

# **Physique**

# **Terminale Sciences Exactes**

## **Programme de Physique**

---

### **Unité d'Apprentissage 1** : Rappels sur la Mécanique

Concept : Rappels sur le Mouvement du Centre d'inertie d'un Solide

---

### **Unité d'Apprentissage 2** : Application de la Relation Fondamentale de la Dynamique

Concept 1 : Mouvement d'un Projectile dans le Champ Uniforme de Pesanteur Terrestre

Concept 2 : Mouvement d'une Particule Chargée dans le Champ Electrique Uniforme

Concept 3 : Mouvement d'une Particule Chargée dans le Champ Magnétique Uniforme

Concept 4 : Mouvement d'un Satellite Terrestre dans le Champ de Pesanteur

---

### **Unité d'Apprentissage 3** : Energie Interne d'un Système

Concept 1 : Premier Principe de la Thermodynamique

Concept 2 : La Calorimétrie

---

### **Unité d'Apprentissage 4** : Auto-induction Electromagnétique

Concept 1 : Induction Electromagnétique

Concept 2 : Applications de l'Induction Electromagnétique

Concept 3 : Auto-induction

---

### **Unité d'Apprentissage 5** : Vibrations

Concept 1 : Nature Vibratoire du Son

Concept 2 : Interférences

Sous Concept 1 : Interférences Mécaniques

Sous Concept 2 : Interférences lumineuses

Concept 3 : Rayonnement Laser

---

### **Unité d'apprentissage 6** : Oscillateurs Libres

Concept 1 : Oscillateurs Mécaniques Libres

Sous concept 1 : Oscillateurs Mécaniques Libres de Translation

Sous concept 2 : Oscillateurs Mécaniques Libres de Rotation

Concept 2 : Oscillateurs Electriques Libres

Concept 3 : Ondes Electromagnétiques

---

### **Unité d'apprentissage 7** : Oscillateurs Forcés

Concept 1 : Oscillateurs Mécaniques Forcés

Concept 2 : Oscillateurs Electriques Forcés

---

### **Unité d'apprentissage 8** : Physique Ondulatoire et Corpusculaire

Concept 1 : Effet Photoélectrique

Concept 2 : Niveau d'Energie dans l'Atome d'Hydrogène

Concept 3 : Rayons X

---

### **Unité d'apprentissage 9** : Physique Atomique et Nucléaire

Concept : Le Noyau Atomique et les Réactions Nucléaires

## Séquence 1

### Unité d'Apprentissage 1 : Rappels sur la Mécanique

#### Concept : Rappels sur le Mouvement du Centre d'Inertie d'un Solide

#### Situation d'apprentissage :

Dans ce concept, nous rappelons quelques notions de la Mécanique (cinématique de quelques mouvements, relation fondamentale de la dynamique, énergie potentielle, énergie cinétique et théorème de l'énergie cinétique) étudiées en classe précédente.

### Activité 1 : Généralités sur la cinématique

#### Consigne :

- Définis : cinématique, point matériel, système de points matériels, mobile, mouvement, référentiel, trajectoire.
- Définis la position d'un mobile M en translation, dans la base cartésienne.
- Définis l'abscisse curviligne et l'abscisse angulaire d'un mobile M en rotation.
- Définis la vitesse d'un mobile M en translation, dans la base cartésienne.
- Définis la vitesse linéaire et angulaire d'un mobile M, en rotation.
- Définis l'accélération d'un mobile M en translation, dans la base cartésienne.
- Définis l'accélération d'un mobile M en rotation, dans la base de Frenet.

### Synthèse 1 :

#### I. Généralités :

##### 1. Définitions :

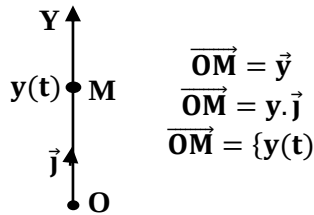
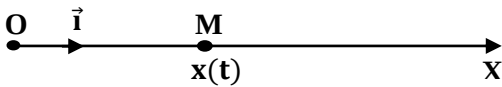
- La cinématique est la partie de la mécanique qui étudie les mouvements des corps indépendamment de leurs causes.
- Un point matériel est un point géométrique d'un solide assimilé à son centre d'inertie (ou de gravité).
- Un système de points matériels est un ensemble de points matériels constituant un corps.
- Un mobile est un corps (ou un point matériel) en mouvement.
- Tout corps qui change de position est en mouvement.
- On appelle référentiel l'objet physique par rapport auquel on étudie le mouvement ; par exemple un immeuble, ...
- Les différentes positions successives occupées par le mobile désignent la trajectoire.

##### 2. La position d'un mobile M :

##### a. La position d'un mobile M en translation :

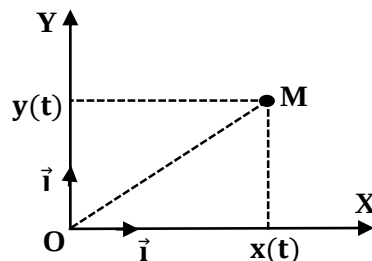
Le vecteur position d'un mobile, est défini dans la base cartésienne par  $\overrightarrow{OM}$

- Sur une droite :  $\overrightarrow{OM} = \vec{x}$   
 $\overrightarrow{OM} = x.\vec{i}$   
 $\overrightarrow{OM} = \{x(t)\}$



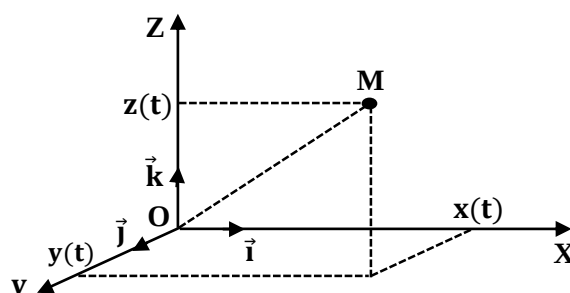
$$\begin{aligned}\overrightarrow{OM} &= \vec{y} \\ \overrightarrow{OM} &= y.\vec{j} \\ \overrightarrow{OM} &= \{y(t)\}\end{aligned}$$

- Dans un plan :



$$\begin{aligned}\overrightarrow{OM} &= \vec{x} + \vec{y} \\ \overrightarrow{OM} &= x.\vec{i} + y.\vec{j} \\ \overrightarrow{OM} &= \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix}\end{aligned}$$

- Dans l'espace :



$$\begin{aligned}\overrightarrow{OM} &= \vec{x} + \vec{y} + \vec{z} \\ \overrightarrow{OM} &= x.\vec{i} + y.\vec{j} + z.\vec{k} \\ \overrightarrow{OM} &= \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix}\end{aligned}$$

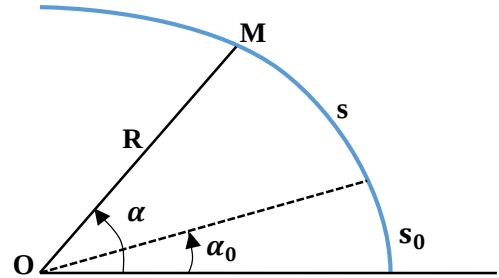
Les coordonnées  $x(t)$ ,  $y(t)$  et  $z(t)$  varient en fonction du temps, appelées les équations paramétriques ou horaires du mouvement (où  $t$  est en seconde ; et  $x$ ,  $y$  et  $z$  sont en mètre).

### A savoir :

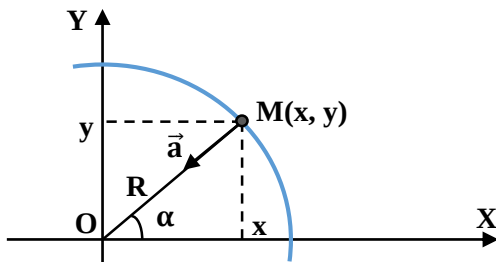
- La position initiale est définie à  $t = 0s$  :  $\overrightarrow{OM}_0 = \{x_0$   $\overrightarrow{OM}_0 = \{y_0$   $\overrightarrow{OM}_0 = \begin{cases} x_0 \\ y_0 \end{cases}$   $\overrightarrow{OM}_0 = \begin{cases} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{cases}$
- L'équation de la trajectoire est  $y = f(x)$  ou  $x = f(y)$ , on tire le temps ( $t$ ) dans l'une et on le remplace dans l'autre.
- Si l'équation de la trajectoire est sous la forme :  $y = ax + b$  ou  $y = a$  ou  $x = b$  alors la trajectoire est une droite.
- Si l'équation de la trajectoire est sous la forme :  $y = ax^2 + bx + c$  alors la trajectoire est parabolique.

### b. L'abscisse curviligne et l'abscisse angulaire d'un mobile M en rotation :

- L'abscisse curviligne d'un mobile, est une fonction du temps :  $s(t)$  (en m)
- L'abscisse angulaire d'un mobile, est aussi une fonction du temps :  $\alpha(t)$  (en rd)
- L'abscisse angulaire et l'abscisse curviligne sont liées par :  
 $s = R\alpha \Rightarrow \alpha = \frac{s}{R}$  (où  $r$  le rayon de la trajectoire)



### A savoir : Position en coordonnées cartésiennes d'un solide en rotation



$$\text{On a : } \begin{cases} \cos \alpha = \frac{x}{R} \\ \sin \alpha = \frac{y}{R} \end{cases} \Rightarrow \overrightarrow{OM} = \begin{cases} x = R \cos \alpha \\ y = R \sin \alpha \end{cases}$$

$$\text{Si } \alpha = at + b \Rightarrow \overrightarrow{OM} = \begin{cases} x = R \cos(at + b) \\ y = R \sin(at + b) \end{cases}$$

$$\Rightarrow R^2 = x^2 + y^2 \Rightarrow R^2 = \sqrt{x^2 + y^2}$$

### 3. La vitesse d'un mobile :

#### a. Vitesse d'un mobile M en translation :

Le vecteur-vitesse d'un mobile, est définie, dans la base cartésienne par :

$$\vec{V} = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt} = \begin{cases} V_x = \frac{dx}{dt} \\ V_y = \frac{dy}{dt} \\ V_z = \frac{dz}{dt} \end{cases} \quad \text{dont son module est } V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

#### b. Vitesse linéaire et vitesse angulaire d'un mobile M en rotation :

Dans la base de Frenet :

- La vitesse linéaire ou la vitesse, est la dérivée de l'abscisse curviligne par rapport au temps :  $\vec{v} = \begin{cases} v_t = \frac{ds}{dt} = v \\ v_n = 0 \end{cases}$
- La vitesse angulaire, est la dérivée de l'abscisse angulaire par rapport au temps :  $\omega = \frac{d\alpha}{dt}$
- On sait que :  $\alpha = \frac{s}{r} \Rightarrow \omega = \frac{d(s)}{r dt} \Rightarrow \omega = \frac{v}{r} \Rightarrow v = \omega r$

### 4. L'accélération :

- Le vecteur-accélération d'un mobile M en translation, est définie, dans la base cartésienne par :

$$\vec{a} = \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{d^2\overrightarrow{OM}}{dt^2} = \begin{cases} a_x = \frac{dV_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \\ a_y = \frac{dV_y}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2} \\ a_z = \frac{dV_z}{dt} = \frac{d^2z}{dt^2} \end{cases} \quad \text{dont son module est } a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

- Le vecteur-accélération d'un mobile M en rotation, est définie, dans la base de Frenet par :

$$\vec{a} = \begin{cases} a_t = \frac{dv}{dt} \\ a_n = \frac{v^2}{R} \end{cases} \quad R \text{ est le rayon de la trajectoire et le module de l'accélération est } a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}$$

**A savoir :** Sur un axe

- La vitesse moyenne entre  $x_1$  à  $t_1$  et  $x_2$  à  $t_2$  est  $V = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$
- L'accélération moyenne entre  $V_1$  à  $t_1$  et  $V_2$  à  $t_2$  est  $a = \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1}$

## Activité 2 : Différents types de mouvement

A partir de tes connaissances

**Consigne :** définis

- Le mouvement rectiligne uniforme suivant un axe, dans la base cartésienne.
- Le mouvement rectiligne uniformément varié suivant un axe, dans la base cartésienne.
- Le mouvement rectiligne sinusoïdal suivant un axe, dans la base cartésienne.
- Le mouvement circulaire uniforme dans la base de Frenet.

