de la valeur de sa vitesse instantanée  $v(t)$ .
  - b) Calculer sa valeur, en  $\text{Km.h}^{-1}$ , au passage par  $M_1$ .
  - c) Calculer, en  $\text{Km.h}^{-1}$ , la vitesse moyenne du mobile entre  $M_0$  et  $M_1$ .

**1.**

- \* Solide de référence : la Terre
- \* Repère d'espace :  $(O, \vec{i})$
- \* Repère de temps :  $t = 0$  à l'instant de passage par  $M_0$ , (et un chronomètre).  
C'est un référentiel de laboratoire (terrestre)

**2.**

- a) MRU,  $OM_0$  est la distance de réaction, parcourue à la même vitesse  $v_0$  pendant une durée  $\Delta t$  dont la valeur dépend du conducteur et de son état de vigilance (temps de réaction) :

$$v_0 = \frac{OM_0}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{OM_0}{v_0}$$

- \*  $OM_0 = 6 \cdot 4 \text{ m} = 24 \text{ m}$
- \*  $v_0 = 108 \text{ Km.h}^{-1} = \frac{108}{3,6} \text{ m.s}^{-1} = 30 \text{ m.s}^{-1}$

$$\Rightarrow \Delta t = \frac{24 \text{ m}}{30 \text{ m.s}^{-1}} = 0,8 \text{ s}$$

- b) MRUR

**3.**

$$O : t_0 = -T = -0,8 \text{ s}$$

$$M_0 : t_0 = 0$$

$$M_1 : t_1 = T = 0,8 \text{ s}$$

$$M_2 : t_2 = 2T = 1,6 \text{ s}$$

$$M_3 : t_3 = 3T = 2,4 \text{ s}$$

**4.**

- a)  $v(t) = a \cdot t + v_0$ , avec :

- \*  $v_0 = 30 \text{ m.s}^{-1}$

- \*  $a = ?$  ; on a  $v(t_3) = 0 \Rightarrow a \cdot t_3 + v_0 = 0 \Rightarrow a \cdot t_3 = -v_0 \Rightarrow a = -\frac{v_0}{t_3} = -\frac{30 \text{ m.s}^{-1}}{2,4 \text{ s}} = -12,5 \text{ m.s}^{-2}$

b)  $v(t_1) = a \cdot t_1 + v_0 = -12,5 \cdot 0,8 + 30 = 20 \text{ m.s}^{-1} = 20 \cdot 3,6 \text{ Km.h}^{-1} = 72 \text{ Km.h}^{-1}$

c)  $v_m(M) = \frac{M_0 M_1}{t_1 - t_0} = \frac{5 \cdot 4 \text{ m}}{0,8 - 0} = 25 \text{ m.s}^{-1} = 25 \cdot 3,6 \text{ Km.h}^{-1} = 90 \text{ Km.h}^{-1}$

### Outils mathématiques (d'amples détails à la fin du livre)

Soient  $f(t)$  et  $g(t)$  des fonctions de variable réelle  $(t)$ , et  $a, b, n$  des constantes réelles :

❖ On appelle dérivée de la fonction  $(f)$  en un point  $(t)$  de son domaine de définition ; la fonction, notée  $\frac{df(t)}{dt}$ ,

définie par  $\frac{df(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{f(t_2) - f(t_1)}{t_2 - t_1}$ , avec  $t_1$  et  $t_2$  deux points tels que  $t_1 < t < t_2$  et  $\Delta t = t_2 - t_1$  :

- $\frac{da}{dt} = 0$
- $\frac{dt}{dt} = 1$
- $\frac{dt^2}{dt} = 2t$
- $\frac{d[a \cdot f(t)]}{dt} = a \cdot \frac{df(t)}{dt}$

- $\frac{d[f(t)]^n}{dt} = n \cdot [f(t)]^{n-1} \cdot \frac{df(t)}{dt}$
- $\frac{d\sqrt{f(t)}}{dt} = \frac{1}{2\sqrt{f(t)}} \cdot \frac{df(t)}{dt}$
- $\frac{d[f(t) + g(t)]}{dt} = \frac{df(t)}{dt} + \frac{dg(t)}{dt}$
- $\frac{d[\sin(at + b)]}{dt} = a \cos(at + b)$
- $\frac{d[\cos(at + b)]}{dt} = -a \sin(at + b)$
- L'espace étant rapporté à un repère cartésien  $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  dont les vecteurs  $\vec{i}, \vec{j}$  et  $\vec{k}$  sont constants, et  $\vec{u}(t)$  une fonction vectorielle de variable réelle  $t$  ;  $\frac{d\vec{u}(t)}{dt} = \frac{du_x(t)}{dt} \vec{i} + \frac{du_y(t)}{dt} \vec{j} + \frac{du_z(t)}{dt} \vec{k}$

❖ On appelle primitive de la fonction  $f(t)$  ; **Toute** fonction  $F(t)$  telle que :  $\frac{dF(t)}{dt} = f(t)$  ;

on note :  $F(t) = \int f(t) dt$  :

- $\int a dt = a t + Cte$
- $\int (a t) dt = \frac{1}{2} a t^2 + Cte$
- $\int (a t + b) dt = \frac{1}{2} a t^2 + b t + Cte$

❖ La fonction  $f(t) = \sin(at + b)$  est périodique, de période  $T = \frac{2\pi}{a}$

## I- Mouvement de translation (Fig-1)

Un solide est dit en mouvement de translation, dans un référentiel donné, si toute droite reliant deux points quelconques du solide demeure parallèle à elle-même durant le mouvement.

Ainsi, tous les points du solide ont des trajectoires identiques et le même mouvement à chaque instant : il suffit d'étudier le mouvement d'un seul point (le centre de gravité G).

NB La rotation d'un solide autour d'un axe n'est pas un mouvement de translation circulaire.

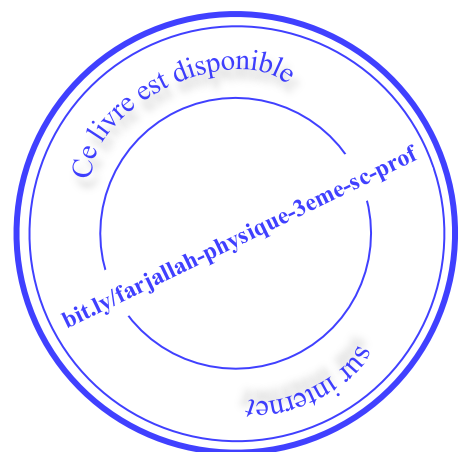
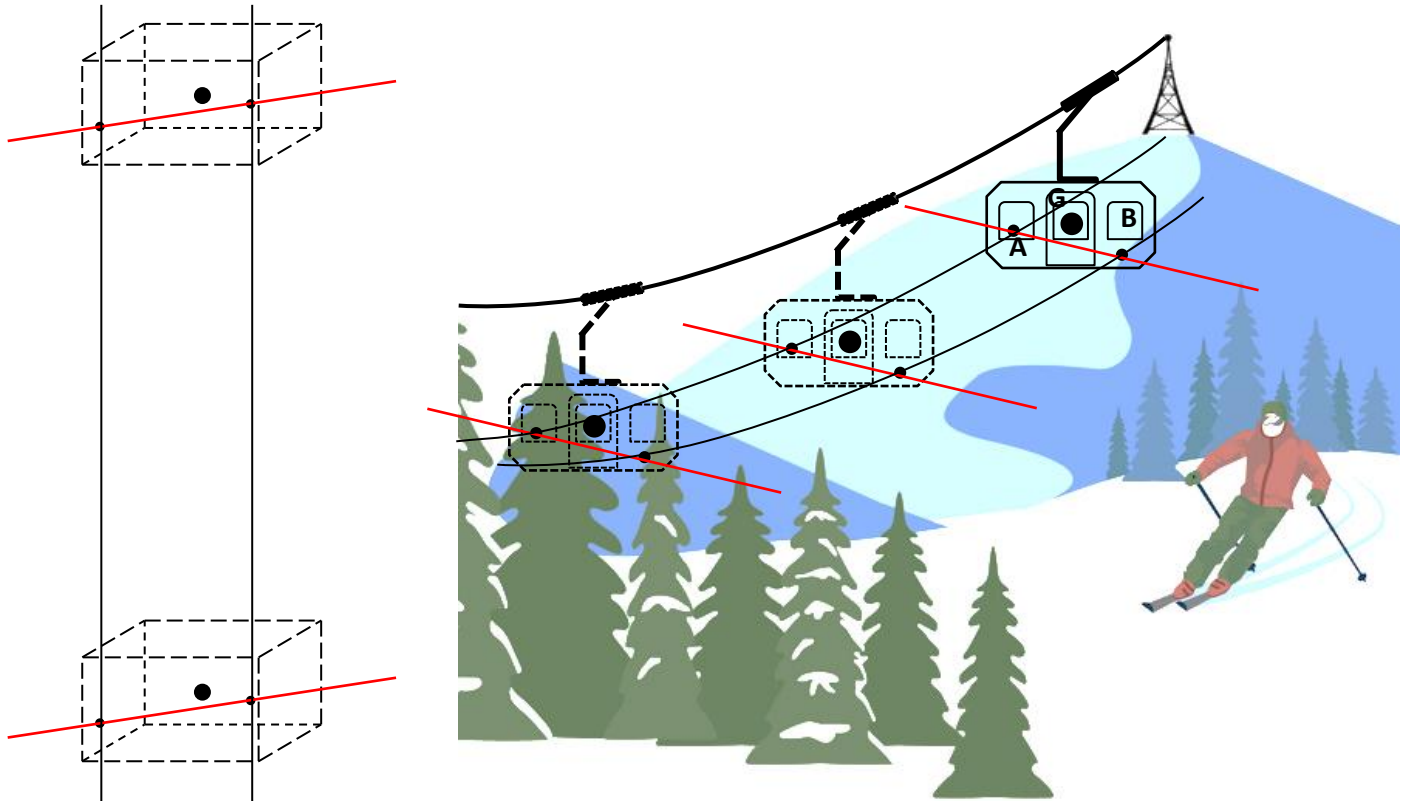
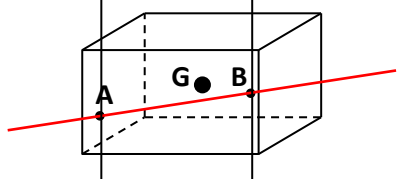


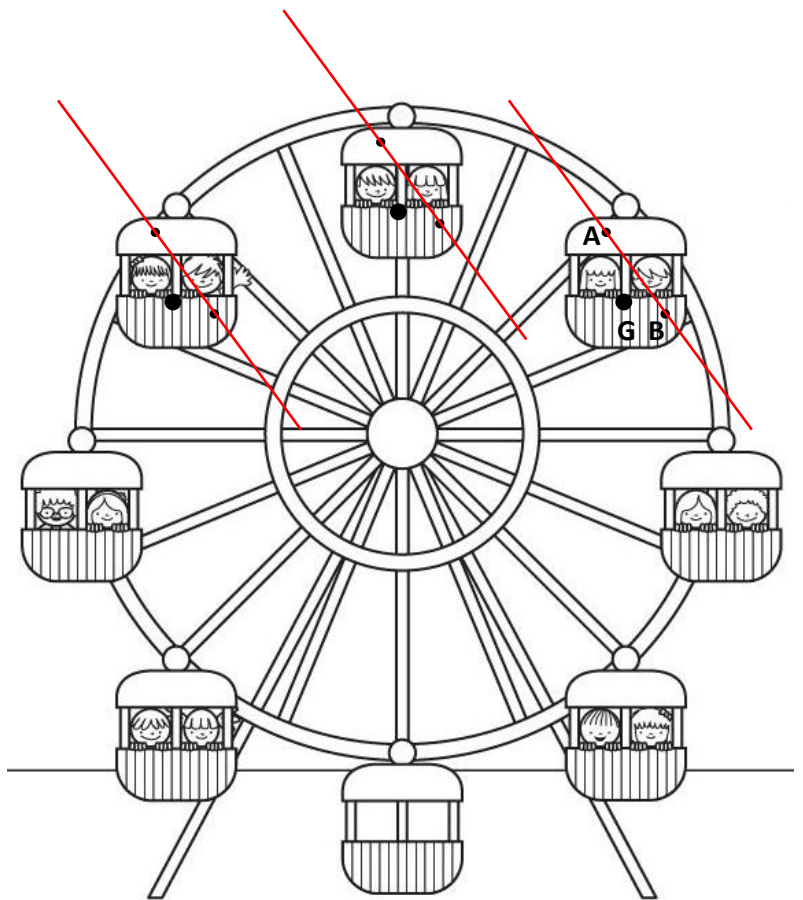
Figure-1



(Le téléphérique) : Translation **curviligne**



(Chute libre) : Translation **rectiligne**



(Les nacelles de la grande roue du manège) : Translation **circulaire**

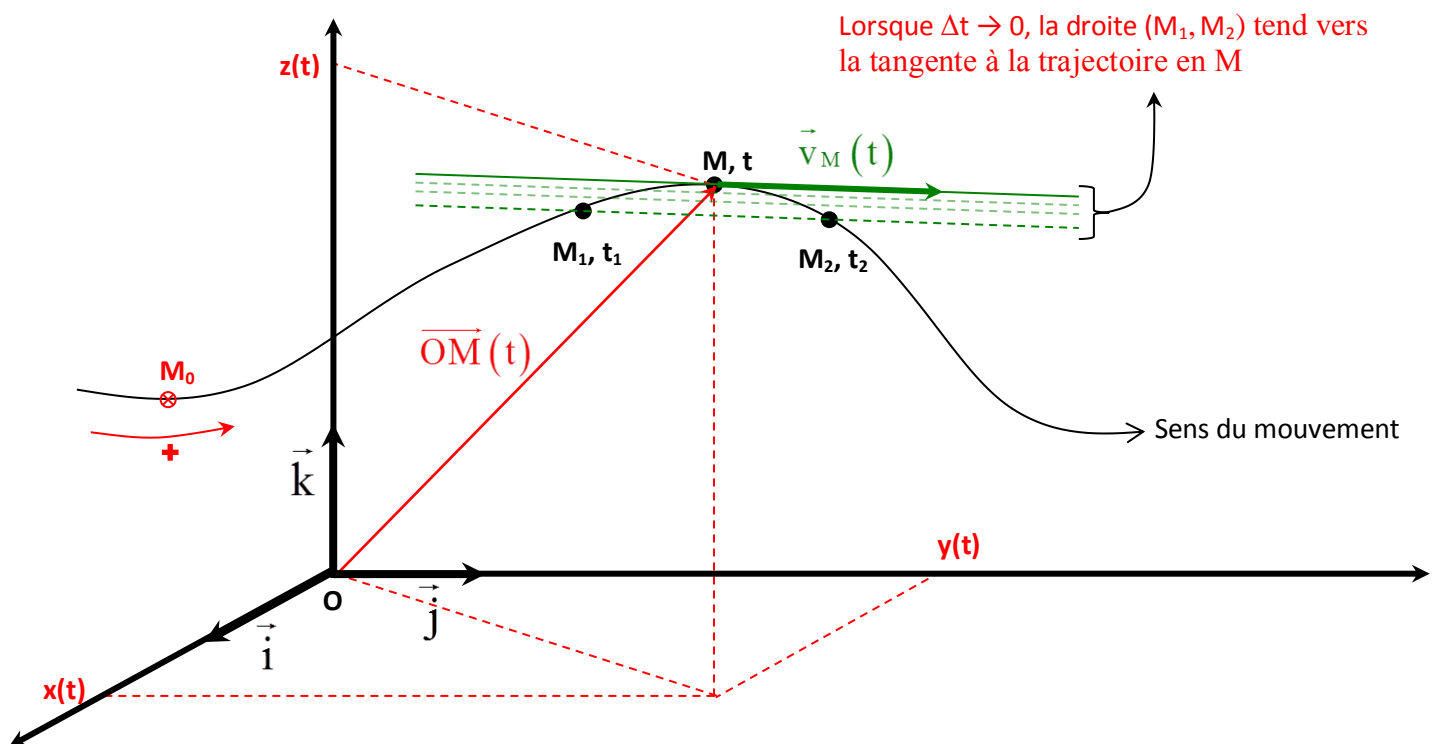
## II- Grandeurs cinématiques pour un point mobile (Fig-2)

Un référentiel étant choisi, dont le repère d'espace  $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  est orthonormé ; considérons un point mobile (point matériel ou bien le centre de gravité d'un solide en mouvement de translation) :

Sa position (M) à un instant de date (t) est repérée par ses coordonnées cartésiennes  $x(t)$ ,  $y(t)$ , et  $z(t)$  appelées équations horaires.

Rq La position (M) du mobile peut aussi être repérée par son abscisse curviligne  $s(t) = M_0M$ , après avoir choisi une position origine ( $M_0$ ) sur la trajectoire et un sens (+) pour le mouvement.

Figure-2



### 1) Vecteur position

$\overline{OM}(t) = x(t) \vec{i} + y(t) \vec{j} + z(t) \vec{k}$ . On le note aussi  $\overline{OM}(t) \begin{cases} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{cases}$

### 2) Vecteur vitesse instantanée

Soient  $(t_1)$  et  $(t_2)$  les dates de deux instants aux alentours de l'instant de date  $(t)$  ;  $\Delta t = t_2 - t_1$

\* La vitesse moyenne du mobile entre  $(t_1)$  et  $(t_2)$  étant  $\vec{v}_{m \rightarrow t_2}(\mathbf{M}) = \frac{\overline{M_1 M_2}}{t_2 - t_1}$  ; on définit le vecteur vitesse

moyenne par  $\vec{v}_{m \rightarrow t_2}(\mathbf{M}) = \frac{\overline{M_1 M_2}}{t_2 - t_1}$ .

\* On sait que la vitesse instantanée  $\vec{V}_M(t)$  du mobile à l'instant  $(t)$  correspond à sa vitesse moyenne entre  $(t_1)$  et  $(t_2)$  lorsque  $\Delta t \rightarrow 0$  ; alors son vecteur vitesse instantanée à l'instant  $(t)$  correspond à son vecteur vitesse moyenne entre  $(t_1)$  et  $(t_2)$  lorsque  $\Delta t \rightarrow 0$  :

$$\vec{v}_M(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\overline{M_1 M_2}}{t_2 - t_1} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\overline{M_1 O} + \overline{O M_2}}{t_2 - t_1} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\overline{O M_2} - \overline{O M_1}}{t_2 - t_1} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\overline{OM}(t_2) - \overline{OM}(t_1)}{t_2 - t_1}$$

$$\begin{aligned}
 &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\overrightarrow{\Delta OM}(t)}{\Delta t} : \text{c'est la dérivée du vecteur } \overrightarrow{OM}(t), \text{ qu'on note } \frac{d\overrightarrow{OM}(t)}{dt} \\
 \Rightarrow \vec{v}_M(t) &= \frac{d\overrightarrow{OM}(t)}{dt} \\
 &= \frac{d}{dt} [x(t) \vec{i} + y(t) \vec{j} + z(t) \vec{k}] \\
 &= \frac{d}{dt} [x(t) \vec{i}] + \frac{d}{dt} [y(t) \vec{j}] + \frac{d}{dt} [z(t) \vec{k}] \\
 &= \frac{dx(t)}{dt} \vec{i} + \frac{dy(t)}{dt} \vec{j} + \frac{dz(t)}{dt} \vec{k} \\
 &= v_x(t) \vec{i} + v_y(t) \vec{j} + v_z(t) \vec{k}
 \end{aligned}$$

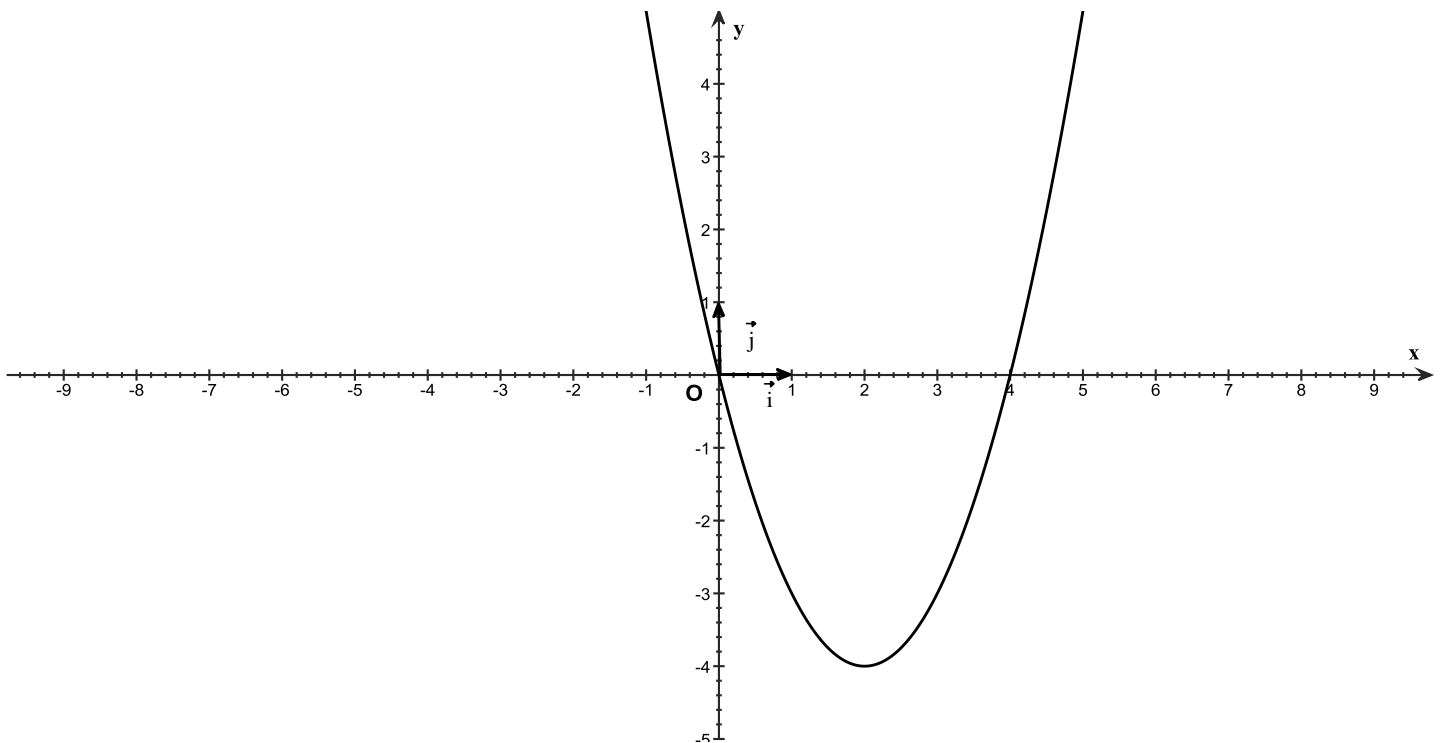
On note aussi  $\vec{v}_M(t) \begin{cases} v_x(t) \\ v_y(t) \\ v_z(t) \end{cases}$

La valeur de la vitesse à un instant donné est alors :  $\|\vec{v}_M(t)\| = \sqrt{v_x^2(t) + v_y^2(t) + v_z^2(t)}$ , sa direction est la tangente à la trajectoire en M, et son sens celui du mouvement.

### Application-1

Le mouvement d'un point mobile M est étudié par rapport à un référentiel dont le repère d'espace  $(O, \vec{i}, \vec{j})$  est orthonormé, et l'origine du temps correspond au passage par l'origine O (figure ci-dessous).

Son vecteur position est  $\overrightarrow{OM}(t) = (2t) \vec{i} + (4t^2 - 8t) \vec{j}$



1. Donner ses équations horaires.
2. En déduire l'équation cartésienne de sa trajectoire.
3. Déterminer l'expression de son vecteur vitesse instantanée.

4. On considère le mobile à l'instant de date  $t = 1 \text{ s}$  :
- Donner son vecteur position à cet instant, et le représenter.
  - Donner son vecteur vitesse à cet instant, et le représenter à l'échelle  $1 \text{ m.s}^{-1} \rightarrow 1 \text{ cm}$  ; en déduire le sens du mouvement.
  - Retrouver la valeur de sa vitesse.
5. On considère le mobile à l'instant de date  $t = 2 \text{ s}$  :
- Donner son vecteur position à cet instant, et le représenter.
  - Donner son vecteur vitesse à cet instant, calculer sa valeur et le représenter à l'échelle  $1 \text{ m.s}^{-1} \rightarrow 1 \text{ cm}$

1.

$$* \quad x(t) = 2t$$

$$* \quad y(t) = 4t^2 - 8t$$

$$2. \quad t = \frac{x}{2} \Rightarrow y = 4\left(\frac{x}{2}\right)^2 - 8\frac{x}{2} = \cancel{4} \frac{x^2}{\cancel{4}} - 4x : \boxed{y = x^2 - 4x}$$

$$3. \quad \vec{v}_M(t) = v_x(t) \vec{i} + v_y(t) \vec{j}, \text{ avec :}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v_x(t) = \frac{dx(t)}{dt} = \frac{d(2t)}{dt} = 2 \frac{dt}{dt} = 2 \text{ m.s}^{-1} \\ v_y(t) = \frac{dy(t)}{dt} = \frac{d(4t^2 - 8t)}{dt} = \frac{d(4t^2)}{dt} - \frac{d(8t)}{dt} = 4 \frac{d(t^2)}{dt} - 8 \frac{d(t)}{dt} = 8t - 8 \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow \boxed{\vec{v}_M(t) = 2 \vec{i} + (8t - 8) \vec{j}}$$

4.

$$a) \quad \overline{OM}(t=1\text{s}) = (2) \vec{i} + (4 - 8) \vec{j} = 2 \vec{i} - 4 \vec{j}$$

$$b) \quad \vec{v}_M(t=1\text{s}) = 2 \vec{i} + (8 - 8) \vec{j} = 2 \vec{i}$$

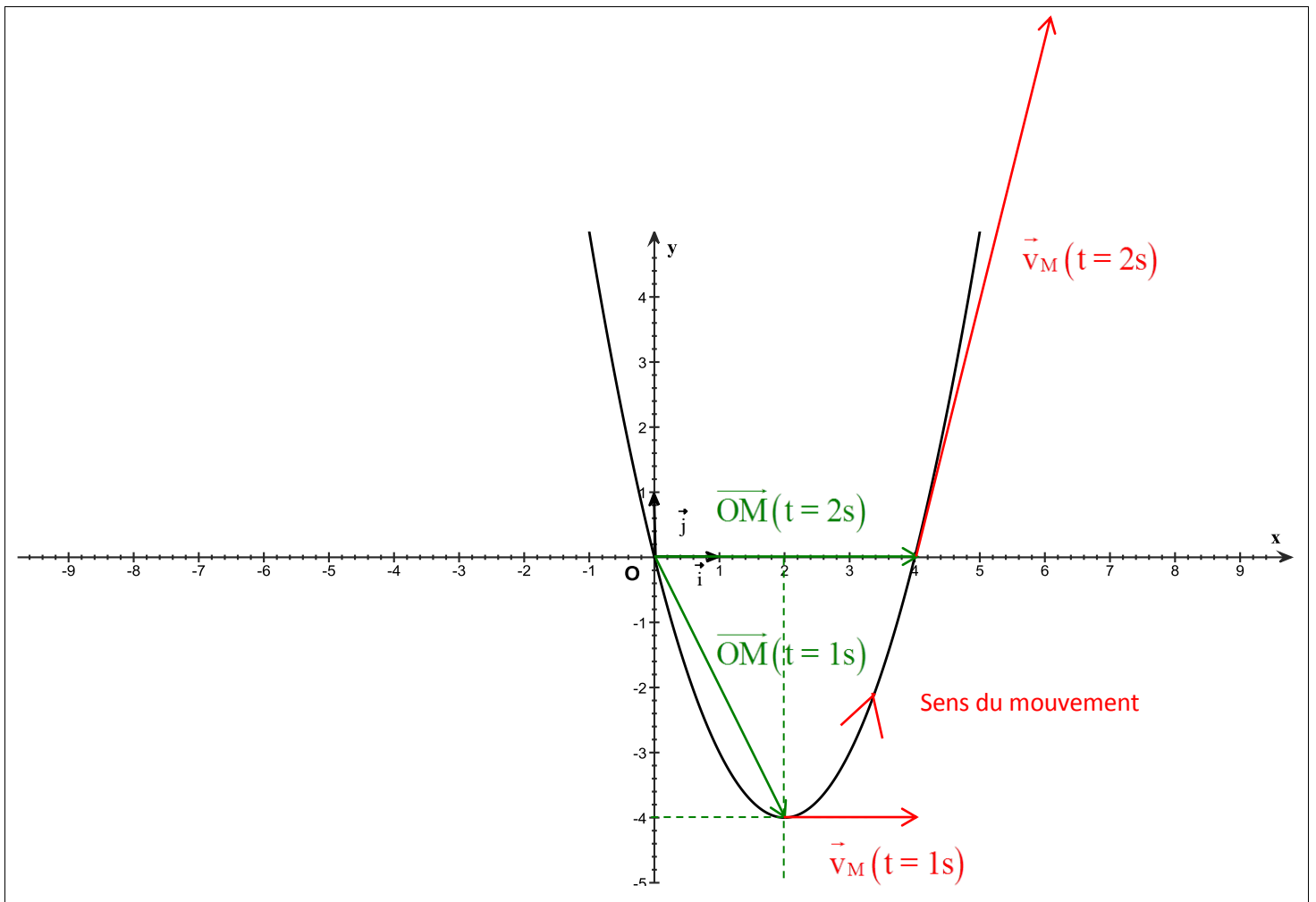
$$c) \quad \|\vec{v}_M(t)\| = \sqrt{v_x^2(t) + v_y^2(t)} = \sqrt{4 + (8t - 8)^2} \Rightarrow \|\vec{v}_M(t=1\text{s})\| = \sqrt{4 + 0} = 2 \text{ m.s}^{-1}$$

5.

$$a) \quad \overline{OM}(t=2\text{s}) = (2 \cdot 2) \vec{i} + (4 \cdot 2^2 - 8 \cdot 2) \vec{j} = (4) \vec{i} + (16 - 16) \vec{j} = 4 \vec{i}$$

$$b) \quad \vec{v}_M(t=2\text{s}) = 2 \vec{i} + (8 \cdot 2 - 8) \vec{j} = 2 \vec{i} + 8 \vec{j}, \quad \|\vec{v}_M(t=2\text{s})\| = \sqrt{2^2 + 8^2} \approx 8,25 \text{ m.s}^{-1} \rightarrow 8,25 \text{ cm}$$





### 3) Vecteur accélération instantanée

#### a) Notion d'accélération

Pour un point mobile en MRUA ou MRUR, la valeur de la vitesse instantanée est telle que  $\|\vec{v}(t)\| = a t + \|\vec{v}_0\|$  ; entre deux instants  $t_1$  et  $t_2$ , la variation de la valeur de la vitesse relativement au temps est :

$$\frac{\Delta \|\vec{v}(t)\|}{\Delta t} = \frac{\|\vec{v}(t_2)\| - \|\vec{v}(t_1)\|}{t_2 - t_1} = \frac{a t_2 + \|\vec{v}_0\| - a t_1 - \|\vec{v}_0\|}{t_2 - t_1} = \frac{a (t_2 - t_1)}{t_2 - t_1} = a$$

$\Rightarrow a = \frac{\Delta \|\vec{v}(t)\|}{\Delta t}$  : grandeur caractérisant la variation de la valeur de la vitesse instantanée.

ex

- \*  $a = 3 \text{ m.s}^{-2} = 3 \text{ m.s}^{-1}/\text{s}$  : à chaque seconde, la valeur de la vitesse augmente de  $3 \text{ m.s}^{-1}$  (MRUA) (...)
- \*  $a = -3 \text{ m.s}^{-2} = -3 \text{ m.s}^{-1}/\text{s}$  : à chaque seconde, la valeur de la vitesse diminue de  $3 \text{ m.s}^{-1}$  (MRUR) (...)

Dans les deux cas (a) est appelée accélération ; si  $a > 0$  le mouvement est effectivement accéléré, et si  $a < 0$  le mouvement est freiné (retardé, décéléré).

Mais  $\vec{v}(t)$  ne varie pas seulement en valeur, il peut varier aussi en direction et en sens : pour cela, on définit une accélération vectorielle.

#### b) Définition du vecteur accélération

Le vecteur accélération moyenne d'un point mobile entre deux instants  $t_1$  et  $t_2$  est

$$\vec{a}_m(\mathbf{M})_{t_1 \rightarrow t_2} = \frac{\Delta \vec{v}(t)}{\Delta t} = \frac{\vec{v}(t_2) - \vec{v}(t_1)}{t_2 - t_1} ; \text{ son vecteur accélération instantanée à l'instant } (t) \text{ correspond à son}$$

vecteur accélération moyenne entre  $(t_1)$  et  $(t_2)$  lorsque  $\Delta t \rightarrow 0$  :  $\vec{a}_M(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}(t)}{\Delta t}$  ; c'est la dérivée du

vecteur  $\vec{v}(t)$ , qu'on note  $\frac{d\vec{v}(t)}{dt}$ .

$$\Rightarrow \vec{a}_M(t) = \frac{d\vec{v}(t)}{dt}$$

$$= \frac{d}{dt} [v_x(t) \vec{i} + v_y(t) \vec{j} + v_z(t) \vec{k}]$$

$$= \frac{dv_x(t)}{dt} \vec{i} + \frac{dv_y(t)}{dt} \vec{j} + \frac{dv_z(t)}{dt} \vec{k}$$

$$= a_x(t) \vec{i} + a_y(t) \vec{j} + a_z(t) \vec{k}$$

On note aussi  $\vec{a}_M(t) \begin{cases} a_x(t) \\ a_y(t) \\ a_z(t) \end{cases}$

La valeur de l'accélération à un instant donné est alors :  $\|\vec{a}_M(t)\| = \sqrt{a_x^2(t) + a_y^2(t) + a_z^2(t)}$

Rq

$$a_x(t) = \frac{dv_x(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \left[ \frac{dx(t)}{dt} \right] = \frac{d^2x(t)}{dt^2} \text{ (dérivée seconde); de même :}$$

$$a_y(t) = \frac{d^2y(t)}{dt^2}$$

$$a_z(t) = \frac{d^2z(t)}{dt^2}$$

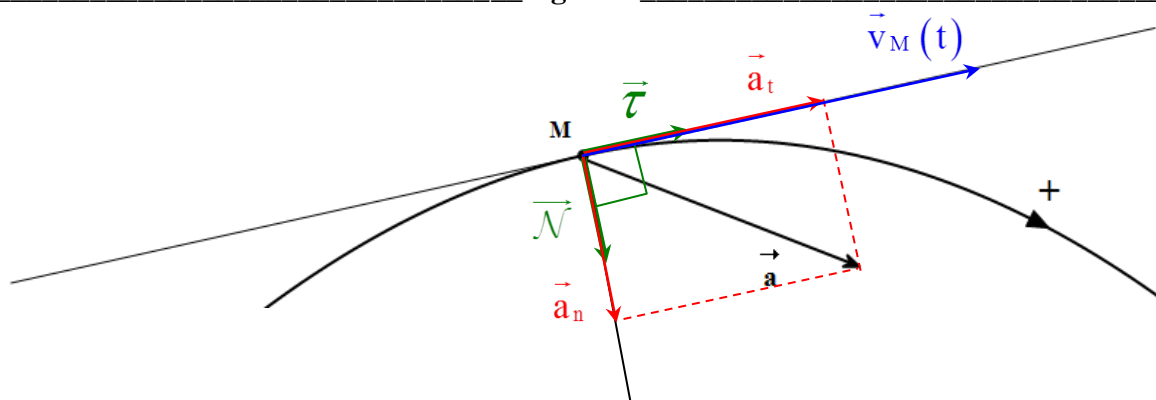
$$\vec{a}_M(t) = \frac{d\vec{v}(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \left[ \frac{d\vec{OM}}{dt} \right] = \frac{d^2\vec{OM}}{dt^2}$$

### c) Cas d'une trajectoire plane (Fig-3)

Il serait plus commode d'exprimer le vecteur  $\vec{a}(t)$  dans un repère local  $(M, \vec{\tau}, \vec{\mathcal{N}})$  lié au point mobile M : repère de Frenet (Jean Frédéric/France), où :

$\vec{\tau}$  : vecteur unitaire tangent à la trajectoire, et orienté dans le sens (+) choisi pour le mouvement  
 $\vec{\mathcal{N}}$  : vecteur unitaire normal ( $\perp$ ) à  $\vec{\tau}$ , et dirigé vers l'intérieur de la concavité de la trajectoire

Figure-3



$$\vec{a}(t) = a_t \vec{\tau} + a_n \vec{\mathcal{N}} \quad \text{et} \quad \vec{v}_M(t) = v \vec{\tau} + 0 \vec{\mathcal{N}}$$

On montre que :  $a_t = \frac{dv}{dt}$  et  $a_n = \frac{v^2}{r}$ , avec  $r$  : rayon de courbure de la trajectoire en M (rayon du cercle auquel  $\in$  l'élément de la trajectoire au voisinage immédiat de M)

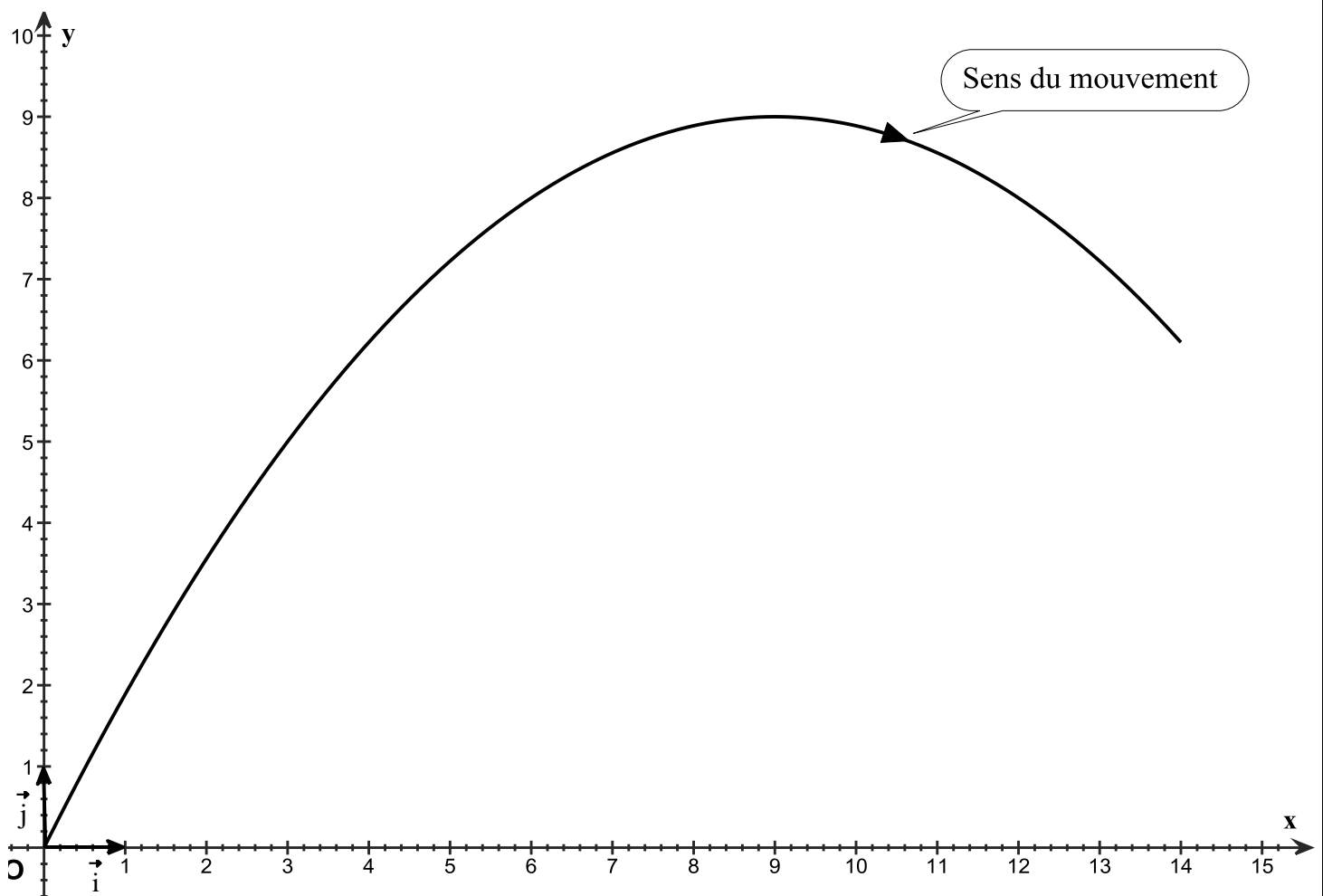
- \*  $\vec{a}_t = a_t \vec{\tau}$  : accélération tangentielle ; renseigne sur le changement de la valeur de la vitesse.
- \*  $\vec{a}_n = a_n \vec{\mathcal{N}}$  : accélération normale ; renseigne sur le changement de la direction de  $\vec{v}_M(t)$  ;  
 $a_n > 0 \Rightarrow \vec{a}_n$  est toujours dirigée vers la concavité de la trajectoire, de même pour  $\vec{a}(t)$ .

### Rq

- \* Cas d'un MCU :  $a_t = \frac{dv}{dt} = 0$  ;  $a_n = \frac{v^2}{r} \neq 0 \Rightarrow \vec{a}(t) = \frac{v^2}{r} \vec{\mathcal{N}} \Rightarrow$  à chaque instant  $\vec{a}$  est radial et centripète : le vecteur vitesse ne change pas de valeur, mais change constamment de direction.
- \* Cas d'un mouvement rectiligne :  $r \rightarrow +\infty \Rightarrow a_n = 0 \Rightarrow \vec{a}(t) = \frac{dv}{dt} \vec{\tau}$  ; porté par la trajectoire.

### Application-2

Le mouvement d'un point mobile **M** est étudié par rapport à un référentiel dont le repère d'espace  $(O, \vec{i}, \vec{j})$  est orthonormé, et l'origine du temps correspond au début du mouvement à l'origine O (figure ci-dessous). Son vecteur vitesse instantanée est  $\vec{v}_M(t) = 3\vec{i} + (-2t + 6)\vec{j}$



1. Déterminer l'expression de son vecteur accélération instantanée.

2. La trajectoire étant *orientée dans le sens du mouvement*, soit  $(M, \vec{T}, \vec{N})$  le repère de Frenet à un instant quelconque :
- Justifier que la composante tangentielle du vecteur vitesse instantanée est  $v = + \|\vec{v}_M(t)\|$ , et écrire son expression.
  - En déduire l'expression de la composante tangentielle de l'accélération
3. On considère le mobile à l'instant de date  $t = 1 \text{ s}$  :
- Déterminer son vecteur position à cet instant.
  - Donner son vecteur vitesse à cet instant; le représenter.
  - Représenter le vecteur accélération du mobile à cet instant.
  - Représenter le repère de Frenet à cet instant, ainsi que les accélérations tangentielle et normale du mobile à cet instant.
  - Calculer la valeur de la composante tangentielle de l'accélération, la valeur de sa composante normale, et la valeur du rayon de courbure de la trajectoire à cet instant.

1.  $\vec{a}_M(t) = a_x(t) \vec{i} + a_y(t) \vec{j}$ , avec :

$$\begin{cases} a_x(t) = \frac{dv_x(t)}{dt} = \frac{d(3)}{dt} = 0 \\ a_y(t) = \frac{dv_y(t)}{dt} = \frac{d(-2t + 6)}{dt} = \frac{d(-2t)}{dt} + \frac{d(6)}{dt} = -2 \frac{d(t)}{dt} + 0 = -2.1 = -2 \text{ m.s}^{-2} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \boxed{\vec{a}_M = -2 \vec{j}}$$

2.

a)

\* La trajectoire étant orientée dans le sens du mouvement, alors  $\vec{T}$  est de même sens que  $\vec{v}_M(t)$   
 $\Rightarrow v > 0$ .

\*  $v = \sqrt{v_x^2(t) + v_y^2(t)} = \sqrt{9 + (-2t + 6)^2}$

$$\begin{aligned} \text{b) } a_t &= \frac{dv}{dt} = \frac{d\sqrt{9 + (-2t + 6)^2}}{dt} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{9 + (-2t + 6)^2}} \cdot \frac{d[9 + (-2t + 6)^2]}{dt} \\ &= \frac{1}{2 \cdot \sqrt{9 + (-2t + 6)^2}} \cdot \left[ \frac{d(9)}{dt} + \frac{d(-2t + 6)^2}{dt} \right] \\ &= \frac{1}{2 \cdot \sqrt{9 + (-2t + 6)^2}} \cdot \left[ 0 + 2 \cdot (-2t + 6) \frac{d(-2t + 6)}{dt} \right] \\ &= \frac{1}{2 \cdot \sqrt{9 + (-2t + 6)^2}} \cdot \left[ \cancel{2} \cdot (-2t + 6) \left( \frac{d(-2t)}{dt} + \frac{d(6)}{dt} \right) \right] \\ &= \frac{1}{\sqrt{9 + (-2t + 6)^2}} \cdot \left[ (-2t + 6) \left( -2 \cdot \frac{d(t)}{dt} + 0 \right) \right] \\ &= \frac{1}{\sqrt{9 + (-2t + 6)^2}} \cdot [(-2t + 6)(-2)] \end{aligned}$$

$$\boxed{a_t = \frac{4t - 12}{\sqrt{9 + (-2t + 6)^2}}}$$

3.

 a)  $\vec{OM}(t) = x(t) \vec{i} + y(t) \vec{j}$ , avec :

$$\begin{cases} v_x(t) = \frac{dx(t)}{dt} \Rightarrow x(t) = \int v_x(t).dt = \int 3.dt = 3t + Cte; \text{ on a } x(t=0) = 0, \text{ alors } Cte = 0 : x(t) = 3t \\ v_y(t) = \frac{dy(t)}{dt} \Rightarrow y(t) = \int v_y(t).dt = \int (-2t + 6).dt = \frac{1}{2} \cdot (-2).t^2 + 6t + Cte; \text{ on a } y(t=0) = 0, \\ \text{alors } Cte = 0 : y(t) = -t^2 + 6t \end{cases}$$

D'où  $\vec{OM}(t) = (3t) \vec{i} + (-t^2 + 6t) \vec{j} \Rightarrow \boxed{\vec{OM}(t=1s) = 3 \vec{i} + 5 \vec{j}}$

b)  $\boxed{\vec{v}_M(t=1s) = 3 \vec{i} + 4 \vec{j}}$

c)

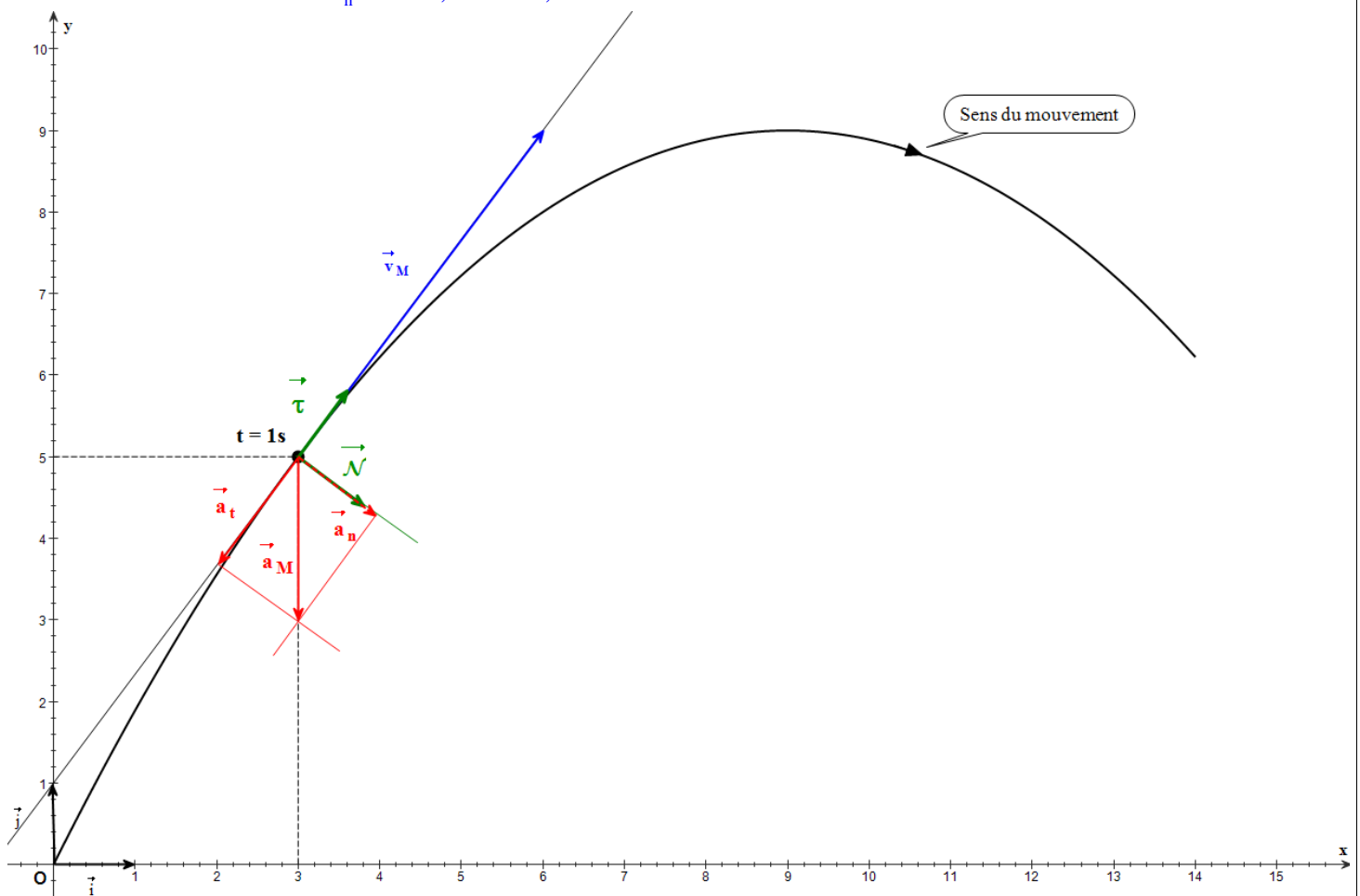
d)

 e) Pour  $t = 1s$ 

$$* a_t = \frac{4 - 12}{\sqrt{9 + (-2 + 6)^2}} = \frac{-8}{\sqrt{9 + 16}}; \boxed{a_t = -1,6 \text{ m.s}^{-2}} \text{ (la valeur de la vitesse est en train de diminuer)}$$

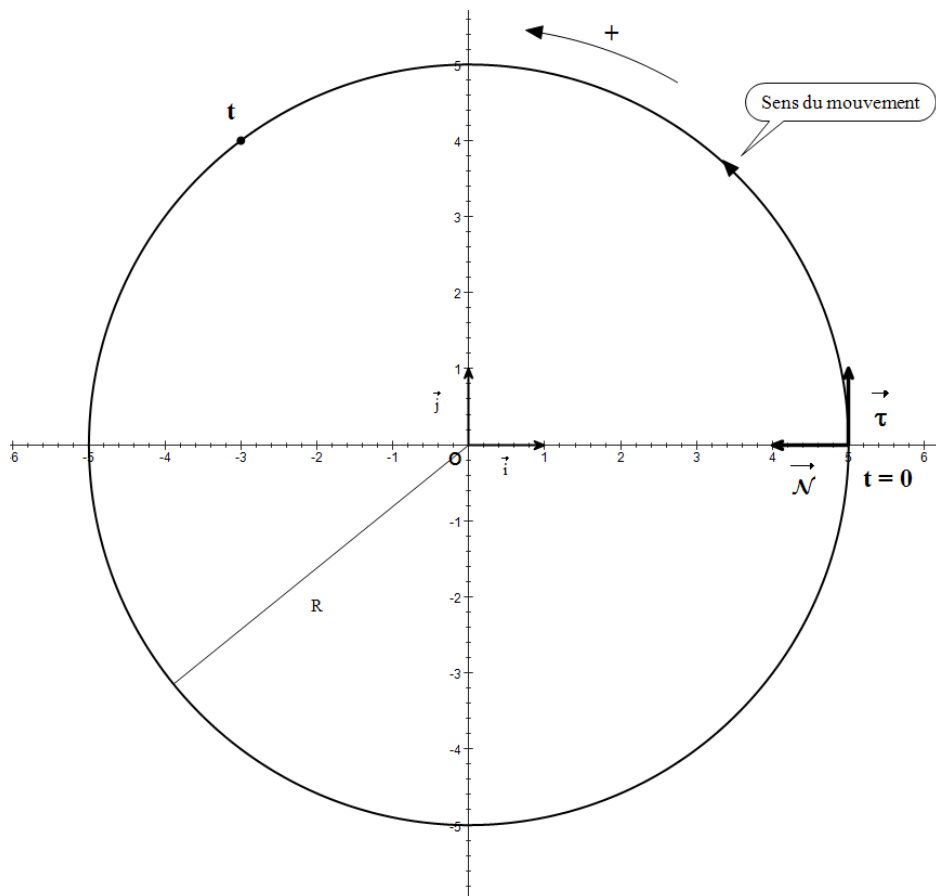
$$* \|\vec{a}_M\|^2 = a_t^2 + a_n^2 \Rightarrow a_n^2 = \|\vec{a}_M\|^2 - a_t^2 = 2^2 - (-1,6)^2 = 1,44 \Rightarrow \boxed{a_n = 1,2 \text{ m.s}^{-2}}$$

$$* a_n = \frac{v^2}{r} \Rightarrow r = \frac{v^2}{a_n} = \frac{3^2 + 4^2}{1,2} = \frac{25}{1,2}; \boxed{r = 20,8 \text{ m}}$$



**Application-3**

Un point mobile **M** est en MCU par rapport à un repère d'espace  $(O, \vec{i}, \vec{j})$ , l'origine du temps et le sens positif de rotation étant choisis comme le montre la figure ci-dessous.



Le rayon de la trajectoire est  $R = 5 \text{ cm}$ , et la valeur de la vitesse  $V = 5 \text{ m.s}^{-1}$

1. Calculer les valeurs des composantes tangentielle ( $a_t$ ) et normale ( $a_n$ ) de son vecteur accélération instantanée.
2. On considère le mobile à l'origine des dates :
  - a) Représenter son vecteur vitesse  $\vec{v}_M(t=0)$ , à l'échelle  $1 \text{ m.s}^{-1} \rightarrow 1 \text{ cm}$ .
  - b) Représenter son vecteur accélération  $\vec{a}_M(t=0)$ , à l'échelle  $250 \text{ m.s}^{-2} \rightarrow 1 \text{ cm}$ .
3. On considère le mobile à un instant de date ( $t$ ) quelconque :
  - a) Représenter le repère de Frenet à cet instant.
  - b) Représenter son vecteur vitesse  $\vec{v}_M(t)$ , à la même échelle  $1 \text{ m.s}^{-1} \rightarrow 1 \text{ cm}$ .
  - c) Représenter son vecteur accélération  $\vec{a}_M(t)$ , à la même échelle  $250 \text{ m.s}^{-2} \rightarrow 1 \text{ cm}$ .
4. Commenter.

1.
  - \*  $a_t = \frac{dv}{dt} = 0$ , car la valeur de la vitesse est constante pour un MCU.
  - \*  $a_n = \frac{v^2}{r} = \frac{V^2}{R} = \frac{5^2}{5 \cdot 10^{-2} \text{ m}} = 500 \text{ m.s}^{-2}$  : constante

2.
  - a)
  - b)  $\vec{a}_M(t=0) = \underbrace{a_t(t=0)}_0 \vec{\tau} + a_n(t=0) \vec{\mathcal{N}} = a_n \vec{\mathcal{N}}$

3.

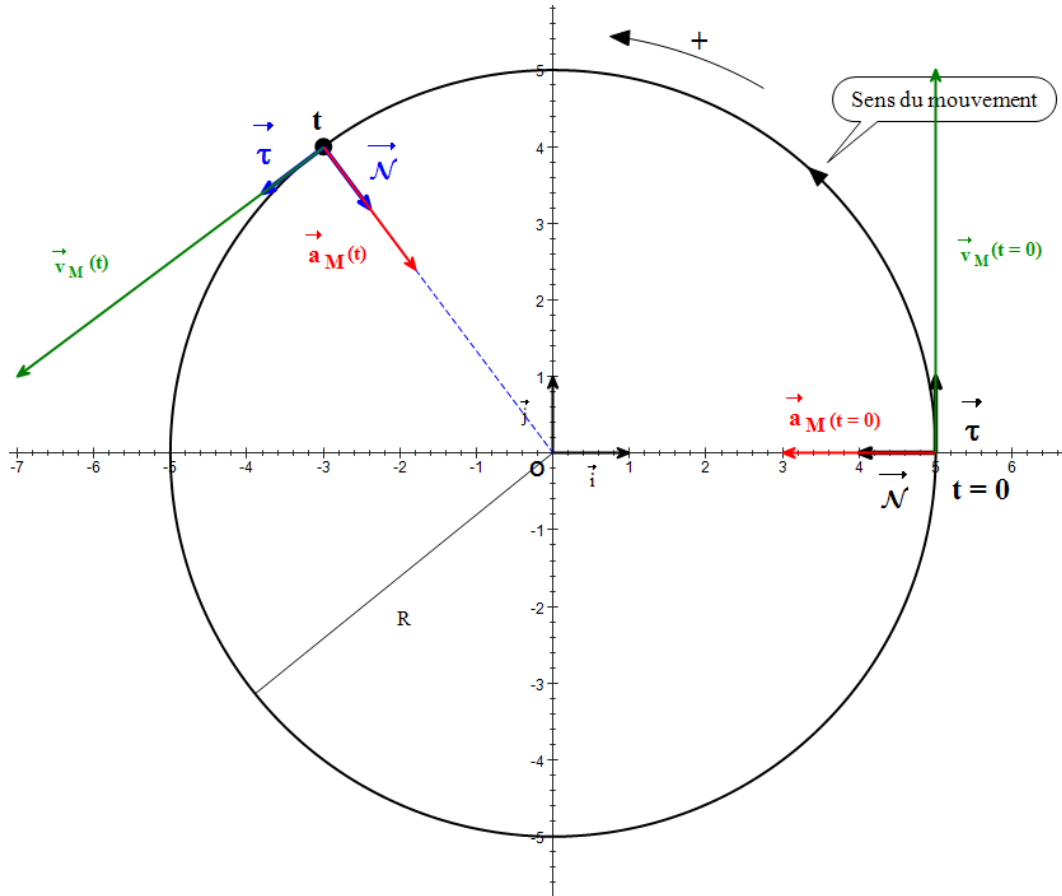
a)

b)

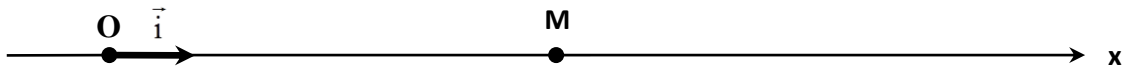
c)  $\vec{a}_M(t) = a_t(t) \vec{\tau} + a_n(t) \vec{\mathcal{N}} = a_n \vec{\mathcal{N}}$

4.

- \* Pour un MCU ;  $\vec{a} \neq \vec{0}$  malgré que la vitesse ne change pas de valeur : le vecteur accélération traduit la variation du vecteur vitesse dans son ensemble, et pas seulement sa valeur.
- \* Pour un MCU ;  $\vec{v}$  change seulement de direction, ce qui se traduit par une accélération réduite à sa composante normale.



### III- Cas particuliers de mouvements rectilignes



Un référentiel étant choisi, avec  $(O, \vec{i})$  comme repère d'espace ;

$$\overrightarrow{OM}(t) = x(t) \vec{i}$$

$$\vec{v}_M(t) = v_x(t) \vec{i} = v(t) \vec{i}; \text{ avec } v(t) = \frac{dx(t)}{dt}$$

$$\vec{a}_M(t) = a_x(t) \vec{i} = a(t) \vec{i}; \text{ avec } a(t) = \frac{dv(t)}{dt}$$

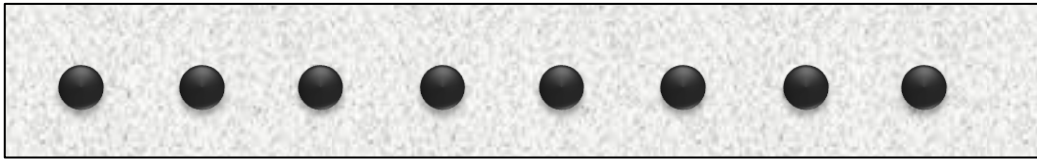


## 1) Mouvement Rectiligne Uniforme (MRU)

### Activité-1

Un point mobile  $M$  est dit en Mouvement Rectiligne Uniforme (MRU) par rapport à un repère d'espace  $(O, \vec{i})$ , si son vecteur vitesse  $\vec{v}_M(t)$  est constant au cours du temps ; une origine du temps étant choisie, soit  $x_0$  l'abscisse initiale du mobile (à l'origine des dates,  $t = 0$ ), et  $\vec{v}_0$  son vecteur vitesse initial.

- Déterminer son vecteur accélération instantanée.
- Montrer que l'équation horaire du mobile s'écrit  $x(t) = v_0 t + x_0$



Chronophotographie d'une bille en MRU

- $\vec{a}_M(t) = \frac{d\vec{v}_M(t)}{dt} = \vec{0}$ , car  $\vec{v}_M(t)$  est constant
- $\vec{v}_M(t) = \vec{v}_0 = v_0 \vec{i}$ ; on a  $v_0 = \frac{dx(t)}{dt}$ , alors  $x(t) = \int v_0 dt = v_0 t + Cte$   
On a  $x(t=0) = x_0 \Rightarrow Cte = x_0$ ; d'où  $x(t) = v_0 t + x_0$

## 2) Mouvement rectiligne uniformément varié

### Activité-2

Un point mobile  $M$  est dit en Mouvement Rectiligne Uniformément varié par rapport à un repère d'espace  $(O, \vec{i})$ , si son mouvement est uniformément Accéléré (MRUA) ou uniformément Retardé (MRUR) ; dans les deux cas son vecteur accélération est constant au cours du temps, et non nul ;  $\vec{a}_M(t) = a \vec{i}$ , avec  $a$  constante. Une origine du temps étant choisie, soit  $x_0$  l'abscisse initiale du mobile et  $v_0$  sa vitesse initiale :

- Montrer que  $v(t) = a t + v_0$
- Montrer que l'équation horaire du mobile s'écrit  $x(t) = \frac{1}{2} a t^2 + v_0 t + x_0$
- Considérons deux instants quelconques de dates  $t_1$  et  $t_2$ ; soient  $\begin{cases} x_1 = x(t=t_1) \\ x_2 = x(t=t_2) \end{cases}$  et  $\begin{cases} v_1 = v(t=t_1) \\ v_2 = v(t=t_2) \end{cases}$ ,  
montrer que  $v_2^2 - v_1^2 = 2 a (x_2 - x_1)$
- Dans le cas d'un MRUA, montrer que  $v a \geq 0$ , comment sont les vecteurs  $\vec{a}$  et  $\vec{v}_M(t)$ .
- Dans le cas d'un MRUR, montrer que  $v a \leq 0$ , comment sont les vecteurs  $\vec{a}$  et  $\vec{v}_M(t)$ .



Chronophotographie d'une bille en MRUA



Chronophotographie d'une bille en MRUR

1.  $a = \frac{dv(t)}{dt}$ , alors  $v(t) = \int a dt = a t + Cte$ . On a  $v(t=0) = v_0 \Rightarrow Cte = v_0$ ; d'où  $v(t) = a t + v_0$

2.  $v(t) = \frac{dx(t)}{dt}$ , alors  $x(t) = \int v(t) dt = \int (a t + v_0) dt = \int (a t) dt + \int v_0 dt = \frac{1}{2} a t^2 + v_0 t + Cte$

On a  $x(t=0) = x_0 \Rightarrow Cte = x_0$ ; d'où  $x(t) = \frac{1}{2} a t^2 + v_0 t + x_0$

3. On a  $\begin{cases} x_1 = \frac{1}{2} a t_1^2 + v_0 t_1 + x_0 \\ x_2 = \frac{1}{2} a t_2^2 + v_0 t_2 + x_0 \end{cases}$  et  $\begin{cases} v_1 = a t_1 + v_0 \\ v_2 = a t_2 + v_0 \end{cases}$ , alors :

$$\begin{aligned} v_2^2 - v_1^2 &= (a t_2 + v_0)^2 - (a t_1 + v_0)^2 \\ &= (a^2 t_2^2 + 2 a t_2 v_0) - (a^2 t_1^2 + 2 a t_1 v_0) \\ &= (a^2 t_2^2 + 2 a t_2 v_0) - (a^2 t_1^2 + 2 a t_1 v_0) \\ &= 2 a \left[ \left( \frac{1}{2} a t_2^2 + t_2 v_0 \right) - \left( \frac{1}{2} a t_1^2 + t_1 v_0 \right) \right] \\ &= 2 a \left[ \underbrace{\left( \frac{1}{2} a t_2^2 + t_2 v_0 + x_0 \right)}_{x_2} - \underbrace{\left( \frac{1}{2} a t_1^2 + t_1 v_0 + x_0 \right)}_{x_1} \right] \text{ d'où : } v_2^2 - v_1^2 = 2 a (x_2 - x_1) \end{aligned}$$

4. Pour un MRUA, la valeur de la vitesse augmente au cours du temps  $\Rightarrow v^2$  augmente au cours du temps  $\Rightarrow$

$$\frac{d(v^2)}{dt} > 0 \Rightarrow 2 v \frac{dv}{dt} > 0 \Rightarrow 2 v a > 0 \Rightarrow v a > 0, \text{ et pour tenir compte du cas où le mobile}$$

commence son mouvement à partir du repos ( $v = 0$ ) :  $v a \geq 0 \Rightarrow$

$\vec{a}$  est de même sens que  $\vec{v}_M(t)$ , sens du mouvement.

5. Pour un MRUR, la valeur de la vitesse diminue au cours du temps  $\Rightarrow v^2$  diminue au cours du temps  $\Rightarrow$

$$\frac{d(v^2)}{dt} < 0 \Rightarrow 2 v \frac{dv}{dt} < 0 \Rightarrow 2 v a < 0 \Rightarrow v a < 0, \text{ et pour tenir compte du cas où le mobile finit}$$

par s'arrêter ( $v = 0$ ) :  $v a \leq 0 \Rightarrow \vec{a}$  est opposé à  $\vec{v}_M(t)$ , opposé au sens du mouvement.

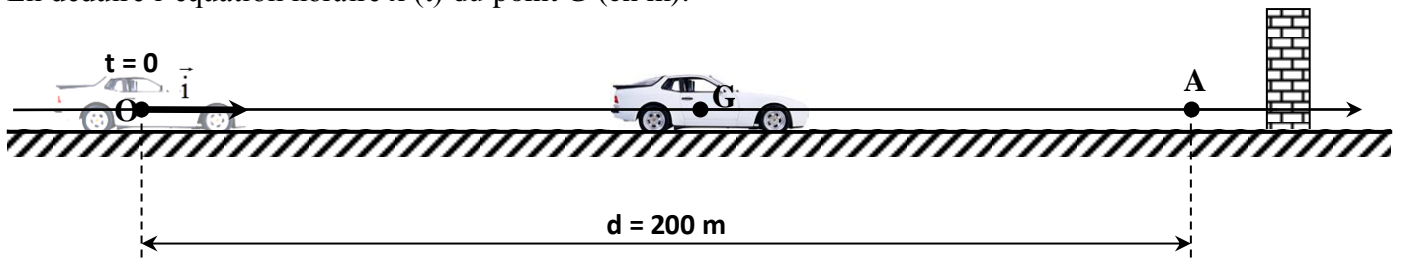
**Application-4**

La figure ci-dessous représente une voiture roulant sur une route horizontale ; on s'intéressera au mouvement de son centre d'inertie **G** par rapport au repère d'espace  $(O, \vec{i})$  fixe par rapport à la route, et on considère comme *origine du temps l'instant de passage par la position O*.

A l'origine des dates, le conducteur actionne ses freins dans le but d'arrêter son véhicule avant de l'atteindre un obstacle qu'il vient d'apercevoir sur la route. (On supposera que le freinage est régulier).

Avant cela, la voiture roulait à une vitesse constante  $v_0 = 180 \text{ Km.h}^{-1}$ .

1. Quelle est la nature du mouvement pour  $t < 0$  ; donner la valeur de son accélération, ainsi que son équation horaire (en m).
2. Quelle est la nature du mouvement pour  $t \geq 0$  ; donner le sens de son accélération  $\vec{a}$  par rapport à celui de sa vitesse  $\vec{v}(t)$ .
3. Soit **a** la valeur algébrique de l'accélération de la voiture pour  $t \geq 0$ ; calculer la valeur qu'elle devrait avoir pour que le conducteur soit à peine sauvé (la voiture s'arrête au point A immédiatement avant de toucher l'obstacle)
4. Déterminer l'expression (en  $\text{ms}^{-1}$ ) de la mesure algébrique de la vitesse instantanée  $v(t)$  au cours du freinage; en déduire la durée du freinage.
5. En déduire l'équation horaire  $x(t)$  du point G (en m).

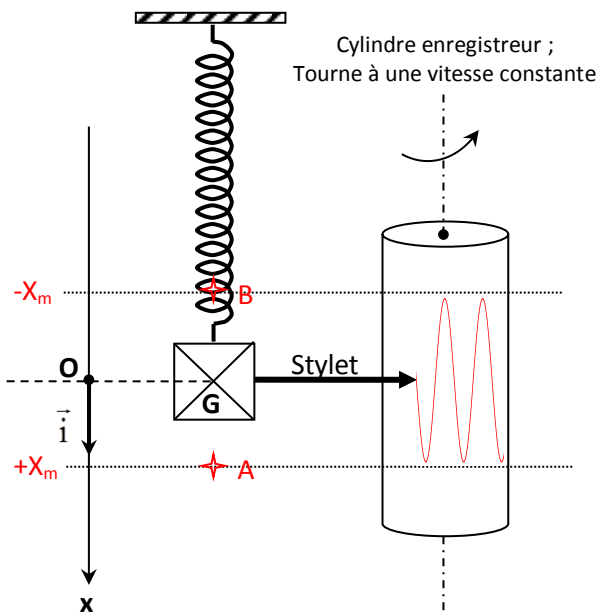


1.
  - \* MRU :  $a = 0$
  - \*  $x(t) = v_0 t + x_0 : \begin{cases} x_0 = x(t=0) = 0 \\ v_0 = 180 \text{ Km.h}^{-1} = 180 \cdot \frac{1}{3,6} \text{ m.s}^{-1} = 50 \text{ m.s}^{-1} \Rightarrow x(t) = 50 t \end{cases}$ , avec t en s
2. MRUR :  $\vec{a}$  est opposé à  $\vec{v}(t)$ .
3. Entre les points O et A :  $v_A^2 - v_O^2 = 2 a (x_A - x_O)$   
 $\Rightarrow 0 - v_0^2 = 2 a d \Rightarrow a = - \frac{v_0^2}{2 d} = - \frac{50^2}{2 \cdot 200} : a = -6,25 \text{ m.s}^{-2}$
4.
  - \*  $v(t) = a t + v_0 \Rightarrow v(t) = -6,25 t + 50$ , avec t en s
  - \* Soit  $t_F$  la durée du freinage :  
 $v(t = t_F) = 0 \Rightarrow -6,25 t_F + 50 = 0 \Leftrightarrow 6,25 t_F = 50 \Rightarrow t_F = \frac{50}{6,25} : t_F = 8 \text{ s}$
5.  $x(t) = \frac{1}{2} a t^2 + v_0 t + x_0 = \frac{1}{2} (-6,25) t^2 + 50 t + 0 : x(t) = -3,125 t^2 + 50 t$ , avec t en s

### 3) Mouvement rectiligne sinusoïdal

#### a) Exemple : oscillations d'un pendule élastique (Fig-4)

Figure-4



- ❖ On écarte le solide de sa position d'équilibre, jusqu'à une position où son centre de gravité G ait l'abscisse  $X_m$ . Ensuite on l'abandonne à lui-même sans vitesse initiale : il effectue un mouvement d'oscillation entre deux positions extrêmes A et B d'abscisses  $+X_m$  et  $-X_m$  respectivement.
- ❖ Soit  $x(t)$  l'abscisse de G à un instant  $(t)$  quelconque ; l'enregistrement graphique montre que  $x(t)$  varie sinusoïdalement entre  $-X_m$  et  $+X_m$ , au cours du temps : G est en mouvement rectiligne sinusoïdal sur le segment [AB].

#### b) Définition

Un point mobile est dit en mouvement rectiligne sinusoïdal, si :

- \* Sa trajectoire est un segment de droite [AB].
- \* Son équation horaire dans un repère  $(O, \vec{i})$  porté par la trajectoire, avec  $O = A * B$  ; est de la forme :

$$\text{Elongation instantanée (m)} \rightarrow x(t) = X_m \sin(\omega t + \varphi_x)$$

Pulsation ( $\text{rad.s}^{-1}$ )
Phase initiale (rad)

Amplitude (m)

On appelle phase instantanée la fonction  $\Phi(t) = \omega t + \varphi_x$ , exprimée en rad

#### c) Périodicité

- \* Ce mouvement est dit périodique car il se répète identiquement à des intervalles de temps égaux (T).
- \*  $T = \frac{2\pi}{\omega} \Rightarrow \omega = \frac{2\pi}{T} \Rightarrow x(t) = X_m \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_x\right)$
- \*  $N = \frac{1}{T}$  : nombre d'oscillations par seconde (fréquence, en Hz)

#### d) Grandeurs cinématiques

- \* Vecteur position :  $\overrightarrow{OM}(t) = x(t) \vec{i}$
- \* Vecteur vitesse :  $\vec{v}_M(t) = v(t) \vec{i}$ ; avec  $v(t) = \frac{dx(t)}{dt} = \frac{d}{dt} [X_m \sin(\omega t + \varphi_x)]$   

$$= X_m \cdot \frac{d}{dt} [\sin(\omega t + \varphi_x)]$$
  

$$v(t) = X_m \omega \cdot \cos(\omega t + \varphi_x)$$

$$\begin{aligned}
 &= X_m \omega \cdot \sin \left( \omega t + \underbrace{\varphi_x + \frac{\pi}{2}} \right) \\
 \text{m.s}^{-1} \rightarrow v(t) &= \underbrace{V_m}_{\text{m.s}^{-1}} \cdot \sin(\omega t + \underbrace{\varphi_v}_{\text{rad}})
 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \begin{cases}
 \text{- La valeur de la vitesse est maximale au passage par la position d'équilibre : } x = 0 \Rightarrow \sin(\omega t + \varphi_x) = 0 \\
 \Leftrightarrow \cos(\omega t + \varphi_x) = \pm 1 \Rightarrow v = \pm V_m \\
 \text{- La vitesse est nulle au retour des positions extrêmes : } x = \pm X_m \Rightarrow \sin(\omega t + \varphi_x) = \pm 1 \\
 \Leftrightarrow \cos(\omega t + \varphi_x) = 0 \Rightarrow v = 0
 \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Rq } \frac{v(t)}{\omega} = X_m \cdot \cos(\omega t + \varphi_x) &\Rightarrow \left( \frac{v}{\omega} \right)^2 + x^2 = X_m^2 \cdot \cos^2(\omega t + \varphi_x) + X_m^2 \cdot \sin^2(\omega t + \varphi_x) \\
 &= X_m^2 \cdot \underbrace{[\cos^2(\omega t + \varphi_x) + \sin^2(\omega t + \varphi_x)]}_1
 \end{aligned}$$

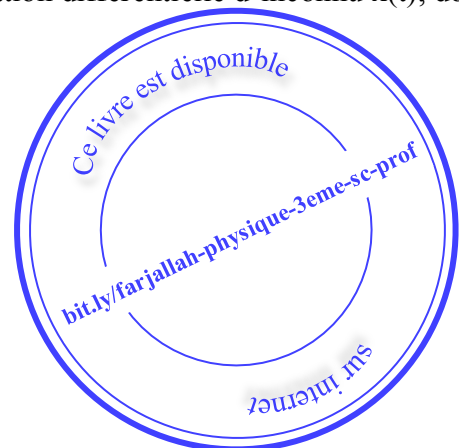
$$\boxed{\left( \frac{v}{\omega} \right)^2 + x^2 = X_m^2}$$

⇒ Plus le solide s'éloigne de sa position d'équilibre, plus la valeur de sa vitesse diminue et inversement.

$$\begin{aligned}
 * \text{ Vecteur accélération : } \vec{a}(t) &= a(t) \vec{i}; \text{ avec } a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d}{dt} [ X_m \omega \cdot \cos(\omega t + \varphi_x) ] \\
 &= X_m \omega \cdot \frac{d}{dt} [\cos(\omega t + \varphi_x)] \\
 a(t) &= -X_m \omega^2 \cdot \sin(\omega t + \varphi_x) = -\omega^2 x(t) \\
 &= \underbrace{X_m \omega^2}_{\text{m.s}^{-2}} \cdot \sin \left( \omega t + \underbrace{\varphi_x + \pi}_{\text{rad}} \right) \\
 \text{m.s}^{-2} \rightarrow a(t) &= \underbrace{A_m}_{\text{m.s}^{-2}} \cdot \sin(\omega t + \underbrace{\varphi_a}_{\text{rad}})
 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \begin{cases}
 \text{- L'accélération est nulle au passage par la position d'équilibre : } x = 0 \Rightarrow a = 0 \\
 \text{- La valeur de l'accélération est maximale au retour des positions extrêmes : } x = \pm X_m \\
 \Rightarrow \sin(\omega t + \varphi_x) = \pm 1 \Rightarrow a = \pm A_m
 \end{cases}$$

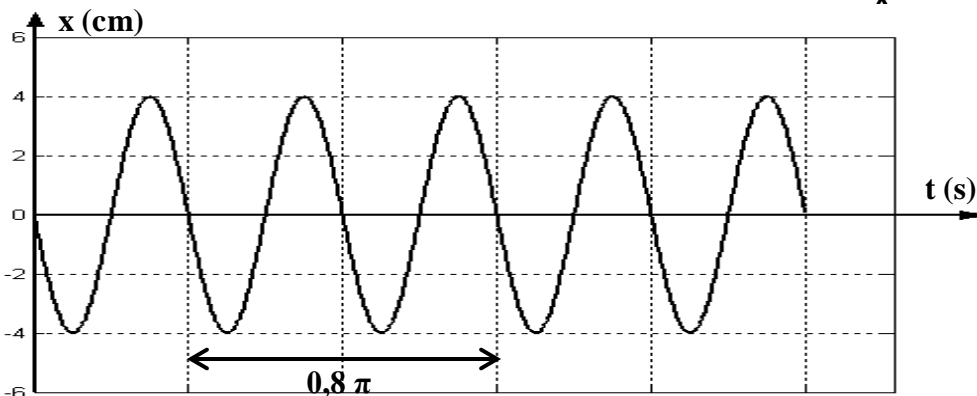
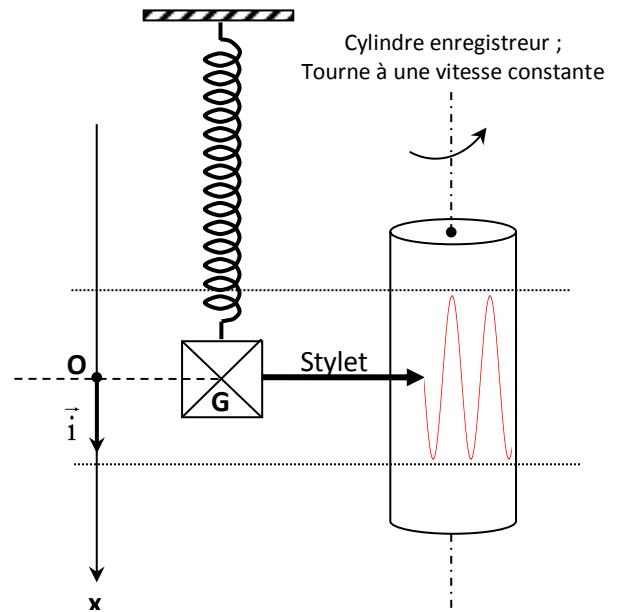
$$\text{Rq } a = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{dx}{dt} \right) = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 x \Rightarrow \boxed{\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0} : \text{équation différentielle d'inconnu } x(t), \text{ dot la solution est toute fonction de la forme } x(t) = X_m \sin(\omega t + \varphi_x).$$



**Application-5**

Le dispositif de la figure ci-contre permet de réaliser l'enregistrement graphique du mouvement, par rapport à un repère de laboratoire  $(O, \vec{i})$ , du centre de gravité d'un solide suspendu à un ressort ; on obtient le graphe ci-dessous :

- Déterminer la valeur de l'amplitude du mouvement.
- Déterminer la valeur de sa période, et de sa fréquence.
- Déterminer la valeur de la phase initiale  $\varphi_x$ .
- Écrire l'équation horaire du mouvement, **en cm**.
- En déduire la vitesse instantanée du mobile **en m.s<sup>-1</sup>**, donner la valeur de son amplitude.
- En déduire l'accélération instantanée du mobile, donner la valeur de son amplitude.



1.  $X_m = 4 \text{ cm} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ m}$

2.  $T = 0,8 \cdot \pi \text{ (s)} \Rightarrow T = 0,4 \cdot \pi \text{ (s)} \Rightarrow N = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,4 \cdot \pi} \approx 0,8 \text{ Hz}$

3.  $x(t) = X_m \sin(\omega t + \varphi_x)$ ; d'après le graphe :  $x(0) = 0$ , alors  $\sin(\varphi_x) = 0 \Rightarrow \varphi_x = 0$  ou  $\pi \text{ rad}$

or d'après le graphe :  $\left(\frac{dx(t)}{dt}\right)_{t=0} < 0$  (fonction décroissante à  $t=0$ )

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{d}{dt}[X_m \sin(\omega t + \varphi_x)] = X_m \omega \cdot \cos(\omega t + \varphi_x) \Rightarrow \left(\frac{dx(t)}{dt}\right)_{t=0} = X_m \omega \cos(\varphi_x)$$

$\Rightarrow$  puisque  $X_m > 0$  et  $\omega > 0$ ; il faut que :  $\cos(\varphi_x) < 0$ , alors  $\varphi_x = \pi \text{ rad}$

4.  $\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{0,4 \cdot \pi} = 5 \text{ rad.s}^{-1} \Rightarrow x(t) = 4 \sin(5t + \pi)$ ; avec  $x$  en cm et  $t$  en s

5.  $v(t) = \frac{dx(t)}{dt} = \frac{d}{dt}[4 \cdot 10^{-2} \sin(5t + \pi)] = 4 \cdot 10^{-2} \cdot 5 \cdot \cos(5t + \pi) = 0,2 \sin\left(5t + \pi + \frac{\pi}{2}\right)$

$\Rightarrow v(t) = 0,2 \sin\left(5t + \frac{3\pi}{2}\right)$ ; avec  $v$  en  $\text{m.s}^{-1}$  et  $t$  en s.  $V_m = 0,2 \text{ m.s}^{-1}$

6.  $a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d}{dt}\left[0,2 \sin\left(5t + \frac{3\pi}{2}\right)\right] = 0,2 \cdot 5 \cos\left(5t + \frac{3\pi}{2}\right) = 1 \sin\left(5t + \frac{3\pi}{2} + \frac{\pi}{2}\right)$

$\Rightarrow a(t) = \sin(5t)$ , avec  $a$  en  $\text{m.s}^{-2}$  et  $t$  en s.  $A_m = 1 \text{ m.s}^{-2}$

## TP 3 : Etude expérimentale d'un MRUA : La chute libre

### Objectifs :

- Mesurer la durée de temps que met une bille en chute libre sans vitesse initiale pour parcourir différentes distances.
- Reconnaître, à partir des résultats, la nature du mouvement d'un corps en chute libre.
- Déterminer la valeur de l'accélération d'un corps en chute libre.

### Matériel :

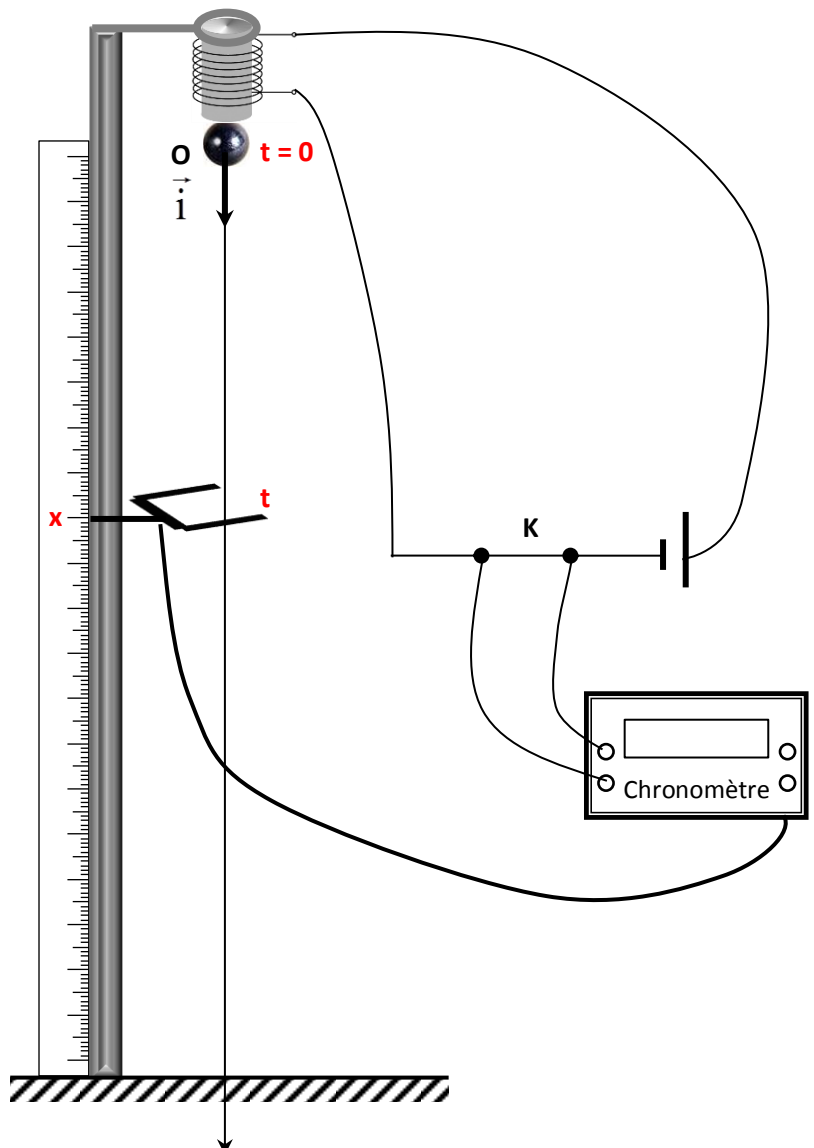
- 1 Ensemble pour l'étude de la chute libre
- 1 Bille en acier.
- 1 Chronomètre automatique.
- 1 Capteur mesureur de temps.
- 1 Générateur de tension (6V).
- 1 Interrupteur
- 10 Fils de connexion.

### Manipulation :

#### 1. Expérience

Le mouvement de la bille, assimilée à un point mobile, est étudié par rapport au repère d'espace  $(O, \vec{i})$  fixe par rapport à la Terre, et on choisit comme origine du temps le début du mouvement en O. (référentiel de laboratoire)

- \* La bille en acier est retenue à sa position de départ par l'électroaimant, tant que ce dernier est alimenté par le générateur.
- \* L'ouverture de l'interrupteur (K) prive l'électroaimant du courant, d'où il lâche la bille. Et en même temps cela déclenche le chronomètre automatique.
- \* Le passage de la bille à travers le capteur, provoque l'arrêt du chronomètre : il vient de mesurer la durée (t) pendant laquelle la bille, en chute libre, a parcouru la distance (x).



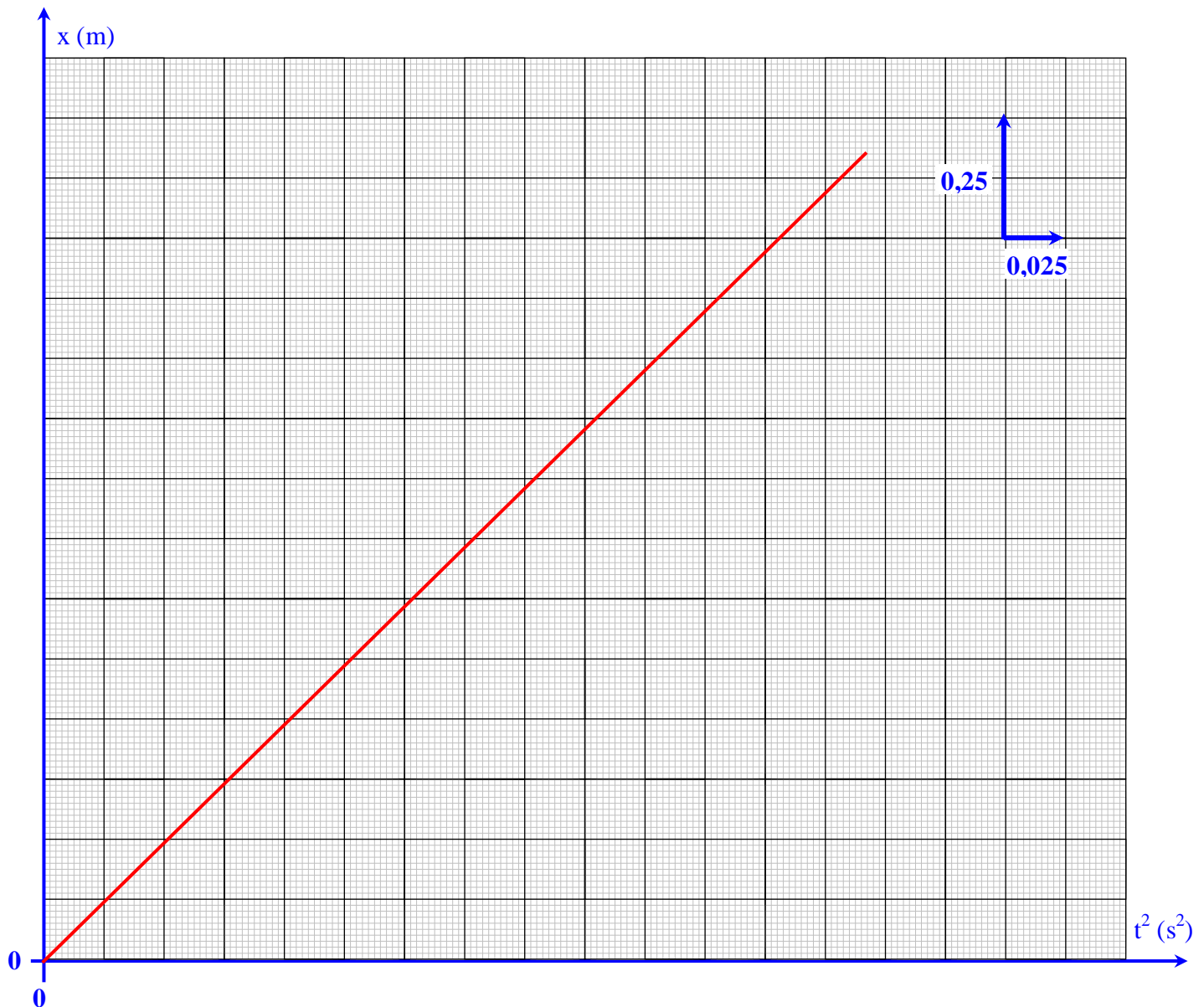
#### 2. Résultats

<b>x (cm)</b>	0	25	50	75	100	150
<b>x (m)</b>	0	0,25	0,5	0,75	1	1,5
<b>t (s)</b>	0	0,226	0,320	0,391	0,452	0,553
<b>t<sup>2</sup> (s<sup>2</sup>)</b>	0	0,051	0,102	0,153	0,204	0,306



### 3. Exploitation des résultats

Tracer la courbe  $x = f(t^2)$  selon les échelles :  $\begin{cases} 0,025 \text{ s}^2 \rightarrow 1 \text{ cm} \\ 0,25 \text{ m} \rightarrow 2 \text{ cm} \end{cases}$



### 4. Interprétation

$x(t)$  est une fonction linéaire :

$$x = \text{Cte} \cdot t^2, \text{ avec } \text{Cte} = \frac{x}{t^2} = \frac{1 \text{ m}}{0,204 \text{ s}^2} = 4,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} : \text{coefficient directeur de la droite}$$

$$\Rightarrow x(t) = 4,9 t^2 \Rightarrow v(t) = \frac{dx(t)}{dt} = 2 \cdot 4,9 t = 9,8 t \Rightarrow a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

L'accélération est constante, alors le mouvement est rectiligne uniformément varié.