## Synthèse 2 :

### II. Différents types de mouvements :

#### 1. Mouvement rectiligne uniforme :

Un mouvement rectiligne uniforme suivant un axe, est défini dans la base cartésienne par :

$$\begin{cases} x = v_0 t + x_0 \\ v = \frac{dx}{dt} = v_0 \text{ constante} \\ a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = 0 \end{cases} \quad \text{où} \quad \vec{v} \cdot \vec{a} = 0$$

#### 2. Mouvement rectiligne uniformément varié :

Un mouvement rectiligne uniformément varié suivant un axe, est défini dans la base cartésienne par :

$$\begin{cases} x = \frac{1}{2} a t^2 + v_0 t + x_0 \\ v = \frac{dx}{dt} = a t + v_0 \\ a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \text{ constante} \end{cases} \quad \text{où} \quad \begin{cases} \vec{v} \cdot \vec{a} \neq 0 \\ \text{Si } \vec{v} \cdot \vec{a} > 0 \text{ alors le mouvement est accéléré} \\ \text{Si } \vec{v} \cdot \vec{a} < 0 \text{ alors le mouvement est retardé} \end{cases}$$

**A savoir :**

On a :  $v = a t + v_0 \Rightarrow t = \frac{v - v_0}{a}$ , on remplace t par son expression dans l'équation :  $x = \frac{1}{2} a t^2 + v_0 t + x_0$

$$\text{On aura : } x = \frac{1}{2} a \left( \frac{v - v_0}{a} \right)^2 + v_0 \left( \frac{v - v_0}{a} \right) + x_0 = \frac{v^2 + v_0^2 - 2vv_0}{2a} + \frac{vv_0 - v_0^2}{a} + x_0 \Rightarrow x - x_0 = \frac{v^2 + v_0^2 - 2vv_0 + 2vv_0 - 2v_0^2}{2a} = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$$

$$\text{Alors : } 2a(x - x_0) = v^2 - v_0^2$$

### Application 1 : Mouvement d'un point mobile M

Les équations horaires du mouvement d'un point mobile M Sont :  $\vec{OM} = \begin{cases} x = 3t \\ y = -t^2 + 2t \\ z = 0 \end{cases}$

- Quel est le domaine dans lequel s'effectue le mouvement ?
- Etablis l'équation cartésienne de la trajectoire du mobile. En déduis sa nature.
- Détermine le vecteur-vitesse et le vecteur-accélération à tout instant puis en déduis la nature du mouvement suivant les axes.
- Calcule la vitesse du M à  $t = 7$  s. Quelle est alors la position du point mobile M ?
- Calcule la vitesse du point mobile M au point d'ordonnée  $y = 1$  m.
- Pour quelle(s) valeur(s) de t le mouvement est-il accéléré ? Retardé ?

**Correction 1****1. Le domaine dans lequel s'effectue le mouvement**

On a :  $\mathbf{Z} = \mathbf{0}$  alors le mouvement ne s'effectue pas sur l'axe (oz) donc le mouvement s'effectue dans le plan (o, x, y)

**2. Établissons l'équation cartésienne de la trajectoire du mobile. En déduisons sa nature**

On sait que :  $x = 3t \Rightarrow t = \frac{x}{3}$  et  $y = -t^2 + 2t \Rightarrow y = -x^2 + 2x$  la trajectoire est parabolique

**3. Déterminons le vecteur-vitesse et le vecteur-accélération à tout instant**

$$\text{On a : } \overrightarrow{OM} = \begin{cases} x = 3t \\ y = -t^2 + 2t \end{cases} \Rightarrow \mathbf{v} = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt} = \begin{cases} V_x = \frac{dx}{dt} \\ V_y = \frac{dy}{dt} \end{cases} \Rightarrow \vec{v} = \begin{cases} V_x = 3 \\ V_y = -2t + 2 \end{cases}$$

$$\text{Alors : } \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \begin{cases} a_x = \frac{dV_x}{dt} \\ a_y = \frac{dV_y}{dt} \end{cases} \Rightarrow \vec{a} = \begin{cases} a_x = 0 & \text{mouvement uniforme suivant (ox)} \\ a_y = -2 & \text{mouvement uniformément varié suivant (oy)} \end{cases}$$

**4. Calculons la position du point mobile M et sa vitesse à  $t = 7$  s**

$$\text{On a : } \overrightarrow{OM} = \begin{cases} x = 3t \\ y = -t^2 + 2t \end{cases} \text{ à } t = 7 \Rightarrow \overrightarrow{OM} = \begin{cases} x = 3 \times 7 \\ y = -7^2 + 2 \times 7 \end{cases} \Rightarrow \overrightarrow{OM} = \begin{cases} x = 21 \\ y = -35 \end{cases}$$

$$\text{Et : } \vec{v} = \begin{cases} V_x = 3 \\ V_y = -2t + 2 \end{cases} \text{ à } t = 7 \Rightarrow \vec{v} = \begin{cases} V_x = 3 \\ V_y = -2 \times 7 + 2 \end{cases} \Rightarrow \vec{v} = \begin{cases} V_x = 3 \\ V_y = -12 \end{cases} \Rightarrow v = \sqrt{3^2 + 12^2} \Rightarrow v = 12,37 \text{ m/s}$$

**5. Calculons la vitesse du mobile M au point d'ordonnée :  $y = 1$  m**

$$\text{On a : } \overrightarrow{OM} = \begin{cases} x = 3t \\ y = -t^2 + 2t \end{cases} = 1 \Rightarrow -t^2 + 2t - 1 = 0 \Rightarrow \Delta = 2^2 - 4 \Rightarrow \Delta = 0 \Rightarrow t = \frac{-2}{-2} \Rightarrow t = 1 \text{ s}$$

$$\text{Et : } \vec{v} = \begin{cases} V_x = 3 \\ V_y = -2t + 2 \end{cases} \text{ à } t = 1 \Rightarrow \vec{v} = \begin{cases} V_x = 3 \\ V_y = -2 \times 1 + 2 \end{cases} \Rightarrow \vec{v} = \begin{cases} V_x = 3 \\ V_y = 0 \end{cases} \Rightarrow v = 3 \text{ m/s}$$

**6. Les valeurs de (t) pour lesquelles le mouvement est accéléré ou Retardé**

$$\text{On a : } \vec{v} = \begin{cases} V_x = 3 \\ V_y = -2t + 2 \end{cases} \text{ et } \vec{a} = \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = -2 \end{cases} \Rightarrow \vec{v} \cdot \vec{a} = V_x \cdot a_x + V_y \cdot a_y = (3 \times 0) + (-2t + 2)(-2)$$

$$\Rightarrow \vec{v} \cdot \vec{a} = 4t - 4, \text{ on pose } 4t - 4 = 0 \Rightarrow 4t = 4 \Rightarrow t = \frac{4}{4} \Rightarrow t = 1$$

**■ Tableau de signe :**

| t                       | 0 | 1 | $+\infty$ |
|-------------------------|---|---|-----------|
| $\vec{v} \cdot \vec{a}$ |   | - | +         |

- Pour tout  $t \in ]0 ; 1[$  le mouvement est retardé.
- Pour tout  $t \in ]1 ; +\infty[$  le mouvement est accéléré.

**3. Mouvement rectiligne sinusoïdal :**

Le mouvement rectiligne sinusoïdal suivant un axe, est défini dans la base cartésienne par :

$$\begin{cases} x(t) = x = x_m \cos(\omega t + \varphi_0) \\ \dot{x} = v = \frac{dx}{dt} = -\omega x_m \sin(\omega t + \varphi_0) \\ \ddot{x} = a = -\omega^2 x_m \cos(\omega t + \varphi_0) \Rightarrow a = -\omega^2 x \end{cases}$$

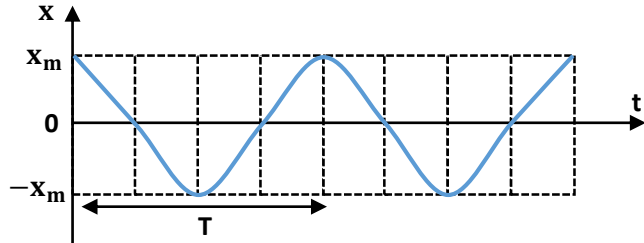
- $\varphi = \omega t + \varphi_0$  est la phase à l'instant t (en rd),
- x est appelée élongation (en m),
- $x_m$  est l'amplitude ou la valeur maximale de x (en m),
- $\omega$  est la pulsation (en rd/s).
- $\varphi_0$  est la phase initiale (en rd), elle est déterminée par les conditions initiales.

**A savoir :**

- La période :  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  (en s)
- La fréquence :  $N$  ou  $f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$  (en Hz)  $\Rightarrow \omega = 2\pi f$  (en rd/s)
- Soit à représenter  $x = x_m \cos(\omega t)$  avec  $\varphi = \omega t = \frac{2\pi}{T}t \Rightarrow x = x_m \cos(\frac{2\pi}{T}t)$  en fonction du temps.

Le tableau de valeurs de  $x$  par pas du quart de la période  $T$  :

|                      |       |                 |               |                  |        |
|----------------------|-------|-----------------|---------------|------------------|--------|
| $t(s)$               | 0     | $\frac{T}{4}$   | $\frac{T}{2}$ | $\frac{3T}{4}$   | $T$    |
| $\varphi(\text{rd})$ | 0     | $\frac{\pi}{2}$ | $\pi$         | $\frac{3\pi}{2}$ | $2\pi$ |
| $x(m)$               | $x_m$ | 0               | $-x_m$        | 0                | $x_m$  |

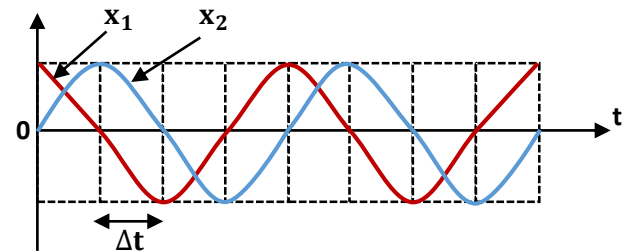


- Le déphasage entre deux fonctions sinusoïdales :  $x_1 = x_m \cos(\omega t + \varphi_1)$  et  $x_2 = x_m \cos(\omega t + \varphi_2)$  est  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$
- Si  $\Delta\varphi = 0$  alors  $x_1$  et  $x_2$  sont en phase ;
- Si  $\Delta\varphi > 0$  alors  $x_2$  est en avance sur  $x_1$  ou  $x_1$  est en retard sur  $x_2$  ;
- Si  $\Delta\varphi < 0$  alors  $x_1$  est en avance sur  $x_2$  ou  $x_2$  est en retard sur  $x_1$  ;
- Si  $\Delta\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$  alors  $x_1$  et  $x_2$  sont en quadrature de phase ;
- Si  $\Delta\varphi = \pm \pi$  alors  $x_1$  et  $x_2$  sont en opposition de phase.
- Le décalage horaire  $\Delta t$  entre les deux courbes représentatives des deux fonctions sinusoïdales à  $x_1 = 0$  et à  $x_2 = 0$ , allant dans le même sens est tel que :  $\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{|\Delta\varphi|}{\Delta t}$

Par exemple pour  $\Delta\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$  en quadrature de phase,

$$\text{on a : } \omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{|\Delta\varphi|}{\Delta t}$$

$$\Rightarrow \Delta t = \frac{T \cdot |\Delta\varphi|}{2\pi} = \frac{T}{2\pi} \times \frac{\pi}{2} \Rightarrow \Delta t = \frac{T}{4}$$

**Application 2 : Mouvement rectiligne sinusoïdal**

Un mobile est animé d'un mouvement rectiligne sinusoïdal de période :  $T = 0,2s$ . A la date  $T = 0s$ , il passe par l'origine des elongations avec une vitesse de mesure algébrique  $V = 0,4\pi$  m/s.

- Ecris l'équation horaire du mouvement du mobile.
- A quel instant le mobile passe-t-il pour la première fois par l'élongation  $x = -2$  cm en allant dans le sens positif ? Trouve la vitesse et accélération du mobile à cet instant.
- Calcule le décalage angulaire et le décalage horaire entre  $v$  et  $a$ . Conclus
- Représente  $x$  et  $v$  dans un même repère.

**Correction 2****1. Ecrivons l'équation horaire du mouvement du mobile c'est-à-dire déterminons :  $\varphi_0$ ,  $\omega$  et  $x_m$** 

$$\begin{cases} x(t) = x = x_m \cos(\omega t + \varphi_0) \\ v = -\omega x_m \sin(\omega t + \varphi_0) \end{cases} \quad \text{à } t = 0 \quad \begin{cases} x_0 = x = x_m \cos(\varphi_0) = 0 \\ v_0 = -\omega x_m \sin(\varphi_0) = 0,4\pi > 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \cos(\varphi_0) = 0 \\ \sin(\varphi_0) < 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \varphi_0 = \pm \frac{\pi}{2} \\ \varphi_0 < 0 \end{cases} \Rightarrow \varphi_0 = -\frac{\pi}{2}$$

$$\text{On sait que : } \omega = \frac{2\pi}{T} \Rightarrow \omega = \frac{2 \times 3,14}{0,2} \Rightarrow \omega = 31,4 \text{ rd/s}$$

$$\text{Et } v_0 = -\omega x_m \sin(\varphi_0) \Rightarrow -\omega x_m \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) = v_0 \Rightarrow \omega x_m = v_0 \Rightarrow x_m = \frac{v_0}{\omega} \Rightarrow x_m = \frac{0,4 \times 3,14}{31,4} \Rightarrow x_m = 0,04 \text{ m}$$

$$\text{Alors : } x(t) = 0,04 \cos\left(31,4t - \frac{\pi}{2}\right)$$

2. Déterminons l'instant où le mobile passe pour la première fois par l'élongation  $x = -2 \text{ cm}$  en allant dans le sens positif et Trouvons la vitesse et accélération du mobile à cet instant

$$\text{On a : } \begin{cases} x = 0,04 \cos\left(31,4t - \frac{\pi}{2}\right) = -0,02 \\ v = -0,04 \times 31,4 \sin\left(31,4t - \frac{\pi}{2}\right) > 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \cos\left(31,4t - \frac{\pi}{2}\right) = \frac{-0,02}{0,04} = -0,5 \\ \sin\left(31,4t - \frac{\pi}{2}\right) < 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} 31,4t - \frac{\pi}{2} = \pm\left(\frac{2\pi}{3} + 2K\pi\right) \\ 31,4t - \frac{\pi}{2} < 0 \end{cases}$$

$$\text{Avec } K = 0 \Rightarrow 31,4t - \frac{\pi}{2} = -\frac{2\pi}{3} \Rightarrow 31,4t = \left|\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}\right| \Rightarrow 31,4t = \frac{\pi}{6} \Rightarrow t = \frac{3,14}{6 \times 31,4} \Rightarrow t = 0,0167 \text{ s}$$

$$\text{On a : } \begin{cases} v = -0,04 \times 31,4 \sin\left(31,4t - \frac{\pi}{2}\right) \\ a = -\omega^2 x \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} v = -0,04 \times 31,4 \sin\left(-\frac{2\pi}{3}\right) \\ a = -\omega^2 x = -31,4^2 \times -0,02 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} v = 1,09 \text{ m/s} \\ a = 19,7 \text{ m/s}^2 \end{cases}$$

3. Calculons le décalage angulaire et le décalage horaire entre  $v$  et  $a$

$$\text{On sait que : } \Delta\varphi = \varphi_a - \varphi_v \Rightarrow \begin{cases} v = -0,04 \times 31,4 \sin\left(31,4t - \frac{\pi}{2}\right) \\ a = -\omega^2 x = -31,4^2 \times 0,04 \cos\left(31,4t - \frac{\pi}{2}\right) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} v = 0,04 \times 31,4 \cos(31,4t) \\ a = -31,4^2 \times 0,04 \cos\left(31,4t - \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \Rightarrow \Delta\varphi = -\frac{\pi}{2} - 0 \Rightarrow \Delta\varphi = -\frac{\pi}{2} \text{ alors (a) est en retard sur (v)}$$

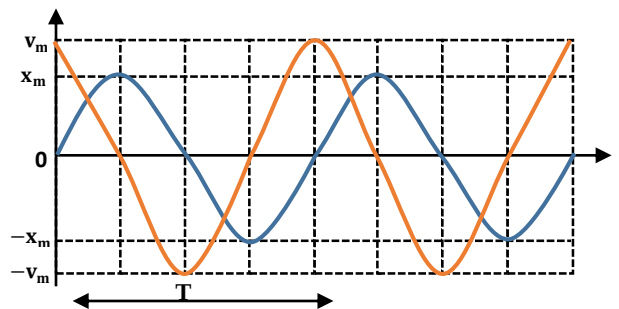
$$\text{On sait que : } \omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{|\Delta\varphi|}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{T \cdot |\Delta\varphi|}{2\pi} = \frac{T}{2\pi} \times \frac{\pi}{2} \Rightarrow \Delta t = \frac{T}{4} \text{ alors (a) et (v) sont en quadrature de phase}$$

4. Représentons  $x$  et  $v$  dans un même repère.

$$\text{On a : } \begin{cases} x = 0,04 \cos\left(31,4t - \frac{\pi}{2}\right) \\ v = -0,04 \times 31,4 \sin\left(31,4t - \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x = 0,04 \cos\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{\pi}{2}\right) \\ v = -1,26 \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{\pi}{2}\right) \end{cases}$$

Tableau de valeur de  $x$  et  $v$

| $t \text{ (s)}$        | 0                | $\frac{T}{4}$ | $\frac{T}{2}$   | $\frac{3T}{4}$ | $T$               |
|------------------------|------------------|---------------|-----------------|----------------|-------------------|
| $\varphi \text{ (rd)}$ | $-\frac{\pi}{2}$ | 0             | $\frac{\pi}{2}$ | $\pi$          | $-\frac{3\pi}{2}$ |
| $x \text{ (m)}$        | 0                | 0,04          | 0               | -0,04          | 0                 |
| $v \text{ (m/s)}$      | 1,26             | 0             | -1,26           | 0              | 1,26              |



#### 4. Mouvement circulaire :

##### a. Mouvement circulaire uniforme :

La base de Frenet est une base mobile ayant son origine le point où se trouve le mobile. Ses axes sont l'un tangent à la trajectoire de vecteur unitaire  $\vec{u}$  et l'autre suivant la normale de vecteur unitaire  $\vec{n}$  toujours dirigé vers le centre du cercle.

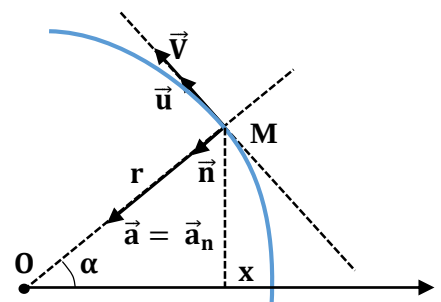
Dans la base de Frenet :

- Le vecteur-vitesse du mouvement circulaire uniforme est :

$$\vec{v} = \begin{cases} v_t = \frac{ds}{dt} = v = v_0 \\ v_n = 0 \end{cases}$$

- Le vecteur-accélération du mouvement circulaire uniforme

$$\text{est : } \vec{a} = \begin{cases} a_t = \frac{dv}{dt} = 0 \\ a_n = \frac{v^2}{r} \end{cases} \Rightarrow \vec{a} = \vec{a}_n \Rightarrow a = a_n$$

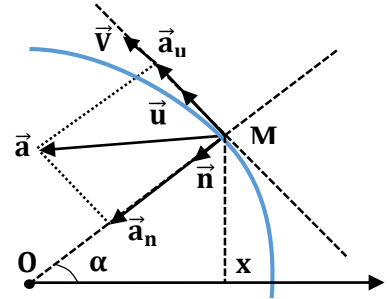


- Le mouvement circulaire uniforme est périodique :  $T = \frac{2\pi}{\omega}$
- On a :  $\omega = \frac{v}{r} \Rightarrow T = \frac{2\pi r}{v}$  et sa fréquence est le nombre de tours par seconde :  $f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{v}{2\pi r}$
- L'abscisse curviligne est :  $s = vt + s_0$
- L'abscisse angulaire est :  $\alpha = \omega t + \alpha_0$
- L'abscisse x dans la base cartésienne est :  $x = r \cos \alpha$  et  $\alpha = \omega t + \alpha_0 \Rightarrow x = r \cos(\omega t + \alpha_0)$

### b. Mouvement circulaire uniformément varié :

Dans la base de Frenet :

- Le vecteur-vitesse du mouvement circulaire uniformément varié est :  $\vec{v} = \begin{cases} \vec{v}_t = \frac{ds}{dt} = v = at + v_0 \\ \vec{v}_n = 0 \end{cases}$
- Le vecteur-accelération du mouvement circulaire uniformément varié est :  $\vec{a} = \begin{cases} \vec{a}_t = \frac{dv}{dt} \\ \vec{a}_n = \frac{v_M^2}{r} \end{cases} \Rightarrow \vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_n \Rightarrow a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}$
- L'abscisse curviligne est :  $s = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + s_0$
- L'abscisse angulaire est :  $\alpha = \frac{1}{2}\gamma t^2 + \omega_0t + \alpha_0$  où  $\gamma$  est l'accélération angulaire
- La vitesse angulaire est :  $\omega = \gamma t + \omega_0$
- L'abscisse x dans la base cartésienne est :  $x = r \cos \alpha$  et  $\alpha = \frac{1}{2}\gamma t^2 + \omega_0t + \alpha_0 \Rightarrow x = r \cos(\frac{1}{2}\gamma t^2 + \omega_0t + \alpha_0)$



### Application 3 : Mouvement circulaire uniforme

La période d'un mouvement circulaire uniforme est de 20s, la vitesse linéaire du mobile étant de 31,4m/s.

- Détermine le rayon de la trajectoire du mobile.
- Calcule la vitesse angulaire du mobile.
- Calcule la valeur de son accélération.
- Ecris l'expression de l'abscisse x dans la base cartésienne, sachant que à  $t = 0s$  l'abscisse angulaire est nulle.

### Correction 3

#### 1. Déterminons le rayon de la trajectoire du mobile

$$\text{On a : } T = \frac{2\pi r}{v} \Rightarrow r = \frac{T \cdot v}{2\pi} \Rightarrow r = \frac{20 \times 31,4}{2 \times 3,14} \Rightarrow r = 100m$$

#### 2. Calculons la vitesse angulaire du mobile

$$\text{On a : } \omega = \frac{v}{r} \Rightarrow \omega = \frac{31,4}{100} \Rightarrow \omega = 0,314 \text{rd/s}$$

#### 3. Calculons la valeur de son accélération

$$\text{On a : } a = \frac{v^2}{r} \Rightarrow a = \frac{31,4^2}{100} \Rightarrow a = 9,86 \text{m/s}^2$$

#### 4. Ecrivons l'expression de l'abscisse x dans la base cartésienne, sachant que à $t = 0s$ l'abscisse angulaire est nulle

L'abscisse x dans la base cartésienne est :  $x = r \cos \alpha$  et  $\alpha = \omega t + \alpha_0$

$$\Rightarrow \alpha = 0,314t \Rightarrow x = 100 \cos(0,314t)$$

### Activité 3 : Relation fondamentale de la dynamique

#### Consigne :

A partir de tes connaissances, rappelle la relation fondamentale de la dynamique.

**Synthèse 3 :****III. Relation fondamentale de la dynamique :**

Un référentiel Galiléen est un référentiel dans lequel, un point matériel soustrait à toute interaction (système isolé) a une trajectoire rectiligne et une vitesse constante.

Dans un repère Galiléen, la dérivée par rapport au temps du vecteur-quantité du mouvement d'un solide est égale à la somme vectorielle des forces extérieures appliquées sur ce solide.

Le vecteur quantité de mouvement :  $\vec{P} = m\vec{V}$  ( $m$  : la masse du système est une constante et  $\vec{V}$  : le vecteur vitesse du système)

D'après la relation fondamentale :  $\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \frac{d\vec{P}}{dt} = \frac{dm\vec{V}}{dt} = m \frac{d\vec{V}}{dt} \Rightarrow \sum \vec{F}_{\text{ext}} = m\vec{a}$  (où  $\vec{a}$  est le vecteur-accelération)

- Si :  $\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \text{cste} \Rightarrow a = \text{cste}$  alors sur cet axe le mouvement est uniformément varié :

$$\Rightarrow \mathbf{V} = \mathbf{at} + \mathbf{V_0t} \text{ et } \mathbf{x} = \frac{1}{2}\mathbf{at^2} + \mathbf{v_0t} + \mathbf{x_0}$$

- Si  $\vec{a}$  et  $\vec{V}$  ont la même direction alors le centre d'inertie G du système décrit une rectiligne,
- Si  $\vec{a}$  et  $\vec{V}$  n'ont pas la même direction, alors, le centre d'inertie G du système décrit une trajectoire parabolique,
- Si  $\vec{a}$  et  $\vec{V}$  sont orthogonales, alors, le centre d'inertie G du système décrit une trajectoire circulaire,
- Si  $\vec{a} \cdot \vec{V} > 0 \Rightarrow (\widehat{\vec{a}, \vec{V}}) < 90^\circ$  alors le mouvement est accéléré,
- Si  $\vec{a} \cdot \vec{V} < 0 \Rightarrow (\widehat{\vec{a}, \vec{V}}) > 90^\circ$  alors le mouvement est désaccélééré.

- Si :  $\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{0}$  alors sur cet axe son centre d'inertie a un mouvement rectiligne uniforme et réciproquement :  
 $\Rightarrow \mathbf{a} = \mathbf{0} \Rightarrow \mathbf{V} = \mathbf{V_0} \text{ et } \mathbf{x} = \mathbf{v_0t} + \mathbf{x_0}$

**A savoir :** Théorème du centre d'inertie

Dans un référentielle galiléen le mouvement du centre d'inertie d'un système est celui d'un point matériel où serait concentrée toute la masse du système et auquel serait appliquée la résultante des forces extérieures au système.

**Application 4 :** Relation fondamentale de la dynamique

Un objet de masse  $m = 2\text{kg}$ , est repos à la date  $t = 0\text{s}$ . Il subit l'action d'une force de direction constante dont la valeur est  $F = 12\text{N}$ . Trouve les expressions de l'accélération  $a(t)$ , de la vitesse  $v(t)$  et l'abscisse  $x(t)$ .

**Correction 4**

- L'objet est soumis uniquement à la force :  $\vec{F}$
- D'après la RFD :  $\sum \vec{F}_{\text{ext}} = m\vec{a} \Rightarrow \vec{F} = m\vec{a} \Rightarrow \vec{a} = \frac{1}{m}\vec{F} \Rightarrow a = \frac{F}{m} \Rightarrow a = \frac{12}{2} \Rightarrow \mathbf{a = 6m/s^2}$   
**C'est une constante alors le mouvement est uniformément varié**
- Alors la vitesse :  $v = at + v_0$  ; repos  $v_0 = 0$  et  $a = 6 \Rightarrow \mathbf{v = 6t}$
- Alors l'abscisse :  $x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0$  ; on a  $x_0 = 0$  ;  $v_0 = 0$  et  $a = 6 \Rightarrow \mathbf{x = 3t^2}$

**Activité 4 :** Travail d'une force conservative

A partir de tes connaissances

**Consigne :**

- Donne l'expression du travail d'une force.
- Définit une force conservative et donne un exemple.
- Donne l'expression du travail du poids d'un corps.
- Donne l'expression du travail de la force électrostatique régnant entre deux plaques parallèles de potentiels opposés
- Donne l'expression du travail de la force de frottements.