D'autre part  $a \cdot v > 0$ , alors c'est un MRUA.

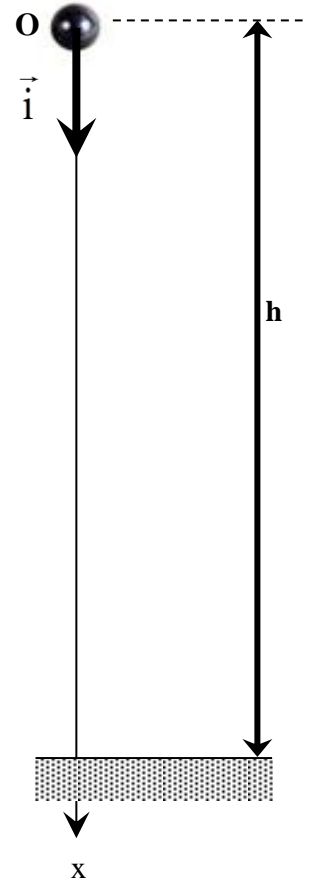
### 5. Conclusion

La chute libre est un MRUA, vertical, dont le vecteur accélération est  $\vec{a} = a \vec{i}$ , avec  $a \simeq 9,8 \text{ ms}^{-2}$ , et  $\vec{i}$  vertical vers le bas.

**Application**

Une bille assimilée à un point matériel est abandonnée à l'origine des dates sans vitesse initiale depuis une position O situé à une hauteur **h** du sol, comme le montre la figure ci-contre.

Le mouvement est étudié par rapport à un repère de laboratoire  $(O, \vec{i})$



1. Quelle est la nature de son mouvement, donner la valeur algébrique de son accélération.
2. Sachant que la bille arrive au sol à la date  $t_{\text{sol}} = 3 \text{ s}$  ; calculer la valeur algébrique de sa vitesse à l'arrivée au sol ( $v_{\text{sol}}$ ).
3. Donner son équation horaire ; calculer la valeur de la hauteur **h**.
4. Retrouver la valeur de ( $v_{\text{sol}}$ ) d'une autre façon.
5. Calculer la valeur algébrique de la vitesse ( $v_{1/2}$ ) de la bille quand elle aurait parcouru la moitié de la hauteur **h**, ainsi que la date ( $t_{1/2}$ ) de son passage par cette position.

1. MRUA ;  $a = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$

2.  $v(t) = a t + v_0$ , avec  $v_0 = 0$

$$v(t) = a t \Rightarrow \text{au sol : } v_{\text{sol}} = a t_{\text{sol}} = 9,8 \cdot 3 = 29,4 \text{ m.s}^{-1}$$

3.  $x(t) = \frac{1}{2} a t^2 + v_0 t + x_0$ , avec  $v_0 = 0$  et  $x_0 = 0$

$$x(t) = \frac{1}{2} a t^2 \Rightarrow \text{au sol : } h = \frac{1}{2} a t_{\text{sol}}^2 = \frac{1}{2} \cdot 9,8 \cdot 3^2 = 44,1 \text{ m}$$

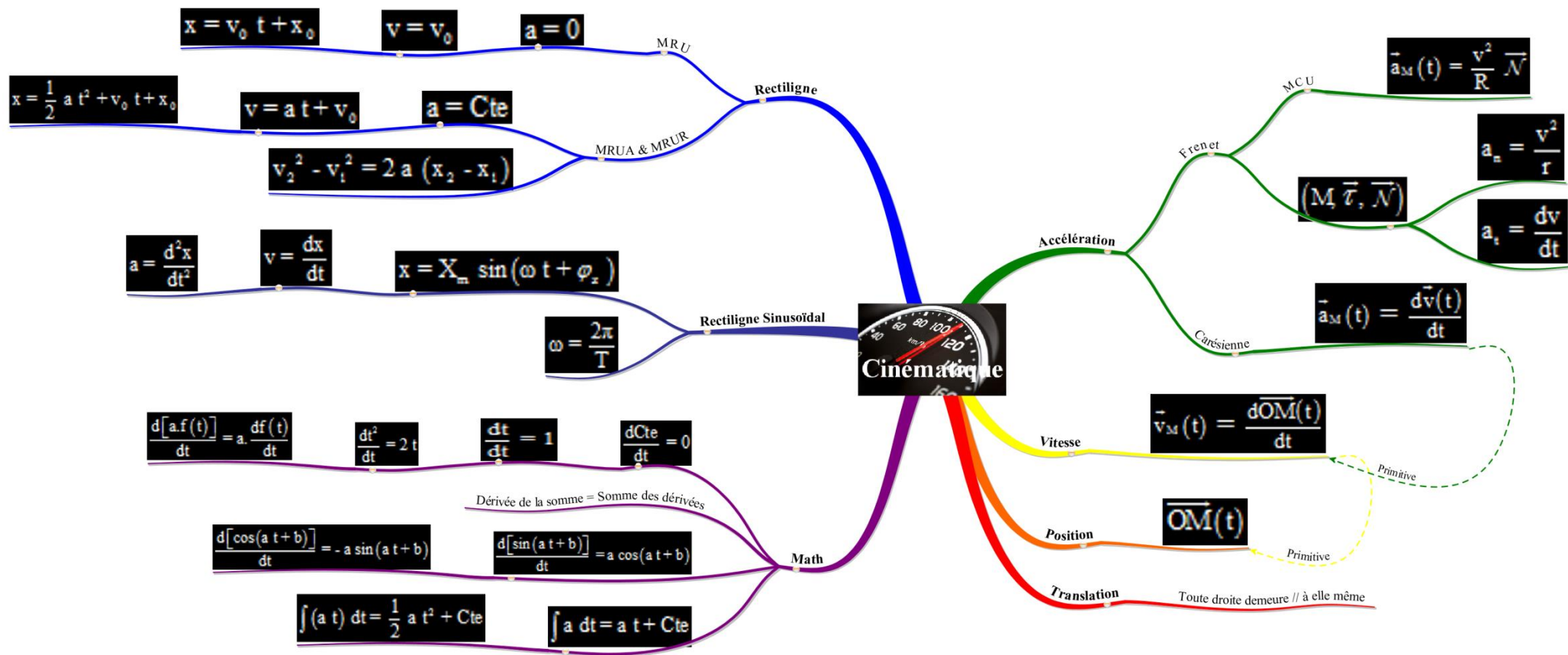
4. Entre l'instant  $t=0$ , et l'instant  $t_{\text{sol}}$  :

$$v_{\text{sol}}^2 - v_0^2 = 2 a (h - 0) \Rightarrow v_{\text{sol}}^2 = 2 a h \Rightarrow v_{\text{sol}} = \sqrt{2 a h} = \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 44,1} = 29,4 \text{ m.s}^{-1}$$

5.

$$* \quad v_{1/2}^2 - v_0^2 = 2 a \left( \frac{h}{2} - 0 \right) \Rightarrow v_{1/2}^2 = a h \Rightarrow v_{1/2} = \sqrt{a h} = \sqrt{9,8 \cdot 44,1} \approx 20,8 \text{ m.s}^{-1}$$

$$* \quad v_{1/2} = v(t_{1/2}) = a \cdot t_{1/2} \Rightarrow t_{1/2} = \frac{v_{1/2}}{a} = \frac{20,8}{9,8} = 2,12 \text{ s}$$



## Chapitre-2 : Dynamique du solide en mouvement de translation

### Objectifs

- Appliquer la loi fondamentale de la dynamique (2<sup>ème</sup> loi de Newton)
- Reconnaître un référentiel galiléen.
- Appliquer le théorème du centre d'inertie.

### Prérequis

- Définition de la force.
- Définition du centre de gravité d'un système matériel, forces intérieures et forces extérieures.
- Equilibre d'un solide sur un plan incliné.
- 1<sup>ère</sup> loi de Newton.
- Notion de référentiel.
- Caractéristiques d'un MRU.
- Caractéristiques d'un MRUA : la chute libre.

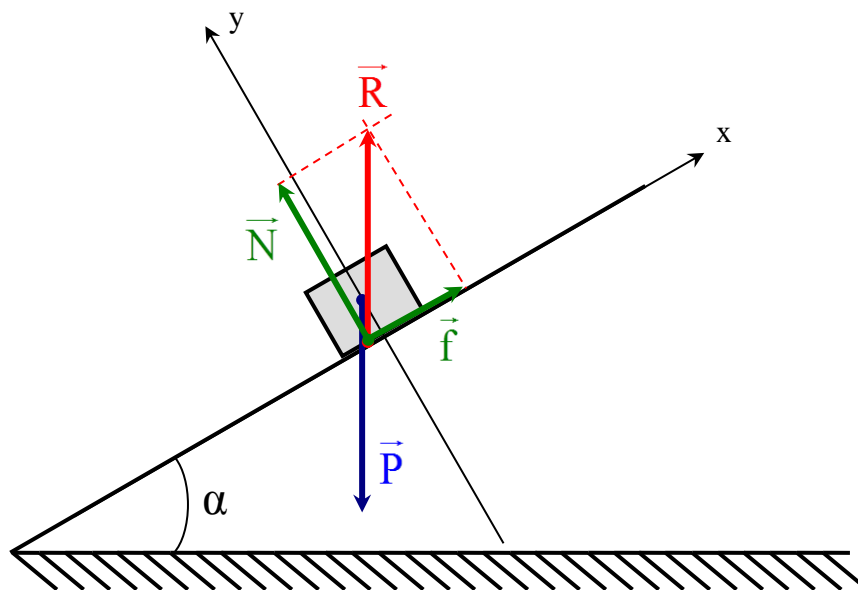
### Matériel

\* Masse marquée de 500 g.

\* Bille métallique.

### Rappels

- ❖ On appelle force (ou action mécanique), toute cause capable de déformer un corps ou modifier son mouvement.
- ❖ La somme des forces intérieures à un solide est nulle :  $\sum \vec{F}_{\text{int}} = \vec{0}$
- ❖ Le centre de Gravité (ou d'inertie) G d'un système matériel est le barycentre des points matériels  $M_i$  qui le constituent, pondérés chacun de sa masse  $m_i$  :  $\sum_i m_i \vec{GM}_i = \vec{0}$ .
- ❖ Dans un repère de laboratoire, un solide reste en équilibre sur un plan incliné grâce à la réaction  $\vec{R}$  de ce dernier :  $\vec{R} + \vec{P} = \vec{0}$ .
- On note  $\begin{cases} \vec{N} = \vec{R}_N, \text{ la composante normale de } \vec{R} (\perp \text{ à la surface de contact}) \\ \vec{f} = \vec{R}_\tau, \text{ la composante tangentielle de } \vec{R} (\text{selon la tangente à la surface de contact}) \end{cases}$
- $\vec{f}$  est la force de frottement qui s'oppose au glissement du solide.



- ❖ 1<sup>ère</sup> loi de Newton (principe d'inertie) : Pour un corps dont la somme des forces égale  $\vec{0}$  (pseudo-isolé), ou qui ne subit aucune force (isolé) ; le centre de gravité ne peut être qu'au repos, ou en mouvement rectiligne uniforme.

## I- Cas d'un point matériel

### 1) Exemple

Une bille ponctuelle de masse (m) en chute libre par rapport à un référentiel de laboratoire : d'après TP3, elle est en MRUA d'accélération  $\vec{a} = a \vec{i}$ , avec  $a \simeq 9,8 \text{ ms}^{-2}$ .

Or la somme des forces qu'elle subit est  $\sum \vec{F} = \vec{P} = m \vec{g} = m g \vec{i}$ , avec  $g = 9,8 \text{ N.kg}^{-1} = a$ , alors  $\sum \vec{F} = m \vec{a}$  : la modification du mouvement d'un corps (accélération) est en relation directe avec la résultante des forces qu'il subit.

Rq  $\|\vec{g}\|$  possède la dimension d'une accélération, on peut l'exprimer en  $\text{m.s}^{-2}$  :  $1 \text{ N.kg}^{-1} = 1 \text{ m.s}^{-2}$

### 2) Généralisation

Pour tout corps ponctuel de masse (m) et d'accélération  $\vec{a}$  dans un référentiel donné, la somme des forces qu'il subit est telle que  $\sum \vec{F} = m \vec{a}$  à chaque instant : 2<sup>ème</sup> loi de Newton (relation fondamentale de la dynamique)

Rq Cette loi n'est valable que dans les référentiels où la 1<sup>ère</sup> loi est vérifiée, dits galiléens

### 3) Notion de référentiel galiléen

- \* C'est tout référentiel où la 1<sup>ère</sup> loi de Newton est vérifiée, tel que le référentiel de Copernic (Fig-1)

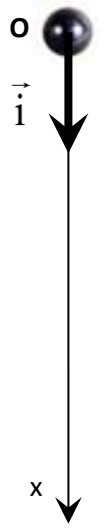
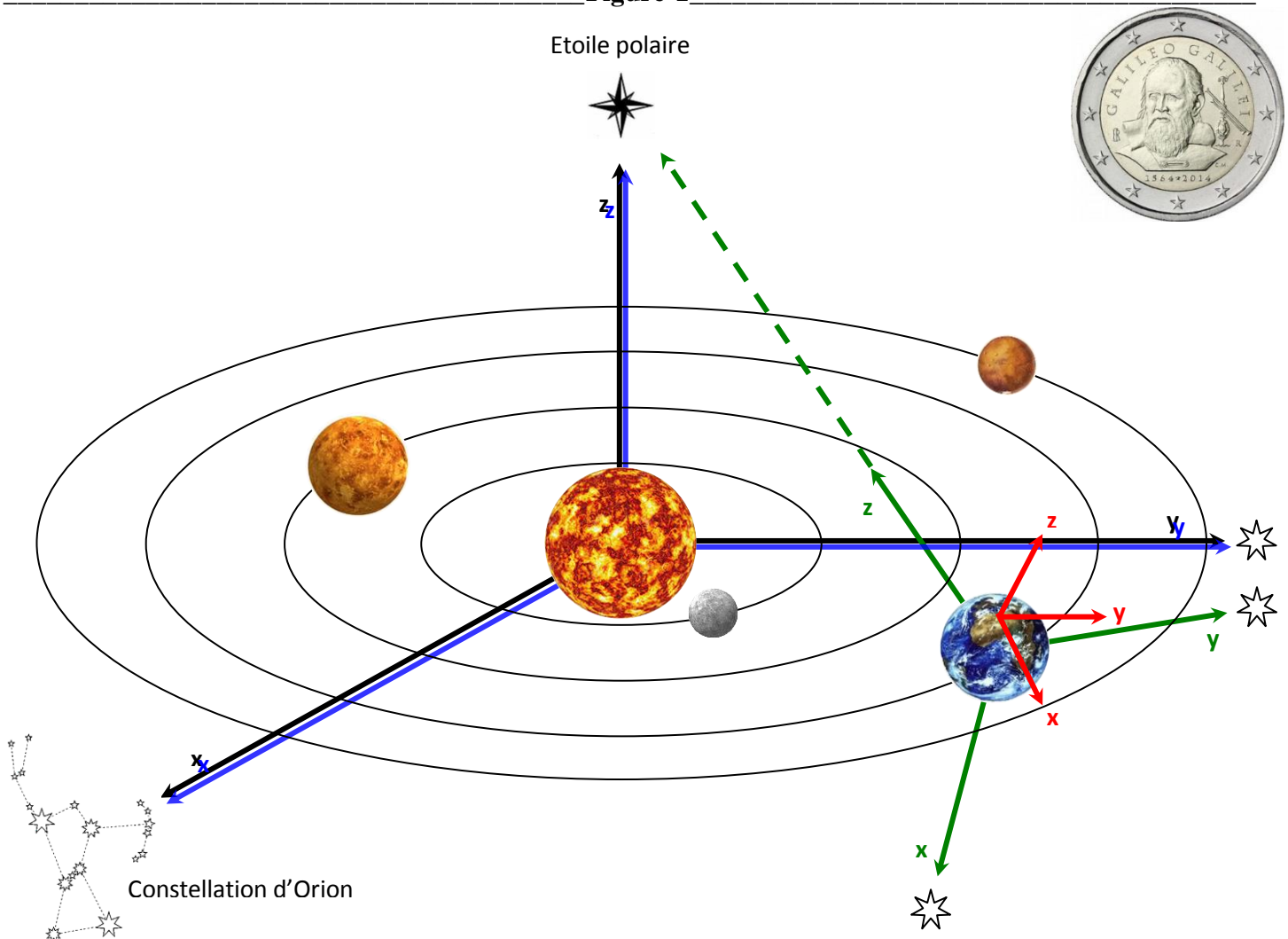


Figure-1



- **Référentiel de Copernic** : celui dont le corps de référence est le système solaire, et le repère d'espace d'origine le centre d'inertie du système solaire avec des axes orientés vers 3 corps célestes pratiquement fixes dont l'étoile polaire et la constellation d'Orion; convenable pour l'étude des mouvements des étoiles et des planètes.
- **Référentiel héliocentrique** : celui dont le corps de référence est le Soleil, et le repère d'espace d'origine le centre du Soleil avec des axes orientés vers 3 corps célestes pratiquement fixes dont l'étoile polaire et la constellation d'Orion; convenable pour l'étude des mouvements des étoiles et des planètes.  
Vu que le centre d'inertie du système solaire est pratiquement confondu avec le centre du Soleil, le repère héliocentrique et le repère de Copernic sont pratiquement confondus.
- **Référentiel géocentrique** : celui dont le solide de référence est la Terre, et le repère d'espace d'origine le centre de la Terre avec des axes orientés vers 3 étoiles pratiquement fixes dont l'une est l'étoile polaire; convenable pour l'étude des mouvements des satellites et de la Lune.
- **Référentiel du laboratoire (terrestre)** : celui dont le solide de référence est la Terre, et le repère d'espace d'origine un point à la surface de la Terre avec des axes orientés arbitrairement; convenable pour l'étude des mouvements à la surface de la Terre.

- \* La 1<sup>ère</sup> loi fut vérifiée dans le référentiel héliocentrique : il est galiléen.
- \* Il a été vérifié que tout référentiel en translation rectiligne uniforme par rapport à un référentiel galiléen, est aussi galiléen ; par suite :
  - Pendant une durée négligeable devant 1 an, le référentiel géocentrique est pratiquement en translation rectiligne uniforme dans le référentiel héliocentrique : il peut être considéré galiléen.
  - Pendant une durée négligeable devant 1 jour, le référentiel de laboratoire est pratiquement en translation rectiligne uniforme dans le référentiel géocentrique : il peut être considéré galiléen.

Rq La chute libre de la bille a duré ~ 0,5 s ; c'est négligeable devant 1 jour : le référentiel de laboratoire était suffisamment galiléen.

## II- Cas d'un système matériel

Pour un système matériel de masse (m) et de centre d'inertie G ; on mq :  $\sum \vec{F}_{\text{ext}} = m \vec{a}_G$  ; c'est le théorème du centre d'inertie, il n'est aussi valable que dans un référentiel galiléen. (Le centre d'inertie d'un système matériel a le même mouvement qu'un point matériel ayant toute la masse du système et soumis aux mêmes forces extérieures)

### Démonstration

Le système est composé d'un ensemble de points matériels  $M_i$ , de masse  $m_i$  chacun et d'accélération  $\vec{a}_i$  ; soit  $\vec{F}_i$  la résultante des forces qu'il subit dans un référentiel galiléen : d'après la 2<sup>ème</sup> loi de Newton  $\vec{F}_i = m_i \vec{a}_i$  ;  
 $\Rightarrow \sum_i \vec{F}_i = \sum_i m_i \vec{a}_i$ , or  $\sum_i \vec{F}_i = \underbrace{\sum_i \vec{F}_{\text{int}}}_0 + \sum_i \vec{F}_{\text{ext}}$  exercées sur le système, alors

$$\begin{aligned} \sum \vec{F}_{\text{ext}} &= \sum_i m_i \vec{a}_i = \sum_i m_i \left( \frac{d^2 \overline{OM}_i}{dt^2} \right) = \sum_i \frac{d^2 (m_i \overline{OM}_i)}{dt^2} = \frac{d^2}{dt^2} \left( \sum_i m_i \overline{OM}_i \right) = \frac{d^2}{dt^2} \left[ \sum_i m_i (\overline{OG} + \overline{GM}_i) \right] \\ &= \frac{d^2}{dt^2} \left[ \sum_i (m_i \overline{OG} + m_i \overline{GM}_i) \right] = \frac{d^2}{dt^2} \left[ \sum_i m_i \overline{OG} + \underbrace{\sum_i m_i \overline{GM}_i}_0 \right] = \frac{d^2}{dt^2} \left[ \sum_i m_i \overline{OG} \right] = \frac{d^2}{dt^2} \left[ \left( \sum_i m_i \right) \overline{OG} \right] \\ &= \frac{d^2}{dt^2} (m \overline{OG}) = m \frac{d^2 \overline{OG}}{dt^2} = m \vec{a}_G \end{aligned}$$



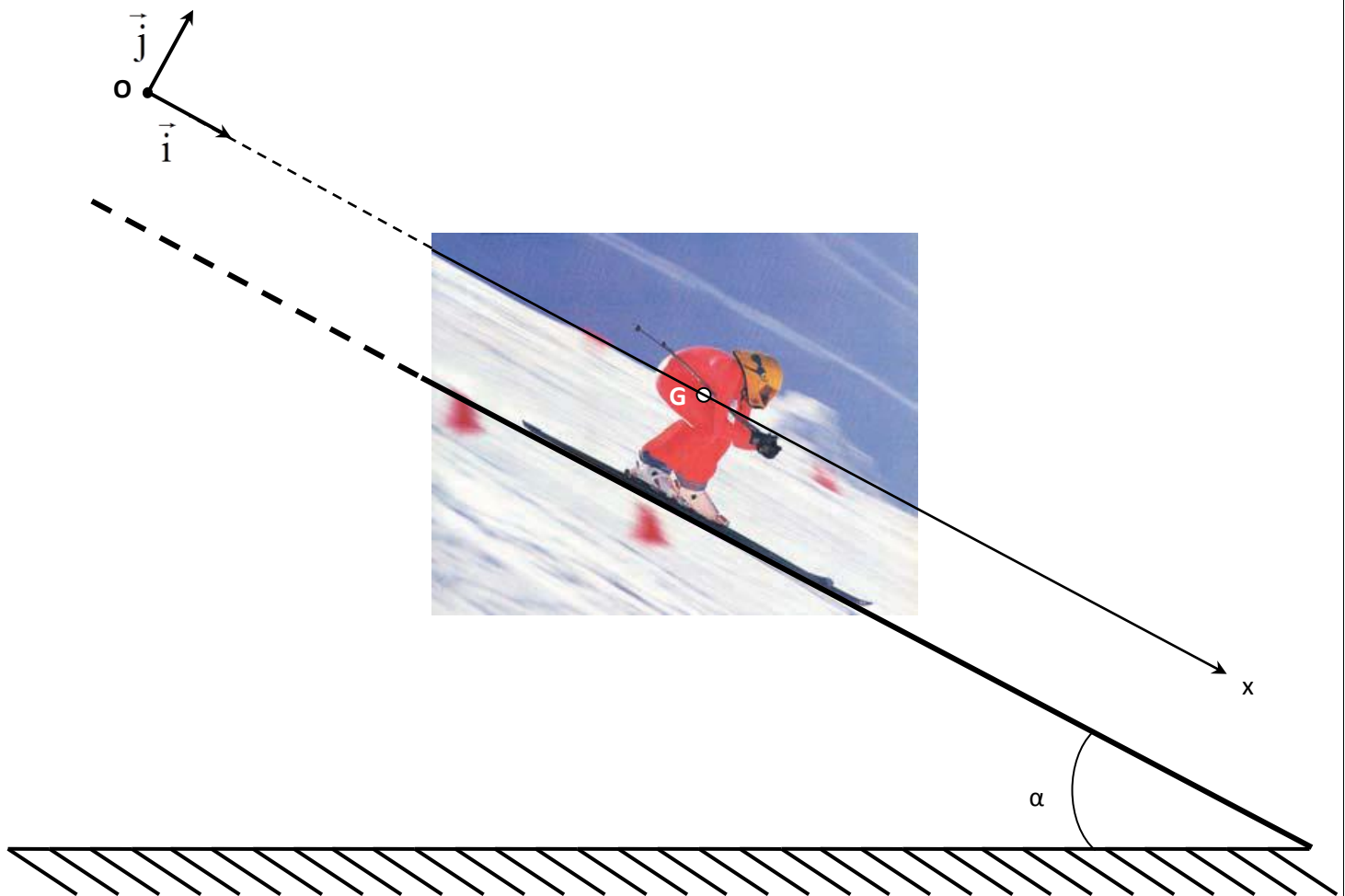
**Rq** Le th du centre d'inertie permet de retrouver la 1<sup>ère</sup> loi de Newton : pour un solide isolé ou pseudo-isolé;

$\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{0} \Rightarrow m \vec{a}_G = \vec{0} \Rightarrow \vec{a}_G = \vec{0} \Leftrightarrow \frac{d\vec{v}_G}{dt} = \vec{0} \Rightarrow \vec{v}_G \text{ est constant} \Rightarrow \text{si } G \text{ est déjà au repos } (\vec{v}_G = \vec{0}), \text{ il}$   
 restera au repos, sinon  $(\vec{v}_G = \vec{Cte})$  il serait en MRU (cela n'est vrai que dans un référentiel galiléen).

### Application-1

On considère comme système matériel, un skieur de masse  $m = 80 \text{ kg}$  qui glisse sans frottement suivant la ligne de plus grande pente d'un plan incliné d'un angle  $\alpha = 30^\circ$  par rapport à l'horizontale.

On donne  $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$ .



On s'intéresse au mouvement du centre de gravité (G) du système par rapport à un référentiel terrestre, supposé galiléen, dont le repère d'espace est  $(O, \vec{i}, \vec{j})$ , et l'origine du temps le début du mouvement en O avec une vitesse nulle.

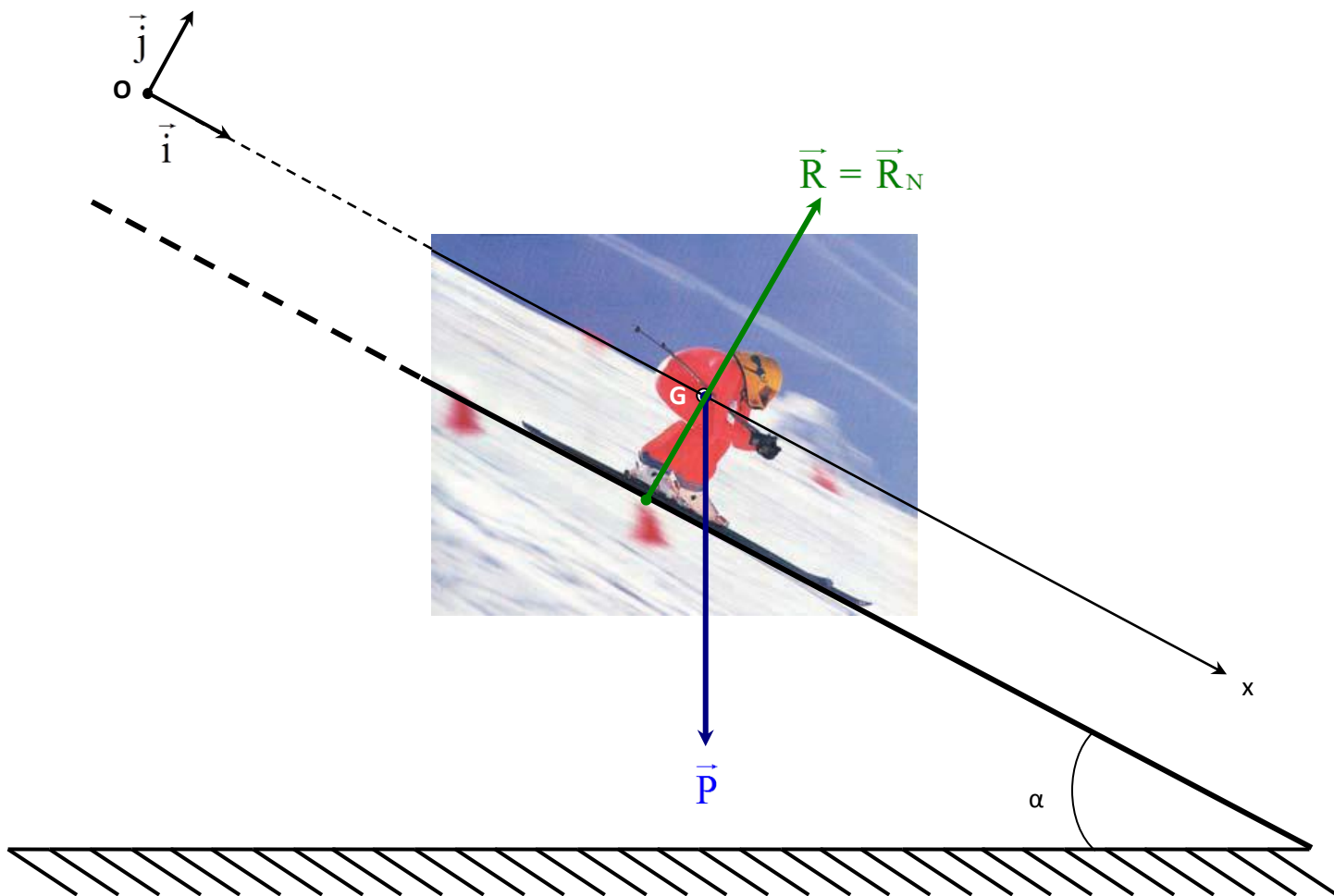
On admettra que le skieur maintient la même posture durant le mouvement, afin que l'ordonnée ( $y_G$ ) de son centre de gravité soit considérée constamment nulle.

1. Quelle est la forme de la trajectoire du centre de gravité du système.
2. Représenter les forces extérieures exercées sur le système.
3. Montrer que le vecteur accélération de G est  $\vec{a}_G = (g \sin \alpha) \vec{i}$  ; calculer sa valeur algébrique.
4. Quelle est la nature de ce mouvement ; déterminer la loi de variation de sa vitesse, et calculer sa valeur à l'instant de date  $t = 10 \text{ s}$  (donner le résultat en  $\text{Km.h}^{-1}$ )
5. Déterminer l'équation horaire du mouvement ; calculer la distance parcourue après 10 s.



1.  $y_G = 0$  durant le mouvement  $\Rightarrow$  trajectoire rectiligne.

2.



3. Th du centre d'inertie :  $\vec{P} + \vec{R}_N = m \vec{a}_G$

$$\text{Sur } (O, x) : \|\vec{P}\| \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) + 0 = m a_{G_x} \Rightarrow \cancel{m} g \sin\alpha = \cancel{m} a_{G_x} \Rightarrow g \sin\alpha = a_{G_x}$$

Or  $\vec{a}_G = a_{G_x} \vec{i}$ , car  $a_{G_y} = 0$  (mouvement rectiligne selon  $\vec{i}$ ), alors  $\vec{a}_G = (g \sin\alpha) \vec{i}$

$$\underline{\text{AN}} : a_G = g \sin\alpha = 9,8 \cdot \sin 30^\circ : \boxed{a_G = 4,9 \text{ m.s}^{-2}}$$

4.  $\vec{a}_G$  est constant, et de même sens que  $\vec{v}_G$  : MRUA de vitesse  $v_G(t) = a_G t + v_{G_0}$ , avec  $v_{G_0} = 0$

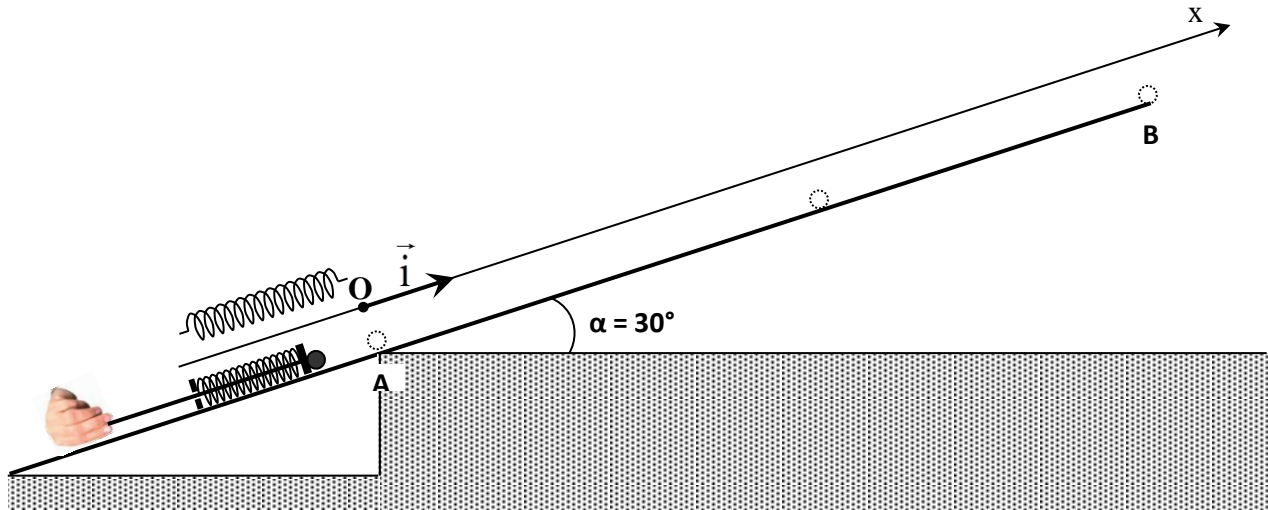
$$\Rightarrow \boxed{v_G(t) = a_G t} : v_G(t = 10 \text{ s}) = 4,9 \cdot 10 = 49 \text{ m.s}^{-1} = 49 \cdot 3,6 \text{ Km.h}^{-1} = 176,4 \text{ Km.h}^{-1} !$$

5.  $x_G(t) = \frac{1}{2} a_G t^2 + v_{G_0} t + x_{G_0} = \frac{1}{2} a_G t^2 + 0 t + 0 \Rightarrow \boxed{x_G(t) = \frac{1}{2} a_G t^2}$  : après 10 s le skieur parcourt la

$$\text{distance } x_G(t = 10 \text{ s}) = \frac{1}{2} 4,9 10^2 = 245 \text{ m}$$

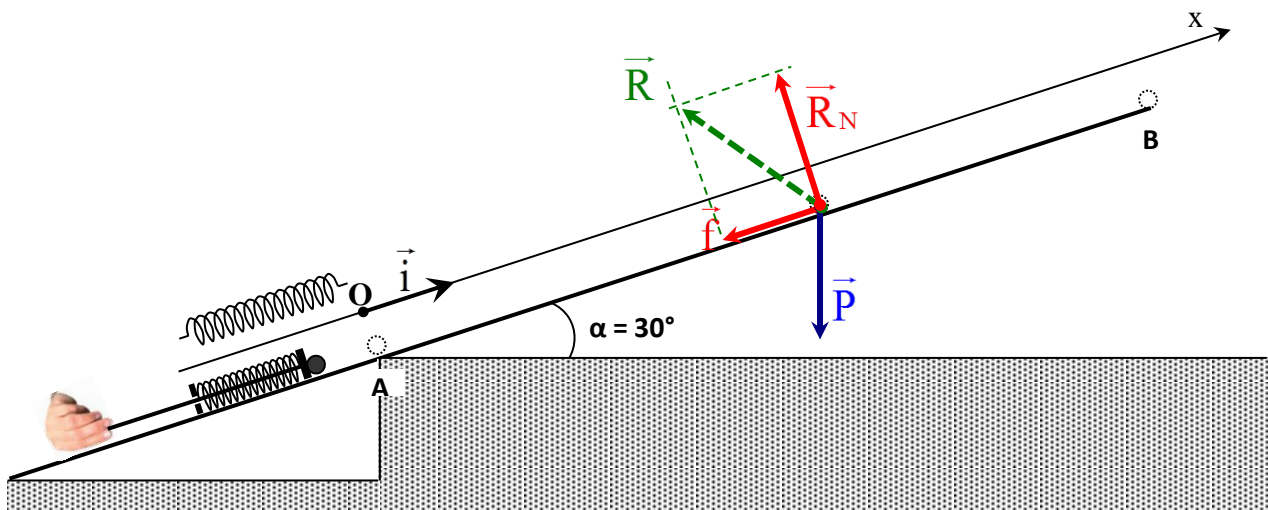
**Application-2**

Une bille considérée ponctuelle de masse  $m = 100 \text{ g}$  est lancée à l'aide d'un ressort, afin de monter un plan incliné, selon la ligne de plus grande pente  $AB = 1,8 \text{ m}$  comme le montre la figure ci-dessous ; durant le mouvement, l'ensemble des frottements est équivalent à une force constante  $\vec{f}$ . Le mouvement est étudié par rapport à un référentiel de laboratoire, supposé galiléen, dont le repère d'espace est  $(O, \vec{i})$ , et l'origine du temps l'instant où la bille se détache du ressort en A avec une vitesse initiale  $v_0$ . On donne  $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$ .



1. Représenter les forces exercées sur la bille après qu'elle se détache du ressort.
2. Supposons qu'il n'y a aucun frottement :
  - a) Déterminer l'accélération  $\vec{a}$  de la bille ; calculer sa valeur algébrique.
  - b) Quelle est la nature du mouvement ?
  - c) Calculer la valeur minimale ( $v_{0 \text{ min}}$ ) de la vitesse initiale qui permet à la bille d'atteindre la position B
3. La bille est lancée avec la vitesse initiale  $v_0 = 4,2 \text{ m.s}^{-1}$ , et on tiendra compte des frottements :
  - a) Déterminer l'expression de la mesure algébrique ( $a'$ ) de la nouvelle accélération de la bille.
  - b) Pourquoi la bille ne pourra plus atteindre la position B ?
  - c) La bille atteint une position maximale B' telle que  $AB' = 1 \text{ m}$  ; calculer la valeur de  $a'$ .
  - d) En déduire la valeur de la force de frottement.

1.



2.

a) 2<sup>ème</sup> loi de Newton :  $\vec{P} + \vec{R}_N = m \vec{a}$

Sur  $(O, x)$  :  $-\|\vec{P}\| \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) + 0 = m a \Rightarrow -mg \sin\alpha = m a \Rightarrow -g \sin\alpha = a \Rightarrow \boxed{\vec{a} = (-g \sin\alpha) \vec{i}}$

AN :  $a = -g \sin\alpha = -9,8 \cdot \sin 30^\circ : \boxed{a = -4,9 \text{ m.s}^{-2}}$ .

b)  $\vec{a}$  est constant, et de sens opposé à celui de  $\vec{v}$  : MRUR.

c) Si la bille est lancée avec la vitesse initiale  $v_{0 \min}$ , elle atteint la position B mais avec une vitesse nulle ; entre A et B :  $v_B^2 - v_A^2 = 2 a (x_B - x_A) \Rightarrow$

$$0 - v_{0 \min}^2 = 2 a AB \Rightarrow v_{0 \min}^2 = -2 a AB \Rightarrow v_{0 \min} = \sqrt{-2 a AB} = \sqrt{-2 (-4,9) 1,8} : v_{0 \min} = 4,2 \text{ m.s}^{-1}$$

3.

a) 2<sup>ème</sup> loi de Newton :  $\vec{P} + \vec{R}_N + \vec{f} = m \vec{a}'$

$$\text{Sur (O, x)} : - \|\vec{P}\| \sin \alpha + 0 - \|\vec{f}\| = m a' \Rightarrow - m g \sin \alpha - \|\vec{f}\| = m a' \Rightarrow a' = - g \sin \alpha - \frac{\|\vec{f}\|}{m}$$

b) Le mouvement est plus freiné que précédemment, et la bille est lancée avec la vitesse minimale  $v_0 = v_{0 \min} = 4,2 \text{ m.s}^{-1}$  : elle ne pourra plus atteindre la position B.

c) Entre A et B' :  $v_{B'}^2 - v_A^2 = 2 a' (x_{B'} - x_A) \Rightarrow$

$$0 - v_0^2 = 2 a' AB' \Rightarrow a' = - \frac{v_0^2}{2 AB'} = - \frac{4,2^2}{2 \cdot 1} : a' = - 8,82 \text{ m.s}^{-2}$$

d)  $- m g \sin \alpha - \|\vec{f}\| = m a' \Rightarrow \|\vec{f}\| = - m g \sin \alpha - m a' = - m (g \sin \alpha + a') = - 0,1 \text{ kg} (9,8 \sin 30^\circ - 8,82)$

$$\|\vec{f}\| \approx 0,4 \text{ N}$$

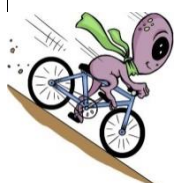
### Application-3 A chaque balade en vélo, n'oublie pas que Newton est avec toi !

Sur la ligne du départ, ton vélo est immobile. Selon la 1<sup>ère</sup> loi de Newton, il le restera tant qu'aucune force ne s'exerce sur lui.

« Je n'avance pas ! Il faut pourtant que je démarre... ». C'est là que ton coup de pédale est important : plus tu appuies fort, [...] plus tu vas accélérer : c'est la 2<sup>ème</sup> loi de Newton. [...] Te voilà parti ! A partir d'un certain moment, tu peux même t'arrêter de pédaler et tu continueras d'avancer à la même vitesse : c'est la 1<sup>ère</sup> loi de Newton. Toi et ton vélo, êtes en mouvement uniforme et rectiligne : aucune force ne vient perturber le mouvement.

Aucune force ou presque... parce que tu finis tout de même par ralentir. Pourquoi ?

D'après la 2<sup>ème</sup> loi de Newton, c'est qu'une force a agi quelque part [...]. Il s'agit des frottements du sol sur tes pneus, et de l'air sur le vélo et le cycliste. [...]



Attention, la route est en pente ! Tu sens bien que tu vas accélérer. Et pour cause, d'après la 2<sup>ème</sup> loi de Newton, une autre force est entrée en jeu : la gravité. En terrain plat, la gravité était compensée par la réaction du sol. « C'est génial ! J'accélère sans faire le moindre effort. C'est la force de gravité qui agit à ma place ! »

Ouh la la ! Ce n'est plus la même histoire, voilà une forte montée ! Là encore la gravité est à l'œuvre : mais elle attire le vélo vers le bas et tu ralentis. C'est la 2<sup>ème</sup> loi de Newton.

Tu vas devoir redoubler d'efforts afin de continuer à avancer.

« Je vois bien que je ralentis. C'est encore la force de gravité qui modifie mon mouvement »



Attention, un obstacle à l'horizon ! Tu dois vite freiner.

Oh mais que s'est-il passé ?

Les roues de ton vélo se sont arrêtées trop brusquement.

D'après la 1<sup>ère</sup> loi de Newton, ton corps a continué son mouvement. C'est la chute.

Et la 3<sup>ème</sup> loi de Newton, comment s'illustre-t-elle ?

Et bien tout simplement par le fait que si ton vélo avance, c'est que par le biais du mouvement de la pédale, le pneu a poussé sur le sol : c'est l'action. En réaction, le sol a poussé ton vélo. [...]

Pascale Baugé (adapté) : [bit.ly/petite-balade-en-velo](http://bit.ly/petite-balade-en-velo) 📄

**Question** : la loi de Newton mise en jeu à chaque fois a été masquée dans ce texte ; compléter le.

## TP 4 : Etude expérimentale du glissement d'un solide sur un plan incliné

### Objectifs :

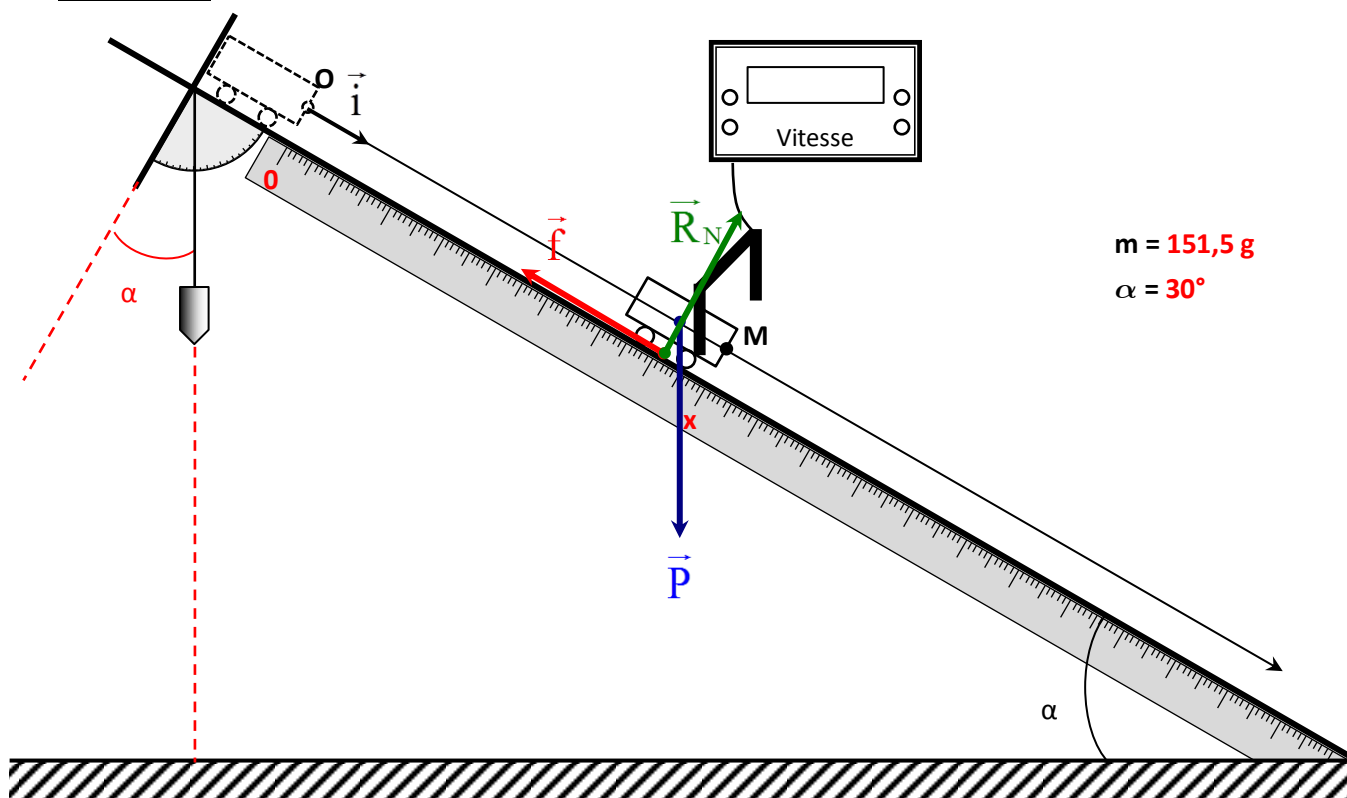
- Mesurer la vitesse d'un solide abandonné à lui-même sur un plan incliné.
- Déterminer, à partir des résultats, la valeur de son accélération.
- Déterminer, en appliquant le théorème du centre d'inertie, la valeur de la force de frottement à laquelle il est soumis.

### Matériel :

- 1 Ensemble pour l'étude du plan incliné
- 1 Capteur mesureur de vitesse.
- 1 Mesureur de vitesse automatique.
- 1 Balance électronique.

### Manipulation :

#### 1. Expérience



Le chariot de masse ( $m$ ) est abandonné à lui-même sans vitesse initiale en haut du plan incliné ; il descend le plan selon sa ligne de plus grande pente dans un mouvement de **translation rectiligne**  $\Rightarrow$  **il suffit d'étudier le mouvement de l'un de ses points (M).**

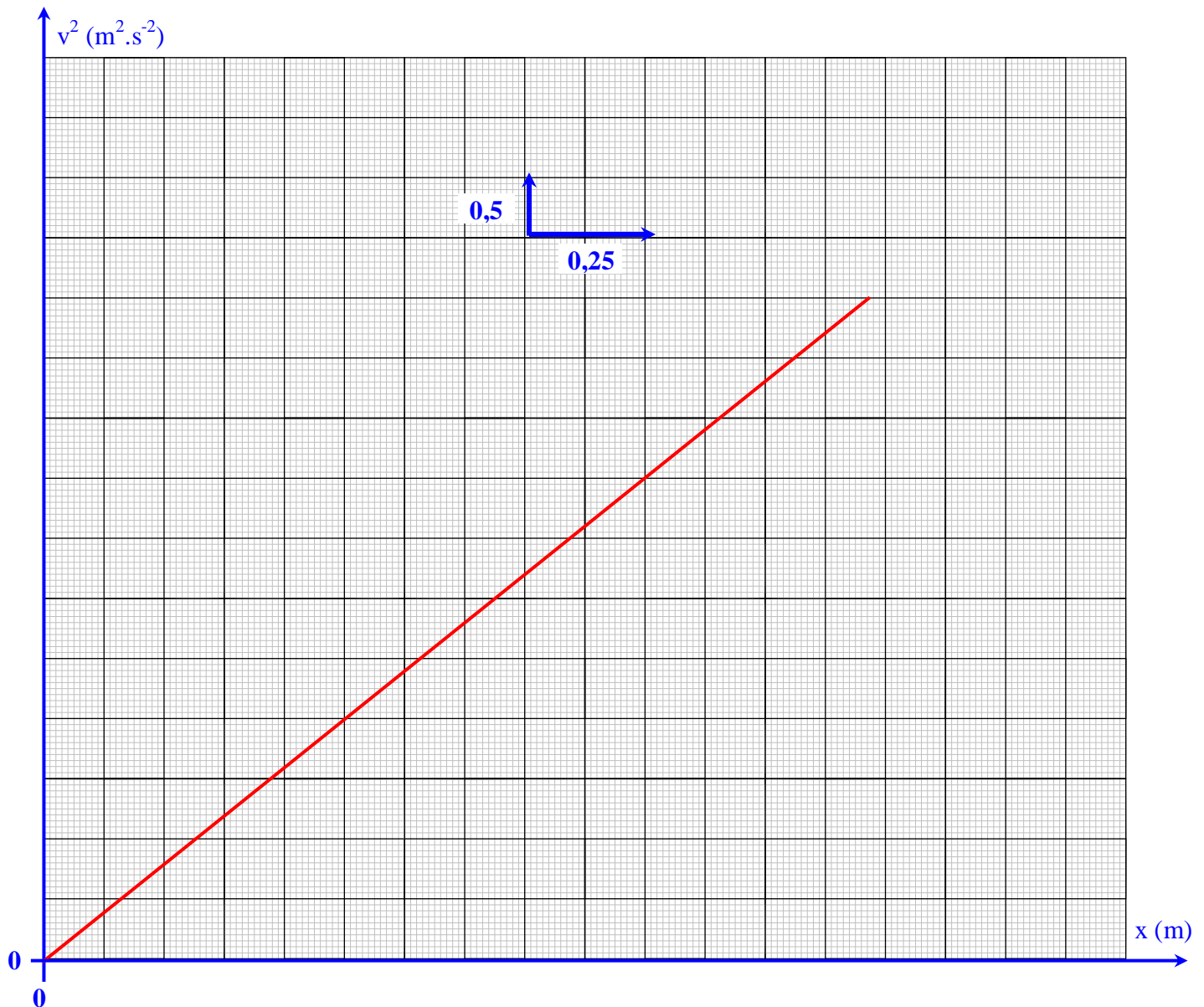
- \* Le mouvement est étudié par rapport au repère d'espace  $(O, \vec{i})$  fixe par rapport à la Terre, et on choisit comme origine du temps le début du mouvement en  $O$ . (**référentiel de laboratoire, qui peut être considéré galiléen car la durée mouvement est négligeable devant 1 jour**)
- \* Au passage par une position d'abscisse ( $x$ ) en laquelle est fixé un capteur lié à un mesureur de vitesse automatique ; on obtient la valeur de la vitesse du mobile en cette position.

## 2. Résultats

x (cm)	0	25	50	75	100	150
x (m)	0	0,25	0,5	0,75	1	1,5
v (m.s <sup>-1</sup> )	0	0,894	1,264	1,549	1,788	2,190
v <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup> )	0	0,8	1,6	2,4	3,2	4,8

## 3. Exploitation des résultats

a) Choisir des échelles convenables, et tracer la courbe  $v^2 = f(x)$



b) Représenter les forces exercées sur le chariot, et déterminer l'expression de la valeur algébrique de l'accélération ( $a_G$ ) de son centre de gravité.

$$\text{Th du centre d'inertie : } \vec{P} + \vec{R}_N + \vec{f} = m \vec{a}_G$$

$$\text{Sur (O, x) : } \|\vec{P}\| \sin\alpha + 0 - \|\vec{f}\| = m a_G \Rightarrow m g \sin\alpha - \|\vec{f}\| = m a_G \Rightarrow a_G = g \sin\alpha - \frac{\|\vec{f}\|}{m} : \text{constante.}$$

c) En déduire la nature du mouvement : MRUA

d) Déterminer la valeur numérique de  $a_G$ .

$a_G = a$  : accélération du point (M)

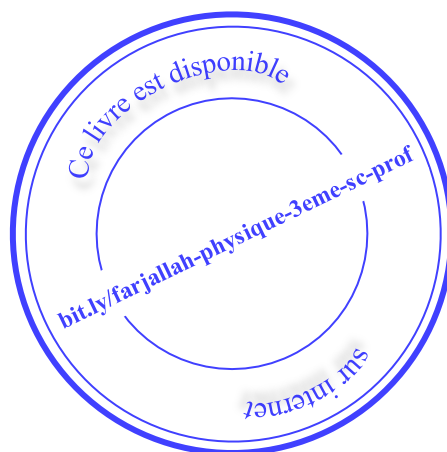
$$\text{MRUA} \Rightarrow \text{entre O et une position M quelconque : } v^2 - v_0^2 = 2 a (x - 0) \Rightarrow v^2 = 2 a x \Rightarrow 2 a = \frac{v^2}{x}$$

$$\text{D'après le graphe } 2 a = \frac{3,2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}}{1 \text{ m}} = 3,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \Rightarrow \boxed{a_G = 1,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}$$

e) En déduire la valeur de la force de frottement exercée sur le chariot. On donne  $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

$$\|\vec{f}\| = m g \sin\alpha - m a_G = m (g \sin\alpha - a_G)$$

$$\text{AN : } \|\vec{f}\| = m (g \sin\alpha - a_G) = 151,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg} (9,8 \sin 30^\circ - 1,6) : \boxed{\|\vec{f}\| \approx 0,5 \text{ N}}$$



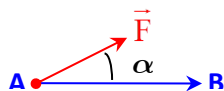
## Chapitre-3 :Energie cinétique

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...).	
Prérequis	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notion d'énergie cinétique.</li> <li>▪ Notion d'énergie potentielle de pesanteur.</li> <li>▪ Travail d'une force constante.</li> <li>▪ Travail du poids d'un corps.</li> <li>▪ Caractéristiques d'un MRUA : la chute libre.</li> </ul>	
Matériel	
<ul style="list-style-type: none"> <li>* Bille métallique.</li> <li>* Ressort.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 2 masses marquées de 200 g avec crochet.</li> </ul>

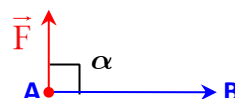
### Rappels

- ❖ Tout système matériel en **mouvement**, dans un référentiel donné, possède de l'énergie mécanique du type cinétique ( $E_c$ ) par rapport à ce référentiel ; sa valeur augmente avec l'augmentation de la vitesse et la masse du système.
- ❖ Soit (S) un solide situé à une certaine **hauteur** au-dessus de la surface de la Terre : le système {S + Terre} possède de l'énergie mécanique du type potentielle de pesanteur ( $E_{pp}$ ) ; sa valeur augmente avec l'augmentation de la hauteur et la masse du système.
- ❖ L'unité d'énergie mécanique dans le S.I est le **Joule (J)**.
- ❖ Si l'énergie mécanique d'un système varie, c'est grâce aux travaux des forces auxquelles il est soumis ; le travail d'une force constante  $\vec{F}$  dont le point d'application vient de se déplacer d'une position A → une position B, s'écrit :  $W(\vec{F})_{A \rightarrow B} = \vec{F} \cdot \overline{AB} = \|\vec{F}\| \cdot AB \cdot \cos \alpha$ , avec  $\alpha = (\vec{F}, \overline{AB})$ , et cela quel que soit le chemin suivi de A → B. L'unité du travail dans le S.I est le **Joule (J)**.

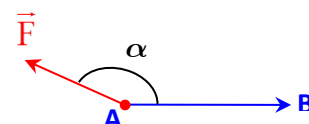
- Si  $0 \leq \alpha < \frac{\pi}{2}$  rad ;  $\vec{F}$  est exercée dans le sens du déplacement  $\overline{AB}$  : son travail est moteur;  $W(\vec{F})_{A \rightarrow B} > 0$



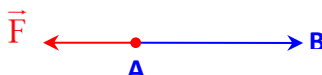
- Si  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  rad;  $\vec{F}$  est  $\perp$  au déplacement  $\overline{AB}$  : elle ne travaille pas;  $W(\vec{F})_{A \rightarrow B} = 0$



- Si  $\frac{\pi}{2}$  rad  $< \alpha \leq \pi$  rad ;  $\vec{F}$  est exercée dans le sens opposé au déplacement  $\overline{AB}$  : son travail est résistant;  $W(\vec{F})_{A \rightarrow B} < 0$



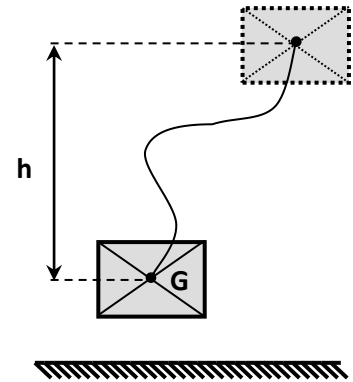
- Si  $\alpha = \pi$  rad ; le travail de  $\vec{F}$  est totalement résistant (cas d'une force de frottement)





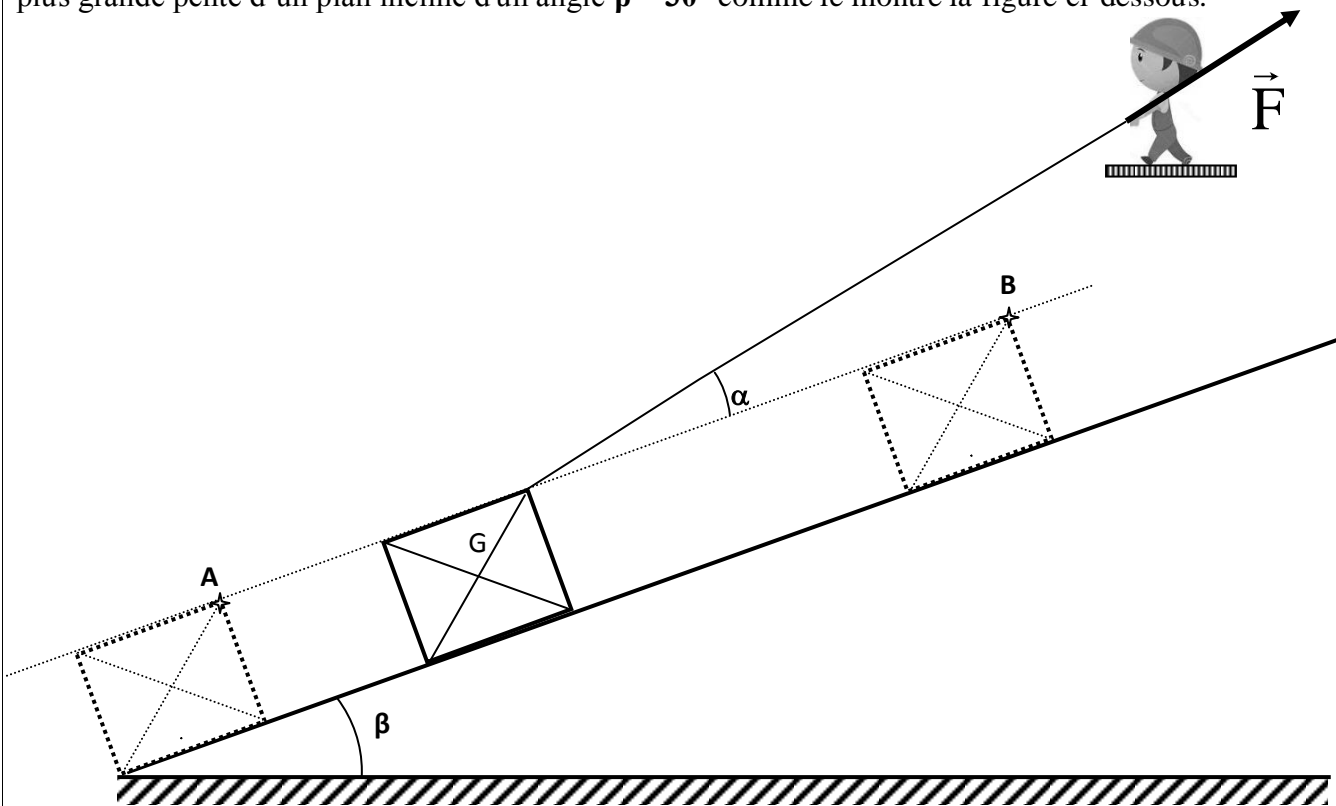
- ❖ Le travail du poids d'un corps de masse ( $m$ ) dont le centre de gravité vient de monter ou descendre une hauteur ( $h$ ), est :

$$\begin{array}{c}
 \text{descente} \\
 \downarrow \\
 W(\vec{P}) = \pm m \cdot g \cdot h, \text{ quel que soit le chemin.} \\
 \uparrow \\
 \text{montée}
 \end{array}$$



### Application

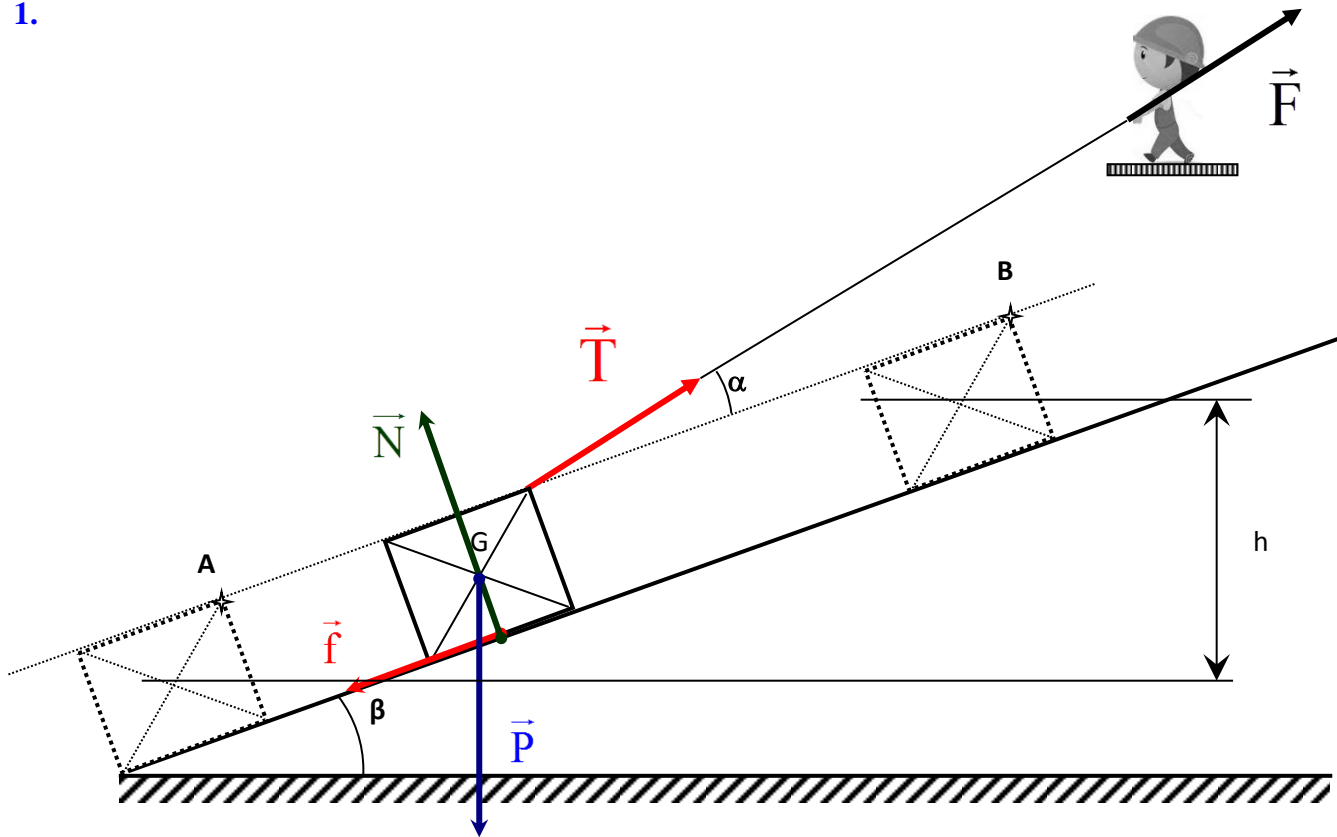
Un ouvrier exerce une force constante  $\vec{F}$  sur l'extrémité d'une corde inextensible et de masse négligeable pour faire monter un solide de masse  $m = 25 \text{ kg}$  d'une position **A** à une position **B** distantes de  $d$ , selon la ligne de plus grande pente d'un plan incliné d'un angle  $\beta = 30^\circ$  comme le montre la figure ci-dessous.



- Le plan incliné exerce sur le solide une **force de frottement constante**  $\vec{f}$ .
- $\|\vec{F}\| = 152,7 \text{ N}$ , et  $\alpha = 15^\circ$
- $g = 9,8 \text{ N.kg}^{-1}$

1. Représenter les forces agissant sur le solide.
2. Sachant que  $d = 4 \text{ m}$  ; calculer le travail de la tension  $\vec{T}$  de la corde, de la position A à la position B. Préciser son caractère.
3. Donner les expressions des travaux des autres forces pendant ce déplacement, en précisant leurs caractères.
4. Calculer la valeur du travail du poids.
5. Quelles sont les formes d'énergie que possède le système **{Solide + Terre}** au cours de la montée ?
6. En lubrifiant le plan incliné ; les forces de frottement disparaissent pratiquement, et l'ouvrier aurait besoin de déployer un travail de seulement **490 J** : commenter, et déduire la valeur de la force de frottement existant avant la lubrification.

1.

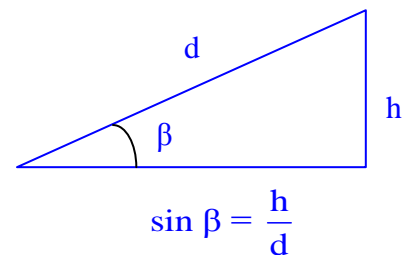


$$2. \quad W_{A \rightarrow B}(\vec{T}) = \|\vec{T}\| \cdot AB \cdot \cos \alpha ; \text{ avec } \|\vec{T}\| = \|\vec{F}\| \text{ car la corde est de masse négligeable, et } AB = d$$

$$W_{A \rightarrow B}(\vec{T}) = \|\vec{F}\| \cdot d \cdot \cos \alpha = 152,7 \text{ N} \cdot 4 \text{ m} \cdot \cos 15^\circ \approx \boxed{590 \text{ J}} : \text{ travail moteur}$$

3.

- $W(\vec{N}) = 0$ , car la direction de  $\vec{N}$  est  $\perp$  au chemin de son point d'application
- $\vec{f}$  est une force de frottement ; son travail est purement résistant :  $W(\vec{f}) = - \|\vec{f}\| \cdot d$
- $W(\vec{P}) = - m \cdot g \cdot h$  : travail résistant, le schéma ci-dessous montre que  $h = d \cdot \sin \beta$ , alors  
 $W(\vec{P}) = - m \cdot g \cdot d \cdot \sin \beta$



$$4. \quad W(\vec{P}) = - 25 \cdot 9,8 \cdot 4 \cdot \sin 30^\circ = \boxed{- 490 \text{ J}}$$

$$5. \quad E_c + E_{pp}$$

6. La disparition de la force de frottement permet à l'ouvrier de lutter seulement contre le travail du poids (-490 J), et ainsi épargner une énergie  $\Delta E = 590 \text{ J} - 490 \text{ J} = 100 \text{ J}$  : cela correspond au travail de la force de frottement auquel l'ouvrier luttait par une dépense énergétique excessive  $\Rightarrow$

$$|W(\vec{f})| = \Delta E \Rightarrow \|\vec{f}\| \cdot d = \Delta E \Rightarrow \|\vec{f}\| = \frac{\Delta E}{d} = \frac{100 \text{ J}}{4 \text{ m}} = \boxed{25 \text{ N}}$$

## I- Energie cinétique d'un solide en mouvement de translation

- \* L'énergie cinétique d'un point matériel de masse ( $m$ ) et de vitesse  $\vec{v}$  est donnée par  $E_c = \frac{1}{2} m v^2$ , dans le référentiel où il possède la vitesse  $\vec{v}$ .
- \* Pour un solide de masse ( $m$ ) en mouvement de translation avec une vitesse  $\vec{v}$  dans un référentiel

donné ; on montre que  $E_c = \frac{1}{2} m v^2$

↑ ↑ ↑  
J      kg m.s<sup>-1</sup>

### Démonstration

Le solide est composé d'un ensemble de points matériels  $M_i$ , de masse  $m_i$  chacun et de vitesse  $\vec{v}_i$  ; pour un solide en translation la vitesse est la même pour tous ses points :  $\vec{v}_i = \vec{v}$ .

$$E_c = \sum_i E_{c_i}, \text{ avec } E_{c_i} = \frac{1}{2} m_i v_i^2 = \frac{1}{2} m_i v^2$$

$$= \sum_i \frac{1}{2} m_i v^2 = \frac{1}{2} \left( \sum_i m_i \right) v^2 = \frac{1}{2} m v^2$$

⇒ Un solide en translation possède la même  $E_c$  qu'un point matériel de même masse et vitesse que lui.

### Application-1

Tous les mobiles sont considérés par rapport à un référentiel terrestre.

1. Calculer l'énergie cinétique  $E_{c_1}$  d'une voiture de masse  **$m = 1$  tonne** qui roule à une vitesse de valeur  $\|\vec{v}_1\| = 90 \text{ Km.h}^{-1}$ .
2. Calculer son énergie cinétique  $E_{c_2}$ , si le conducteur augmente sa vitesse à  $\|\vec{v}_2\| = 110 \text{ Km.h}^{-1}$  ; de combien a augmenté le risque encouru dans le cas d'accident de route ?
3. Soit  $E_{c_3}$  l'énergie cinétique d'un camion de masse  **$M = 30$  tonnes** qui roule à la vitesse  $\|\vec{v}_1\| = 90 \text{ Km.h}^{-1}$  ; sans calculer la valeur de  $E_{c_3}$ , calculer la différence relative entre l'énergie cinétique du camion et celle de la voiture à la même vitesse  $\|\vec{v}_1\| = 90 \text{ Km.h}^{-1}$ .

$$1. E_{c_1} = \frac{1}{2} m v_1^2 = \frac{1}{2} \cdot 1000 \text{ kg} \cdot \left( \frac{90}{3,6} \text{ m.s}^{-1} \right)^2 = 312500 \text{ J}$$

$$2. E_{c_2} = \frac{1}{2} m v_2^2 = \frac{1}{2} \cdot 1000 \text{ kg} \cdot \left( \frac{110}{3,6} \text{ m.s}^{-1} \right)^2 = 466821 \text{ J}$$

$$\frac{E_{c_2} - E_{c_1}}{E_{c_1}} = \frac{466821 - 312500}{312500} \approx 0,5 = 50 \% \text{ : de } 90 \rightarrow 110 \text{ Km.h}^{-1}, \text{ le risque dû à l'énergie cinétique de la voiture a augmenté de } 50 \%$$

$$3. \frac{E_{c_3} - E_{c_1}}{E_{c_1}} = \frac{\frac{1}{2} M v_1^2 - \frac{1}{2} m v_1^2}{\frac{1}{2} m v_1^2} = \frac{M - m}{m} = \frac{30 - 1}{1} = 29 = 2900 \% !$$

## II- Théorème de l'énergie cinétique

### 1) Exemple (Fig-1)

Figure-1

Un solide de masse ( $m$ ) en chute libre par rapport à un référentiel de laboratoire ; soit  $\vec{a}$  son accélération :

d'après le th du centre d'inertie  $\vec{P} = m \vec{a}$ , avec  $\vec{P} = m \vec{g} \Rightarrow \vec{a} = \vec{g}$

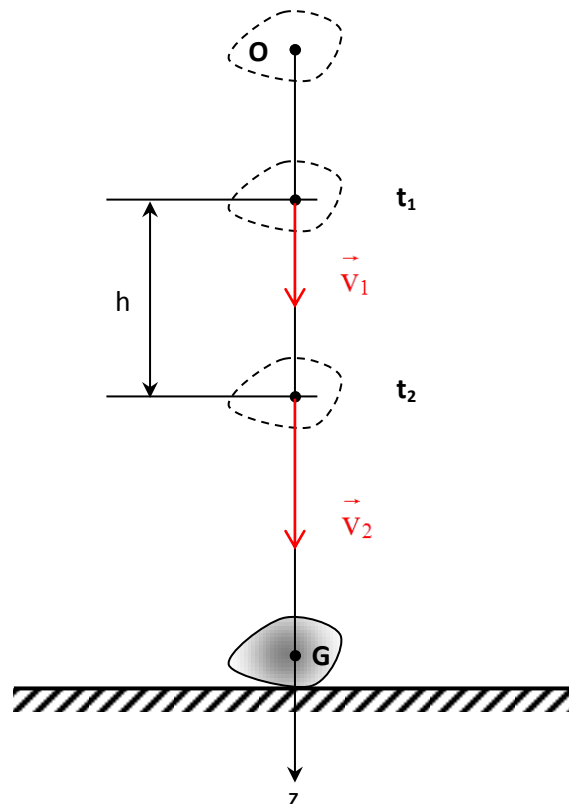
$\Rightarrow$  MRUA d'accélération  $a = g$ .

La variation de son  $E_c$  de  $t_1 \rightarrow t_2$  est :

$$\begin{aligned} \Delta E_c &= E_{c_2} - E_{c_1} = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2 = \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2) \\ &= \frac{1}{2} m \int_{t_1 \rightarrow t_2} a (z_2 - z_1) = m g h = \mathbf{W}(\vec{P}) \end{aligned}$$

(À condition que le référentiel soit galiléen, car on a utilisé le th du centre d'inertie)

**Rq** Pendant la chute  $E_c$  augmente grâce au travail moteur du poids ; en même temps, l' $E_{pp}$  du système {Solide + Terre} diminue : elle est convertie en  $E_c$  grâce au travail du poids. Par suite, si le solide est lancé vers le haut (MRUR), le travail résistant du poids assure la conversion inverse de l' $E_c$  de lancement en  $E_{pp}$ , d'où sa diminution ( $\Delta E_c = - m g h < 0$ )



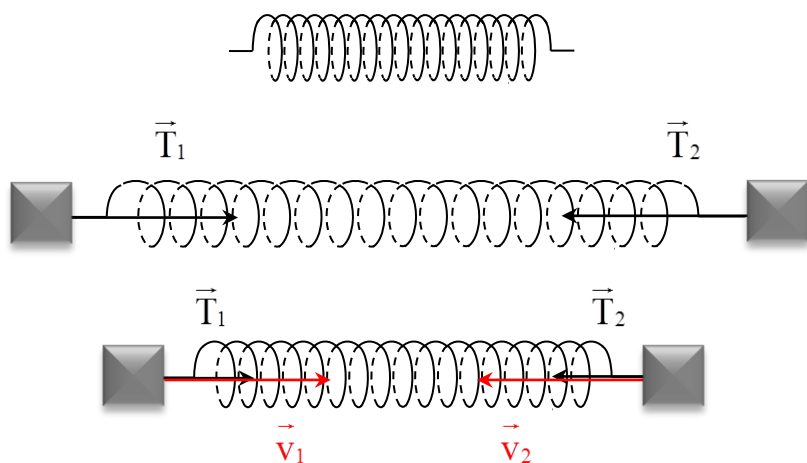
### 2) Généralisation

Dans un référentiel galiléen, la variation de l' $E_c$  d'un système matériel, entre deux instants  $t_1$  et  $t_2$  est :

$$\Delta E_c = \sum_{t_1 \rightarrow t_2} \mathbf{W} \text{ (toutes les forces extérieures et intérieures au système)}$$

**Rq** Pour un système indéformable (solide), seules les forces extérieures peuvent provoquer une variation de son  $E_c$ , car  $\sum \vec{F}_{int} = \vec{0}$  ; ce qui n'est pas le cas pour un système déformable : ex. Fig-2

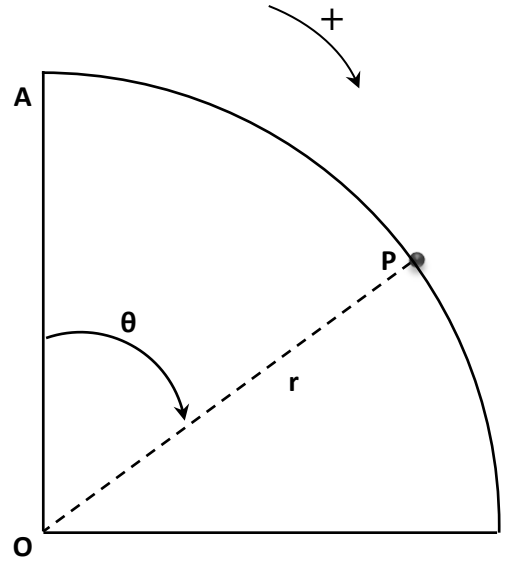
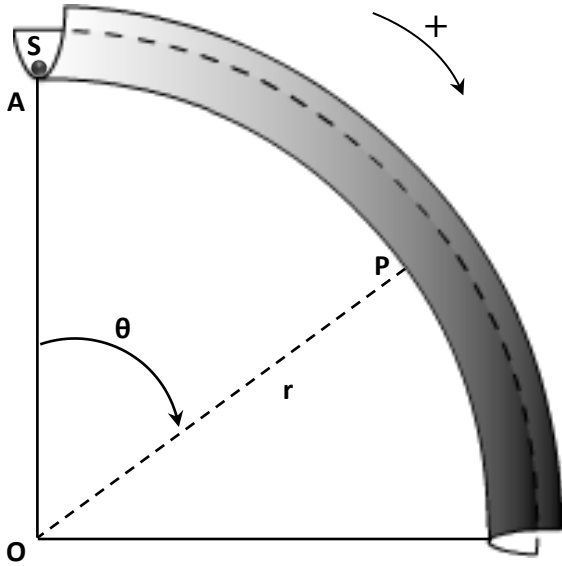
Figure-2



Le ressort étant allongé ; si on abandonne le système {Ressort + 2 solides} à lui-même, le ressort se détend et communique de l' $E_c$  à chaque solide grâce au travaux de ses tensions  $\vec{T}_1$  et  $\vec{T}_2$ , qui sont des forces intérieures à ce système.

**Application-2**

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 pose le solide doucement au sommet A de sorte qu'il le quitte avec une vitesse nulle.

Une position P de (S) à un instant  $t$  est repérée par l'angle  $\theta$  que fait le rayon OP avec le rayon OA.

Le mouvement est considéré par rapport à un référentiel de laboratoire, supposé galiléen.

On se propose de déterminer la valeur de la réaction  $\vec{R}$  de la gouttière sur la bille au cours du mouvement.

1.

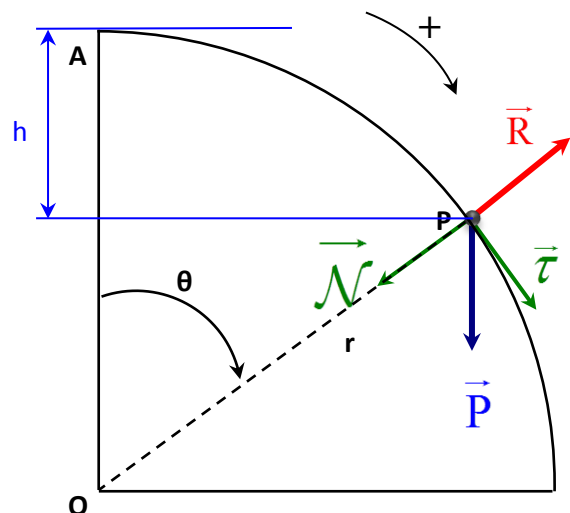
- Représenter les forces exercées sur (S) au point P.
- Appliquer, au point P, la 2<sup>ème</sup> loi de Newton au système (S), et en déduire les expressions de :
  - \* la composante tangentielle  $a_t$  du vecteur accélération en fonction de  $g$  et  $\theta$ .
  - \* le module  $\|\vec{R}\|$  de la réaction de la gouttière en fonction de  $m$ ,  $g$ ,  $\theta$ ,  $r$  et de la vitesse  $v$  au point P.

2.

- 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  $g$ ,  $\theta$  et  $r$ .
- En déduire l'expression de  $\|\vec{R}\|$  en fonction de  $g$ ,  $\theta$  et  $m$ .
- Déterminer, en degré, la valeur de l'angle  $\theta$  lorsque le solide (S) quitte la gouttière.
- Comment varie  $\|\vec{R}\|$  au cours du mouvement ?

1.

a)



b) 2<sup>ème</sup> loi de Newton :  $\vec{P} + \vec{R} = m \vec{a}$

$$\left\{ \begin{array}{l} * \text{ Sur } (\vec{P}, \vec{\tau}) : \|\vec{P}\| \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) + 0 = m a_t \Leftrightarrow m g \sin \theta = m a_t \Leftrightarrow a_t = g \sin \theta \\ * \text{ Sur } (\vec{P}, \vec{N}) : \|\vec{P}\| \cos \theta - \|\vec{R}\| = m a_n \Leftrightarrow m g \cos \theta - \|\vec{R}\| = m \frac{v^2}{r} \Leftrightarrow \|\vec{R}\| = m \left( g \cos \theta - \frac{v^2}{r} \right) \end{array} \right.$$

2.

a)  $\Delta E_c = W(\vec{P}) + W(\vec{R}) \Rightarrow E_c(P) - E_c(A) = m g h + 0 \Rightarrow \frac{1}{2} m v^2 - 0 = m g h \Rightarrow v^2 = 2 g h,$

Avec  $h = r - r \cos \theta = r (1 - \cos \theta) : v^2 = 2 g r (1 - \cos \theta) \Rightarrow \|\vec{v}\| = \sqrt{2 g r (1 - \cos \theta)}$

b)  $\frac{v^2}{r} = 2 g (1 - \cos \theta) \Rightarrow \|\vec{R}\| = m (g \cos \theta - 2 g (1 - \cos \theta)) = m g (\cos \theta - 2 + 2 \cos \theta)$   
 $\Rightarrow \|\vec{R}\| = m g (3 \cos \theta - 2)$

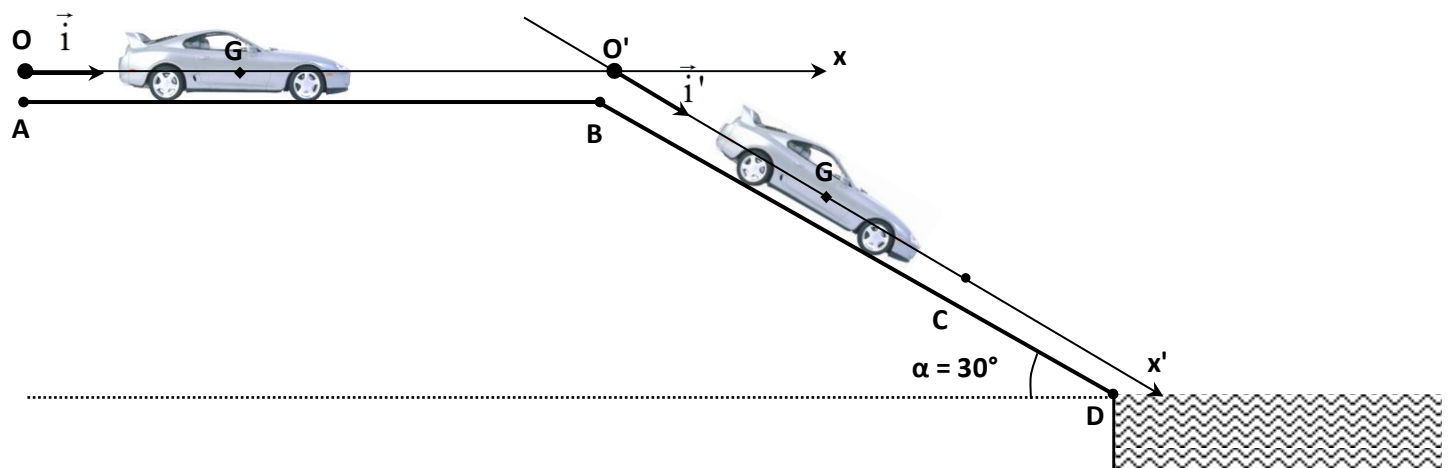
c) Lorsque le solide perd tout contact avec la gouttière,  $\|\vec{R}\| = 0$

$$\Rightarrow 3 \cos \theta - 2 = 0 \Rightarrow 3 \cos \theta = 2 \Rightarrow \cos \theta = \frac{2}{3} \Rightarrow \theta \approx 48,2^\circ$$

d)  $\theta$  augmente de  $0 \rightarrow 48,2^\circ \Rightarrow \cos \theta$  diminue de  $1 \rightarrow \frac{2}{3} : \|\vec{R}\|$  diminue de  $(m g) \rightarrow 0$

### Application-3

Une voiture de masse  $m = 1000 \text{ kg}$  et de centre d'inertie G, est en mouvement sur une piste ABCD.



1. **Sur la partie AB de la piste :** on étudie le mouvement par rapport à un référentiel terrestre considéré galiléen, dont le repère d'espace est  $(O, \vec{i})$ ;

La voiture roule grâce à une force motrice  $\vec{F} = \|\vec{F}\| \vec{i}$ , et elle est soumise à des forces de frottement dont la résultante s'écrit  $\vec{f} = - \|\vec{f}\| \vec{i}$ .

a) Représenter les forces agissant sur la voiture.

b) Sachant que la vitesse de la voiture est constante, et  $\|\vec{F}\| = 500 \text{ N}$  : calculer  $\|\vec{f}\|$  à l'aide du théorème du centre d'inertie; *commenter*.

c) Retrouver  $\|\vec{f}\|$  à l'aide du théorème de l'énergie cinétique ; *commenter*.

**2. Sur la partie BC de la piste :** on étudie le mouvement par rapport à un référentiel terrestre considéré galiléen, dont le repère d'espace est  $(O', \vec{i}')$  ;

La voiture aborde la pente en B avec une vitesse  $v_B = 72 \text{ Km.h}^{-1}$ , le conducteur arrête le moteur et laisse la voiture traîner grâce à son poids selon la ligne de plus grande pente  $BC = 300 \text{ m}$ , elle est toujours soumise à une force de frottement de même intensité que précédemment  $\vec{f}' = - \|\vec{f}\| \vec{i}'$ .

On donne  $g = 10 \text{ N.kg}^{-1}$ .

a) Représenter les forces agissant sur la voiture.

b) A l'aide du théorème de l'énergie cinétique ; déterminer, en  $\text{Km.h}^{-1}$ , sa vitesse au passage par C.

c) On se propose de retrouver ce résultat à l'aide des lois de la dynamique :

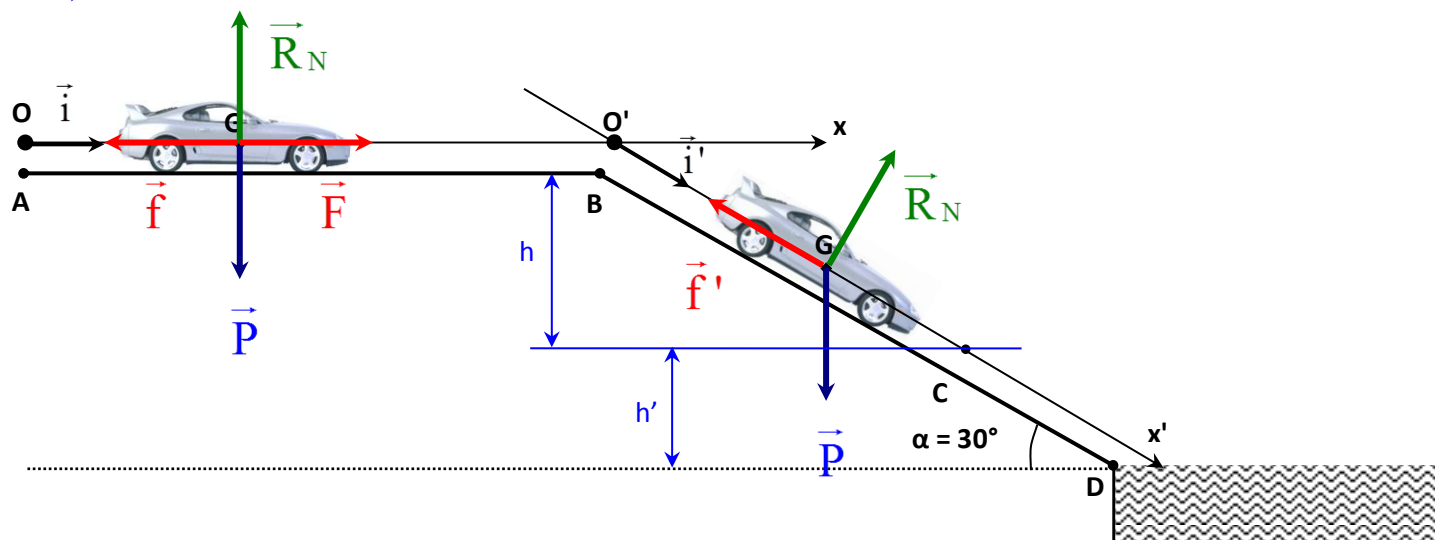
- \* A l'aide du théorème du centre d'inertie ; vérifier que le centre de gravité est animé d'un MRUA, déterminer son accélération.
- \* Retrouver sa vitesse au passage par la position C.