**Synthèse 4 :****IV. Travail d'une force conservative :****1. L'expression de travail :**

Le travail d'une force  $\vec{F}$  au cours du déplacement  $\overline{AB}$  est  $W_{\vec{F}} = \vec{F} \cdot \overline{AB} = \mathbf{F \cdot AB \cdot \cos(\widehat{\vec{F}, \overline{AB}})}$  c'est une valeur algébrique.

- Si la force favorise le mouvement alors  $W_F > 0$  : le travail est dit moteur.
- Si la force s'oppose au mouvement alors  $W_F < 0$  : le travail est dit résistant.
- Si la force est perpendiculaire au déplacement alors  $W_F = 0$  : le travail est nul

## 2. Définition d'une force conservative :

Une force conservative est une force dont son travail ne dépend que de la position initiale et de la position finale. Elle se conserve donc constante.

**Exemple :** Les poids d'un corps au voisinage de la terre, la force électrique dans un condensateur, ...

## 3. Travail du poids d'un corps :

Le poids d'un corps travaille toujours verticalement :  $W_P = \vec{P} \cdot \overrightarrow{AB}$  tel que  $\overrightarrow{AB}$  est le vecteur-déplacement, de A vers B.

- Si l'altitude diminue en allant de A vers B, le travail du poids est moteur :  $W_P = P \cdot AB$
- Si l'altitude augmente en allant de A vers B, le travail du poids est résistant :  $W_P = -P \cdot AB$
- Si l'altitude ne varie pas (c'est-à-dire horizontalement), le poids ne travaille pas :  $W_P = 0$

## 4. Travail de la force électrostatique :

- La force électrostatique régnant entre deux plaques distantes de d : est  $\vec{F} = q\vec{E}$
- Le travail d'une force électrostatique accélératrice d'une charge q, est toujours moteur :  $W_F = |q|E \cdot d$  et la tension  $U = E \cdot d \Rightarrow W_F = |q| \cdot U$ .

## 5. Travail de la force de frottements :

- La force de frottements  $\vec{f}$  s'oppose toujours au mouvement.
- Le travail de la force de frottements entre deux positions A et B, est un travail résistant :  $W_f = -f \cdot AB$

## 6. Travail d'une force perpendiculaire à la trajectoire ou à la vitesse :

- Le travail de la réaction  $\vec{R}$  d'un plan est nul pour tout déplacement sur ce plan :  $W_R = 0$
- Le travail de la tension  $\vec{T}$  d'un fil d'un pendule simple est nul :  $W_T = 0$
- Le travail de la force électromagnétique de Lorentz  $\vec{F} = q \cdot \vec{V} \wedge \vec{B}$  est nul :  $W_F = 0$
- Le travail du poids  $\vec{P}_h = m \cdot \vec{g}_h$  d'un satellite sur l'orbite à l'altitude h est nul :  $W_{P_h} = 0$

**A savoir :** la puissance

En physique, la puissance reflète la vitesse à laquelle un travail est fourni. C'est la quantité d'énergie par unité de temps fournie par un système à un autre.

Son expression est :  $P = \vec{F} \times \vec{V} = F \cdot V \cdot \cos(\widehat{\vec{F}, \vec{V}})$  ou  $P = \frac{W_F}{t} \Rightarrow W_F = P \times t$

## Activité 5 : Energie Mécanique

A partir de tes connaissances

**Consigne :**

- Donne l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur.
- Donne l'expression de l'énergie cinétique puis énonce le théorème de l'énergie cinétique.
- Donne l'expression de l'énergie mécanique.

## Synthèse 5 :

### V. Energie mécanique :

#### 1. L'énergie potentielle de pesanteur :

L'énergie potentielle de pesanteur d'un corps de masse m, à l'altitude h, est définie par la relation :  $E_p = P \cdot Z$  et  $P = mg$  est le poids alors  $E_p = mgZ$  (en J)

La variation de l'énergie potentielle de pesanteur entre deux positions est égale à l'opposé du travail du poids entre ces deux positions :  $\Delta E_p = -W_P$

**A savoir :**

L'énergie potentielle électrostatique d'une charge dans un champ électrique à un point de potentielle V est :  $E_p = |q|V$

L'énergie potentielle élastique d'un ressort de raideur  $k$  et d'allongement  $x$  est :  $E_p = \frac{1}{2} kx^2$

L'énergie potentielle d'un fil de constante de torsion  $C$  et de rotation d'angle  $\theta$  est :  $E_p = \frac{1}{2} C\theta^2$

## 2. L'énergie cinétique :

L'énergie cinétique d'un corps de masse  $m$  et de vitesse  $V$ , en translation, est définie par la relation :

$$E_C = \frac{1}{2} mV^2 \text{ (en J)}$$

Si le solide est en rotation autour d'un axe avec une vitesse angulaire  $\omega$ , son énergie cinétique est donnée par :

$$E_C = \frac{1}{2} m\omega^2 \text{ (en J)}$$

Pour un solide animé à la fois d'un mouvement de translation et de rotation, l'expression de son énergie cinétique est :

$$E_C = \frac{1}{2} mV^2 + \frac{1}{2} m\omega^2$$

**Enoncé du théorème :** La variation de l'énergie cinétique d'un solide indéformable entre deux instants (ou positions A et B), est égale à la somme des travaux de toutes les forces extérieures appliquées sur ce solide, entre ces instants :

$$\Delta E_C = \sum W_{\vec{F}_{\text{ext}}} \Rightarrow \frac{1}{2} mV_B^2 - \frac{1}{2} mV_A^2 = \sum W_{\vec{F}_{\text{ext}}}$$

$\frac{1}{2} mV_B^2$  : est l'énergie cinétique de la position finale et  $\frac{1}{2} mV_A^2$  : est l'énergie cinétique de la position initiale

## 3. Energie mécanique :

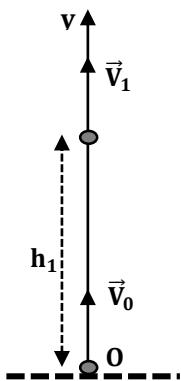
L'énergie mécanique d'un système est la somme des énergies cinétique et potentielle de ce système :

$$E_m = E_C + E_p$$

### Application 5 : Théorème de l'énergie cinétique

On jette une pierre d'un point O, verticalement vers le haut, avec une vitesse  $V_0 = 12 \text{ m/s}$ . À quelle hauteur  $h_1$  au-dessus du point O, la vitesse de la pierre n'est-elle plus que  $V_1 = 6 \text{ m/s}$  ? On donne  $g = 9,8 \text{ N/kg}$ . Les frottements sont négligeables.

### Correction 5

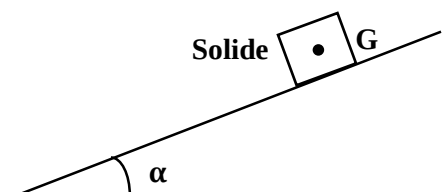


- La pierre est soumise uniquement au poids  $\vec{P}$
  - Détermination de  $h_1$  :
  - La variation de l'énergie cinétique :  $\Delta E_C = \sum W_{\vec{F}_{\text{ext}}} \Rightarrow \frac{1}{2} mV_1^2 - \frac{1}{2} mV_0^2 = W_{\vec{P}}$
  - Le travail du poids est un travail résistant :  $W_{\vec{P}} = -P \cdot h_1$  avec  $P = mg$
- $$\Rightarrow W_{\vec{P}} = -mg \cdot h_1 \Rightarrow \frac{1}{2} mV_1^2 - \frac{1}{2} mV_0^2 = -mg \cdot h_1 \Rightarrow V_1^2 - V_0^2 = -2g \cdot h_1$$
- $$\Rightarrow h_1 = \frac{V_1^2 - V_0^2}{-2g} \Rightarrow h_1 = \frac{V_0^2 - V_1^2}{2g} \Rightarrow h_1 = \frac{12^2 - 6^2}{2 \times 9,8} \Rightarrow h_1 = 5,5 \text{ m}$$

### Application 6 : Relation fondamentale de la dynamique et la variation de l'énergie cinétique

Un solide homogène de masse  $m = 100 \text{ g}$  est abandonné sans vitesse initiale au sommet d'un plan incliné d'angle  $\alpha = 30^\circ$  par rapport à l'horizontale. A la fin de la descente son énergie cinétique vaut  $12,8 \text{ J}$ . Les frottements sur le plan incliné sont équivalents à une force unique de module égal au dixième du poids du solide. On prendra  $g = 10 \text{ m/s}^2$ .

- Exprime puis calcule le module ( $a$ ) du vecteur-accelération du centre d'inertie (G) du solide.
- Calcule la réaction du plan incliné.
- Ecris l'équation horaire du mouvement du centre d'inertie. On prendra pour origine des dates la date de départ et pour espaces le point de départ.
- Calcule la vitesse à la fin de la descente.
- Calcule la durée du mouvement et en déduire la distance  $d$  parcourue.

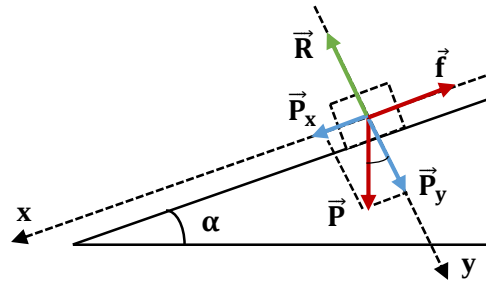


**Correction 6****1. Le module de l'accélération**

Le solide est soumis au poids  $\vec{P} = m\vec{g}$ , à la réaction  $\vec{R}$

du plan incliné et les frottements  $\vec{f} = \frac{1}{10}\vec{P}$  alors :

$$\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{P} + \vec{R} + \vec{f} = m\vec{a}$$



On a :  $\begin{cases} \sin \alpha = \frac{P_x}{P} \Rightarrow P_x = P \sin \alpha = mg \sin \alpha \\ \cos \alpha = \frac{P_y}{P} \Rightarrow P_y = P \cos \alpha = mg \cos \alpha \end{cases}$ ,  $\vec{P} = \begin{cases} P_x = mg \sin \alpha \\ P_y = mg \cos \alpha \end{cases}$ ,  $\vec{R} = \begin{cases} R_x = 0 \\ R_y = -R \end{cases}$  et  $\vec{f} = \begin{cases} f_x = -P/10 \\ f_y = 0 \end{cases}$

Le mouvement s'effectue uniquement sur le plan incliné (OX) alors :

$$P_x - f_x = ma_x = ma \Rightarrow ma = mg \sin \alpha - mg/10 \Rightarrow a = g \sin \alpha - g/10$$

**A.N :**  $\alpha = 30^\circ$  et  $g = 10 \text{ m/s}^2$  alors :  $a = 10 \sin 30^\circ - 10/10 \Rightarrow a = 5 - 1 \Rightarrow a = 4 \text{ m/s}^2$

**2. La réaction du plan incliné**

On a :  $P_y + R_y = 0 \Rightarrow mg \cos \alpha - R = 0 \Rightarrow R = mg \cos \alpha = 0,1 \times 10 \times \cos 30^\circ = 0 \Rightarrow R = 0,87 \text{ N}$

**3. L'équation horaire du mouvement**

L'accélération est une constante alors le mouvement est uniformément varié donc :  $x = \frac{1}{2}at^2 + V_0t + x_0$

On a :  $V_0 = 0$  et  $x_0 = 0 \Rightarrow x = \frac{1}{2}at^2 \Rightarrow x = \frac{1}{2}4t^2 \Rightarrow x = 2t^2$

**4. La vitesse à la fin de la descente**

A la fin de la descente son énergie cinétique vaut :  $E_C = \frac{1}{2}mV^2 = 12,8 = V^2 = \frac{2E_C}{m} \Rightarrow V = \sqrt{\frac{2E_C}{m}}$

**A.N :**  $m = 100 \text{ g} = 0,1 \text{ kg} \Rightarrow V = \sqrt{\frac{2 \times 12,8}{0,1}} \Rightarrow V = 16 \text{ m/s}$

**5. La durée du mouvement**

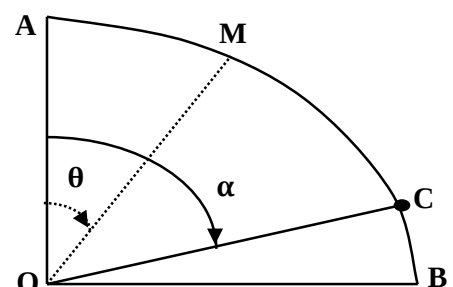
$$x = 2t^2 \Rightarrow V = \frac{dx}{dt} = 4t \Rightarrow t = \frac{V}{4} \Rightarrow t = \frac{16}{4} \Rightarrow t = 4 \text{ s}$$

**La distance parcourue :**  $d = x = 2t^2 \Rightarrow d = 2(4)^2 \Rightarrow d = 32 \text{ m}$

**Application 7 : Relation fondamentale de la dynamique et la variation de l'énergie cinétique**

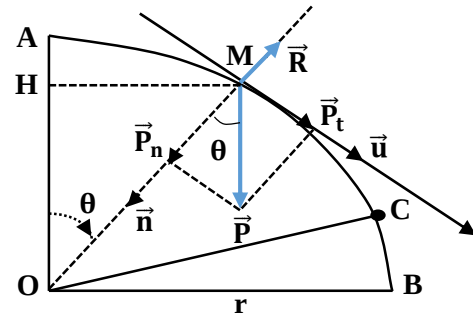
Un solide S de petites dimensions, de masse m et assimilable à un point matériel, est placé au sommet A d'une piste circulaire AB. AB est dans le plan vertical et représente un quart de circonférence de centre O et de rayon r = 5 m. On déplace légèrement le solide S pour qu'il quitte la position A avec une vitesse quasiment nulle et glisse sans frottement le long de la piste. On repère le mobile M par l'angle  $\theta$  tel que  $(OA, OM) = \theta$ .

1. Exprime la vitesse  $V_M$  du mobile au point M en fonction de  $\theta$ , r et g.
2. Exprime la réaction de la piste circulaire sur le mobile au point M en fonction de  $\theta$ , r et g.
3. Le solide perd le contact avec la piste en un point C tel que  $(OA, OC) = \alpha$ .
  - a. Calcule la valeur de l'angle  $\alpha$ .
  - b. Détermine la norme du vecteur-vitesse  $\vec{V}_C$  du solide en C.



**Correction 7****1. Exprimons la vitesse  $V_M$  du mobile au point M en fonction de  $\theta$ ,  $r$  et  $g$** 

- Le solide est soumis au poids  $\vec{P}$  et à la réaction  $\vec{R}$  du plan sphérique.
- Détermination de  $V_M$  : La variation de l'énergie cinétique :  
 $\Delta E_C = \sum W_{\vec{F}_{\text{ext}}} \Rightarrow \frac{1}{2} m V_M^2 - \frac{1}{2} m V_A^2 = W_{\vec{R}} + W_{\vec{P}}$
- La réaction est perpendiculaire à la tangente à la trajectoire alors son travail est nul :  $W_{\vec{R}} = 0$



- Le travail du poids est un travail moteur :  $W_{\vec{P}} = P \cdot AH$  avec  $P = mg$ ,  $AH = r - HO$  et  $\cos \theta = \frac{HO}{r}$   
 $\Rightarrow HO = r \cos \theta \Rightarrow AH = r - r \cos \theta \Rightarrow AH = r(1 - \cos \theta) \Rightarrow W_{\vec{P}} = mg r(1 - \cos \theta)$
- La bille est abandonnée sans vitesse initiale :  $V_A = 0 \Rightarrow \frac{1}{2} m V_M^2 = W_{\vec{P}} \Rightarrow V_M^2 = \frac{2W_{\vec{P}}}{m}$   
 $\Rightarrow V_M^2 = \frac{2mg r(1 - \cos \theta)}{m} \Rightarrow V_M^2 = 2g r(1 - \cos \theta) \Rightarrow V_M = \sqrt{2g r(1 - \cos \theta)}$

**2. Exprimons la réaction de la piste circulaire sur le mobile au point M en fonction de  $\theta$ ,  $r$  et  $g$ .**

- La relation fondamentale de la dynamique :  $\sum \vec{F}_{\text{ext}} = m\vec{a}$  et  $\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{P} + \vec{R}$

- Dans la base de Frenet :

$$\vec{a} = \begin{cases} a_t = \frac{dV}{dt} \\ a_n = \frac{V^2}{r} \end{cases}, \quad \vec{R} = \begin{cases} R_t = 0 \\ R_n = -R \end{cases} \quad \text{et} \quad \vec{P} = \begin{cases} P_t \\ P_n \end{cases}; \quad \begin{cases} \sin \theta = \frac{P_t}{P} \Rightarrow P_t = P \sin \theta \\ \cos \theta = \frac{P_n}{P} \Rightarrow P_n = P \cos \theta \end{cases} \Rightarrow \vec{P} = \begin{cases} P_t = P \sin \theta \\ P_n = P \cos \theta \end{cases}$$

$$\text{Alors : } \vec{P} \begin{cases} P_t = P \sin \theta \\ P_n = P \cos \theta \end{cases} + \vec{R} \begin{cases} R_t = 0 \\ R_n = -R \end{cases} = m\vec{a} \begin{cases} a_t = \frac{dV}{dt} \\ a_n = \frac{V^2}{r} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} m \frac{dV}{dt} = P \sin \theta \\ m \frac{V^2}{r} = P \cos \theta - R \Rightarrow R = P \cos \theta - m \frac{V^2}{r} \end{cases}$$

- En M :** la réaction est  $R = P \cos \theta - m \frac{V_M^2}{r}$  et  $P = mg \Rightarrow R = mg \cos \theta - m \frac{V_M^2}{r} \Rightarrow R = m \left( g \cos \theta - \frac{V_M^2}{r} \right)$

$$\text{et } V_M^2 = 2g r(1 - \cos \theta) \quad \text{Alors} \quad R = m \left( g \cos \theta - \frac{2g r(1 - \cos \theta)}{r} \right) \Rightarrow R = m(g \cos \theta - 2g(1 - \cos \theta))$$

$$\Rightarrow R = m(g \cos \theta - 2g + 2g \cos \theta) \Rightarrow R = m(3g \cos \theta - 2g) \Rightarrow R = mg(3 \cos \theta - 2)$$

**3. Le solide perd le contact avec la piste en un point C tel que  $(OA, OC) = \alpha$ .****a. Calculons la valeur de l'angle  $\alpha$ .**

$$\text{Au point C : } \theta = \alpha \quad \text{et} \quad R = 0 \Rightarrow R = mg(3 \cos \alpha - 2) \Rightarrow mg(3 \cos \alpha - 2) = 0 \Rightarrow 3 \cos \alpha - 2 = 0$$

$$\Rightarrow 3 \cos \alpha = 2 \Rightarrow \cos \alpha = \frac{2}{3} \Rightarrow \cos \alpha = 0,667 \Rightarrow \alpha \approx 48^\circ$$

**b. Déterminons la norme du vecteur-vitesse  $\vec{V}_C$  du solide en C.**

$$\text{On sait que : } V_C = \sqrt{2g r(1 - \cos \alpha)} \Rightarrow V_C = \sqrt{2 \times 9,8 \times 5(1 - 0,667)} \Rightarrow V_C = 5,7 \text{ m/s}$$

## Séquence 2

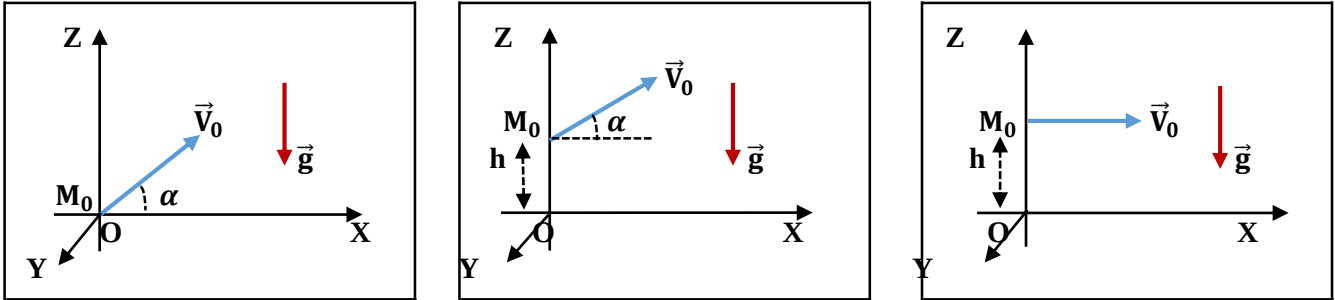
**Unité d'Apprentissage 2** : Application de la Relation Fondamentale de la Dynamique

**Concept 1** : Mouvement d'un Projectile dans le Champ Uniforme de Pesanteur Terrestre

### Pré-évaluation :

- Définis un espace champ uniforme de pesanteur.
- Donne les coordonnées des vecteurs  $\overrightarrow{OM_0}$  ;  $\vec{V}_0$  et  $\vec{g}$  dans les cas suivants :

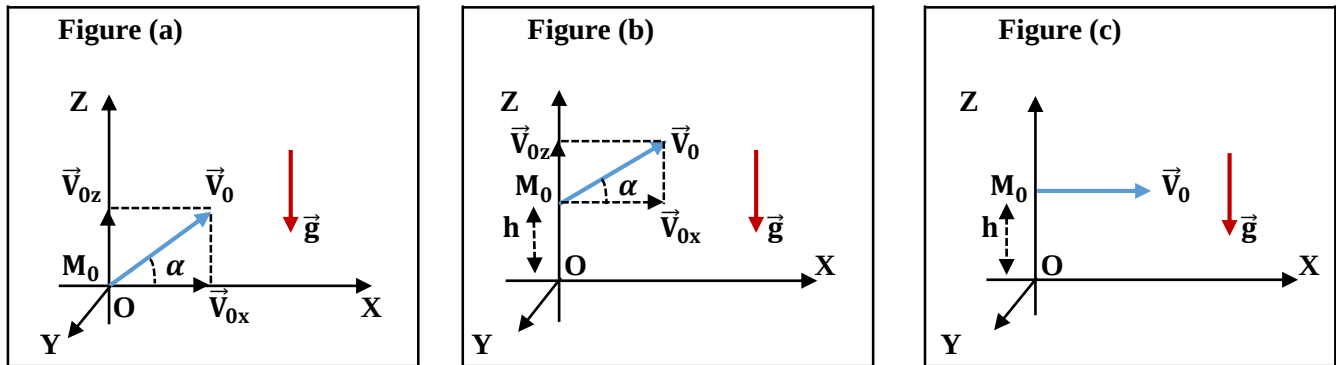
**A savoir** : Ces vecteurs sont tous dans le plan vertical (O, X, Z).



- A partir de tes connaissances, rappelle la relation fondamentale de la dynamique dans une base cartésienne.

### Rappels :

- Un espace champ uniforme de pesanteur est une région restreinte de l'espace au voisinage de la Terre où les lignes de champ de pesanteur sont supposées parallèles, verticales, dirigées vers le bas, et de module constant.



Les coordonnées des vecteurs  $\overrightarrow{OM_0}$  ;  $\vec{V}_0$  et  $\vec{g}$  sont :

$$\text{Figure (a)} : \overrightarrow{OM_0} = \begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = 0 \\ z_0 = 0 \end{cases} ; \begin{cases} \cos\alpha = \frac{V_{0x}}{V_0} \Rightarrow V_{0x} = V_0 \cos\alpha \\ \sin\alpha = \frac{V_{0z}}{V_0} \Rightarrow V_{0z} = V_0 \sin\alpha \end{cases} \Rightarrow \vec{V}_0 = \begin{cases} V_{0x} = V_0 \cos\alpha \\ V_{0y} = 0 \\ V_{0z} = V_0 \sin\alpha \end{cases} \quad \text{et} \quad \vec{g} = \begin{cases} g_x = 0 \\ g_y = 0 \\ g_z = -g \end{cases}$$

$$\text{Figure (b)} : \overrightarrow{OM_0} = \begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = 0 \\ z_0 = h \end{cases} ; \begin{cases} \cos\alpha = \frac{V_{0x}}{V_0} \Rightarrow V_{0x} = V_0 \cos\alpha \\ \sin\alpha = \frac{V_{0z}}{V_0} \Rightarrow V_{0z} = V_0 \sin\alpha \end{cases} \Rightarrow \vec{V}_0 = \begin{cases} V_{0x} = V_0 \cos\alpha \\ V_{0y} = 0 \\ V_{0z} = V_0 \sin\alpha \end{cases} \quad \text{et} \quad \vec{g} = \begin{cases} g_x = 0 \\ g_y = 0 \\ g_z = -g \end{cases}$$

$$\text{Figure (c)} : \overrightarrow{OM_0} = \begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = 0 \\ z_0 = h \end{cases} ; \vec{V}_0 = \begin{cases} V_{0x} = V_0 \\ V_{0y} = 0 \\ V_{0z} = 0 \end{cases} \quad \text{et} \quad \vec{g} = \begin{cases} g_x = 0 \\ g_y = 0 \\ g_z = -g \end{cases}$$

- A.R.F.D sur un solide en translation dans une base cartésienne :  $\sum \vec{F} = m\vec{a} \Rightarrow \vec{a} = \frac{1}{m} \sum \vec{F} \Rightarrow \vec{a} = \begin{cases} a_x = \frac{1}{m} \sum F_x \\ a_y = \frac{1}{m} \sum F_y \\ a_z = \frac{1}{m} \sum F_z \end{cases}$

### A savoir :

Pour Toute étude dynamique : Le choix du système matériel, le choix d'un repère Galiléen et le bilan des forces extérieures appliquées au système sont nécessaires.