**3. Sur la partie CD de la piste :**

Juste avant d'atteindre la position C, le conducteur s'aperçoit que la piste mène à la mer ! ; il actionne ses freins au niveau de la position C, qui produisent des forces de frottement supplémentaires de résultante supposée constante  $\vec{f}_f = - \|\vec{f}_f\| \cdot \vec{i}'$ , qui s'ajoute à la force de frottement précédente  $\vec{f}'$  : soit  $\vec{f}'' = \vec{f}' + \vec{f}_f$  la résultante de tous les frottements agissant sur la voiture ; sachant que  $CD = 200 \text{ m}$ , calculer la valeur minimale de  $\|\vec{f}_f\|$  pour qu'il ne se plonge pas dans la mer.

1.

a)



b)  $\vec{F} + \vec{f} + \vec{P} + \vec{R}_N = m \vec{a}$  ; avec  $\vec{a}$  : accélération de G

On a  $\begin{cases} \vec{a} = \vec{0}, \text{ car la vitesse est constante} \\ \vec{P} + \vec{R}_N = \vec{0} \end{cases}$ , alors  $\vec{F} + \vec{f} = \vec{0} \Leftrightarrow \vec{f} = -\vec{F} \Rightarrow \boxed{\|\vec{f}\| = \|\vec{F}\| = 500 \text{ N}}$

A vitesse constante, la force motrice produite par le moteur sert juste à lutter aux forces de frottement.

c)  $\Delta E_c = W(\vec{F}) + W(\vec{f}) + W(\vec{P}) + W(\vec{R}_N) \Rightarrow 0 = W(\vec{F}) + W(\vec{f}) \Leftrightarrow W(\vec{f}) = -W(\vec{F})$

$\Rightarrow -\|\vec{f}\| \mathcal{AB} = -\|\vec{F}\| \mathcal{AB} \Rightarrow \|\vec{f}\| = \|\vec{F}\|$

A vitesse constante, le travail de la force motrice produite par le moteur sert juste à compenser les travaux des forces de frottement.



2.

a)

b) 
$$\Delta E_c = \underbrace{W(\vec{P})}_{B \rightarrow C} + \underbrace{W(\vec{f}')}_{B \rightarrow C} + \underbrace{W(\vec{R}_N)}_{B \rightarrow C} \Rightarrow E_c(C) - E_c(B) = m g h - \|\vec{f}\| BC, \text{ avec } h = BC \sin \alpha$$

$$\Rightarrow \frac{1}{2} m v_C^2 - \frac{1}{2} m v_B^2 = m g BC \sin \alpha - \|\vec{f}\| BC \Rightarrow \frac{1}{2} m v_C^2 = \frac{1}{2} m v_B^2 + m g BC \sin \alpha - \|\vec{f}\| BC$$

$$\Rightarrow v_C^2 = v_B^2 + 2 g BC \sin \alpha - \frac{2}{m} \|\vec{f}\| BC$$

$$= v_B^2 + 2 BC \left( g \sin \alpha - \frac{\|\vec{f}\|}{m} \right) = \left( \frac{72}{3,6} \right)^2 + 2 \cdot 300 \left( 10 \cdot \sin 30^\circ - \frac{500}{1000} \right) = 3100 \text{ (m.s}^{-1}\text{)}^2$$

$$\Rightarrow v_C = \sqrt{3100} \text{ m.s}^{-1} = \sqrt{3100} \cdot 3,6 \text{ Km.h}^{-1} : \boxed{v_C \approx 200 \text{ Km.h}^{-1}}$$

c)

\*  $\vec{P} + \vec{R}_N + \vec{f}' = m \vec{a}$

Sur (O', x') :  $\|\vec{P}\| \sin \alpha + 0 - \|\vec{f}\| = m a \Rightarrow m g \sin \alpha - \|\vec{f}\| = m a \Rightarrow a = g \sin \alpha - \frac{\|\vec{f}\|}{m}$

$a = 10 \sin 30^\circ - \frac{500}{1000} = 4,5 \text{ m.s}^{-2}$  : l'accélération est constante, de même sens que la vitesse, et la trajectoire étant rectiligne, alors la voiture est en MRUA.

\*  $v_C^2 - v_B^2 = 2 a (x'_C - x'_B) = 2 a BC \Rightarrow v_C^2 = v_B^2 + 2 a BC = \left( \frac{72}{3,6} \right)^2 + 2 \cdot 4,5 \cdot 300 = 3100 \text{ m.s}^{-1}$

$\Rightarrow v_C \approx 200 \text{ Km.h}^{-1}$

3. Il faut que le mouvement se termine au plus en D avec une vitesse nulle :  $v_D = 0 \Rightarrow E_c(D) = 0$

D'après le théorème de l'énergie cinétique :

$$\Delta E_c = \underbrace{W(\vec{P})}_{C \rightarrow D} + \underbrace{W(\vec{f}'')}_{C \rightarrow D} + \underbrace{W(\vec{R}_N)}_{C \rightarrow D} \Rightarrow 0 - E_c(C) = m g h' - \|\vec{f}''\| CD, \text{ avec } h' = CD \sin \alpha$$

$$\Rightarrow -\frac{1}{2} m v_C^2 = m g CD \sin \alpha - \|\vec{f}''\| CD \Rightarrow \|\vec{f}''\| CD = m g CD \sin \alpha + \frac{1}{2} m v_C^2$$

$$\Rightarrow \|\vec{f}''\| = m g \sin \alpha + \frac{1}{2} \frac{m}{CD} v_C^2 = m \left( g \sin \alpha + \frac{1}{2} \frac{v_C^2}{CD} \right) = 1000 \left( 10 \sin 30^\circ + \frac{1}{2} \frac{3100}{200} \right) = 12750 \text{ N}$$

D'où la valeur minimale que doit avoir la force exercée par les freins :

$$\|\vec{f}_r\| = \|\vec{f}''\| - \|\vec{f}\| = 12750 - 500 : \boxed{\|\vec{f}_r\| = 12250 \text{ N}}$$



## TP 5 : Vérification expérimentale du théorème de l'énergie cinétique

### Objectifs :

- Déterminer l'énergie cinétique d'un solide supposé ponctuel à partir de la mesure de sa vitesse.
- Vérifier le théorème de l'énergie cinétique

### Matériel :

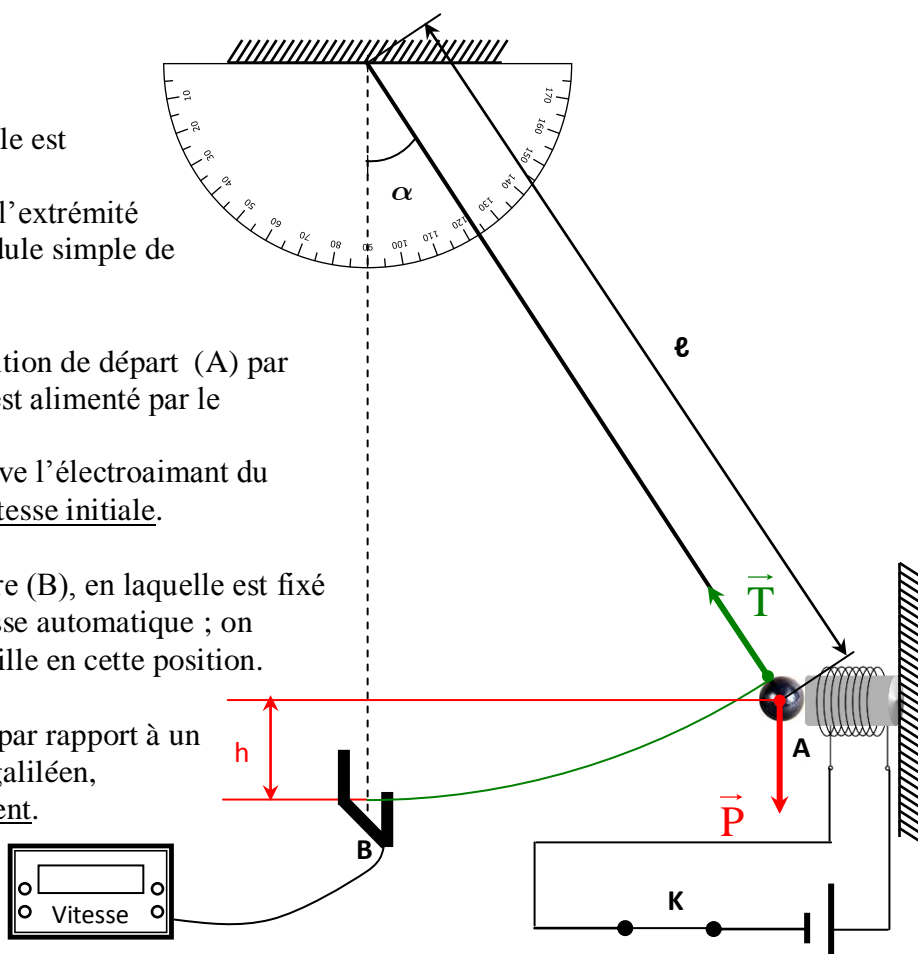
- 1 Pendule simple ( $\ell = 62$  cm,  $m = 50$  g en acier), sur potence munie d'un rapporteur.
- 2 Pince + 1 Noix de serrage.
- 1 Potence.
- 1 Capteur mesureur de vitesse.
- 1 Mesureur de vitesse automatique.
- 1 Electroaimant.
- 1 Générateur de tension.
- 1 Interrupteur.
- 4 Fils de connexion.

### Manipulation :

#### 1. Expérience

Une bille de masse ( $m$ ) supposée ponctuelle est suspendue à l'extrémité inférieure d'un fil inextensible et de masse négligeable dont l'extrémité supérieure est fixe : cela constitue un pendule simple de masse ( $m$ ) et de longueur ( $\ell$ ).

- \* La bille en acier est retenue à sa position de départ (A) par l'électroaimant, tant que ce dernier est alimenté par le générateur.  
L'ouverture de l'interrupteur (K) prive l'électroaimant du courant, d'où il lâche la bille sans vitesse initiale.
- \* Au passage par la position d'équilibre (B), en laquelle est fixé un capteur lié à un mesureur de vitesse automatique ; on obtient la valeur de la vitesse de la bille en cette position.
- \* Le mouvement de la bille est étudié par rapport à un référentiel de laboratoire considéré galiléen, et on négligera les forces de frottement.



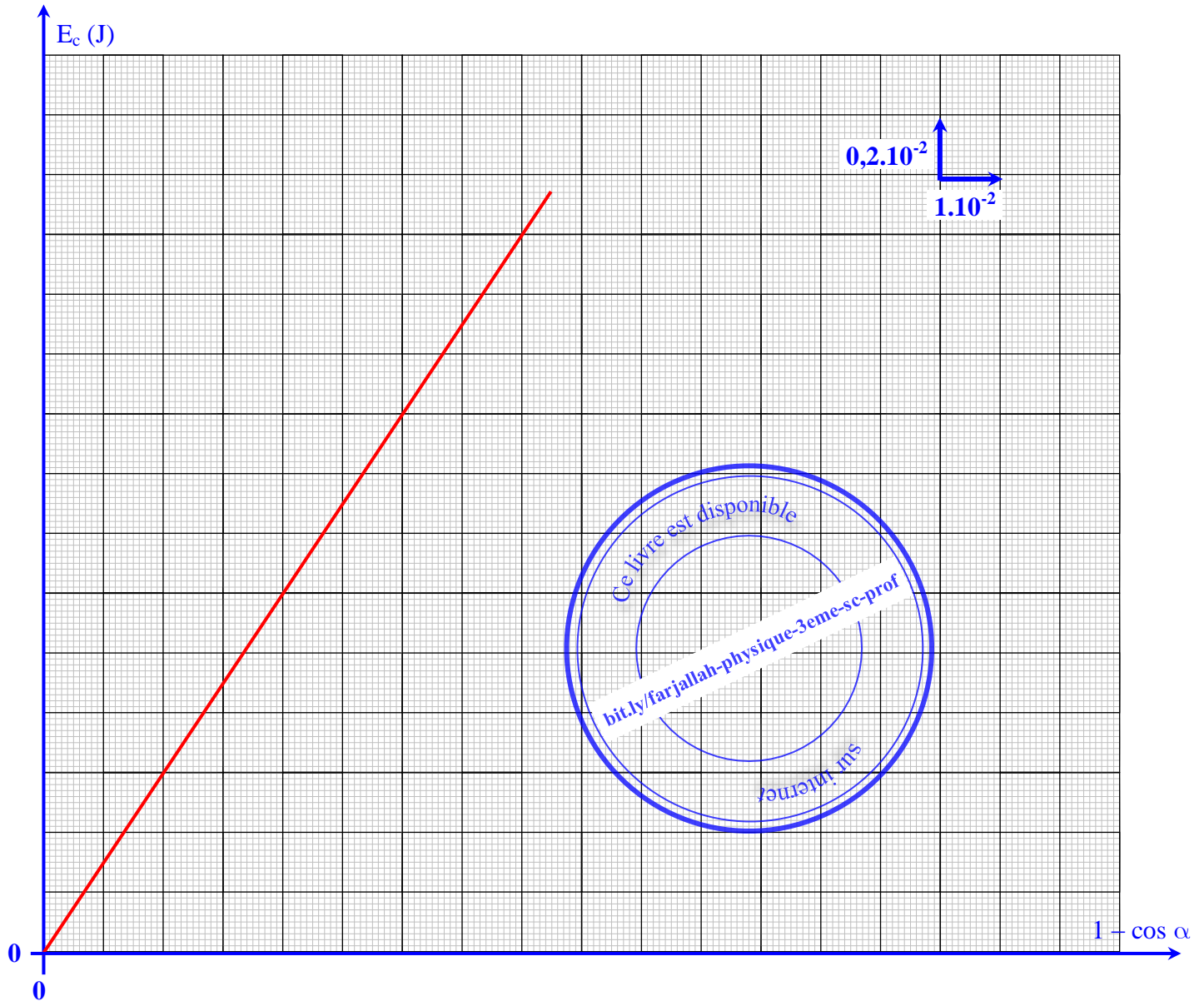
#### 2. Résultats

$m = 50$  g &  $\ell = 62$  cm

$\alpha$ (°)	0	5	10	15	20	25
$1 - \cos \alpha$	0	$0,38 \cdot 10^{-2}$	$1,52 \cdot 10^{-2}$	$3,41 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$9,37 \cdot 10^{-2}$
$v$ (m.s <sup>-1</sup> )	0	0,215	0,430	0,643	0,854	1,067
$E_c$ (J)	0	$0,11 \cdot 10^{-2}$	$0,46 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$2,84 \cdot 10^{-2}$

### 3. Exploitation des résultats

a) Choisir des échelles convenables, et tracer la courbe  $E_c = f(1 - \cos \alpha)$



b) En appliquant le théorème de l'énergie cinétique à la bille entre les positions A et B ; établir l'expression théorique de  $E_c$  en fonction de  $m$ ,  $g$ ,  $\ell$  et  $\alpha$

$$\Delta E_c = W(\vec{P}) + W(\vec{T}) \Rightarrow E_c - 0 = m g h + 0, \text{ avec } h = \ell - \ell \cos \alpha = \ell (1 - \cos \alpha)$$

$$\Rightarrow E_c = m g \ell (1 - \cos \alpha)$$

c) Est-ce que le théorème de l'énergie cinétique est vérifié ?

Pour que le théorème de l'énergie cinétique soit vérifié, il faut que la courbe  $E_c = f(1 - \cos \alpha)$  soit une droite passant par l'origine et de coefficient directeur ( $m g \ell$ ) ; d'après les résultats de l'expérience :

\* La courbe est bien une droite passant par l'origine.

\* Son coefficient directeur est  $\frac{E_c}{1 - \cos \alpha} = \frac{1,8 \cdot 10^{-2} \text{ J}}{6 \cdot 10^{-2}} = 0,3 \text{ J} = m g \ell = 50 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 9,8 \cdot 0,62 \text{ m}$

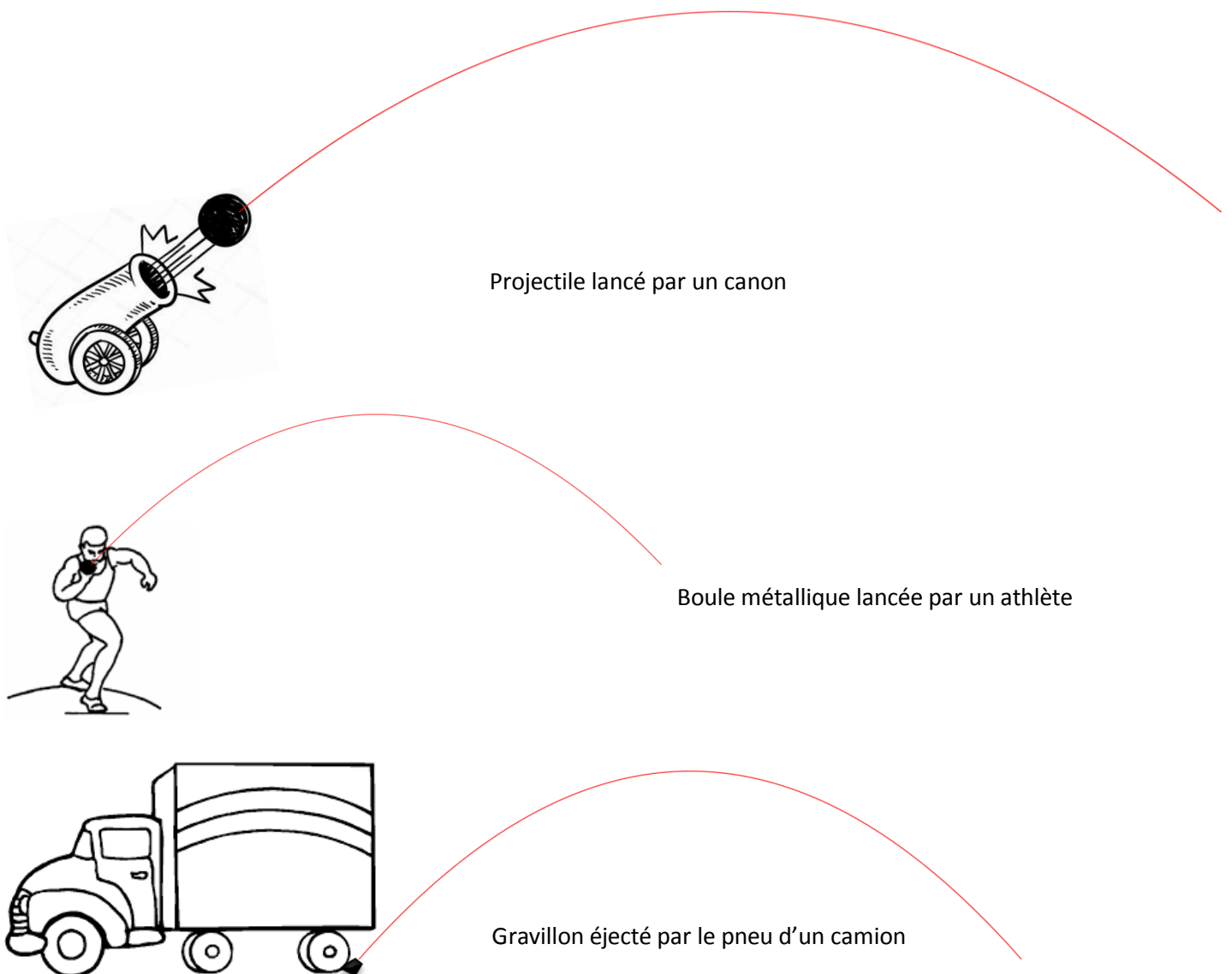
Donc le théorème de l'énergie cinétique est vérifié.

## Chapitre-4 :Mouvement dans un champ gravitationnel

Objectifs
➤ Appliquer la relation fondamentale de la dynamique au mouvement d'un projectile.
Prérequis
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Champ de pesanteur.</li> <li>▪ 2<sup>ème</sup> loi de Newton / Théorème du centre d'inertie.</li> <li>▪ Relations entre les vecteurs ; accélération instantanée, vitesse instantanée, et position.</li> <li>▪ Chute libre.</li> <li>▪ MRUA et MRUR.</li> </ul>
Matériel
* Bille métallique.

- \* On se limitera aux mouvements dans un domaine restreint au voisinage de la Terre, où le champ de gravitation est pratiquement uniforme : champ de pesanteur  $\vec{g}$ .
- \* En négligeant la résistance de l'air, tout corps lancé avec une certaine vitesse initiale  $\vec{v}_0$  dans le champ de pesanteur serait en mouvement sous la seule action de son poids : projectile.  
ex (Fig-1)

**Figure-1**

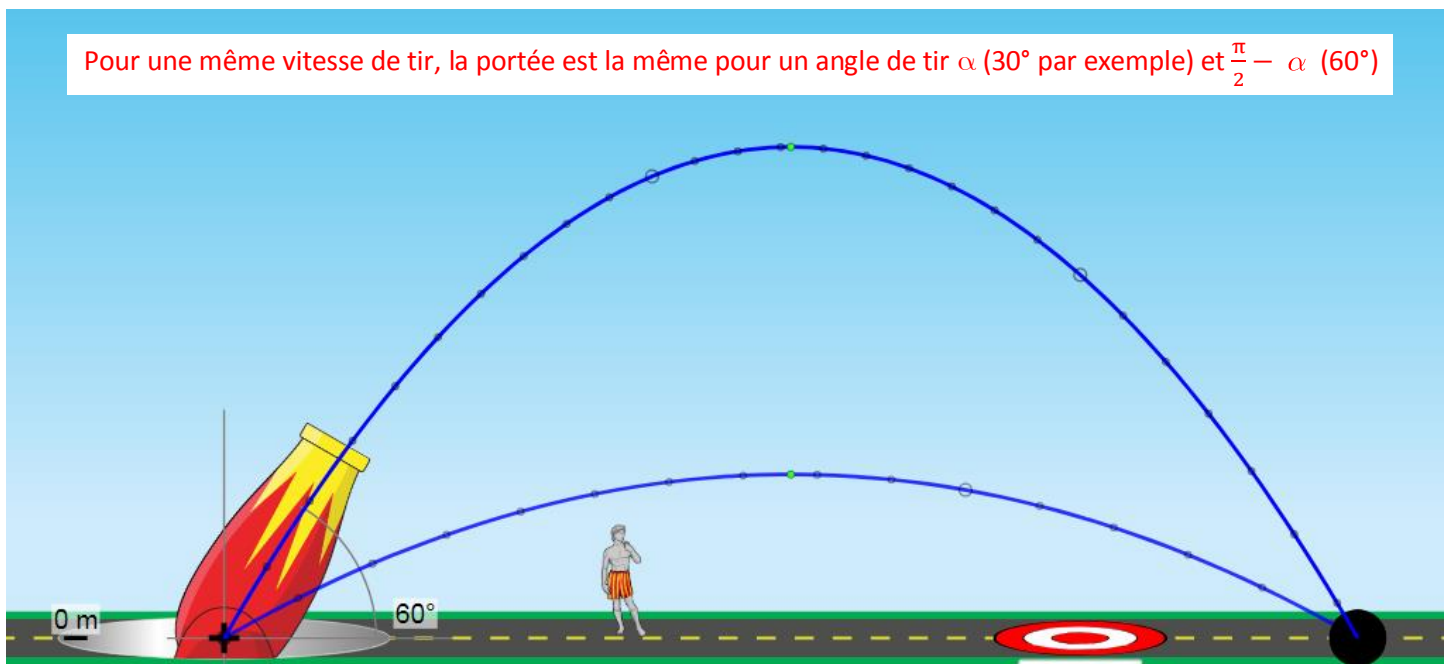




Flèche projetée par un archer

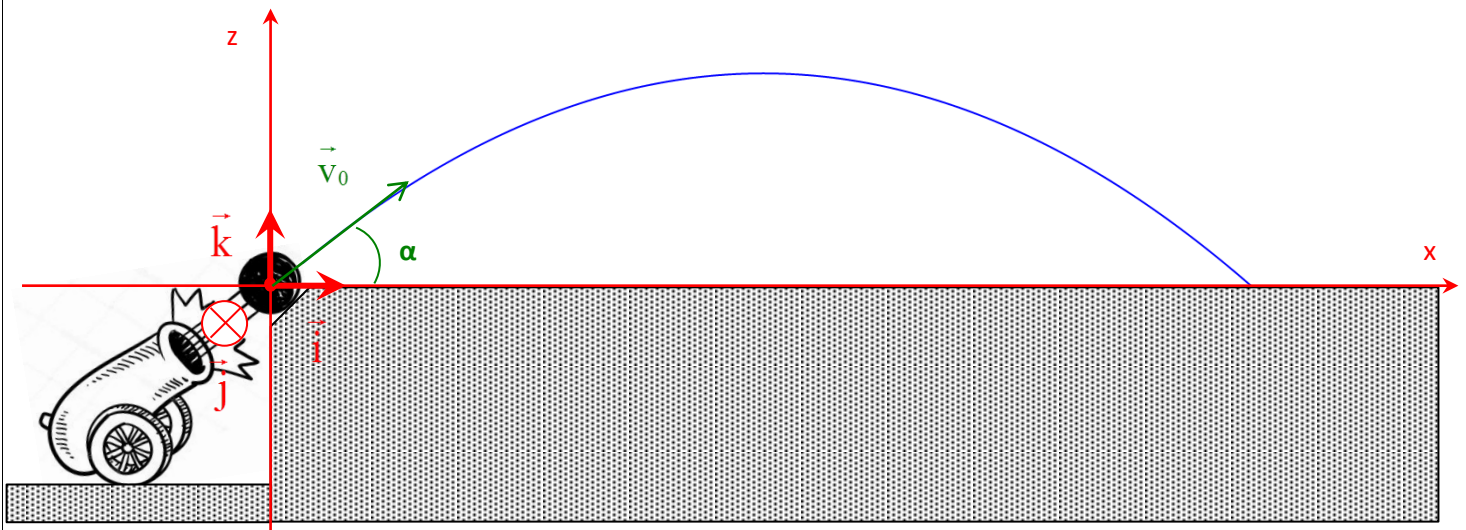
La trajectoire du centre de gravité d'un projectile est parabolique

Figure-2



**Activité**

Un boulet de masse  $m$  est lancée par un canon, comme le montre la figure ci-dessous ;



Durant le mouvement, l'ensemble des frottements dus à la résistance de l'air sont négligés.

On s'intéresse au mouvement du centre de gravité  $G$  de ce projectile dans le champ de pesanteur considéré uniforme ; le mouvement est étudié par rapport à un référentiel terrestre, supposé galiléen, dont le repère d'espace est  $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ , et l'origine du temps l'instant où le boulet quitte la gueule du canon en  $O$  avec une vitesse initiale  $\vec{v}_0$  contenue dans le plan vertical  $(O, x, z)$  et faisant un angle  $\alpha$  avec l'horizontale.

- Etablir les équations horaires  $x(t)$ ,  $y(t)$  et  $z(t)$  du mouvement. On notera  $v_0 = \|\vec{v}_0\|$
- Vérifier que la trajectoire est contenue dans le plan  $(O, x, z)$ , et qu'elle est parabolique.
- Pour  $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$  rad ; la trajectoire possède un sommet (S) et une portée :
  - \* La coordonnée ( $z_S$ ) du sommet est la hauteur maximale atteinte par le projectile au-dessus du sol lorsque l'origine (O) est au niveau du sol ; elle est appelée **flèche** en balistique (science du mouvement des projectiles de guerre)
  - \* L'abscisse ( $x_P$ ) du point (P) d'impact du projectile avec le sol, lorsque l'origine (O) est au niveau du sol ; est appelée **portée**, en balistique.
  - a) Indiquer le sommet et la flèche sur la figure, et représenter le vecteur vitesse en S.
  - b) Etablir l'expression de la date ( $t_S$ ) de l'instant de passage du projectile par le sommet.
  - c) En déduire :
    - \* L'expression de la flèche, dans quel cas elle serait maximale pour une vitesse initiale donnée ?, au détriment de quoi ?
    - \* L'expression de l'abscisse ( $x_S$ ) du sommet.
  - d) Indiquer la portée, et déterminer son expression par deux méthodes différentes.
  - e) En déduire, pour une vitesse initiale donnée :
    - \* La valeur  $\alpha_0$  de l'angle de tir permettant une portée maximale.
    - \* La relation entre les angles aboutissant à la même portée.
    - \* L'expression de la date ( $t_P$ ) de l'instant d'impact du projectile avec le sol.
- Pour  $\alpha = 90^\circ$  (tir vers le haut) ; le projectile atteint un sommet (S), puis il rebrousse chemin :
  - a) Ecrire les expressions des grandeurs cinématiques du projectile.
  - b) En déduire les expressions de  $t_S$  et  $z_S$ .
  - c) Quelle est la nature du mouvement pendant la phase de montée ?
  - d) Quelle est la nature du mouvement pendant la phase de descente ?

**1.**

$$* \text{ Th du centre d'inertie } \vec{P} = m \vec{a}, \text{ avec } \vec{P} = m \vec{g} \Rightarrow \vec{a} = \vec{g} = -g \vec{k} \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = 0 \\ a_z = -g \end{cases}$$

$$* \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \Rightarrow \vec{v} = \int \vec{a} dt \Rightarrow \vec{v} \begin{cases} v_x = \int a_x dt = \int 0 dt = C^{te}_1 \\ v_y = \int a_y dt = \int 0 dt = C^{te}_2 \\ v_z = \int a_z dt = \int -g dt = -gt + C^{te}_3 \end{cases}$$

$$\text{On a } \begin{cases} v_x(t=0) = v_{0x} = v_0 \cos \alpha \Rightarrow C^{te}_1 = v_0 \cos \alpha \\ v_y(t=0) = v_{0y} = 0 \Rightarrow C^{te}_2 = 0 \\ v_z(t=0) = v_{0z} = v_0 \sin \alpha \Rightarrow -g \cdot 0 + C^{te}_3 = v_0 \sin \alpha \Rightarrow C^{te}_3 = v_0 \sin \alpha \end{cases},$$

$$\text{alors : } \vec{v} \begin{cases} v_x = v_0 \cos \alpha \\ v_y = 0 \\ v_z = -gt + v_0 \sin \alpha \end{cases}$$

$$* \vec{v} = \frac{d\vec{OG}}{dt} \Rightarrow \vec{OG} = \int \vec{v} dt \Rightarrow \vec{OG} \begin{cases} x = \int v_x dt = \int (v_0 \cos \alpha) dt = (v_0 \cos \alpha) t + C^{te}_4 \\ y = \int v_y dt = \int 0 dt = C^{te}_5 \\ z = \int v_z dt = \int (-gt + v_0 \sin \alpha) dt = \left( -\frac{1}{2} g t^2 + v_0 \sin \alpha t \right) + C^{te}_6 \end{cases}$$

$$\text{On a } \begin{cases} x(t=0) = 0 \Rightarrow (v_0 \cos \alpha) \cdot 0 + C^{te}_4 = 0 \Rightarrow C^{te}_4 = 0 \\ y(t=0) = 0 \Rightarrow C^{te}_5 = 0 \\ z(t=0) = 0 \Rightarrow \left( -\frac{1}{2} g \cdot 0 + v_0 \sin \alpha \cdot 0 \right) + C^{te}_6 = 0 \Rightarrow C^{te}_6 = 0 \end{cases},$$

$$\text{alors : } \vec{OG} \begin{cases} x = v_0 \cos \alpha \cdot t \\ y = 0 \\ z = -\frac{1}{2} g \cdot t^2 + v_0 \sin \alpha \cdot t \end{cases}$$

**2.**

\* A chaque instant  $y = 0 \Rightarrow$  Le mouvement s'effectue dans le plan (O, x, z) : plan vertical qui contient  $\vec{v}_0$ .

\* Equation cartésienne de la trajectoire :

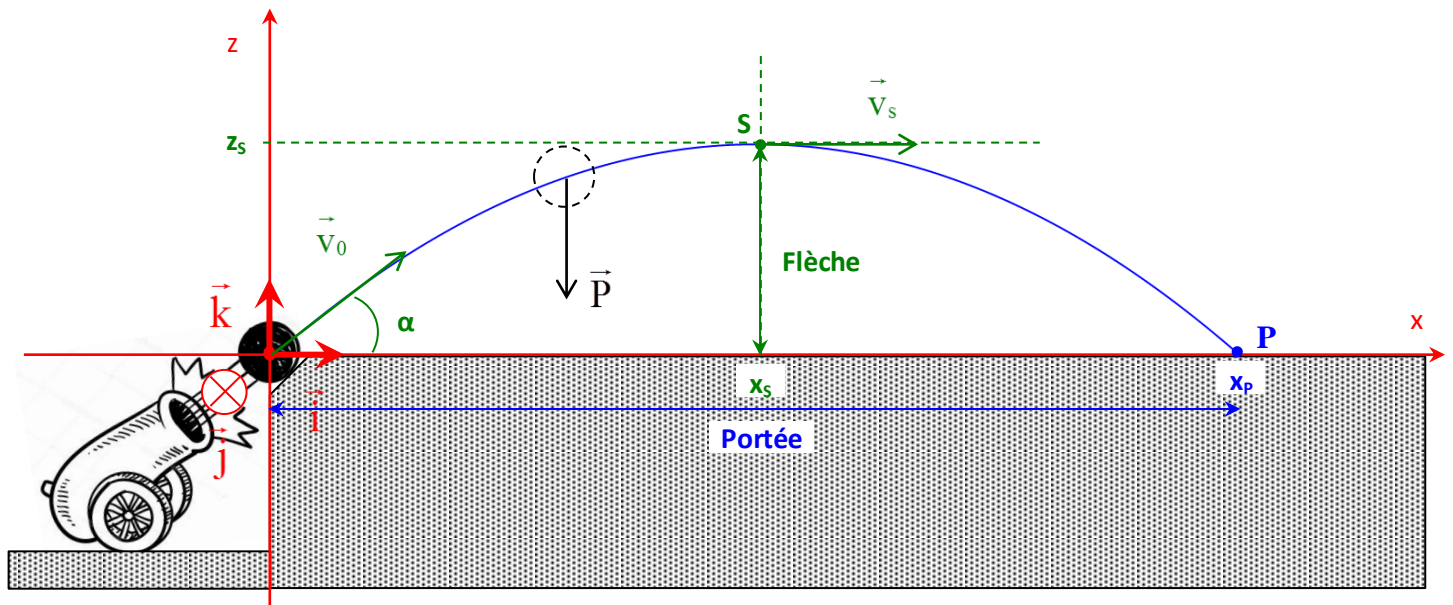
$$t = \frac{x}{v_0 \cos \alpha} \Rightarrow z = -\frac{1}{2} g \cdot \left( \frac{x}{v_0 \cos \alpha} \right)^2 + \cancel{y_0} \sin \alpha \cdot \frac{x}{\cancel{y_0} \cos \alpha} \Rightarrow z = \left( -\frac{g}{2 v_0^2 \cos^2 \alpha} \right) \cdot x^2 + (\text{tg } \alpha) \cdot x$$

La trajectoire du centre de gravité d'un corps en chute libre avec vitesse initiale non verticale, est parabolique.



3.

a)



$$b) \left( \frac{dz}{dt} \right)_{t=t_s} = 0 \Rightarrow v_z(t=t_s) = 0 \Rightarrow -g t_s + v_0 \sin \alpha = 0 \Rightarrow g t_s = v_0 \sin \alpha \Rightarrow \boxed{t_s = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}}$$

c)

$$* z_s = z(t=t_s) = -\frac{1}{2} g \cdot \left( \frac{v_0 \sin \alpha}{g} \right)^2 + v_0 \sin \alpha \cdot \frac{v_0 \sin \alpha}{g} = -\frac{1}{2} g \cdot \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{g^2} + \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{g}$$

$$= \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{g} \left( 1 - \frac{1}{2} \right) : \boxed{z_s = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}}$$

$$\Rightarrow z_s \text{ est maximale pour } \sin^2 \alpha = 1 \Leftrightarrow \sin \alpha = \pm 1 \Leftrightarrow \alpha = \frac{\pi}{2} \text{ ou } \frac{3\pi}{2} \text{ rad} :$$

$\Rightarrow$  La flèche est maximale pour un tir vertical  $\left( \alpha = \frac{\pi}{2} \text{ rad} \right)$ , mais au détriment de la portée ( $x_p = 0$ ).

$$* x_s = x(t=t_s) = v_0 \cos \alpha \cdot \frac{v_0 \sin \alpha}{g} = \frac{v_0^2 \sin \alpha \cos \alpha}{g} = \frac{v_0^2 (2 \sin \alpha \cos \alpha)}{2g} : \boxed{x_s = \frac{v_0^2 \sin(2\alpha)}{2g}}$$

d)

$$* \boxed{x_p = 2 x_s = \frac{v_0^2 \sin(2\alpha)}{g}}$$

$$* x_p = x(\text{pour } z=0) : \left( -\frac{g}{2 v_0^2 \cos^2 \alpha} \right) \cdot x_p^2 + (\text{tg } \alpha) \cdot x_p = 0 \Rightarrow \frac{g}{2 v_0^2 \cos^2 \alpha} \cdot x_p = \text{tg } \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}$$

$$\Rightarrow \frac{g}{2 v_0^2 \cos^2 \alpha} \cdot x_p = \sin \alpha \Rightarrow x_p = \frac{2 v_0^2 \cos \alpha \sin \alpha}{g} = \frac{v_0^2 \sin(2\alpha)}{g}$$

e)

$$* x_p \text{ est maximale pour } \sin(2\alpha) = 1 \Rightarrow 2\alpha_0 = \frac{\pi}{2} \text{ rad} \Rightarrow \boxed{\alpha_0 = \frac{\pi}{4} \text{ rad}} = 45^\circ$$

\* On sait que  $\sin(\pi - 2\alpha) = \sin(2\alpha)$ , alors la portée ( $x_p$ ) est la même pour tout angle ( $\alpha$ ) et un angle

$$(\alpha') \text{ tel que } 2\alpha' = \pi - 2\alpha \Rightarrow \boxed{\alpha' = \frac{\pi}{2} - \alpha} \text{ . (Fig-2)}$$

$$* \quad x_p = x(\text{pour } t = t_p) : \frac{v_0^2 \sin(2\alpha)}{g} = \cancel{v_0} \cos \alpha \cdot t_p \Leftrightarrow \frac{v_0 2 \sin \alpha \cancel{\cos \alpha}}{g} = \cancel{\cos \alpha} \cdot t_p$$

$$\Rightarrow \boxed{t_p = \frac{2 v_0 \sin \alpha}{g}}$$

4.

a)

$$* \quad \vec{a} = -g \vec{k}$$

$$* \quad \vec{v} \begin{cases} v_x = 0 \\ v_y = 0 \\ v_z = -gt + v_0 \end{cases} \Rightarrow \vec{v} = (-gt + v_0) \vec{k}$$

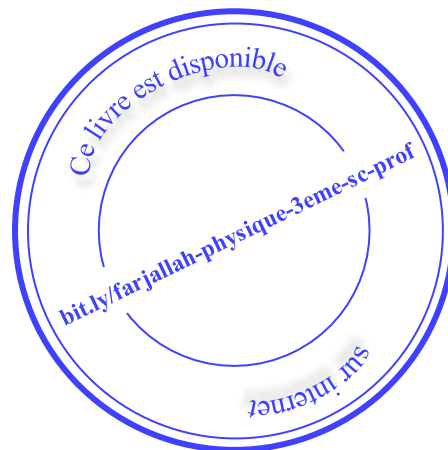
$$* \quad \overrightarrow{OG} \begin{cases} x = 0 \\ y = 0 \\ z = -\frac{1}{2} g \cdot t^2 + v_0 \cdot t \end{cases} \Rightarrow \overrightarrow{OG} = \left( -\frac{1}{2} g \cdot t^2 + v_0 \cdot t \right) \vec{k}$$

b) Au sommet le mobile s'arrête ( $v_s = 0$ ), avant de rebrousser chemin :

$$-gt_s + v_0 = 0 \Rightarrow gt_s = v_0 \Rightarrow t_s = \frac{v_0}{g} \Rightarrow z_s = -\frac{1}{2} g \cdot \frac{v_0^2}{g^2} + v_0 \cdot \frac{v_0}{g} = \frac{v_0^2}{g} \left( 1 - \frac{1}{2} \right) = \frac{1}{2} \frac{v_0^2}{g}$$

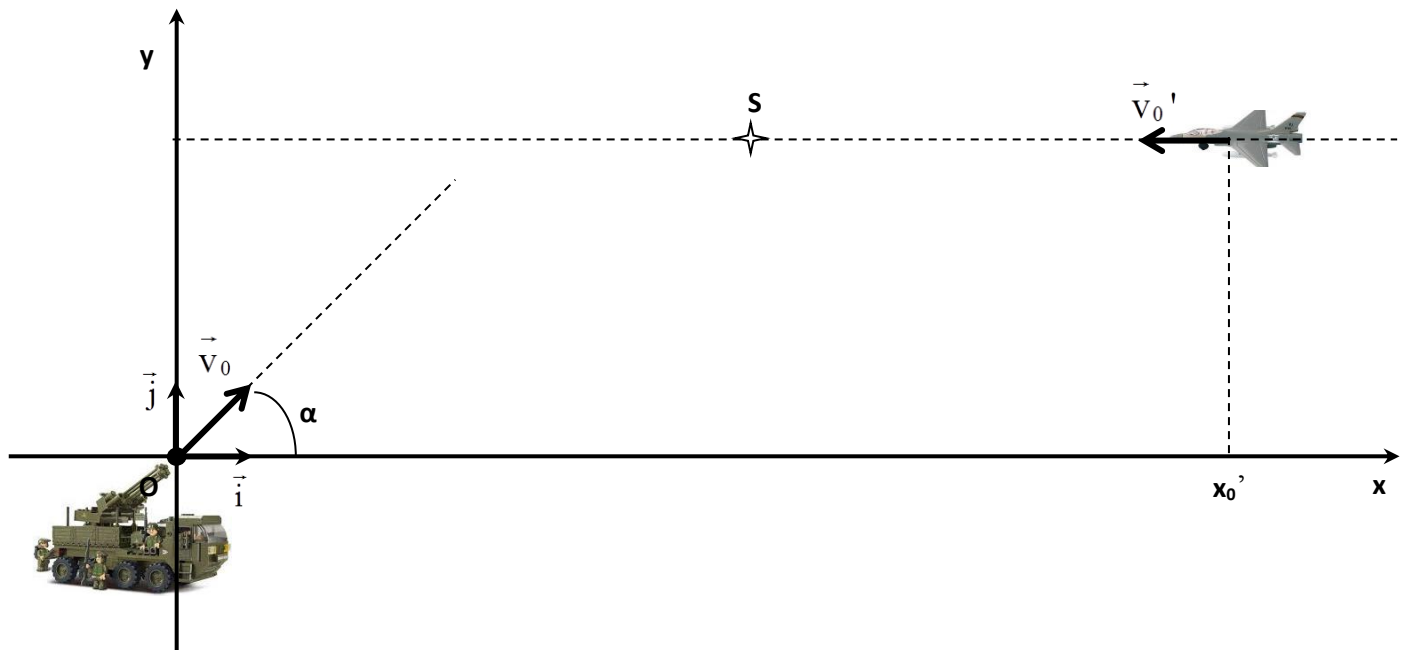
c)  $\vec{a}$  constante, et  $\vec{a} \cdot \vec{v} < 0$  : MRUR.

d)  $\vec{a}$  constante, et  $\vec{a} \cdot \vec{v} > 0$  : MRUA. (chute libre sans vitesse initiale)



### Application

Tous les mouvements sont étudiés par rapport à un référentiel terrestre, supposé galiléen, dont le repère d'espace est  $(O, \vec{i}, \vec{j})$ . La résistance de l'air est négligée, et le champ de pesanteur considéré uniforme.



Une pièce d'artillerie lance un projectile, qu'on assimile à un point matériel M, dans une direction faisant un angle  $\alpha = 45^\circ$  avec l'horizontale ; il part avec une vitesse initiale  $\vec{v}_0$  depuis le point O à l'origine des dates.

On notera  $v_0 = \|\vec{v}_0\|$ .

On donne  $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$  et  $\sin 45^\circ = \cos 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}$ .

1.

- Dans quel plan s'effectue le mouvement du projectile, sachant que  $\vec{v}_0$  est contenu dans le plan  $(O, x, y)$
- Montrer que le vecteur vitesse instantanée du projectile serait  $\vec{v}(t) = \left(\frac{\sqrt{2}}{2} v_0\right) \vec{i} + \left(-gt + \frac{\sqrt{2}}{2} v_0\right) \vec{j}$
- Montrer que le vecteur position du projectile serait  $\overline{OM}(t) = \left(\frac{\sqrt{2}}{2} v_0 t\right) \vec{i} + \left(-\frac{1}{2} g t^2 + \frac{\sqrt{2}}{2} v_0 t\right) \vec{j}$
- Etablir l'équation cartésienne de la trajectoire du mobile ; quelle est sa forme, représenter son allure où le point (S) est son sommet.

2. Le tireur veut que le projectile ait une flèche de **10 Km** au-dessus de l'horizontale  $(O, x)$  qu'on confonde avec le sol :

- Indiquer la flèche et la portée du projectile, sur la figure.
- Calculer la valeur que devrait avoir  $\vec{v}_0$ .
- Calculer l'abscisse  $x_S$  du sommet S, en déduire la valeur de la portée de ce projectile.
- Ecrire le vecteur vitesse  $\vec{v}_S$  du projectile au point S, et le représenter à l'échelle :  $443 \text{ m.s}^{-1} \rightarrow 1 \text{ cm}$ .

3. Un avion de chasse vole à une vitesse constante  $\vec{v}_0' = -v_0' \vec{i}$  avec  $v_0' = 720 \text{ Km.h}^{-1}$ , et à une altitude constante **h = 10 Km** au-dessus de l'horizontale  $(O, x)$  qu'on confonde avec le sol.

Il se rapproche de la pièce d'artillerie et largue un obus, la ciblant, au même instant que cette dernière a tiré son projectile ( $t = 0$ ).

On assimile l'obus à un point matériel M'; soit  $x_0'$  son abscisse à l'instant où il est largué.

- a) Dans quel plan s'effectue le mouvement de l'obus, quelle est la forme de sa trajectoire, la représenter dans le cas où il atteint sa cible.
- b) Etablir ses équation horaires  $x'(t)$  et  $y'(t)$ .
- c) Calculer la valeur que devrait avoir  $x_0'$  pour que l'obus atteigne sa cible.
- d) Après avoir largué son obus, l'avion poursuit son mouvement rectiligne uniforme à la même altitude ( $h$ ) et avec la même vitesse ( $\vec{v}_0'$ ) : est-ce qu'il sera à son tour touché par le projectile ; si oui déterminer sa position à l'instant où le projectile l'atteint.

1.

a) Le mouvement s'effectue dans le plan vertical contenant  $\vec{v}_0 : (O, x, y)$ .

b) Soit  $m$  la masse du projectile ; 2<sup>ème</sup> loi de Newton :  $\vec{P} = m \vec{a}$ , avec  $\vec{P} = m \vec{g} \Rightarrow \vec{a} = \vec{g} = -g \vec{j} \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = -g \end{cases}$

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \Rightarrow \vec{v} = \int \vec{a} dt \Rightarrow \vec{v} \begin{cases} v_x = \int a_x dt = \int 0 dt = C^{te}_1 \\ v_y = \int a_y dt = \int -g dt = -gt + C^{te}_2 \end{cases}$$

$$\text{On a } \begin{cases} v_x(t=0) = v_{0x} = v_0 \cos \alpha \Rightarrow C^{te}_1 = v_0 \cos \alpha = v_0 \frac{\sqrt{2}}{2} \\ v_y(t=0) = v_{0y} = v_0 \sin \alpha \Rightarrow C^{te}_2 = v_0 \sin \alpha = v_0 \frac{\sqrt{2}}{2} \end{cases},$$

$$\text{alors : } \vec{v} \begin{cases} v_x = \frac{\sqrt{2}}{2} v_0 \\ v_y = -gt + \frac{\sqrt{2}}{2} v_0 \end{cases} \Leftrightarrow \boxed{\vec{v}(t) = \left( \frac{\sqrt{2}}{2} v_0 \right) \vec{i} + \left( -gt + \frac{\sqrt{2}}{2} v_0 \right) \vec{j}}$$

c)

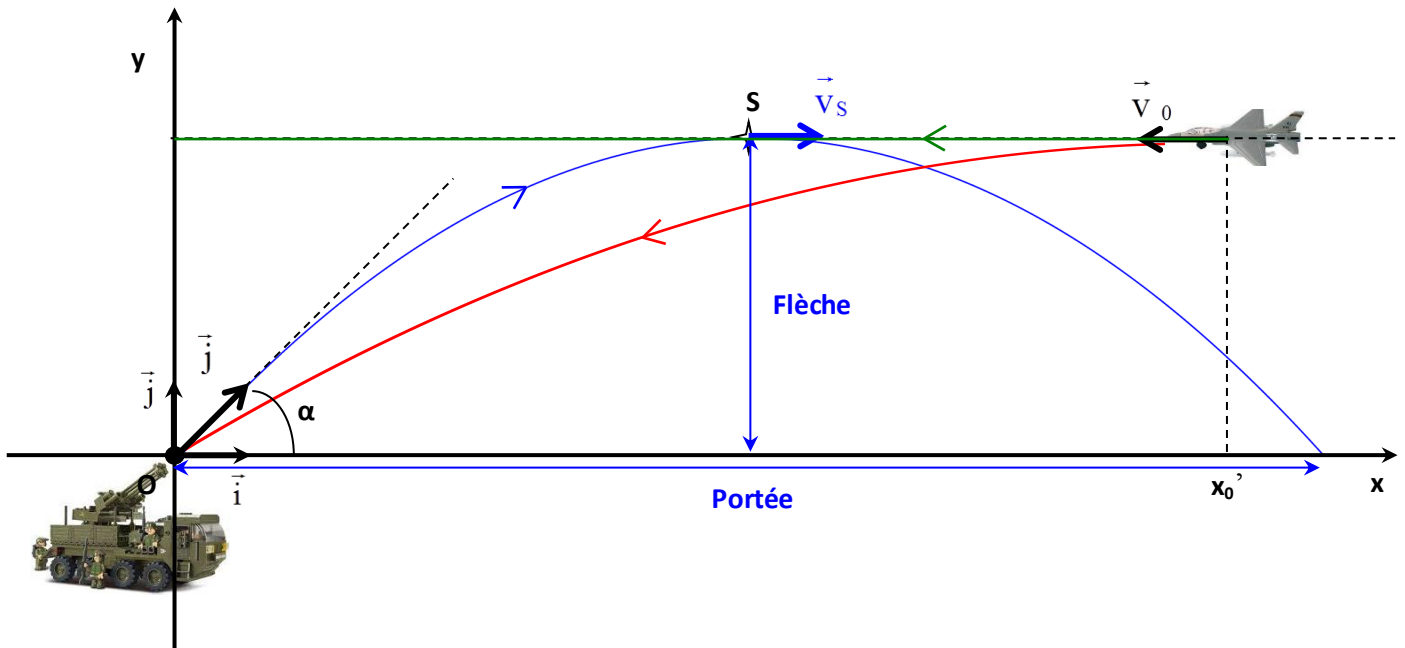
$$\vec{v} = \frac{d\vec{OM}}{dt} \Rightarrow \vec{OM} = \int \vec{v} dt \Rightarrow \vec{OM} \begin{cases} x = \int v_x dt = \int \left( \frac{\sqrt{2}}{2} v_0 \right) dt = \frac{\sqrt{2}}{2} v_0 t + C^{te}_3 \\ y = \int v_y dt = \int \left( -gt + \frac{\sqrt{2}}{2} v_0 \right) dt = -\frac{1}{2} g t^2 + \frac{\sqrt{2}}{2} v_0 t + C^{te}_4 \end{cases}$$

$$\text{On a } \begin{cases} x(t=0) = 0 \Rightarrow C^{te}_3 = 0 \\ y(t=0) = 0 \Rightarrow C^{te}_4 = 0 \end{cases}, \text{ alors : } \vec{OM} \begin{cases} x = \frac{\sqrt{2}}{2} v_0 t \\ y = -\frac{1}{2} g t^2 + \frac{\sqrt{2}}{2} v_0 t \end{cases} \Leftrightarrow$$

$$\boxed{\vec{OM}(t) = \left( \frac{\sqrt{2}}{2} v_0 t \right) \vec{i} + \left( -\frac{1}{2} g t^2 + \frac{\sqrt{2}}{2} v_0 t \right) \vec{j}}$$

$$\text{d) } x = \frac{\sqrt{2}}{2} v_0 t \Rightarrow t = \frac{2}{\sqrt{2} v_0} x \Rightarrow y = -\frac{1}{2} g \frac{4}{2 v_0^2} x^2 + \frac{\sqrt{2}}{2} \cancel{v_0} \frac{2}{\sqrt{2} \cancel{v_0}} x$$

$$\Rightarrow \boxed{y = \left( -\frac{g}{v_0^2} \right) x^2 + x} : \text{ parabole.}$$



2.

a)

b)  $y_s = 10 \text{ Km}$ ,  $\|\vec{v}_0\| = ?$

 Soit  $t_s$  la date de l'instant de passage du projectile par le sommet S ;

$$* y_s = -\frac{1}{2} g t_s^2 + \frac{\sqrt{2}}{2} v_0 t_s; t_s = ?$$

$$* \left(\frac{dy}{dt}\right)_{t=t_s} = 0 \Rightarrow v_y(t=t_s) = 0 \Rightarrow -g t_s + \frac{\sqrt{2}}{2} v_0 = 0 \Rightarrow g t_s = \frac{\sqrt{2}}{2} v_0 \Rightarrow t_s = \frac{\sqrt{2}}{2g} v_0$$

$$\text{D'où : } y_s = -\frac{1}{2} g \left(\frac{\sqrt{2}}{2g} v_0\right)^2 + \frac{\sqrt{2}}{2} v_0 \left(\frac{\sqrt{2}}{2g} v_0\right) = -\frac{v_0^2}{4g} + \frac{v_0^2}{2g} = \frac{v_0^2}{g} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4}\right) = \frac{v_0^2}{4g}$$

$$\Rightarrow v_0^2 = 4 g y_s \Rightarrow v_0 = 2 \sqrt{g y_s} = 2 \sqrt{9,8 \cdot 10000 \text{ m}} : \boxed{v_0 \approx 626 \text{ m.s}^{-1}}$$

c)

$$* x_s = x(t=t_s) = \frac{\sqrt{2}}{2} v_0 \cdot t_s = \frac{\sqrt{2}}{2} v_0 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2g} v_0 = \frac{v_0^2}{2g} = \frac{4 g y_s}{2 g} = 2 y_s = 2 \cdot 10 \text{ Km} : \boxed{x_s = 20 \text{ Km}}$$

$$* \boxed{x_p = 2 x_s = 40 \text{ Km}}$$

$$\text{d) } \vec{v}_s = \vec{v}(t_s) = \left(\frac{\sqrt{2}}{2} v_0\right) \vec{i} + \left(-g t_s + \frac{\sqrt{2}}{2} v_0\right) \vec{j} = \left(\frac{\sqrt{2}}{2} v_0\right) \vec{i} + \underbrace{\left(-\cancel{g} \frac{\sqrt{2}}{2g} v_0 + \frac{\sqrt{2}}{2} v_0\right)}_{0 : \text{ déjà prévu}} \vec{j}$$

$$\boxed{\vec{v}_s = \left(\frac{\sqrt{2}}{2} v_0\right) \vec{i}} \Rightarrow \|\vec{v}_s\| = \frac{\sqrt{2}}{2} v_0 = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \sqrt{g y_s} = \sqrt{2 g y_s} = \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 10000 \text{ m}} \approx 443 \text{ m.s}^{-1} \rightarrow 1 \text{ cm}$$

3.

 a) Le mouvement s'effectue dans le plan vertical contenant  $\vec{v}_0'$  : (O, x, y), selon une trajectoire parabolique.

 b) Soit  $m'$  la masse de l'obus ; 2<sup>ème</sup> loi de Newton :  $\vec{P}' = m' \vec{a}'$ , avec  $\vec{P}' = m' \vec{g} \Rightarrow$

$$\vec{a}' = \vec{g} = -g \vec{j} \begin{cases} a_x' = 0 \\ a_y' = -g \end{cases} \Rightarrow$$

$$* \begin{cases} v_x' = \int a_x' dt = \int 0 dt = C^{te}_1 \\ v_y' = \int a_y' dt = \int -g dt = -gt + C^{te}_2 \end{cases} ; \text{ on a } \begin{cases} v_x'(t=0) = -v_0' \Rightarrow C^{te}_1 = -v_0' \\ v_y'(t=0) = 0 \Rightarrow C^{te}_2 = 0 \end{cases}, \text{ alors : } \begin{cases} v_x' = -v_0' \\ v_y' = -gt \end{cases}$$

$$* \begin{cases} x' = \int v_x' dt = \int -v_0' dt = -v_0' t + C^{te}_3 \\ y' = \int v_y' dt = \int (-gt) dt = -\frac{1}{2} g t^2 + C^{te}_4 \end{cases} ;$$

$$\text{On a } \begin{cases} x'(t=0) = x_0' \Rightarrow C^{te}_3 = x_0' \\ y'(t=0) = h \Rightarrow C^{te}_4 = h \end{cases}, \text{ alors : } \begin{cases} x'(t) = -v_0' t + x_0' \\ y'(t) = -\frac{1}{2} g t^2 + h \end{cases}$$

c) Pour que l'obus atteigne sa cible ; il faut que lorsqu'il atteint le sol ( $y' = 0$ ),  $x' = 0$  :

$$* y' = 0 \Rightarrow -\frac{1}{2} g t^2 + h = 0 \Rightarrow \frac{1}{2} g t^2 = h \Rightarrow t^2 = \frac{2h}{g} \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

$$* x' \left( t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \right) = 0 \Rightarrow -v_0' \sqrt{\frac{2h}{g}} + x_0' = 0 \Rightarrow x_0' = v_0' \sqrt{\frac{2h}{g}} = \frac{720}{3,6} \text{ m.s}^{-1} \sqrt{\frac{2 \cdot 10000 \text{ m}}{9,8}}$$

$$\boxed{x_0' \approx 9035 \text{ m}}$$

d) L'avion serait touché par le projectile s'il y a intersection de leurs trajectoires, et que les deux mobiles se trouvent en ce point d'intersection au même instant ;

\* L'équation cartésienne de la trajectoire du projectile étant  $y = \left( -\frac{g}{v_0^2} \right) x^2 + x$ , et celle du centre de gravité de l'avion est  $y = h$  : il y aurait intersection si l'équation  $h = \left( -\frac{g}{v_0^2} \right) x^2 + x$  admet une

solution :

$$\left( -\frac{g}{v_0^2} \right) x^2 + x - h = 0 \Leftrightarrow \left( \frac{g}{v_0^2} \right) x^2 - x + h = 0; \Delta = 1 - 4 \frac{g}{v_0^2} h = 1 - \frac{4g}{v_0^2} h = 0$$

$$\Rightarrow x = \frac{1}{2 \frac{g}{v_0^2}} = \frac{v_0^2}{2g} = x_s \Rightarrow \text{intersection au point } (x = x_s, y = h = y_s) : S$$

\* Le projectile passe par le point S à l'instant  $t_s = \frac{\sqrt{2}}{2g} v_0$  ; de l'instant  $t = 0 \rightarrow$  l'instant  $t = t_s$ , l'avion se déplace horizontalement d'une distance  $(v_0' t_s)$  : à l'instant  $t_s$ , il va se trouver au point d'abscisse

$$x_0' - v_0' t_s = x_0' - v_0' \frac{\sqrt{2}}{2g} v_0 = x_0' - v_0' \frac{\sqrt{2}}{2g} \cancel{v_0} \neq \sqrt{gh} = x_0' - v_0' \frac{\sqrt{2gh}}{g} = x_0' - v_0' \sqrt{\frac{2gh}{g^2}} = x_0' - v_0' \underbrace{\sqrt{\frac{2h}{g}}}_{x_0'} = 0$$

$\Rightarrow$  A l'instant  $t_s$ , l'avion ne se trouve pas à la même position S que le projectile : il est épargné. (Il est déjà au-dessus de la pièce d'artillerie)

## TP 6 : Etude expérimentale du mouvement d'un projectile

### Objectifs :

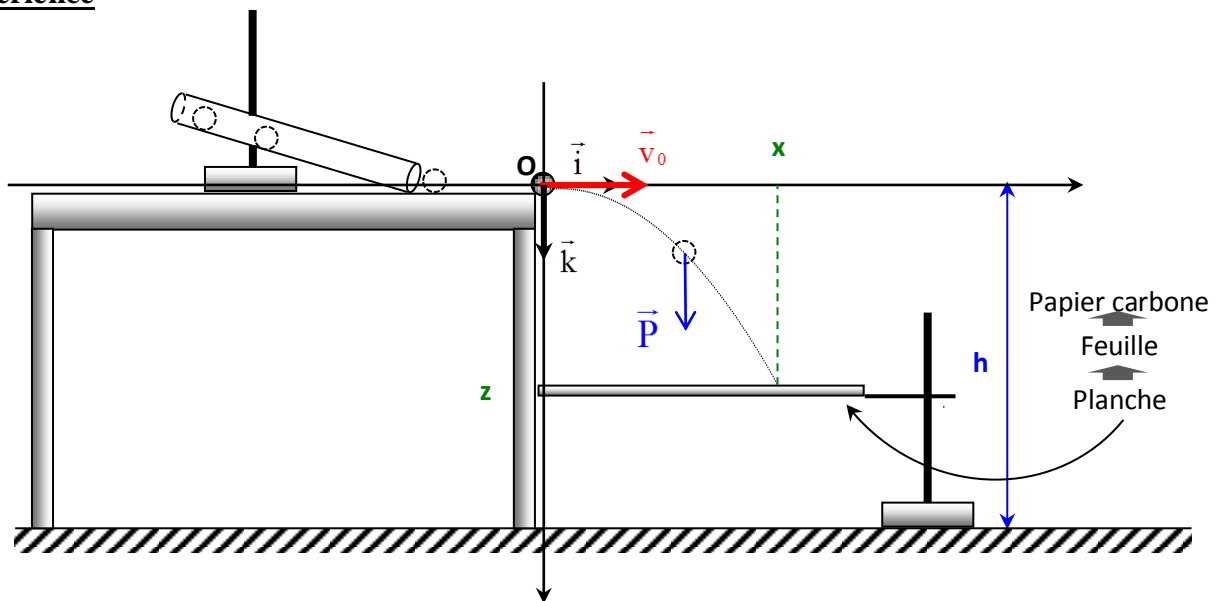
- Tracer point par point la trajectoire d'un projectile, et déterminer la valeur de sa vitesse initiale.

### Matériel :

- |                                    |                   |                     |
|------------------------------------|-------------------|---------------------|
| • 2 Potences.                      | • 1 Planche.      | • 1 Papier.         |
| • 2 Pincettes + 3 Noix de serrage. | • 1 Bille en fer. | • 1 Papier carbone. |
| • 1 Tige métallique.               | • 1 Règle.        | • Scotch.           |
| • 1 Gouttière.                     |                   |                     |

### Manipulation :

#### 1. Expérience



- Une bille de masse (m) considérée ponctuelle est libérée en haut de la gouttière sans vitesse initiale ; elle quitte la paillasse avec une vitesse de lancement  $\vec{v}_0$  horizontale.
- En négligeant la résistance de l'air ; elle se meut ensuite sous la seule action de son poids, jusqu'à heurter la planche horizontale portant une feuille couverte d'un papier carbone.

Le point d'impact ainsi obtenu est repéré par ses coordonnées :

- x : mesuré horizontalement depuis le bord vertical de la paillasse jusqu'au point d'impact.
  - z : mesuré verticalement depuis la surface de la paillasse jusqu'à la surface de la planche.
- Au cours des mesures, afin que la vitesse initiale de lancement soit la même pour tous les essais:
    - Ne plus toucher à la gouttière ou à son support.
    - Veiller à ce que la bille soit, à chaque fois, libérée sans vitesse initiale du haut de la gouttière.

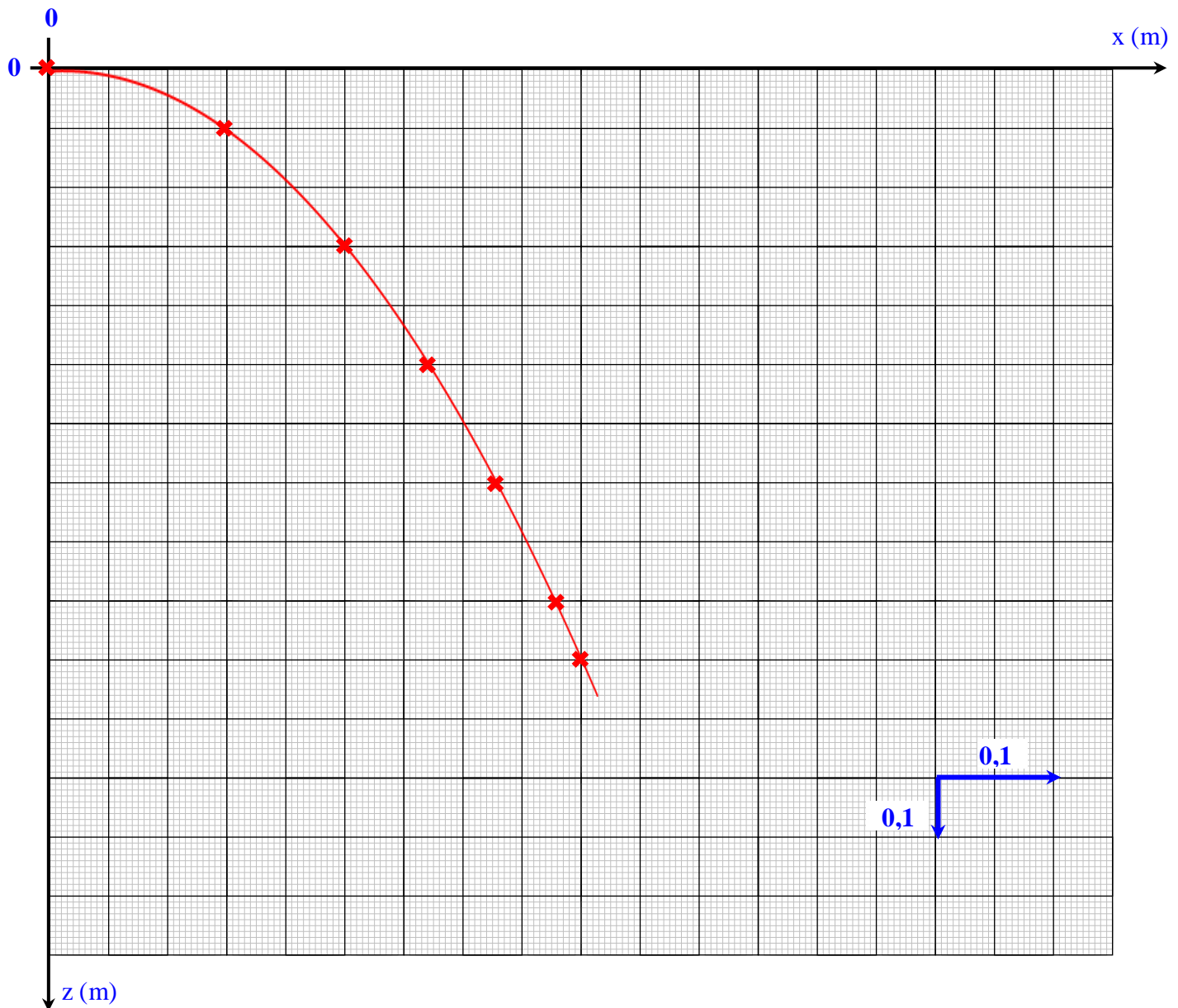
#### 2. Résultats

z (m)	0	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1
x (m)	0	0,14	0,25	0,32	0,38	0,43	0,45
$x^2$ (m <sup>2</sup> )	0	0,02	0,06	0,1	0,14	0,18	0,2



### 3. Exploitation des résultats

a) Choisir des échelles convenables, et tracer la courbe  $z = f(x)$



⇒ La trajectoire de la bille est parabolique.

b) En appliquant la 2<sup>ème</sup> loi de Newton à la bille ; justifier que la trajectoire est parabolique.

Le mouvement est étudié par rapport à un référentiel de laboratoire dont le repère d'espace  $(O, \vec{i}, \vec{k})$  est considéré galiléen, et on considère comme instant origine celui de début de la chute en O.

$$2^{\text{ème}} \text{ loi de Newton : } \vec{P} = m \vec{a}, \text{ avec } \vec{P} = m \vec{g} \Rightarrow \vec{a} = \vec{g} = g \vec{k} \begin{cases} a_x = 0 \\ a_z = g \end{cases} \Rightarrow$$

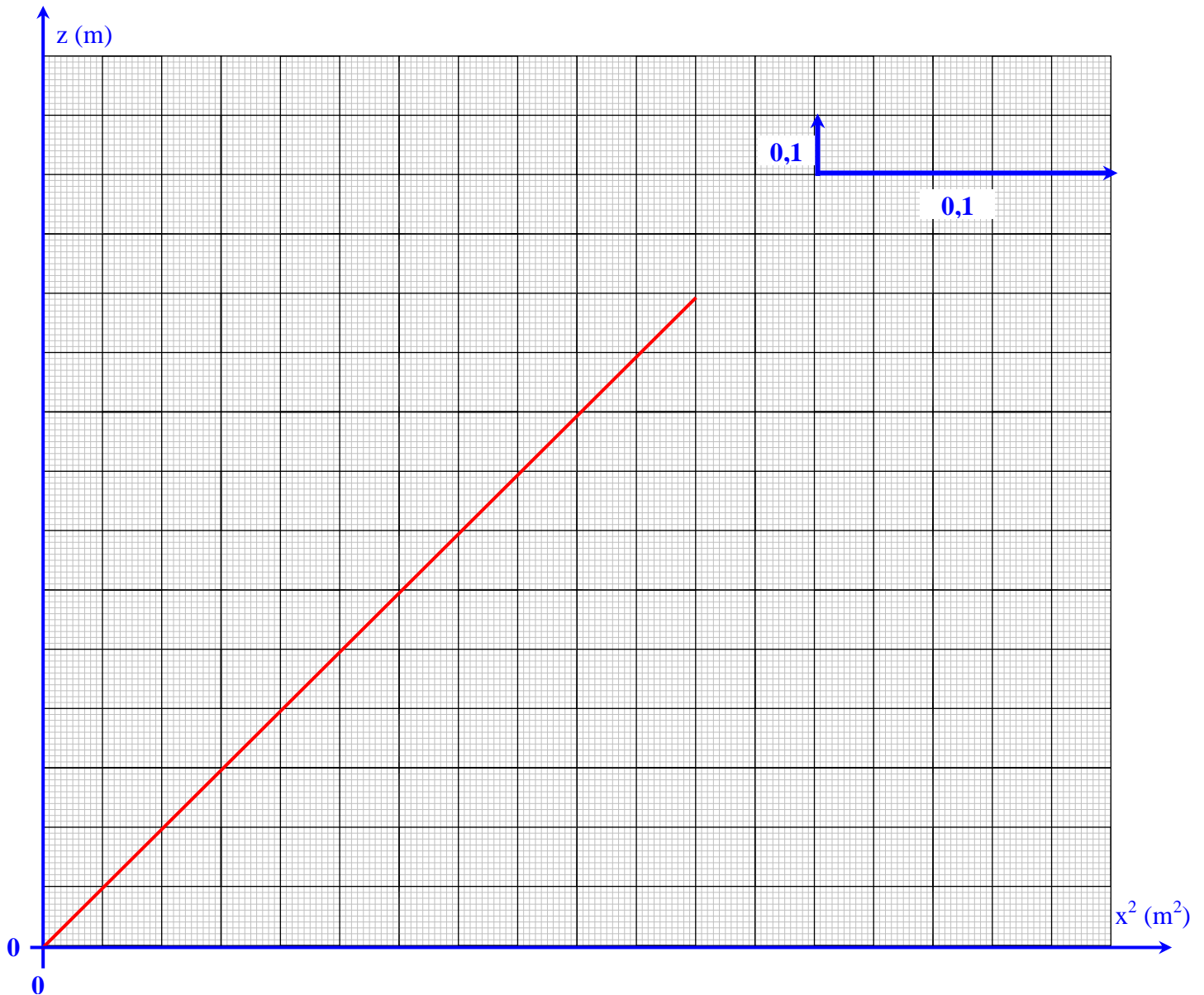
$$* \begin{cases} v_x = \int a_x dt = \int 0 dt = C^{\text{te}}_1 \\ v_z = \int a_z dt = \int g dt = g t + C^{\text{te}}_2 \end{cases} ; \text{ on a } \begin{cases} v_x(t=0) = v_0 \Rightarrow C^{\text{te}}_1 = v_0 \\ v_z(t=0) = 0 \Rightarrow C^{\text{te}}_2 = 0 \end{cases}, \text{ alors : } \begin{cases} v_x = v_0 \\ v_z = g t \end{cases}$$

$$* \begin{cases} x = \int v_x dt = \int v_0 dt = v_0 t + C^{\text{te}}_3 \\ z = \int v_z dt = \int (g t) dt = \frac{1}{2} g t^2 + C^{\text{te}}_4 \end{cases} ; \text{ On a } \begin{cases} x(t=0) = 0 \Rightarrow C^{\text{te}}_3 = 0 \\ z(t=0) = 0 \Rightarrow C^{\text{te}}_4 = 0 \end{cases}, \text{ alors : } \begin{cases} x = v_0 t \\ z = \frac{1}{2} g t^2 \end{cases}$$

$$* t = \frac{x}{v_0} \Rightarrow z = \frac{1}{2} g \frac{x^2}{v_0^2} \Rightarrow z = \left( \frac{g}{2 v_0^2} \right) x^2 : \text{ parabole.}$$

c) Choisir des échelles convenables, et tracer la courbe  $z = f(x^2)$  ; en déduire la valeur de  $\vec{v}_0$ .

On donne  $\|\vec{g}\| = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$ .



Le coefficient directeur de la droite  $z = f(x^2)$  est  $\frac{g}{2 v_0^2} = \frac{1 \text{ m}}{0,2 \text{ m}^2} = 5 \text{ m}^{-1} \Rightarrow 10 v_0^2 = g \Rightarrow v_0 = \sqrt{\frac{g}{10}} = \sqrt{\frac{9,8}{10}}$

$$\|\vec{v}_0\| \approx 1 \text{ m.s}^{-1}$$

d) Imaginons une autre bille qui quitte le point O en même temps que la bille étudiée, mais en chute libre sans vitesse initiale : dire si les deux billes vont atteindre le sol simultanément ou non ?

\* La bille étudiée atteint le sol à un instant  $t_{\text{sol}}$  tel que  $h = \frac{1}{2} g t_{\text{sol}}^2 \Rightarrow t_{\text{sol}} = \sqrt{\frac{2h}{g}}$

\* Pour une bille en chute libre sans vitesse initiale, elle serait en MRUA d'accélération  $a = g$  selon (O, z)  $\Rightarrow v = \int a dt = \int g dt = g t + C^{te}$ , avec  $C^{te} = 0$  car  $v(t=0) = 0$

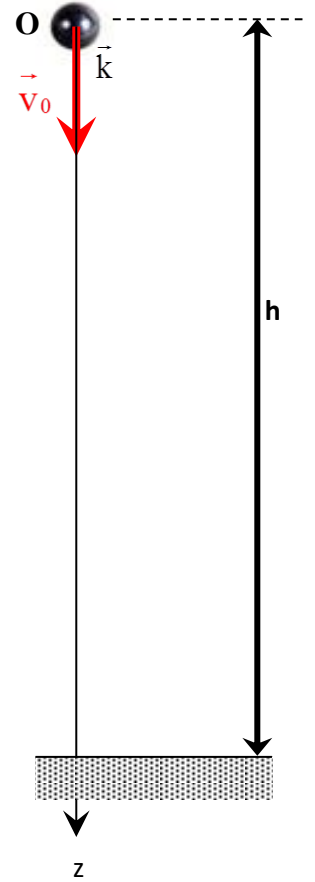
$$\Rightarrow z = \int v dt = \int (g t) dt = \frac{1}{2} g t^2 + C^{te}, \text{ avec } C^{te} = 0 \text{ car } z(t=0) = 0 : z = \frac{1}{2} g t^2$$

$$\Rightarrow \text{Cette bille atteint le sol à un instant } t_{\text{sol}} \text{ tel que } h = \frac{1}{2} g t_{\text{sol}}^2 \Rightarrow t_{\text{sol}} = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

La bille lâchée sans vitesse initiale atteint le sol au même instant que la bille lancée avec une vitesse initiale horizontale !

### Application

Une bille, de masse ( $m$ ) assimilée à un point matériel, est lancée vers le bas à l'origine des dates avec une vitesse initiale  $\vec{v}_0$  depuis une position  $O$  situé à une hauteur  $h$  du sol, comme le montre la figure ci-contre. Le mouvement est étudié par rapport à un référentiel de laboratoire dont le repère d'espace  $(O, \vec{k})$  est considéré galiléen, et on négligera la résistance de l'air.



1. Montrer que la bille est en MRUA.
2. Calculer la date ( $t_{\text{sol}}$ ) de son arrivée au sol.
3. Comparer à sa valeur dans le cas d'une chute libre sans vitesse initiale.

On donne :  $h = 1,2 \text{ m}$ ,  $\|\vec{v}_0\| = 1 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $\|\vec{g}\| = 10 \text{ m.s}^{-2}$

1. La bille est en chute libre selon  $(O, z)$ ; son accélération est  $a = g$   
 $\Rightarrow v = \int a \, dt = \int g \, dt = g t + C^{\text{te}}$ ; on a  $v(t=0) = v_0$ , alors  $C^{\text{te}} = v_0$ , d'où  $v = g t + v_0$   
 $a$  est constante, et on a  $a \cdot v > 0$  : MRUA.

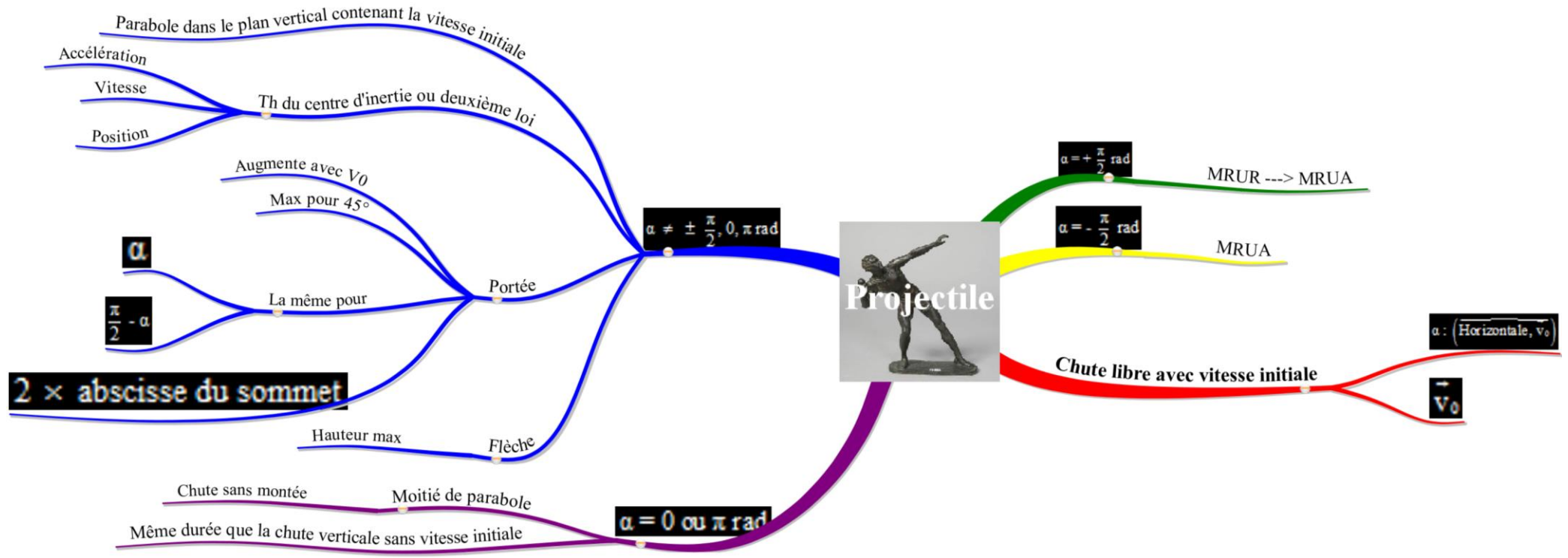
2. La bille atteint le sol à un instant  $t_{\text{sol}}$  tel que  $h = z(t = t_{\text{sol}})$

On a  $z = \int v \, dt = \int (g t + v_0) \, dt = \frac{1}{2} g t^2 + v_0 t + C^{\text{te}}$ , avec  $C^{\text{te}} = 0$  car  $z(t=0) = 0$  :  $z = \frac{1}{2} g t^2 + v_0 t$

$$\Rightarrow h = \frac{1}{2} g t_{\text{sol}}^2 + v_0 t_{\text{sol}} \Rightarrow \frac{1}{2} g t_{\text{sol}}^2 + v_0 t_{\text{sol}} - h = 0 \Rightarrow 5 t_{\text{sol}}^2 + t_{\text{sol}} - 1,2 = 0$$

$$\Delta = 1 + 24 = 25 \Rightarrow \begin{cases} t_{\text{sol}} = \frac{-1 - \sqrt{25}}{10} < 0 : \text{à rejeter} \\ \text{ou} \\ t_{\text{sol}} = \frac{-1 + \sqrt{25}}{10} = 0,4 \text{ s} \end{cases} \Rightarrow \boxed{t_{\text{sol}} = 0,4 \text{ s}}$$

3. Si  $v_0 = 0$  :  $h = \frac{1}{2} g t_{\text{sol}}^2 + \cancel{v_0 t_{\text{sol}}} \Leftrightarrow h = \frac{1}{2} g t_{\text{sol}}^2 \Rightarrow t_{\text{sol}} = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,2}{10}} = 0,49 \text{ s}$  : la durée de la chute libre est plus courte avec une vitesse initiale vers le bas.



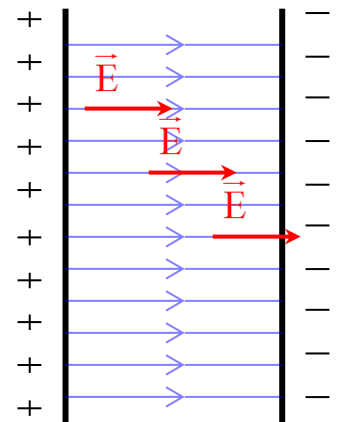
## Chapitre-5 : Mouvement dans un champ électrique uniforme

Objectifs	
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Calculer le travail d'une force électrique.</li> <li>➤ Appliquer l'expression du travail d'une force électrique : <math>W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_e) = q \cdot (V_A - V_B)</math></li> <li>➤ Appliquer la relation fondamentale de la dynamique au mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme.</li> </ul>	
Prérequis	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Champ électrique, champ électrique uniforme.</li> <li>▪ Force électrique.</li> <li>▪ Travail d'une force constante, indépendance du chemin suivi.</li> <li>▪ 2<sup>ème</sup> loi de Newton.</li> <li>▪ Relations entre les vecteurs ; accélération instantanée, vitesse instantanée, et position.</li> <li>▪ Propriétés du MRUA.</li> <li>▪ Théorème de l'énergie cinétique.</li> <li>▪ 1<sup>ère</sup> loi de Newton.</li> </ul>	
Matériel	
<ul style="list-style-type: none"> <li>* Déflectron + son Alimentation THT.</li> <li>* Alimentation HT.</li> <li>* 6 Fils de connexion.</li> <li>* Oscilloscope.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Pile plate.</li> <li>* 2 pinces crocodile.</li> <li>* GBF.</li> <li>* Tournevis.</li> </ul>

### Rappels

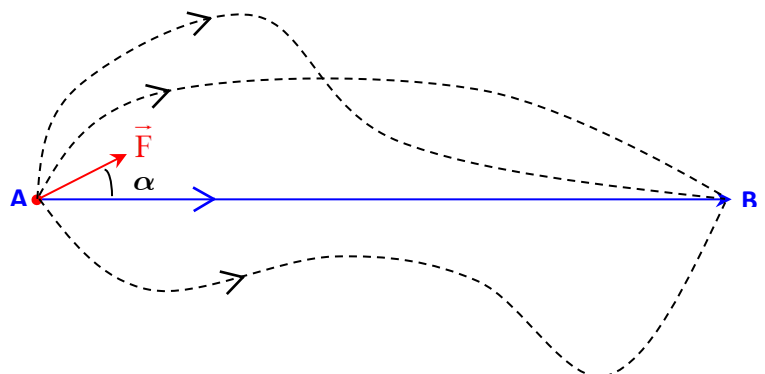
❖ Un champ électrique ( $\vec{E}$ ) règne dans une région de l'espace si, dans cette région, un corps qui porte une charge électrique ( $q$ ) subit une force électrique :  $\vec{F}_e = q \cdot \vec{E}$ .

❖ Le champ électrique est uniforme entre deux plaques en regard, l'une chargée positivement et l'autre négativement.



❖ Le travail d'une force constante est indépendant du chemin suivi par son point d'application.

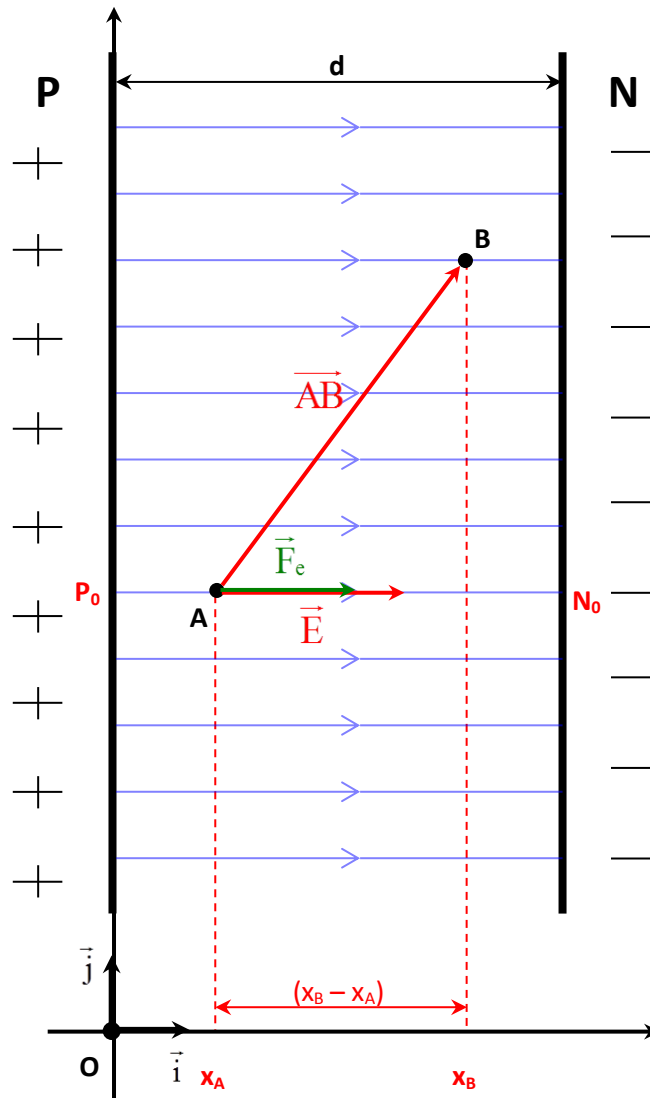
$W_{A \rightarrow B}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{AB} = \|\vec{F}\| \cdot AB \cdot \cos \alpha$ ,  
pour tous les chemins.



## I- Travail d'une force électrique, notion de ddp

Soit une particule de charge ( $q$ ) se déplaçant d'un point  $A \rightarrow$  un point  $B$  dans une région où règne un champ électrique uniforme ( $\vec{E}$ ) ; elle subit une force constante  $\vec{F}_e = q \cdot \vec{E}$  :  $W(\vec{F}_e)_{A \rightarrow B} = \vec{F}_e \cdot \overline{AB} = q \vec{E} \cdot \overline{AB}$ , quel que soit le chemin suivi (Fig-1 : cas où  $q > 0$ )

**Figure-1**



### 1) Notion de ddp

$$W(\vec{F}_e)_{A \rightarrow B} = q \vec{E} \cdot \overline{AB}$$

$$= q \vec{E} \cdot (\overline{AO} + \overline{OB})$$

$$= q \vec{E} \cdot [(-\overline{OA}) - (-\overline{OB})]$$

$$= q \cdot \left[ \underbrace{(-\vec{E} \cdot \overline{OA})}_{V_A} - \underbrace{(-\vec{E} \cdot \overline{OB})}_{V_B} \right]$$

$$W(\vec{F}_e)_{A \rightarrow B} = q \cdot (V_A - V_B)$$

↑ ↑ ↑  
J    C    Volts

Avec  $V_A = - \vec{E} \cdot \overline{OA}$  : potentiel électrique en A.

$V_B = - \vec{E} \cdot \overline{OB}$  : potentiel électrique en B.

$\Rightarrow \boxed{V_A - V_B = \vec{E} \cdot \overline{AB}}$  : différence de potentiel électrique (ddp) entre A et B.

Et on appelle tension électrique entre A et B :  $\boxed{U_{AB} = V_A - V_B}$

ex  $q = e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ,  $U_{AB} = 1 \text{ V}$

$$W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_e) = q \cdot (V_A - V_B) = e \cdot U_{AB} = \boxed{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1 \text{ eV}} \text{ (électron-volt)}$$

Rq On montre la relation  $W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_e) = q \cdot (V_A - V_B)$  est valable même dans un champ électrique non uniforme.