**Situation d'apprentissage :**

Au cours d'un match inter-école, votre équipe obtient un coup franc direct à la distance D du but adverse. Quelles dispositions pouvez-vous prendre pour une meilleure exécution de ce coup franc ?

**Activité 1 : Etablissement des équations**

Déposez le ballon au point de tir qui sera pris comme origine du repère, Communiquez au ballon une vitesse  $V_0$  contenant dans le plan (O, X, Z) et faisant un angle  $\alpha$  avec l'horizontale. La résistance de l'air est négligeable.

**Consigne :**

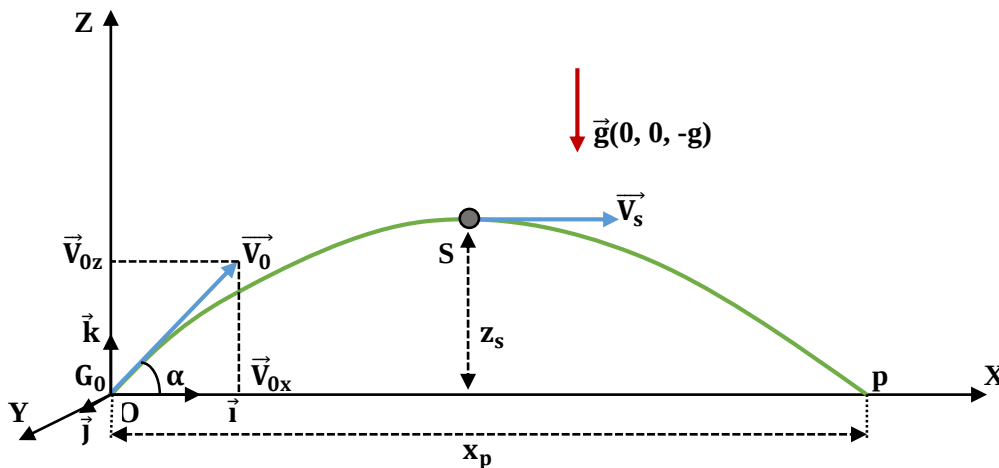
- Définis un projectile.
- Fais l'inventaire des forces extérieures appliquées sur le solide.
- Donne les coordonnées :
  - Du Ballon au début du mouvement,
  - De la vitesse initiale, de l'accélération de pesanteur dans le repère (O, X, Y, Z).

En appliquant la relation fondamentale de la dynamique (A.R.F.D) à la balle en mouvement :

- Détermine le vecteur accélération,
- Précise le domaine dans lequel s'effectue le mouvement,
- Donne la nature du mouvement suivant les axes (OX) et (OY).
- Puis en déduis les équations horaires de la vitesse et du mouvement (la position du mobile).
- Elimine le temps (t) entre ces équations horaires et déduis l'équation cartésienne du mouvement.

**Synthèse 1 :****I. Etablissement des équations :**

- Un projectile est un corps lancé dans le champ de pesanteur avec une vitesse initiale.
- Système {projectile} de masse m et de centre d'inertie G,
- Le repère (O,  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$ ,  $\vec{k}$ ) est supposé Galiléen,
- L'axe (O,  $\vec{k}$ ) est ascendant et le plan (O,  $\vec{i}$ ,  $\vec{k}$ ) contient le vecteur-vitesse initial  $\vec{V}_0$  faisant un angle  $\alpha$  avec l'horizontale,
- Origine des espaces est le point de tir,
- Origine des temps est l'instant de tir.

**1. Equations horaires :**

- **Conditions initiales : A t = 0s**

$$\text{On a : } \overrightarrow{OG_0} = \begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = 0 \\ z_0 = 0 \end{cases} ; \begin{cases} \cos\alpha = \frac{V_{0x}}{V_0} \Rightarrow V_{0x} = V_0 \cos\alpha \\ \sin\alpha = \frac{V_{0z}}{V_0} \Rightarrow V_{0z} = V_0 \sin\alpha \end{cases} \Rightarrow \vec{V}_0 = \begin{cases} V_{0x} = V_0 \cos\alpha = \text{cste} \\ V_{0y} = 0 \\ V_{0z} = V_0 \sin\alpha = \text{cste} \end{cases} \quad \text{et} \quad \vec{g} = \begin{cases} g_x = 0 \\ g_y = 0 \\ g_z = -g \end{cases}$$

- **En mouvement : A t ≠ 0s**

L'unique force extérieure exercée sur le projectile en mouvement est le poids :  $\vec{P} = m\vec{g}$

$$\text{A.R.F.D : } \sum \vec{F} = m\vec{a} \text{ et } \sum \vec{F} = \vec{P} = m\vec{g} \Rightarrow m\vec{a} = m\vec{g} \Rightarrow \vec{a} = \vec{g} \Rightarrow \vec{a} = \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = 0 \\ a_z = -g \end{cases}$$

On a :  $y_0 = 0$ ,  $V_{0y} = 0$  et  $a_y = 0$  alors le mouvement ne s'effectue pas sur l'axe (OY), donc il s'effectue sur le plan vertical (O,  $\vec{i}$ ,  $\vec{k}$ ).

L'accélération devient :  $\vec{a} = \begin{cases} a_x = 0 & \text{alors le mouvement est uniforme sur l'axe (OX)} \\ a_z = -g & \text{alors le mouvement est uniformément varié sur l'axe (OZ)} \end{cases}$  ;

Alors par intégration on a :  $\vec{V} = \begin{cases} V_x = V_{0x} \\ V_z = a_z t + V_{0z} \end{cases} \Rightarrow \vec{V} = \begin{cases} V_x = V_{0x} = V_0 \cos \alpha = \text{cste} \\ V_z = -gt + V_0 \sin \alpha \end{cases}$  ;

Alors par intégration on a :  $\vec{OG} = \begin{cases} x = V_{0x}t + x_0 \\ z = \frac{1}{2}a_z t^2 + V_{0z}t + z_0 \end{cases} \Rightarrow \vec{OG} = \begin{cases} x = (V_0 \cos \alpha)t \\ z = -\frac{1}{2}gt^2 + (V_0 \sin \alpha)t \end{cases}$

Les fonctions  $x(t)$  et  $z(t)$  en fonction du temps sont les équations horaires ou paramétriques du mouvement.

## 2. Equation de la trajectoire :

L'équation de la trajectoire s'obtient en éliminant le temps entre  $x$  et  $z$  :

$$x = (V_0 \cos \alpha)t \Rightarrow t = \frac{x}{V_0 \cos \alpha} \text{ et } z = -\frac{1}{2}gt^2 + (V_0 \sin \alpha)t \Rightarrow z = -\frac{1}{2}g\left(\frac{x}{V_0 \cos \alpha}\right)^2 + (V_0 \sin \alpha)\frac{x}{V_0 \cos \alpha}$$

Alors :  $z = -\frac{g}{2V_0^2 \cos^2 \alpha} x^2 + x \tan \alpha$ , c'est une fonction du second degré du temps alors la trajectoire est parabolique.

### Activité 2 : Détermination de la portée du tir

Les coordonnées du point d'impact p (point de chute) sont :  $P = \begin{cases} X_P = OP \\ Z_P = 0 \end{cases}$

#### Consigne :

- Détermine l'abscisse du point p appelée portée du tir à partir des équations :  $x(t)$  et  $z(t)$
- Pour quelle valeur de  $\alpha$ , la portée du tir est-elle maximale ? En déduis l'expression de la portée maximale.

### Synthèse 2 :

#### II. La portée du tir :

- La portée est la distance maximale horizontale parcourue par le projectile.

C'est la distance  $X_P = OP$ , P étant le point d'impact du projectile sur le plan horizontal passant par le point O.

$$\text{Au point P : } Z_P = 0 \Rightarrow -\frac{1}{2}gt_P^2 + (V_0 \sin \alpha)t_P = 0 \Rightarrow -\frac{1}{2}gt_P + V_0 \sin \alpha = 0 \Rightarrow t_P = \frac{2V_0 \sin \alpha}{g} ;$$

$$\text{Alors : } x_P = (V_0 \cos \alpha)t_P \text{ devient } x_P = \frac{2V_0^2 \cos \alpha \sin \alpha}{g} \text{ on sait que : } 2\cos \alpha \sin \alpha = \sin 2\alpha \Rightarrow x_P = \frac{V_0^2 \sin 2\alpha}{g}$$

- La portée est maximale si  $\sin 2\alpha = 1 \Rightarrow 2\alpha = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \alpha = \frac{\pi}{4} \Rightarrow x_{P\max} = \frac{V_0^2}{g}$
- La portée peut être aussi déterminée à partir de l'équation de la trajectoire :  $z = -\frac{g}{2V_0^2 \cos^2 \alpha} x^2 + x \tan \alpha = 0$

#### A savoir :

- Au point d'impact P la durée du tir :  $t_P = \frac{2V_0 \sin \alpha}{g}$  alors  $\vec{V}_P = \begin{cases} V_{xP} = V_{0x} = V_0 \cos \alpha \\ V_{zP} = -gt + V_0 \sin \alpha = -g\frac{2V_0 \sin \alpha}{g} + V_0 \sin \alpha \end{cases}$

$$\Rightarrow \vec{V}_P = \begin{cases} V_{xP} = V_{0x} = V_0 \cos \alpha \\ V_{zP} = -2V_0 \sin \alpha + V_0 \sin \alpha = -V_0 \sin \alpha \end{cases} \text{ alors } \vec{V}_P = \begin{cases} V_{xP} = V_0 \cos \alpha \\ V_{zP} = -V_0 \sin \alpha \end{cases} ;$$

$$\text{Et son module est : } V_P = \sqrt{(V_0 \cos \alpha)^2 + (-V_0 \sin \alpha)^2} \Rightarrow V_P = \sqrt{V_0^2 (\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha)} \Rightarrow V_P = V_0 \text{ m/s}$$

- La vitesse  $V_P$  peut être aussi déterminée en appliquant le théorème de l'énergie cinétique entre O et P : même altitude donc le travail du poids est nul. L'énergie cinétique se conserve :  $\Delta E_C = \frac{1}{2}mV_P^2 - \frac{1}{2}mV_0^2 = 0 \Rightarrow V_P = V_0$

**Activité 3 : Détermination de la flèche du tir**

Les coordonnées du vecteur-vitesse au sommet S atteint par le Ballon sont :  $V_P = \begin{cases} V_{xs} = V_0 \cos \alpha \\ V_{zs} = 0 \end{cases}$

**Consigne :**

- Détermine l'ordonnée de S, appelée la flèche du tir, sachant que la vitesse est horizontale à ce point.
- Pour quelle valeur de  $\alpha$ , la flèche est-elle maximale ? En déduis l'expression de la flèche maximale.

**Synthèse 3 :****III. La flèche du tir :**

- La flèche est la hauteur maximale  $Z_S$  atteinte par le projectile au point S.

Au point S le vecteur vitesse est horizontal alors :  $V_{zs} = 0 \Rightarrow \frac{dz_s}{dt} = 0 \Rightarrow -gt_s + V_0 \sin \alpha = 0 \Rightarrow t_s = \frac{V_0 \sin \alpha}{g}$  ;

$$\text{Et } z_s = -\frac{1}{2}gt_s^2 + (V_0 \sin \alpha)t_s \Rightarrow z_s = -\frac{1}{2}g\left(\frac{V_0 \sin \alpha}{g}\right)^2 + (V_0 \sin \alpha) \frac{V_0 \sin \alpha}{g} \Rightarrow z_s = \frac{V_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$$

- La flèche peut être aussi déterminée en appliquant le théorème de l'énergie cinétique entre O et S ( $V_S = V_0 \cos \alpha$ ) : A l'altitude  $z_s$ , le travail du poids est  $W_P = -mg \cdot z_s$ . La variation de l'énergie cinétique est :

$$\Delta E_C = \frac{1}{2}m(V_0 \cos \alpha)^2 - \frac{1}{2}mV_0^2 = -mg \cdot z_s \Rightarrow V_0^2 - V_0^2 \cos^2 \alpha = 2g \cdot z_s \Rightarrow V_0^2(1 - \cos^2 \alpha) = 2g \cdot z_s$$

$$\text{et on sait que : } \sin^2 \alpha = 1 - \cos^2 \alpha \Rightarrow V_0^2 \sin^2 \alpha = 2g \cdot z_s \Rightarrow z_s = \frac{V_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$$

- La flèche est maximale si  $\sin \alpha = 1 \Rightarrow \alpha = \frac{\pi}{2} \Rightarrow z_{s\max} = \frac{V_0^2}{2g}$

**Activité 4 : Détermination des angles de tir d'une cible**

A partir du point O, on veut lancer un projectile avec une vitesse initiale  $\vec{V}_0$  convenable pour qu'il atteigne une cible  $A(x_A, z_A)$ .