## 2) Relation entre la ddp et $\|\vec{E}\|$ (Fig-1)

$$U_{AB} = V_A - V_B = \vec{E} \cdot \overline{AB}$$

$$= \begin{vmatrix} E \\ 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x_B - x_A \\ y_B - y_A \end{vmatrix}$$

$$= E \cdot (x_B - x_A) + 0 \cdot (y_B - y_A)$$

$$= E \cdot (x_B - x_A) : \text{ tous les points de même abscisse sont au même potentiel}$$

$$\Rightarrow E = \frac{U_{AB}}{x_B - x_A} \Rightarrow \|\vec{E}\| = \frac{|U_{AB}|}{|x_B - x_A|} \Rightarrow \text{Si } \begin{cases} \text{A se trouve sur la plaque (P)} \\ \text{B se trouve sur la plaque (N)} \end{cases}; \|\vec{E}\| = \frac{|U_{PN}|}{d}$$

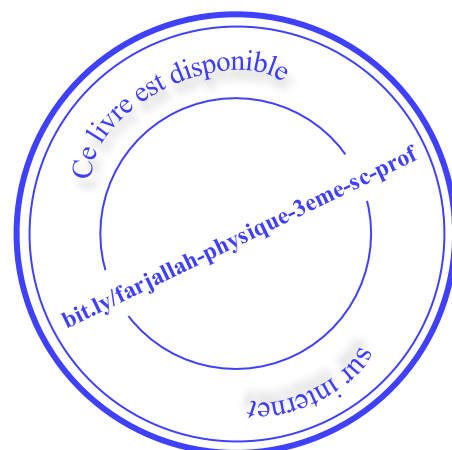
$$\mathbf{V \cdot m^{-1}} \rightarrow \boxed{\|\vec{E}\| = \frac{|U_{PN}|}{d} = \frac{|U_{AB}|}{|x_B - x_A|}} \leftarrow \begin{matrix} \mathbf{V} \\ \mathbf{m} \end{matrix}$$

Rq

Soient

- \*  $P_0$  un point de la plaque (P) ; il est au même potentiel  $V_P$  que tous les points de la plaque P.
- \*  $N_0$  un point de la plaque (N) ; il est au même potentiel  $V_N$  que tous les points de la plaque N.

$V_P - V_N = V_{P_0} - V_{N_0} = \vec{E} \cdot \overline{P_0N_0} > 0 \Rightarrow V_P > V_N$  : les lignes de champ étant dirigées de  $P \rightarrow N$  ; ils descendent les potentiels.  $\Rightarrow V_B < V_A$



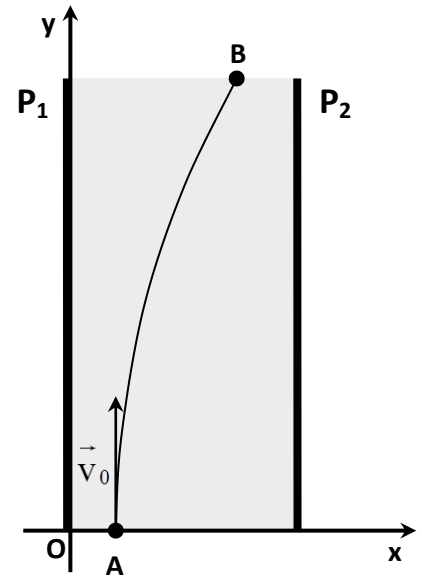
### Application

Entre deux plaques  $P_1$  et  $P_2$ , distantes de  $d = 2 \text{ cm}$ , est appliquée une tension  $U_{P_1P_2} = -10 \text{ V}$ .

Un charge ponctuelle ( $q$ ) de valeur absolue  $3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ , pénètre entre les plaques par le point A et décrit une trajectoire curviligne (AB).

On négligera l'effet du poids et la résistance de l'air.

1. Quelle est la nature du champ électrique qui règne entre les plaques ; représenter les lignes de champ, ainsi que le vecteur champ électrique.
2. Calculer la valeur de ce champ.
3. Calculer la valeur de la ddp  $U_{AB}$ , sachant que  $x_B - x_A = 1 \text{ cm}$ .
4. Représenter la force électrique exercée sur la particule; en déduire le signe de la charge  $q$ .
5. Calculer le travail de la force électrique au cours du déplacement (AB); exprimer le résultat en eV. On donne  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .



1.
  - \* Champ uniforme.
  - \* Les lignes de champ descendent les potentiels :  
on a  $U_{P_1P_2} = V_{P_1} - V_{P_2} < 0 \Rightarrow V_{P_1} < V_{P_2}$  ; d'où le sens des lignes de champ.

$$2. \|\vec{E}\| = \frac{|U_{P_1P_2}|}{d} = \frac{10 \text{ V}}{2 \cdot 10^{-2} \text{ m}} = 500 \text{ V.m}^{-1}$$

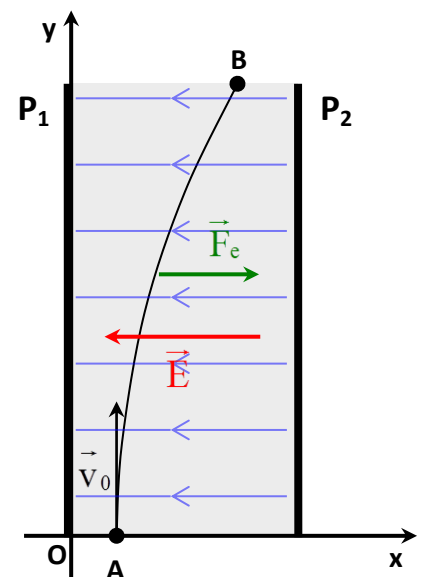
$$3. \|\vec{E}\| = \frac{|U_{AB}|}{|x_B - x_A|} \Rightarrow |U_{AB}| = \|\vec{E}\| \cdot |x_B - x_A| = 500 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 5 \text{ V}$$

Or  $U_{AB} = V_A - V_B < 0$ , alors  $U_{AB} = -5 \text{ V}$

$$4. \vec{F}_e = q \cdot \vec{E}; \vec{F}_e \text{ et } \vec{E} \text{ sont opposés, alors } q < 0$$

$$5. W_{A \rightarrow B}(\vec{F}_e) = q \cdot (V_A - V_B)$$

$$= -3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot (-5 \text{ V}) = 16 \cdot 10^{-19} \text{ J} = \frac{16 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ eV} = 10 \text{ eV}$$

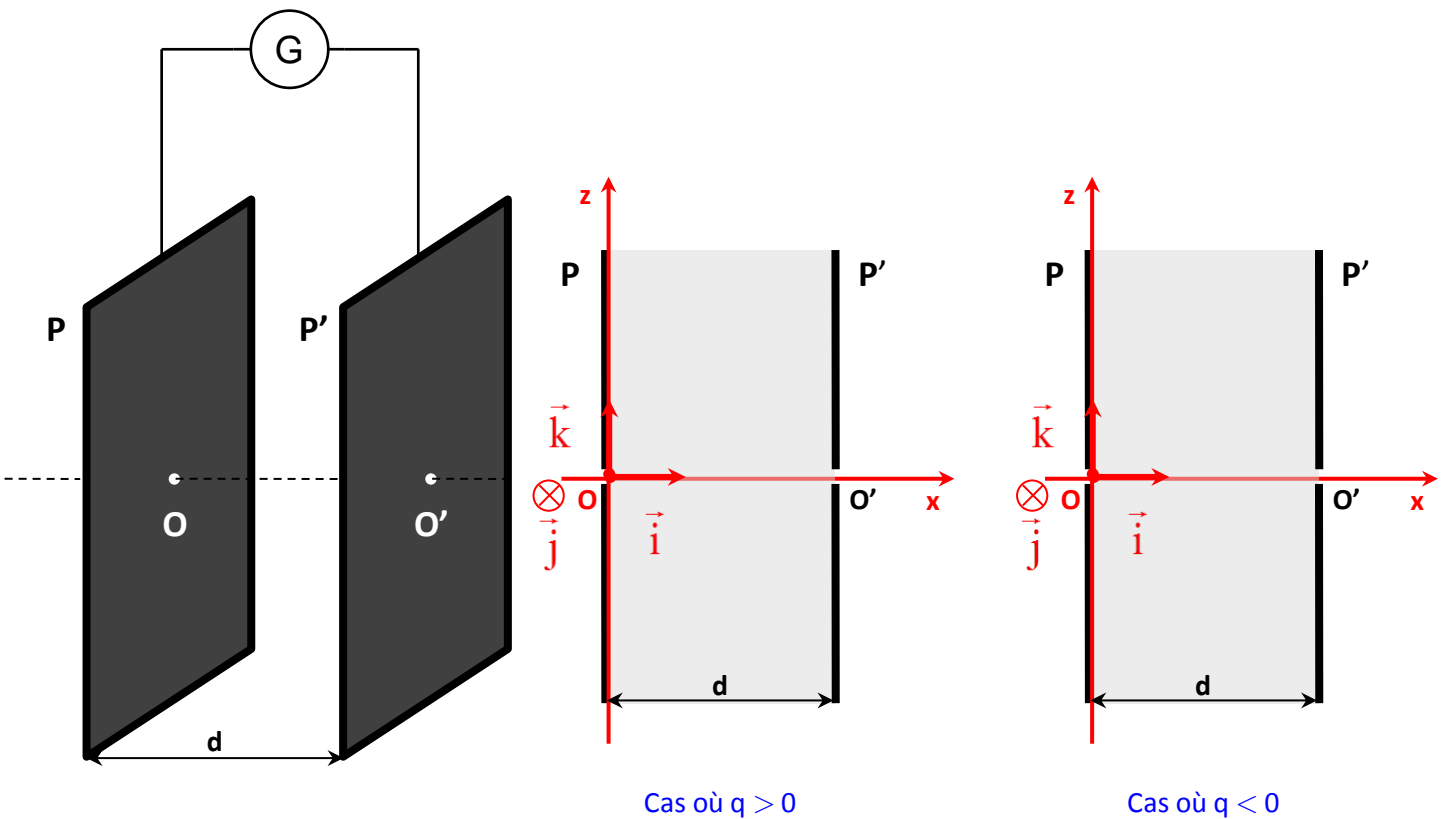


## II- Accélération d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme



**Activité-1**

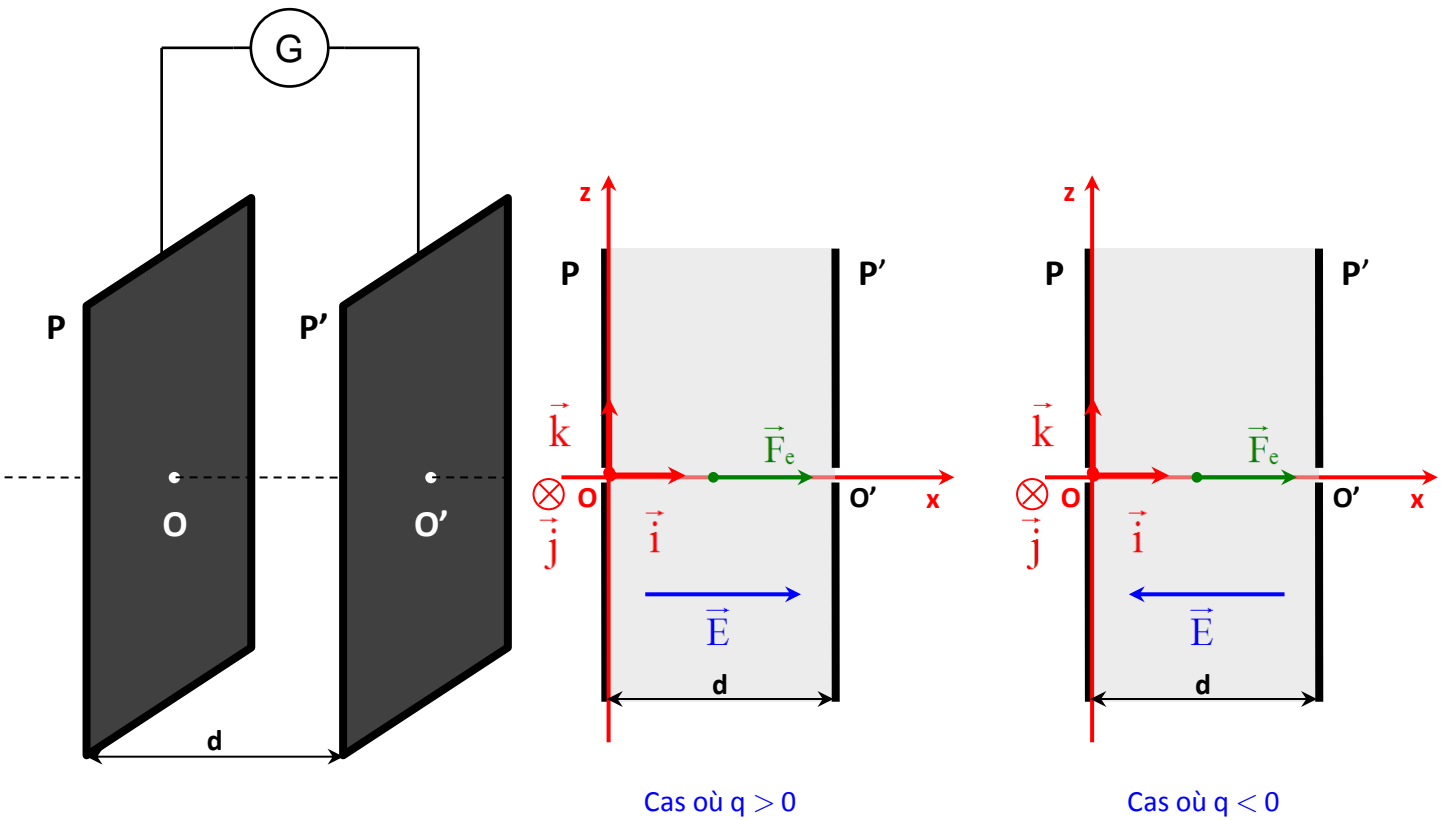
On considère le dispositif de la figure ci-dessous : P et P' sont deux plaques conductrices en regard, distantes de  $d$ , munies d'orifices O et O' respectivement, et enfermées dans une ampoule où règne un vide poussée afin d'éliminer la résistance de l'air.



A l'aide d'un générateur (G), on applique une tension continue  $U_{PP'}$  entre les plaques ; le champ électrique uniforme ainsi créé entre les plaques est tel que son vecteur  $\vec{E}$  soit parallèle à la direction (OO'). Un dispositif approprié permet d'injecter des particules ponctuelles de vitesse nulle par l'orifice O ; soit  $q$  la charge d'une particule (M), et  $m$  sa masse.

- Représenter la force électrique  $\vec{F}_e$  qui permet aux particules de se déplacer vers P', dans les deux cas.
- Représenter le vecteur  $\vec{E}$  dans les deux cas, et donner le signe de  $U_{PP'}$  pour chaque cas.
- Dans ce qui suit, on se limitera au cas où  $q > 0$  et on négligera le poids de la particule devant la force électrique : le mouvement est étudié par rapport à un référentiel de laboratoire, supposé galiléen, dont le repère d'espace est  $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ , et l'origine du temps l'instant où la particule pénètre dans le champ électrique en O avec une vitesse initiale nulle.
  - Etablir les équations horaires  $x(t)$ ,  $y(t)$  et  $z(t)$  du mouvement ; vérifier que la particule serait en mouvement rectiligne selon la direction (OO').
  - Ecrire l'expression de la valeur algébrique de l'accélération  $a$  de la particule en fonction de  $q$ ,  $m$ ,  $d$ , et  $U_{PP'}$  ; vérifier que le mouvement est uniformément accéléré.
  - Etablir l'expression de la valeur de la vitesse de sortie de la particule en O', en fonction de  $q$ ,  $m$  et  $U_{PP'}$ .
  - Retrouver ce résultat en appliquant le théorème de l'énergie cinétique.
- A.N :**  $|U_{PP'}| = 1 \text{ KV}$  et  $d = 5 \text{ cm}$  ; la particule est un électron de masse  $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$  et de charge  $q = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .
  - Vérifier que le poids est bien négligeable devant la force électrique. ( $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$ )
  - Donner le signe de  $U_{PP'}$  pour que les électrons se déplacent vers P'.
  - Calculer la valeur algébrique de l'accélération.
  - Calculer la valeur de la vitesse de sortie de l'électron, commenter et conclure.

1.



2.

- \*  $\vec{F}_e = q \cdot \vec{E}$  ; d'où le sens de  $\vec{E}$  pour chaque cas.
- \* Les lignes de champ descendent les potentiels, et on a  $U_{PP'} = V_P - V_{P'}$  ; d'où :
  - Pour  $q > 0$  :  $V_{P'} < V_P \Rightarrow V_P - V_{P'} > 0 : U_{PP'} > 0$ .
  - Pour  $q < 0$  :  $V_{P'} > V_P \Rightarrow V_P - V_{P'} < 0 : U_{PP'} < 0$ .

3.

a)

\* 2<sup>ème</sup> loi de Newton :  $\vec{F}_e = m \vec{a} \Rightarrow q \cdot \vec{E} = m \vec{a} \Rightarrow \vec{a} = \frac{q}{m} \vec{E} = \frac{q}{m} E \vec{i}$

$$\left. \begin{array}{l} a_x = \frac{q}{m} E \\ a_y = 0 \\ a_z = 0 \end{array} \right\}$$

\*  $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \Rightarrow \vec{v} = \int \vec{a} dt \Rightarrow \vec{v} \left\{ \begin{array}{l} v_x = \int a_x dt = \int \left( \frac{q}{m} E \right) dt = \left( \frac{q}{m} E \right) t + C^{te}_1 \\ v_y = \int a_y dt = \int 0 dt = C^{te}_2 \\ v_z = \int a_z dt = \int 0 dt = C^{te}_3 \end{array} \right.$

On a  $\left\{ \begin{array}{l} v_x(t=0) = 0 \Rightarrow C^{te}_1 = 0 \\ v_y(t=0) = 0 \Rightarrow C^{te}_2 = 0, \text{ alors : } \vec{v} \\ v_z(t=0) = 0 \Rightarrow C^{te}_3 = 0 \end{array} \right. \left| \begin{array}{l} v_x = \left( \frac{q}{m} E \right) t \\ v_y = 0 \\ v_z = 0 \end{array} \right.$

$$* \vec{v} = \frac{d\vec{OM}}{dt} \Rightarrow \vec{OM} = \int \vec{v} dt \Rightarrow \vec{OM} \begin{cases} x = \int v_x dt = \int \left( \frac{q}{m} E \right) t dt = \frac{1}{2} \left( \frac{q}{m} E \right) t^2 + C^{te}_4 \\ y = \int v_y dt = \int 0 dt = C^{te}_5 \\ z = \int v_z dt = \int 0 dt = C^{te}_6 \end{cases}$$

$$\text{On a } \begin{cases} x(t=0) = 0 \Rightarrow C^{te}_4 = 0 \\ y(t=0) = 0 \Rightarrow C^{te}_5 = 0, \text{ alors : } \\ z(t=0) = 0 \Rightarrow C^{te}_6 = 0 \end{cases} \vec{OM} \begin{cases} x = \left( \frac{q E}{2 m} \right) t^2 \\ y = 0 \\ z = 0 \end{cases}$$

⇒ A chaque instant  $y = z = 0$  : la particule se meut selon une trajectoire rectiligne (O, x)

b)

$$* a = a_x = \frac{q}{m} E, \text{ et on a } E = \|\vec{E}\| = \frac{U_{PP'}}{d} = \frac{U_{PP'}}{d}, \text{ alors } a = \frac{q U_{PP'}}{m d}.$$

\* a est constante et positive, donc  $a \cdot v > 0$  : MRUA.

c) Soit  $\vec{v}_s$  la vitesse de sortie de la particule en O' :

$$\text{Entre O et O'} ; v_s^2 - 0^2 = 2 a (x_{O'} - x_O)$$

$$v_s^2 = 2 \frac{q U_{PP'}}{m d} d = \frac{2 q}{m} U_{PP'} \Rightarrow \|\vec{v}_s\| = \sqrt{\frac{2 q}{m} U_{PP'}} = \sqrt{\frac{2 |q|}{m}} \cdot \sqrt{U_{PP'}}$$

$$d) \Delta E_c = W(\vec{F}_e) \Rightarrow E_c(O') - E_c(O) = q \cdot (V_O - V_{O'}) \Rightarrow \frac{1}{2} m v_s^2 = q \cdot (V_P - V_{P'}) = q \cdot U_{PP'}$$

$$\Rightarrow v_s^2 = \frac{2}{m} q U_{PP'} \Rightarrow \|\vec{v}_s\| = \sqrt{\frac{2 q}{m} U_{PP'}}$$

4.

a)

$$* \|\vec{F}_e\| = |q| \cdot \|\vec{E}\| = |q| \frac{U_{PP'}}{d} = 1,6 \cdot 10^{-19} \frac{1000 \text{ V}}{5 \cdot 10^{-2} \text{ m}} = 3,2 \cdot 10^{-15} \text{ N}$$

$$* \|\vec{P}\| = m g = 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 9,8 = 8,92 \cdot 10^{-30} \text{ N}$$

$$\frac{\|\vec{P}\|}{\|\vec{F}_e\|} = \frac{8,92 \cdot 10^{-30}}{3,2 \cdot 10^{-15}} = 2,78 \cdot 10^{-15} \approx 0 \Rightarrow \|\vec{P}\| \text{ est nettement négligeable devant } \|\vec{F}_e\|.$$

b)  $U_{PP'} < 0$ .

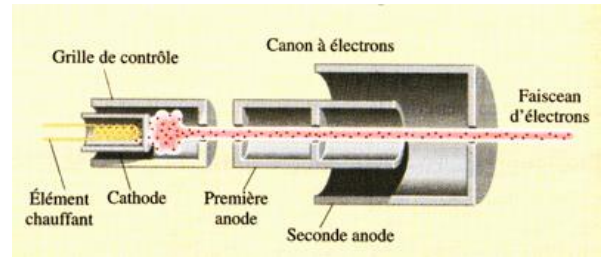
$$c) a = \frac{q U_{PP'}}{m d} = \frac{(-1,6 \cdot 10^{-19}) \cdot (-1000 \text{ V})}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \text{ m}} : a = 3,5 \cdot 10^{15} \text{ m.s}^{-2} !$$

$$d) \|\vec{v}_s\| = \sqrt{\frac{2 q}{m} U_{PP'}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (-1,6 \cdot 10^{-19})}{9,1 \cdot 10^{-31}} \cdot (-1000 \text{ V})} : \|\vec{v}_s\| = 1,87 \cdot 10^7 \text{ m.s}^{-1} : \text{ le champ électrique permet}$$

d'accélérer fortement des particules pendant une durée très courte, proportionnellement à la racine carrée de la valeur absolue de la tension accélératrice.

**Application-1 Le canon à électrons : « moteur » principal de la formation de l'image à l'écran**

Un canon à électrons est composé de plaques métalliques : la cathode, une ou plusieurs anodes et le wehnelt.

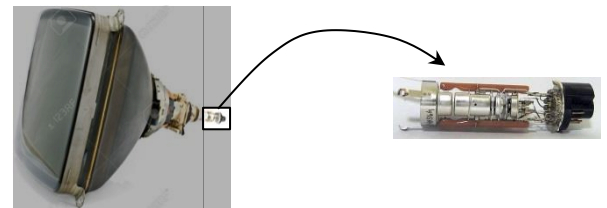


- \* La cathode est une plaque métallique chargée négativement, émettrice d'électrons par chauffage électrique du filament qu'elle contient. [...] Lorsque l'on chauffe une cathode, elle libère des électrons qui *restent à sa surface* et forment une couche superficielle chargée négativement.
- \* L'anode est une plaque métallique chargée positivement, percée d'un minuscule trou. Si l'on place près de la cathode une plaque portée à un potentiel positif, ce potentiel va attirer les électrons [...] Il est nécessaire que la différence de tension entre l'anode et la cathode soit très élevée afin de créer un champ électrique très fort qui va arracher les électrons de la cathode et les projeter à très grande vitesse vers l'anode. Un certain nombre d'entre eux passent par le petit trou de l'anode et forment le faisceau électronique. Les électrons décrivent alors une trajectoire rectiligne à la sortie du canon à électrons.
- \* Entre la cathode et l'anode est placée une dernière électrode, nommée Wehnelt ou grille de contrôle. [...] Elle permet de régler le débit des électrons, agissant ainsi sur la luminosité du spot. [...]

Cet ensemble est fermé dans un tube à l'intérieur duquel est réalisé un **vide** [...] **très poussé**, c'est-à-dire que l'on a enlevé le plus d'air possible (il n'y aura donc pas d'air pour gêner la progression des électrons).

[bit.ly/le-canon-a-electrons-moteur-principal-de-la-formation-de-l-image-a-l-ecran](http://bit.ly/le-canon-a-electrons-moteur-principal-de-la-formation-de-l-image-a-l-ecran) (adapté)

1. Le canon à électrons est le constituant principal des tubes cathodiques équipant les anciens téléviseurs, écrans d'ordinateurs, oscilloscopes analogiques...etc : quel est son rôle ?



- 2. Quel est l'élément du canon qui produit les électrons, comment ?
- 3. Quel est l'élément qui assure l'accélération des électrons, comment ?
- 4. Quel est le rôle du wehnelt (ou grille), quelle est sa position par rapport à l'anode et la cathode ?
- 5. A la sortie du canon, les électrons ont la même vitesse (on dit qu'ils constituent un faisceau **homocinétique**) : pour quelle raison ils ne peuvent pas avoir des vitesses différentes.
- 6. Dans quel but, les composants du canon sont enfermés dans un tube où règne un vide très poussé ?
- 7. Dans le canon à électrons d'un oscilloscope analogique il y en a une 4<sup>ème</sup> électrode, entre la grille et l'anode, dont le rôle est de *focaliser* le faisceau d'électrons ;

a) Faire un schéma simplifié du canon à électrons d'un oscilloscope ;

on désignera par

C : Cathode
G : Grille
F : électrode de Focalisation
A : Anode

b) Lorsqu'un oscilloscope est en marche, les ddp entre les différents éléments de son canon sont :

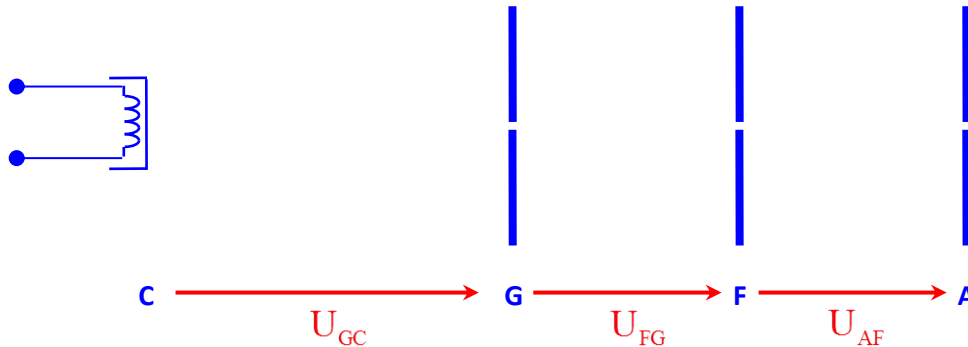
$$\begin{cases} U_{GC} = 100 \text{ V} & : \text{ddp entre la Grille \& la Cathode} \\ U_{FG} = 1000 \text{ V} & : \text{ddp entre l'électrode de Focalisation \& la Grille} \\ U_{AF} = 900 \text{ V} & : \text{ddp entre l'Anode \& l'électrode de Focalisation} \end{cases}$$

Sachant que la masse et la charge de l'électron sont respectivement  $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ , et  $q = -e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  ; calculer sa vitesse par rapport à un référentiel de laboratoire, supposé galiléen, et où on négligera son poids :

- \* A l'issue de la grille.
- \* A l'issue de l'électrode de focalisation.
- \* A la sortie du canon : quelle est la nature de son mouvement ultérieur ?

1. Emettre et accélérer des électrons.
2. La cathode, par chauffage électrique du filament qu'elle contient.
3. L'anode, en attirant les électrons par son potentiel positif.
4. Le wehnelt (ou grille) permet de régler le débit des électrons, agissant ainsi sur la luminosité du spot. Elle est placée entre la cathode et l'anode.
5. Les électrons quittent la cathode avec la même vitesse nulle, et sont accélérés par la même ddp.
6. Pour éliminer la résistance de l'air.
- 7.

a)



b) Soit  $\vec{F}_e$  la force électrique subie par un électron dans le canon :

$$\begin{aligned}
 * \quad \Delta E_c &= W(\vec{F}_e) \\
 C \rightarrow G & \\
 \Rightarrow \frac{1}{2} m v_G^2 - 0 &= q \cdot (V_C - V_G) \Rightarrow \frac{1}{2} m v_G^2 = -e \cdot (V_C - V_G) = e \cdot (V_G - V_C) = e \cdot U_{GC} \\
 \Rightarrow v_G^2 &= \frac{2}{m} e U_{GC} \Rightarrow \|\vec{v}_G\| = \sqrt{\frac{2e}{m} U_{GC}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{9,1 \cdot 10^{-31}} \cdot 100} : \boxed{\|\vec{v}_G\| \approx 5,93 \cdot 10^6 \text{ m.s}^{-1}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 * \quad \Delta E_c &= W(\vec{F}_e) \\
 G \rightarrow F & \\
 \Rightarrow \frac{1}{2} m v_F^2 - \frac{1}{2} m v_G^2 &= q \cdot (V_G - V_F) \Rightarrow \frac{1}{2} m (v_F^2 - v_G^2) = e \cdot (V_F - V_G) = e \cdot U_{FG} \\
 \Rightarrow v_F^2 - v_G^2 &= \frac{2}{m} e U_{FG} \Rightarrow v_F^2 = \frac{2e}{m} U_{GC} + \frac{2e}{m} U_{FG} = \frac{2e}{m} (U_{FG} + U_{GC}) = \frac{2e}{m} U_{FC} \\
 \Rightarrow \|\vec{v}_F\| &= \sqrt{\frac{2e}{m} U_{FC}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{9,1 \cdot 10^{-31}} \cdot (1000 + 100)} : \boxed{\|\vec{v}_F\| \approx 1,97 \cdot 10^7 \text{ m.s}^{-1}}
 \end{aligned}$$

$$* \quad \text{Par analogie : } \|\vec{v}_A\| = \sqrt{\frac{2e}{m} U_{AC}} = \sqrt{\frac{2e}{m} (U_{AF} + U_{FG} + U_{GC})}$$

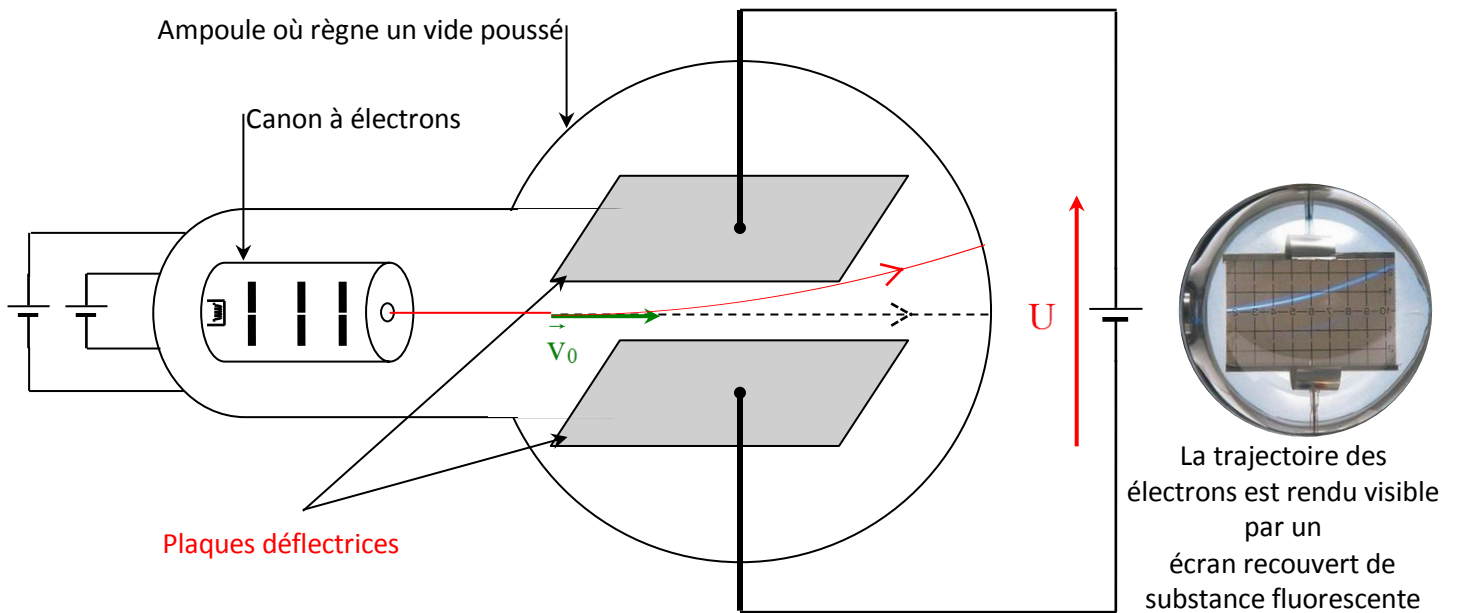
$$\|\vec{v}_A\| = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{9,1 \cdot 10^{-31}} \cdot (900 + 1000 + 100)} : \boxed{\|\vec{v}_F\| \approx 2,65 \cdot 10^7 \text{ m.s}^{-1}} = 26500 \text{ Km.s}^{-1} !$$

A la sortie du canon, l'électron n'est soumis qu'à son poids négligeable : il sera en MRU d'après la 1<sup>ère</sup> loi de Newton.

### III- Déviation d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme

#### 1) Expérience (Fig-2)

Figure-2



Le canon émet un faisceau d' $e^-$  homocinétique ; soit  $\vec{v}_0$  la vitesse d'un  $e^-$  par rapport à un référentiel de laboratoire :

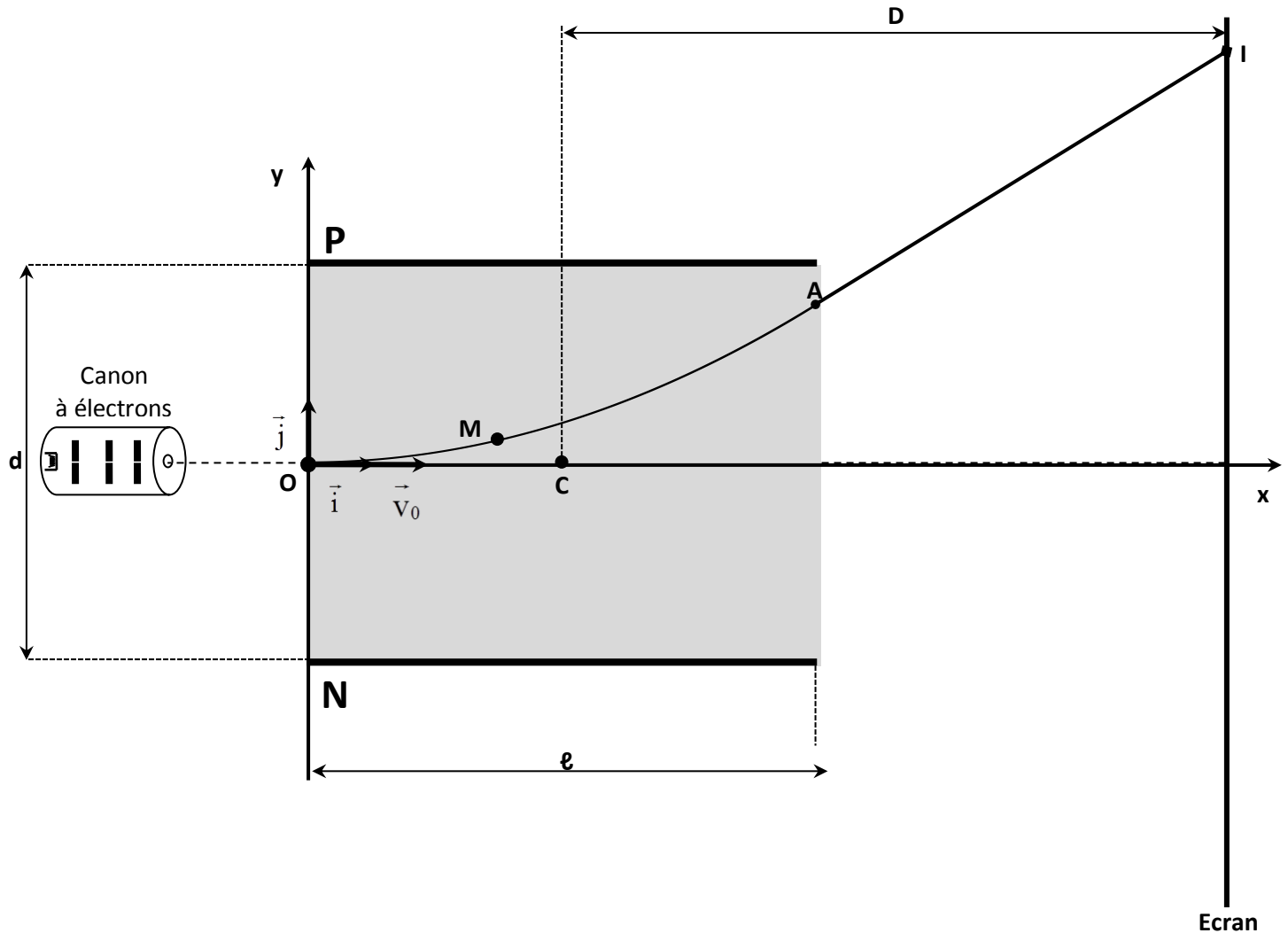
- \* Pour  $U = 0$  ; aucun champ électrique entre les plaques horizontales : le faisceau suit un trajet horizontal.
- \* Pour  $U \neq 0$  ; le faisceau subit une déviation (déflexion) d'allure parabolique dans le champ électrique uniforme qui règne entre les plaques.

#### 2) Activité-2

**Activité-2**

On considère le dispositif de la figure ci-dessous :

- \* P et N sont deux plaques identiques conductrices en regard, distantes de  $d$ , de même longueur  $\ell$ , et disposées horizontalement en symétrie par rapport à l'axe d'un canon à électrons : une tension continue  $U_{PN} = U > 0$  est maintenue entre les plaques.
- \* Le canon à électrons injecte, par le point O, des électrons de masse  $m$ , de charge  $q = -e$  et de vitesse  $\vec{v}_0$ .
- \* L'écran, plan et recouvert d'une substance fluorescente, est disposé perpendiculairement à l'axe du canon à une distance  $D$  du centre de symétrie C des plaques : il permet de visualiser le point d'impact I des électrons.

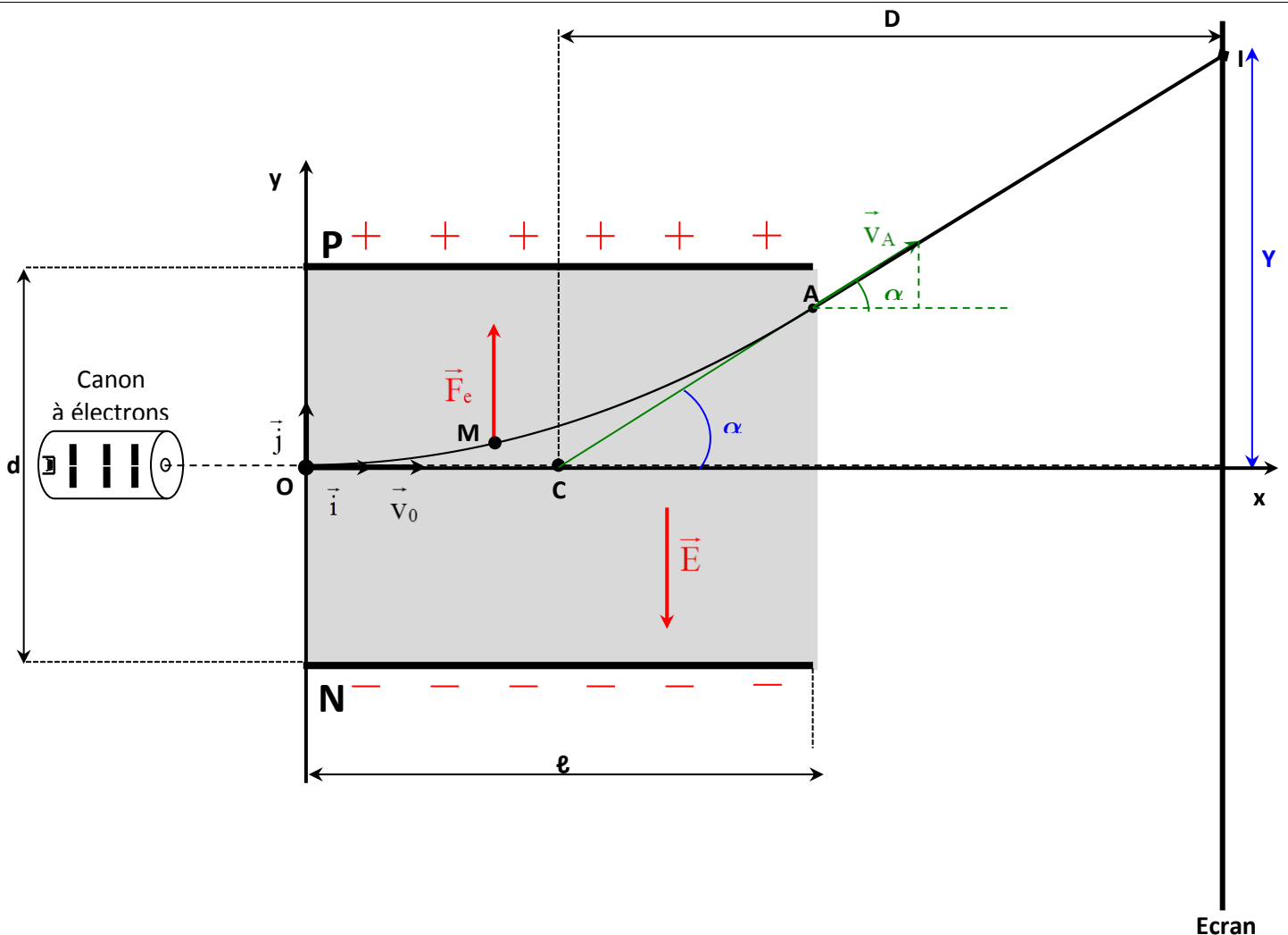


On s'intéresse à l'étude du mouvement d'un électron (M) qui pénètre en O dans le champ électrique uniforme régnant entre les plaques à l'origine des dates, avec la vitesse initiale  $\vec{v}_0 = v_0 \vec{i}$  relativement à un référentiel de laboratoire, supposé galiléen, dont le repère d'espace est  $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ .

On négligera le poids de l'électron devant la force électrique, ainsi que la résistance de l'air.

1. Représenter le vecteur champ électrique  $\vec{E}$  uniforme qui règne entre les plaques.
2. Représenter la force électrique  $\vec{F}_e$  qui s'exerce sur l'électron (M).
3. Etablir les équations horaires  $x(t)$ ,  $y(t)$  et  $z(t)$  du mouvement en fonction de  $e$ ,  $U$ ,  $m$ ,  $d$  et  $v_0$  ; vérifier que le mouvement s'effectue dans le plan  $(O, x, y)$ .
4. Etablir l'équation cartésienne de la trajectoire ; quelle est sa forme ?
5. Etablir l'expression de la valeur de la vitesse de sortie en A de l'électron en fonction de  $v_0$ ,  $e$ ,  $U$ ,  $\ell$ ,  $m$ , et  $d$ .

6. A la sortie du champ électrique ; l'électron n'est soumis qu'à son poids, qu'on négligera toujours :
- Quelle sera la nature du mouvement de l'électron après la sortie du champ électrique.
  - Représenter l'angle  $\alpha$  que fait la direction de  $\vec{v}_A$  avec celle de  $\vec{v}_0$ , appelée déviation de l'électron ; établir l'expression de  $\text{tg } \alpha$  : comment elle varie avec la valeur de la tension déviatrice ?
  - Retrouver l'expression de  $\text{tg } \alpha$  par une autre méthode.
  - On appelle déflexion électrique  $Y$  de l'électron ; la distance, sur l'écran, qui sépare son point d'impact (I) en présence du champ électrique, du point d'impact qu'il aurait eu en l'absence de ce champ :
    - \* Représenter la déflexion électrique.
    - \* Montrer que la tangente à la trajectoire en A rencontre l'axe (O, x) en C.
    - \* Etablir l'expression de  $Y$  : comment elle varie avec la valeur de la tension déviatrice ?
    - \* On appelle coefficient de déflexion la constante  $K$  telle que  $Y = K \cdot U$  : donner son expression, de quoi il dépend ?
7. **A.N :**  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ,  $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ ,  $\ell = 10 \text{ cm}$ ,  $d = 4,4 \text{ cm}$ ,  $D = 20 \text{ cm}$ ,  $v_0 = 20 \cdot 10^6 \text{ m.s}^{-1}$ , et  $Y = 8 \text{ cm}$ ;
- Calculer la valeur du coefficient de déflexion  $K$ .
  - Calculer la valeur de la tension déviatrice  $U$ .
  - Calculer la valeur de la déviation  $\alpha$ .



- $U_{PN} = V_P - V_N > 0 \Rightarrow V_P > V_N$  : d'où le sens de  $\vec{E}$  (descend les potentiels)
- $\vec{F}_e = q \cdot \vec{E} = -e \cdot \vec{E}$  : opposée à  $\vec{E}$



3.

$$* \text{ 2<sup>ème</sup> loi de Newton : } \vec{F}_e = m \vec{a} \Rightarrow -e \cdot \vec{E} = m \vec{a} \Rightarrow \vec{a} = -\frac{e}{m} \vec{E} = -\frac{e}{m} (-E \vec{j}) \quad \left\{ \begin{array}{l} a_x = 0 \\ a_y = \frac{e}{m} E = \frac{e}{m} \frac{U}{d} \\ a_z = 0 \end{array} \right.$$

$$* \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \Rightarrow \vec{v} = \int \vec{a} dt \Rightarrow \vec{v} \quad \left\{ \begin{array}{l} v_x = \int a_x dt = \int 0 dt = C^{te}_1 \\ v_y = \int a_y dt = \int \left( \frac{eU}{m d} \right) dt = \left( \frac{eU}{m d} \right) t + C^{te}_2 \\ v_z = \int a_z dt = \int 0 dt = C^{te}_3 \end{array} \right.$$

$$\text{On a } \left\{ \begin{array}{l} v_x(t=0) = v_0 \Rightarrow C^{te}_1 = v_0 \\ v_y(t=0) = 0 \Rightarrow C^{te}_2 = 0 \\ v_z(t=0) = 0 \Rightarrow C^{te}_3 = 0 \end{array} \right. , \text{ alors : } \vec{v} \quad \left\{ \begin{array}{l} v_x = v_0 \\ v_y = \left( \frac{eU}{m d} \right) t \\ v_z = 0 \end{array} \right.$$

$$* \vec{v} = \frac{d\vec{OM}}{dt} \Rightarrow \vec{OM} = \int \vec{v} dt \Rightarrow \vec{OM} \quad \left\{ \begin{array}{l} x = \int v_x dt = \int v_0 dt = v_0 t + C^{te}_4 \\ y = \int v_y dt = \int \left( \frac{eU}{m d} \right) t dt = \frac{1}{2} \left( \frac{eU}{m d} \right) t^2 + C^{te}_5 \\ z = \int v_z dt = \int 0 dt = C^{te}_6 \end{array} \right.$$

$$\text{On a } \left\{ \begin{array}{l} x(t=0) = 0 \Rightarrow C^{te}_4 = 0 \\ y(t=0) = 0 \Rightarrow C^{te}_5 = 0 \\ z(t=0) = 0 \Rightarrow C^{te}_6 = 0 \end{array} \right. , \text{ alors : } \vec{OM} \quad \left\{ \begin{array}{l} x = v_0 t \\ y = \frac{eU}{2 m d} t^2 \\ z = 0 \end{array} \right.$$

$\Rightarrow$  A chaque instant  $z = 0$  : l'électron se meut dans le plan(O, x, y)

$$4. t = \frac{x}{v_0} \Rightarrow y = \frac{eU}{2 m d} \left( \frac{x}{v_0} \right)^2 \Rightarrow y = \left( \frac{eU}{2 m d v_0^2} \right) \cdot x^2 : \text{ forme parabolique.}$$

$$5. \|\vec{v}_A\| = \sqrt{v_{Ax}^2 + v_{Ay}^2 + v_{Az}^2}$$

$$\text{Soit } t_A \text{ la date de l'instant de sortie de l'électron du champ électrique ; } \vec{v}_A \quad \left\{ \begin{array}{l} v_{Ax} = v_0 \\ v_{Ay} = \left( \frac{eU}{m d} \right) t_A, t_A = ? \\ v_{Az} = 0 \end{array} \right.$$

$$\text{On a } x(t_A) = \ell \Rightarrow v_0 t_A = \ell \Rightarrow t_A = \frac{\ell}{v_0}, \text{ alors } \vec{v}_A \quad \left\{ \begin{array}{l} v_{Ax} = v_0 \\ v_{Ay} = \frac{eU \ell}{m d v_0} \\ v_{Az} = 0 \end{array} \right. , \text{ d'où } \|\vec{v}_A\| = \sqrt{v_0^2 + \left( \frac{eU \ell}{m d v_0} \right)^2}$$

6.

a) En négligeant le poids et la résistance de l'air, l'électron est « isolé » à la sortie du champ électrique : d'après la 1<sup>ère</sup> loi de Newton il sera en MRU.

$$b) \operatorname{tg} \alpha = \frac{|v_{Ay}|}{|v_{Ax}|} = \frac{\frac{eU \ell}{m d v_0}}{v_0} : \operatorname{tg} \alpha = \frac{eU \ell}{m d v_0^2} \Rightarrow \alpha \text{ augmente avec l'augmentation de } U$$

c)  $\operatorname{tg} \alpha$  est le coefficient directeur de la tangente à la trajectoire (parabolique) en A

$$\Rightarrow \operatorname{tg} \alpha = \left( \frac{dy}{dx} \right)_{x=x_A=\ell} ; \text{ on a } \frac{dy}{dx} = \frac{d}{dx} \left[ \left( \frac{eU}{2mdv_0^2} \right) \cdot x^2 \right] = \frac{eU}{mdv_0^2} \cancel{\neq} x = \frac{eU}{mdv_0^2} x,$$

$$\text{Alors } \operatorname{tg} \alpha = \frac{eU\ell}{mdv_0^2}$$

d)

\*

\* L'équation cartésienne de la tangente à la trajectoire en A est de la forme  $y = \operatorname{tg} \alpha \cdot x + b$ , elle rencontre l'axe (O, x) en un point d'abscisse x telle que  $0 = \operatorname{tg} \alpha \cdot x + b \Rightarrow x = -\frac{b}{\operatorname{tg} \alpha}$

$$\text{au point A : } y_A = \operatorname{tg} \alpha \cdot x_A + b \Rightarrow b = y_A - \operatorname{tg} \alpha \cdot x_A \Rightarrow -\frac{b}{\operatorname{tg} \alpha} = -\frac{y_A}{\operatorname{tg} \alpha} + x_A$$

or le point A  $\in$  trajectoire, alors  $y_A = \left( \frac{eU}{2mdv_0^2} \right) \cdot x_A^2$ ; d'où

$$-\frac{b}{\operatorname{tg} \alpha} = -\frac{\left( \frac{eU}{2mdv_0^2} \right) \cdot x_A^2}{\operatorname{tg} \alpha} + x_A = -\frac{\left( \frac{eU}{2mdv_0^2} \right) \cdot x_A^2}{\frac{eU\ell}{mdv_0^2}} + x_A = -\frac{x_A}{2} + x_A = \frac{x_A}{2} = \frac{\ell}{2} : \text{Point C}$$

$$* \operatorname{tg} \alpha = \frac{Y}{D} \Rightarrow Y = D \cdot \operatorname{tg} \alpha = D \frac{eU\ell}{mdv_0^2} : Y = \left( \frac{De\ell}{mdv_0^2} \right) U ; Y \text{ est proportionnelle à } U.$$

$$* K = \frac{De\ell}{mdv_0^2}, \text{ ne dépend que des caractéristiques du dispositif.}$$

7.

$$\text{a) } K = \frac{De\ell}{mdv_0^2} = \frac{0,2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,1}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 4,4 \cdot 10^{-2} \cdot (20 \cdot 10^6)^2} \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ m.V}^{-1}$$

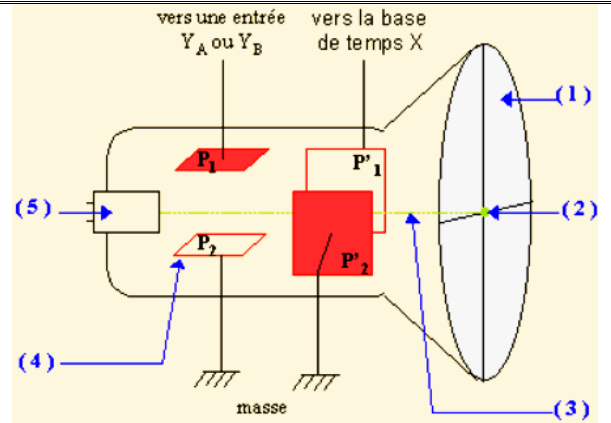
$$\text{b) } Y = KU \Rightarrow U = \frac{Y}{K} = \frac{8 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-4}} = 400 \text{ V}$$

$$\text{c) } \operatorname{tg} \alpha = \frac{eU\ell}{mdv_0^2} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 400 \cdot 0,1}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 4,4 \cdot 10^{-2} \cdot (20 \cdot 10^6)^2} = 0,4 \Rightarrow \alpha \approx 21,8^\circ$$

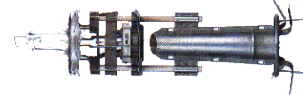
**Application-2 Principe de l'oscilloscope analogique**

Le **canon à électrons** produit un fin **faisceau d'électrons** qui vont percuter l'**écran fluorescent**, laissant apparaître un **spot** de couleur verte (ou autre selon la substance dont est enduite la paroi interne de l'écran).

Les **plaques de déviation** dévient le faisceau quand on applique une tension entre les deux plaques horizontales ( $P_1$  et  $P_2$ ) ou les deux plaques verticales ( $P'_1$  et  $P'_2$ ). [...]



Le **canon à électrons** est la partie se situant à l'opposé de l'écran fluorescent. [...]



Le **tube cathodique** [...] est l'enceinte fermée entre le canon à électrons d'un côté et l'écran de l'autre. Il y règne un vide poussé pour permettre aux électrons de circuler librement d'un bout à l'autre. [...]



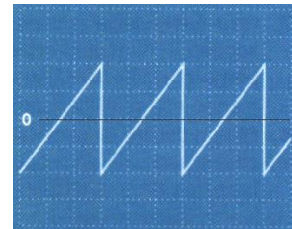
Les deux **plaques de déviation horizontales** ( $P_1$  et  $P_2$ ) dévient le faisceau verticalement quand on applique une tension entre elles deux. [...]

Les deux **plaques de déviation verticales** ( $P'_1$  et  $P'_2$ ) dévient le faisceau horizontalement selon le même principe. [...]

La **base de temps** est un dispositif électronique qui applique une tension de balayage entre les deux plaques verticales.

Le spot qui est la trace du faisceau sur l'écran, le parcourt, horizontalement, plus ou moins rapidement selon la vitesse de balayage choisie.

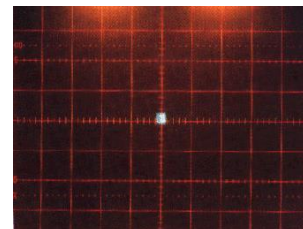
Le signal ci-contre, dit en *dents de scie* ou en rampes, peut être utilisé pour constituer une base de temps d'un oscilloscope.



L'**écran fluorescent** est gradué en divisions (ou carreaux).

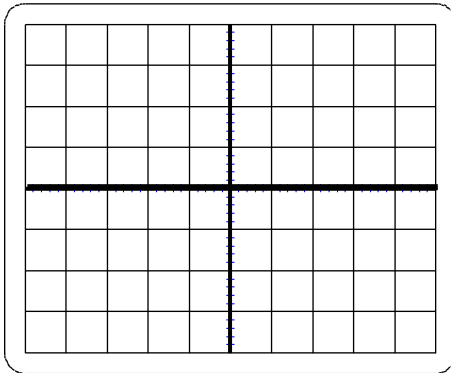
L'axe horizontal est celui du temps [...].

L'axe vertical est celui de la tension [...].

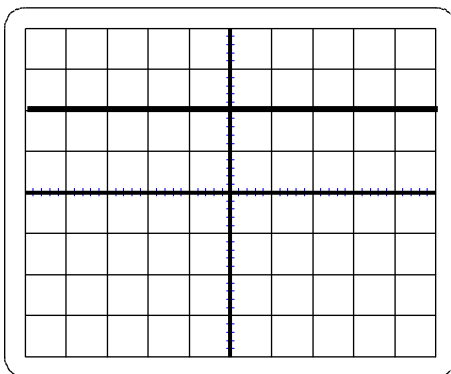
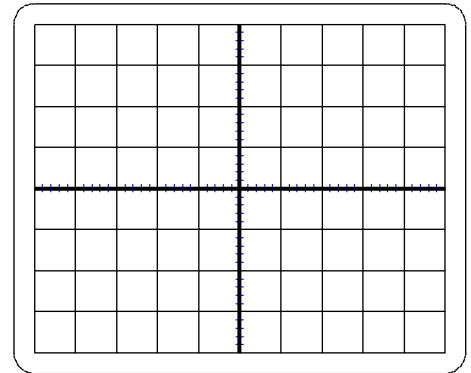


[bit.ly/decouverte-oscillo](http://bit.ly/decouverte-oscillo) (adapté)

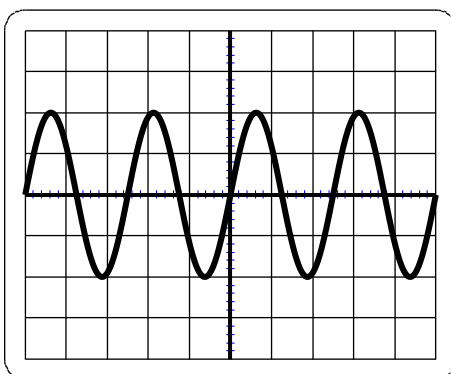
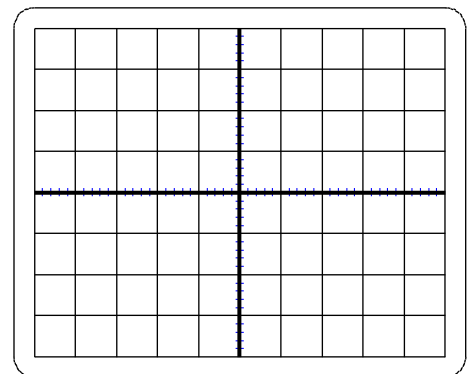
1. Attribuer son nom à chacun des éléments (1), (2), (3), (4), et (5).
2. Quel est le constituant principal d'un oscilloscope analogique ; en quoi il consiste, et qu'est-ce qu'il renferme ?
3. Quel est le rôle du canon à électrons ; comment est-il le faisceau d'électrons qu'il produise ?
4. Soit (u) une tension que l'on souhaite visualiser à l'écran de l'oscilloscope ;
  - a) La représenter sur la 1<sup>ère</sup> figure.
  - b) Dans quelle direction elle va dévier le faisceau d'électrons ?
5. Qu'est-ce que la base de temps, où elle se trouve ; comment elle assure le balayage horizontal de l'écran ?
6. Représenter l'axe de temps, et l'axe de la tension sur la dernière figure : qu'est-ce qui se dessine à l'écran.
7. Pour chacun des oscillogrammes suivants ; représenter ce qu'il devient si on éteint la base de temps.



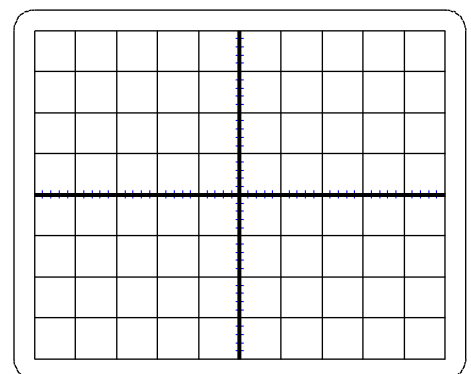
On éteint la base de temps



On éteint la base de temps

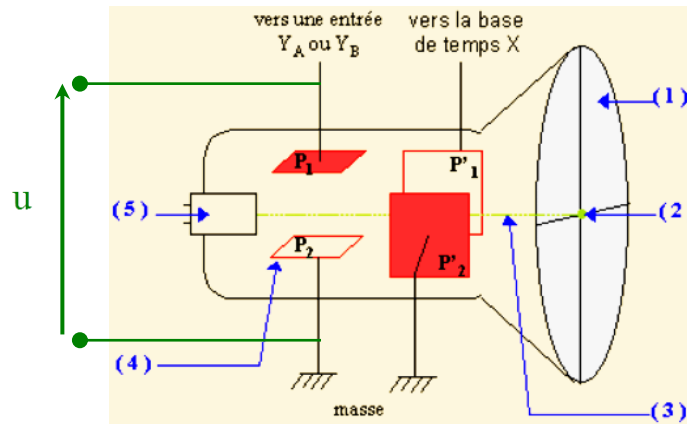


On éteint la base de temps



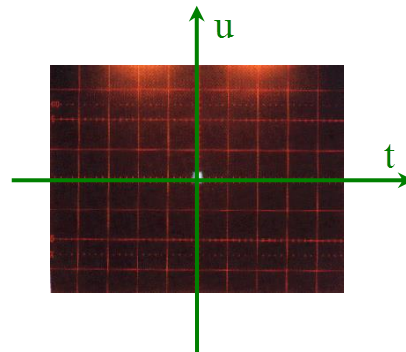
1.
  - (1) : Ecran fluorescent.
  - (2) : Spot.
  - (3) : Faisceau d'électrons.
  - (4) : Plaques de déviation.
  - (5) : Canon à électrons.
2. Le tube cathodique ; il consiste en une enceinte fermée où règne un vide poussé. Il renferme le canon à électrons d'un côté et l'écran de l'autre, ainsi que les plaques de déviation.
3. Emettre un faisceau d'électrons fin et homocinétique.
- 4.

a)

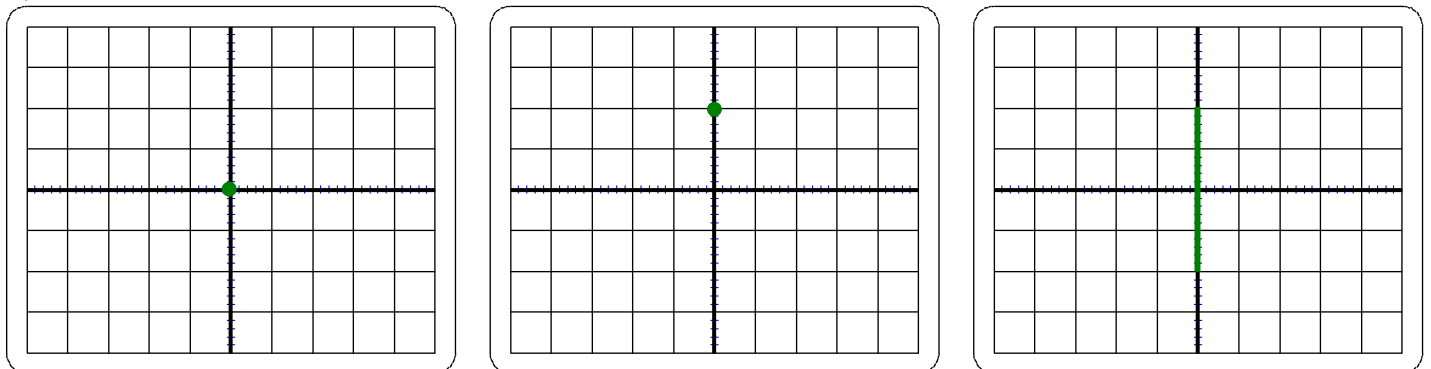


b) Verticale.

5. La base de temps est un dispositif électronique qui applique une tension de balayage entre les deux plaques verticales, elle se trouve dans le boîtier de l'oscilloscope. La tension produite par la base de temps étant en dents de scie ; la déviation horizontale du spot qu'elle provoque augmente, au cours du temps, d'une valeur minimale (spot à l'extrême gauche de l'écran) à une valeur maximale (spot à extrême droite de l'écran), puis revient instantanément à sa valeur minimale... et ainsi de suite.
6. A l'écran d'un oscilloscope se dessine la courbe  $u = f(t)$



7.



## TP 7 : Etude expérimentale d'un champ électrique uniforme

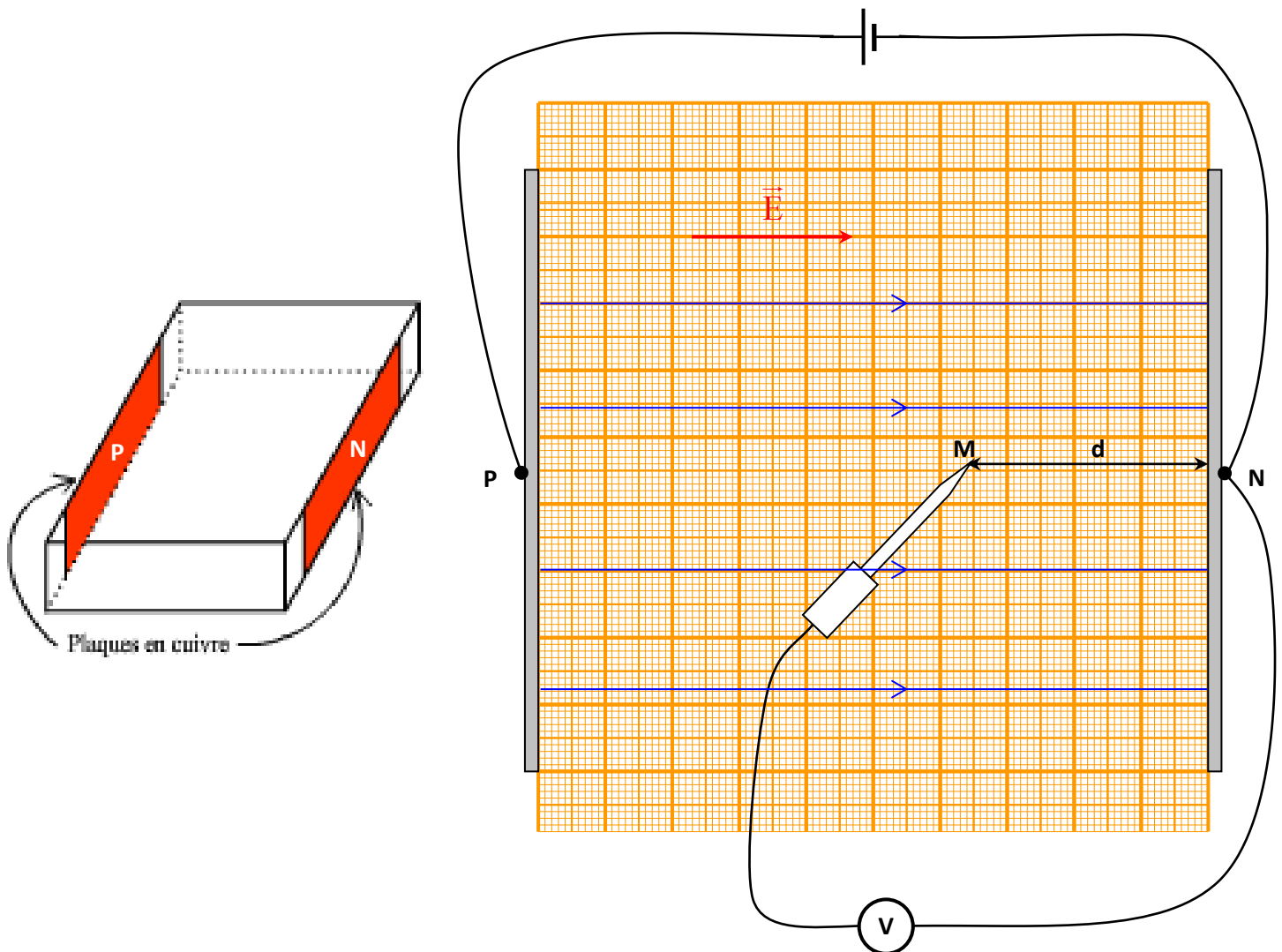
### Objectifs :

- Déterminer la forme des surfaces équipotentielles entre deux plaques en regard.
- Vérifier l'uniformité du champ électrique créé entre deux plaques en regard, et déterminer son intensité.

### Matériel :

- 1 Cuve à fond transparent, portant deux plaques métalliques en regard.
- 1 Générateur de tension continue (6 V).
- 1 Multimètre + 1 Sonde.
- 4 Fils de connexion.
- Solution aqueuse de  $\text{CuSO}_4$  (0,1 M).

### Manipulation :



- \* Remplir la cuve de la solution d'électrolyte ( $\text{CuSO}_4$ ), et relier les plaques métalliques aux bornes P (+) et N (-) d'un générateur de tension continue (6 V).
- \* Placer un papier millimétré sous la cuve et brancher un voltmètre comme le montre la figure ci-dessus.
- \* Quelle est la nature du champ électrique créé dans l'espace séparant les plaques ; représenter le vecteur champ électrique, ainsi que quelques lignes de champ.

Le champ est uniforme, les lignes de champ sont  $\perp$  aux plaques et descendent les potentiels (P  $\rightarrow$  N)

**1. 1<sup>ère</sup> expérience**

- a) Déplacer la sonde du voltmètre horizontalement et verticalement, tout en maintenant la distance (d) constante. Refaire pour différentes valeurs de (d)
- b) Conclure ; quelle est la forme des surfaces équipotentiels.  
 Les points situés à une même distance des plaques sont au même potentiel électrique ;  
 les surfaces équipotentiels sont des plans parallèles aux plaques.

**2. 2<sup>ème</sup> expérience**

- a) Remplir le tableau de mesures suivant :

d (10 <sup>-2</sup> m)	2	3	4	5	6	7	8
U <sub>MN</sub>   (V)	2	3	4	5	6	7	8
$\frac{ U_{MN} }{d}$ (V.m <sup>-1</sup> )	100	100	100	100	100	100	100

- b) Conclure

$$\frac{|U_{MN}|}{d} = \|\vec{E}\| = 100 \text{ V.m}^{-1}$$

La valeur du champ électrique uniforme créé entre deux plaques conductrices identiques, en regard, séparées d'une distance (d) et reliées aux pôles P et N d'un générateur de tension continue, est donnée

par :  $\|\vec{E}\| = \frac{|U_{PN}|}{d}$

**Application**

On considère le dispositif de la figure ci-dessous :

- \* Des particules  $\alpha$  (ions He<sup>2+</sup>) de masse **m** et de charge **q = 2 e**, sont émis au point A avec une vitesse nulle ; ils sont ensuite accélérés entre A et B par une tension U<sub>AB</sub> appliquée par un générateur de tension continue (G) entre deux plaques conductrices en regard et percées en A et B : elles sortent en B avec une vitesse  $\vec{v}_B$ .
- \* Le faisceau homocinéétique obtenu pénètre en O dans la région délimitée par deux plaques P et N, avec une vitesse  $\vec{v}_0$  inclinée d'un angle  $\beta$  par rapport au vecteur  $\vec{i}$ .  
 Les plaques P et N sont identiques, conductrices, en regard, distantes de **d**, de même longueur **ℓ**, et disposées horizontalement en symétrie par rapport à l'axe (O, x) : un générateur de tension continue maintient une tension **U<sub>PN</sub> = U** entre les plaques.
- \* L'écran est une plaque photographique (sensible aux particules  $\alpha$ ) disposée perpendiculairement à l'axe (O, x), à une distance **D** du point O : les particules y-arrivent au point d'impact **I**.

On s'intéresse à l'étude du mouvement d'une particule  $\alpha$  (M) qui passe par le point O à l'origine des dates, relativement à un référentiel de laboratoire, supposé galiléen, dont le repère d'espace est  $(O, \vec{i}, \vec{j})$ .

On admettra que le mouvement s'effectue dans le plan (O, x, y), et on négligera le poids de la particule, ainsi que la résistance de l'air.

Données :

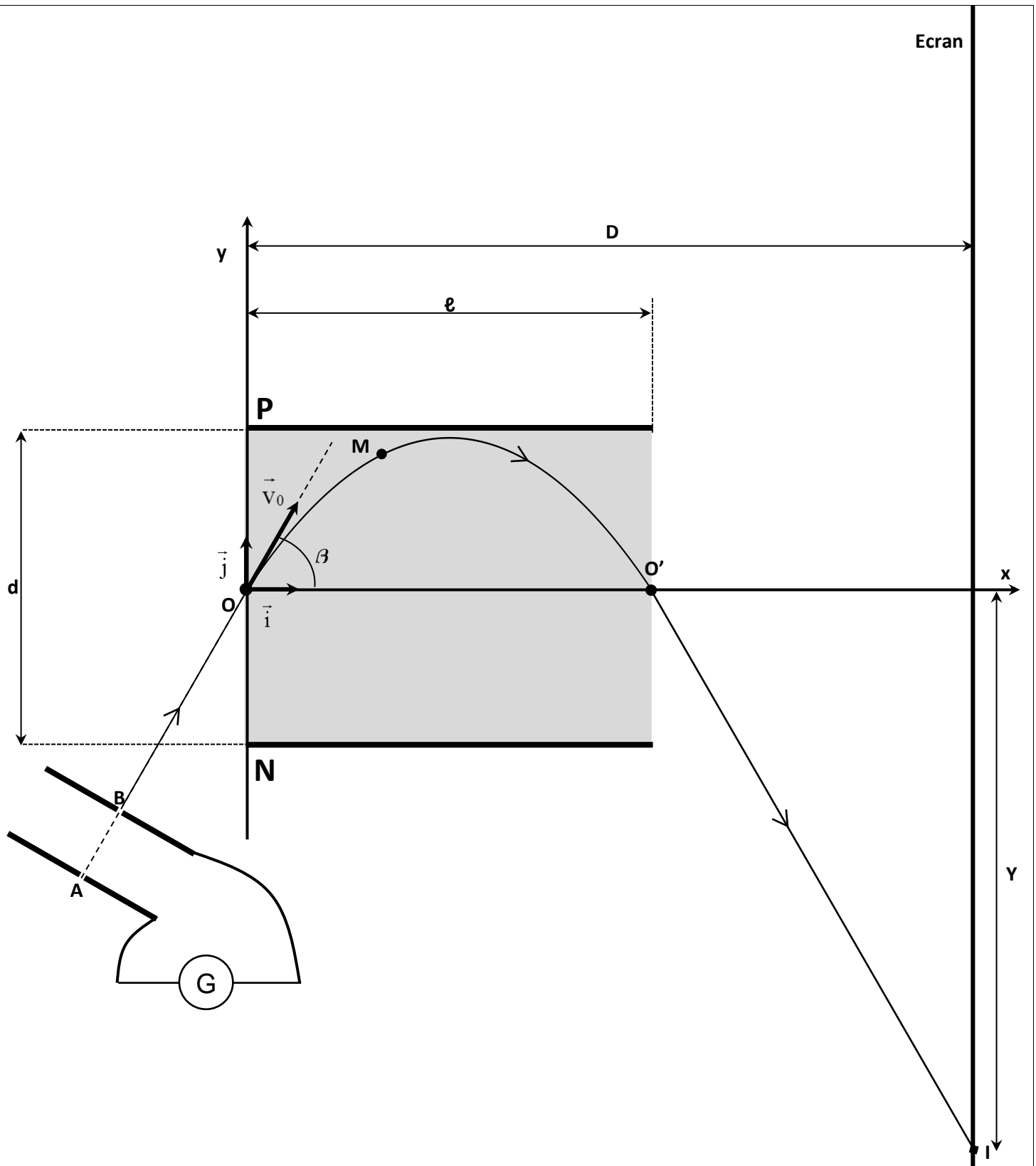
$$m = 6,64 \cdot 10^{-27} \text{ kg}, \quad e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$v_B = \|\vec{v}_B\| = 10^6 \text{ m.s}^{-1}$$

$$\beta = 60^\circ$$

$$d = 52 \text{ cm}, \quad \ell = 60 \text{ cm}$$

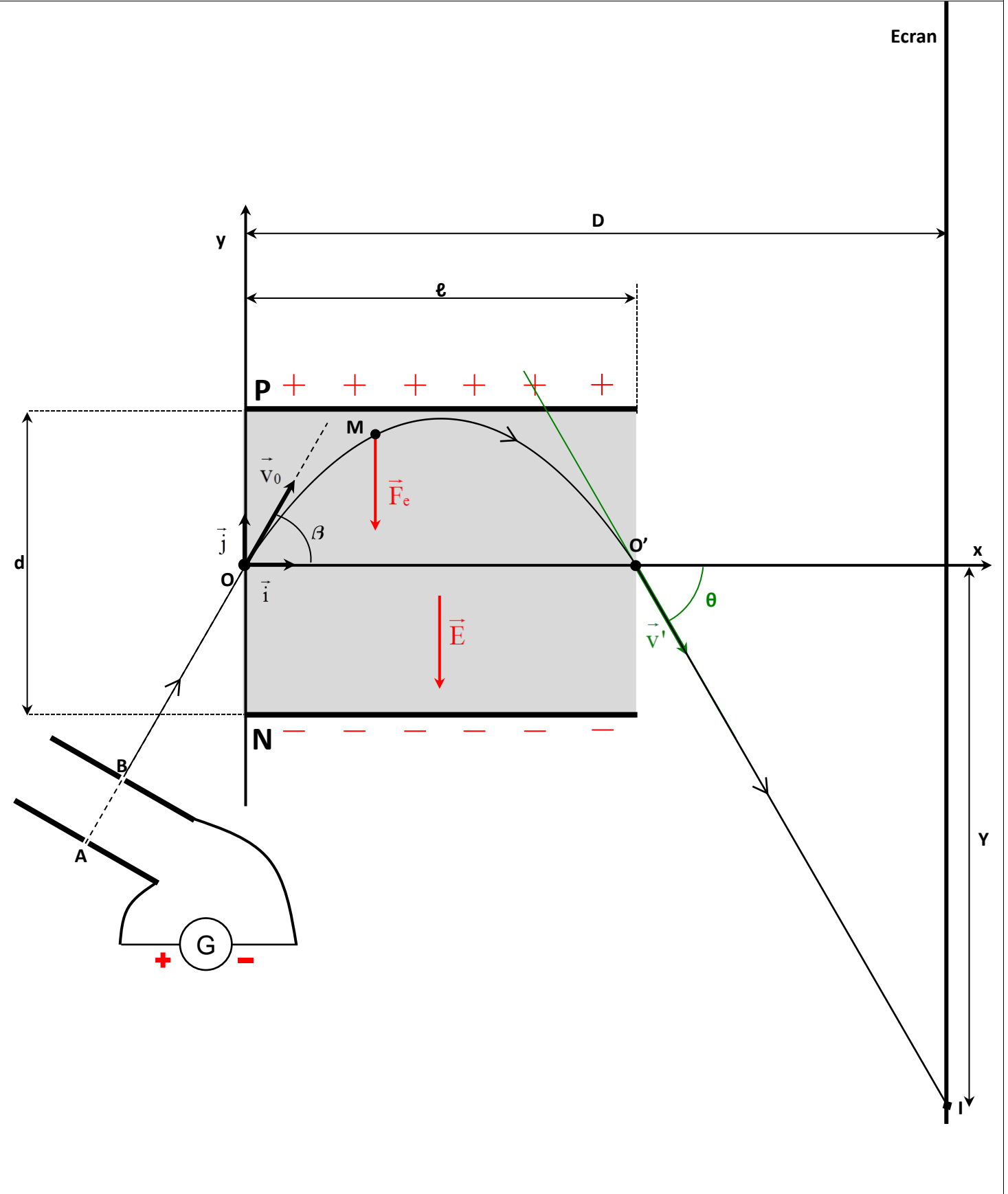
$$D = 97 \text{ cm}$$



1. Indiquer les pôles du générateur ( $G$ ), permettant d'accélérer les particules de  $A \rightarrow B$ , et calculer la valeur de la tension accélératrice  $U_{AB}$ .
2. Justifier que  $\vec{v}_0 = \vec{v}_B$
3. Représenter le vecteur champ électrique uniforme  $\vec{E}$  qui règne entre les plaques  $P$  et  $N$  afin qu'il soit possible que les particules sortent par le point  $O'$  : indiquer les polarités des plaques dans ce cas et le signe de  $U_{PN}$ .
4. Etablir l'équation cartésienne de la trajectoire ; quelle est sa forme ?
5. En déduire la valeur de  $U$  nécessaire pour que les particules sortent par le point  $O'$ .



6. Soit  $\vec{v}'$  la vitesse de sortie de la particule en  $O'$  ;
- Représenter  $\vec{v}'$ , et l'angle ( $\theta$ ) qu'il fait avec  $\vec{i}$ .
  - Montrer que  $\|\vec{v}'\| = \|\vec{v}_0\|$ , et  $\theta = \beta$ .
7. On s'intéresse à la particule après la sortie du champ électrique ;
- Quelle est la nature de son mouvement.
  - Déterminer la valeur de  $Y$ .



1.

 \*  $q > 0$  ; d'où la polarité du générateur.

 \*  $U_{AB} = ?$ 

 Soit  $\vec{F}_e$  la force électrique subie par une particule entre A et B :

$$\Delta E_c = W(\vec{F}_e) \Rightarrow \frac{1}{2} m v_B^2 - 0 = q \cdot (V_A - V_B) = 2 e U_{AB}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{2} m v_B^2 = 2 e U_{AB} \Rightarrow U_{AB} = \frac{m}{4 e} v_B^2 = \frac{6,64 \cdot 10^{-27}}{4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} (10^6)^2 : \boxed{U_{AB} = 10375 \text{ V}}$$

 2. En négligeant le poids et la résistance de l'air, les particules sont « isolées » pendant leur mouvement de B  $\rightarrow$  O : d'après la 1<sup>ère</sup> loi de Newton elles sont en MRU de vitesse  $\vec{v}_B$  : elles arrivent en O avec la même vitesse qu'elles avaient en B.

3.

 \*  $\vec{F}_e = q \cdot \vec{E}$ , avec  $q > 0$  :  $\vec{E}$  est de même sens que  $\vec{F}_e$ .

 \* D'autre part  $\vec{E}$  descend les potentiels, alors  $V_N > V_P$  : d'où les polarités des plaques.

 \*  $U_{PN} = V_P - V_N > 0$ 

 4. 2<sup>ème</sup> loi de Newton :  $\vec{F}_e = m \vec{a} \Rightarrow q \cdot \vec{E} = m \vec{a} \Rightarrow 2 e \cdot \vec{E} = m \vec{a}$ 

$$* \vec{a} = \frac{2 e}{m} \vec{E} = \frac{2 e}{m} (- \|\vec{E}\| \vec{j}) = - \frac{2 e}{m} \frac{|U_{PN}|}{d} \vec{j} \left| \begin{array}{l} a_x = 0 \\ a_y = - \frac{2 e U}{m d} \end{array} \right.$$

$$* \vec{v} = \int \vec{a} dt \Rightarrow \vec{v} \left| \begin{array}{l} v_x = \int a_x dt = \int 0 dt = C^{te}_1 \\ v_y = \int a_y dt = \int \left( - \frac{2 e U}{m d} \right) dt = - \left( \frac{2 e U}{m d} \right) t + C^{te}_2 \end{array} \right.$$

$$\text{On a } \left\{ \begin{array}{l} v_x(t=0) = v_0 \cos \beta \Rightarrow C^{te}_1 = v_0 \cos \beta \\ v_y(t=0) = v_0 \sin \beta \Rightarrow C^{te}_2 = v_0 \sin \beta \end{array} \right., \text{ alors : } \vec{v} \left| \begin{array}{l} v_x = v_0 \cos \beta \\ v_y = - \left( \frac{2 e U}{m d} \right) t + v_0 \sin \beta \end{array} \right., \text{ avec } v_0 = \|\vec{v}_0\|$$

$$* \vec{OM} = \int \vec{v} dt \Rightarrow \vec{OM} \left| \begin{array}{l} x = \int v_x dt = \int (v_0 \cos \beta) dt = (v_0 \cos \beta) t + C^{te}_3 \\ y = \int v_y dt = \int \left[ - \left( \frac{2 e U}{m d} \right) t + v_0 \sin \beta \right] dt = - \left( \frac{2 e U}{m d} \right) \frac{1}{2} t^2 + (v_0 \sin \beta) t + C^{te}_4 \end{array} \right.$$

$$\text{On a } \left\{ \begin{array}{l} x(t=0) = 0 \Rightarrow C^{te}_3 = 0 \\ y(t=0) = 0 \Rightarrow C^{te}_4 = 0 \end{array} \right., \text{ alors : } \vec{OM} \left| \begin{array}{l} x = (v_0 \cos \beta) t \\ y = - \left( \frac{e U}{m d} \right) t^2 + (v_0 \sin \beta) t \end{array} \right.$$

$$* t = \frac{x}{v_0 \cos \beta} \Rightarrow y = - \left( \frac{e U}{m d} \right) \frac{x^2}{v_0^2 \cos^2 \beta} + (v_0 \sin \beta) \frac{x}{v_0 \cos \beta}$$

$$\Rightarrow y = - \left( \frac{e U}{m d v_0^2 \cos^2 \beta} \right) \cdot x^2 + \text{tg } \beta \cdot x : \text{ forme parabolique.}$$

5.  $y(x = \ell) = 0 \Rightarrow - \left( \frac{e U}{m d v_0^2 \cos^2 \beta} \right) \cdot \ell^2 + \text{tg } \beta \cdot \ell = 0 \Rightarrow \frac{e U \ell}{m d v_0^2 \cos^2 \beta} = \text{tg } \beta$   
 $\Rightarrow e U \ell = \text{tg } \beta \cdot m d v_0^2 \cos^2 \beta = \frac{\sin \beta}{\cos \beta} m d v_0^2 \cos^2 \beta = m d v_0^2 \sin \beta \cos \beta \Rightarrow U = \frac{m d v_0^2 \sin \beta \cos \beta}{e \ell}$   
 $U = \frac{6,64 \cdot 10^{-27} \cdot 0,52 \cdot (10^6)^2 \cdot \sin 60^\circ \cos 60^\circ}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,6} : \boxed{U = 15574 \text{ V}}$

6.

- a)
- b)

\* O et O' ∈ à la même surface équipotentielle :  $V_O = V_{O'}$

Th de l'Ec entre O et O' :  $\Delta E_c = W(\vec{F}_e)$   
 $\underset{O \rightarrow O'}{\longrightarrow} \quad \underset{O \rightarrow O'}{\longrightarrow}$

$\Rightarrow \frac{1}{2} m v'^2 - \frac{1}{2} m v_0^2 = q \cdot (V_O - V_{O'}) = 0 \Rightarrow \frac{1}{2} m (v'^2 - v_0^2) = 0 \Rightarrow v'^2 - v_0^2 = 0 \Rightarrow v'^2 = v_0^2$

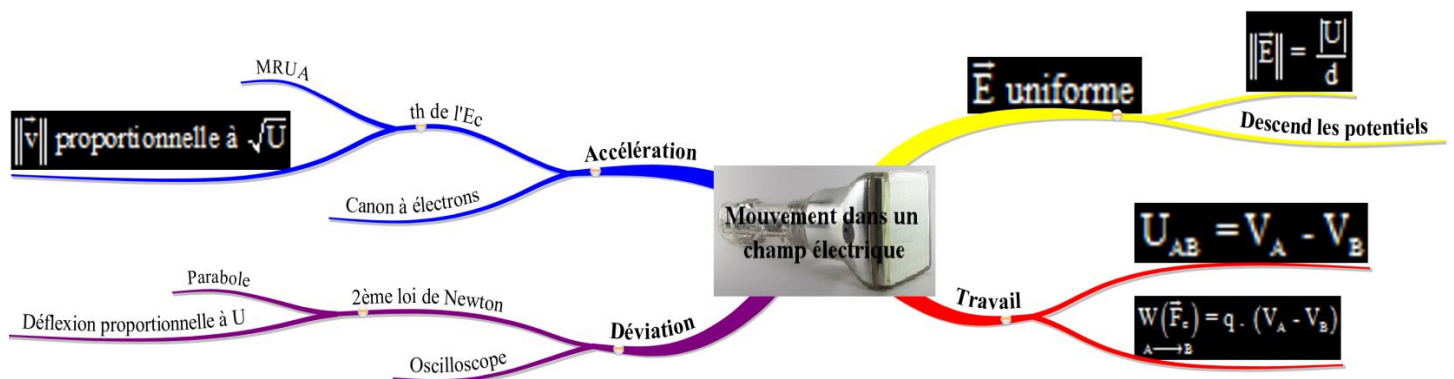
$\Rightarrow \|\vec{v}'\| = \|\vec{v}_0\|$

\*  $\cos \theta = \frac{v'_x}{\|\vec{v}'\|} = \frac{y_0 \cos \beta}{y_0} = \cos \beta \Rightarrow \theta = \beta$

7.

a) En négligeant le poids et la résistance de l'air, la particule est « isolée » : d'après la 1<sup>ère</sup> loi de Newton elle en MRU de vitesse  $\vec{v}'$ .

b)  $\text{tg } \theta = \frac{Y}{D - \ell} \Rightarrow Y = (D - \ell) \cdot \text{tg } \theta = (0,97 - 0,6) \cdot \text{tg } 60^\circ = 0,64 \text{ m} : \boxed{Y = 64 \text{ cm}}$



## Chapitre-6 : Mouvement dans un champ magnétique uniforme

### Objectifs

- 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.

### Prérequis

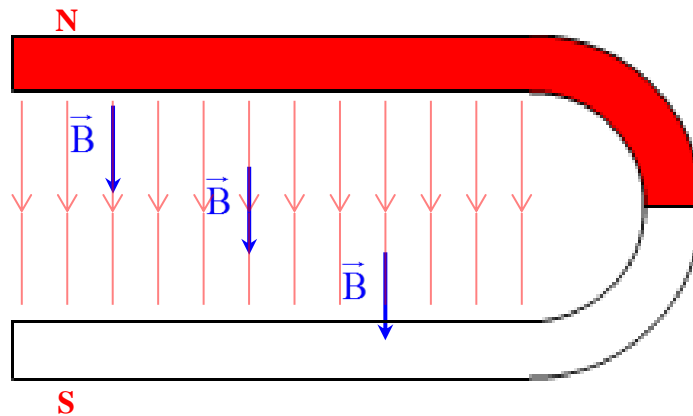
- Champ magnétique, champ magnétique uniforme, vecteur champ magnétique.
- 1<sup>ère</sup> loi, et 2<sup>ème</sup> loi de Newton.
- Relations entre les vecteurs ; accélération instantanée, vitesse instantanée, et position.
- Repère de Frenet ; accélération normale, accélération tangentielle.
- Propriétés du MCU.
- Accélération d'une particule chargée dans un champ électrique.
- Théorème de l'énergie cinétique.
- Travail d'une force électrique.
- Isotopes d'un élément chimique.