**Consigne :** Détermine les angles de tir pour atteindre cette cible donnée.

**Synthèse 4 :****IV. Les angles de tir :**

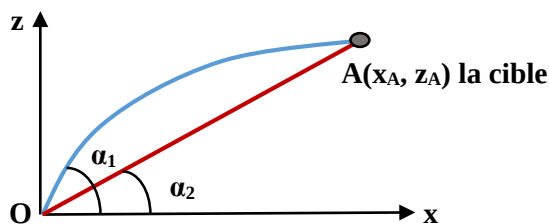
Pour une cible donnée  $A(x_A, z_A)$  : l'équation de la trajectoire ( $z$ ) obéit l'équation :

$$z_A = -\frac{g}{2V_0^2 \cos^2 \alpha} x_A^2 + x_A \tan \alpha \quad \text{et on sait que : } \frac{1}{\cos^2 \alpha} = 1 + \tan^2 \alpha \quad \text{alors } z_A = -\frac{g}{2V_0^2} x_A^2 (1 + \tan^2 \alpha) + x_A \tan \alpha$$

$$\text{Alors : } z_A = -\frac{g}{2V_0^2} x_A^2 - \left(\frac{g}{2V_0^2} x_A^2\right) \tan^2 \alpha + x_A \tan \alpha \Rightarrow \left(\frac{g}{2V_0^2} x_A^2\right) \tan^2 \alpha - x_A \tan \alpha + \left(z_A + \frac{g}{2V_0^2} x_A^2\right) = 0$$

Connaissant  $V_0$ , on résout l'équation du second degré avec  $\tan \alpha$  comme inconnue. On trouve généralement deux angles de tir possible ( $\alpha_1$  et  $\alpha_2$ )  $\leq \frac{\pi}{2}$ .

- Si  $\alpha_1 > \alpha_2$  alors :  $\alpha_1$  correspond à l'angle de tir en cloche et  $\alpha_2$  correspond à l'angle de tir tendu.
- Si l'équation n'admet pas de solution c'est ce que le point A n'est pas atteint.

**A savoir :**

- Si la cible coïncide au point d'impact P au sol alors les angles de tir sont tel que :  $\alpha_2 = 90^\circ - \alpha_1$
- Si la cible coïncide au point d'impact P au sol dont  $X_p$  est max alors les angles de tir sont tel que :  $\alpha_1 = \alpha_2 = \frac{\pi}{4}$

**Activité 5 : Parabole de sûreté****Consigne :**

Détermine l'équation de la parabole qui enveloppe toutes les autres paraboles possibles. Sachant qu'elle est délimitée par la portée maximale sur l'axe des abscisses et la flèche maximale sur l'axe des ordonnées, d'équation :  $z = ax^2 + b$

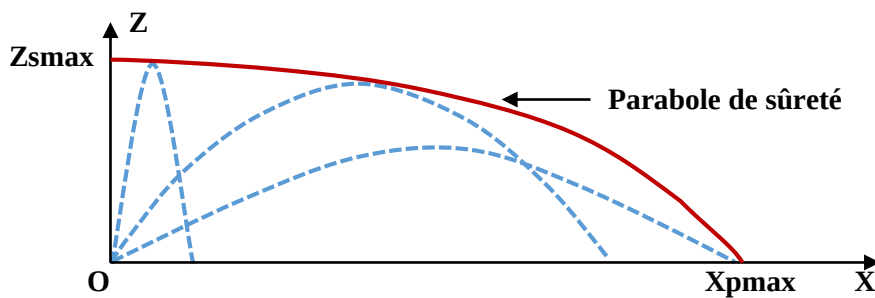
**Synthèse 5 :****V. Parabole de sûreté :**

La parabole de sûreté est la zone qui enveloppe toutes les autres paraboles.

Elle a pour équation :  $z = ax^2 + b$

$$\text{Si } z = 0 \Rightarrow z = z_{\text{max}} = \frac{v_0^2}{2g} \Rightarrow b = \frac{v_0^2}{2g} \quad \text{et si } z = 0 \Rightarrow 0 = ax^2 + b \Rightarrow a = \frac{-b}{x^2} \quad \text{et } x = x_{\text{pmax}} = \frac{v_0^2}{g}$$

$$\Rightarrow a = -\frac{v_0^2}{2g} \cdot \left(\frac{g}{v_0^2}\right)^2 \Rightarrow a = -\frac{v_0^2 \cdot g^2}{2g v_0^4} \Rightarrow a = -\frac{g}{2v_0^2} \quad \text{alors son équation s'écrit : } z = \frac{v_0^2}{2g} - \frac{gx^2}{2v_0^2}$$



## Séquence 3

**Unité d'Apprentissage 2 :** Application de la Relation Fondamentale de la Dynamique

**Concept 2 :** Mouvement d'une Particule Chargée dans le Champ Electrique Uniforme

### Pré-évaluation :

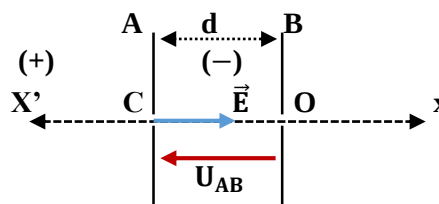
- Donne les caractéristiques de la force électrique attractive exercée sur une particule de charge  $q$  dans un champ électrique  $E$  uniforme régnant entre deux plaques parallèles et distantes.
- Trouve l'expression de la vitesse à la sortie du champ électrique  $E$ , en appliquant le théorème de l'énergie cinétique.

### Rappels :

- Entre deux plaques métalliques A et B parallèles de potentiels opposés, soumises à une DDP ( $U$ ), il y existe un champ électrique  $\vec{E}$  dirigé vers le potentiel le plus petit (négatif).

Dans le champ électrique, une particule chargée est soumise à la force électrostatique :  $\vec{F} = q\vec{E} \Rightarrow F = |q|E$

- Si  $q > 0$  alors la force  $\vec{F}$  et le champ  $\vec{E}$  ont même direction et même sens.
- Si  $q < 0$  alors la force  $\vec{F}$  et le champ  $\vec{E}$  ont même direction mais de sens contraire.



$$U_{AB} = V_A - V_B > 0 \text{ et } E = \frac{U_{AB}}{d} \Rightarrow U_{AB} = E \cdot d$$

- La variation de l'énergie cinétique est :  $\Delta E_C = \sum W_{(\vec{f}_e)} = W_{(\vec{f}_e)} \Rightarrow \frac{1}{2} m V_0^2 - \frac{1}{2} m V_C^2 = |q|U$  où  $V_0^2 - V_C^2 = \frac{2|q|U}{m}$

Avec  $\vec{V}_C = \vec{0}$  c'est-à-dire injecté sans vitesse initiale alors :  $V_0 = \sqrt{\frac{2|q|U}{m}}$

### A savoir :

- Tout ion  ${}^A_ZX^{n+}$  a pour charge  $q = n \cdot e$  et pour masse  $m = A \cdot mp$  avec  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$  et  $mp = 1,67 \cdot 10^{-27} kg$
- Tout ion  ${}^A_ZX^{n-}$  a pour charge  $q = -n \cdot e$  et pour masse  $m = A \cdot mp$  avec  $-e = -1,6 \cdot 10^{-19} C$

### Exemple :

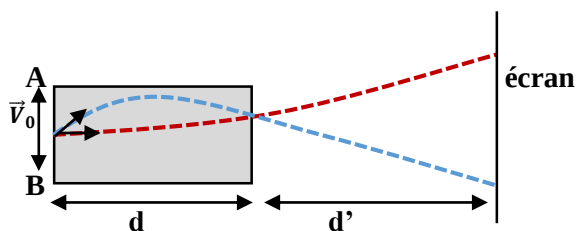
Soit le noyau d'hélium :  ${}^4_2He^{2+}$  alors  $q = 2e \Rightarrow q = 2 \times 1,6 \cdot 10^{-19} C$  et  $m = 4mp \Rightarrow m = 4 \times 1,67 \cdot 10^{-27} Kg$

### Situation d'apprentissage :

Considérons deux plaques A et B, planes, parallèles, distantes de  $d$ , de longueur  $l$ . Elles délimitent une zone dans laquelle il y règne un champ électrique  $E$  issu d'une différence de potentielle réglable  $U_{AB} = V_A - V_B$  telle que :  $V_A = -V_B$ . L'ensemble est placé parallèlement à une distance  $d'$  d'un écran opaque.

Les expériences montrent que toute particule de charge  $q$  et de masse  $m$  pénétrant dans cette zone avec une vitesse  $V_0$  a une trajectoire Parabolique.

Un résumé des observations sur certaines expériences est édifié par la figure suivante :



Quelle est la nature du mouvement d'une particule de charge  $q$  et de masse  $m$  dans un champ électrique uniforme ?

**Activité 1 :** Un électron pénètre dans le champ électrique avec une vitesse parallèle au vecteur champ.

De façon analogue à un projectile,

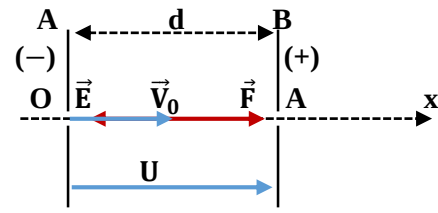
### Consigne :

- Fais l'inventaire des forces extérieures appliquées sur l'électron.
- Donne les coordonnées : de l'électron au début du mouvement, la vitesse initiale, du champ électrique, dans le repère (O, X).
- Etablis l'équation horaire du mouvement en appliquant la relation fondamentale de la dynamique, puis en déduis la nature du mouvement.

**A savoir :** le poids de l'électron est négligeable devant la force électrostatique et la vitesse  $\vec{V}_0$  est parallèle à  $\vec{E}$ .

**Synthèse 1 :****I. Un électron pénètre dans le champ électrique avec une vitesse parallèle au vecteur champ :**

- Le système {électron} de charge  $q = -e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  et de masse  $m$ ,
- Le repère  $(O, X)$  est supposé Galiléen,
- L'origine des espaces coïncide avec le point où l'électron pénètre dans le champ,
- L'origine des temps coïncide avec l'instant d'entrée dans le champ électrique,
- La vitesse initiale  $\vec{V}_0$  est horizontale et parallèle à  $\vec{E}$ .



$$U = V_B - V_A > 0 \quad \text{et} \quad E = \frac{U}{d} \Rightarrow U = E \cdot d$$

- Les forces appliquées sont : La force électrostatique  $\vec{f}_e$  et le poids  $\vec{p}$  de l'électron est négligeable.

**A t = 0s :**

Position initiale :  $\vec{OM}_0$  ( $x_0 = 0$ ) ; la vitesse initiale :  $\vec{V}_0$  ( $V_{0x} = V_0$ ) et le champ :  $\vec{E}$  ( $E_x = -E$ )

**A t ≠ 0s :**

A.R.F.D :  $\sum \vec{F} = m\vec{a}$  et  $\sum \vec{F} = \vec{f}_e = q\vec{E} = -e\vec{E} \Rightarrow m\vec{a} = -e\vec{E} \Rightarrow \vec{a} = -\frac{e\vec{E}}{m}$  alors :  $a = -\frac{e}{m}(E_x = -E)$

$\Rightarrow a = \frac{eE}{m}$  c'est une constante alors le mouvement est uniformément varié.

Par intégration :  $V = at + V_0 \Rightarrow V = \frac{eE}{m}t + V_0$  et  $E = \frac{U}{d} \Rightarrow V = \frac{eU}{dm}t + V_0$  ;

Alors par intégration :  $x = \frac{1}{2}at^2 + V_0t + x_0 \Rightarrow x = \frac{eE}{2m}t^2 + V_0t + x_0 \Rightarrow x = \frac{eU}{2dm}t^2 + V_0t + x_0$

- Si  $V_0 = 0$  injecté dans le champ sans vitesse initiale et  $x_0 = 0$ , les équations deviennent :  $V = \frac{eU}{dm}t$  et  $x = \frac{eU}{2dm}t^2$

**Activité 2 :** Un électron pénètre dans le champ électrique avec une vitesse parallèle aux plaques.

De façon analogue à un projectile,

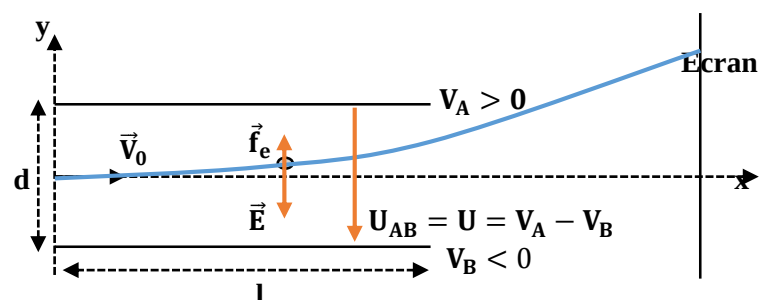
**Consigne :**

- Fais l'inventaire des forces extérieures appliquées sur l'électron.
- Donne les coordonnées : de l'électron au début du mouvement, la vitesse initiale, du champ électrique, dans le repère  $(O, \vec{i}, \vec{j})$ .
- Etablis les équations horaires du mouvement en appliquant la relation fondamentale de la dynamique, puis en déduis le domaine dans lequel évolue l'électron et la nature du mouvement suivant les axes.
- Détermine l'équation cartésienne de la trajectoire du mouvement, puis en déduis la nature de la trajectoire.
- Détermine l'angle que fait la vitesse avec l'horizontale à la sortie, puis en déduis l'ordonnée du point d'impact de l'électron sur l'écran.

**A sa voir :** le poids de l'électron est négligeable devant la force électrostatique et la vitesse  $\vec{V}_0$  est dans le plan vertical.