### Matériel

- |                 |  |
|-----------------|--|
| * Oscilloscope. | * Déflectron + son Alimentation THT.         |
| * Aimant droit. | * Bobines d'Helmholtz + Alimentation 6-12 V. |
| * Teslamètre.   | * 8 Fils de connexion.                       |

### Rappels

- ❖ Un champ magnétique ( $\vec{B}$ ) règne dans la région de l'espace au voisinage d'un aimant, ou d'un conducteur parcouru par un courant électrique.
- ❖ Le champ magnétique est uniforme, par exemple, entre les branches d'un aimant en U.



## I- Force de Lorentz

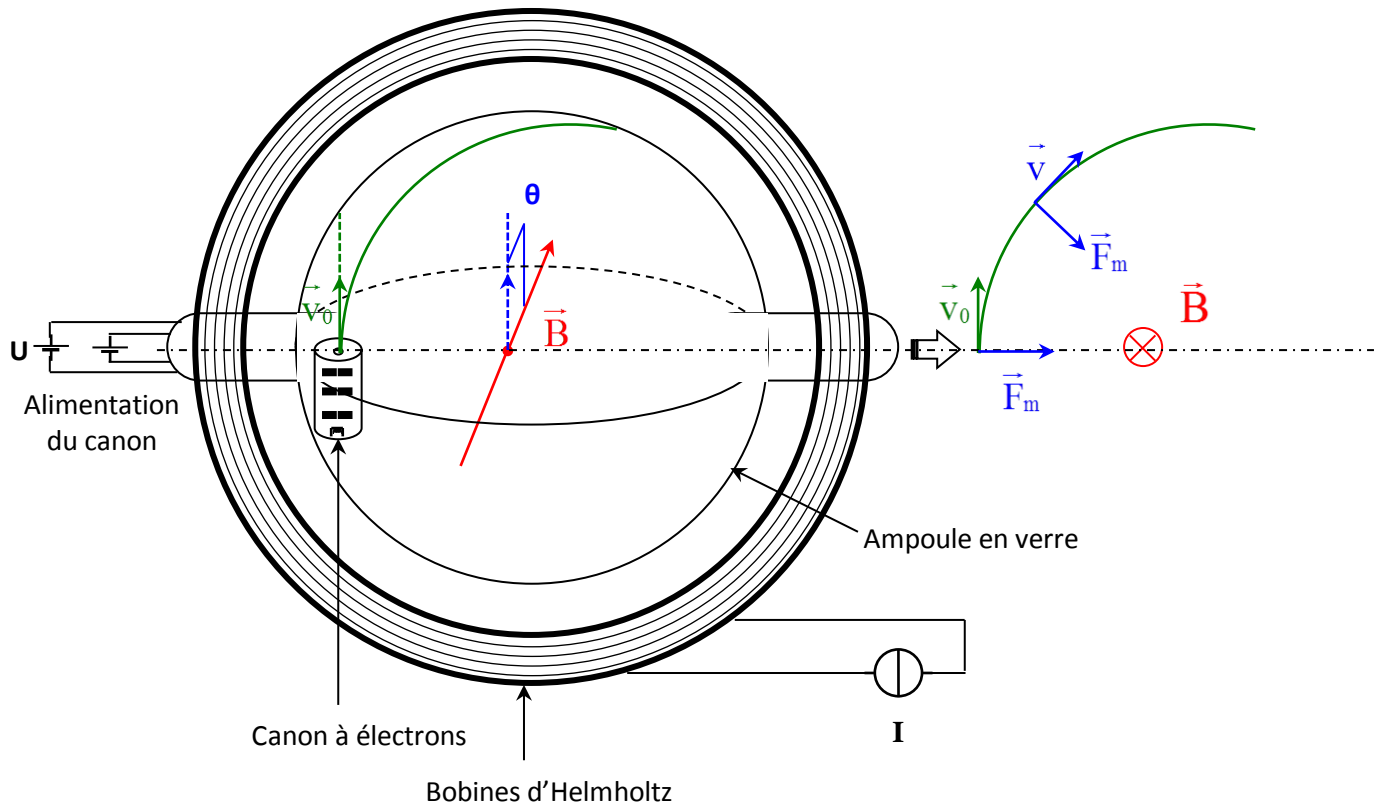
### 1) Mise en évidence

La présence d'un aimant au voisinage d'un oscilloscope provoque la déviation de son faisceau d' $e^-$   
 $\Rightarrow$  les  $e^-$  en mouvement dans le champ magnétique de l'aimant subissent une force magnétique  $\vec{F}_m$ , appelée force de Lorentz (Hendrick / Pays-Bas).

## 2) Etude expérimentale de la force de Lorentz

### a) Expérience (Fig-1)

Figure-1



- \* Les bobines d'Helmholtz sont deux bobines identiques, circulaires, de même axe, et placées l'une en face de l'autre à une distance égale à leur rayon ; étant parcourues par un même courant d'intensité ( $I$ ) et dans le même sens, elles créent un champ magnétique uniforme dans la région de l'espace qui les sépare.

$\|\vec{B}\|$  est proportionnelle à ( $I$ ).

- \* Le canon à électrons émet un faisceau d'électrons rectiligne et homocinétique de vitesse  $\vec{v}_0$ , dont la trace est rendue visible grâce aux collisions avec les atomes de mercure gazeux sous faible pression remplissant l'ampoule.

$\|\vec{v}_0\|$  est proportionnelle à  $\sqrt{U}$ ,  $U$  étant la tension accélératrice du canon.

- \* L'angle  $\theta$  entre les directions de  $\vec{v}_0$  et  $\vec{B}$  peut être modifié en tournant l'ampoule autour de son axe :  
**Si  $\theta = 0$  les électrons ne sont pas déviés, et si  $\theta \neq 0$  et de  $90^\circ$  les électrons sont déviés selon une trajectoire hélicoïdale ; on se limitera au cas où  $\theta = 90^\circ$**

Pour  $\theta = 90^\circ$ , le champ magnétique exerce une force magnétique  $\vec{F}_m$  sur les  $e^-$  en mouvement ; leur trajectoire s'incurve tout en restant dans un plan  $\perp \vec{B}$  : la trajectoire est un arc de cercle, car si on augmente  $\|\vec{B}\|$  suffisamment elle devient circulaire.

**b) Conclusion**

- \* Un champ magnétique uniforme dévie un faisceau de particules chargées lorsque leur vitesse n'est pas //  $\vec{B}$ .
- \* La force qui en est responsable est la force de Lorentz  $\vec{F}_m$ , dont les caractéristiques sont :
  - Direction :  $\perp$  plan  $(\vec{v}, \vec{B})$
  - Intensité :  $\|\vec{F}_m\| = |q| \|\vec{v}_0\| \|\vec{B}\| \sin\theta$ 

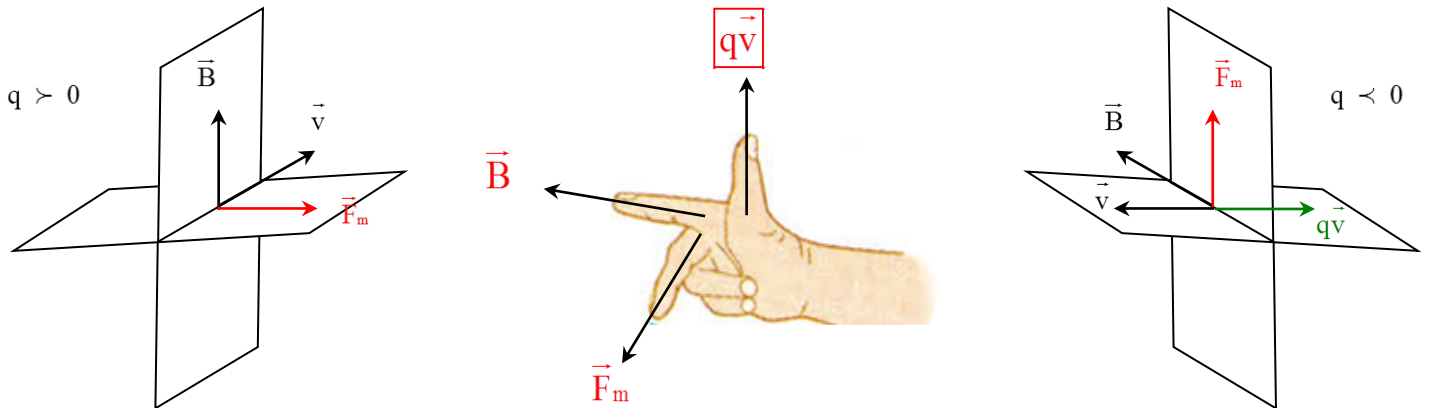
↑  
N

↑  
C

↑  
m.s<sup>-1</sup>

↑  
T
  - Sens : donné par la règle des 3 doigts de la main droite. (Fig-2)

**Figure-2**



**Rq**

Si une particule chargée est au repos dans un référentiel donné ( $\vec{v} = \vec{0}$ ), ou en mouvement mais avec une vitesse dont la direction est // à celle de  $\vec{B}$  ( $\theta = 0$ ); le champ magnétique n'a aucun effet sur elle dans ce référentiel ( $\|\vec{F}_m\| = 0$ ).

**Application-1**

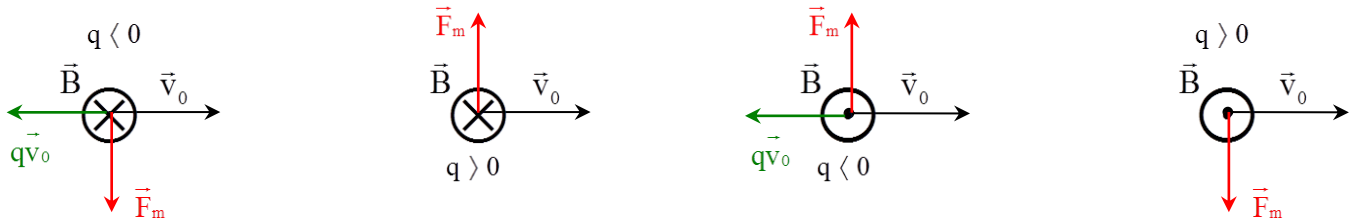
1. Représenter la force de Lorentz dans chacun des cas suivants :



2. Un faisceau de particules  $\alpha$  (noyaux  ${}^4_2\text{He}^{2+}$ ), rectiligne et homocinétique de vitesse  $\|\vec{v}_0\| = 2.10^5 \text{ m.s}^{-1}$ ; pénètre dans une région où règne un champ magnétique uniforme de valeur  $\|\vec{B}\| = 0,1 \text{ T}$ , et perpendiculaire à la direction du faisceau.

- a) Calculer la valeur de la force de Lorentz. On donne  $e = 1,6.10^{-19} \text{ C}$
- b) Vérifier que le poids de ces particules est négligeable devant la force magnétique qu'elles subissent. On donne  $m(\alpha) = 6,65.10^{-27} \text{ kg}$  et  $g = 9,8 \text{ N.kg}^{-1}$

1.



2.

- a)  $\|\vec{F}_m\| = |q| \|\vec{v}_0\| \|\vec{B}\| \sin \theta$   
 $= 2 \cdot e \|\vec{v}_0\| \|\vec{B}\| \sin 90^\circ = 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,1 \cdot 1 = 6,4 \cdot 10^{-15} \text{ N}$
- b)  $\frac{\|\vec{P}\|}{\|\vec{F}_m\|} = \frac{m(\alpha) g}{\|\vec{F}_m\|} = \frac{6,65 \cdot 10^{-27} \cdot 9,8}{6,4 \cdot 10^{-15}} \approx 10^{-11} \approx 0 \Rightarrow \|\vec{P}\| \text{ est nettement négligeable devant } \|\vec{F}_m\|.$

**Dossier à préparer pour TP3**

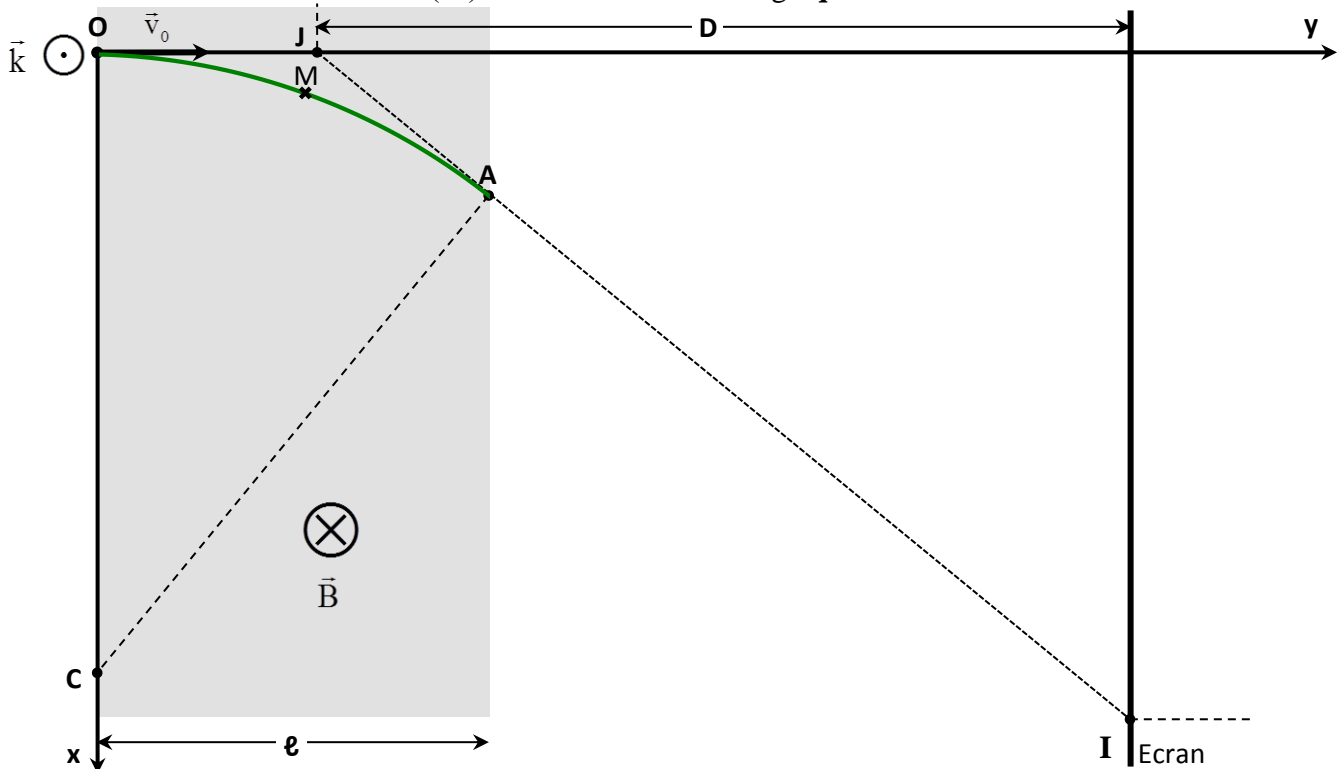
**La force de Lorentz dans la nature : le soleil, protection de la Terre des rayonnements solaires et cosmiques, aurores boréales et aurores australes**

A envoyer par e-mail ([farjallaha@gmail.com](mailto:farjallaha@gmail.com)) avant le **10/05/2020**, précédé d'un résumé  
 Tout dossier envoyé après le 10/05/2020 ne sera pas pris en considération, et l'élève aura un zéro

**II- Etude dynamique du mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme**

**Activité-1**

Un référentiel de laboratoire, supposé galiléen, dont le repère d'espace est  $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ , étant choisi pour étudier le mouvement d'un électron (M) de masse  $m$  et de charge  $q = -e$ .



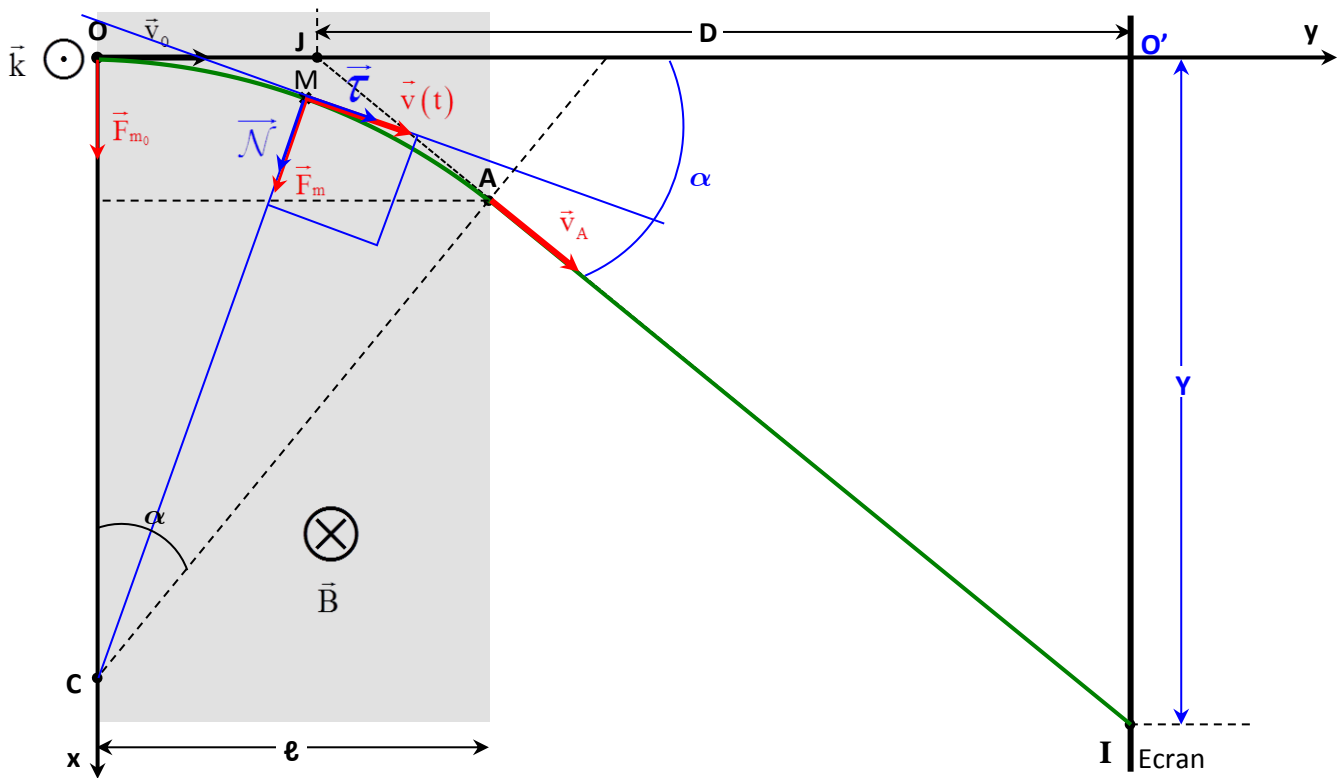
L'électron pénètre en O, à l'origine des dates, avec une vitesse initiale  $\vec{v}_0$  dans une région de l'espace d'étendue  $\ell$  où règne un champ magnétique uniforme de vecteur  $\vec{B}$  ; en négligeant le poids de l'électron devant la force magnétique  $\vec{F}_m$ , ainsi que la résistance de l'air, sa trajectoire est un arc de cercle (OA) : soit (C) le centre du cercle dont (OA) est un arc.

Ensuite l'électron quitte le champ magnétique au point (A), et poursuit son mouvement sous la seule action de son poids qu'on négligera toujours (ainsi que la résistance de l'air), jusqu'à rencontrer un écran plan fluorescent, disposé perpendiculairement à la direction de  $\vec{v}_0$ , à une distance  $D$  du point (J) d'intersection de la tangente à la trajectoire en A avec la direction de  $\vec{v}_0$  : il permet de visualiser le point d'impact **I** de l'électron.

- Représenter la force magnétique  $\vec{F}_{m_0}$  s'exerçant sur l'électron à l'origine des dates.
- Soit (M) une position de l'électron à un instant de date (t) quelconque :
  - Représenter le vecteur vitesse  $\vec{v}(t)$  de l'électron.
  - Représenter la force magnétique  $\vec{F}_m(t)$  s'exerçant sur l'électron; comment est-elle sa direction par rapport au plan  $(\vec{v}, \vec{B})$ .
- En appliquant la 2<sup>ème</sup> loi de Newton ; montrer que dans le champ magnétique, l'électron se meut dans le plan  $(\vec{F}_m, \vec{v})$ .
- La trajectoire étant orientée dans le sens du mouvement ; construire le repère de Frenet à l'instant (t) quelconque, et écrire l'expression de l'accélération dans ce repère.
- Montrer que le mouvement de l'électron dans le champ magnétique est circulaire uniforme ; établir l'expression de son rayon en fonction de  $m$ ,  $\|\vec{v}_0\|$ ,  $q$ , et  $\|\vec{B}\|$ .
- A.N** :  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  kg,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C,  $\|\vec{v}_0\| = 10^7$  m.s<sup>-1</sup>, et  $\|\vec{B}\| = 1,14 \cdot 10^{-4}$  T ;
  - \* Calculer, en cm, la valeur du rayon de la trajectoire.
  - \* Calculer la valeur de l'accélération.
- On s'intéresse à l'électron après sa sortie du champ magnétique ; soit  $\vec{v}_A$  son vecteur vitesse à l'instant où il quitte le champ magnétique : le représenter.
  - Quelle est la nature du mouvement de l'électron après sa sortie du champ magnétique ; construire sa trajectoire.
  - Représenter l'angle  $\alpha$  que fait la direction de  $\vec{v}_A$  avec celle de  $\vec{v}_0$ , appelée déviation de l'électron ; établir son expression en fonction de  $\ell$ ,  $q$ ,  $\|\vec{B}\|$ ,  $m$ , et  $\|\vec{v}_0\|$ . (On fera l'approximation  $OA \approx \ell$  : l'étendue du champ magnétique est très faible devant le rayon de la trajectoire)
  - On appelle déflexion magnétique **Y** de l'électron ; la distance, sur l'écran, qui sépare son point d'impact (I) en présence du champ magnétique, du point d'impact (O') qu'il aurait eu en l'absence de ce champ :
    - \* Représenter le point O', et la déflexion magnétique Y.
    - \* Etablir l'expression de Y en fonction de D,  $\ell$ ,  $q$ ,  $\|\vec{B}\|$ ,  $m$ , et  $\|\vec{v}_0\|$ .
 (On fera l'approximation  $\text{tg } \alpha \approx \alpha(\text{rad})$ , valable pour  $\alpha < 10^\circ$ )
  - A.N** :  $\ell = 8$  cm et  $Y = 20$  cm
    - \* Vérifier que les approximations faites précédemment étaient raisonnables.
    - \* Donner la valeur de la déviation  $\alpha$  en degré, et calculer la valeur de la distance D.



1.



2.

- a)  
 b)  $\vec{F}_m(t) \perp \text{plan}(\vec{v}, \vec{B})$
3. 2<sup>ème</sup> loi de Newton :  $\vec{F}_m = m \vec{a}$  ; à chaque instant, on a  $\vec{F}_m \perp \vec{B} \Rightarrow \vec{F}_m \perp \vec{k} \Rightarrow F_{m_z} = 0 \Rightarrow a_z = 0$   
 \*  $v_z = \int a_z dt = \int 0 dt = C^{te}$  ; on a  $v_z(t=0) = 0 \Rightarrow C^{te} = 0$ , alors  $v_z = 0$   
 \*  $z = \int v_z dt = \int 0 dt = C^{te}$  ; on a  $z(t=0) = 0 \Rightarrow C^{te} = 0$ , alors  $z = 0$   
 $\Rightarrow$  A chaque instant  $z = 0$  : l'électron se meut dans le plan  $(O, x, y)$  : plan  $(\vec{F}_m, \vec{v})$

4.  $\vec{a} = a_t \vec{\tau} + a_n \vec{N} = \frac{1}{m} \vec{F}_m = \frac{1}{m} F_m \vec{N}$ , avec  $F_m = \|\vec{F}_m\| = |q| \|\vec{v}\| \|\vec{B}\| \sin \frac{\pi}{2}$

$$\Rightarrow \begin{cases} a_t = 0 \\ a_n = \frac{F_m}{m} \end{cases} \Rightarrow \vec{a} = \frac{F_m}{m} \vec{N} \Rightarrow \vec{a} = \frac{|q| \|\vec{v}\| \|\vec{B}\|}{m} \vec{N}$$

or  $a_t = 0 \Rightarrow \frac{dv}{dt} = 0 \Rightarrow v$  est constante :  $v = v_0 \Rightarrow \|\vec{v}\| = \|\vec{v}_0\|$ ; d'où  $\vec{a} = \frac{|q| \|\vec{v}_0\| \|\vec{B}\|}{m} \vec{N}$

5.

- \*  $\|\vec{v}\|$  est constante.
- \*  $R$  le rayon de courbure ( $r$ ) de la trajectoire est constant (cercle) :

$$a_n = \frac{|q| \|\vec{v}_0\| \|\vec{B}\|}{m} = \frac{v^2}{r} = \frac{\|\vec{v}_0\|^2}{r} \Rightarrow \frac{\|\vec{v}_0\|}{r} = \frac{|q| \|\vec{B}\|}{m} \Rightarrow \frac{1}{r} = \frac{|q| \|\vec{B}\|}{m \|\vec{v}_0\|} \Rightarrow r = \frac{m \|\vec{v}_0\|}{|q| \|\vec{B}\|} : C^{te}$$

D'où l'électron est en MCU dans le champ magnétique, de vitesse  $\|\vec{v}_0\|$  et de rayon  $R = \frac{m \|\vec{v}_0\|}{|q| \|\vec{B}\|}$

6.

$$* R = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^7}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,14 \cdot 10^{-4}} \approx 0,5 \text{ m} = 50 \text{ cm}$$

$$* \|\vec{a}\| = \frac{|q| \|\vec{v}_0\| \|\vec{B}\|}{m} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^7 \cdot 1,14 \cdot 10^{-4}}{9,1 \cdot 10^{-31}} \approx 2 \cdot 10^{14} \text{ m.s}^{-2} !$$

7.

a) En négligeant le poids et la résistance de l'air, l'électron est « isolé » à la sortie du champ magnétique : d'après la 1<sup>ère</sup> loi de Newton il sera en MRU de vitesse  $\vec{v}_A$ .

$$b) OA = R \alpha (\text{rad}) \approx \ell \Rightarrow \alpha \approx \frac{\ell}{R} \Rightarrow \alpha \approx \frac{\ell |q| \|\vec{B}\|}{m \|\vec{v}_0\|}$$

$$c) \text{tg } \alpha = \frac{Y}{D} \approx \alpha (\text{rad}) \Rightarrow Y \approx D \alpha \Rightarrow Y \approx \frac{D \ell |q| \|\vec{B}\|}{m \|\vec{v}_0\|}$$

d)  $R = 50 \text{ cm}$

$$* \sin \alpha = \frac{\ell}{R} = \frac{8}{50} = 0,16 \Rightarrow \alpha = 0,1607 \text{ rad}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} OA = R \alpha = 50 \text{ cm} \cdot 0,1607 \text{ rad} = 8,035 \text{ cm} \approx \ell \\ \text{tg } \alpha = 0,162 \approx \alpha (\text{rad}) \end{cases} : \text{ les approximations étaient raisonnables.}$$

$$* \begin{cases} \alpha = 9,2^\circ \\ D = \frac{Y}{\alpha} = \frac{Y R}{\ell} = \frac{20 \cdot 50}{8} = 125 \text{ cm} = 1,25 \text{ m} \end{cases}$$

### III- Application : le spectrographe de masse

#### Activité-2

Les éléments chimiques, dans leur état naturel, se présentent le plus souvent sous forme d'un mélange d'isotopes ;

on rappelle que les isotopes d'un élément chimique, sont les atomes dont les noyaux ont le même nombre de charge  $Z$  et un nombre de masse  $A$  différent (à cause d'une différence du nombre de neutrons) :

par exemple un échantillon naturel quelconque de magnésium est composé d'un mélange d'atomes

${}^{24}_{12}\text{Mg}$ ,  ${}^{25}_{12}\text{Mg}$ , et  ${}^{26}_{12}\text{Mg}$  dans les proportions 78,9 %, 10 %, et 11,1 % respectivement.

Pour identifier les isotopes d'un élément chimique et déterminer l'abondance de chaque isotope, on utilise un spectrographe de masse : appareil inventé par Joseph John Thomson en 1913, et basé sur le fait que les ions issus des différents isotopes d'un élément chimique et injectés dans un champ magnétique  $\vec{B}$  avec une vitesse  $\vec{v}$ , seront déviés avec des rayons différents selon leurs masses :

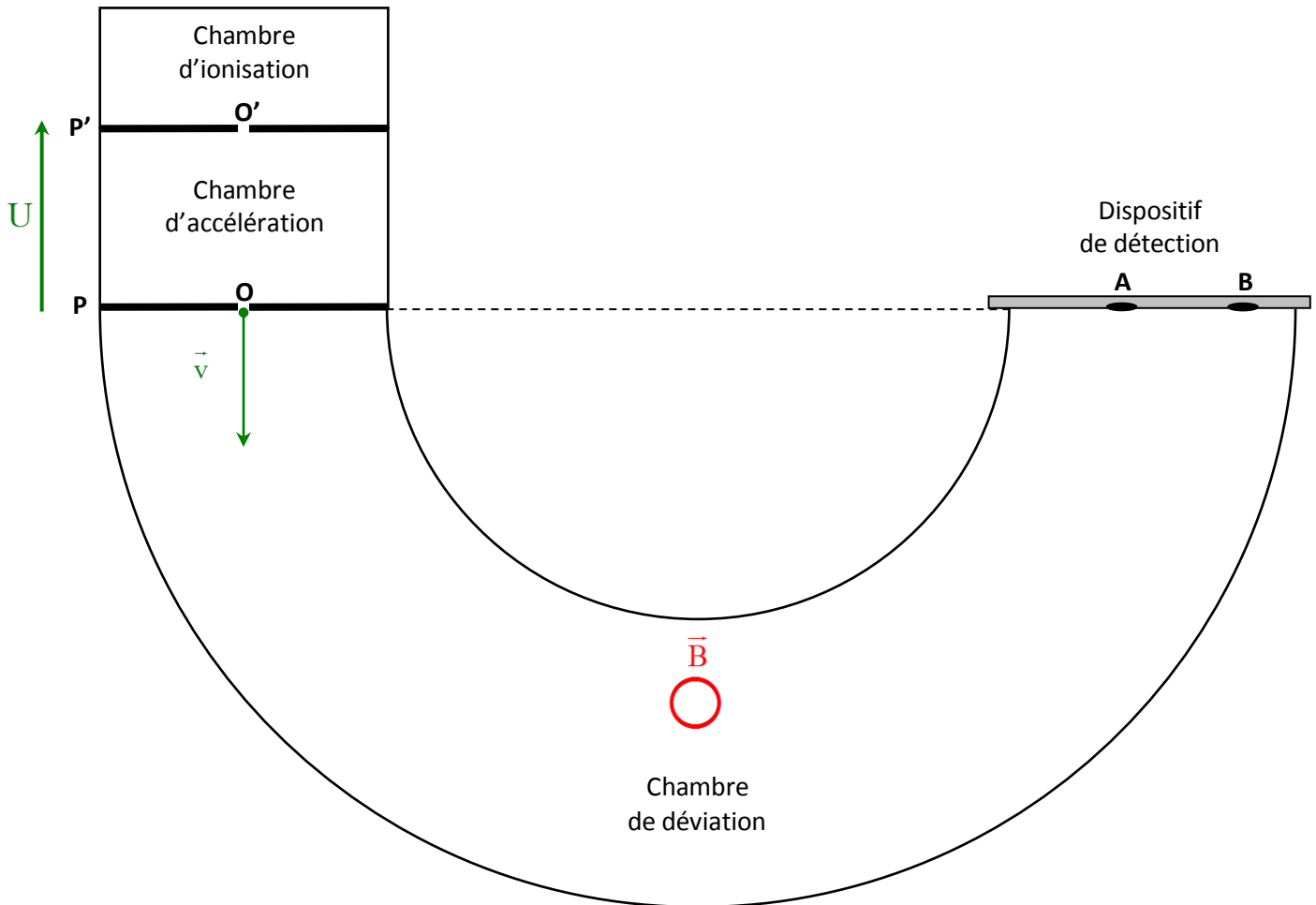
$$R = \frac{m \|\vec{v}\|}{|q| \|\vec{B}\|} = \left( \frac{\|\vec{v}\|}{|q| \|\vec{B}\|} \right) \cdot m$$

Dans ce qui suit, on se propose d'identifier les isotopes de l'élément lithium (Li) ;

la figure ci-dessous représente le schéma de principe du spectrographe de masse, et la procédure expérimentale inhérente :



- \* La **chambre d'ionisation** permet de produire, à l'état gazeux, à partir d'atomes Li, des ions  $\text{Li}^+$  de même charge mais de masses différentes selon leur nombre de masse A.
- \* La **chambre d'accélération** permet d'accélérer les ions entre les orifices  $O'$  et  $O$ , grâce au champ électrique uniforme qui règne entre les plaques  $P'$  et  $P$ .
- \* La **chambre de déviation** (semi-circulaire) permet de dévier les ions, qui la pénètrent par l'orifice  $O$ , grâce à un champ magnétique uniforme  $\vec{B}$  : chaque ion est animé d'un MCU dont le rayon dépend de sa masse.
- \* Le **dispositif de détection**, permet de recueillir séparément les ions : il va d'une simple plaque photographique pour visualiser les points d'impact des ions si on se contente d'identifier les isotopes, à un compteur d'ions si on cherche à déterminer l'abondance de chaque isotope.



Le vecteur champ magnétique  $\vec{B}$  est perpendiculaire au plan de la figure.

On négligera toute force autre que les forces électriques et magnétiques, et on se référera à un référentiel de laboratoire supposé galiléen.

1. Exprimer la charge ( $q$ ) d'un ion lithium en fonction de la charge élémentaire ( $e$ ); est-ce qu'elle diffère selon l'isotope dont il provient ?
2. En admettant qu'un ion de masse  $m$  pénètre dans la chambre d'accélération, par l'orifice  $O'$ , avec une vitesse négligeable;
  - a) Etablir l'expression de la valeur de la vitesse  $\vec{v}$  avec laquelle il arrive en  $O$ , en fonction de  $e$ ,  $U$  et  $m$ .  
On notera :  $U_{P',P} = U > 0$ .
  - b) Est-ce que tous les ions pénètrent dans la chambre de déviation avec la même vitesse ;  
Quels sont les ions les plus rapides ?
3. Les ions pénètrent ensuite dans la chambre de déviation :
  - a) Indiquer le sens que devrait avoir  $\vec{B}$ , pour qu'ils soient déviés vers le dispositif de détection.
  - b) Exprimer le rayon de la trajectoire d'un ion en fonction de  $\|\vec{B}\|$ ,  $U$ ,  $e$ , et sa masse  $m$  ; commenter.

4. Le dispositif de détection utilisé étant une simple plaque photographique, sur laquelle se forment deux taches A et B telles que :  $\mathbf{OA} = 18,6 \text{ cm}$  et  $\mathbf{OB} = 20 \text{ cm}$ .
- De combien d'isotopes est formé l'échantillon de lithium analysé ? Représenter leurs trajectoires, en indiquant leurs centres  $O_1$  et  $O_2$ , et leurs rayons  $R_1$  et  $R_2$ .
  - Calculer les masses de ces isotopes ; en déduire leurs nombres de masse.  
(on considère que la masse d'un ion est pratiquement égale à celle de l'atome dont il provient, et que la masse d'un nucléon est pratiquement la même qu'il soit un proton ou un neutron)
  - Donner leurs symboles, sachant que  $Z = 3$  pour le lithium, et indiquer sur la figure l'isotope qui arrive en A et l'isotope qui arrive en B.
  - Est-il possible de déterminer l'abondance de chaque isotope avec le dispositif de détection utilisé ; sinon par quoi il faut remplacer la plaque photographique ?

On donne  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ,  $\|\vec{B}\| = 0,12 \text{ T}$ ,  $U = 1000 \text{ V}$ , et  $m_n = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  : masse d'un nucléon

1.  $q = e$  : la même quel que soit l'isotopes donnant l'ion.

2.

- Le champ électrique uniforme qui règne entre les plaques exerce sur l'ion une force électrique  $\vec{F}_e$  ; d'après le th de l'Ec :

$$\Delta E_c = W(\vec{F}_e) \Rightarrow E_c(O) - E_c(O') = q \cdot (V_{O'} - V_O) \Rightarrow \frac{1}{2} m v^2 = e \cdot (V_{P'} - V_P) = e \cdot U_{P',P} = e U$$

$$\Rightarrow v^2 = \frac{2}{m} e U \Rightarrow \|\vec{v}\| = \sqrt{\frac{2 e U}{m}}$$

- $\|\vec{v}\|$  dépend de la masse de l'ion ; les plus rapides sont ceux provenant de l'isotope le plus léger.

3.

a)

$$b) R = \frac{m \|\vec{v}\|}{|q| \|\vec{B}\|} = \frac{m \sqrt{\frac{2 e U}{m}}}{e \|\vec{B}\|} = \frac{1}{e \|\vec{B}\|} \sqrt{m^2 \cdot \frac{2 e U}{m}} = \frac{1}{\sqrt{e^2} \|\vec{B}\|} \sqrt{2 e U m} = \frac{1}{\|\vec{B}\|} \sqrt{\frac{2 e U m}{e^2}}$$

$$\Rightarrow R = \frac{1}{\|\vec{B}\|} \sqrt{\frac{2 U m}{e}} : R \text{ dépend de la masse de l'ion ; plus l'isotope dont il provient est lourd, plus son rayon est grand : ainsi les isotopes sont séparés.}$$

4.

a) 2 isotopes.

$$b) R^2 = \frac{1}{\|\vec{B}\|^2} \frac{2 U m}{e} \Rightarrow m = \frac{e \|\vec{B}\|^2 R^2}{2 U} = \frac{e \|\vec{B}\|^2}{2 U} \cdot R^2$$

$$* A : R_1 = \frac{OA}{2}; m_1 = \frac{e \|\vec{B}\|^2}{2 U} \cdot R_1^2 = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,12^2}{2 \cdot 1000} \cdot \left(\frac{18,6}{2} \cdot 10^{-2} \text{ cm}\right)^2 = 9,96 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

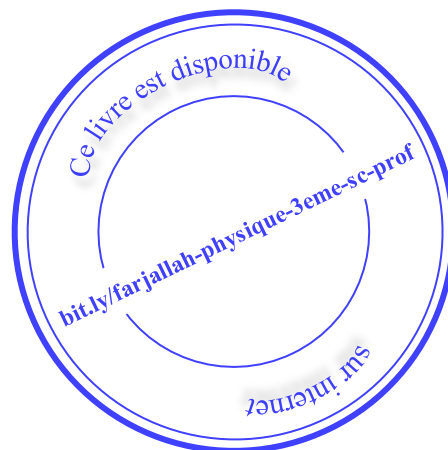
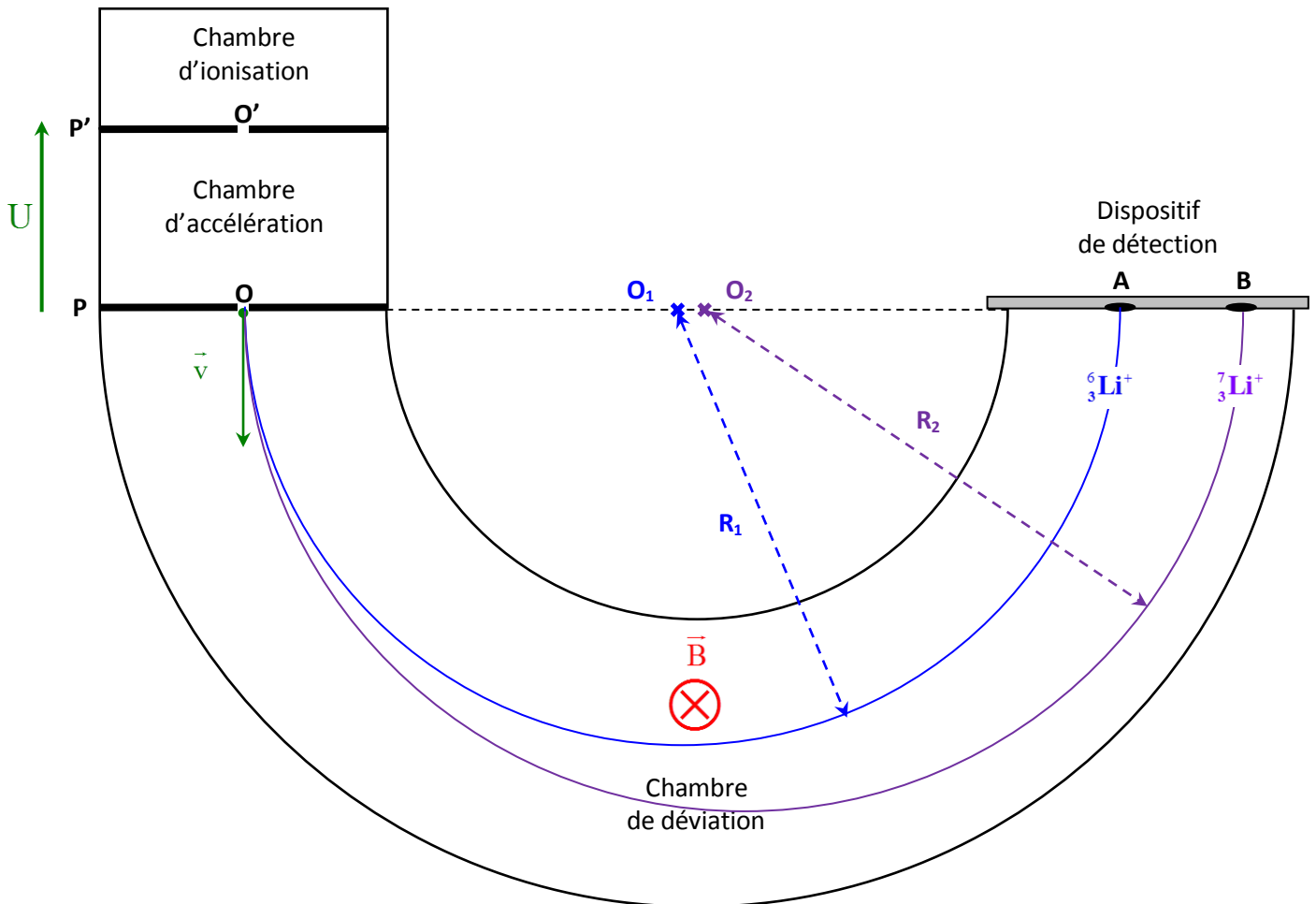
$$\Rightarrow A_1 = \frac{m_1}{m_n} = \frac{9,96 \cdot 10^{-27}}{1,67 \cdot 10^{-27}} = 5,96 \Rightarrow \boxed{A_1 = 6}$$

$$* B : R_2 = \frac{OB}{2}; m_2 = \frac{e \|\vec{B}\|^2}{2 U} \cdot R_2^2 = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,12^2}{2 \cdot 1000} \cdot \left(\frac{20}{2} \cdot 10^{-2} \text{ cm}\right)^2 = 11,52 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\Rightarrow A_2 = \frac{m_2}{m_n} = \frac{11,52 \cdot 10^{-27}}{1,67 \cdot 10^{-27}} = 6,89 \Rightarrow \boxed{A_2 = 7}$$

c)  ${}^6_3\text{Li}$  et  ${}^7_3\text{Li}$

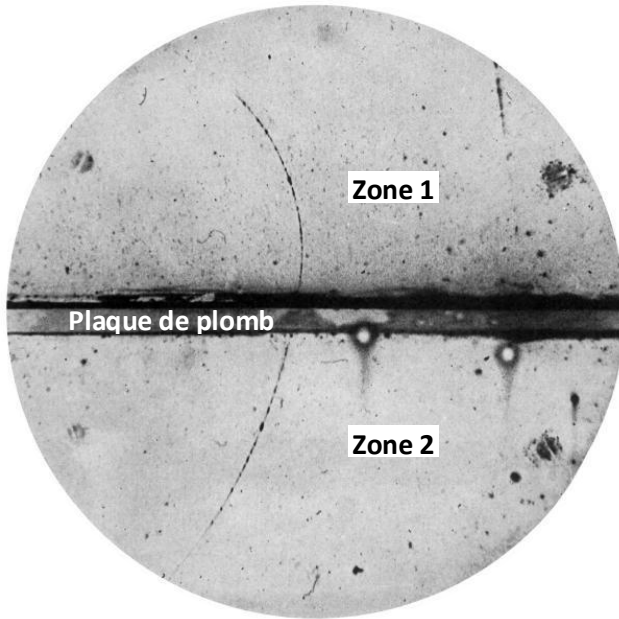
d) La plaque photographique ne permet pas de déterminer l'abondance de chaque isotope ; il faut la remplacer par un compteur d'ions.



**Application-2 Découverte de l'antimatière !**

Au début des années 1930, Carl Anderson et son mentor Robert Millikan utilisaient une chambre à brouillard (ou chambre de Wilson) pour mesurer les rayons cosmiques de haute énergie. [...]

Une chambre à brouillard contient de la vapeur saturée, généralement de l'eau ou de l'alcool, qui se condense lors du passage de particules chargées. Cela laisse des traînées qui matérialisent la trajectoire de la particule. Les physiciens peuvent déduire la charge d'une particule en observant la manière dont elle se courbe lorsque la chambre est soumise à un **champ magnétique**.



En Août 1932, Anderson photographie la traînée d'une particule de haute énergie ayant [...] une charge positive. En mesurant à la fois l'énergie perdue par la particule en traversant une plaque de plomb dans la chambre et la traînée située de l'autre côté de la plaque, il détermine une limite supérieure pour la masse de la particule.

Il découvre qu'elle est du même ordre de grandeur que la masse de l'électron.

Anderson venait d'observer un nouveau type de particule qu'il nomme « positron » et est bientôt identifiée comme étant la première antiparticule, l'antiélectron. [...]

Le positron était en accord avec la prédiction de l'antiélectron par Paul Dirac en 1931. [...]

*Lorsqu'un électron et un positron interagissent ils s'annihilent ! Les 2 particules ont une masse identique mais des charges opposées.*

Les positrons ont une grande variété d'applications pour la recherche en physique des particules [...].

Ils sont à la base des PET scan (Positron Emission Tomography) qui sont utilisés pour l'imagerie médicale.

[bit.ly/decouverte-du-positron](http://bit.ly/decouverte-du-positron) (adapté)

On donne  $\begin{cases} m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} : \text{masse de l'électron} \\ e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} : \text{Charge électrique élémentaire} \end{cases}$

- Soit  $\vec{B}$  le vecteur champ magnétique uniforme auquel est soumise la chambre de Wilson.  
Soit  $\|\vec{v}_1\|$  la valeur de la vitesse du positron dans la zone 1, et  $\|\vec{v}_2\|$  sa valeur dans la zone 2, par rapport à un référentiel de laboratoire supposé galiléen.
  - En négligeant le poids et la résistance de la vapeur remplissant la chambre de Wilson ; quelle est la nature du mouvement du positron.
  - Donner l'expression du rayon de courbure de la trajectoire du positron ;  $R_1$  dans la zone 1, et  $R_2$  dans la zone 2.
  - En déduire le sens du mouvement du positron ; l'indiquer sur le cliché.
  - En déduire le sens du vecteur champ magnétique  $\vec{B}$  ; le représenter sur le cliché, sachant qu'il est perpendiculaire au plan de la figure.
- Sachant que  $R_2 = 3 R_1$ , et que la vitesse de sortie du positron est  $6,67 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  ; calculer (en eV) la valeur de l'énergie cinétique perdue par le positron à la traversée de la plaque de plomb.
- Avant l'expérience d'Anderson, l'existence de l'antiélectron était déjà prévue par Dirac théoriquement (en utilisant une feuille et un stylo, et...son cerveau bien évidemment) : que se passe-t-il à la rencontre d'un électron et un positron ? A la rencontre de la matière et l'antimatière ?

1.

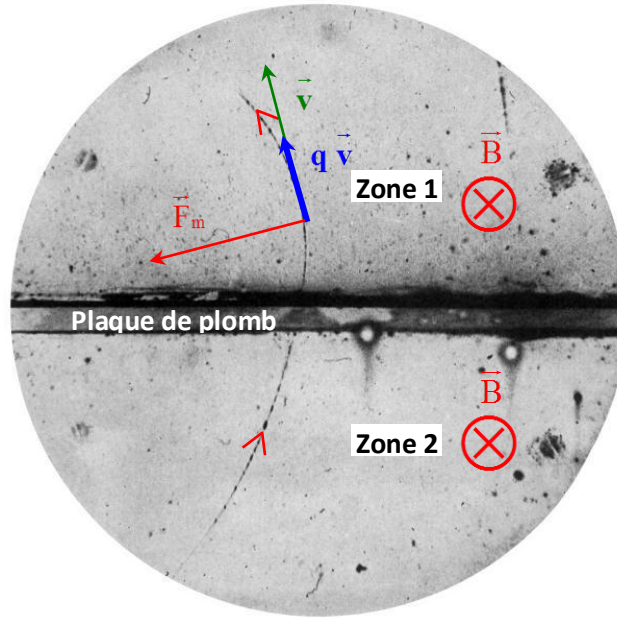
a) MCU

b)  $R_1 = \frac{m_e \|\vec{v}_1\|}{e \|\vec{B}\|}$  &  $R_2 = \frac{m_e \|\vec{v}_2\|}{e \|\vec{B}\|}$

c)  $R_1 < R_2 \Rightarrow \|\vec{v}_1\| < \|\vec{v}_2\| \Rightarrow E_{c1} < E_{c2}$  :

le positron perd de l'énergie en passant de la zone 2 → zone 1 : c'est le sens de son mouvement.

d)  $q \vec{v} = e \vec{v}$ , et  $e > 0$  ; d'où le sens de  $\vec{B}$



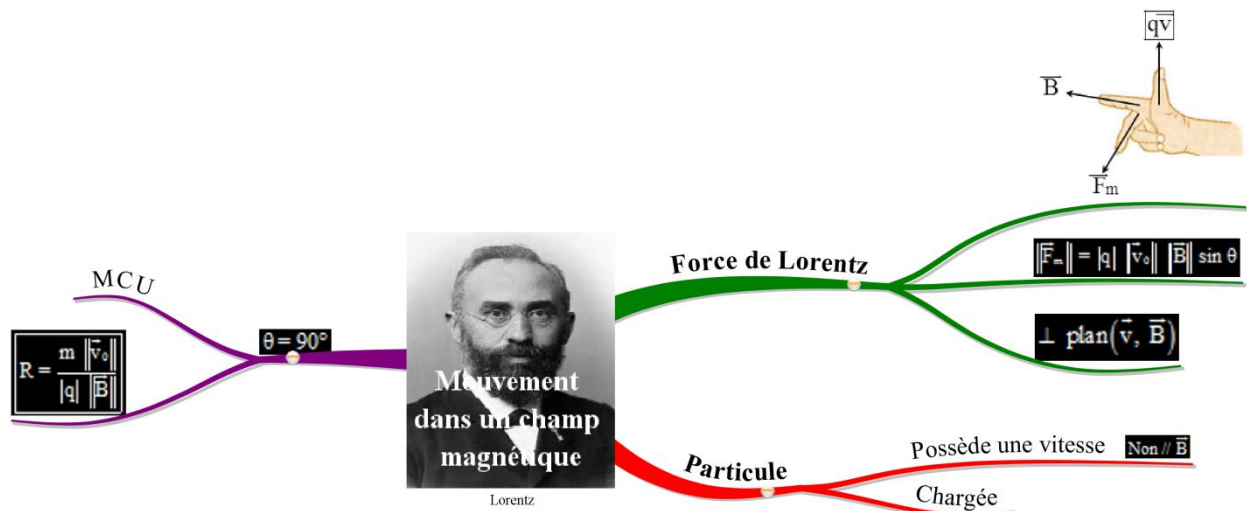
2.  $\|\vec{v}_1\| = 6,67.10^6 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $\Delta E_c = \frac{1}{2} m_e v_1^2 - \frac{1}{2} m_e v_2^2 = \frac{1}{2} m_e (v_1^2 - v_2^2)$

Or  $R_2 = 3 R_1$ , alors  $\frac{m_e \|\vec{v}_2\|}{e \|\vec{B}\|} = 3 \frac{m_e \|\vec{v}_1\|}{e \|\vec{B}\|} \Rightarrow \|\vec{v}_2\| = 3 \|\vec{v}_1\|$

D'où  $\Delta E_c = \frac{1}{2} m_e (v_1^2 - 9 v_1^2) = -8 \frac{1}{2} m_e v_1^2 = -4 m_e v_1^2 = -4 \cdot 9,1.10^{-31} \cdot (6,67.10^6)^2 = -1,62.10^{-16} \text{ J}$

Par suite l'énergie perdue en eV est  $\frac{1,62.10^{-16}}{1,6.10^{-19}} \approx \boxed{1012 \text{ eV}}$

3. A la rencontre d'un électron et un positron, ou à la rencontre de la matière et l'antimatière en général se produit une annihilation réciproque.

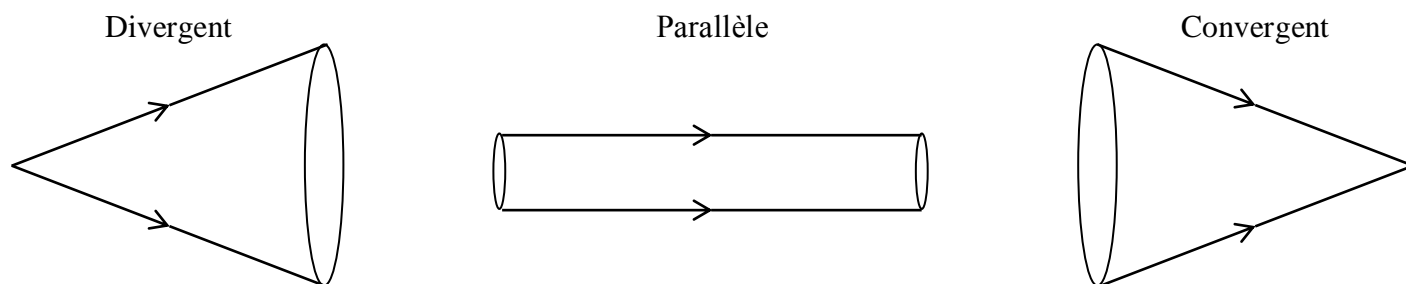




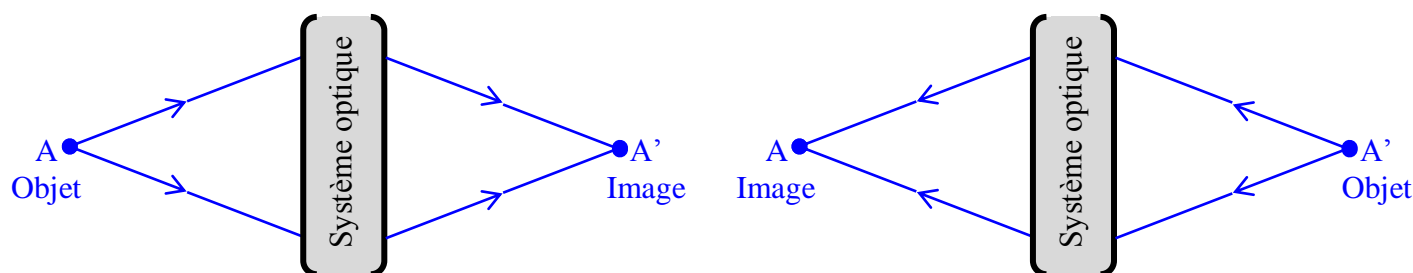
## Thème n°3 : Optique géométrique

### Rappels & généralités

- ❖ On appelle **source de lumière**, tout objet qui émet de la lumière (il est ainsi visible à l'œil); on distingue :
  - **Source primaire** : produit elle-même la lumière qu'elle émet (Soleil, lampe,... etc)
  - **Source secondaire** : ne produit pas la lumière qu'elle émet, elle ne fait que diffuser une partie de la lumière qu'elle reçoit d'une autre source (la lune diffusant la lumière du soleil, les objets dans la salle qui sont visibles grâce à la lumière du soleil ou des tubes néon qu'ils diffusent,... etc)
- ❖ Du point de vue de l'optique, un corps peut être :
  - **Transparent** : s'il se laisse traverser par la lumière, sans la diffuser (vitre, eau, air,... etc)
  - **Translucide** : s'il ne se laisse traverser que partiellement par la lumière, en diffusant le reste (papier calque, papier huilé,... etc)
  - **Opaque** : s'il ne se laisse pas traverser par la lumière, en absorbant une partie et diffusant le reste par sa surface (un mur, le bois,... etc)
- ❖ Dans un milieu transparent *homogène*, la lumière se propage selon des lignes droites appelées **rayons lumineux**; c'est le **principe de propagation rectiligne de la lumière**.  
Sa vitesse de propagation est égale à  $3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$  dans le vide (et approximativement dans l'air)
- ❖ Un ensemble de rayons lumineux issus d'une même source constitue un **faisceau lumineux**, qui peut être :



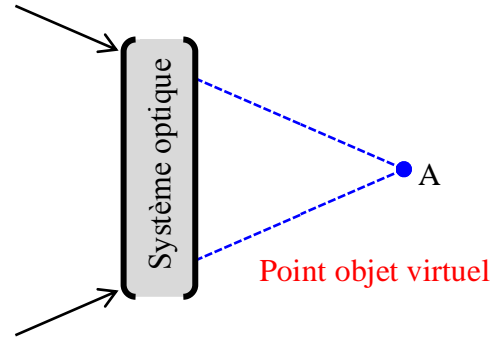
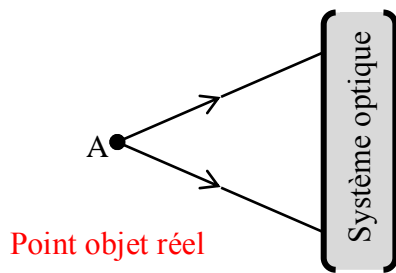
- ❖ **Principe du retour inverse de la lumière** : Dans tout système optique le chemin suivi par la lumière est indépendant du sens de propagation. (le chemin emprunté par la lumière dans un sens à travers un ensemble de milieux transparents, serait le même dans le sens inverse)
- ❖ On appelle **système optique** ; un ensemble de milieux transparents séparés par des surfaces polies : loupe, prisme, jumelles, microscope... etc.  
Il peut donner d'un point lumineux A (point objet), un point lumineux A' (point image). Réciproquement, en vertu du principe du retour inverse de la lumière ; si A' est le point objet, A serait le point image :



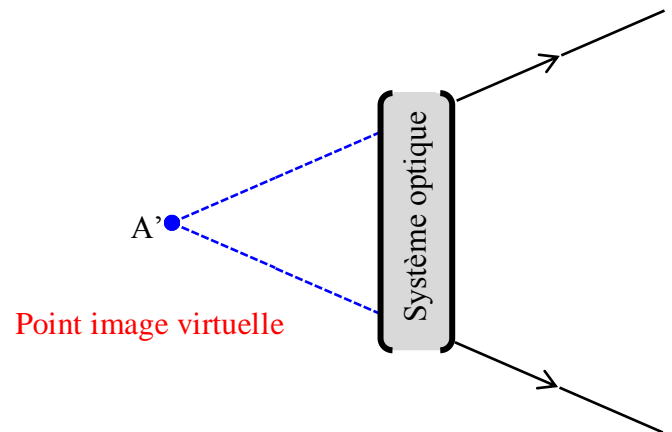
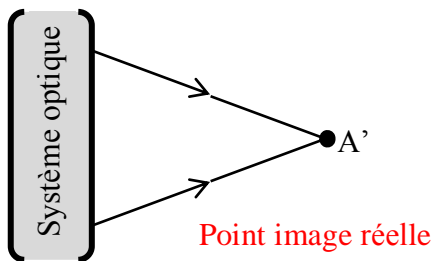
On dit que A et A' sont deux points **conjugués** par rapport au système



- ❖ Un point objet peut être ;
  - Réel : s'il est le point de départ des rayons arrivant sur le système.
  - Virtuel : s'il est le point de concours des prolongements des rayons arrivant sur le système.



- ❖ Un point image peut être ;
  - Réel : s'il est le point de concours des rayons émergents du système. (une image réelle peut être recueillie sur un écran)
  - Virtuel : s'il est le point de concours des prolongements des rayons sortant du système. (une image virtuelle ne peut être recueillie sur un écran, mais elle est visible à l'œil)



Dans ce qui suit on s'intéressera aux systèmes optiques que sont les **lentilles minces**, puis à certaines de leurs applications.

## Chapitre-1 : Les lentilles minces

### 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.
- Appliquer la relation de conjugaison des lentilles minces convergentes.
- Réaliser des montages permettant de mesurer la distance focale d'une lentille.

### Prérequis

- Notion de source de lumière.
- Corps transparents, et principe de propagation rectiligne de la lumière.
- Types de faisceaux lumineux.
- Principe du retour inverse de la lumière.

### Matériel

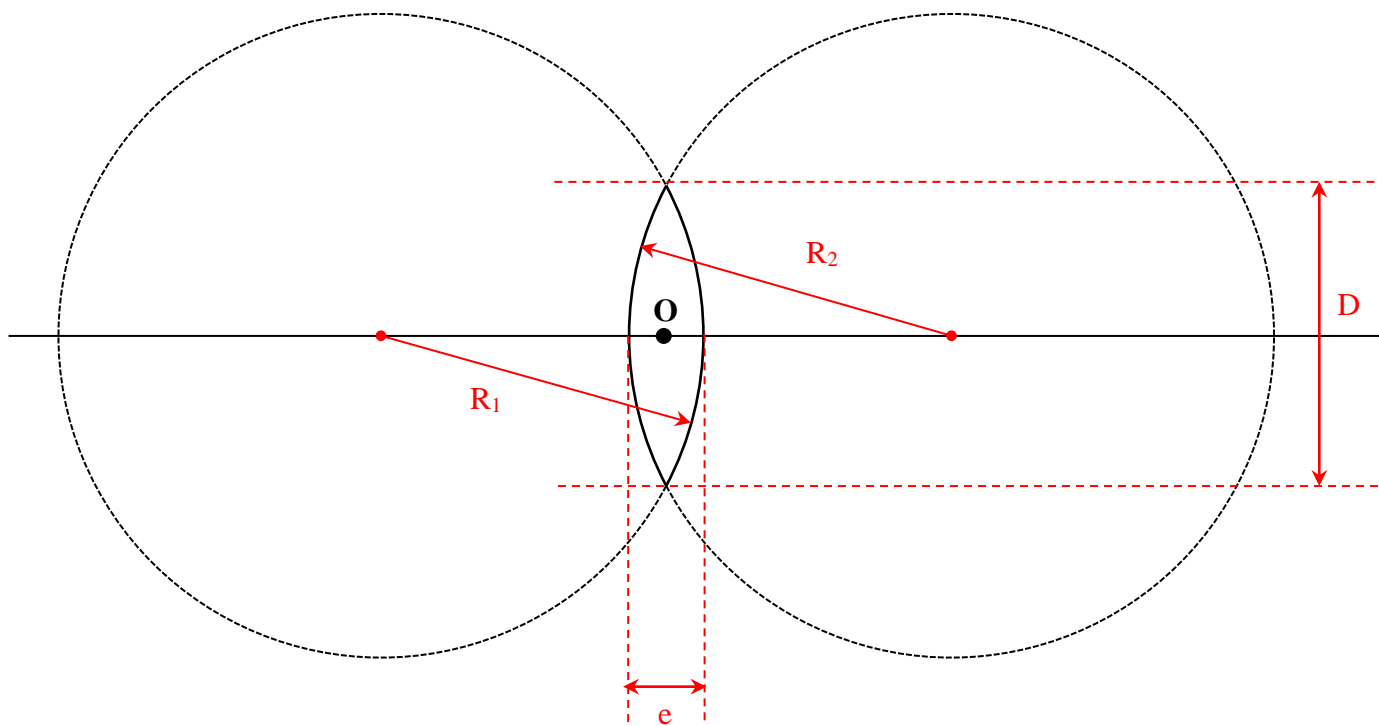
- |   |   |
|---|---|
| * Loupe   | * Banc d'optique + Lanterne   |
| * Prisme  | * Objet lumineux en F adaptable à la lanterne                                       |
| * 10 Lentilles sphériques biconvexes / biconcaves       | * Diaphragme à iris sur monture   |
| * 10 Lentilles cylindriques biconvexes / biconcaves     | * Monture pour écran  |
| * Lentille cylindrique plan convexe                     | * 2 Lentilles convergentes sphériques sur montures (de même distance focale $f_1$ ) |
| * Lentille cylindrique plan concave                     | * 2 Lentilles convergentes sphériques sur montures (de même distance focale $f_2$ ) |
| * Banc d'optique (pour réflexion/réfraction) + Lanterne | * Lentille divergente sphérique sur monture   |
| * Fente triple adaptable à la lanterne                  |   |
| * Fente simple adaptable à la lanterne                  |   |
| * Ecran   |   |

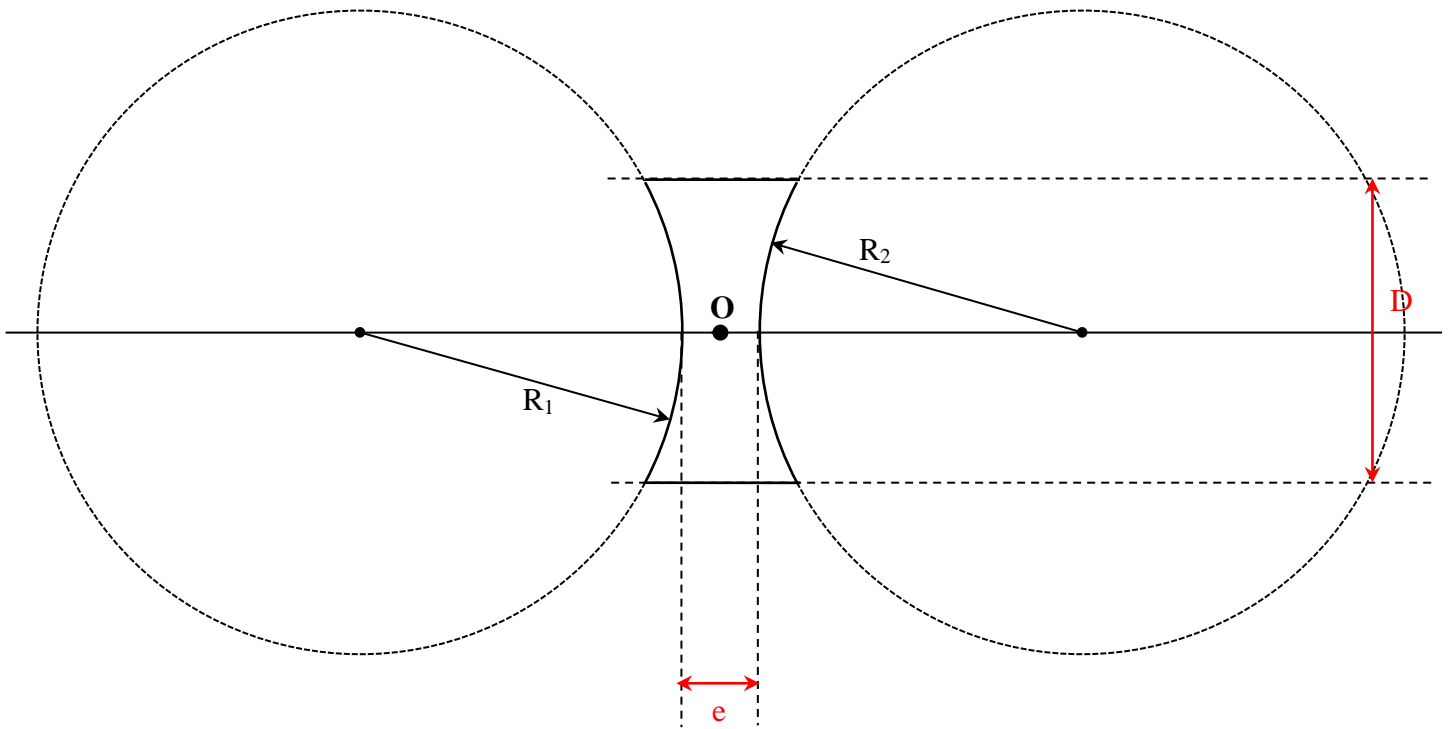
## I- Description et classification

### 1) Description

Une lentille est un milieu transparent limité par deux surfaces sphériques ou cylindriques, dont l'une peut être de rayon infini (plane). On se limitera aux lentilles minces (Fig-1)

Figure-1





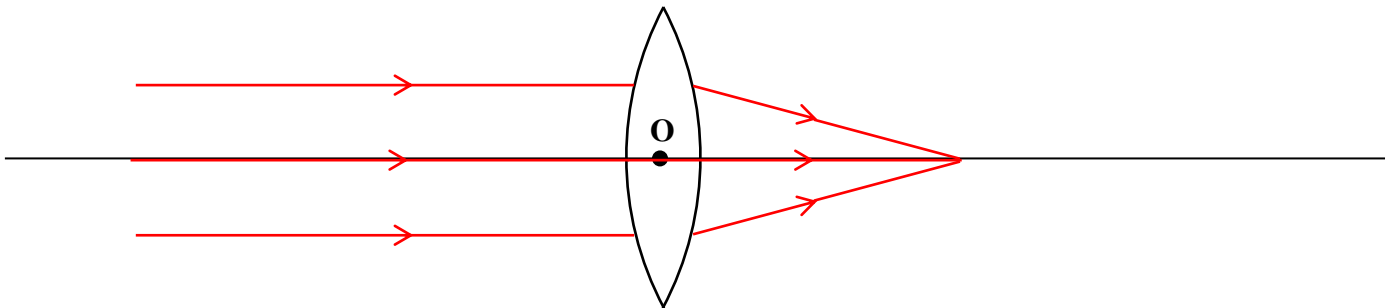
Une lentille est considérée mince si son épaisseur au centre ( $e$ ) est négligeable devant  $R_1$  et  $R_2$  (rayons de courbure de ses faces)  $\Rightarrow e$  nettement  $< D$  (diamètre de la lentille)

## 2) Classification

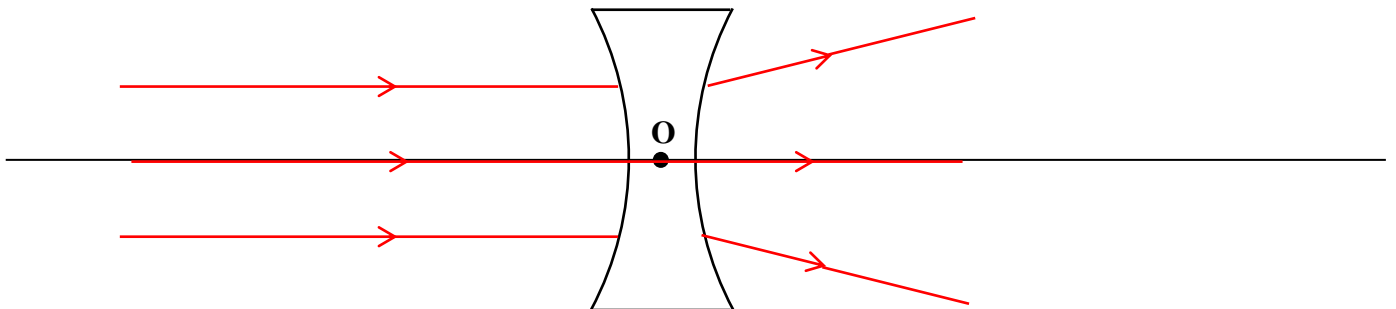
### a) Expérience (Fig-2)

Figure-2

Une lentille mince à bords minces converge un faisceau parallèle



Une lentille mince à bords épais diverge un faisceau parallèle



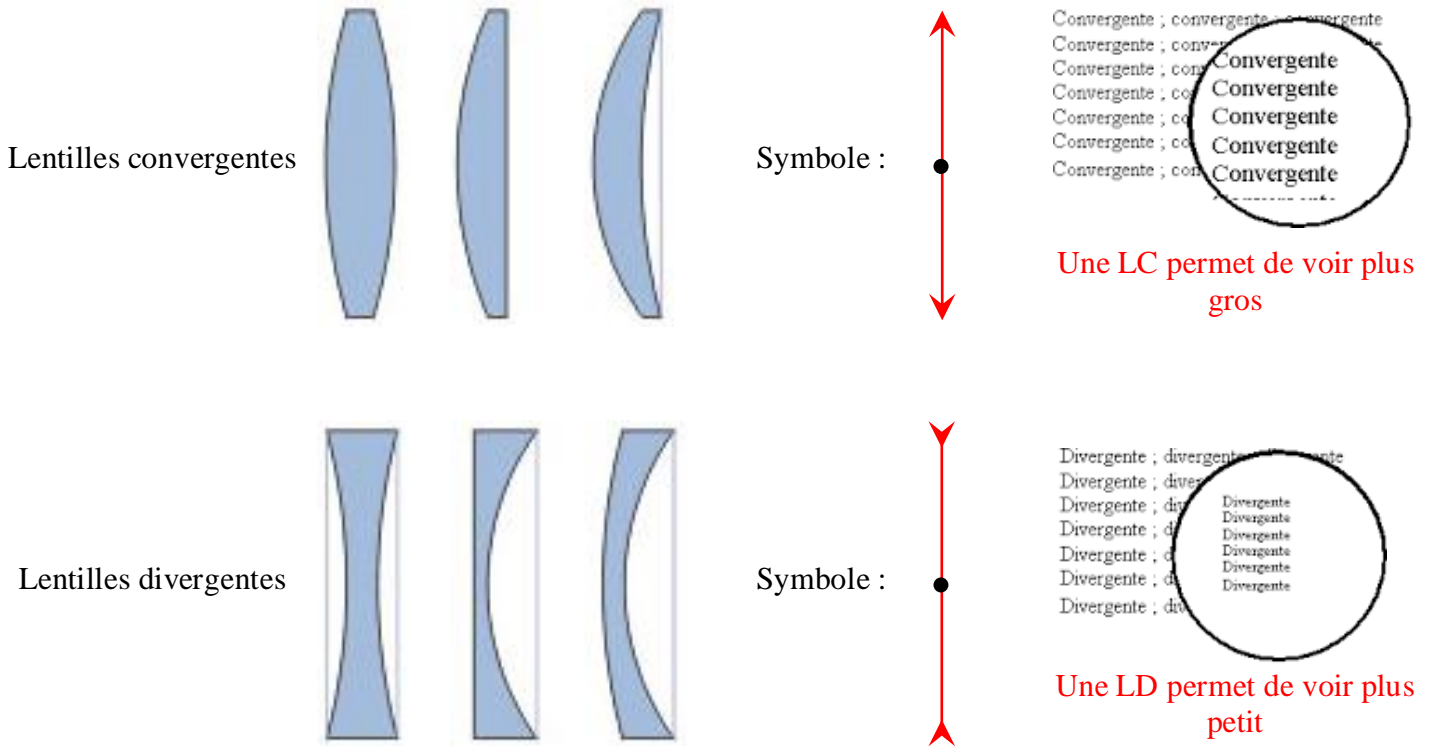
Rq : tout rayon passant par le centre  $O$  de la lentille, n'est pas dévié.

**b) Généralisation (Fig-3)**

Deux types de lentilles minces :

- \* Lentilles Convergentes (LC) : leurs bords sont minces.
- \* Lentilles Divergentes (LD) : leurs bords sont épais.

**Figure-3**



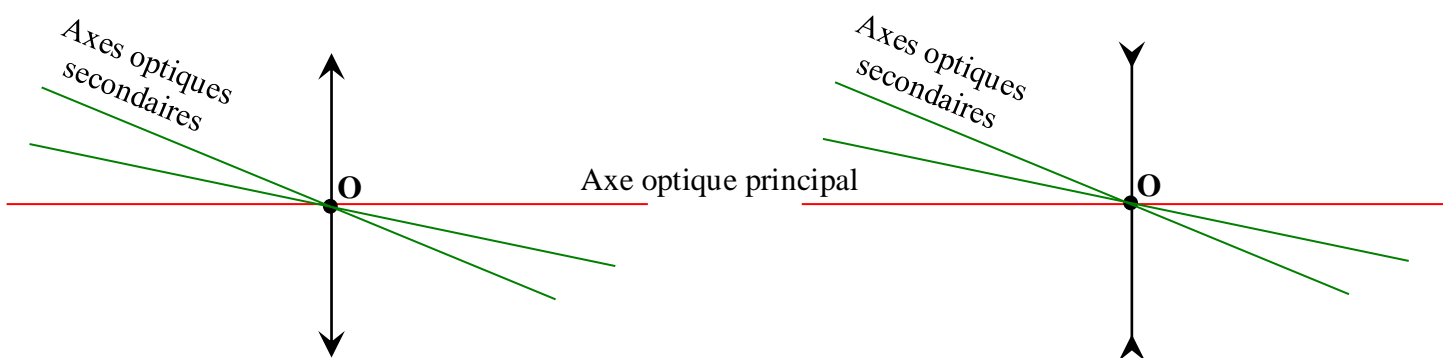
**II- Caractéristiques**

**1) Centre optique et axes optiques (Fig-4)**

Tout rayon passant par le centre O d'une lentille n'est pas dévié :

- \* O : centre optique.
- \* Toute droite passant par O est un axe optique de la lentille ;
  - Axe principal : joignant les centres de courbure de la lentille.
  - Axes secondaires : tout autre axe optique.

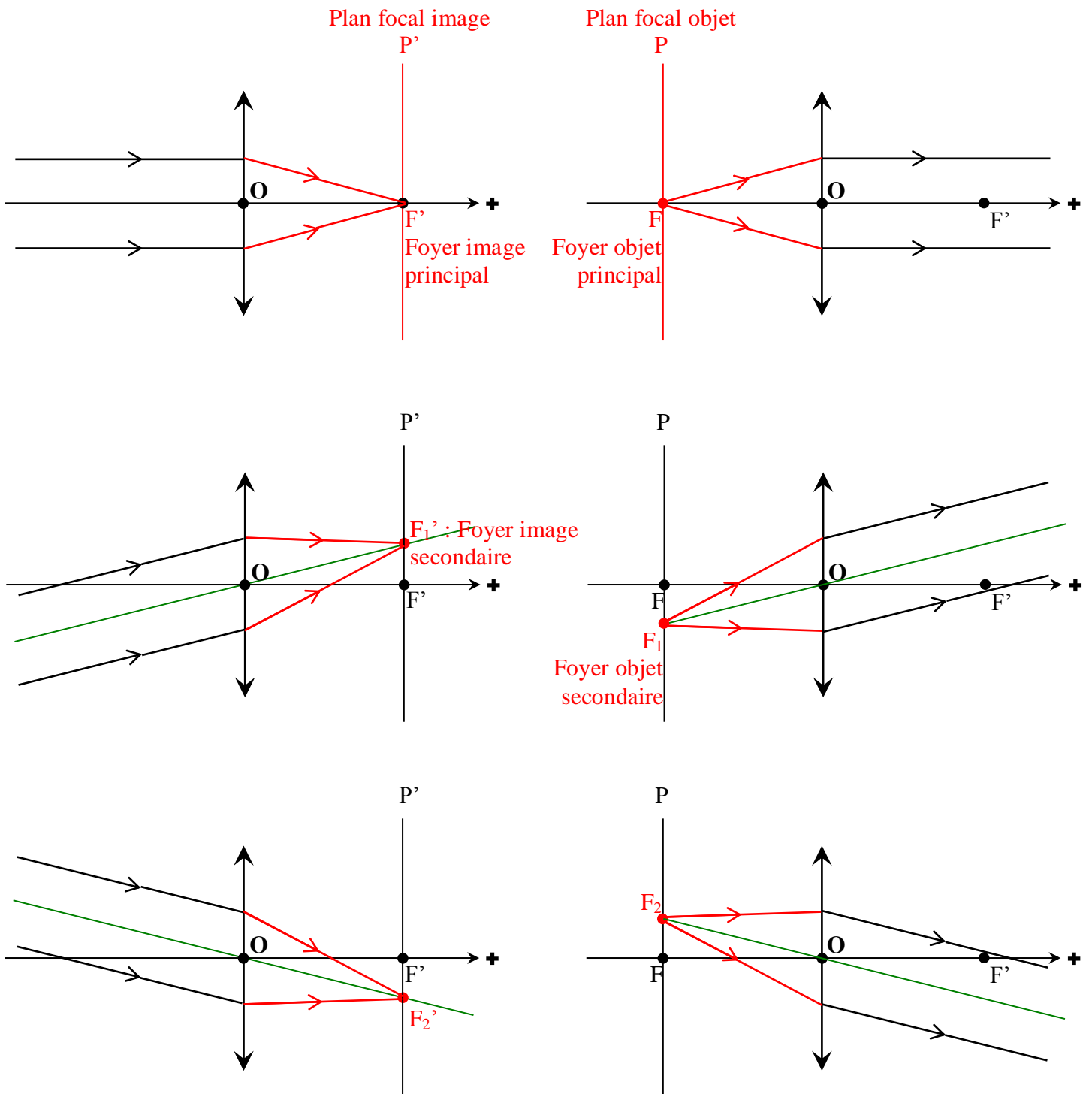
**Figure-4**



## 2) Foyers, plans focaux, distance focale, et vergence

### a) Cas d'une lentille convergente (Fig-5)

Figure-5

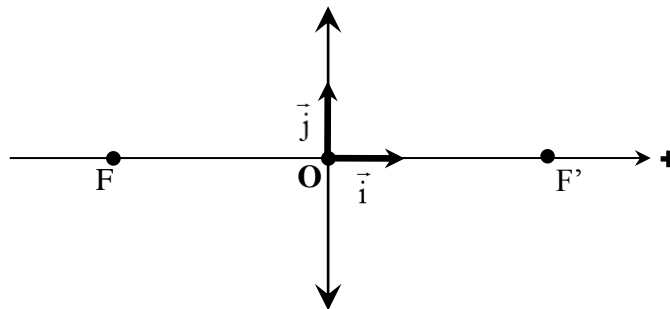


L'expérience montre que :

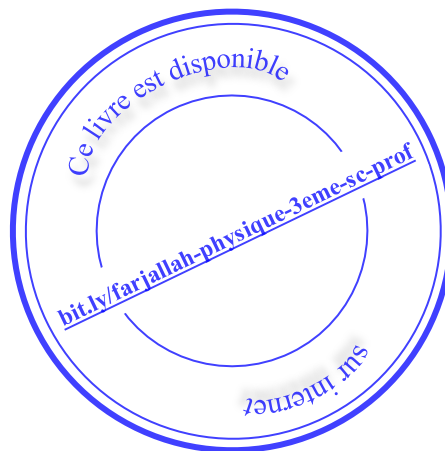
- \* Tout faisceau qui arrive sur la lentille parallèlement à son axe principal, converge vers un point particulier de cet axe ;  $F'$  : Foyer image principal. Le plan ( $P'$ ) passant par  $F'$  perpendiculairement à l'axe principal : plan focal image.  
↳ Tout faisceau qui arrive sur la lentille parallèlement à un axe secondaire, converge vers un point particulier de cet axe, à son intersection avec le plan focal image ; (Foyer image secondaire).
- \* Réciproquement ; tout faisceau qui émerge de la lentille parallèlement à son axe principal, doit lui arriver d'un point particulier de cet axe, symétrique de  $F'$  par rapport à son centre optique ;  $F$  : Foyer objet principal. Le plan ( $P$ ) passant par  $F$  perpendiculairement à l'axe principal : plan focal objet.  
↳ Tout faisceau qui émerge de la lentille parallèlement à un axe secondaire, doit lui arriver d'un point particulier de cet axe, à son intersection avec le plan focal objet ; (Foyer objet secondaire).

### Définitions

Un sens positif étant choisi pour la propagation de la lumière, soit  $(O, \vec{i}, \vec{j})$  un repère orthonormé.

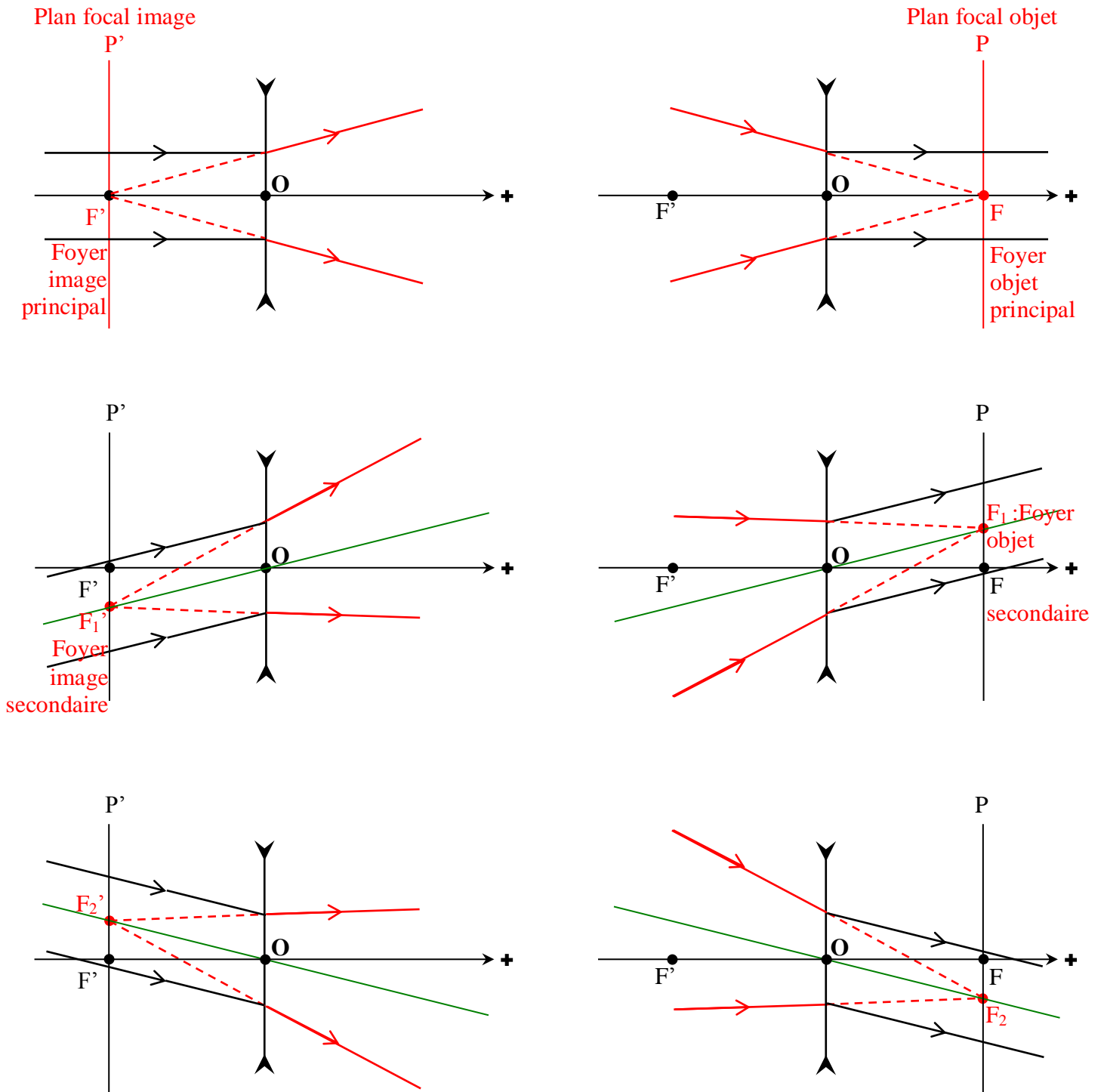


- \*  $f = OF' = OF$  : distance focale de la lentille, en m dans le S.I.
- \*  $C = \frac{1}{OF'}$  : vergence de la lentille, en dioptries  $\delta$  dans le S.I. ( $C > 0$  pour une LC, et plus elle est grande plus la lentille est convergente).



**b) Cas d'une lentille divergente (Fig-6)**

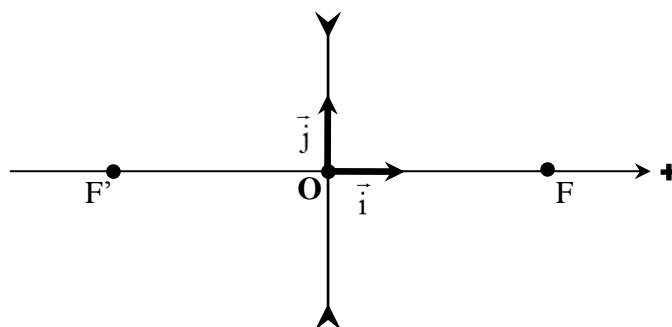
Figure-6



L'expérience montre que :

- \* Tout faisceau qui arrive sur la lentille parallèlement à son axe principal, diverge en semblant émaner d'un point particulier de cet axe ;  $F'$  : Foyer image principal. Le plan (P') passant par  $F'$  perpendiculairement à l'axe principal : plan focal image.  
 ↳ Tout faisceau qui arrive sur la lentille parallèlement à un axe secondaire, diverge en semblant émaner d'un point particulier de cet axe, à son intersection avec le plan focal image ; (Foyer image secondaire).
- \* Réciproquement ; tout faisceau qui émerge de la lentille parallèlement à son axe principal, doit lui arriver tel que les prolongements de ses rayons convergent vers un point particulier de cet axe, symétrique de  $F'$  par rapport à son centre optique ;  $F$  : Foyer objet principal. Le plan (P) passant par  $F$  perpendiculairement à l'axe principal : plan focal objet.  
 ↳ Tout faisceau qui émerge de la lentille parallèlement à un axe secondaire, doit lui arriver tel que les prolongements de ses rayons convergent vers un point particulier de cet axe, à son intersection avec le plan focal objet ; (Foyer objet secondaire).

### Définitions



- \*  $f = OF' = OF$  : distance focale.
- \*  $C = \frac{1}{OF'}$  : vergence. ( $C < 0$  pour une LD, et plus elle est grande en valeur absolue plus la lentille est divergente).

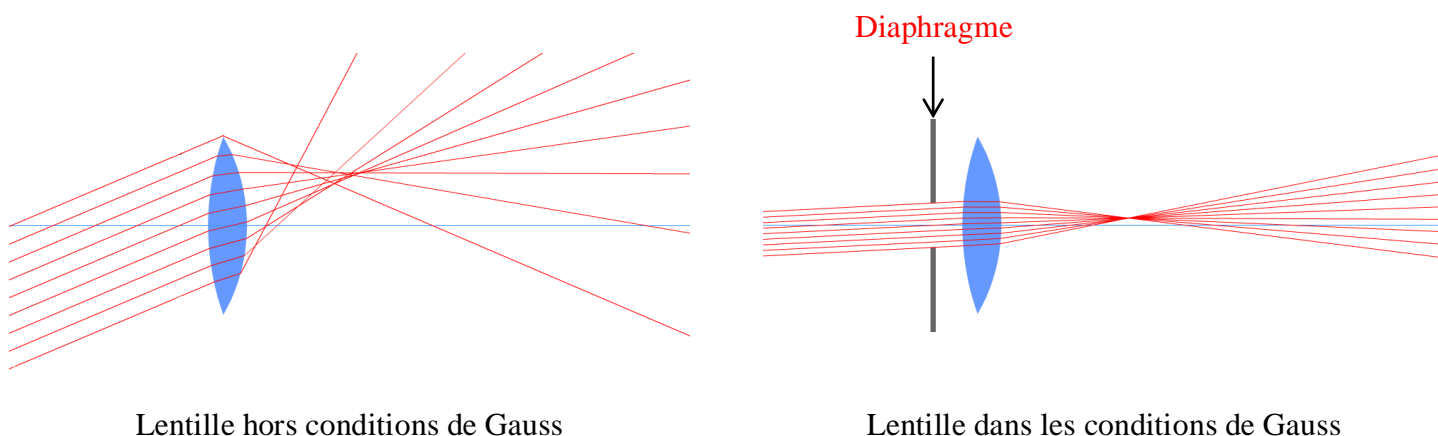
### Rq (Fig-7)

L'expérience montre que  $F$  et  $F'$  ne sont pas rigoureusement des points si le faisceau incident n'est pas suffisamment étroit ou trop incliné par rapport à l'axe optique principal de la lentille; cependant ils le sont presque si :

- \* Le faisceau traverse la lentille près de son centre optique.
- \* Les rayons sont peu inclinés par rapport à son axe optique principal.

Ces conditions, appelées conditions de Gauss (Carl Friedrich), sont réalisables en diaphragmant la lentille, et en la disposant tel que les rayons incidents soient peu inclinés par rapport à son axe principal.

**Figure-7**



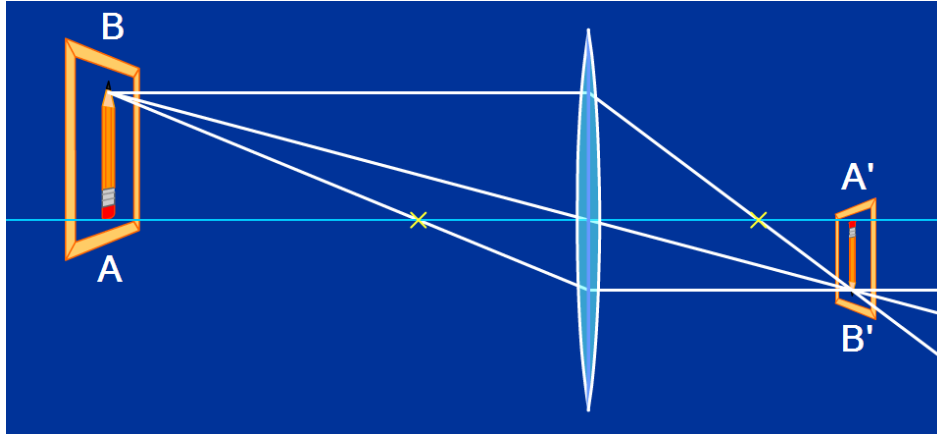


### III- Image d'un objet lumineux donnée par une lentille

**NB** : Les lentilles seront toujours considérées dans les conditions de Gauss, afin que l'image obtenue soit nette et sans lumière parasite. (expérience)

#### 1) Cas d'une lentille convergente

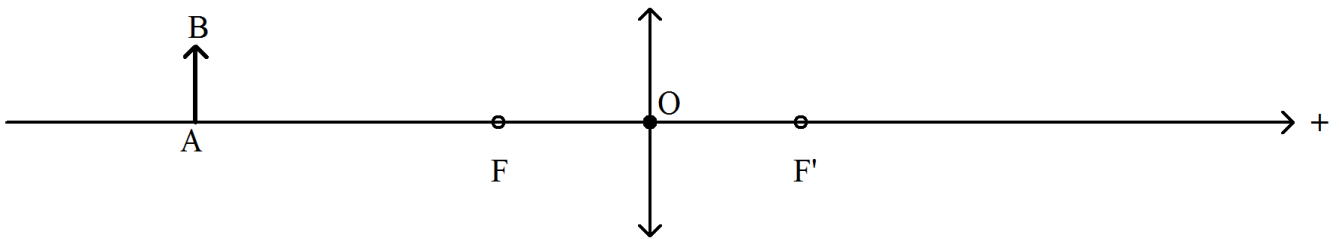
##### Activité-1



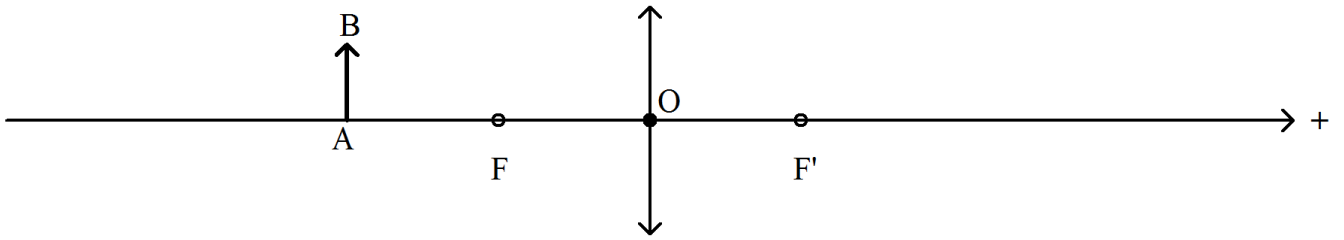
AB est un objet lumineux rectiligne  $\perp$  à l'axe optique principal de la lentille; son image A'B' donnée par la lentille est aussi rectiligne  $\perp$  à l'axe optique principal. D'autre part  $A \in$  à l'axe principal, alors  $A' \in$  à l'axe principal aussi : il suffit de construire l'image B' de B pour obtenir l'image A'B'.

On notera  $\gamma = \frac{A'B'}{AB}$  : grandissement.

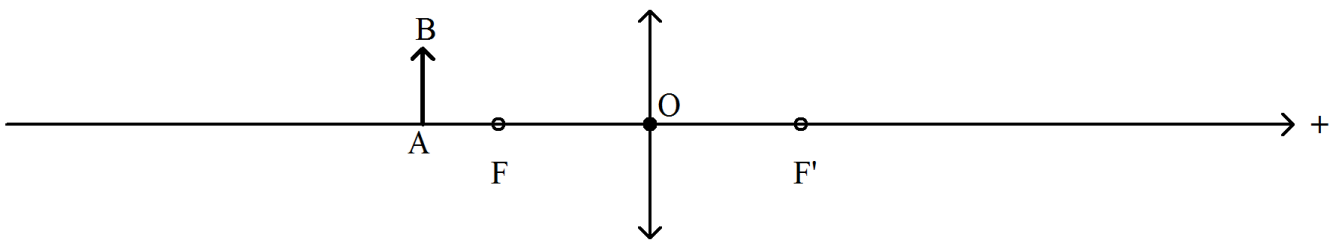
1. Pour chacun des cas suivants : construire l'image A'B' ; et dire si elle est réelle ou virtuelle, droite ou renversée, plus grande ou plus petite ou de même taille que l'objet.



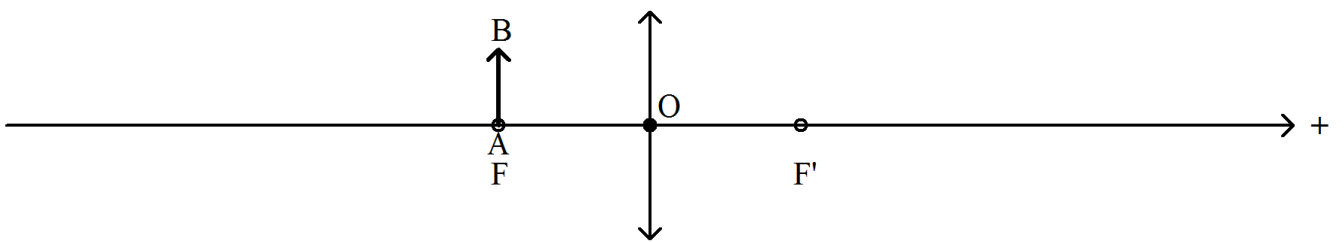
**Objet réel,  $OA > 2f$**  : Image ....., ..... ( $\gamma \dots 0$ ), ..... ( $|\gamma| \dots 1$ )



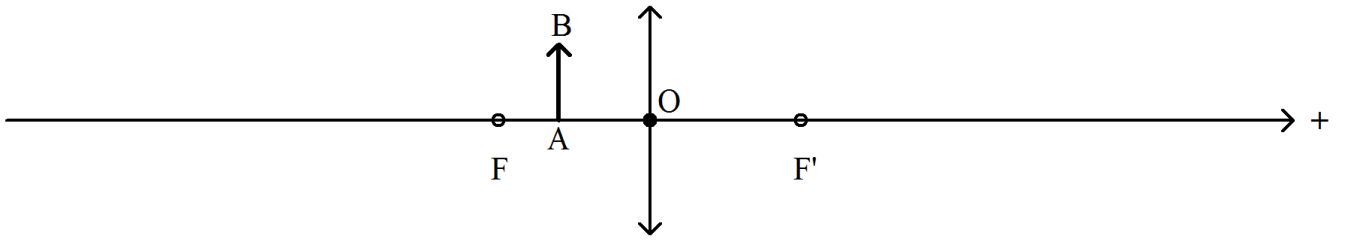
**Objet réel,  $OA = 2 f$  :** Image ....., ..... ( $\gamma \dots 0$ ), ..... ( $|\gamma| \dots 1$ )



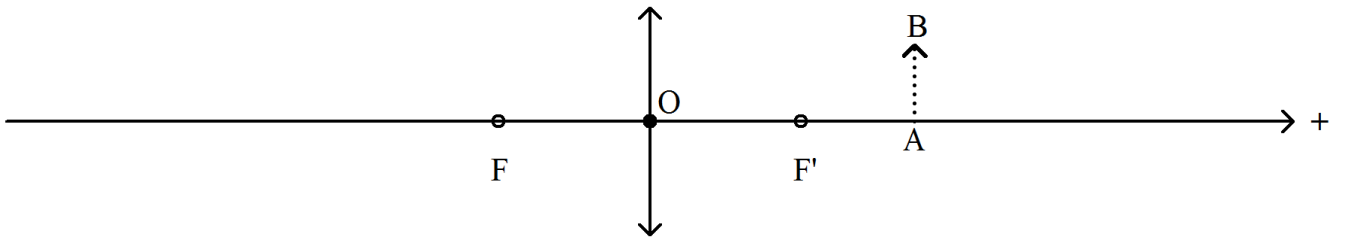
**Objet réel,  $f < OA < 2 f$  :** Image ....., ..... ( $\gamma \dots 0$ ), ..... ( $|\gamma| \dots 1$ )



**Objet réel,  $OA = f$  :** Image ....., ..... ( $\gamma \dots 0$ ), ..... ( $|\gamma| \dots$ )

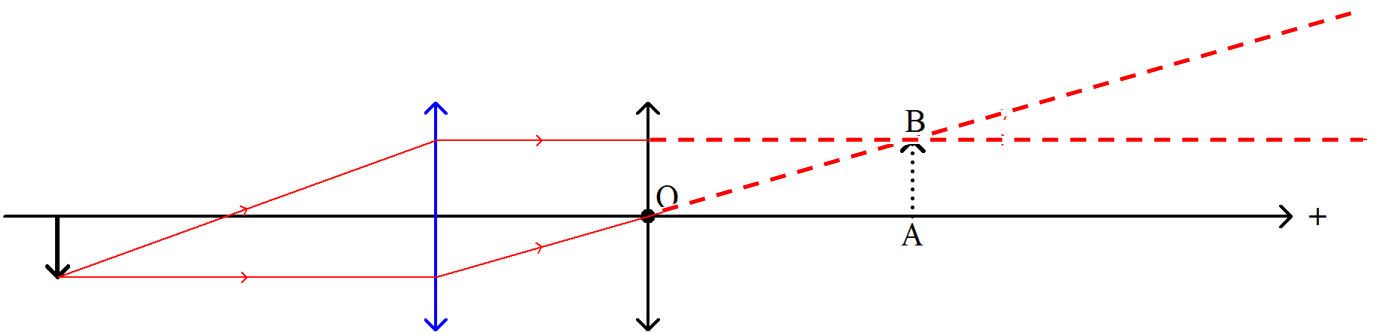


**Objet réel,  $OA < f$  :** Image ....., ..... ( $\gamma > 0$ ), ..... ( $|\gamma| > 1$ )

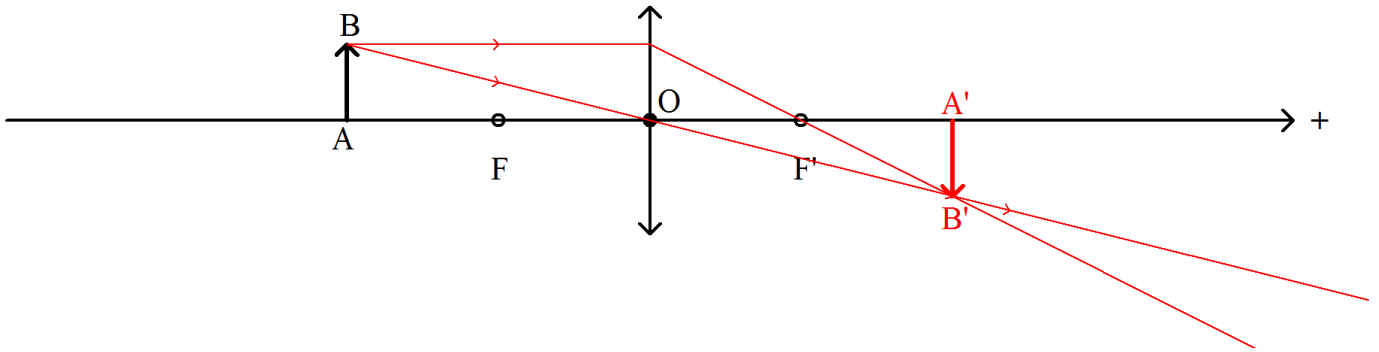


**Objet virtuel,  $OA > f$  :** Image ....., ..... ( $\gamma < 0$ ), ..... ( $|\gamma| > 1$ )

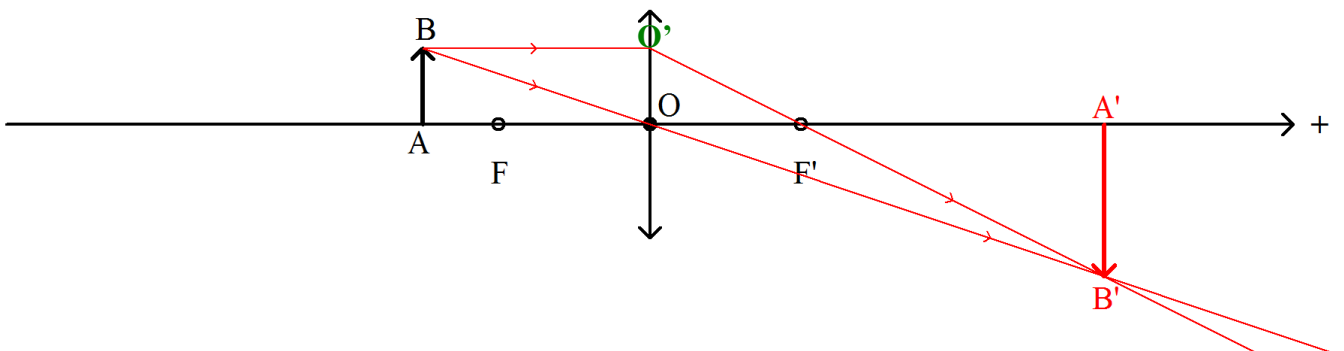
L'objet virtuel peut être fourni à partir d'un objet réel par .....



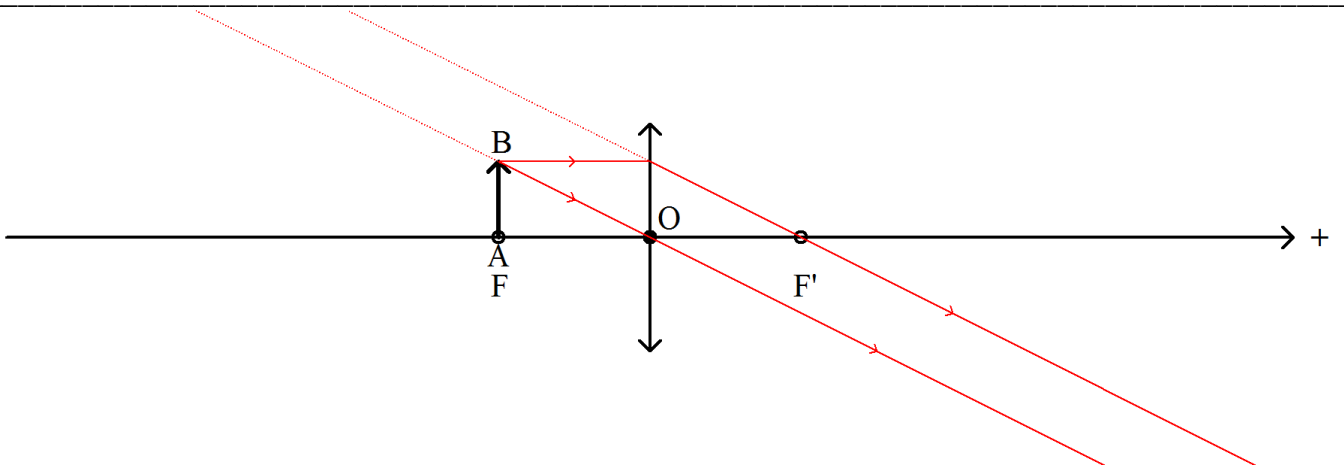




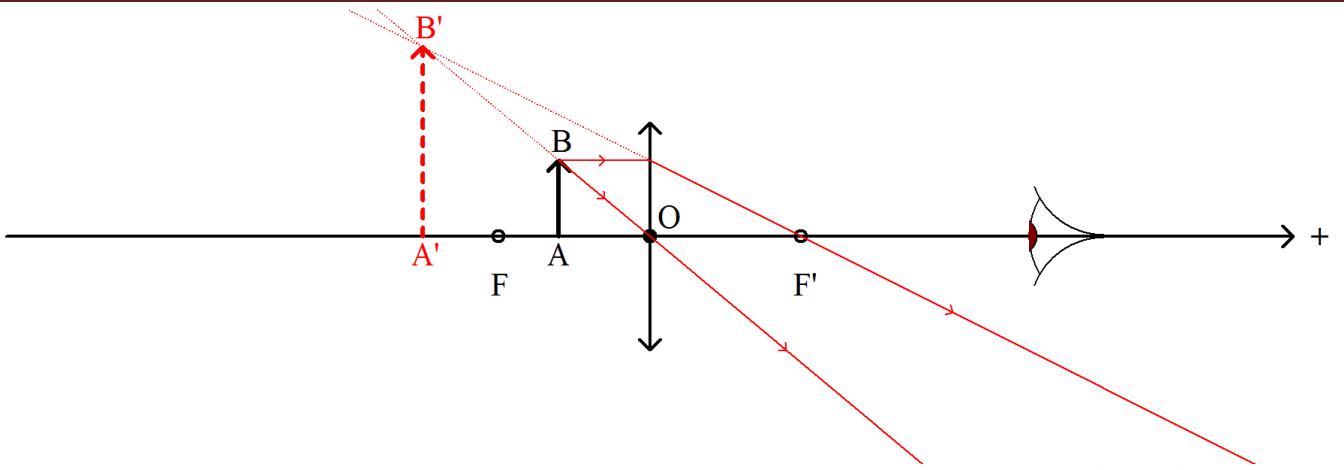
**Objet réel,  $OA = 2f$  :** Image réelle, renversée ( $\gamma < 0$ ), de même taille que l'objet ( $|\gamma| = 1$ )



**Objet réel,  $f < OA < 2f$  :** Image réelle, renversée ( $\gamma < 0$ ), plus grande que l'objet ( $|\gamma| > 1$ )

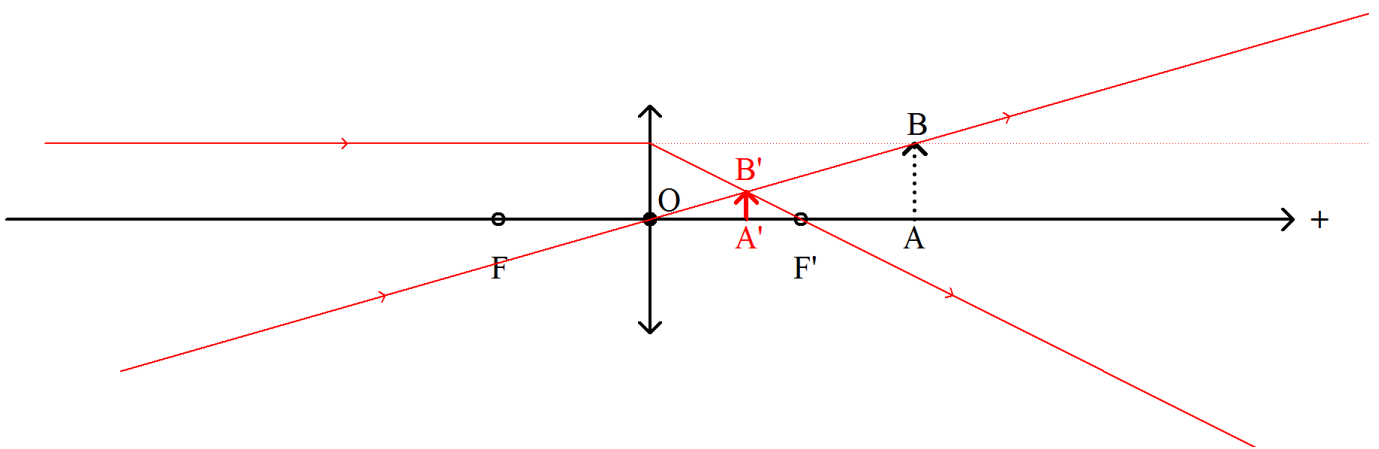


**Objet réel,  $OA = f$  :** Image virtuelle, droite ( $\gamma > 0$ ), à l'infini et de taille infinie ( $|\gamma| \rightarrow +\infty$ )



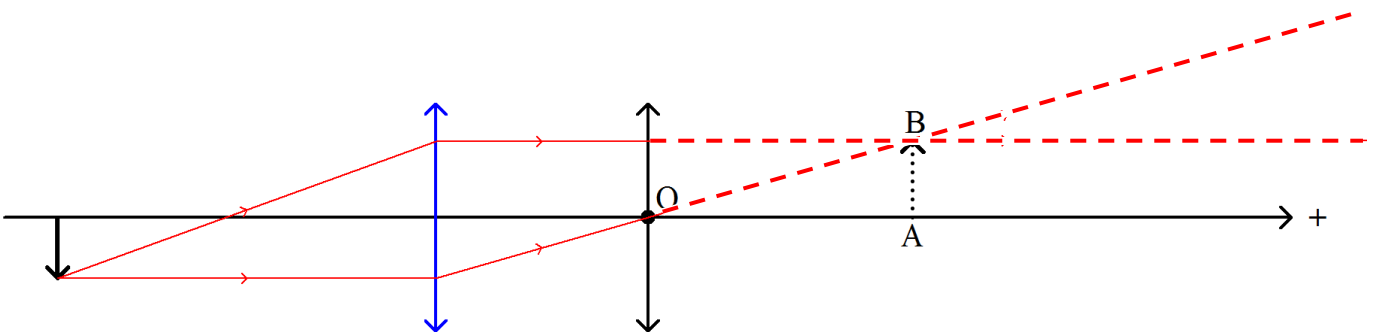
**Objet réel,  $OA < f$  :** Image virtuelle, droite ( $\gamma > 0$ ), plus grande que l'objet ( $|\gamma| > 1$ )

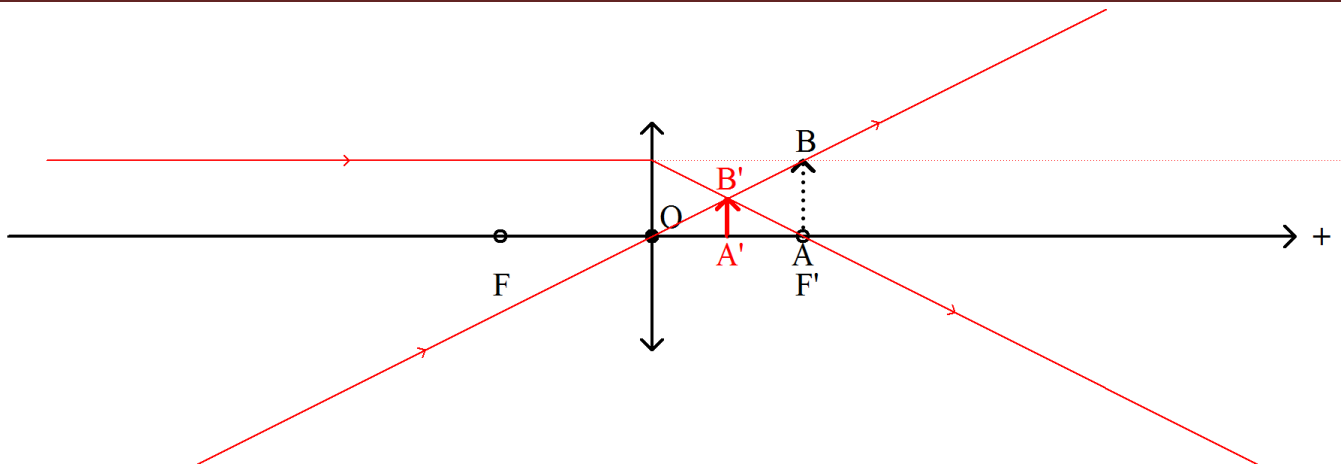
L'image est visible à l'œil regardant à travers la lentille, et elle est plus grande que l'objet : effet de loupe



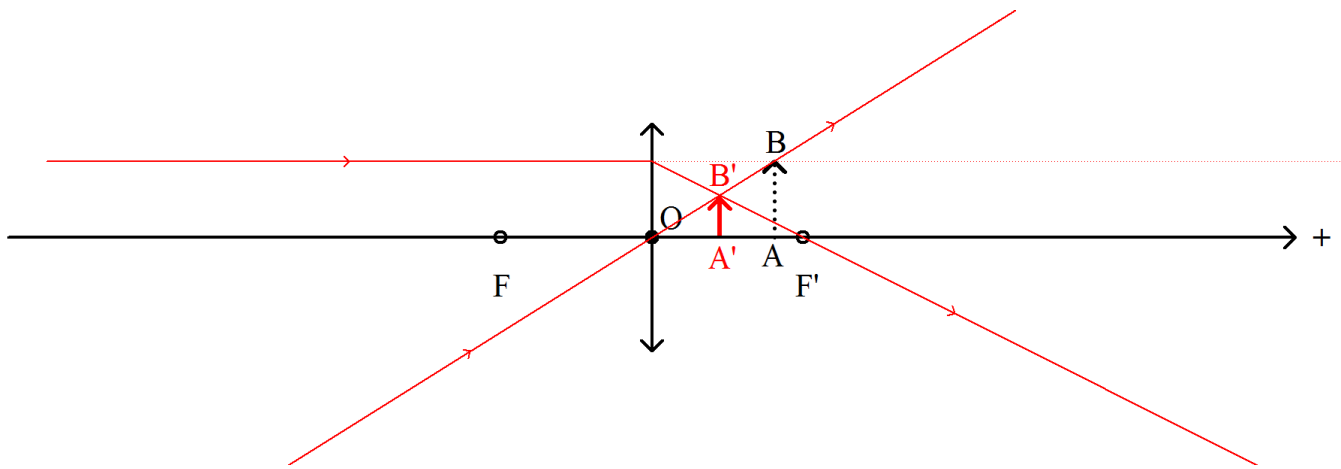
**Objet virtuel,  $OA > f$  :** Image réelle, droite ( $\gamma > 0$ ), plus petite que l'objet ( $|\gamma| < 1$ )

L'objet virtuel peut être fourni à partir d'un objet réel par une autre LC placée avant la lentille considérée





**Objet virtuel,  $OA = f$  :** Image réelle, droite ( $\gamma > 0$ ), de taille la moitié de celle l'objet ( $|\gamma| = \frac{1}{2}$ )



**Objet virtuel,  $OA < f$  :** Image réelle, droite ( $\gamma > 0$ ), plus petite que l'objet ( $|\gamma| < 1$ )

2.  $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$ , or d'après le théorème de Thalès  $\frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$  ; alors  $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$

3. Le point  $O'$  est tel que  $\overline{OO'} = \overline{AB}$  :  $\frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{OO'}}$ .

Or d'après le théorème de Thalès  $\frac{\overline{A'B'}}{\overline{OO'}} = \frac{\overline{F'A'}}{\overline{F'O}}$ , et puisque  $\frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$  ; alors  $\frac{\overline{F'A'}}{\overline{F'O}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$

$$\Rightarrow \frac{\overline{F'O} + \overline{OA'}}{\overline{F'O}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} \Rightarrow \left(1 + \frac{\overline{OA'}}{\overline{F'O}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}\right) \times \frac{1}{\overline{OA'}}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\overline{OA'}} + \frac{1}{\overline{F'O}} = \frac{1}{\overline{OA}} \Rightarrow \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = -\frac{1}{\overline{F'O}} = \frac{1}{\overline{OF'}} = C : \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}} = C$$

**Application-1****IV. Une carte plein cadre (5 points)**

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 :  $\overline{OF'} = +50 \text{ mm}$  ;
- la pellicule par un écran (E), où se forme l'image réelle de l'objet photographié (figure 1).

L'objectif est conçu pour pouvoir déplacer la lentille (L) par rapport à la pellicule.

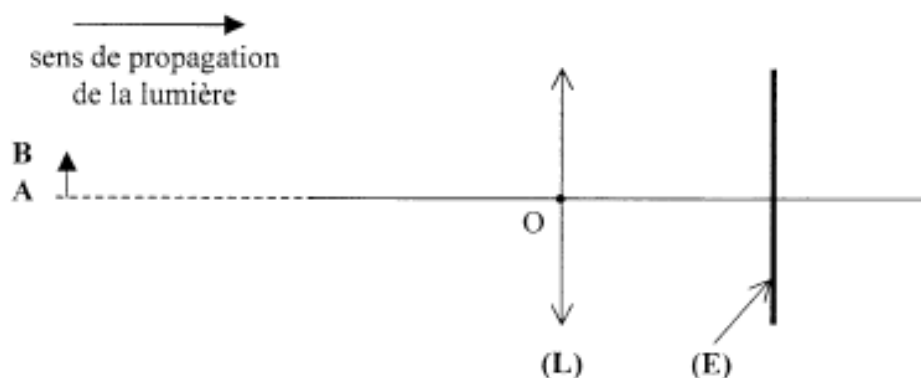


figure 1

On rappelle les relations de conjugaison et de grandissement, avec A', point image d'un point A situé sur l'axe principal, et B', point image d'un point B situé dans un plan perpendiculaire à cet axe contenant A :

$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{OF'}$$

$$\gamma = \frac{A'B'}{AB} = \frac{OA'}{OA}$$

1. On photographie un objet AB situé à une très 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) ?
2. 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 (voir la figure 2 page 9).
  - 2.1. Si l'objet AB à photographier se rapproche de (L), la distance entre la lentille et l'écran doit-elle augmenter ou diminuer ? Justifier à l'aide d'un schéma.
  - 2.2. 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 ».
    - 2.2.1. À quelle distance doit se trouver un objet pour que son image soit nette sur la pellicule quand la distance lentille - écran est maximale ?
    - 2.2.2. Calculer le grandissement  $\gamma$  dans ces conditions.



3. On veut photographier une carte postale de format 10 cm × 15 cm.

3.1. En la plaçant à 55 cm de (L) dans un plan perpendiculaire à l'axe optique 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 × 36 mm ?

3.2. On veut que les dimensions de l'image de la carte postale soient 24 mm × 36 mm.

3.2.1. Calculer la valeur absolue du grandissement  $\gamma$  souhaité.

3.2.2. Pour simplifier les calculs numériques, prendre :  $\gamma = -\frac{1}{4}$ .

Calculer alors la distance OA à laquelle on doit placer la carte postale, ainsi que la distance OA' entre la lentille et l'écran.

3.2.3. On ne peut pas obtenir la distance OA' nécessaire trouvée au 3.2.2. avec le seul objectif de l'appareil photographique.

Il est toutefois possible d'adapter, entre l'objectif et le boîtier de l'appareil photographique, un ou plusieurs tubes creux appelés « bagues allonges » de longueur  $d$  (figure 3 ci-dessous).

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  $\gamma = -\frac{1}{4}$ .

Les figures ci-dessous ne sont pas représentées à l'échelle.

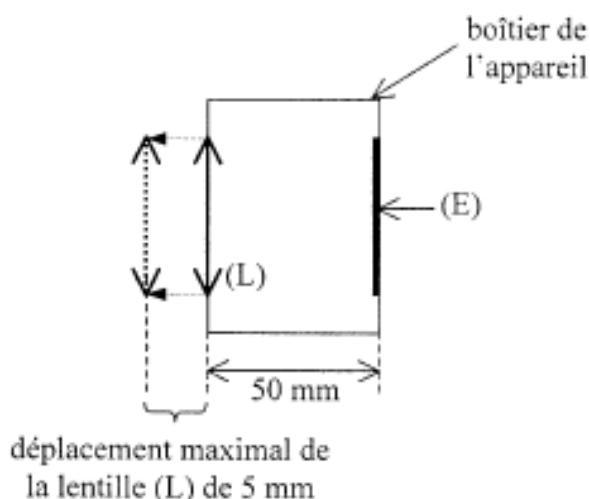


figure 2

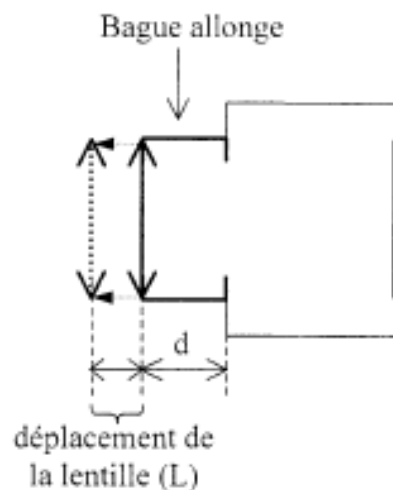
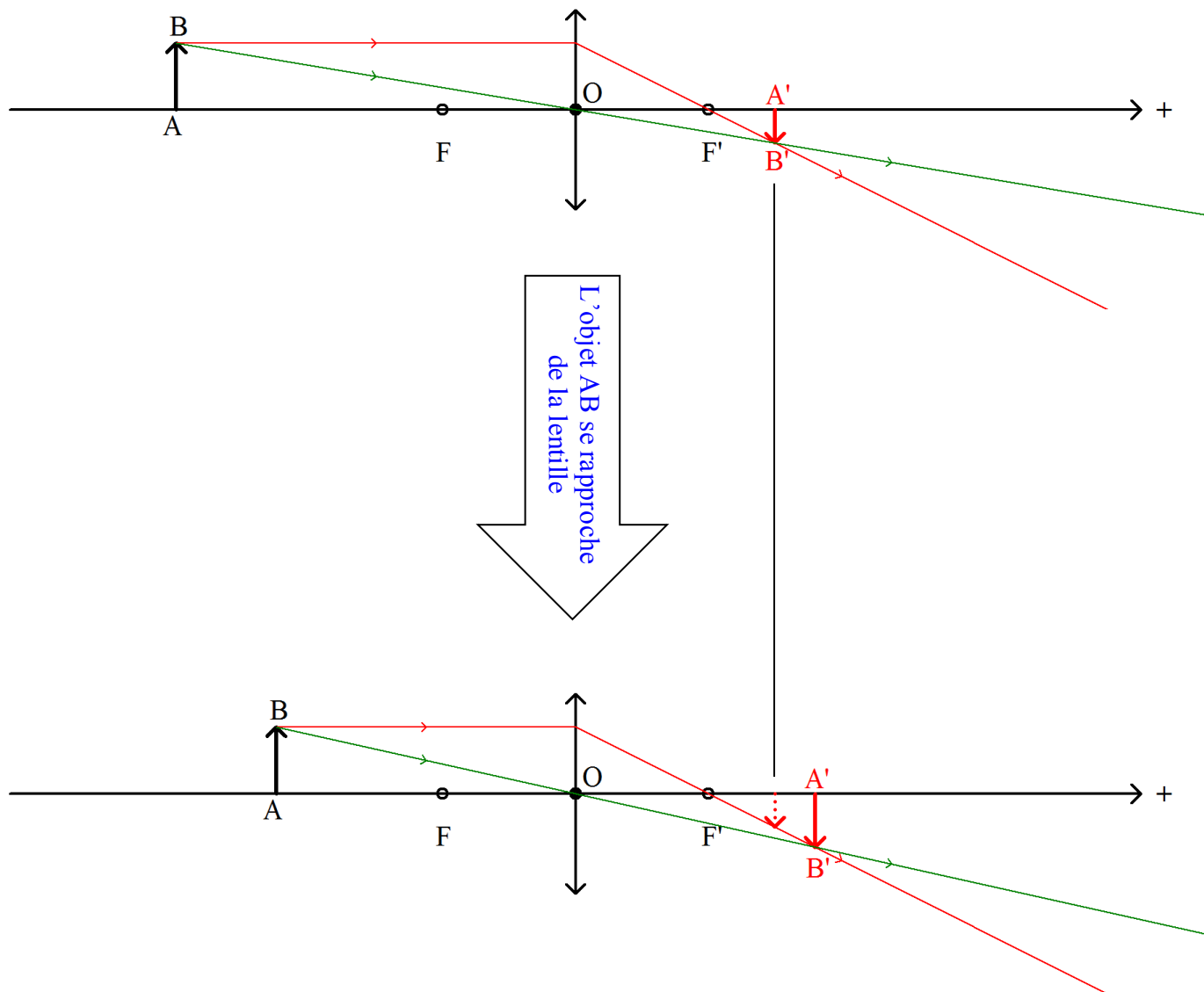


figure 3

1. Les rayons issus de l'objet AB situé à l'infini arrivent sur la lentille parallèlement à son axe optique principal : son image se forme dans le plan focal image, donc à la distance  $OA' = OF'$  de la lentille  $\Rightarrow$  l'écran doit se trouver à la distance  $OF' = 50$  mm.
2.
  - 2.1.



$\Rightarrow$  Si l'objet AB se rapproche de la lentille, son image A'B' s'en éloigne : pour conserver la même netteté de l'image à l'écran, il faut augmenter la distance lentille-écran.

## 2.2.

**2.2.1.** La distance maximale lentille-écran est  $OF' + 5$  mm = 55 mm ; dans ce cas, pour que l'image soit nette sur la pellicule il faut qu'elle se forme au niveau de la pellicule :  $\overline{OA'} = 55$  mm

$$\text{On a } \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}} \Rightarrow \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OF'}} = \frac{\overline{OF'} - \overline{OA'}}{\overline{OA'} \cdot \overline{OF'}} \Rightarrow \overline{OA} = \frac{\overline{OA'} \cdot \overline{OF'}}{\overline{OF'} - \overline{OA'}} = \frac{55 \cdot 50}{50 - 55}$$

$\overline{OA} = -550$  mm = -55 cm : l'objet doit se trouver à 55 cm de la lentille.

**2.2.2.**  $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = \frac{55}{-550} : \gamma = -0,1$

3.

3.1.  $|\gamma| = 0,1 = \frac{1}{10} \Rightarrow$  les dimensions de l'image sur la pellicule constituent le  $\left(\frac{1}{10}\right)^{\text{ème}}$  des dimensions de la carte postale : 1 cm  $\times$  1,5 cm, soit 10 mm  $\times$  15 mm (l'image loge sur la pellicule de dimensions 24 mm  $\times$  36 mm, mais ne la couvre pas entièrement)

3.2. On veut que l'image couvre entièrement la pellicule :

3.2.1.  $|\gamma| = \frac{24 \text{ mm}}{10 \text{ cm}} = \frac{24 \text{ mm}}{100 \text{ mm}} = 0,24 = \frac{36 \text{ mm}}{15 \text{ cm}} = \frac{36 \text{ mm}}{150 \text{ mm}}$  (on l'obtient en diminuant la distance de l'objet à la lentille)

3.2.2.  $\gamma = -\frac{1}{4} = -0,25$

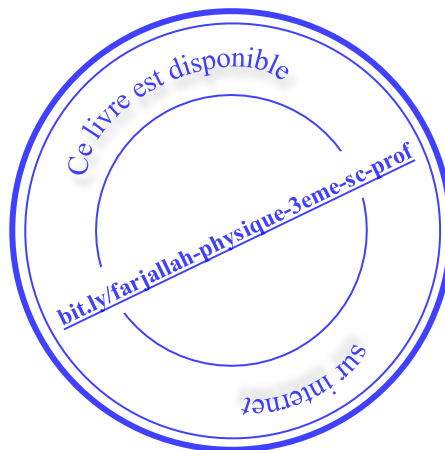
On a  $\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}}$ , or  $\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} \Rightarrow \overline{OA'} = \gamma \cdot \overline{OA}$ , alors

$$\frac{1}{\gamma \cdot \overline{OA}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}} \Rightarrow \frac{1}{\overline{OA}} \left( \frac{1}{\gamma} - 1 \right) = \frac{1}{\overline{OF'}} \Rightarrow \frac{1}{\overline{OA}} (-4 - 1) = \frac{1}{\overline{OF'}}$$

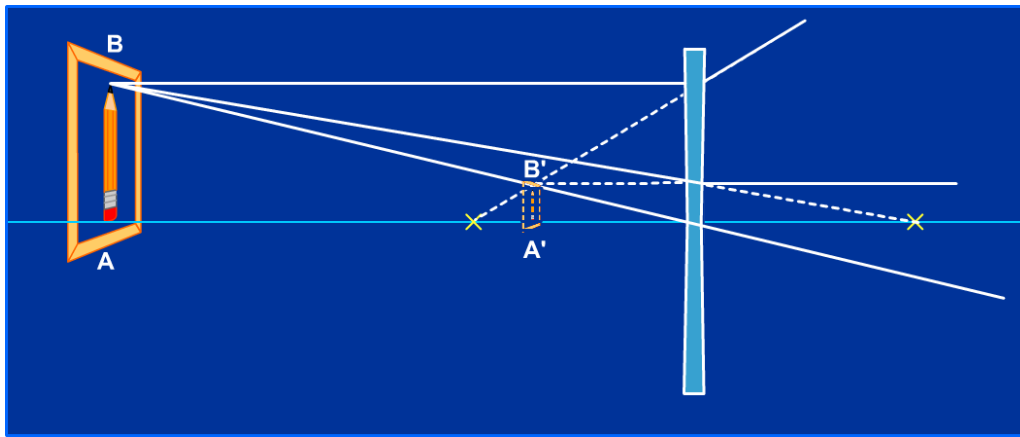
$$\Rightarrow \frac{-5}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}} \Rightarrow \overline{OA} = -5 \overline{OF'} = -5 \cdot 50 \text{ mm} = -250 \text{ mm} : \boxed{\overline{OA} = -25 \text{ cm}}$$

$$\Rightarrow \overline{OA'} = -\frac{1}{4} \cdot (-250 \text{ mm}) : \boxed{\overline{OA'} = 62,5 \text{ mm}}$$

3.2.3. Avec le seul objectif de l'appareil photographique, on peut obtenir une distance OA' de 50 mm jusqu'à 55 mm au maximum ; en intercalant la bague allonge de 10 mm entre l'objectif et le boîtier de l'appareil on pourra ajuster au choix la distance OA' de 60 mm jusqu'à 65 mm : la valeur souhaitée (62,5 mm) étant dans cet intervalle.



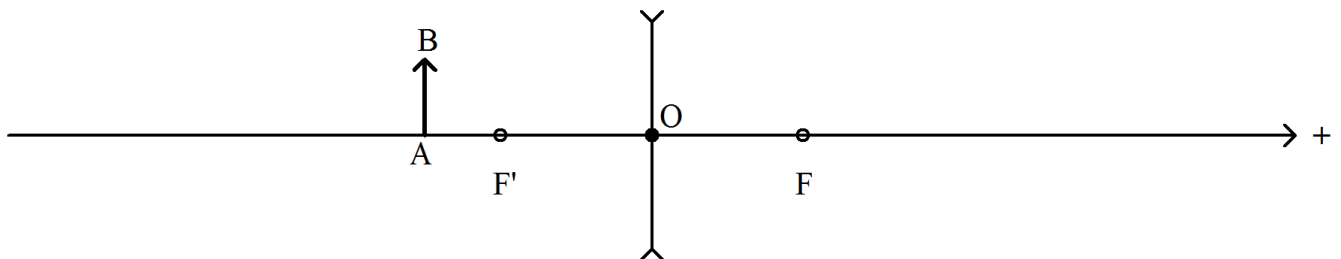
**Activité-2**



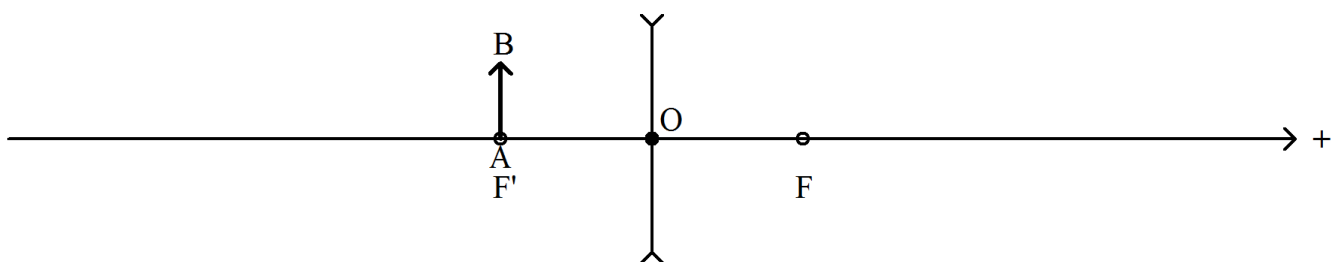
AB est un objet lumineux rectiligne  $\perp$  à l'axe optique principal de la lentille; son image A'B' donnée par la lentille est aussi rectiligne  $\perp$  à l'axe optique principal. D'autre part A  $\in$  à l'axe principal, alors A'  $\in$  à l'axe principal aussi : il suffit de construire l'image B' de B pour obtenir l'image A'B'.

On notera  $\gamma = \frac{A'B'}{AB}$  : grandissement.

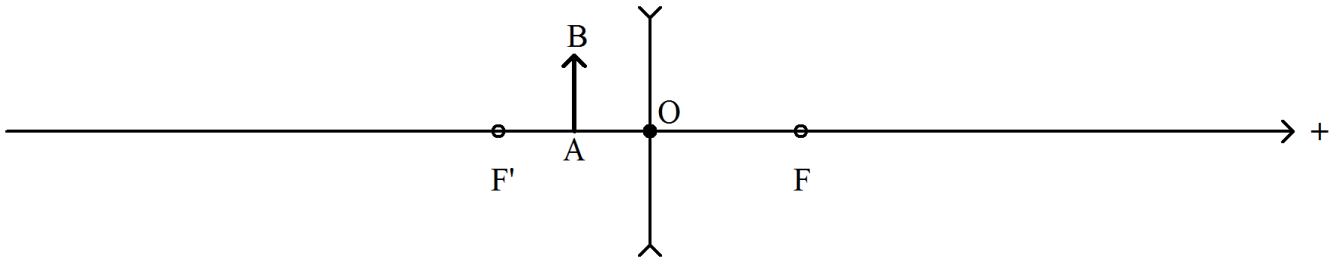
1. Pour chacun des cas suivants : construire l'image A'B' ; et dire si elle est réelle ou virtuelle, droite ou renversée, plus grande ou plus petite ou de même taille que l'objet.



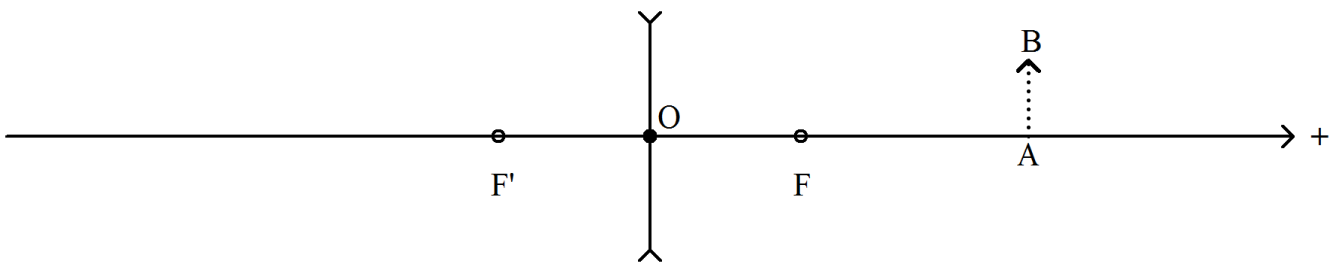
**Objet réel,  $OA > f$  :** Image ....., ..... ( $\gamma \dots 0$ ), ..... ( $|\gamma| \dots 1$ )



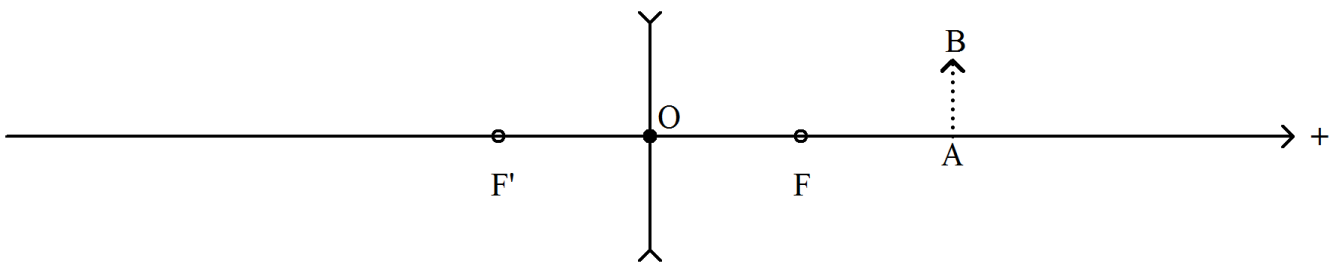
**Objet réel,  $OA = f$  :** Image ....., ..... ( $\gamma \dots 0$ ), ..... ( $|\gamma| \dots$ )



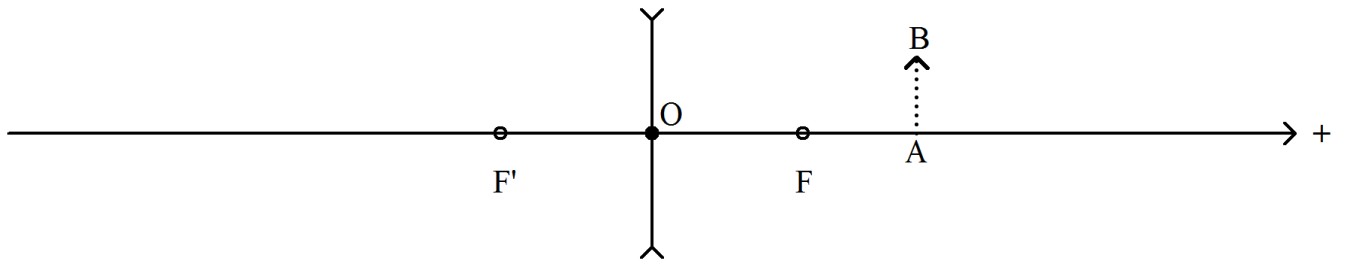
**Objet réel,  $OA < f$  :** Image ....., (  $\gamma > 0$  ), (  $|\gamma| > 1$  )



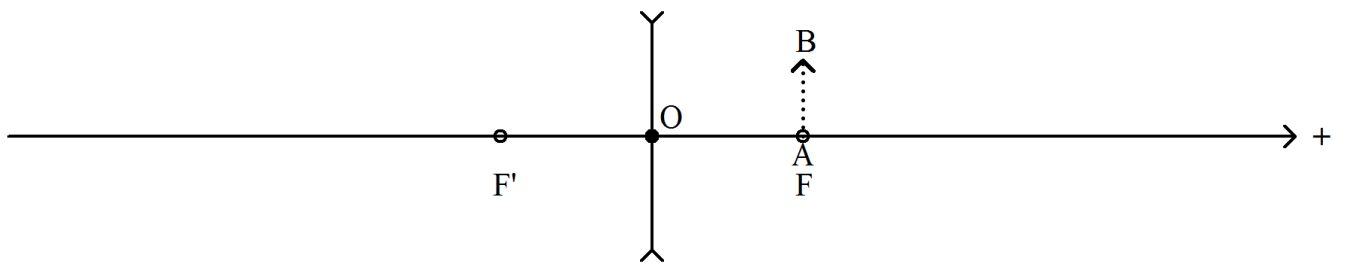
**Objet virtuel,  $OA > 2f$  :** Image ....., (  $\gamma < 0$  ), (  $|\gamma| > 1$  )



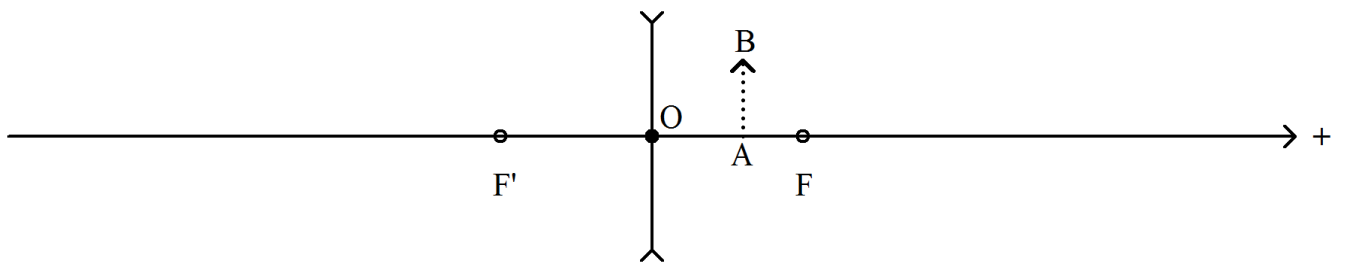
**Objet virtuel,  $OA = 2f$  :** Image ....., (  $\gamma < 0$  ), (  $|\gamma| = 1$  )



**Objet virtuel,  $f < OA < 2f$  :** Image .....,  $(\gamma > 0)$ ,  $(|\gamma| > 1)$



**Objet virtuel,  $OA = f$  :** Image .....,  $(\gamma > 0)$ ,  $(|\gamma| \dots)$

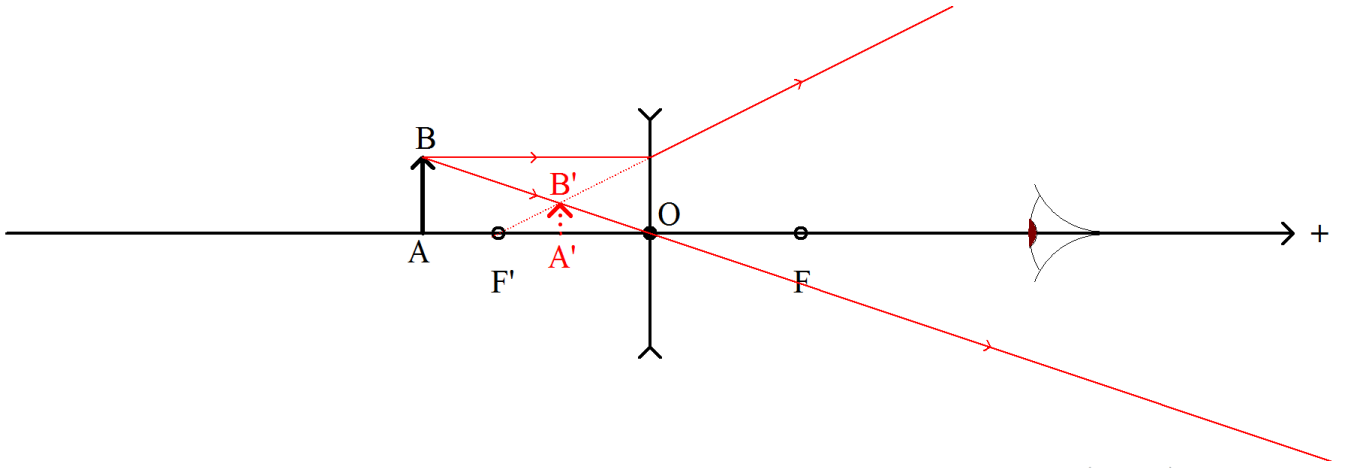


**Objet virtuel,  $OA < f$  :** Image .....,  $(\gamma > 0)$ ,  $(|\gamma| > 1)$

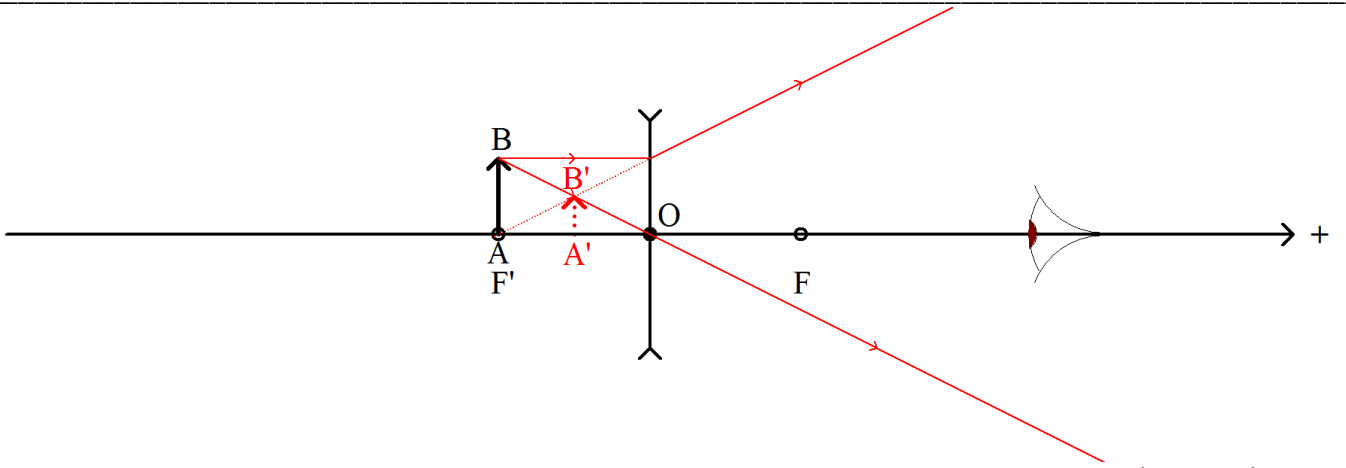
2. Vérifier que  $\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$

3. Montrer que la position de l'image est liée à la position de l'objet par la relation :  $\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = C$ , appelée relation de conjugaison.

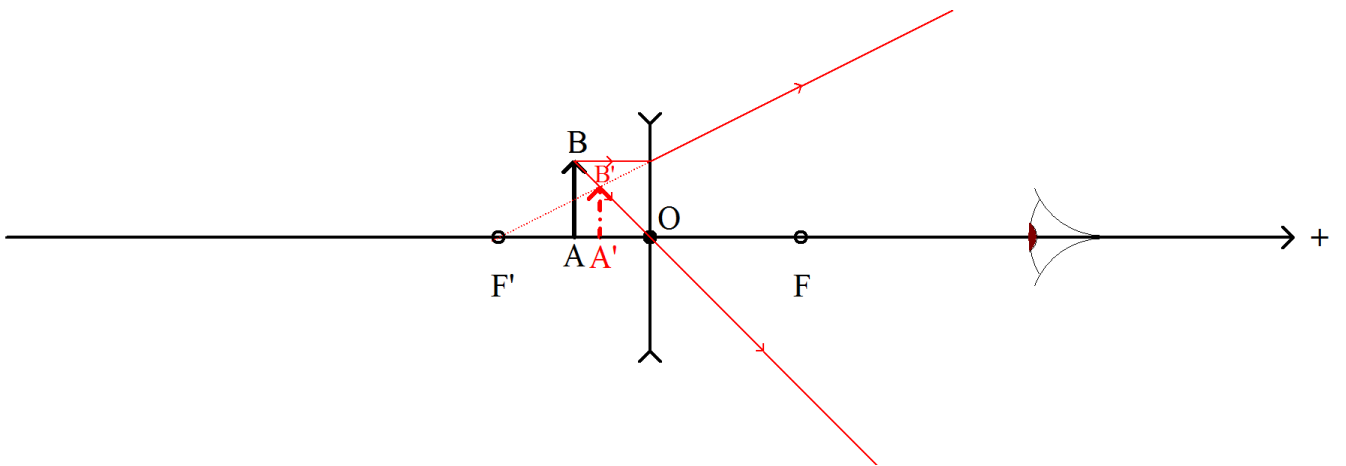
1.



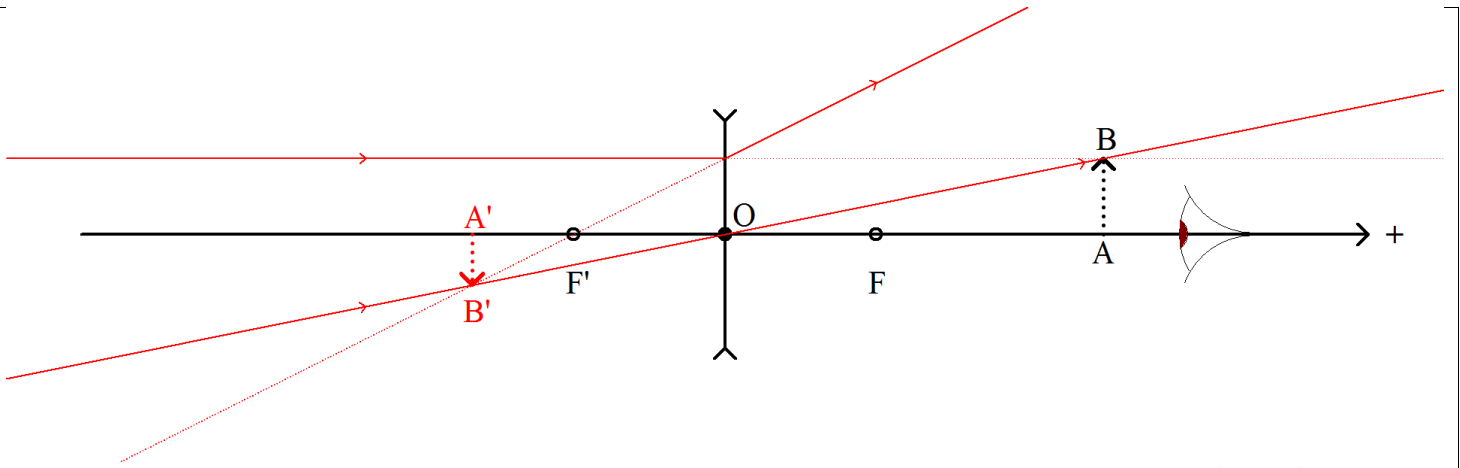
**Objet réel,  $OA > f$  :** Image virtuelle, droite ( $\gamma > 0$ ), plus petite que l'objet ( $|\gamma| < 1$ )



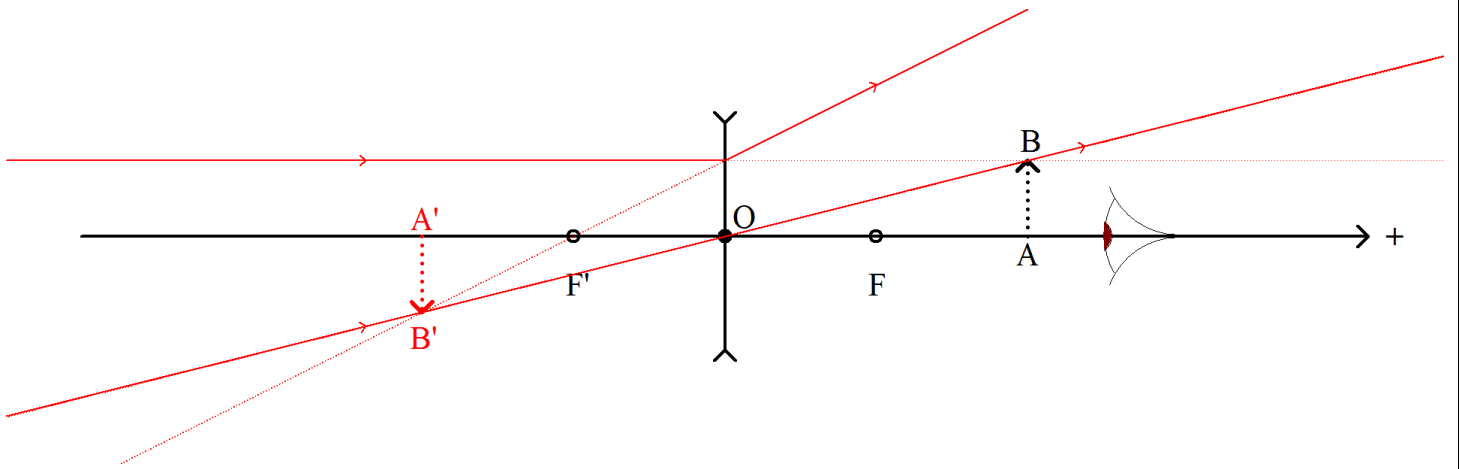
**Objet réel,  $OA = f$  :** Image virtuelle, droite ( $\gamma > 0$ ), de taille la moitié de celle l'objet ( $|\gamma| = \frac{1}{2}$ )



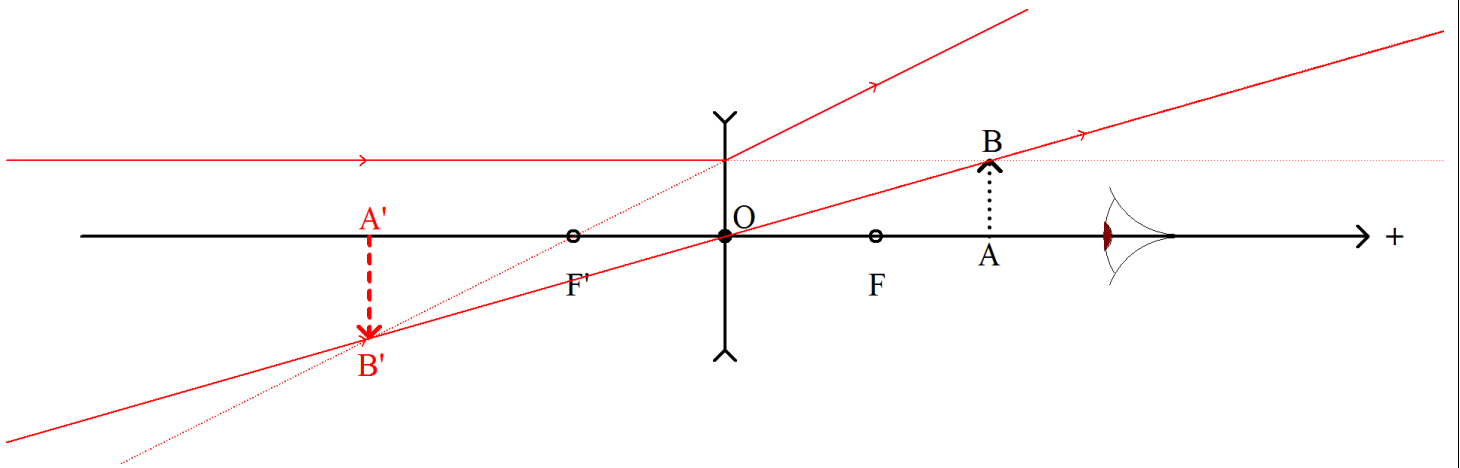
**Objet réel,  $OA < f$  :** Image virtuelle, droite ( $\gamma > 0$ ), plus grande que l'objet ( $|\gamma| > 1$ )



**Objet virtuel,  $OA > 2f$  :** Image virtuelle, renversée ( $\gamma < 0$ ), plus petite que l'objet ( $|\gamma| < 1$ )

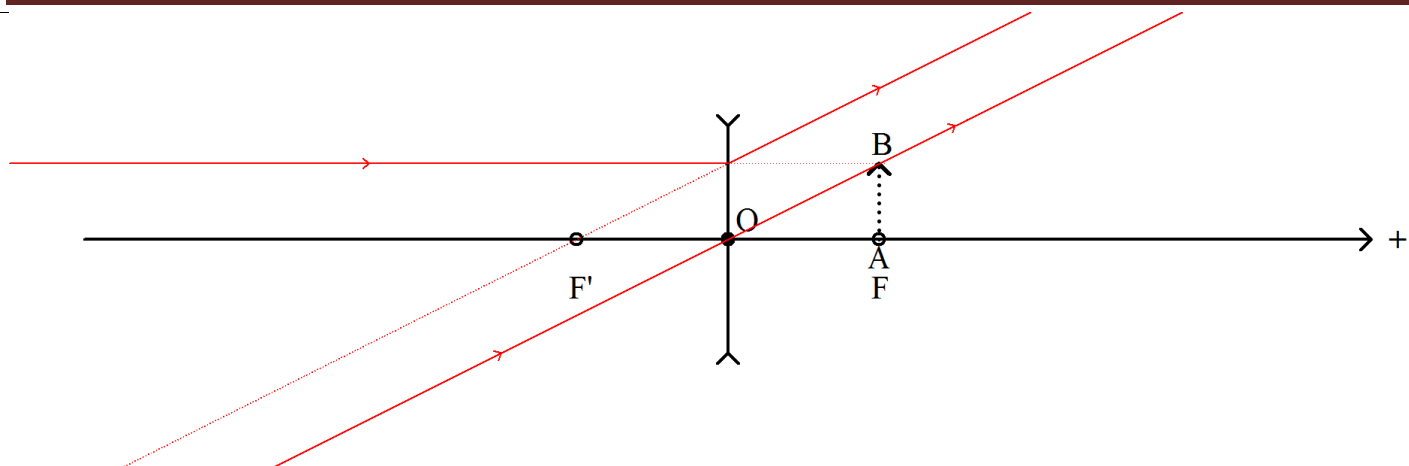


**Objet virtuel,  $OA = 2f$  :** Image virtuelle, renversée ( $\gamma < 0$ ), de même taille que l'objet ( $|\gamma| = 1$ )

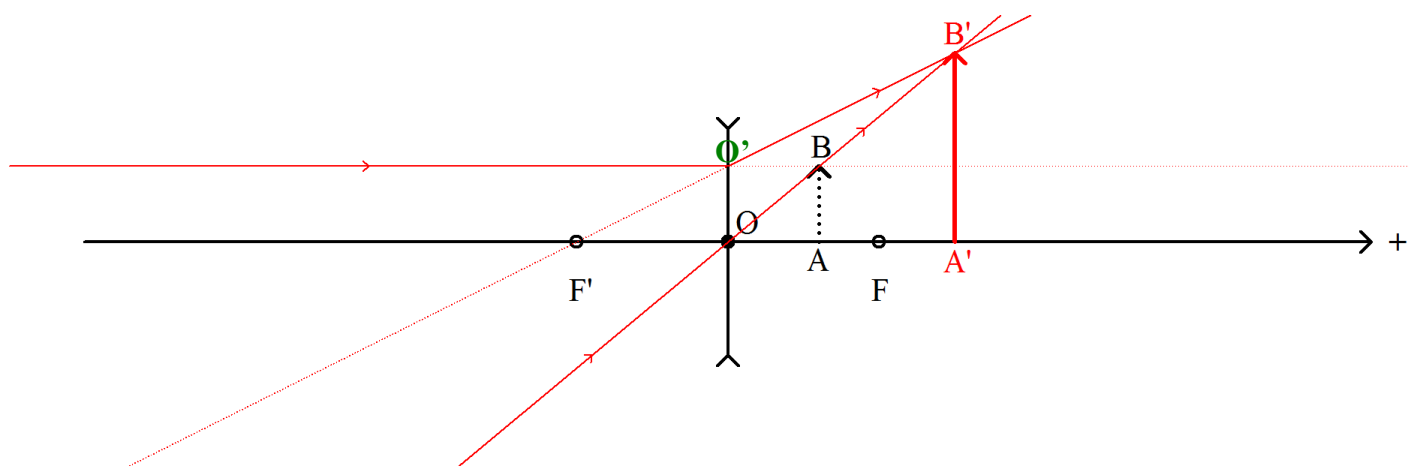


**Objet virtuel,  $f < OA < 2f$  :** Image virtuelle, renversée ( $\gamma < 0$ ), plus grande que l'objet ( $|\gamma| > 1$ )





**Objet virtuel,  $OA = f$  :** Image virtuelle, renversée ( $\gamma < 0$ ), à l'infini et de taille infinie ( $|\gamma| \rightarrow +\infty$ )



**Objet virtuel,  $OA < f$  :** Image réelle, droite ( $\gamma > 0$ ), plus grande que l'objet ( $|\gamma| > 1$ )

2.  $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}$ , or d'après le théorème de Thalès  $\frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$  ; alors  $\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$

3. Le point  $O'$  est tel que  $\overline{OO'} = \overline{AB}$  :  $\frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{OO'}}$ .

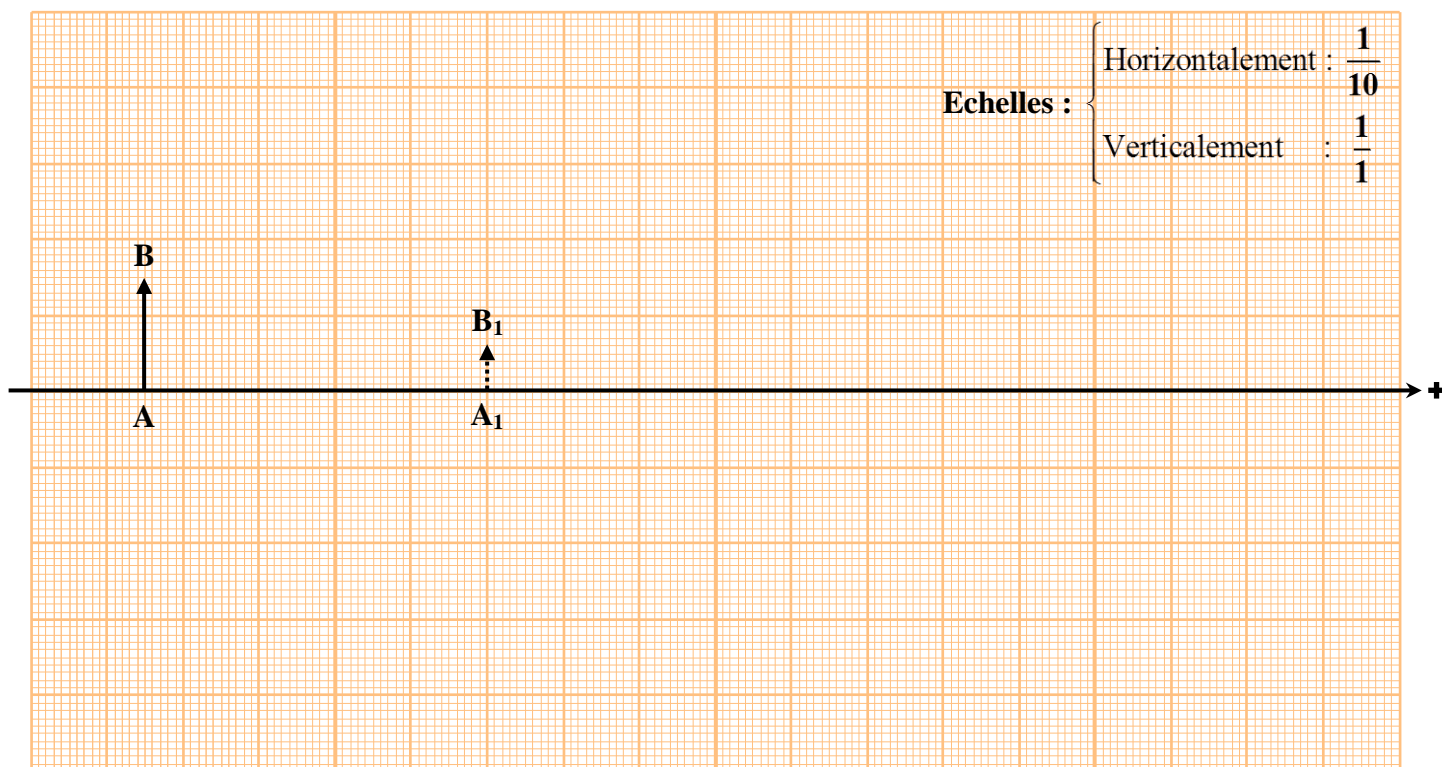
Or d'après le théorème de Thalès  $\frac{\overline{A'B'}}{\overline{OO'}} = \frac{\overline{FA'}}{\overline{FO}}$ , et puisque  $\frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$  ; alors  $\frac{\overline{FA'}}{\overline{FO}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$

$$\Rightarrow \frac{\overline{FO} + \overline{OA'}}{\overline{FO}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} \Rightarrow \left(1 + \frac{\overline{OA'}}{\overline{FO}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}\right) \times \frac{1}{\overline{OA'}}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\overline{OA'}} + \frac{1}{\overline{FO}} = \frac{1}{\overline{OA}} \Rightarrow \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = -\frac{1}{\overline{FO}} = \frac{1}{\overline{OF'}} = C : \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}} = C$$

**Application-2**

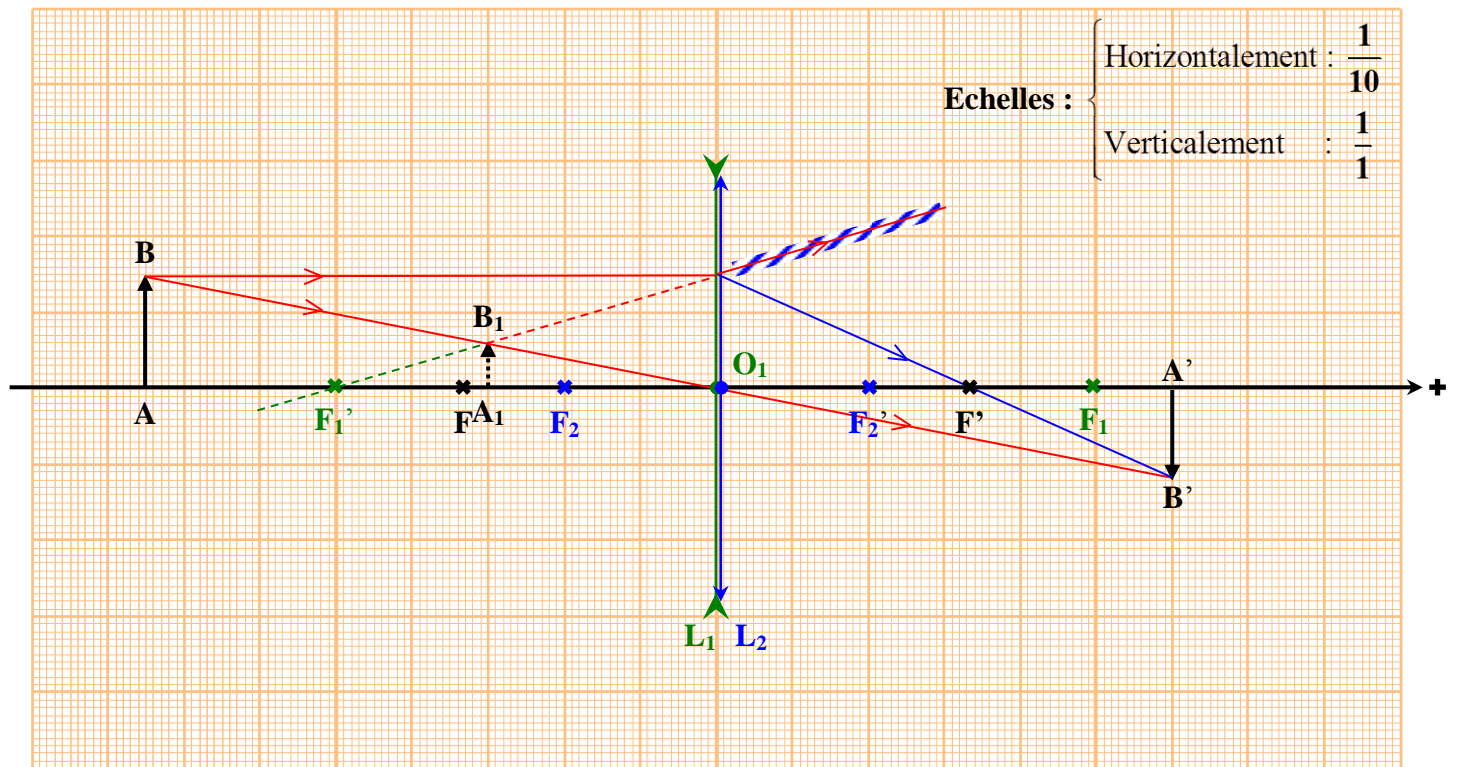
La figure ci-dessous représente l'axe optique principal d'une lentille mince ( $L_1$ ), un objet réel AB, et son image (virtuelle)  $A_1B_1$  donnée par la lentille.



- Déterminer graphiquement la position du centre optique  $O_1$  de la lentille.
- Déterminer la nature (convergente ou divergente) de la lentille ; la représenter, et déterminer graphiquement la position de son foyer principal image et de son foyer principal objet.
- En déduire la valeur de sa distance focale  $f_1$ , et la valeur de sa vergence  $C_1$ .
- Retrouver la valeur de la vergence à l'aide de la relation de conjugaison.
- Déterminer la valeur du grandissement  $\gamma_1$  de la lentille.
- Sachant que  $AB = 1,5 \text{ cm}$ , calculer la valeur de la taille de l'image  $A_1B_1$ .
- Une deuxième lentille mince ( $L_2$ ) de vergence  $C_2 = 5 \delta$ , et 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). Soit  $A'B'$  l'image de l'objet AB à travers le système formé par les deux lentilles accolées.
  - Quelle est la nature de la lentille ( $L_2$ ) ; la représenter, et représenter ses foyers principaux à l'échelle.
  - Montrer que  $\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = C_1 + C_2$ , et déterminer la position de l'image  $A'B'$  : quelle est sa nature ?
  - Vérifier que le grandissement du système formé par les deux lentilles accolées est  $\gamma = \gamma_1 \cdot \gamma_2$  ; déterminer sa valeur, et dire si l'image  $A'B'$  est droite ou renversée : la construire à l'échelle.
  - Construire la marche des rayons lumineux émergents du système : quelle est la nature de la lentille ( $L$ ) équivalente au système  $\{L_1, L_2\}$ , qui placée en O donnerait du même objet AB la même image  $A'B'$  ; indiquer ses foyers principaux F et F', et déterminer sa vergence C ; la comparer à  $C_1 + C_2$ , conclure.

- Le rayon incident issu de B passe par  $O_1$  sans déviation, et il passe par  $B_1 \Rightarrow O_1$  est à l'intersection de la droite (B,  $B_1$ ) avec l'axe optique principal.
- Le rayon incident issu de B qui arrive sur la lentille parallèlement à son axe optique principal, donne un rayon émergent dont le prolongement doit passer par  $B_1$  et rencontrer l'axe optique principal en  $F_1' \Rightarrow L_1$  est divergente.

$$3. f_1 = 5 \text{ cm} \cdot 10 = 50 \text{ cm} = 0,5 \text{ m} \Rightarrow C_1 = \frac{1}{O_1F_1'} = \frac{1}{-f_1} = -\frac{1}{0,5} : \boxed{C_1 = -2 \delta}$$



$$4. \frac{1}{O_1A_1} - \frac{1}{O_1A} = \frac{1}{O_1F_1'} = C_1 ; \text{ avec } \begin{cases} \overline{O_1A_1} = -3 \text{ cm} \cdot 10 = -30 \text{ cm} = -0,3 \text{ m} \\ \overline{O_1A} = -7,5 \text{ cm} \cdot 10 = -75 \text{ cm} = -0,75 \text{ m} \end{cases}$$

$$\text{D'où } C_1 = \frac{1}{-0,3} - \frac{1}{-0,75} = -\frac{1}{0,3} + \frac{1}{0,75} = -2 \delta$$

$$5. \gamma_1 = \frac{\overline{O_1A_1}}{\overline{O_1A}} = \frac{-0,3}{-0,75} : \boxed{\gamma_1 = 0,4}$$

$$6. \gamma_1 = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{AB}} \Rightarrow \overline{A_1B_1} = \gamma_1 \cdot \overline{AB} = 0,4 \cdot 1,5 \text{ cm} = 0,64 \text{ cm}$$

7.

$$a) C_2 = \frac{1}{OF_2'} > 0 \Rightarrow L_2 \text{ est convergente. } \overline{OF_2'} = \frac{1}{C_2} = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ m} = 20 \text{ cm} \xrightarrow{\text{Echelle}} 2 \text{ cm}$$

$$b) \begin{cases} L_1 \text{ donne de } AB, \text{ l'image } A_1B_1 : \frac{1}{OA_1} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{OF_1'} = C_1 \\ L_2 \text{ donne de } A_1B_1, \text{ l'image } A'B' : \frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA_1} = \frac{1}{OF_2'} = C_2 \end{cases} \Rightarrow \frac{1}{\cancel{OA_1}} - \frac{1}{OA} + \frac{1}{OA'} - \frac{1}{\cancel{OA_1}} = C_1 + C_2$$

$$\Rightarrow -\frac{1}{OA} + \frac{1}{OA'} = C_1 + C_2 : \frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = C_1 + C_2 : \text{ relation de conjugaison dans le système } \{L_1, L_2\}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{OA'} = \frac{1}{OA} + C_1 + C_2 = \frac{1}{-0,75} - 2 + 5 \Rightarrow \overline{OA'} = 0,6 \text{ m} = 60 \text{ cm} > 0 : \text{ image réelle.}$$

$$c) \begin{cases} \gamma_1 = \frac{\overline{OA_1}}{\overline{OA}} \\ \gamma_2 = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA_1}} \end{cases} \Rightarrow \gamma_1 \cdot \gamma_2 = \frac{\overline{OA_1}}{\overline{OA}} \cdot \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA_1}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = \gamma \Rightarrow$$

$$\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = \frac{60}{-75} = -0,8 < 0 \Rightarrow \text{image renversée de taille } A'B' \text{ tel que } \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = -0,8$$

$$\Rightarrow A'B' = 0,8 AB = 0,8 \cdot 1,5 \text{ cm} = 1,2 \text{ cm}$$

d) Le faisceau émergent du système étant convergent : L est convergente.

$$\text{Sa vergence est } C = \frac{1}{OF'} = \frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{0,6} - \frac{1}{-0,75} = 3 = C_1 + C_2$$

$\Rightarrow$  Deux lentilles accolées de vergences  $C_1$  et  $C_2$ , sont équivalentes à une lentille de vergence  $C_1 + C_2$ .

### Application-3 The Rochester Cloak, ou la cape d'invisibilité de l'université de Rochester (USA)



[...] Inspirés peut-être par la cape d'invisibilité d'Harry Potter, les scientifiques ont récemment développé plusieurs procédés [...] de camoufler des objets. Le dernier, développé à l'Université de Rochester, non seulement surmonte certaines des limitations des dispositifs précédents, mais il utilise des *matériaux peu coûteux et faciles à se procurer* [...]. John Howell [...] et son collaborateur Joseph Choi ont mis au point un montage de quatre lentilles ordinaires qui masque un objet *même si le spectateur s'éloigne de plusieurs degrés de la position de visualisation optimale*. [...] Plusieurs

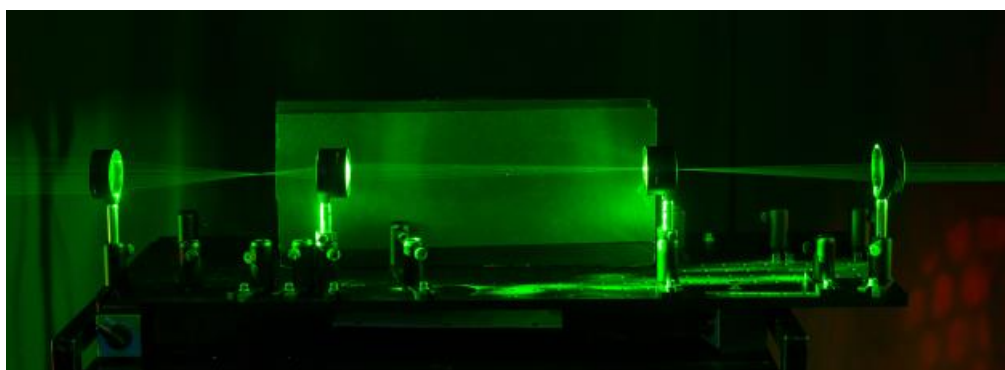
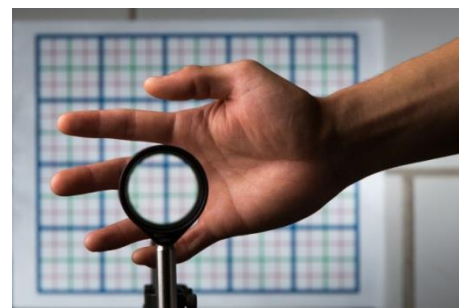
dispositifs de masquage fonctionnent bien lorsque vous regardez un objet directement, mais si vous déplacez votre point de vue même un peu, l'objet devient visible, explique Howell.

Choi ajoute que les dispositifs de masquage précédents peuvent également provoquer une altération de l'arrière-plan, ce qui rend évident l'existence d'un dispositif de masquage. [...] Pour tester leur dispositif, ils ont placé l'objet masqué devant un quadrillage en arrière-plan. Alors qu'ils regardaient à travers les lentilles et changeaient leur angle de vision en se déplaçant d'un côté à l'autre, *le quadrillage se déplaçait en conséquence comme si le dispositif de masquage n'était pas là*. [...]

Et, contrairement à certains autres dispositifs, [...] *cela fonctionne pour tout le spectre visible de lumière*. [...]

Mais ce n'était pas parfait. "Cette cape courbe la lumière et la transmet à travers le centre du dispositif, de sorte que la région sur l'axe ne peut pas être bloquée ou masquée," dit Choi. [...]

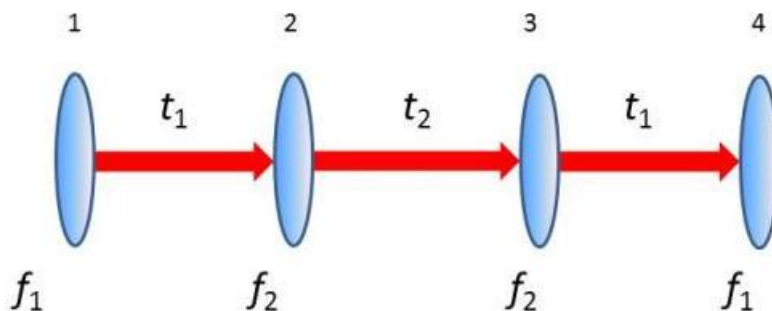
Il ajoute qu'ils ont des modèles un peu plus compliqués qui résolvent ce problème. [...]



[...] *Marche des rayons lumineux à travers le système, montrant les régions pouvant être utilisées pour masquer un objet*. [...]

Howell a des idées sur les applications potentielles, tel que permettre à un chirurgien de “regarder à travers ses mains sur ce qu’il opère,” il dit. Ou permettre aux conducteurs de camions de voir à travers les angles morts sur leurs véhicules. [...]

**Pour construire votre Rochester Cloak, suivez ces étapes simples :**

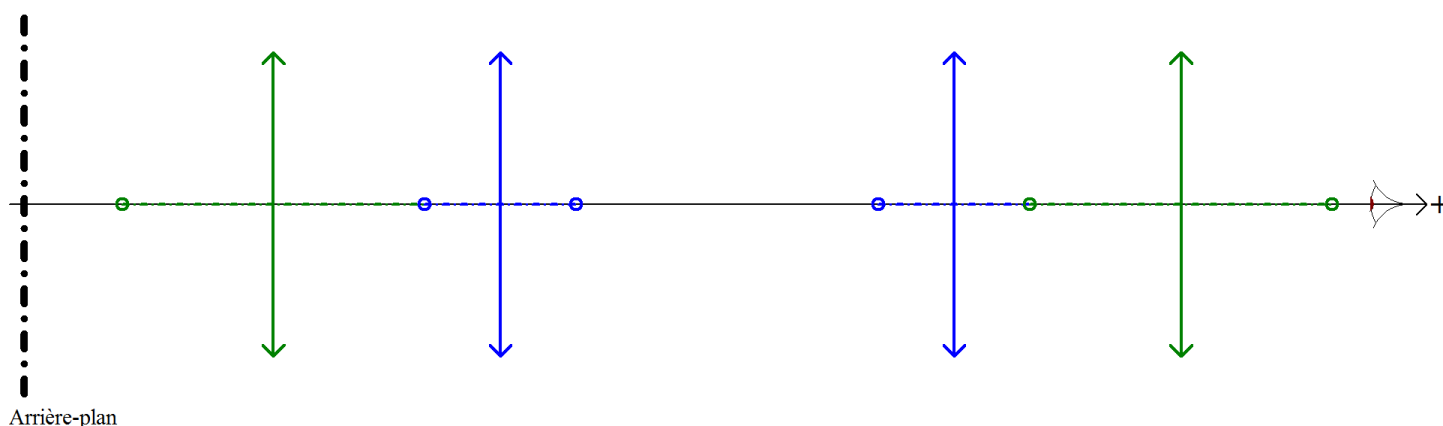


[...]

1. Acheter 2 ensembles de 2 lentilles avec différente longueur focale  $f_1$  et  $f_2$  [...]
2. Séparer les deux premières lentilles par la somme de leurs distances focales [...] ( $t_1 = f_1 + f_2$ ).
3. Faites la même chose à l'étape 2 pour les deux autres lentilles.
4. Séparer les deux ensembles par  $t_2 = 2 \cdot f_2 \cdot \frac{f_1 + f_2}{f_1 - f_2}$  [...]

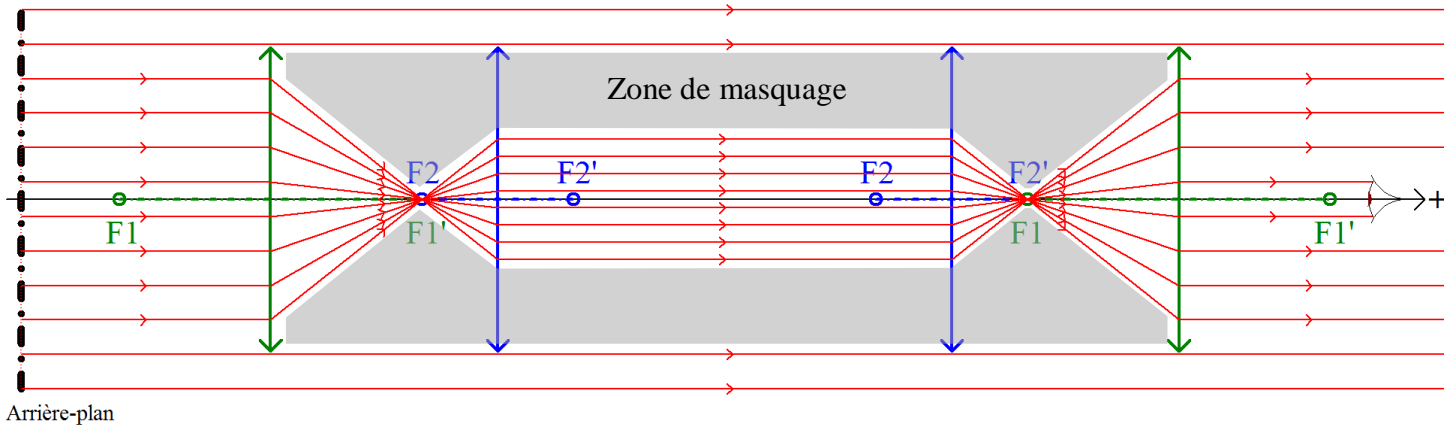
[bit.ly/rochester-cloak](http://bit.ly/rochester-cloak)

1. De quoi a-t-on besoin pour construire une Rochester Cloak ?
2. Citer quatre avantages du Rochester Cloak par rapport aux dispositifs qui l'ont précédé.
3. Quelle est la faille du Rochester Cloak pour le modèle décrit par le document; est ce qu'elle fut surmontée.
4. Proposer d'autres applications du Rochester Cloak.
5. La figure ci-dessous représente une Rochester Cloak construite avec des lentilles de distance focales  $f_1 = 20 \text{ cm}$  et  $f_2 = 10 \text{ cm}$



- a) Indiquer les foyers principaux de chaque lentille.
- b) Construire la marche des rayons lumineux issus de l'arrière-plan considéré à l'infini : que verra l'observateur ?
- c) Indiquez, en justifiant, les zones pouvant être utilisées pour masquer un objet.

1. 4 lentilles convergentes, chaque 2 lentilles ont une distance focale différente des 2 autres.
2. Matériaux peu coûteux et faciles à se procurer, fonctionne pour un angle de vision de plusieurs degrés, n'altère pas l'arrière-plan, fonctionne pour tout le spectre visible de la lumière.
3. La région sur l'axe ne peut pas être bloquée ou masquée ; ce problème fut surmonté avec des modèles un peu plus compliqués.
4. Laisser libre cours à votre imagination ! (toute situation où on a besoin de voir derrière un obstacle, ou on veut occulter un objet)
- 5.



- a)
- b) L'observateur verra l'arrière-plan sans aucune altération.
- c) Les zones pouvant être utilisées pour masquer les objets sont celles où l'objet n'intercepte pas le faisceau lumineux issu de l'arrière-plan, afin qu'il reste visible pour l'observateur.



**Application-4 Réfraction par les lentilles**

[...]

**Considérons d'abord une lentille biconvexe.**

Supposons que des rayons lumineux arrivent sur la lentille [...] parallèlement à son axe principal.

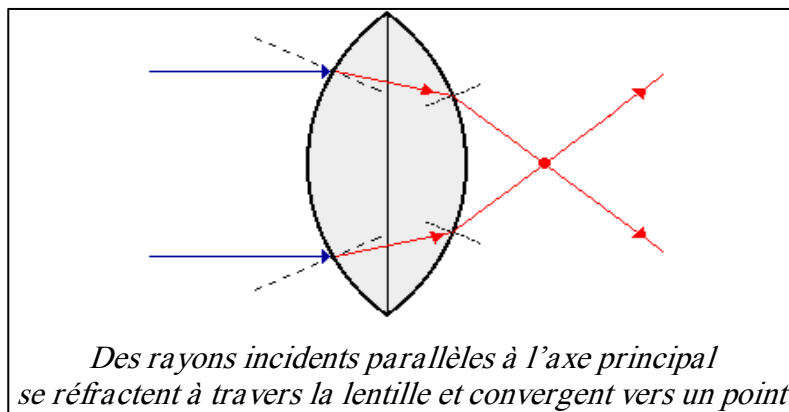
Au niveau de la face avant de la lentille, chaque rayon se réfracte vers la normale à la surface. A cette frontière, le rayon lumineux passe de l'air dans un milieu plus dense (souvent du verre ou du plastique). Comme il passe d'un milieu où il se propage plus rapidement [...] vers un milieu où il se propage relativement lentement [...], il dévie vers la normale. [...]. Une fois le rayon s'est réfracté à travers la frontière et pénétré la lentille, il se propage en ligne droite jusqu'à la face arrière de la lentille. A cette frontière, chaque rayon se réfracte en s'éloignant de la normale à la surface. Comme il passe d'un milieu où il se propage lentement [...] vers un milieu où il se propage plus rapidement [...], il dévie en s'éloignant de la normale [...].

[...]

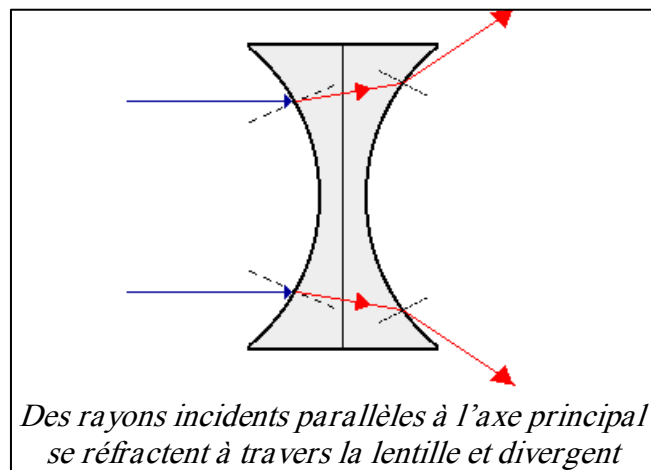
**Examinons maintenant la réfraction de la lumière par une lentille biconcave.** [...].

Au niveau de la face avant de la lentille, chaque rayon se réfracte vers la normale à la surface. [...].

Une fois le rayon s'est réfracté à travers la frontière et pénétré la lentille, il se propage en ligne droite jusqu'à la face arrière de la lentille. A cette frontière, chaque rayon se réfracte en s'éloignant de la normale à la surface. [...].



*Des rayons incidents parallèles à l'axe principal se réfractent à travers la lentille et convergent vers un point*



*Des rayons incidents parallèles à l'axe principal se réfractent à travers la lentille et divergent*

[bit.ly/Refraction-by-Lenses](http://bit.ly/Refraction-by-Lenses) 

1. Quel est le phénomène physique à l'origine des propriétés convergentes ou divergentes des lentilles ; en quoi il consiste précisément ?
2. A quoi est due la différence entre la vitesse de propagation de la lumière dans l'air est sa vitesse dans le matériau dont est constitué la lentille selon le document : quel autre notion convient mieux pour expliquer cette différence ?
3. Les mêmes phénomènes étant mis en jeu au niveau de chaque face de la lentille, qu'elle soit biconvexe ou biconcave : qu'est ce qui fait alors que la lentille biconvexe converge le faisceau lumineux, alors que la lentille biconcave le diverge ?

1. La réfraction : déviation d'un rayon lumineux à la traversée de l'interface entre deux milieux transparents où sa vitesse de propagation est différente.
  - \* En passant dans un milieu où sa vitesse de propagation est plus lente, il se rapproche de la normale à la surface de séparation.
  - \* En passant dans un milieu où sa vitesse de propagation est plus rapide, il s'éloigne de la normale à la surface de séparation.
2. Selon le document, la lumière se propage plus lentement dans un milieu plus dense ; cela n'est pas précis, il a fallu remplacer la notion de densité par la notion d'indice de réfraction ( $n$ ) : la lumière se propage plus lentement dans un milieu d'indice de réfraction plus élevé (milieu réfringent)
3. C'est la forme géométrique qui fait la différence entre une lentille convergente et une lentille divergente.

## TP 8 : Mesure de la distance focale, vérification expérimentale de la relation de conjugaison

### Objectifs :

- Déterminer la distance focale d'une lentille convergente par la méthode de l'objet à l'infini, par la méthode de Bessel, et par la méthode de Silbermann.
- Vérifier la relation de conjugaison dans le cas d'une lentille convergente.

### Matériel :

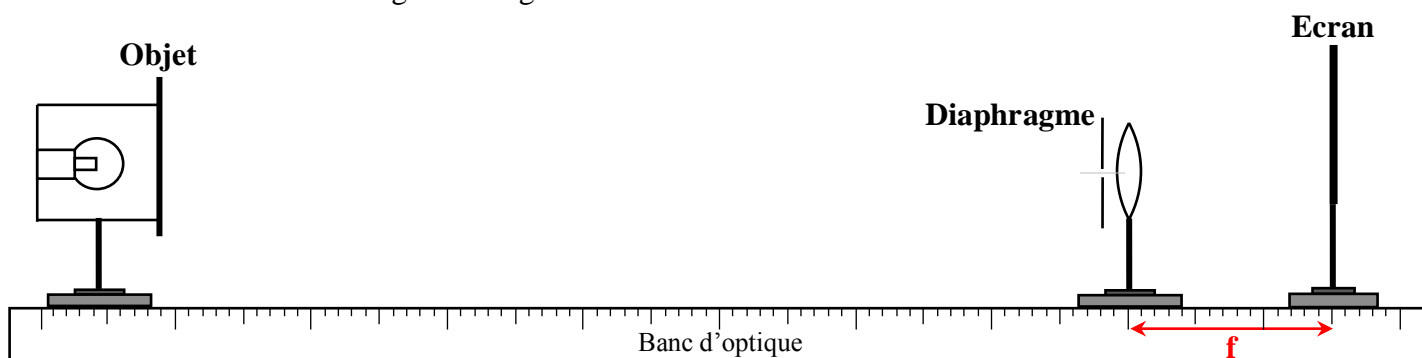
- |   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 Banc d'optique</li> <li>• 1 Lanterne</li> <li>• 1 Un objet en forme d'une lettre, adaptable à la lanterne</li> <li>• 1 Une lentille convergente sphérique</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diaphragme en iris</li> <li>• 1 Ecran</li> <li>• 4 Montures</li> </ul> |
|---|---|

### Manipulation :

#### 1. Détermination de la distance focale

##### a) Par la méthode de l'objet à l'infini

On considère le montage de la figure ci-dessous :



L'objet lumineux est une fente en forme d'une lettre, pratiquée dans un plan opaque éclairé par la lanterne. Il est disposé à une distance de 1,5 à 2 m de la lentille ; distance suffisamment grande par rapport à la distance focale de la lentille pour le considérer à l'infini.

- \* Comment arrivent, sur la lentille, les rayons lumineux issus de l'objet : **parallèlement à son axe principal**
- \* Comment ils émergent : **convergent vers le foyer principal image.**
- \* Où se forme alors l'image de l'objet : **dans le plan focal image.**
- \* Indiquer la distance focale ( $f$ ) si l'écran est placée à l'endroit où se forme l'image.

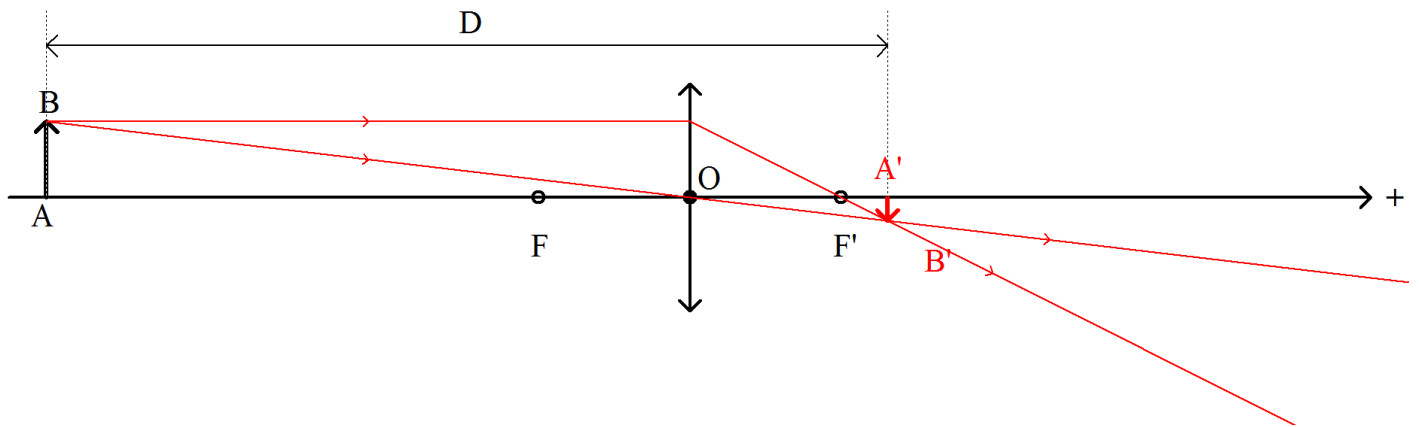
- Réaliser le montage, et ajuster la position de l'écran par rapport à la lentille jusqu'à avoir une image nette : donner la valeur de ( $f$ ) :  **$f \approx 10 \text{ cm}$**

##### b) Par la méthode de Bessel

Soit une lentille convergente de distance focale ( $f$ ) qui donne une image  $A'B'$  d'un objet réel  $AB$  (figure ci-dessous) : soit  $D = AA'$  ; montrer que si  $D > 4f$ , il y a une autre position ( $O'$ ) de la lentille où elle donne du même objet  $AB$  la même image  $A'B'$  à la même position, et vérifier que la position ( $O'$ ) est telle que

$$f = \frac{D^2 - d^2}{4D}, \text{ avec } d = OO'.$$





On a  $\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{OF'}$  ;  $\overline{OF'} = f$ , et soit  $\overline{OA'} = \overline{OA} + \overline{AA'} = \overline{OA} + D$  , la relation de conjugaison devient :

$$\frac{1}{\overline{OA} + D} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{\overline{OA} - \overline{OA} - D}{(\overline{OA} + D)\overline{OA}} = \frac{1}{f} \Rightarrow (\overline{OA} + D)\overline{OA} = -Df \Rightarrow (\overline{OA})^2 + D\overline{OA} + Df = 0 :$$

équation de second degré d'inconnu  $\overline{OA}$  :  $\Delta = D^2 - 4Df$

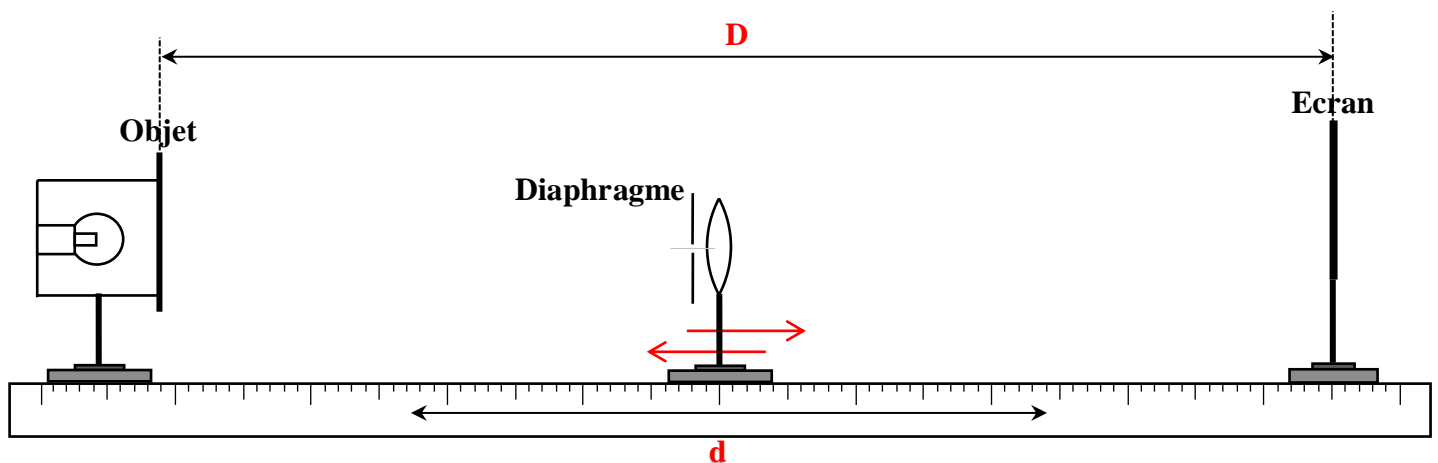
$\Delta$  s'annule pour  $D^2 = 4Df \Rightarrow D = 4f$  ; alors pour  $D > 4f$ ,  $\Delta > 0 \Rightarrow$  il y a 2 valeurs possibles pour  $\overline{OA}$  : la valeur correspondant à la position actuelle de la lentille, et une autre valeur correspondant à une autre position  $O'$  ;

$$\overline{OA} = \frac{-D - \sqrt{D^2 - 4Df}}{2} \text{ et } \overline{O'A} = \frac{-D + \sqrt{D^2 - 4Df}}{2}$$

$$\Rightarrow \overline{O'A} - \overline{OA} = \frac{-D + \sqrt{D^2 - 4Df} + D + \sqrt{D^2 - 4Df}}{2} \Rightarrow \overline{O'A} + \overline{AO} = \sqrt{D^2 - 4Df} \Rightarrow \overline{O'O} = \sqrt{D^2 - 4Df}$$

$$\Rightarrow (\overline{O'O})^2 = D^2 - 4Df \Rightarrow d^2 = D^2 - 4Df \Rightarrow 4Df = D^2 - d^2 \Rightarrow f = \frac{D^2 - d^2}{4D}$$

- ☑ Maintenir l'objet et l'écran fixes aux extrémités du banc, à une distance  $D = 1 \text{ m}$



- ☑ En déplaçant la lentille, repérer les deux positions qui donnent chacune une image nette sur l'écran. Puis mesurer la distance qui les sépare :  $d = 77 \text{ cm}$

- ☑ Calculer la valeur de la distance focale :  $f = \frac{D^2 - d^2}{4D} = \frac{1 - 0,77^2}{4} \approx 0,1 \text{ m} = 10 \text{ cm}$

**c) Par la méthode de Silbermann**

C'est un cas particulier de la méthode de Bessel, lorsque  $\Delta = 0$ .

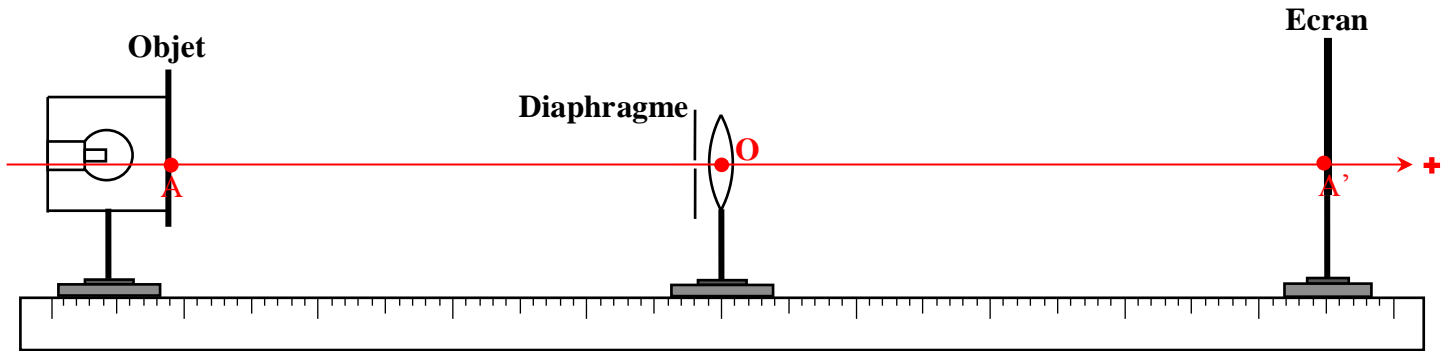
- \* Vérifier qu'il n'y a pas d'autre position pour la lentille où elle donne du même objet AB la même image A'B' à la même position :  $\Delta = 0 \Rightarrow$  l'équation admet une solution unique  $\overline{OA} = \frac{-D}{2}$
- \* Déterminer l'expression de la distance focale :  $\Delta = 0 \Rightarrow D = 4f \Rightarrow f = \frac{D}{4}$
- Abaisser la valeur de la distance D, en déplaçant l'écran, et ajuster la position de la lentille jusqu'à ce qu'elle n'ait qu'une seule position en laquelle elle donne une image nette :  $D \approx 40 \text{ cm} \Rightarrow f \approx 10 \text{ cm}$

**Rq :** Une lentille divergente donne d'un objet réel une image virtuelle donc impossible à récupérer sur un écran ; pour déterminer sa distance focale (f) on lui accole une lentille convergente de distance focale (f<sub>0</sub>) connue telle que l'ensemble soit convergent, puis on détermine la distance focale (f') de l'ensemble :

on sait que la vergence de l'ensemble est  $C' = C + C_0$ , alors  $C = C' - C_0 \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{f'} - \frac{1}{f_0} \Rightarrow f = \left( \frac{1}{f'} - \frac{1}{f_0} \right)^{-1}$

**2. Vérification expérimentale de la relation de conjugaison**
**a) Expérience**

On considère le montage de la figure ci-dessous, dont la lentille possède la distance focale  $f = 10 \text{ cm}$  :



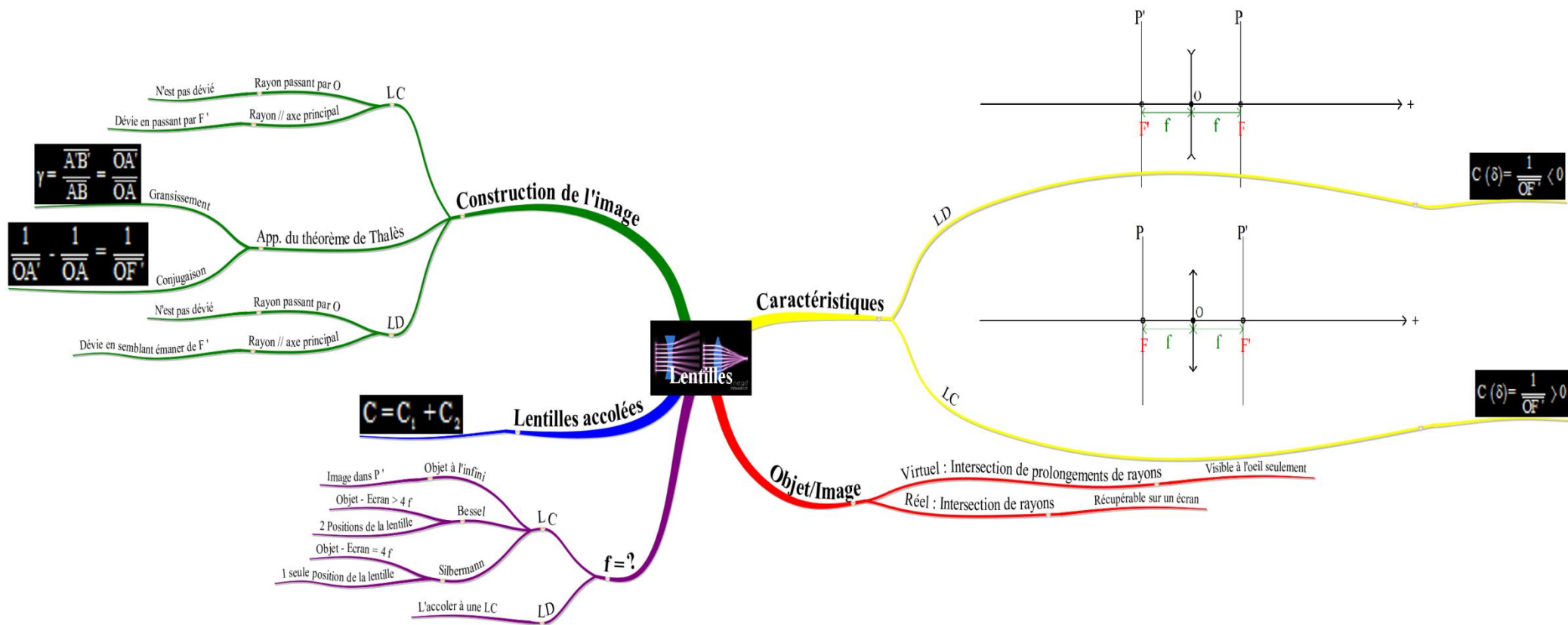
- \* Représenter l'axe optique principal de la lentille, et indiquer le sens de propagation de la lumière.
- \* Indiquer la position A de l'objet, et la position A' de l'image formée sur l'écran.
- En déplaçant la lentille donner à chaque fois à  $\overline{OA}$  la valeur indiquée dans le tableau ci-dessous ; puis chercher en déplaçant l'écran la position A' donnant une image nette : mesurer alors  $\overline{OA'}$  et la noter dans le tableau.
- Compléter le remplissage du tableau.

$\frac{1}{f} = \frac{1}{0,1} = 10 \text{ m}^{-1}$						
$\overline{OA}$ (m)	-0,15	-0,20	-0,30	-0,35	-0,60	-1,10
$\overline{OA'}$ (m)	0,3	0,2	0,15	0,14	0,12	0,11
$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}}$ (m <sup>-1</sup> )	10	10	10	10	10	10

**b) Conclusion**

$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f}$ , avec  $f = \overline{OF'}$  pour cette lentille convergente;

alors  $\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{\overline{OF'}}$  : relation de conjugaison



## Chapitre-2 : Instruments d'optique

### Objectifs

- Utiliser le modèle réduit de l'œil pour expliquer les défauts de la vision.
- Expliquer le principe de fonctionnement du microscope.

### Prérequis

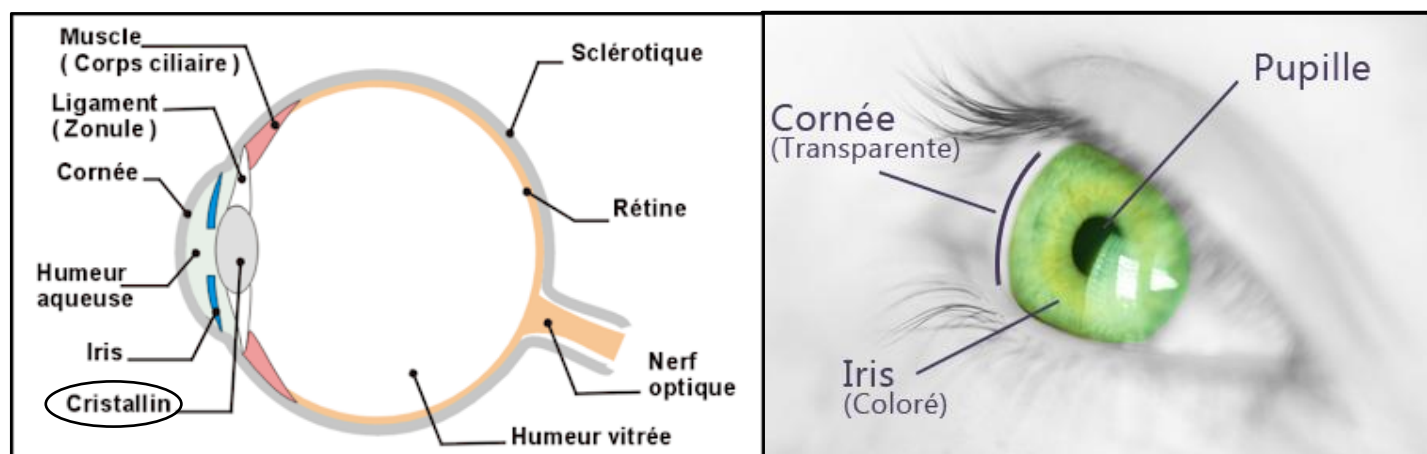
- Notion de source de lumière.
- Corps transparents, et principe de propagation rectiligne de la lumière.
- Types de faisceaux lumineux.
- Réflexion de la lumière par un miroir plan.
- Notion d'indice de réfraction.
- Lentilles : convergente/divergente, distance focale, vergence, construction de l'image, relation de conjugaison, et grandissement.

### Matériel

- \* Microscope & ses objectifs
- \* Lame & lamelle.

## I- L'œil

### Activité-1



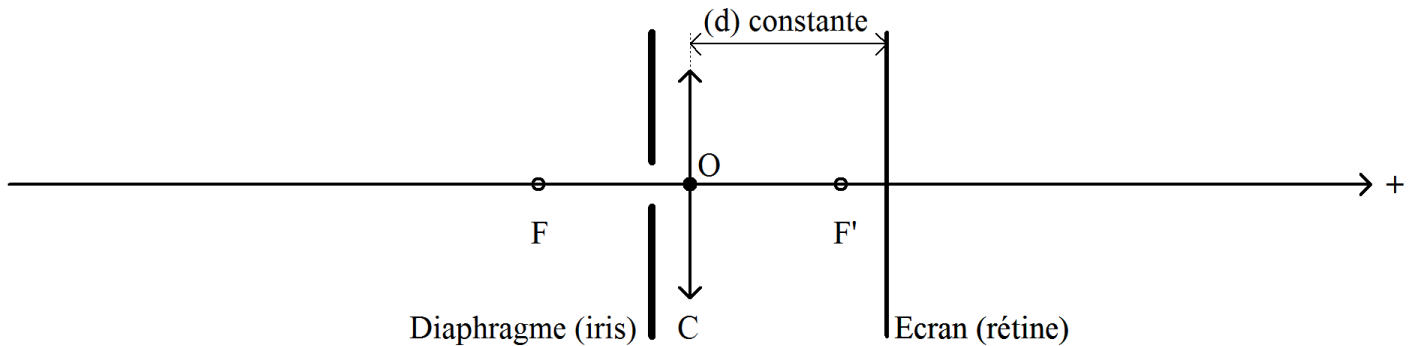
### Anatomie de l'œil ; l'instrument d'optique le plus extraordinaire

L'œil est un globe de diamètre moyen 2,5 cm chez l'espèce humaine ; il comprend notamment :

- **Cornée** : membrane transparente en contact avec l'air ambiant.
- **Humeur aqueuse** : liquide transparent.
- **Iris** : diaphragme, dont l'ouverture (**pupille**) s'ajuste spontanément en fonction de la luminosité.
- **Cristallin** : lentille convergente souple, dont la vergence s'ajuste spontanément en fonction de la distance à l'objet regardé, et cela par modification de sa courbure suite à la contraction/décontraction du (**corps ciliaire**) qui le presse via les ligaments (**zonules**) qui le maintiennent.
- **Humeur vitrée** : corps gélatineux transparent.
- **Rétine** : membrane très fine tapissant le fond de l'œil, constituée de plus de 130 000 000 de cellules nerveuses photosensibles qui transforment l'énergie lumineuse en signaux électriques, que le **nerf optique** achemine vers le cerveau.

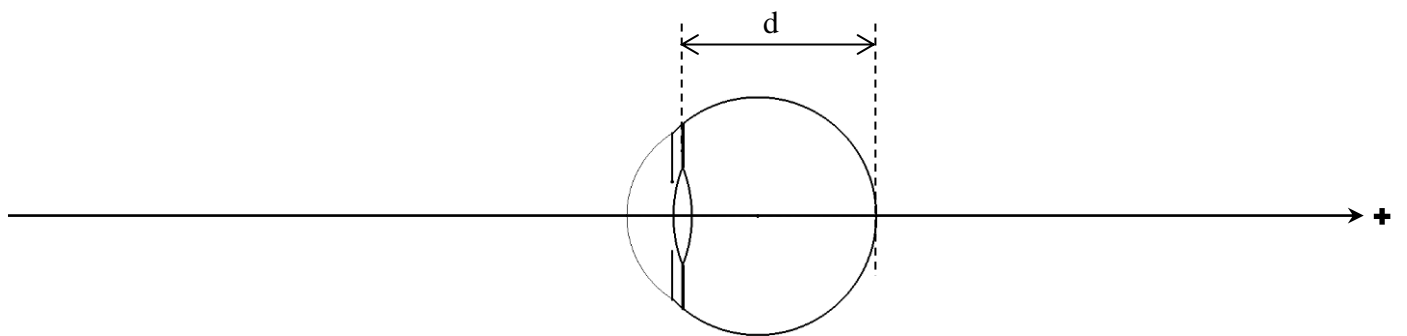
Pour que l'œil voit un objet, il faut qu'il reçoive de la lumière issue de cet objet ; cette dernière traverse l'ensemble des milieux transparents de l'œil (cornée → humeur aqueuse → *cristallin* → humeur vitrée), pour enfin atteindre la rétine où se forme l'image, avant de se diriger au cerveau via le nerf optique sous forme de signaux électriques.

- En examinant la forme des milieux transparents de l'œil ; dire si l'œil est convergent ou divergent; quelle partie de l'œil possède une vergence modifiable ?
- Soit  $C$  la vergence de l'ensemble des milieux transparents de l'œil ; elle est modifiable (par modification de celle du cristallin) entre une valeur minimale  $C_{\min}$  et une valeur maximale  $C_{\max}$ .  
Et pour simplifier, on représentera l'œil par le modèle de la figure ci-dessous (œil réduit) ; où la lentille mince convergente de vergence  $C$  modifiable représente l'ensemble des milieux transparents de l'œil, et l'écran représente la rétine.



(O) est confondu avec le centre du cristallin, et  $d \approx 17$  mm en moyenne

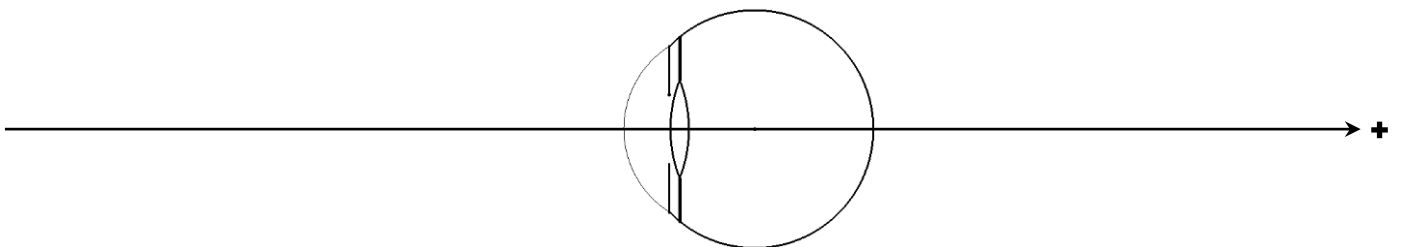
D'où le schéma simplifié de l'œil :



**a) Vision d'un objet très éloigné (à l'infini), par un œil normal :**

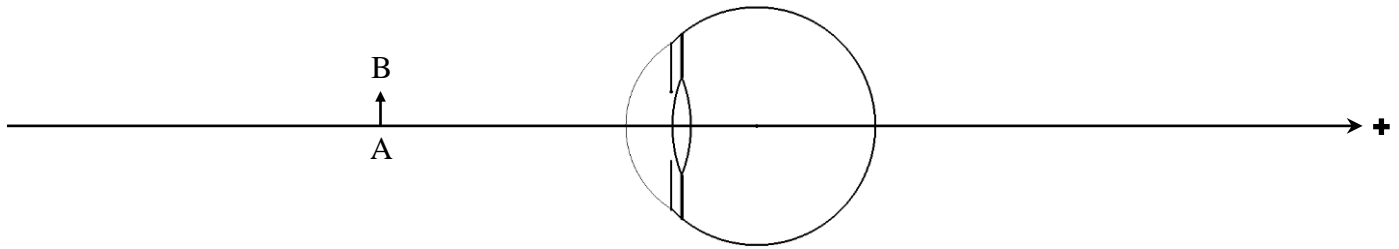
Lorsqu'on regarde un objet très éloigné on ne fait aucun effort, et la vision est nette ; l'œil est au repos (corps ciliaire relâché) : la courbure du cristallin est à son minimum.

- \* La vergence de l'œil, dans ce cas, est-elle à son minimum ou à son maximum ? qu'en est-il de sa distance focale ?
- \* Représenter, sur la figure ci-dessous, l'image  $A'$  d'un point lumineux  $A$  situé à l'infini ; indiquer le foyer image  $F'$  : où se trouvent  $F'$  et  $A'$  ?

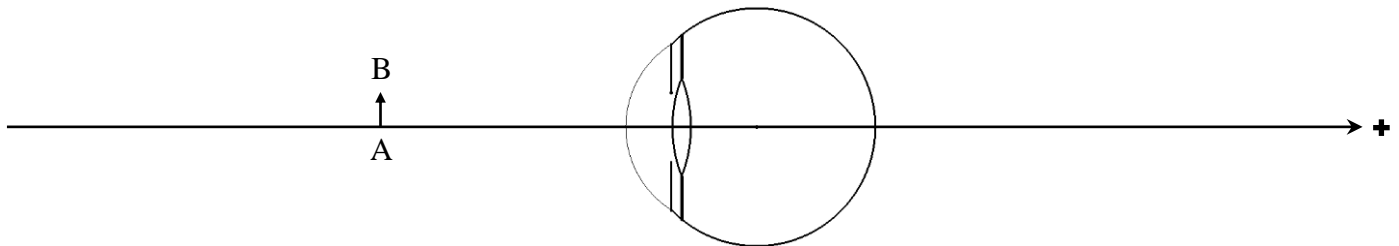


**b) Vision d'un objet rapproché, par un œil normal :**

- \* En supposant que le cristallin reste tel qu'il était en vision à l'infini ( $C = C_{\min}$ ) ; construire l'image A'B' de l'objet rapproché AB sur la figure ci-dessous : est-ce que la vision est nette ?



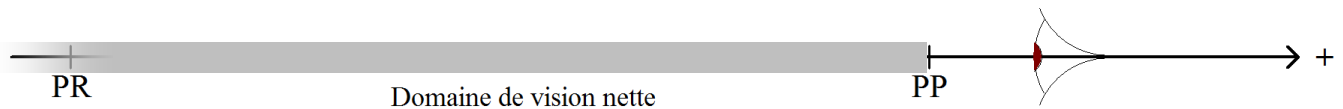
- \* Cependant, pour que la vision soit nette, l'œil a la faculté de ramener l'image sur la rétine : c'est l'**accommodation** : construire, sur la figure ci-dessous, l'image A'B' après l'accommodation et indiquer la nouvelle position du foyer principal image F' ; expliquer comment l'œil accommode, comment devient le cristallin ?



- \* Quelle sensation avez-vous expérimenté lorsque vos yeux accommodent pendant longtemps ?

**3. En ophtalmologie, on appelle ;**

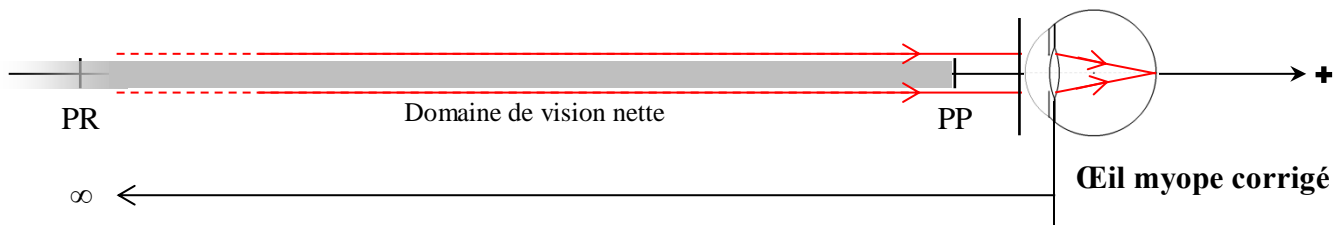
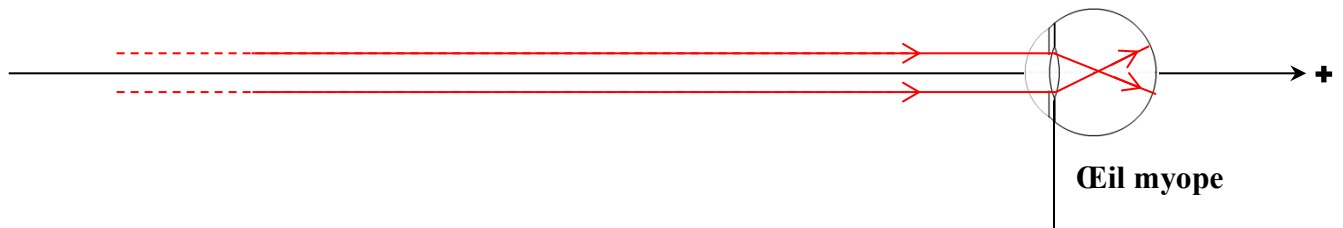
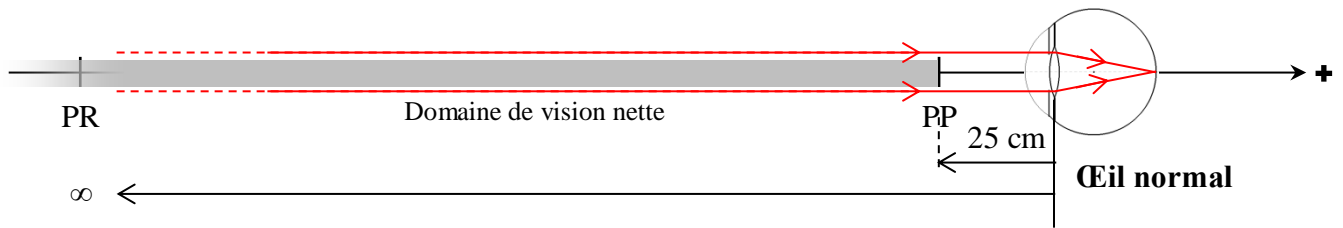
- **Punctum Remotum (PR)** le point le plus éloigné vu nettement *sans accommodation*, et
- **Punctum Proximum (PP)** le point le plus proche visible nettement ; il est à  $\sim 25$  cm pour un œil normal à l'âge adulte.



- A quelle distance se trouve le PR pour un œil normal ; comment sont-elles la vergence de l'œil et sa distance focale lorsqu'il regarde un point au PR ?
- Comment sont-elles la vergence de l'œil et sa distance focale lorsqu'il regarde un point au PP ?

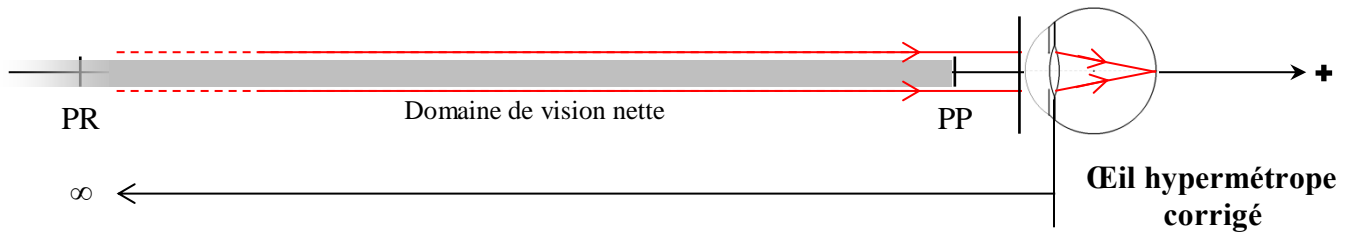
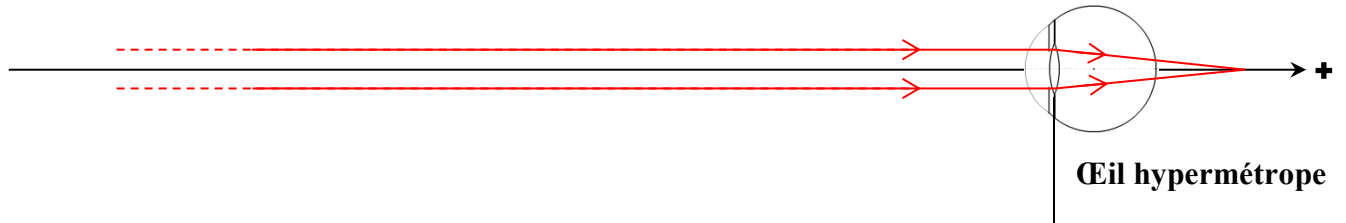
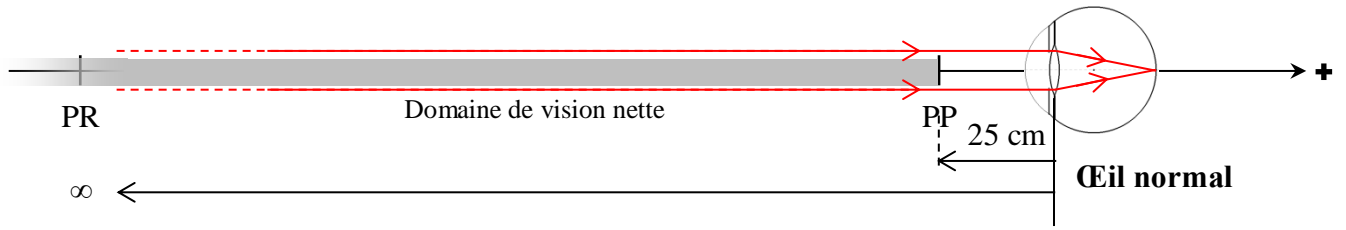
4. Les personnes dont le PR des yeux n'est pas à l'infini, ou le PP est différent de  $\sim 25$  cm, souffrent de troubles de vision ; cependant ces défauts de l'œil peuvent être corrigés par des lunettes ou des lentilles de contact :

a) La **myopie** ; la figure ci-dessous représente un œil normal, un œil myope, et l'œil myope corrigé :



- \* Par quoi se caractérise un œil myope : comment sont-ils alors son PP et son PR, expliquer et les indiquer sur la figure ?
- \* Quel type de lentille permet de le corriger, justifier et la représenter.

b) L'**hypermétropie** ; la figure ci-dessous représente un œil normal, un œil hypermétrope, et l'œil hypermétrope corrigé :



- \* Par quoi se caractérise un œil hypermétrope : comment sont-ils alors son PR et son PP, expliquer et les indiquer sur la figure ?
- \* Quel type de lentille permet de le corriger, justifier et la représenter.

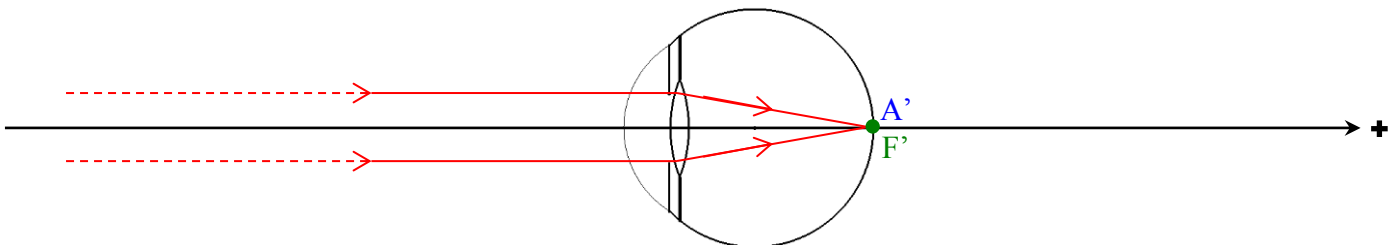
c) La **presbytie** ; en vieillissant, le cristallin devient de moins en moins souple, il perd progressivement sa capacité de se courber : quelles sont les conséquences, et comment y remédier ?

1. L'œil est convergent, le cristallin possède une vergence modifiable.

2.

a) Objet à l' $\infty$  :

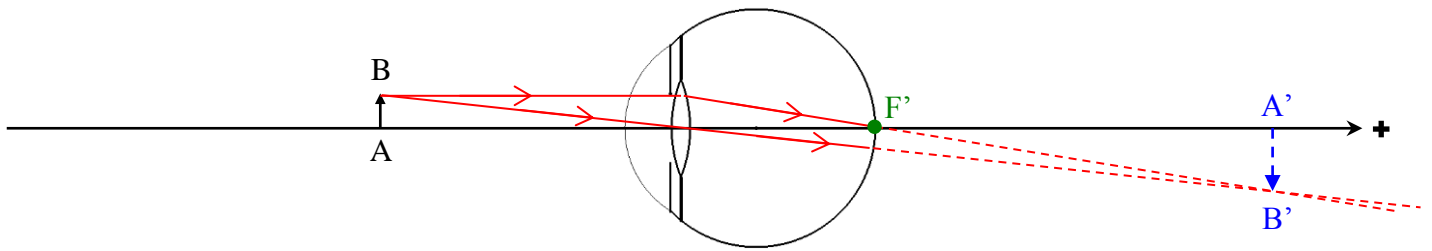
- \*  $C = C_{\min} \Rightarrow f = f_{\max}$
- \* Vision nette  $\Rightarrow$  image formée sur la rétine :  $A'$  et  $F'$  sont sur la rétine.





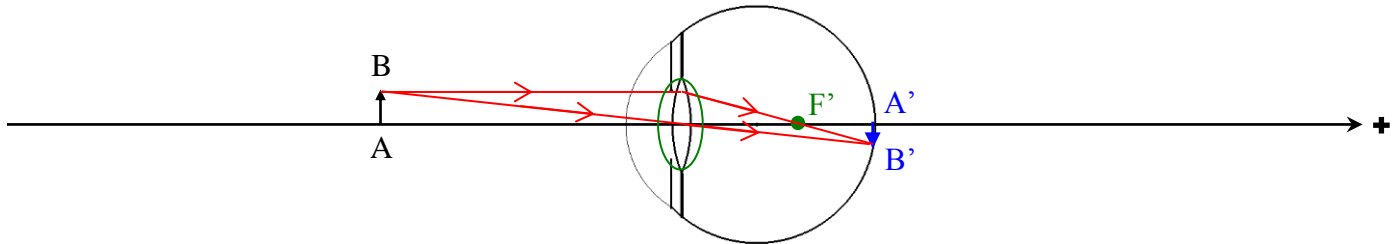
**b) Objet rapproché :**

\*



L'image ne peut se former nettement que derrière la rétine ; cela étant impossible, il se forme une image floue sur la rétine (une tache au lieu du point B', et de même pour les autres points entre A' et B')

\*



L'œil accommode en rapprochant son foyer principal image vers le cristallin  $\Rightarrow$  (f) diminue  $\Rightarrow$  (C) augmente : le cristallin devient plus courbé, cela se passe grâce à la pression qu'il reçoit du corps ciliaire via les zonules.

- \* L'accommodation est suivie de fatigue, et lorsqu'elle dure longtemps elle se manifeste par des maux aux yeux.

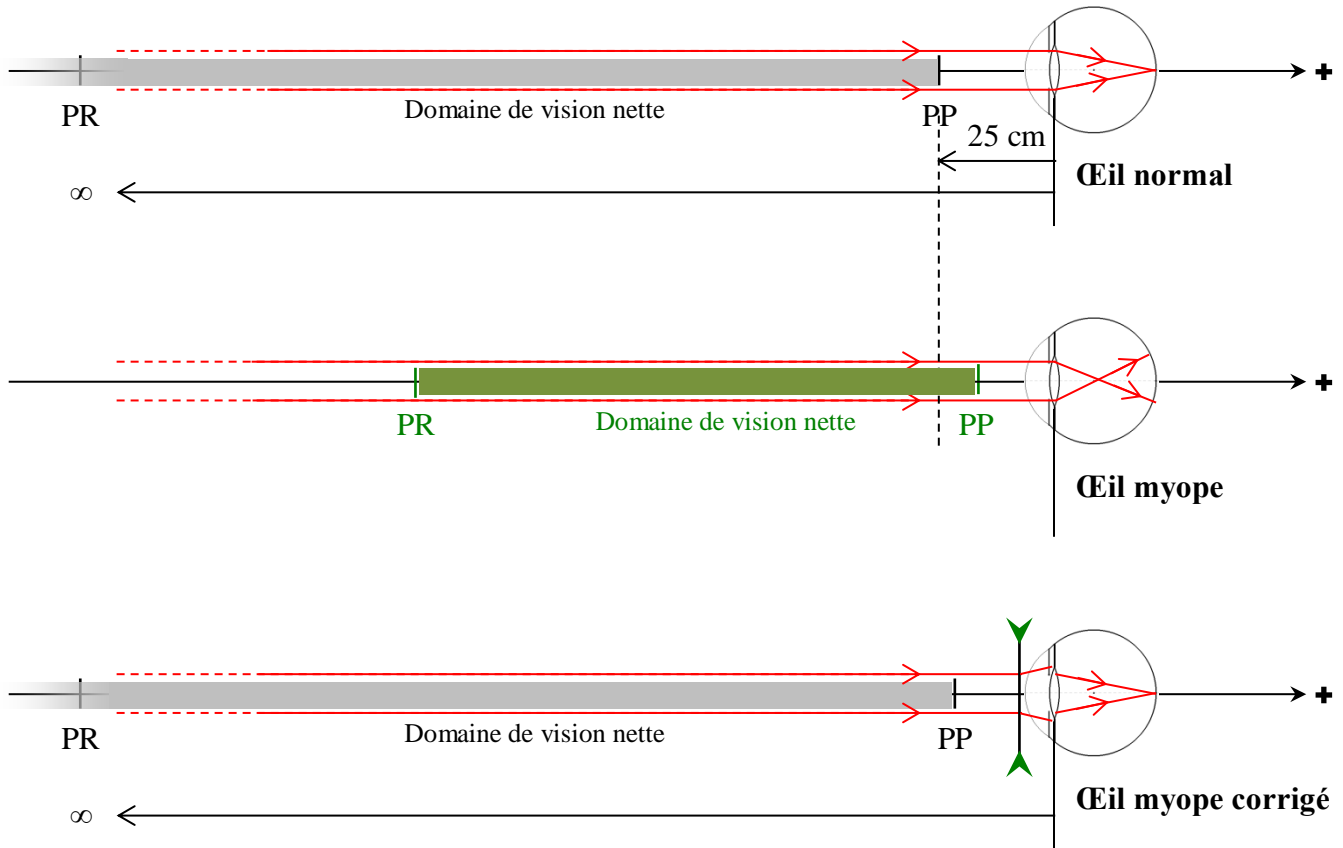
**3.**

- Pour un œil normal PR est à l' $\infty$  ; en regardant un point au PR, l'œil est au repos :  $C = C_{\min}$ ,  $\Rightarrow f = f_{\max}$ .
- Plus l'objet regardé devient proche, plus l'œil doit accommoder pour le distinguer : sa vergence augmente, jusqu'à atteindre son maximum au PP :  $C = C_{\max}$ ,  $\Rightarrow f = f_{\min}$ .

4.

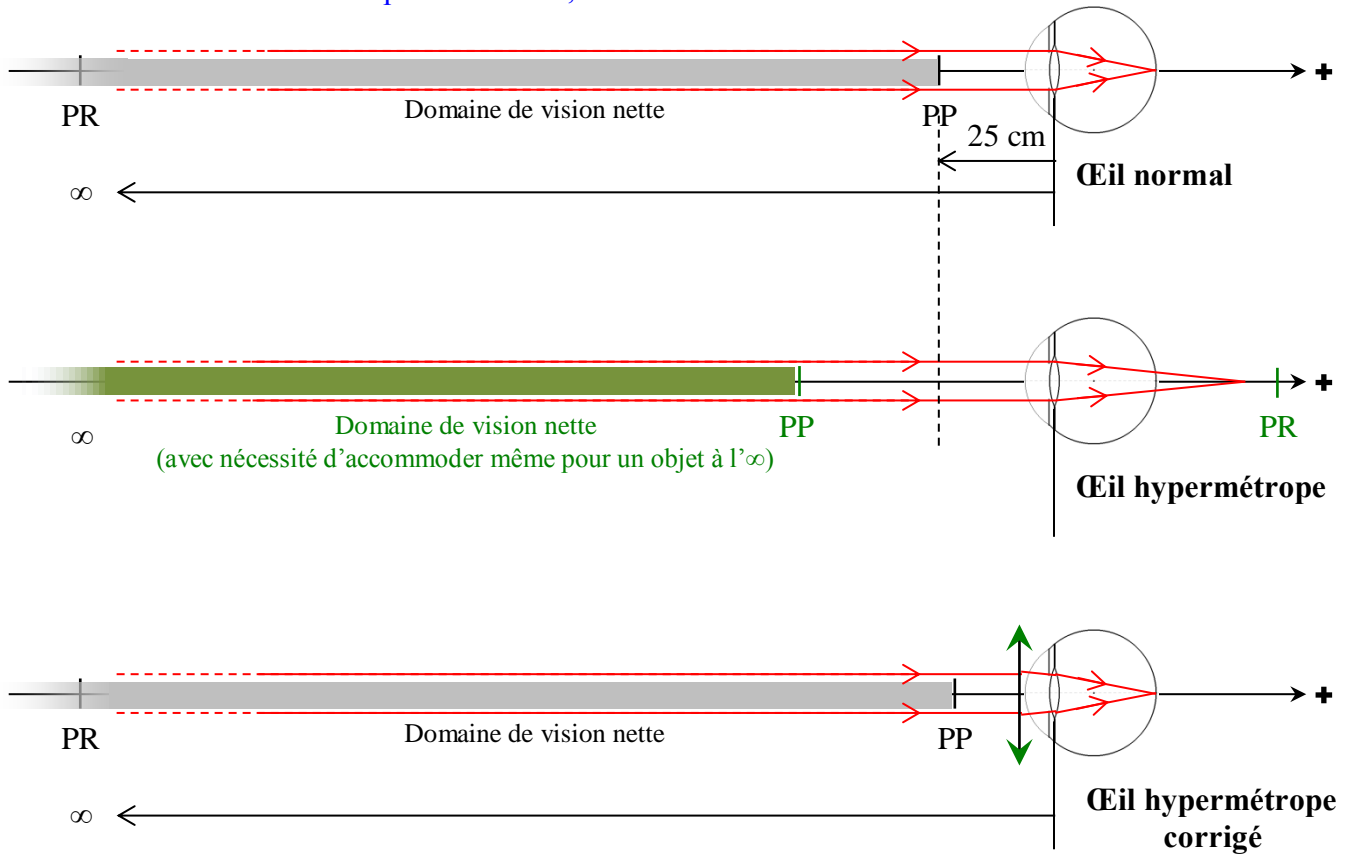
a)

- \* L'œil myope est trop convergent : l'image d'un point à l' $\infty$  se forme avant la rétine, elle est vue floue  $\Rightarrow$  son PR n'est pas à l' $\infty$ . Quant aux objets rapprochés l'œil peut accommoder plus que la norme  $\Rightarrow$  son PP est plus proche de l'œil.



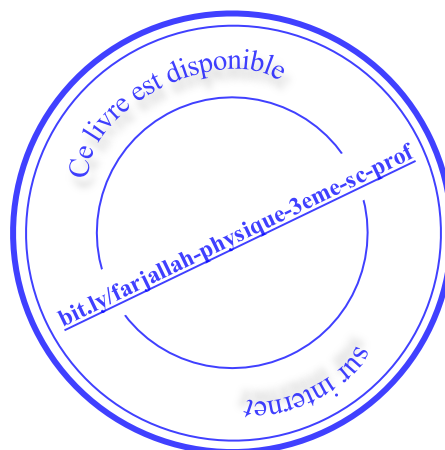
- \* Pour corriger un œil myope, il faut abaisser sa convergence en plaçant devant lui une lentille de vergence négative, donc divergente : le PR est de nouveau rejeté à l' $\infty$ .

- b)
- \* L'œil hypermétrope est peu convergent : l'image d'un point à l' $\infty$  se forme derrière la rétine, elle est vue floue  $\Rightarrow$  l'œil a besoins d'accommoder même en regardant à l' $\infty$   $\Rightarrow$  en regardant des objets de plus en plus proches son maximum d'accommodation est vite atteint  $\Rightarrow$  son PP est plus loin de l'œil. Il n'a pas de PR réel, sinon un PR virtuel derrière l'œil.



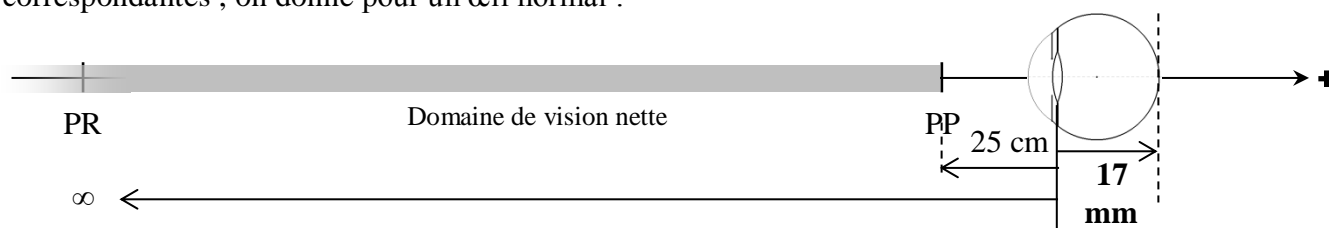
- \* Pour corriger un œil hypermétrope, il faut augmenter sa convergence en plaçant devant lui une lentille de vergence positive, donc convergente afin que l'image d'un point à l' $\infty$  soit ramenée sur la rétine sans que l'œil accomode : le PR est de nouveau rejeté à l' $\infty$  et il est réel.

- c) L'œil presbyte ne peut pas accommoder assez : si la vision au loin n'est pas touchée, la vision très rapprochée nette devient impossible car le PP est devenu trop éloigné. La correction se fait donc en portant des lunettes convergentes pour voir nettement les objets trop proches tel que lors de la lecture.

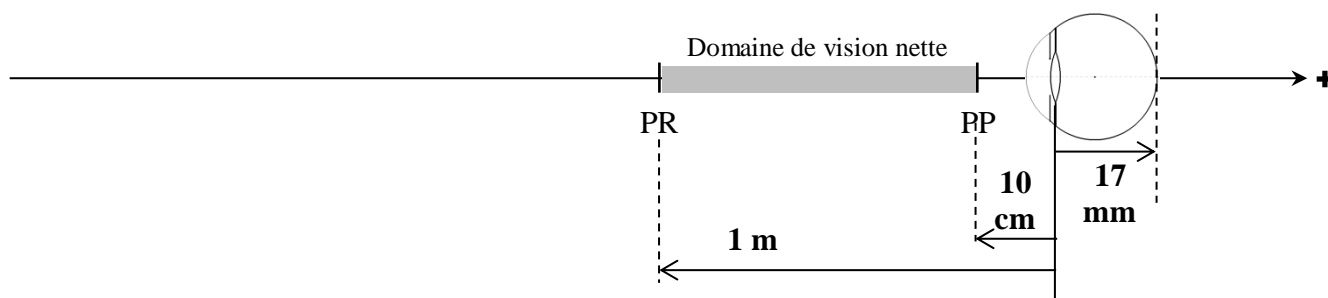


**Application-1**

1. Déterminer la vergence minimale, et la vergence maximale d'un œil normal, ainsi que les distances focales correspondantes ; on donne pour un œil normal :



2. L'examen d'un œil chez l'ophtalmologue donne un PR situé à **1 m** et un PP situé à **10 cm** de l'œil.



- De quel défaut souffre cet œil ?
  - Calculer sa vergence minimale  $C'_{\min}$ , et sa vergence maximale  $C'_{\max}$ . On admettra que la distance cristallin-rétine est de 17 mm.
  - Calculer la vergence  $C_0$  de la lunette à prescrire à cet œil pour le corriger; quelle est sa nature.
3. Une personne porte des lunettes de vergence  $C_0 = 5 \delta$ .
- De quel défaut souffrent ses yeux ?
  - Calculer leur vergence minimale  $C''_{\min}$ .
  - Déterminer la position de son PR, et vérifier qu'il est virtuel. On admettra que la distance cristallin-rétine est de 17 mm.

1. Soit A un point regardé par l'œil, et A' son image sur la rétine :  $\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = C$

\* Si A est au PR :  $\overline{OA} \rightarrow -\infty$ , et  $\overline{OA'} = 17 \text{ mm} \Rightarrow \frac{1}{17 \cdot 10^{-3}} - 0 = C_{\min} \Rightarrow \boxed{C_{\min} = 58,8 \delta}$

La distance focale est maximale  $f_{\max} = 17 \text{ mm} \left( \text{Rq : } C_{\min} = \frac{1}{f_{\max}} = \frac{1}{17 \text{ mm}} = 58,8 \delta \right)$

\* Si A est au PP :  $\overline{OA} = -25 \text{ cm}$ , et  $\overline{OA'} = 17 \text{ mm} \Rightarrow$

$$\frac{1}{17 \cdot 10^{-3}} - \frac{1}{-25 \cdot 10^{-2}} = C_{\max} \Rightarrow \boxed{C_{\max} = 62,8 \delta}$$

La distance focale est minimale  $f_{\min} = \frac{1}{C_{\max}} = \frac{1}{62,8} = 0,0159 \text{ m} = 15,9 \text{ mm}$

2.

- a) PR n'est pas à l' $\infty$ , et PP trop proche de l'œil  $\Rightarrow$  myopie.

- b) Soit A un point regardé par l'œil, et A' son image sur la rétine :  $\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = C'$ , avec  $\overline{OA'} = 17 \text{ mm}$

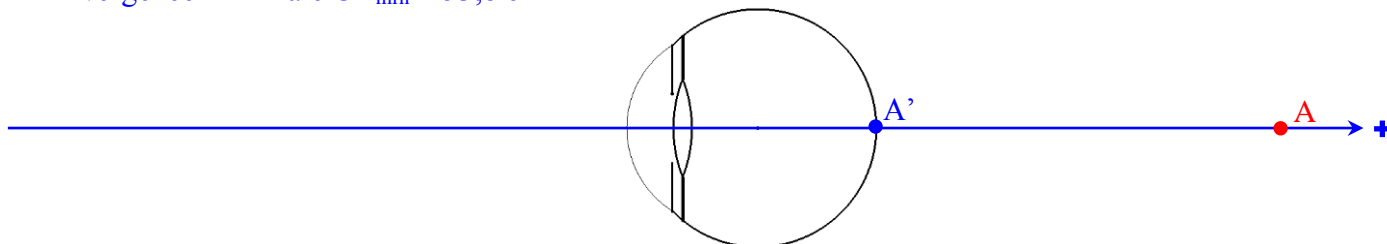
\* Si A est au PR :  $\overline{OA} \rightarrow -1 \text{ m} \Rightarrow \frac{1}{17 \cdot 10^{-3}} - \frac{1}{-1} = C'_{\min} \Rightarrow \boxed{C'_{\min} = 59,8 \delta}$

\* Si A est au PP :  $\overline{OA} = -10 \text{ cm} \Rightarrow \frac{1}{17 \cdot 10^{-3}} - \frac{1}{-0,1} = C'_{\max} \Rightarrow \boxed{C'_{\max} = 68,8 \delta}$

- c) La vergence du système {Lunette, oeil} étant  $(C' + C_0)$  ; la valeur de  $C_0$  doit être telle que le PR soit rejeté à  $l'∞ \Rightarrow$  pour un point regardé au PR, il faut que  $C'_{\min} + C_0 = C_{\min}$  (celle de l'œil normal).  
 D'où  $C_0 = C_{\min} - C'_{\min} = 58,8 - 59,8 : \boxed{C_0 = -1 \delta}$  : lentille divergente.

3.

- a)  $C_0 > 0 \Rightarrow$  les lentilles portées sont convergentes  $\Rightarrow$  hypermétropie.  
 b) La vergence du système {Lunette, oeil} étant  $(C'' + C_0)$  ; la valeur de  $C_0$  est telle que le PR est à  $l'∞$ , or pour un point regardé nettement à  $l'∞$ ,  $C''$  est à son minimum :  $C''_{\min} + C_0 = C_{\min}$  (celle de l'œil normal).  
 D'où  $C''_{\min} = C_{\min} - C_0 = 58,8 - 5 : \boxed{C''_{\min} = 53,8 \delta}$   
 c) Soit A un point lumineux situé au PR de cet œil ; son image A' est vue nettement sur la rétine avec la vergence minimale  $C''_{\min} = 53,8 \delta$



$$* \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = C''_{\min}, \text{ avec } \overline{OA'} = 17 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\overline{OA}} = \underbrace{\left( \frac{1}{17 \text{ mm}} \right)}_{C''_{\min}} - C''_{\min} = C_{\min} - C''_{\min} = C_0 \Rightarrow \overline{OA} = \frac{1}{C_0} = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ m} : \boxed{\overline{OA} = 20 \text{ cm}}$$

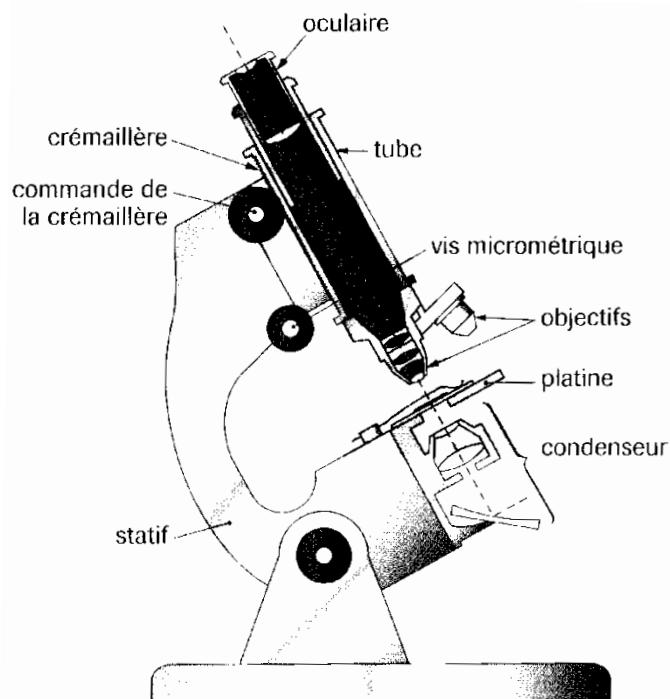
$$* \overline{OA} > 0 ; \text{ donc le PR est situé derrière l'œil.}$$

## II- Le microscope

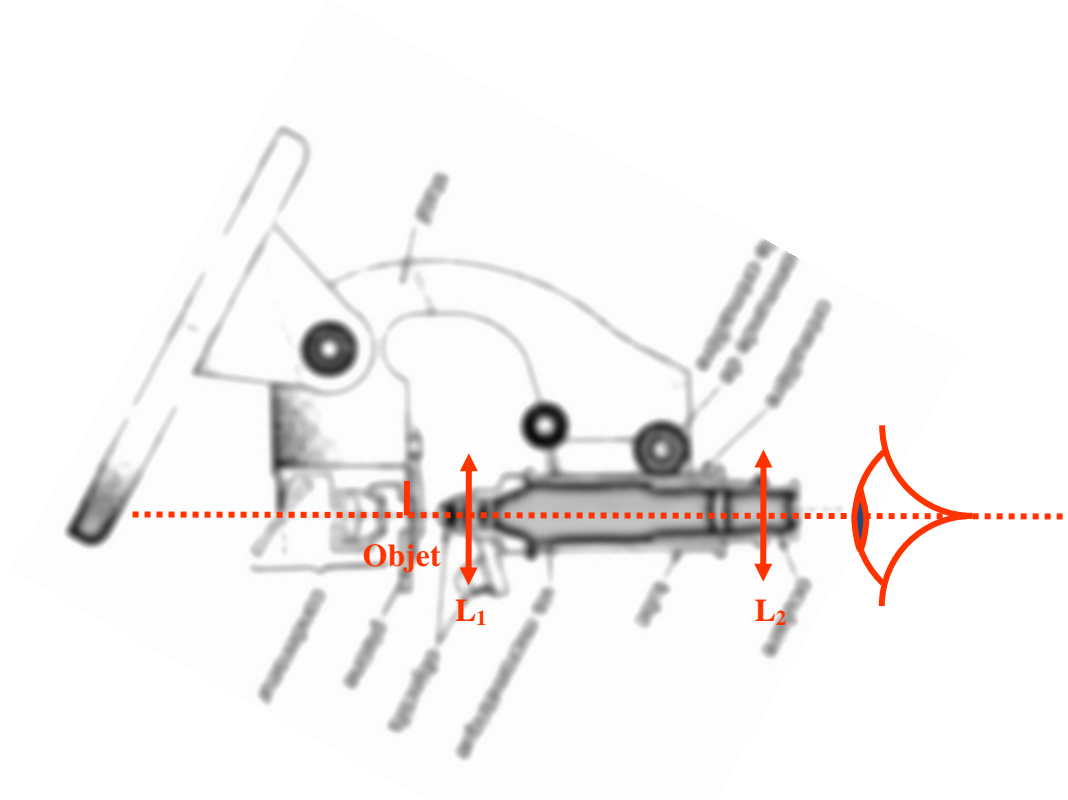
### Activité-2

Le microscope est un instrument d'optique constitué essentiellement de :

- **Condenseur** : un système optique constitué d'un miroir concave associé à une lentille convergente, qui concentre fortement la lumière sur l'objet à examiner (porté par la **platine**) ; l'objet est alors observé par transparence.
- **Objectif** : un système optique constitué d'une association de plusieurs lentilles, équivalente à une seule lentille très convergente, placé près de l'objet à examiner.
- **Oculaire** : un système optique constitué d'une association de plusieurs lentilles, équivalente à une seule lentille convergente.
- **Tube** opaque, aux extrémités duquel sont placés l'objectif et l'oculaire : ils sont ainsi *maintenus à une distance fixe* l'un de l'autre ; le bloc {tube, objectif, oculaire} est solidaire d'une **crémaillère** permettant de le translater, grossièrement via la **commande de crémaillère** et finement via le **vis micrométrique**.



Dans ce qui suit, on modélise le microscope comme le montre la figure ci-dessous :



$L_1$  et  $L_2$  ont le même axe optique principal, et sont fixes l'une par rapport à l'autre.

- $L_1$  est la "lentille" objectif de distance focale ( $f_1$ ) de l'ordre du **mm** ; et qu'on peut choisir parmi plusieurs fournies par le fabricant, en fonction de la petitesse de l'objet examiné :



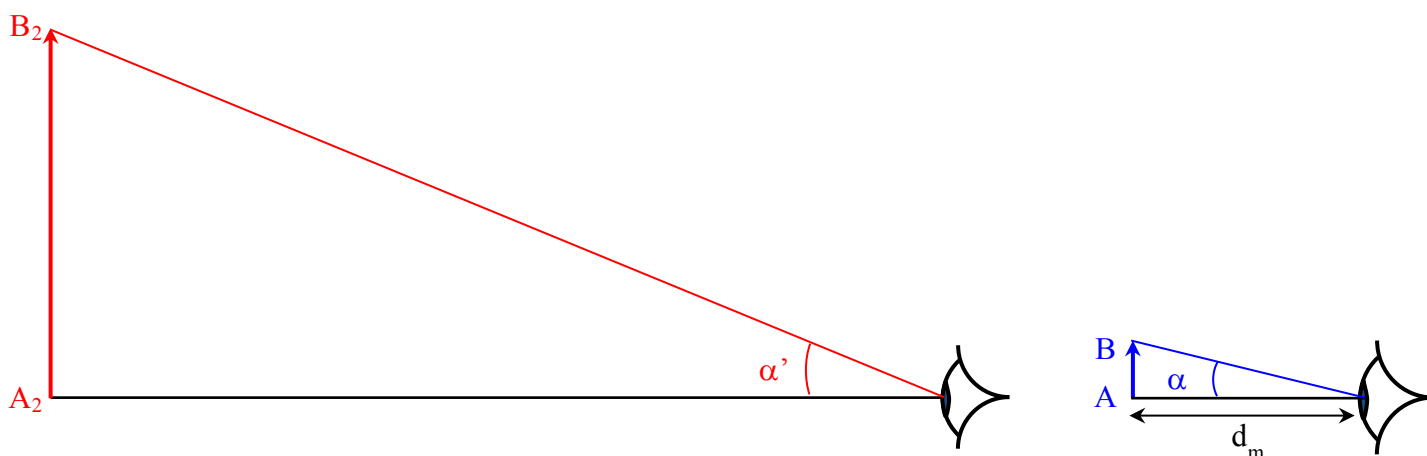
- $L_2$  est la "lentille" oculaire de distance focale ( $f_2$ ) de l'ordre du **cm** :



1. On considère le modèle de microscope de la **Figure-1** ci-dessous :
  - a) Indiquer les foyers principaux objet et image de  $L_1$  et  $L_2$ .
  - b) Les fabricants de microscopes appellent **intervalle optique** ; la distance  $\Delta = \overline{F_1'F_2}$  entre le foyer principal image de l'objectif, et le foyer principal objet de l'oculaire (de l'ordre de 16 à 18 cm) : indiquer le sur la figure.
2. AB étant l'objet à examiner via le microscope :
  - a) Construire sur la **Figure-1** l'image intermédiaire  $A_1B_1$  de AB à travers l'objectif, et donner ses caractéristiques : quel rôle joue-t-elle pour l'oculaire ?
  - b) Construire  $A_2B_2$ , l'image de  $A_1B_1$  à travers l'oculaire (image définitive de AB à travers le microscope); donner ses caractéristiques (par rapport à l'objet).
3. On appelle *mise au point* du microscope; le réglage de la position du bloc {tube, objectif, oculaire} par rapport à l'objet, afin d'observer son image définitive au travers du microscope sans que l'œil (normal) ait à accommoder :
  - a) Où se forme l'image définitive  $A_2B_2$  dans ce cas ? Où doit alors se former l'image intermédiaire  $A_1B_1$  ?
  - b) La **Figure-2** modélise un microscope mis au point pour examiner un objet AB :
    - \* Qu'est-ce qu'on a modifié par rapport à la **Figure-1** ?
    - \* Essayer de construire l'image définitive dans ce cas ; donner ses caractéristiques.
  - c) Montrer que la position de l'objet dans ce cas est telle que  $O_1A = \frac{f_1 (f_1 + \Delta)}{\Delta}$  :  
calculer sa valeur pour un microscope dont  $f_1 = 4 \text{ mm}$  et  $\Delta = 16 \text{ cm}$  : commenter.
  - d) Que se passe-t-il si on abaisse la distance  $O_1A$  ; est ce que l'image reste visible nettement ? jusqu'à quelle limite ?
  - e) Cette distance séparant deux positions du point objet A dont les images à travers le microscope se forment l'une au PR et l'autre au PP d'un œil normal, est appelée latitude de mise au point du microscope : qu'en dites-vous de sa valeur ?
4. **Grossissement** du microscope (et non grandissement !) :

L'image définitive étant à l' $\infty$ , on ne peut plus caractériser le microscope par un grandissement  $\frac{A_2B_2}{AB}$  ;  
 cependant ; plus l'image est grande, plus on la voit sous un angle plus grand ( $\alpha'$ ) comparé à l'angle ( $\alpha$ ) sous lequel on "voit" l'objet à l'œil nu :

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} \text{ est par définition le grossissement commercial du microscope.}$$

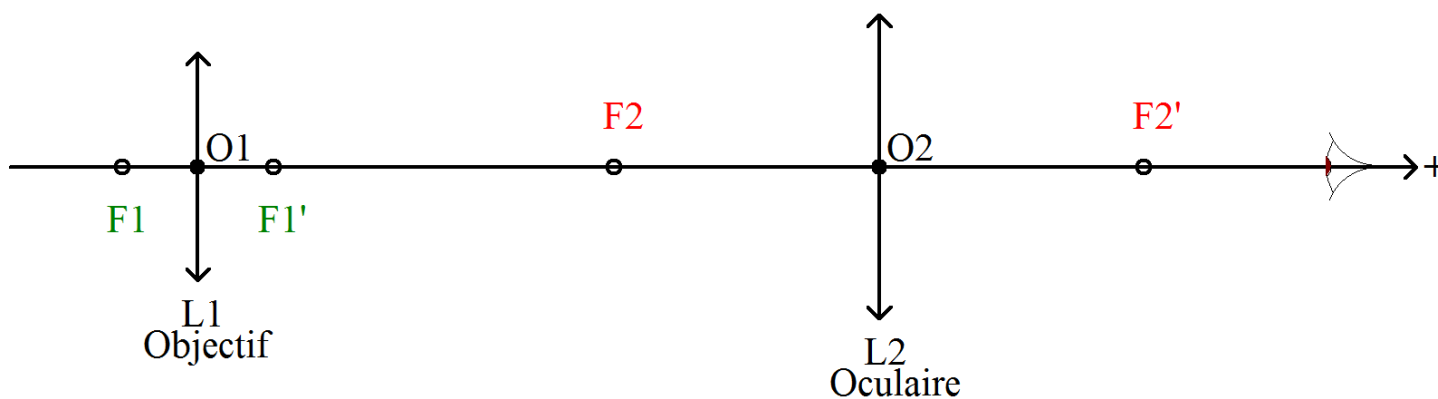


$d_m$  est par convention la distance minimum de vision distincte pour un œil normal (son PP, 25 cm)



- a)  $(\alpha)$  étant infiniment petit ; l'exprimer en fonction de AB et  $d_m$ .
- b) Indiquer  $(\alpha')$  sur la **Figure-2**, et montrer que  $\alpha' \approx \frac{AB \cdot \Delta}{f_1 \cdot f_2}$  (on fera l'approximation  $\alpha' \text{ (rad)} \approx \text{tg } \alpha'$ ).
- c) En déduire l'expression du grossissement commercial G ; commenter.
- d) Les fabricants n'indiquent ni les distances focales  $f_1$  et  $f_2$ , ni l'intervalle optique  $\Delta$  sur leurs microscopes ; ils indiquent plutôt :
- Le grandissement, en valeur absolue,  $|\gamma_1|$  de chaque objectif ; tel que  $\times 10, \times 20, \times 30 \dots$  etc.
  - Le grossissement commercial  $G_2$  de l'oculaire ; tel que  $\times 5, \times 10, \times 12 \dots$  etc
- et c'est à l'utilisateur de calculer le grossissement G qu'il utilise :
- montrer que  $G = |\gamma_1| \cdot G_2$ , avec  $G_2 = \frac{d_m}{f_2}$ .

5. On appelle cercle oculaire d'un microscope ; l'image de la monture de son objectif à travers son oculaire : l'œil doit être placé au niveau du cercle oculaire pour recevoir le maximum de lumière émergente de l'objet, et qu'ainsi l'image soit la plus lumineuse possible : construire le cercle oculaire sur la figure ci-dessous :



6. Compléter : **Le microscope** est un système optique modélisé par .....

.....

Dans le cas où l'œil n'accomode pas, l'objectif donne d'un petit objet .....

..... située dans .....

L'image définitive observée à travers l'oculaire est .....

.....

- 1.
- a)
- b)
- 2.
- a)  $A_1B_1$  est une image réelle et renversée, jouant le rôle d'objet pour l'oculaire.
- b)  $A_2B_2$  est une image virtuelle renversée et agrandie.
- 3.
- a) L'image définitive  $A_2B_2$  se forme à l' $\infty$  (PR d'un œil normal)  $\Rightarrow$  l'image intermédiaire  $A_1B_1$  doit se former dans le plan focal objet de l'oculaire.
- b)
- \* La position du bloc {tube, objectif, oculaire} par rapport à l'objet est modifiée.
  - \* Image virtuelle renversée rejetée à l' $\infty$ , et donc trop agrandie.



c)

$$* \frac{1}{O_1A_1} - \frac{1}{O_1A} = \frac{1}{O_1F_1'}; \text{ avec } \begin{cases} \overline{O_1A_1} = f_1 + \Delta \\ \overline{O_1A} = -O_1A \\ \overline{O_1F_1'} = f_1 \end{cases} : \frac{1}{f_1 + \Delta} + \frac{1}{O_1A} = \frac{1}{f_1} \Rightarrow \frac{1}{O_1A} = \frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_1 + \Delta}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{O_1A} = \frac{f_1 + \Delta - f_1}{f_1(f_1 + \Delta)} \Rightarrow O_1A = \frac{f_1(f_1 + \Delta)}{\Delta} = \frac{0,004(0,004 + 0,16)}{0,16} = 0,0041 \text{ m} = 4,1 \text{ mm}$$

\* L'objet est à 1 mm du foyer principal objet de l'objectif, il en est très proche ; d'où l'intérêt du vis micrométrique pour la mise au point.

d) Si AB se rapproche de L<sub>1</sub>, son image intermédiaire s'éloigne de L<sub>1</sub>, donc se rapproche de L<sub>2</sub> : l'image définitive revient de l' $\infty$  (PR) : elle reste visible nettement, mais en accommodant, cependant l'accommodation à une limite, lorsque l'image atteint le PP de l'œil.

e) D'après ce qui précède la latitude de mise au point d'un microscope est très faible.

4.

a)  $\alpha(\text{rad}) \approx \text{tg } \alpha = \frac{AB}{d_m}$

b)  $\alpha'(\text{rad}) \approx \text{tg } \alpha' = \frac{A_1B_1}{f_2}$ , or d'après le théorème de Thalès  $\frac{A_1B_1}{O_1O_1'} = \frac{\Delta}{f_1} \Rightarrow \frac{A_1B_1}{AB} = \frac{\Delta}{f_1} \Rightarrow A_1B_1 = \frac{\Delta}{f_1} \cdot AB$ ;

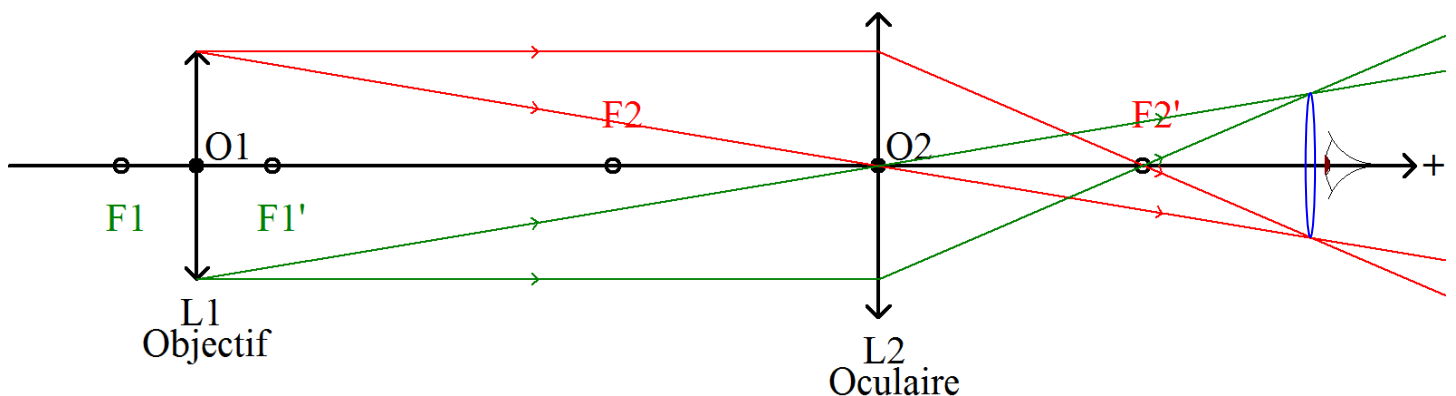
alors  $\alpha' \approx \frac{\frac{\Delta}{f_1} \cdot AB}{f_2} = \frac{AB \cdot \Delta}{f_1 \cdot f_2}$

c)  $G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{\frac{AB \cdot \Delta}{f_1 \cdot f_2}}{\frac{AB}{d_m}} \Rightarrow G = \frac{\Delta}{f_1 \cdot f_2} d_m$  : G est d'autant plus grand que f<sub>1</sub> et f<sub>2</sub> sont faibles ; c'est la

raison pour laquelle l'objectif et l'oculaire d'un microscope sont très convergents.

d)  $G = \frac{\Delta}{f_1 \cdot f_2} d_m = \frac{\Delta}{f_1} \cdot \frac{d_m}{f_2} = \frac{\Delta}{f_1} \cdot G_2$ , or  $|\gamma_1| = \frac{A_1B_1}{AB} = \frac{\Delta}{f_1}$ ; alors  $G = |\gamma_1| \cdot G_2$

5.



6. Le microscope est un système optique modélisé par deux lentilles convergentes ; l'objectif et l'oculaire. Dans le cas où l'œil n'accorde pas, l'objectif donne d'un petit objet une image réelle 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.

Figure-1

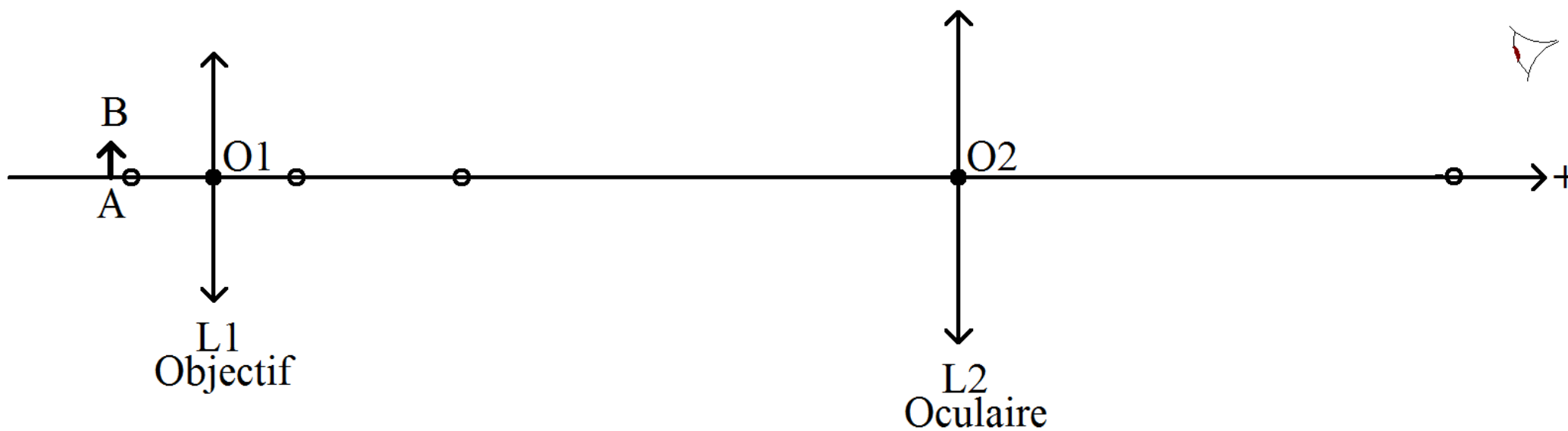


Figure-1

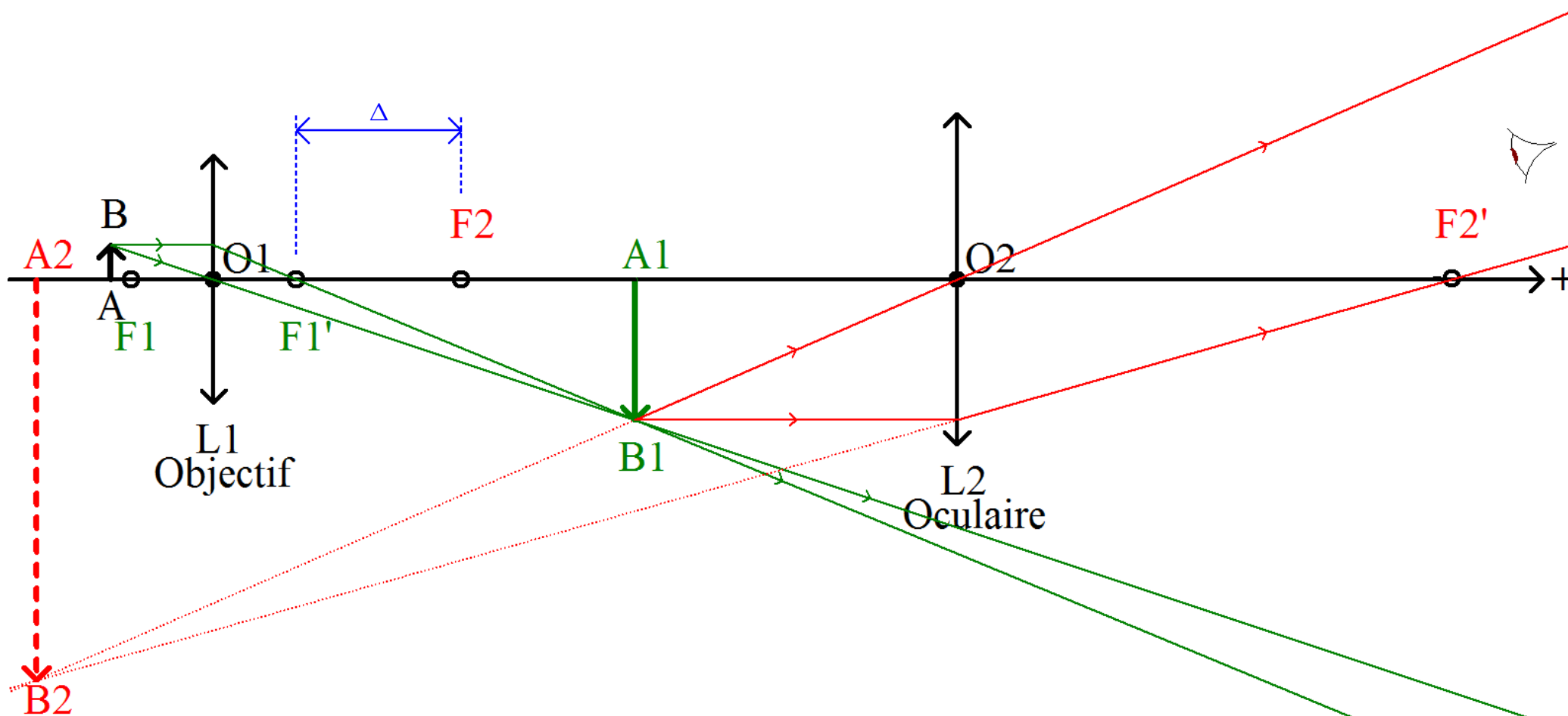


Figure-2

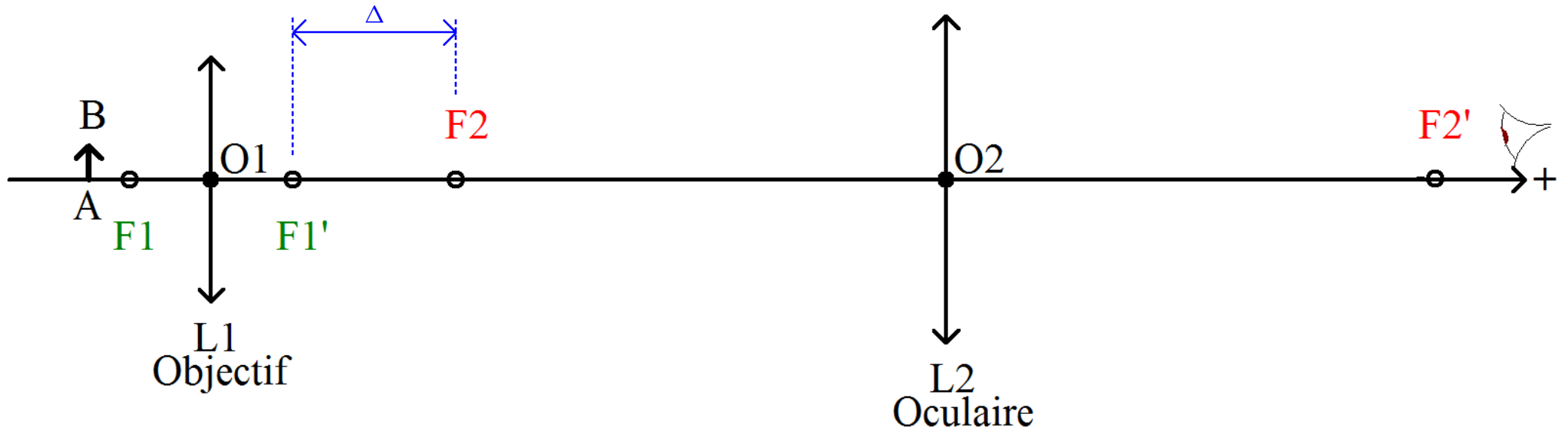
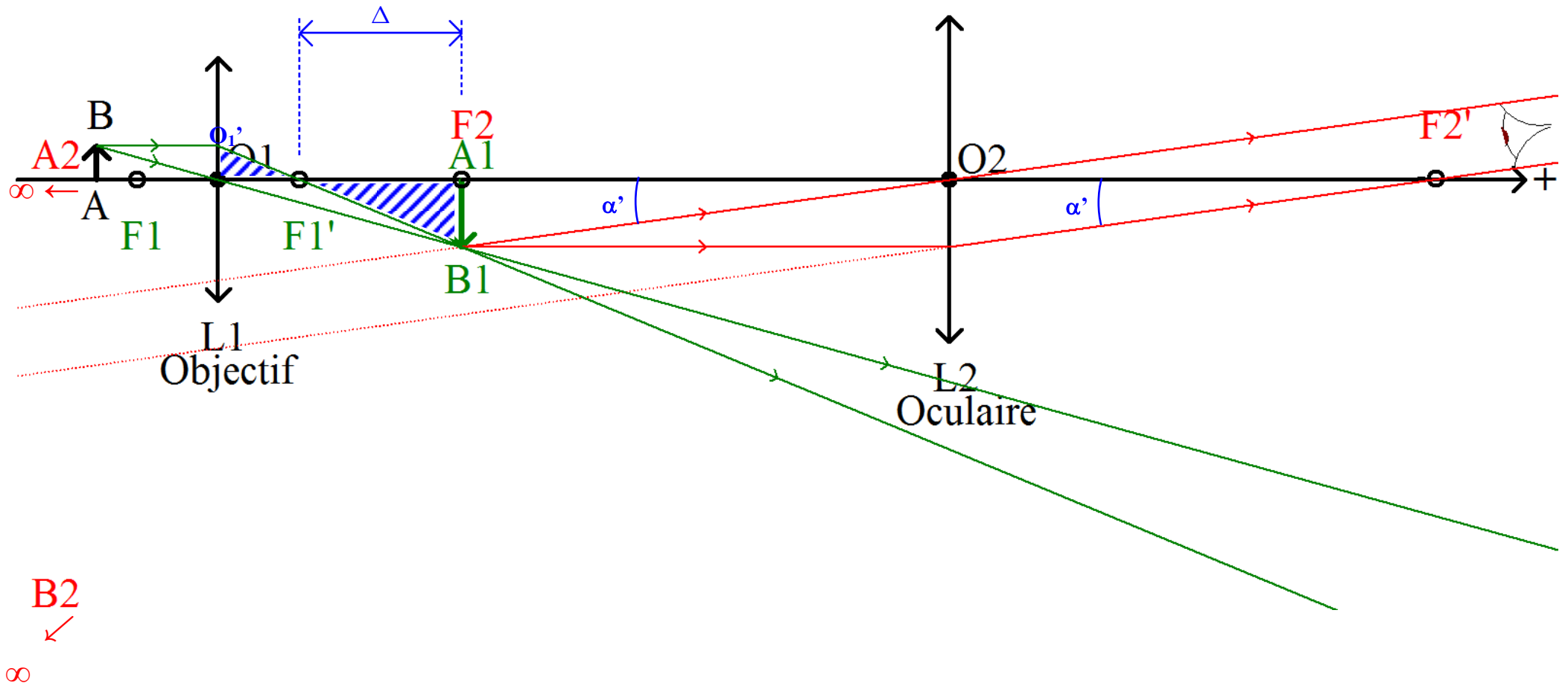


Figure-2



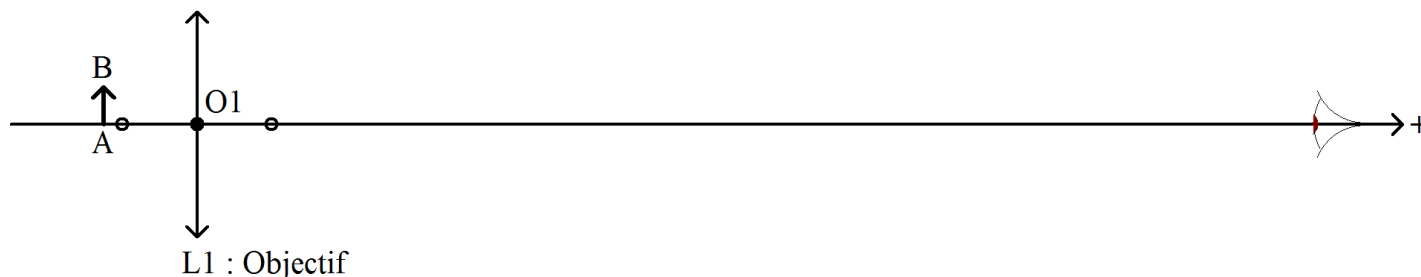
### Application-2

Le microscope est un instrument d'optique qui comprend deux systèmes convergents que nous supposons réduits chacun à une lentille mince :

- l'objectif  $L_1$ , de centre optique  $O_1$ , de distance focale  $f_1$ , devant lequel est placé l'objet  $AB$ ;
- l'oculaire  $L_2$  de centre optique  $O_2$ , de distance focale  $f_2$ , dont l'axe optique principal est confondu avec celui de  $L_1$ , placé devant l'œil de l'observateur.

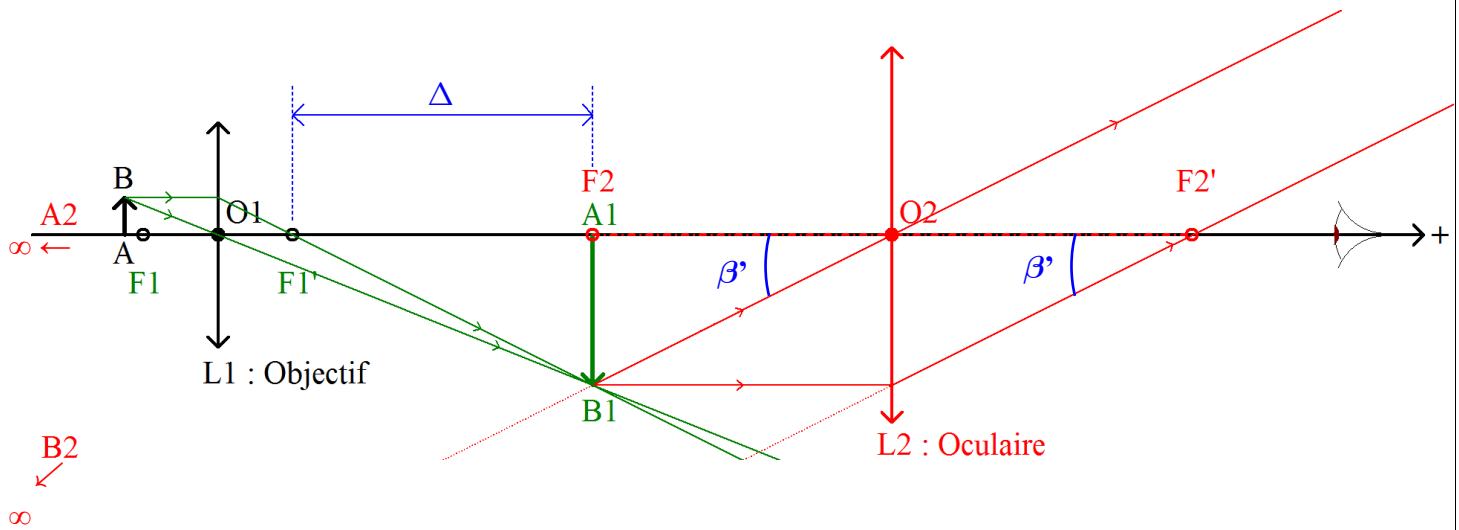
La figure ci-dessous représente, en partie, le modèle d'un microscope dont les caractéristiques sont :

$$f_1 = 6 \text{ mm}, f_2 = 2,5 \text{ cm}, \text{ et } \Delta = 18 \text{ cm} \text{ (intervalle optique)}$$



L'objet  $AB$  de hauteur  $AB = 1 \mu\text{m}$  est placé perpendiculairement à l'axe optique principal,  $A$  est sur l'axe principal ; on notera  $A_1B_1$  son image intermédiaire à travers l'objectif, et  $A_2B_2$  son image définitive à travers le microscope.

1. Construire l'image intermédiaire  $A_1B_1$  : où doit-elle se trouver pour l'oculaire afin que le microscope soit mis au point, pour un œil normal ? Justifier.
2. Représenter alors l'oculaire, sans souci d'échelle, et construire la marche des rayons lumineux donnant l'image définitive  $A_2B_2$ .
3. Le microscope étant mis au point ; déterminer la position de l'objet par rapport à l'objectif. Commenter.
4. Calculer le grossissement  $\gamma_1$  de l'objectif :
  - a) Le microscope possède trois objectifs dont le 1<sup>er</sup> porte l'indication  $\times 10$ , le 2<sup>ème</sup>  $\times 20$ , et le 3<sup>ème</sup>  $\times 30$  : lequel a-t-on utilisé ?
  - b) Déterminer la taille de l'image intermédiaire  $A_1B_1$ .
5. Montrer que le grossissement commercial  $G_2$  de l'oculaire de ce microscope s'écrit  $G_2 = \frac{d_m}{f_2}$ , et calculer sa valeur pour un œil normal (on donne  $d_m = 25 \text{ cm}$  : PP d'un œil normal).
6. Calculer la valeur du grossissement commercial  $G$  du microscope, et compléter la phrase suivante : ce microscope grossit .....fois  $\Leftrightarrow$  il permet de voir sous un .....qu'avec l'œil nu à son maximum d'accommodation.
7. A quelle distance du centre  $O_2$  de l'oculaire doit se trouver l'œil, pour une observation optimale ?



1. Le microscope est mis au point pour un œil normal, si l'image définitive se forme au PR de l'œil : c.-à-d. à l' $\infty$  pour un œil normal (il la voit sans besoins d'accommoder)  $\Rightarrow$  l'image intermédiaire doit se former dans le plan focal objet de l'oculaire.

2.

3.  $O_1A = ?$

$$\frac{1}{O_1A_1} - \frac{1}{O_1A} = \frac{1}{O_1F_1'}; \text{ avec } \begin{cases} \overline{O_1A_1} = f_1 + \Delta \\ \overline{O_1A} = -O_1A \\ \overline{O_1F_1'} = f_1 \end{cases} : \frac{1}{f_1 + \Delta} + \frac{1}{O_1A} = \frac{1}{f_1} \Rightarrow \frac{1}{O_1A} = \frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_1 + \Delta}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{O_1A} = \frac{f_1' + \Delta - f_1'}{f_1(f_1 + \Delta)} \Rightarrow O_1A = \frac{f_1(f_1 + \Delta)}{\Delta} = \frac{6 \cdot 10^{-3} (6 \cdot 10^{-3} + 0,18)}{0,18} = 6,2 \cdot 10^{-3} \text{ m} : \boxed{O_1A = 6,2 \text{ mm}}$$

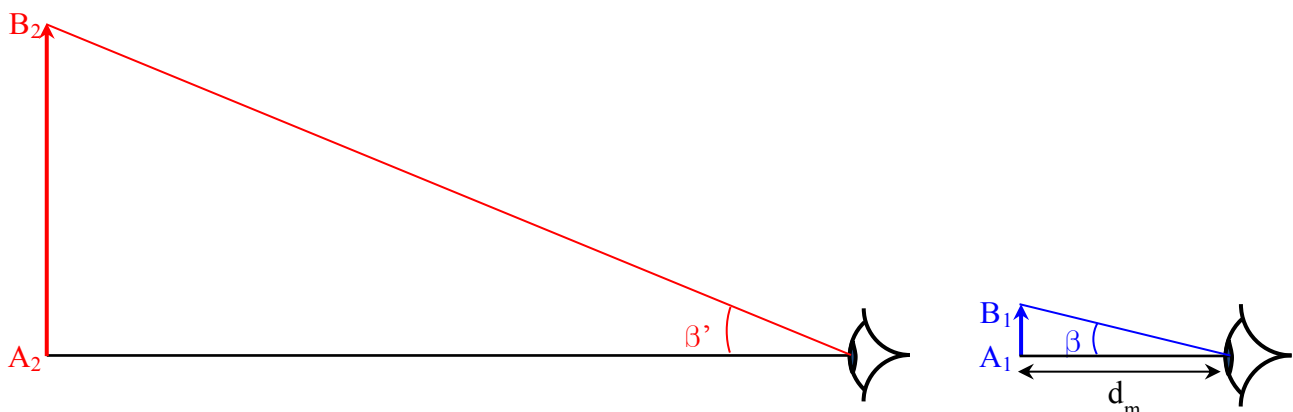
$\Rightarrow O_1A(\text{mm}) = f_1(\text{mm}) + 0,2 \text{ mm}$  : l'objet est à 0,2 mm du foyer principal objet de l'objectif (très proche)

$$4. \gamma_1 = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{O_1A_1}}{\overline{O_1A}} = - \frac{f_1 + \Delta}{O_1A} = - \frac{6 \cdot 10^{-3} + 0,18}{6,2 \cdot 10^{-3}} : \boxed{\gamma_1 = -30}$$

a) 3<sup>ème</sup> objectif

$$b) \overline{A_1B_1} = \gamma_1 \cdot \overline{AB} = -30 \cdot 1 \mu\text{m} = -30 \mu\text{m} \Rightarrow \boxed{A_1B_1 = 30 \mu\text{m}}$$

5. L'oculaire donne de l'image intermédiaire  $A_1B_1$  une image définitive  $A_2B_2$   $G_2$  fois plus grosse : soit  $\beta$  l'angle sous lequel un œil normal nu "voit" à son maximum d'accommodation  $A_1B_1$ , et  $\beta'$  l'angle sous lequel ce même œil voit  $A_2B_2$  à travers l'oculaire ;  $G_2 = \frac{\beta'}{\beta}$



$$\begin{cases} \beta(\text{rad}) \approx \text{tg } \beta = \frac{A_1 B_1}{d_m} \\ \beta'(\text{rad}) \approx \text{tg } \beta' = \frac{A_1 B_1}{f_2} \end{cases} \Rightarrow G_2 = \frac{\frac{A_1 B_1}{f_2}}{\frac{A_1 B_1}{d_m}} = \frac{d_m}{f_2} = \frac{25}{2,5} : \boxed{G_2 = 10}$$

6.  $G = |\gamma_1| \cdot G_2 = 30 \cdot 10 : \boxed{G = 300}$  : ce microscope grossit 300 fois  $\Leftrightarrow$  il permet de voir sous un angle 300 fois plus gros qu'avec l'œil (normal) nu à son maximum d'accommodation.

7. L'œil doit se trouver au niveau du cercle oculaire ; soit C sa position sur l'axe optique principal :

$$\frac{1}{O_2 C} - \frac{1}{O_2 O_1} = \frac{1}{O_2 F_2'}; \text{ avec } \begin{cases} \overline{O_2 C} = O_2 C \\ \overline{O_2 O_1} = -(f_1 + f_2 + \Delta) \\ \overline{O_2 F_2'} = f_2 \end{cases} : \frac{1}{O_2 C} + \frac{1}{f_1 + f_2 + \Delta} = \frac{1}{f_2} \Rightarrow \frac{1}{O_2 C} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_1 + f_2 + \Delta}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{O_2 C} = \frac{f_1 + \cancel{f_2} + \Delta - \cancel{f_2}}{f_2 (f_1 + f_2 + \Delta)} \Rightarrow O_2 C = \frac{f_2 (f_1 + f_2 + \Delta)}{f_1 + \Delta} = \frac{2,5(0,6 + 2,5 + 18)}{0,6 + 18} : \boxed{O_2 C \approx 2,84 \text{ cm}}$$

$\Rightarrow$  L'œil doit se trouver à 2,84 cm du centre  $O_2$  de l'oculaire, soit à 0,34 cm après le foyer principal image de l'oculaire.



## TP 9 : Réalisation d'un microscope simplifié

### Objectifs :

- Réaliser un microscope simplifié.
- Tracer la marche des rayons lumineux pour une observation sans accommodation.
- Déterminer le grossissement du microscope.

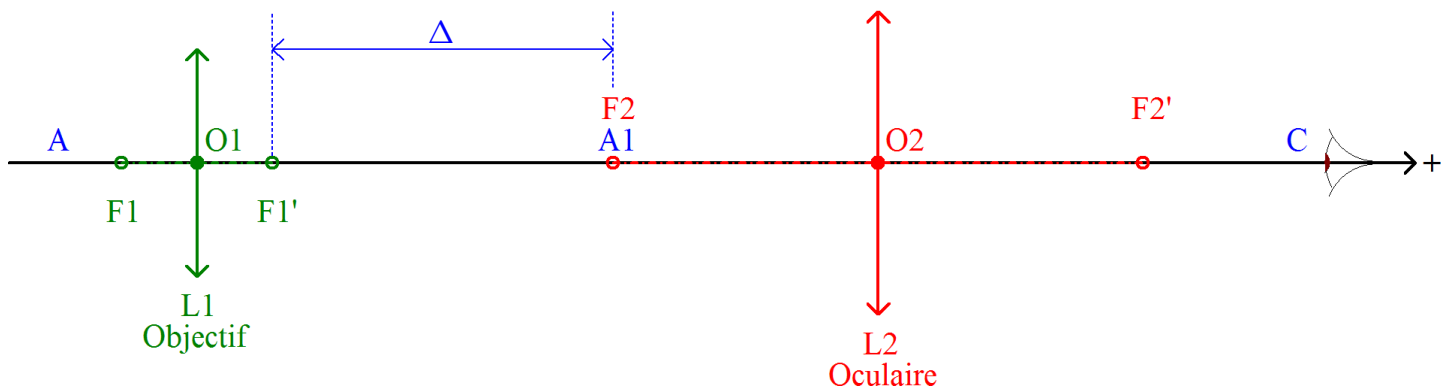
### Matériel :

- 1 Banc d'optique
- 1 Lanterne
- 1 Un objet en forme d'une lettre, adaptable à la lanterne
- 2 lentilles convergentes sphériques  $f = 10$  cm, et 20 cm
- 2 Montures pour lentilles
- 1 Ecran gradué sur monture

### Manipulation :

#### 1. Choix des lentilles :

On se propose de réaliser un microscope simplifié selon le schéma de la figure ci-dessous :



Pour cela on dispose de deux lentilles : l'une de vergence  $5 \delta$  et l'autre de vergence  $10 \delta$

a) Laquelle doit être utilisée comme objectif, et laquelle comme oculaire ?

La lentille la plus convergente constitue l'objectif  $L_1$  ( $C_1 = 10 \delta$ ), l'autre constitue l'oculaire  $L_2$  ( $C_2 = 5 \delta$ )

b) Calculer les distances focales correspondantes.

$$f_1 = \frac{1}{C_1} = \frac{1}{10} = 0,1 \text{ m} = 10 \text{ cm}, f_2 = \frac{1}{C_2} = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ m} = 20 \text{ cm}$$

2. **Positionnement relatif des lentilles :** Déterminer la distance  $O_1O_2$ , pour un intervalle optique  $\Delta = 40$  cm.

$$O_1O_2 = f_1 + \Delta + f_2 = 10 + 40 + 20 : \boxed{O_1O_2 = 70 \text{ cm}}$$

3. **Positionnement de l'objet pour une image définitive à l'infini**

L'objet AB est placé perpendiculairement à l'axe optique principal, A est sur l'axe principal ; on notera  $A_1B_1$  son image intermédiaire à travers l'objectif, et  $A_2B_2$  son image définitive à travers le microscope.

a) Donner la valeur de la distance  $O_1A_1$  afin que l'image définitive soit à l'infini.

$$A_1B_1 \text{ doit se former dans le plan focal objet de l'oculaire} \Rightarrow O_1A_1 = f_1 + \Delta = 10 + 40 : \boxed{O_1A_1 = 50 \text{ cm}}$$

b) En déduire la valeur de la distance  $O_1A$ .

$$\frac{1}{O_1A_1} - \frac{1}{O_1A} = \frac{1}{O_1F_1'}; \text{ avec } \begin{cases} O_1A_1 = O_1A_1 \\ O_1A = -O_1A : \frac{1}{O_1A_1} + \frac{1}{O_1A} = \frac{1}{f_1} \Rightarrow \frac{1}{O_1A} = \frac{1}{f_1} - \frac{1}{O_1A_1} \\ O_1F_1' = f_1 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{O_1A} = \frac{O_1A_1 - f_1}{f_1 \cdot O_1A_1} \Rightarrow O_1A = \frac{f_1 \cdot O_1A_1}{O_1A_1 - f_1} = \frac{10 \cdot 50}{50 - 10} : \boxed{O_1A = 12,5 \text{ cm}}$$

#### 4. Position de l'œil pour une observation optimale

a) Où l'observateur doit positionner son œil pour observer une image définitive la plus lumineuse possible : **Au niveau du cercle oculaire ; image de la monture de l'objectif à travers l'oculaire.**

b) Soit C la position du cercle oculaire sur l'axe optique principal ; déterminer la valeur de  $O_2C$

$$\frac{1}{O_2C} - \frac{1}{O_2O_1} = \frac{1}{O_2F_2'}; \text{ avec } \begin{cases} O_2C = O_2C \\ O_2O_1 = -O_2O_1 : \frac{1}{O_2C} + \frac{1}{O_1O_2} = \frac{1}{f_2} \Rightarrow \frac{1}{O_2C} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{O_1O_2} \\ O_2F_2' = f_2 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{O_2C} = \frac{O_1O_2 - f_2}{f_2 \cdot O_1O_2} \Rightarrow O_2C = \frac{f_2 \cdot O_1O_2}{O_1O_2 - f_2} = \frac{20 \cdot 70}{70 - 20} : \boxed{O_2C = 28 \text{ cm}}$$

#### 5. Marche des rayons lumineux

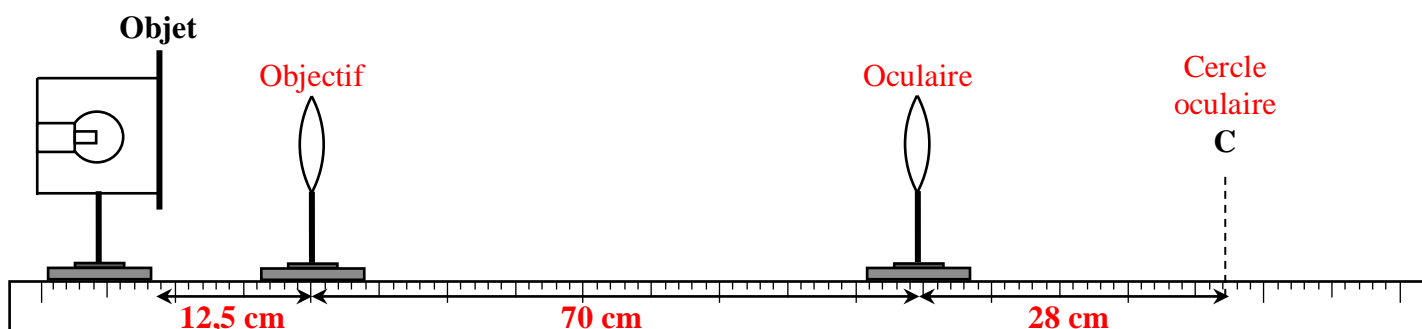
Sur le papier millimétré ci-dessous ; représenter à l'échelle  $\frac{1}{1}$  verticalement et à l'échelle  $\frac{1}{10}$  horizontalement :

- Le microscope.
- L'image intermédiaire.
- La marche des rayons lumineux donnant l'image définitive.
- Le cercle oculaire, et un œil placé à son niveau.

#### 6. Réalisation du microscope

L'objet AB est une fente en forme d'une lettre, pratiquée dans un plan opaque éclairé par la lanterne.

Annoter la figure ci-dessous, puis réaliser le microscope sur le banc d'optique :



- Placez un écran juste après l'oculaire et déplacez-le jusqu'à observer un petit disque lumineux bien net ; ce disque est le cercle oculaire du microscope, (C) est sa position sur l'axe optique : donner sa position par rapport à l'oculaire, et comparer à la valeur théorique :  $O_2C \approx 28 \text{ cm}$  (pratiquement, c'est la même valeur obtenue théoriquement)

- ☑ Placez une pointe de stylo contre l'objectif ; qu'observez-vous au niveau du cercle oculaire ?

On voit l'image de la pointe du stylo  $\Rightarrow$  Le cercle oculaire est l'image de la monture de l'objectif à travers l'oculaire.

- ☑ Retirez l'écran, et placez l'œil au niveau du cercle oculaire, observez l'image définitive : elle est **grosse**.
- ☑ Comment devient l'image en écartant les yeux de la position du cercle oculaire ; est ce que sa taille change ? expliquer : l'image devient moins lumineuse, mais de même taille car elle est à l'infini.

## 7. Grossissement commercial, G, du microscope

### a) Grandissement, $\gamma_1$ , de l'objectif

- ☑ Placer un écran sur le banc, entre l'objectif et l'oculaire; le déplacer jusqu'à obtenir l'image intermédiaire  $A_1B_1$  nette sur l'écran : noter sa position par rapport à l'objectif, et comparer à la valeur déterminée théoriquement :  $O_1A_1 \approx 50 \text{ cm}$  (pratiquement, c'est la même valeur obtenue théoriquement)
- ☑ Mesurer la hauteur de l'image intermédiaire, et déterminer le grandissement  $\gamma_1$  de l'objectif sachant que la hauteur de l'objet est  $AB = 1 \text{ cm}$  ; comparer à la valeur théorique.

$$* \quad A_1B_1 \approx 4 \text{ cm} \Rightarrow \gamma_1 = \frac{\overline{A_1B_1}}{AB} = - \frac{A_1B_1}{AB} = - \frac{4}{1} : \boxed{\gamma_1 = -4} \Rightarrow |\gamma_1| = 4$$

$$* \quad \text{On a } |\gamma_1| = \frac{\Delta}{f_1} = \frac{40}{10} = 4 : \text{ pratiquement, la même valeur obtenue expérimentalement.}$$

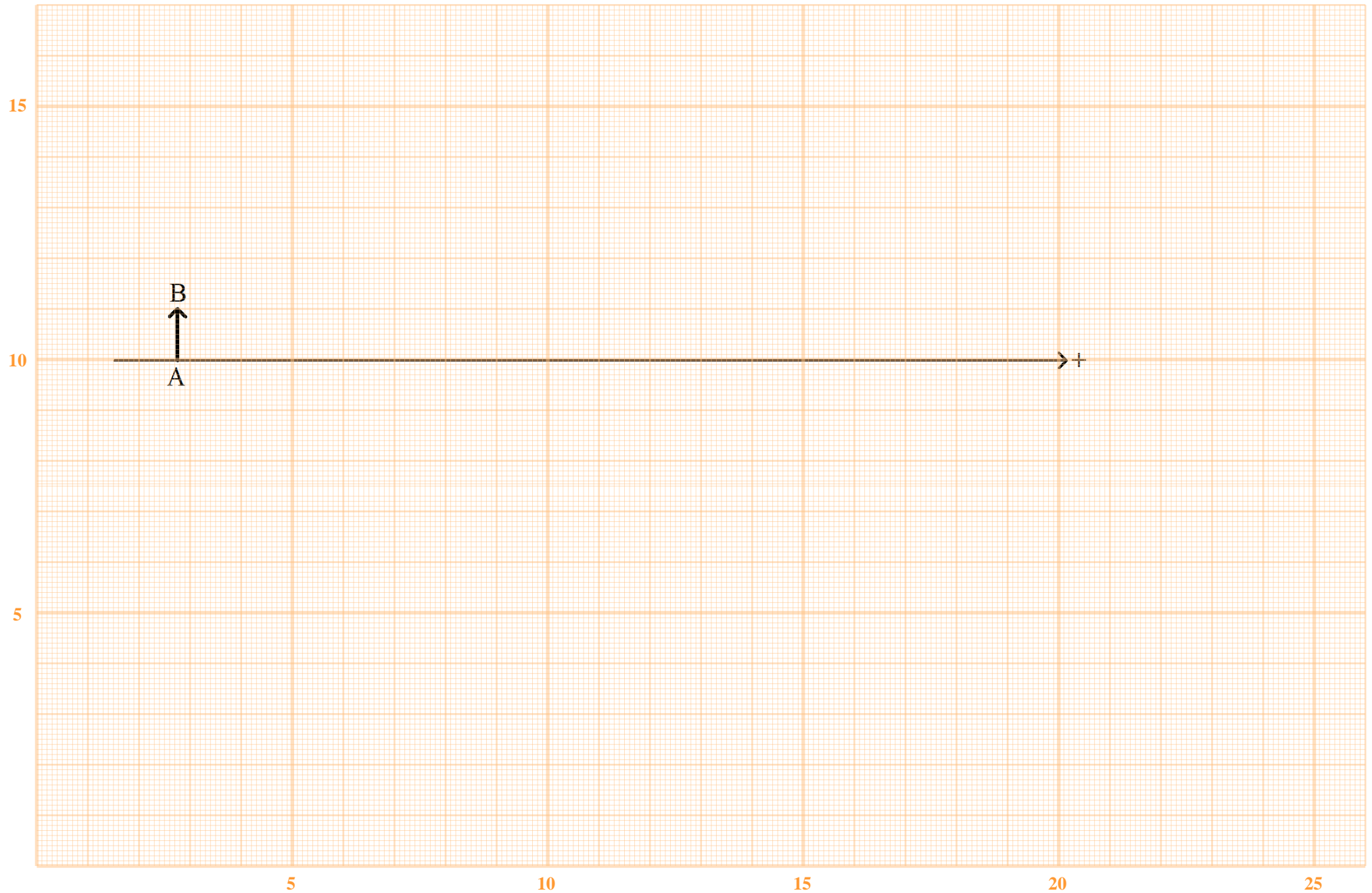
### b) Grossissement commercial, $G_2$ , de l'oculaire

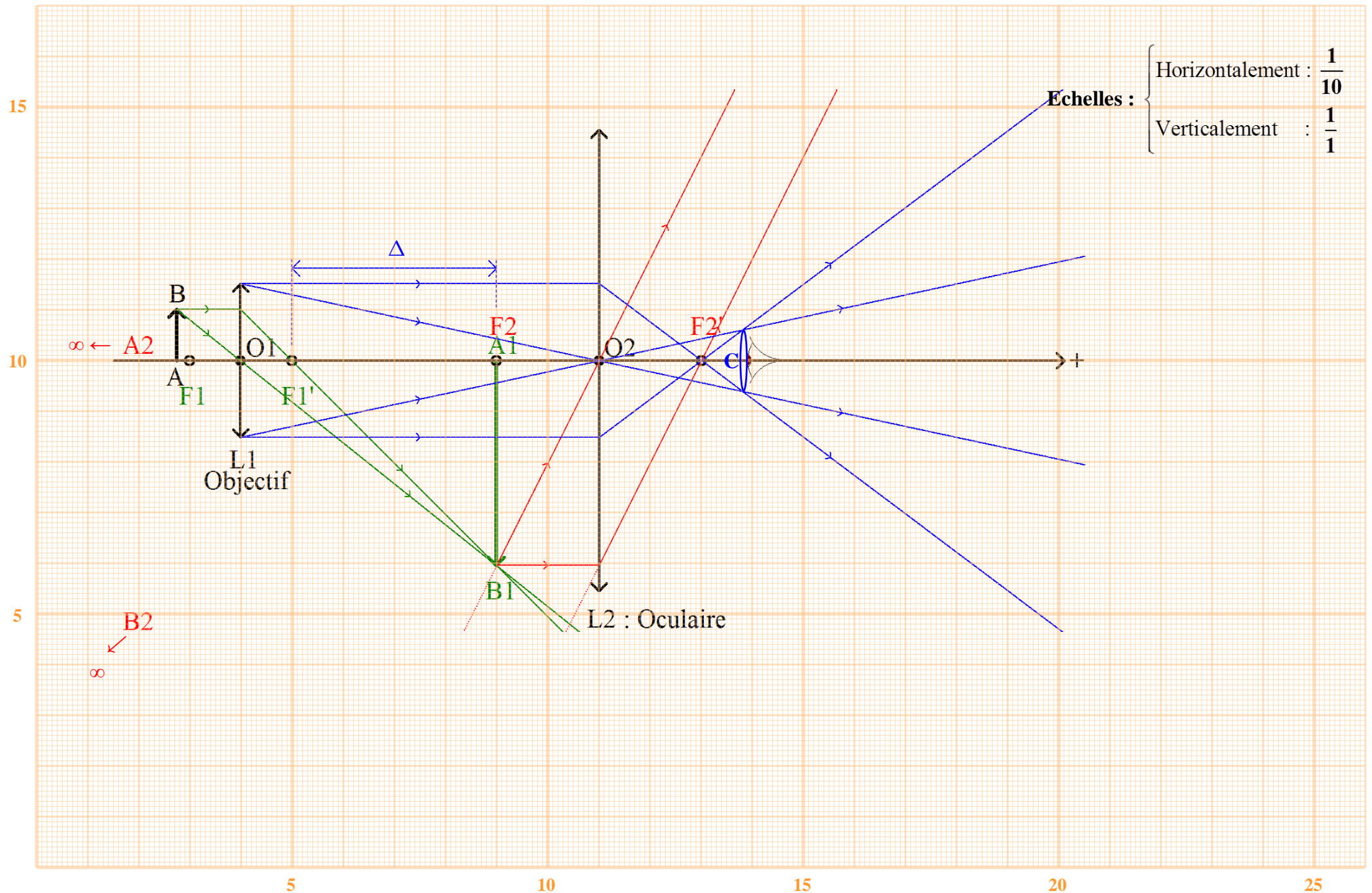
Sachant que le PP d'un œil normal est  $d_m = 25 \text{ cm}$  ; calculer le grossissement commercial de l'oculaire

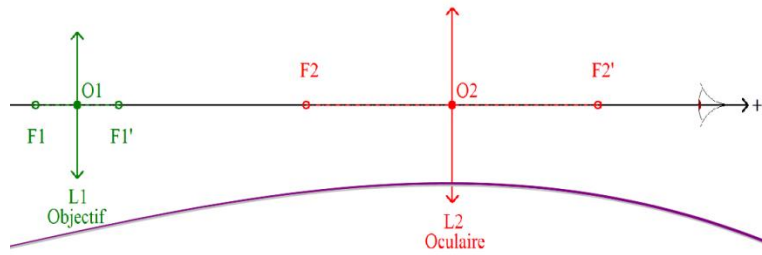
$$G_2 = \frac{d_m}{f_2} = \frac{25}{20} : \boxed{G_2 = 1,25}$$

- c) Donner l'expression de G en fonction de  $\gamma_1$  et  $G_2$ , et calculer sa valeur :

$G = |\gamma_1| \cdot G_2 = 4 \cdot 1,25 : \boxed{G = 5} \Rightarrow$  Ce microscope permet de voir sous un angle 5 fois plus gros qu'à l'œil nu à son maximum d'accommodation.



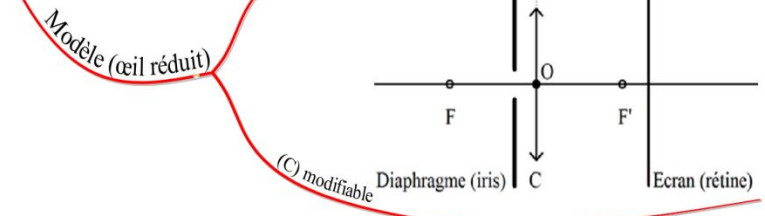
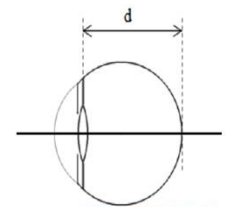
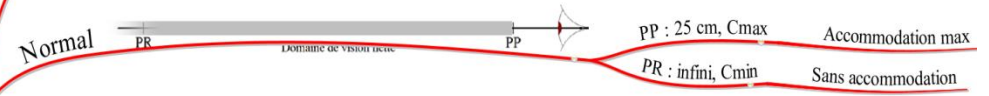




# Instruments d'Optique

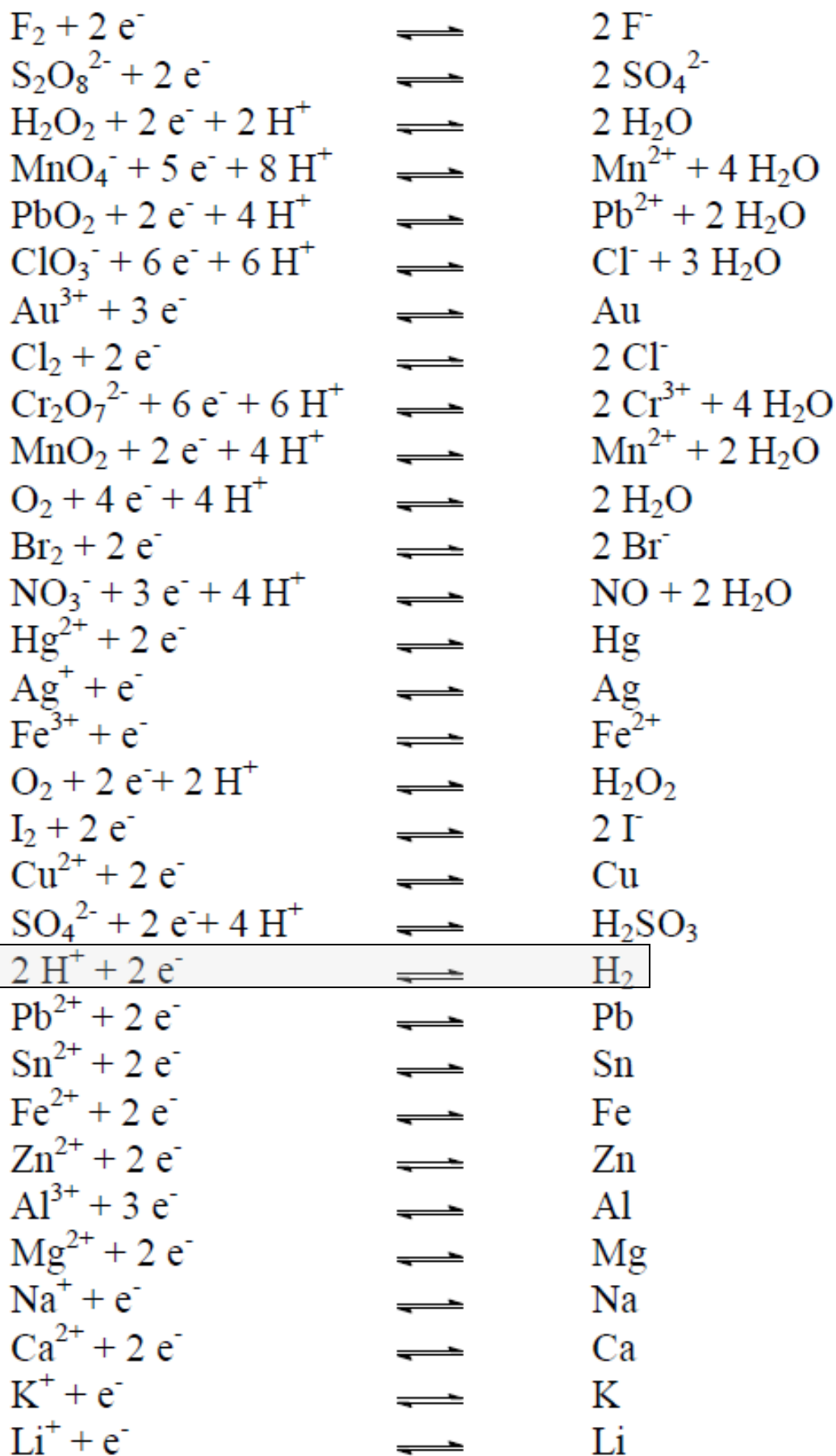
- Modèle**
- Mise au point**
  - Image intermédiaire en F2
  - Image définitive à l'infini
- Grossissement**
  - Voir sous un angle G fois plus grand qu'à l'œil nu à son maximum d'accommodation
  - $\gamma_1$  : Grandissement de l'objectif
  - $G_2$  : grandissement de l'oculaire
  - $G = |\gamma_1| G_2$
- Cercle oculaire**
  - Image de la monture de l'objectif à travers l'oculaire
  - Position de l'œil pour une image plus lumineuse

- Hypermétrope**
  - Correction par LC
  - Peu convergent
    - PP éloigné
    - PR virtuel derrière
- Myope**
  - Correction par LD
  - Trop convergent
    - PP proche
    - PR fini



## Annexes

## Couples redox usuels

Pouvoir oxydant croissant 



# Couples Acide / Base usuels

Acides de plus en plus forts

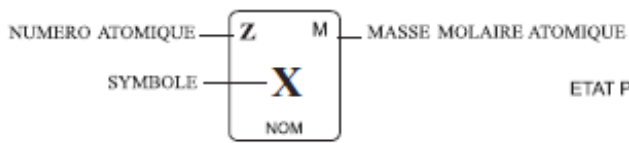
Acide	Nom de l'acide	Base conjuguée	Nom de la base conjuguée
HClO <sub>4</sub>	acide perchlorique	ClO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	ion perchlorate
HCl	acide chlorhydrique	Cl <sup>-</sup>	ion chlorure
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	acide sulfurique	HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	ion hydrogénosulfate
HNO <sub>3</sub>	acide nitrique	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	ion nitrate
H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	ion hydronium	H <sub>2</sub> O	eau
H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	acide sulfureux	HSO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	ion hydrogénosulfite
HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	ion hydrogénosulfate	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	ion sulfate
HClO <sub>2</sub>	acide chloreux	ClO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	ion chlorite
H <sub>2</sub> PO <sub>3</sub>	acide phosphoreux	HPO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	ion hydrogénophosphorite
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	acide phosphorique	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	ion dihydrogénophosphate
[Fe(H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub> ] <sup>3+</sup>	ion hexaaquafer III	[Fe(H <sub>2</sub> O) <sub>5</sub> OH] <sup>2+</sup>	ion pentaquaahydroxyfer III
HF	acide fluorhydrique	F <sup>-</sup>	ion fluorure
HNO <sub>2</sub>	acide nitreux	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	ion nitrite
HCO <sub>2</sub> H	acide méthanoïque	HCO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	ion méthanoate
CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> H	acide éthanoïque (acétique)	CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup>	ion éthanoate (acétate)
[Al(H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub> ] <sup>3+</sup>	ion hexaaquaaluminium	[Al(H <sub>2</sub> O) <sub>5</sub> OH] <sup>2+</sup>	ion pentaquaahydroxyaluminium
H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	acide carbonique	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	ion hydrogénocarbonate
HPO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	ion hydrogénophosphorite	PO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	ion phosphorite
H <sub>2</sub> S	acide sulfhydrique	HS <sup>-</sup>	ion hydrogénosulfure
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	ion dihydrogénophosphate	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	ion hydrogénophosphate
HSO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	ion hydrogénosulfite	SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	ion sulfite
HClO	acide hypochloreux	ClO <sup>-</sup>	ion hypochlorite
HCN	acide cyanhydrique	CN <sup>-</sup>	ion cyanure
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	ion ammonium	NH <sub>3</sub>	ammoniaque
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	ion hydrogénocarbonate	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	ion carbonate
HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	ion hydrogénophosphate	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	ion phosphate
H <sub>2</sub> O	eau	OH <sup>-</sup>	ion hydroxyde
HS <sup>-</sup>	ion hydrogénosulfure	S <sup>2-</sup>	ion sulfure
NH <sub>3</sub>	ammoniac	NH <sub>2</sub> <sup>-</sup>	ion amidure
OH <sup>-</sup>	ion hydroxyde	O <sup>2-</sup>	ion oxyde

Bases de plus en plus fortes



# TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

PÉRIODE	GROUPE																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
K	1 1,0079 <b>H</b>																	2 4,0026 <b>He</b>
L	3 6,941 <b>Li</b>	4 9,0122 <b>Be</b>											5 10,811 <b>B</b>	6 12,011 <b>C</b>	7 14,007 <b>N</b>	8 15,999 <b>O</b>	9 18,998 <b>F</b>	10 20,180 <b>Ne</b>
M	11 22,990 <b>Na</b>	12 24,305 <b>Mg</b>											13 26,982 <b>Al</b>	14 28,086 <b>Si</b>	15 30,974 <b>P</b>	16 32,065 <b>S</b>	17 35,453 <b>Cl</b>	18 39,948 <b>Ar</b>
N	19 39,098 <b>K</b>	20 40,078 <b>Ca</b>	21 44,956 <b>Sc</b>	22 47,867 <b>Ti</b>	23 50,942 <b>V</b>	24 51,996 <b>Cr</b>	25 54,938 <b>Mn</b>	26 55,845 <b>Fe</b>	27 58,933 <b>Co</b>	28 58,693 <b>Ni</b>	29 63,546 <b>Cu</b>	30 65,409 <b>Zn</b>	31 69,723 <b>Ga</b>	32 72,64 <b>Ge</b>	33 74,922 <b>As</b>	34 78,96 <b>Se</b>	35 79,904 <b>Br</b>	36 83,798 <b>Kr</b>
O	37 85,468 <b>Rb</b>	38 87,62 <b>Sr</b>	39 88,906 <b>Y</b>	40 91,224 <b>Zr</b>	41 92,906 <b>Nb</b>	42 95,94 <b>Mo</b>	43 (98) <b>Tc</b>	44 101,07 <b>Ru</b>	45 102,91 <b>Rh</b>	46 106,42 <b>Pd</b>	47 107,87 <b>Ag</b>	48 112,41 <b>Cd</b>	49 114,82 <b>In</b>	50 118,71 <b>Sn</b>	51 121,76 <b>Sb</b>	52 127,60 <b>Te</b>	53 126,90 <b>I</b>	54 131,29 <b>Xe</b>
P	55 132,91 <b>Cs</b>	56 137,33 <b>Ba</b>	57-71 <b>La-Lu</b> Lanthanides	72 178,49 <b>Hf</b>	73 180,95 <b>Ta</b>	74 183,84 <b>W</b>	75 186,21 <b>Re</b>	76 190,23 <b>Os</b>	77 192,22 <b>Ir</b>	78 195,08 <b>Pt</b>	79 196,97 <b>Au</b>	80 200,59 <b>Hg</b>	81 204,38 <b>Tl</b>	82 207,2 <b>Pb</b>	83 208,98 <b>Bi</b>	84 (209) <b>Po</b>	85 (210) <b>At</b>	86 (222) <b>Rn</b>
Q	87 (223) <b>Fr</b>	88 (226) <b>Ra</b>	89-103 <b>Ac-Lr</b> Actinides	104 (267) <b>Rf</b>	105 (268) <b>Db</b>	106 (271) <b>Sg</b>	107 (272) <b>Bh</b>	108 (277) <b>Hs</b>	109 (276) <b>Mt</b>	110 (281) <b>Ds</b>	111 (280) <b>Rg</b>							
7																		



ETAT PHYSIQUE (25 °C; 101 kPa)

**Métaux**

- Métaux alcalins
- Métaux alcalino-terreux
- Métaux de transition

**Non-métaux**

- Méalloïdes
- Halogènes
- Gaz rares
- Lanthanides
- Actinides

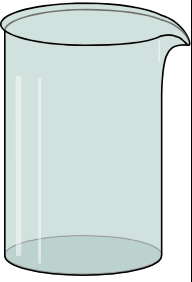
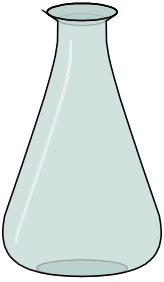
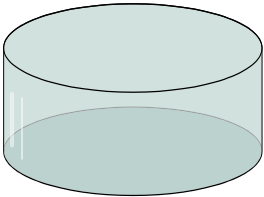
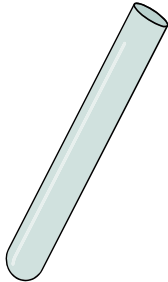
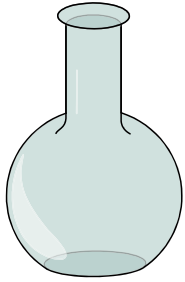
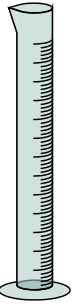


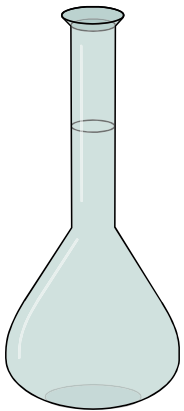
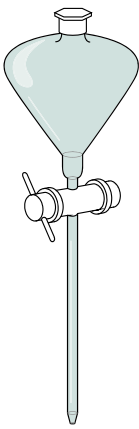



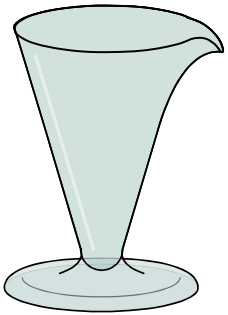
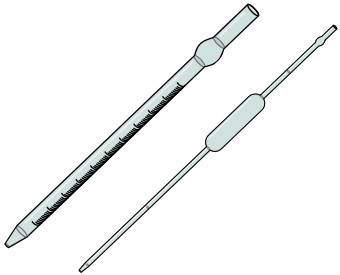

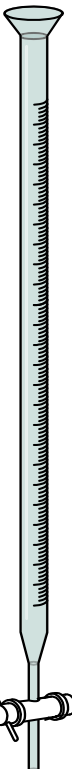




LANTHANIDES

57 138,91 <b>La</b> LANTHANE	58 140,12 <b>Ce</b> CÉRIUM	59 140,91 <b>Pr</b> PRASÉODYME	60 144,24 <b>Nd</b> NÉODYME	61 (145) <b>Pm</b> PROMÉTHIUM	62 150,36 <b>Sm</b> SAMARIUM	63 151,96 <b>Eu</b> EUROPIUM	64 157,25 <b>Gd</b> GADOLINIUM	65 158,93 <b>Tb</b> TERBIUM	66 162,50 <b>Dy</b> DYSPROSIUM	67 164,93 <b>Ho</b> HOLMIUM	68 167,26 <b>Er</b> ERBIUM	69 168,93 <b>Tm</b> THULIUM	70 173,04 <b>Yb</b> YTTÉRIUM	71 174,97 <b>Lu</b> LUTÉTIUM
---------------------------------------	-------------------------------------	---	--------------------------------------	--	---------------------------------------	---------------------------------------	---	--------------------------------------	---	--------------------------------------	-------------------------------------	--------------------------------------	---------------------------------------	---------------------------------------

ACTINIDES

89 (227) <b>Ac</b> ACTINIUM	90 232,04 <b>Th</b> THORIUM	91 231,04 <b>Pa</b> PROTACTINIUM	92 238,03 <b>U</b> URANIUM	93 (237) <b>Np</b> NEPTUNIUM	94 (244) <b>Pu</b> PLUTONIUM	95 (243) <b>Am</b> AMÉRICIUM	96 (247) <b>Cm</b> CURIUM	97 (247) <b>Bk</b> BERKÉLIUM	98 (251) <b>Cf</b> CALIFORNIUM	99 (252) <b>Es</b> EINSTEINIUM	100 (257) <b>Fm</b> FERMIUM	101 (258) <b>Md</b> MENDELÉVIUM	102 (259) <b>No</b> NOBÉLIUM	103 (262) <b>Lr</b> LAWRENCIUM
--------------------------------------	--------------------------------------	---	-------------------------------------	---------------------------------------	---------------------------------------	---------------------------------------	------------------------------------	---------------------------------------	---	---	--------------------------------------	--	---------------------------------------	---

# Matériel de chimie

<p><b>Bécher</b></p> 	<p><b>Erlenmeyer</b></p> 	<p><b>Cristallisoir</b></p> 	<p><b>Tube à essaie</b></p> 	<p><b>Ballon</b></p> 	<p><b>Éprouvette</b></p> 
<p><b>Pissette</b></p> 	<p><b>Entonnoir</b></p> 	<p><b>Fiole jaugée</b></p> 	<p><b>Ampoule à décanter</b></p> 	<p><b>Creuset</b></p> 	<p><b>Verre de montre</b></p> 
<p><b>Flacon applicateur</b></p> 	<p><b>Verre à pied</b></p> 	<p><b>Pipette graduée &amp; pipette jaugée</b></p> 		<p><b>Propipettes</b></p> 	<p><b>Burette</b></p> 
<p><b>Modèles moléculaires</b></p> 		<p><b>Électrolyseur</b></p> 	<p><b>Ampoule de coulée</b></p> 	<p><b>Réfrigérant</b></p> 	

<p><b>Spatule</b></p> 	<p><b>Agitateur (Baguette en verre)</b></p> 	<p><b>Pince en bois</b></p> 	<p><b>Balance de Roberval &amp; Masses marquées</b></p> 	<p><b>Balance électronique</b></p> 
<p><b>Bouchons</b></p> 	<p><b>Thermomètre numérique</b></p> 	<p><b>Thermomètre</b></p> 	<p><b>Papier pH</b></p> 	<p><b>pH-mètre</b></p> 
<p><b>Bec Bunsen &amp; trépied</b></p> 		<p><b>Chauffe-ballon</b></p> 	<p><b>Plaque chauffante agitatrice &amp; barreau aimanté</b></p> 	<p><b>Lampe à alcool</b></p> 

# Outils mathématiques pour la mécanique

## 1. Dérivée et primitive d'une fonction

### a) Notion de dérivée

Soit  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  ; une fonction de variable réelle ( $t$ )

$$t \rightarrow f(t)$$

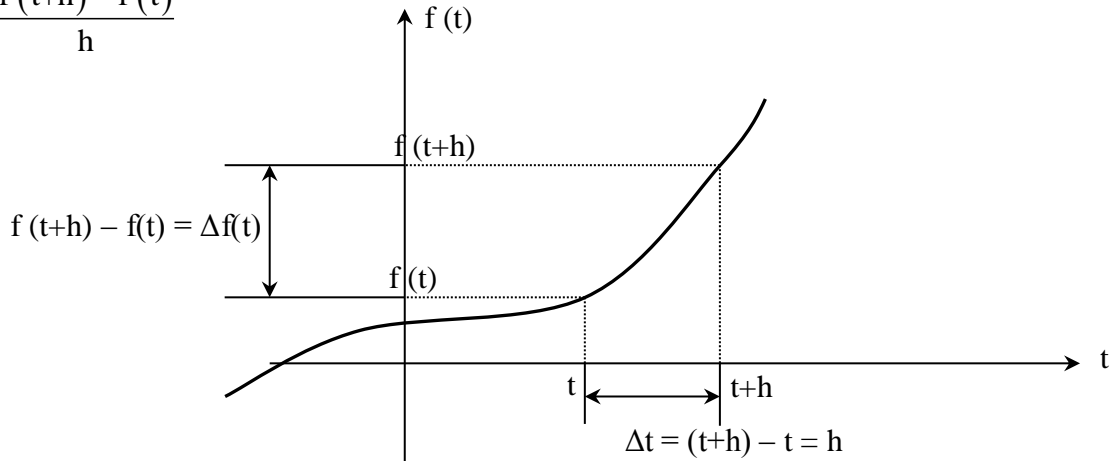
Soit  $h \in \mathbb{R}$  ; si  $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(t+h) - f(t)}{h}$  existe et qu'elle est finie; on l'appelle : dérivée de la fonction  $f$  au point  $t$ .

Et on la note :  $f'(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(t+h) - f(t)}{h}$  ou  $\frac{df(t)}{dt} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(t+h) - f(t)}{h}$

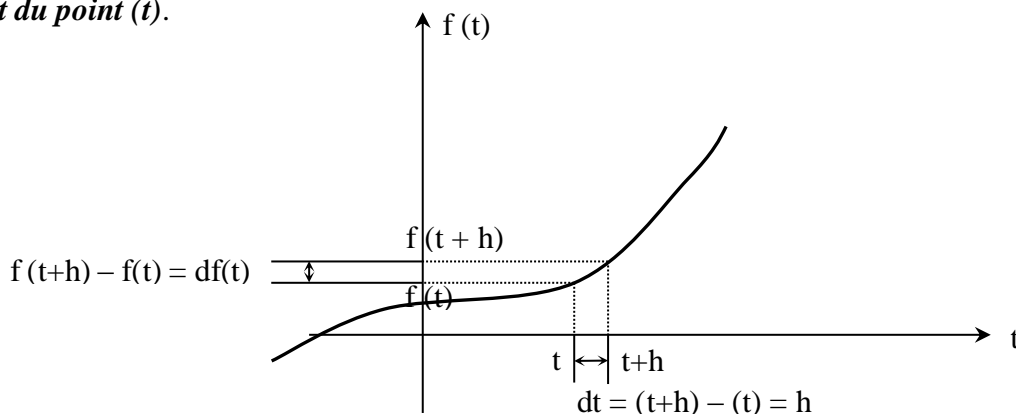
❖ La signification de la dérivée d'une fonction en un point de son domaine de définition, se voit en examinant sa courbe représentative au voisinage du point considéré :

- Pour  $h$  quelconque; le taux de variation de la fonction  $f(t)$  entre les points ( $t$ ) et ( $t+h$ ) s'écrit :

$$\frac{\Delta f(t)}{\Delta t} = \frac{f(t+h) - f(t)}{h}$$



- Pour  $h \rightarrow 0$  ; on notera ce taux par  $\frac{df(t)}{dt}$  : c'est **le taux de variation de la fonction  $f(t)$  au voisinage immédiat du point ( $t$ ).**



Comme  $\frac{f(t+h) - f(t)}{h}$  serait une forme indéterminée pour  $h = 0$ ; on calcule alors le taux de variation de la

fonction  $f$  au voisinage immédiat de  $t$  comme étant la limite vers laquelle tend le rapport  $\frac{f(t+h) - f(t)}{h}$

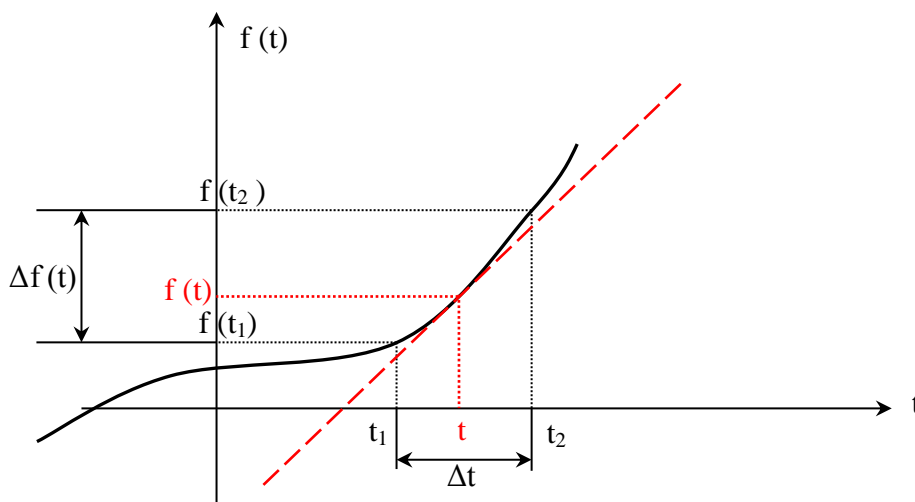
lorsque  $h \rightarrow 0$  :  $\frac{df(t)}{dt} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(t+h) - f(t)}{h}$

Soient maintenant  $t_1$  et  $t_2$  deux points tels que  $t_1 < t < t_2$  ;

le rapport  $\frac{\Delta f(t)}{\Delta t} = \frac{f(t_2) - f(t_1)}{t_2 - t_1}$  correspond au taux de variation de la fonction  $f$  entre les points  $t_1$  et  $t_2$

(aux alentours du point  $t$ ), et la limite vers laquelle il tend lorsque  $(t_2 - t_1) \rightarrow 0$  correspond au taux de variation de  $f$  au voisinage immédiat de  $t$ ; qui est, alors, la dérivée de la fonction  $f$  au point  $t$  :

$$\frac{df(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{f(t_2) - f(t_1)}{t_2 - t_1}$$



- D'après ce qui précède, **la dérivée d'une fonction  $f(t)$  en un point  $(t)$  de son domaine de définition correspond au coefficient directeur de la tangente à sa courbe représentative au point d'abscisse  $(t)$  ; cela nous renseigne sur le sens et l'ampleur de la variation de la fonction au voisinage immédiat du point considéré :**

$$\left\{ \begin{array}{l} * \text{ Si } \frac{df(t)}{dt} > 0 : \text{ la fonction est strictement croissante au voisinage immédiat de } (t) \\ * \text{ Si } \frac{df(t)}{dt} < 0 : \text{ la fonction est strictement décroissante au voisinage immédiat de } (t) \\ * \text{ Si } \frac{df(t)}{dt} = 0 : \text{ la fonction est constante au voisinage immédiat de } (t) \\ * \text{ Plus } \left| \frac{df(t)}{dt} \right| \text{ est grand; plus la variation de la fonction est aiguë au voisinage immédiat de } (t) \end{array} \right.$$

- ❖ A partir de la définition précédente, on montre les propriétés suivantes : soient  $(a)$  et  $(n)$  des constantes réelles, et  $f(t)$ ,  $g(t)$  deux fonctions de variable réelle  $(t)$  ;

- Si  $f(t) = a$ ;  $\frac{df(t)}{dt} = 0$  : **La dérivée d'une constante est nulle.**
- Si  $f(t) = t$ ;  $\frac{df(t)}{dt} = 1$  : **La dérivée de la fonction identique est égale à l'unité.**
- Si  $f(t) = t^n$ ;  $\frac{df(t)}{dt} = n \cdot t^{n-1}$
- $\frac{d[a \cdot f(t)]}{dt} = a \cdot \frac{df(t)}{dt}$
- $\frac{d[f(t) + g(t)]}{dt} = \frac{df(t)}{dt} + \frac{dg(t)}{dt}$  : **La dérivée de la somme = la somme des dérivées.**

- $\frac{d[f(t)]^n}{dt} = n \cdot [f(t)]^{n-1} \cdot \frac{df(t)}{dt}$
- $\frac{d\sqrt{f(t)}}{dt} = \frac{1}{2\sqrt{f(t)}} \cdot \frac{df(t)}{dt}$
- $\frac{d \sin[f(t)]}{dt} = \frac{df(t)}{dt} \cdot \cos[f(t)]$
- $\frac{d \cos[f(t)]}{dt} = - \frac{df(t)}{dt} \cdot \sin[f(t)]$
- Soit  $\vec{u}(t)$  une fonction vectorielle de composantes  $u_x(t)$ ,  $u_y(t)$ ,  $u_z(t)$  dans un repère cartésien  $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  dont les vecteurs  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$  et  $\vec{k}$  sont constants :  $\frac{d\vec{u}(t)}{dt} = \frac{du_x(t)}{dt} \vec{i} + \frac{du_y(t)}{dt} \vec{j} + \frac{du_z(t)}{dt} \vec{k}$

### Application-1: (Réponses à la fin)

1. Dériver les fonctions suivantes définies sur  $\mathbb{R}$  : (a, b, c et d sont des constantes réelles)

- $f(t) = a t$
- $f(t) = a t + b$
- $f(t) = a t^2 + b t + c$
- $f(t) = a t^3 + b t^2 + c t + d$
- $f(t) = (a t + b)^2$
- $f(t) = \sqrt{a + (b t + c)^2}$
- $f(t) = \sin(a t + b)$
- $f(t) = \cos(a t + b)$
- $f(t) = \sin(a t^2 + b)$
- $f(t) = \cos(a t^2 + b t + c)$

2. L'espace étant rapporté à un repère cartésien  $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  dont les vecteurs  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$  et  $\vec{k}$  sont constants ;

- Dériver le vecteur  $\vec{OM}(t)$  de composantes  $\begin{cases} x(t) = 3 t^2 + 2 t \\ y(t) = 2 t^2 \\ z(t) = 4 \end{cases}$
- Déterminer sa dérivée seconde ; on appelle dérivée seconde d'une fonction (f) en un point (t) de son

domaine de définition, la dérivée de sa dérivée en ce point :  $\frac{d^2f(t)}{dt^2} = \frac{d\left[\frac{df(t)}{dt}\right]}{dt}$



## b) Notion de primitive

Soit  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  ; une fonction de variable réelle (t)

$$t \rightarrow f(t)$$

On appelle primitive de la fonction  $f(t)$  ; **Toute** fonction  $F(t)$  dont la dérivation par rapport à (t) donne la

fonction  $f(t) : \frac{dF(t)}{dt} = f(t)$ ; on note :  $F(t) = \int f(t) dt$ .

Remarquons que si une fonction  $f(t)$  admet comme primitive, une fonction  $F(t)$ ; toute autre fonction de la forme  $G(t) = F(t) + Cte$  serait aussi une primitive de la fonction  $f(t)$ .

En effet 
$$\frac{dG(t)}{dt} = \frac{dF(t)}{dt} + \frac{dCte}{dt} = f(t) + 0 = f(t).$$

### Application-2: (Réponses à la fin)

1. Trouver une primitive pour chacune des fonctions suivantes : (a et b sont des constantes réelles)

- $f(t) = 0$
- $f(t) = 1$
- $f(t) = a$
- $f(t) = a t$
- $f(t) = a t + b$

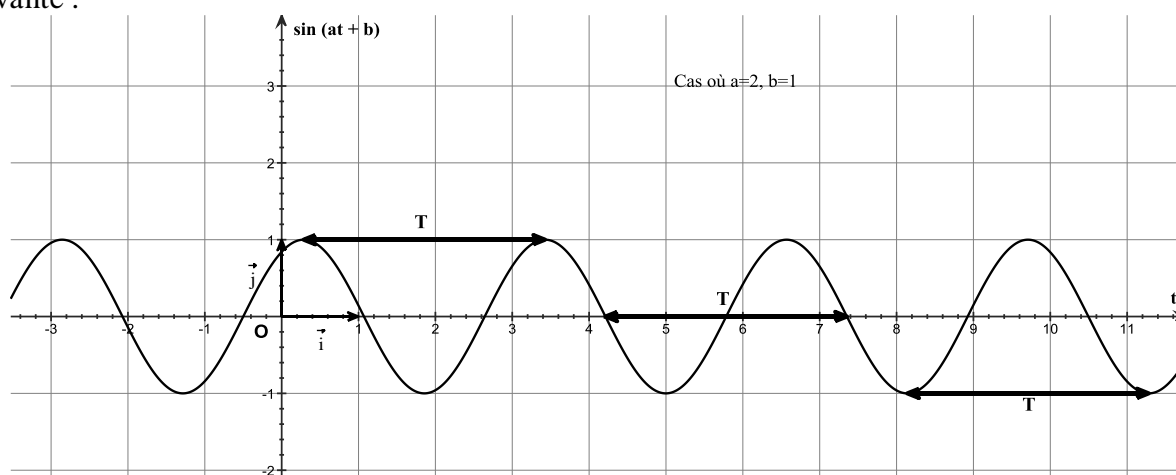
2. Trouver la primitive de la fonction  $f(t) = 3 t + 2$ , qui prend la valeur 3 pour  $t = 0$

3. L'espace étant rapporté à un repère cartésien  $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ , dont les vecteurs  $\vec{i}, \vec{j}$  et  $\vec{k}$  sont constants ;

- a) Trouver la primitive  $\vec{v}(t)$  du vecteur  $\vec{g}(t) = g \cdot \vec{k}$ , qui prend la valeur  $\vec{0}$  pour  $t = 0$  (g est une constante)
- b) Trouver la primitive du vecteur  $\vec{v}(t)$  qui prend la valeur  $\vec{0}$  pour  $t = 0$ .

## 2. Fonctions trigonométriques

La courbe représentative de la fonction définie sur  $\mathbb{R}$  par;  $(t) \rightarrow \sin(a t + b)$ , avec a et b des constantes réelles, est la suivante :



Elle est périodique ; on montre que sa période est  $T = \frac{2\pi}{a}$

## 3. Quelques relations trigonométriques

$$\forall \alpha \in \mathbb{R} : \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1; \cos \alpha = \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right); \sin(\alpha + \pi) = -\sin \alpha$$

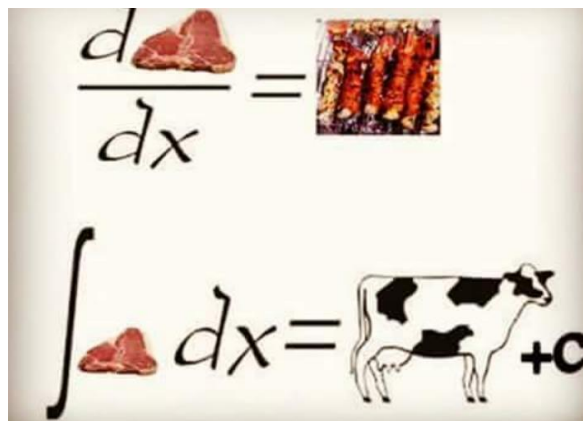
**Réponses pour Application-1:**

1.

- $\frac{d(a t)}{dt} = a$
- $\frac{d(a t + b)}{dt} = a$
- $\frac{d(a t^2 + b t + c)}{dt} = 2 a t + b$
- $\frac{d(a t^3 + b t^2 + c t + d)}{dt} = 3 a t^2 + 2 b t + c$
- $\frac{d[(a t + b)^2]}{dt} = 2 a (a t + b)$
- $\frac{d\sqrt{a + (b t + c)^2}}{dt} = \frac{b (b t + c)}{\sqrt{a + (b t + c)^2}}$
- $\frac{d[\sin(a t + b)]}{dt} = a \cos(a t + b)$
- $\frac{d[\cos(a t + b)]}{dt} = - a \sin(a t + b)$
- $\frac{d[\sin(a t^2 + b)]}{dt} = 2 a t \cos(a t^2 + b)$
- $\frac{d[\cos(a t^2 + b t + c)]}{dt} = - (2 a t + b) \sin(a t^2 + b t + c)$

2.

- $\frac{d\vec{OM}(t)}{dt} = (6 t + 2) \vec{i} + (4 t) \vec{j}$
- $\frac{d^2\vec{OM}(t)}{dt^2} = 6 \vec{i} + 4 \vec{j}$


**Réponses pour Application-2:**

1.

- $\int 0 dt = Cte$
- $\int 1 dt = t + Cte$
- $\int a dt = a t + Cte$
- $\int (a t) dt = \frac{1}{2} a t^2 + Cte$
- $\int (a t + b) dt = \frac{1}{2} a t^2 + b t + Cte$

2.  $\int (3 t + 2) dt = \frac{3}{2} t^2 + 2 t + 3$

3.

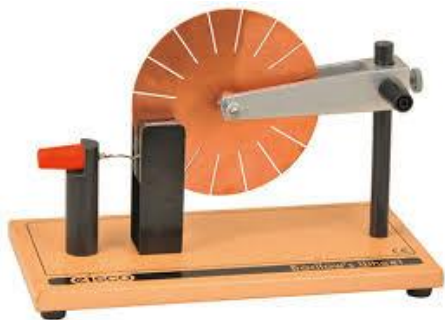
- a)  $\vec{v}(t) = g t \cdot \vec{k}$
- b)  $\int \vec{v}(t) dt = \frac{1}{2} g t^2 \cdot \vec{k}$



# Matériel de physique

<p><b>Pendule électrostatique</b></p> 	<p><b>Électroscope</b></p> 	<p><b>Machine électrostatique (de Wimshurst)</b></p> 
<p><b>Aimant droit</b></p> 	<p><b>Aimant en U</b></p> 	<p><b>Aiguille aimantée</b></p> 
<p><b>Boussole</b></p> 	<p><b>Aiguille aimantée sur axe horizontal</b></p> 	<p><b>Teslamètre</b></p> 
<p><b>Bobine</b></p> 	<p><b>Solénoïde</b></p>  	<p><b>Ensemble d'étude de la force de Laplace</b></p> 

**Roue de Barlow**



**Générateur  
(de laboratoire)**



**Multimètre**



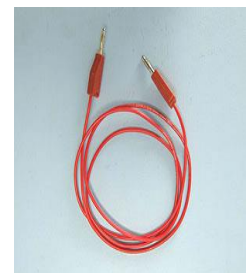
**Rhéostat**



**Interrupteur**



**Fil de connexion**



**Pinces crocodile**



**Moteur**



**Oscilloscope**



**G.B.F**



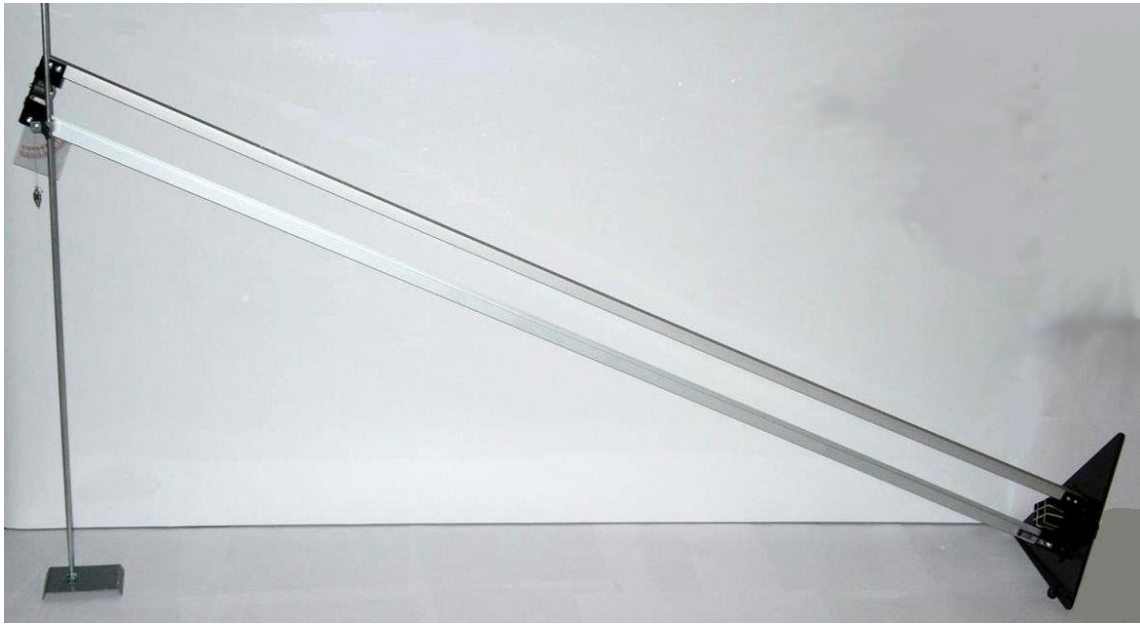
**Stroboscope**



**Electroaimant**



## Ensemble pour l'étude de la chute libre et le plan incliné



**Masses marquées à double crochet**



**Fil à plomb**



**Poulie**



**Potence**



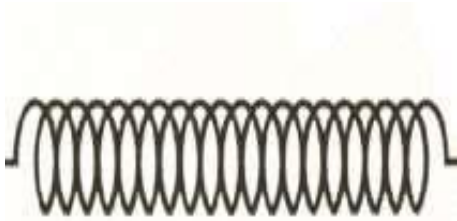
**Pinces**



**Noix de serrage**



**Ressort**



**Dynamomètre à cadran**



**Dynamomètre droit**



**Chronomètre**



**Chronomètre automatique, mesureur de vitesse & capteurs photoélectriques**





<p><b>Délectron</b></p> 	<p><b>Alimentation THT</b></p> 		<p><b>Bobines d'Helmholtz</b></p> 	
<p><b>Loupe</b></p> 	<p><b>Prisme</b></p> 	<p><b>Lentilles convergentes</b></p> 	<p><b>Lentilles divergentes</b></p> 	
<p><b>Lanterne</b></p> 	<p><b>Ecrans</b></p> 	<p><b>Banc d'optique</b></p> 		<p><b>Ensemble d'étude de la réflexion et la réfraction</b></p> 
<p><b>Fentes</b></p> 				
<p><b>Diaphragme en iris</b></p> 				

# Les grandeurs physiques jusqu'à la 3<sup>ème</sup> sciences

Grandeur physique	Symbole	Unité dans le S.I	Autres unités usuelles
Charge électrique	q ou Q	<b>C</b> : Coulomb	
Intensité du courant électrique	I	<b>A</b> : Ampère	
Tension électrique	U	<b>V</b> : Volt	
Potentiel électrique	V		
Distance		<b>m</b> : Mètre	<b>Å</b> : Angstrom ( $1\text{Å} = 10^{-10}\text{ m}$ )
Aire d'une surface	S	<b>m<sup>2</sup></b>	
Volume	V	<b>m<sup>3</sup></b>	<b>L</b> : Litre ( $1\text{ m}^3 = 1000\text{ L}$ )
Masse	m	<b>kg</b> : Kilogramme	<b>Tonne</b> = 1000 kg
Masse volumique	$\rho$	<b>kg. m<sup>-3</sup></b>	<b>g. cm<sup>-3</sup></b> = 1000 <b>kg. m<sup>-3</sup></b>
Densité	d		
Température	T / $\theta$		<b>°C</b> : Degré Celsius
Temps / durée de temps	t, T / $\Delta t$	<b>s</b> : Seconde	<b>min</b> : Minute (1 min = 60 s) <b>h</b> : Heure (1 h = 60 min)
Vitesse	V / v	<b>m.s<sup>-1</sup></b>	<b>Km.h<sup>-1</sup></b>
Intensité d'une force	$\ \vec{F}\ $	<b>N</b> : Newton	
Intensité du champ de pesanteur	g / $\ \vec{g}\ $	<b>N.kg<sup>-1</sup></b> (ou <b>m.s<sup>-2</sup></b> )	
Intensité du champ de gravitation	$\ \vec{G}\ $		
Raideur d'un ressort	k	<b>N.m<sup>-1</sup></b>	
Pression	P	<b>Pa</b> : Pascal	<b>bar</b> (1 bar = $10^5\text{ Pa}$ )
Énergie - Chaleur	E / $\bar{E}$ - Q	<b>J</b> : Joule	<b>cal</b> : calorie (1 cal = 4,185 J) <b>eV</b> : électron-volt (1 eV = $1,6.10^{-19}\text{ J}$ )
Puissance	$\mathcal{P}$	<b>W</b> : Watt	
Résistance électrique	R / r / r'	<b><math>\Omega</math></b> : Ohm	
Résistivité électrique	$\rho$	<b><math>\Omega.m</math></b>	
Force électromotrice / Force contre électromotrice	E / E'	<b>V</b>	
Période	T	<b>s</b>	
Fréquence	N	<b>Hz</b> : Hertz	
Rapport de transformation	$\eta$		
Moment d'une force	$\mathcal{M}$	<b>N.m</b>	
Moment d'un couple de forces	$\mathcal{M}(C)$		
Angle	$\alpha, \beta, \theta, \varphi$	<b>rad</b> : radian	<b>Degré</b> ( $1^\circ = \frac{\pi}{180}\text{ rad}$ )
Vitesse angulaire / Pulsation	$\omega$	<b>rad.s<sup>-1</sup></b>	
Travail mécanique	W	<b>J</b>	
Indice de réfraction	n		
Pression atmosphérique	P <sub>atm</sub>	<b>Pa</b>	<b>hPa</b> : Hectopascal (1 hPa = 1 mbar = 100 Pa) <b>atm</b> : Atmosphère (1 atm = $1,013 \cdot 10^5\text{ Pa} = 1,013\text{ bar}$ ) <b>cm Hg</b> : centimètre de mercure (76 cm Hg = 1 atm) <b>mm Hg</b> : millimètre de mercure (760 mm Hg = 1 atm)

Intensité du champ électrique	$\ \vec{E}\ $	$N.C^{-1}$ ou $V.m^{-1}$	
Intensité du champ magnétique	$\ \vec{B}\ $	T	
Accélération	a	$m.s^{-2}$	
Vergence d'une lentille	C	$\delta$	
Quantité de matière	n	mol : mole	
Avancement d'une réaction	x		
Masse molaire	M		$g.mol^{-1}$
Volume molaire	$V_m$		$L.mol^{-1}$
Concentration massique / solubilité (massique)	C / S		$g.L^{-1}$
Concentration molaire / solubilité (molaire)	C / S		$mol.L^{-1}$
Avancement volumique d'une réaction	y		
Taux d'avancement final d'une réaction	$\tau_f$		
Molarité d'un ion (ou molécule) x en solution	[x]		$mol.L^{-1}$
Produit ionique de l'eau	$K_e$		
pH	pH		
Nombre d'oxydation	n.o		
Conductance électrique	G	S : Siemens	

Sous-multiples	Valeur	Exemples
centi (c)	$10^{-2}$	1 cm = $10^{-2}$ m . .
milli (m)	$10^{-3}$	1 mm = $10^{-3}$ m 1 mA = $10^{-3}$ A 1 mV = $10^{-3}$ V . .
micro ( $\mu$ )	$10^{-6}$	1 $\mu$ m = $10^{-6}$ m 1 $\mu$ A = $10^{-6}$ A 1 $\mu$ C = $10^{-6}$ C . .
nano (n)	$10^{-9}$	1 nm = $10^{-9}$ m 1 nC = $10^{-9}$ C . .
Pico (p)	$10^{-12}$	1 pm = $10^{-12}$ m . .

Multiples	Valeur	Exemples
Kilo (K)	$10^3$	1 Km = $10^3$ m 1 KV = $10^3$ V 1 K $\Omega$ = $10^3$ $\Omega$ . .
Méga (M)	$10^6$	1 MN = $10^6$ N 1 MJ = $10^6$ J 1 M $\Omega$ = $10^6$ $\Omega$ . .
Giga (G)	$10^9$	1 GHz = $10^9$ Hz . .

*Ce livre est conçu conformément au programme officiel Tunisien en vigueur, et aux directives inhérentes.*

*L'auteur a fait de son mieux pour que cet ouvrage soit exempt d'erreurs ;  
Cependant, si vous en découvrez, merci de m'en informer à [farjallaha@gmail.com](mailto:farjallaha@gmail.com),  
afin de les rectifier dans des versions futures.*

*Les suggestions et commentaires des collègues sont, de toute évidence, les bienvenues.*

*En recevant une copie de ce livre, l'auteur vous accorde de plein gré le droit de l'utiliser, le copier,  
le distribuer, par quelque procédé qu'il soit, comme bon vous semble, à des fins non commerciales,  
vous avez même le droit de le manger 😊, ou le jeter à la corbeille; à la seule condition de **ne pas le modifier**.*

*Partager ce livre sur Facebook*



Un autre livre utilisable en classe comme support de cours conjointement avec le présent ouvrage est disponible

[bit.ly/farjallah-physique-3eme-sc](https://bit.ly/farjallah-physique-3eme-sc) 📖