**Synthèse 2 :****II. Un électron pénètre dans le champ électrique avec une vitesse parallèle aux plaques :**

- Le système {électron} de charge  $q = -e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  et de masse  $m$ ,
- Le repère  $(O, \vec{i}, \vec{j})$  est supposé Galiléen,
- L'origine des espaces coïncide avec le point où l'électron pénètre dans le champ,
- L'origine des temps coïncide avec l'instant d'entrée dans le champ électrique,
- La vitesse initiale  $\vec{V}_0$  est horizontale.



- Les forces appliquées sont : La force électrostatique  $\vec{f}_e$  et le poids  $\vec{p}$  de l'électron est négligeable.

▪ **A t = 0s :**

Position initiale :  $\overrightarrow{OM}_0 = \begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = 0 \end{cases}$  la vitesse initiale :  $\vec{V}_0 = \begin{cases} V_{0x} = V_0 \\ V_{0y} = 0 \end{cases}$  et le champ :  $\vec{E} = \begin{cases} E_x = 0 \\ E_y = -E \end{cases}$

▪ **A t ≠ 0s :**

A.R.F.D :  $\begin{cases} \sum \vec{F} = m\vec{a} \text{ la R. F de la dynamique} \\ \sum \vec{F} = \vec{f}_e = q\vec{E} = -e\vec{E} \text{ alors } \vec{f}_e \text{ et } \vec{E} \text{ sont de sens contraire} \end{cases} \Rightarrow m\vec{a} = -e\vec{E} \Rightarrow \vec{a} = -\frac{e\vec{E}}{m} ;$

Alors :  $\vec{a} = -\frac{e}{m} \begin{cases} E_x = 0 \\ E_y = -E \end{cases} \Rightarrow \vec{a} = \begin{cases} a_x = 0 \text{ alors le mouvement est uniforme sur l'axe (OX)} \\ a_y = \frac{eE}{m} \text{ alors le mouvement est uniformément varié sur l'axe (Oy)} \end{cases}$

Par intégration :  $\vec{V} = \begin{cases} V_x = V_{0x} \\ V_y = a_y t + V_{0y} \end{cases} \Rightarrow \vec{V} = \begin{cases} V_x = V_0 \\ V_y = \frac{eE}{m} t \end{cases} ;$

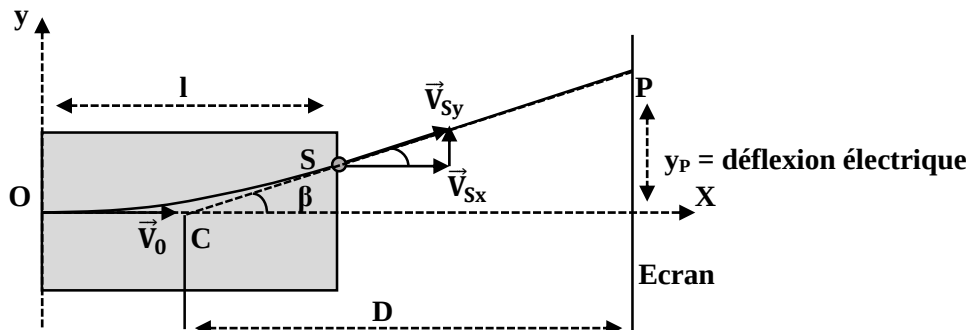
Alors par intégration :  $\overrightarrow{OM} \begin{cases} x = V_{0x}t + x_0 \\ y = \frac{1}{2}a_y t^2 + V_{0y}t + y_0 \end{cases} \Rightarrow \overrightarrow{OM} \begin{cases} x = V_0 t \\ y = \frac{eE}{2m} t^2 \end{cases}$

**Les fonctions x(t) et y(t) en fonction du temps sont les équations horaires ou paramétriques du mouvement.**

▪ L'équation de la trajectoire s'obtient en éliminant le temps entre x et y :

$x = V_0 t \Rightarrow t = \frac{x}{V_0}$  et  $y = \frac{eE}{2m} t^2 \Rightarrow y = \frac{eE}{2mV_0^2} x^2$  et  $E = \frac{U}{d} \Rightarrow y = \frac{eU}{2dmV_0^2} x^2$  la trajectoire est parabolique.

▪ La déviation angulaire est l'angle que fait la vitesse avec l'horizontale à la sortie.



A la sortie  $x_s = V_0 t_s = l \Rightarrow t_s = \frac{l}{V_0}$  ; la particule n'est soumise à aucune force électrique et son poids est négligeable

alors son mouvement est rectiligne et uniforme : La trajectoire est une droite de même direction que la vitesse  $\vec{V}_s$ .

La déviation est telle que  $\tan \beta = \frac{V_{Sy}}{V_{Sx}}$  et  $\vec{V}_s = \frac{d\overrightarrow{OS}}{dt} = \begin{cases} V_{Sx} = V_0 \\ V_{Sy} = \frac{eE}{m} t_s = \frac{eEl}{mV_0} \end{cases}$  et  $\tan \beta = \frac{V_{Sy}}{V_{Sx}} \Rightarrow \tan \beta = \frac{eEl}{mV_0^2} = \frac{eUl}{mdV_0^2}$

▪ La déviation angulaire peut être aussi déterminée par l'ordonnée du point S à la sortie telle que :  $\tan \beta = \frac{y_s}{l/2}$

On sait qu'à la sortie :  $x_s = l$  et  $y = \frac{eU}{2dmV_0^2} x^2 \Rightarrow y_s = \frac{eU}{2dmV_0^2} l^2 \Rightarrow \tan \beta = \frac{\frac{eU}{2dmV_0^2} l^2}{l/2} \Rightarrow \tan \beta = \frac{eUl}{mdV_0^2}$

▪ La déflexion électrique est l'ordonnée du point d'impact de l'électron sur l'écran. Elle est telle que  $\tan \beta = \frac{y_P}{D}$ .

$$\text{Alors } \tan \beta = \frac{eEl}{mV_0^2} = \frac{Y_P}{D} \Rightarrow Y_P = \frac{eElD}{mV_0^2} \Rightarrow Y_P = \left( \frac{eID}{mV_0^2} \right) E \quad \text{on sait que } E = \frac{U}{d} \Rightarrow Y_P = \left( \frac{eID}{mdV_0^2} \right) U$$

La déflexion électrique est proportionnelle à la tension  $U$  entre les plaques de dérivation. Cette propriété est mise à profit dans les oscillographes.

### A savoir :

$$\text{A la sortie du champ, } x_S = l \text{ et } Y_S = \frac{eU}{2dmV_0^2} x_S^2 < \frac{d}{2} \Rightarrow \frac{eU}{2dmV_0^2} l^2 < \frac{d}{2} \Rightarrow V_0^2 > \frac{eUl^2}{d^2m} \Rightarrow V_0 > \frac{1}{d} \cdot \sqrt{\frac{eU}{m}}$$

**Activité 3 :** Un électron pénètre dans le champ électrique avec une vitesse non parallèle aux plaques. De façon analogue au cas précédent,

### Consigne :

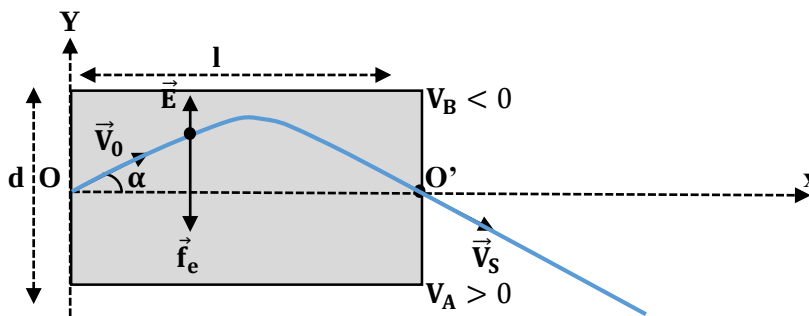
- Etablis l'équation cartésienne de la trajectoire du mouvement, puis en déduis la nature de la trajectoire.
- Quelle doit être la vitesse  $V_0$  ou la tension pour que l'électron sorte dans le champ en interceptant l'axe (OX).

**A savoir :** le poids de l'électron est négligeable devant la force électrostatique et la vitesse  $\vec{V}_0$  est dans le plan vertical.

### Synthèse 3 :

#### III. Un électron pénètre dans le champ électrique avec une vitesse faisant un angle avec l'horizontale :

- Le système {électron} de charge  $q = -e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$  et de masse  $m$ ,
- Le repère  $(O, \vec{i}, \vec{j})$  est supposé Galiléen,
- L'origine des espaces coïncide avec le point où l'électron pénètre dans le champ,
- L'origine des temps coïncide avec l'instant d'entrée dans le champ électrique,



- Les forces appliquées sont : La force électrostatique  $\vec{f}_e$  et le poids  $\vec{p}$  de l'électron est négligeable.

#### ▪ **A $t = 0 \text{s}$ :**

$$\text{Position initiale : } \overrightarrow{OM}_0 = \begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = 0 \end{cases} \quad \text{la vitesse initiale : } \vec{V}_0 = \begin{cases} V_{0x} = V_0 \cos \alpha \\ V_{0y} = V_0 \sin \alpha \end{cases} \quad \text{et le champ : } \vec{E} = \begin{cases} E_x = 0 \\ E_y = E \end{cases}$$

#### ▪ **A $t \neq 0 \text{s}$ :**

$$\text{A.R.F.D : } \begin{cases} \sum \vec{F} = m\vec{a} \text{ la R.F de la dynamique} \\ \sum \vec{F} = \vec{f}_e = q\vec{E} = -e\vec{E} \text{ alors } \vec{f}_e \text{ et } \vec{E} \text{ sont de sens contraire} \end{cases} \Rightarrow m\vec{a} = -e\vec{E} \Rightarrow \vec{a} = -\frac{e\vec{E}}{m} ;$$

$$\text{Alors : } \vec{a} = -\frac{e}{m} \begin{cases} E_x = 0 \\ E_y = E \end{cases} \Rightarrow \vec{a} = \begin{cases} a_x = 0 \text{ alors le mouvement est uniforme sur l'axe (OX)} \\ a_y = -\frac{eE}{m} \text{ alors le mouvement est uniformément varié sur l'axe (Oy)} \end{cases}$$

$$\text{Par intégration : } \vec{V} = \begin{cases} V_x = V_{0x} \\ V_y = a_y t + V_{0y} \end{cases} \Rightarrow \vec{V} = \begin{cases} V_x = V_0 \cos \alpha \\ V_y = -\frac{eE}{m} t + V_0 \sin \alpha \end{cases} ;$$

$$\text{Alors par intégration : } \overrightarrow{OM} \begin{cases} x = V_{0x} t + x_0 \\ y = \frac{1}{2} a_y t^2 + V_{0y} t + y_0 \end{cases} \Rightarrow \overrightarrow{OM} \begin{cases} x = (V_0 \cos \alpha) t \\ y = -\frac{eE}{2m} t^2 + (V_0 \sin \alpha) t \end{cases}$$

**Les fonctions  $x(t)$  et  $y(t)$  en fonction du temps sont les équations horaires ou paramétriques du mouvement.**

- L'équation de la trajectoire est obtenue en éliminant le temps entre  $x$  et  $y$  :

$$x = (V_0 \cos \alpha) t \Rightarrow t = \frac{x}{V_0 \cos \alpha} \text{ et } y = -\frac{eE}{2m} t^2 + (V_0 \sin \alpha) t \Rightarrow y = -\frac{eE}{2m V_0^2 \cos^2 \alpha} x^2 + V_0 \sin \alpha \times \frac{x}{V_0 \cos \alpha} \text{ et } E = \frac{U}{d}$$

d'où  $y = -\frac{eU}{2dmV_0^2 \cos^2 \alpha} x^2 + x \operatorname{tg} \alpha$ , la trajectoire est parabolique.

#### A savoir :

A la sortie en  $O'$ ,  $x_s = l$  et  $y_s = 0$  alors  $y_s = -\frac{eU}{2dmV_0^2 \cos^2 \alpha} x_s^2 + x_s \operatorname{tg} \alpha = 0 \Rightarrow y_s = -\frac{eU}{2dmV_0^2 \cos^2 \alpha} l^2 + l \operatorname{tg} \alpha = 0$

$$\Rightarrow \frac{eU}{2dmV_0^2 \cos^2 \alpha} l^2 = l \operatorname{tg} \alpha \Rightarrow V_0^2 = \frac{eUl^2}{2 \cdot l \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot d \cdot m \cdot \cos^2 \alpha} = \frac{e \cdot U \cdot l}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot d \cdot m \cdot \cos^2 \alpha} \Rightarrow V_0 = \sqrt{\frac{e \cdot U \cdot l}{2 \cdot d \cdot m \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos^2 \alpha}}$$

$$\text{On sait que : } 2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos^2 \alpha = 2 \sin \alpha \cos \alpha = \sin 2\alpha \Rightarrow V_0 = \sqrt{\frac{e \cdot U \cdot l}{d \cdot m \cdot \sin 2\alpha}} \Rightarrow U = \frac{d \cdot m \cdot V_0^2 \cdot \sin 2\alpha}{e \cdot l}$$

#### Activité 4 : Oscilloscope

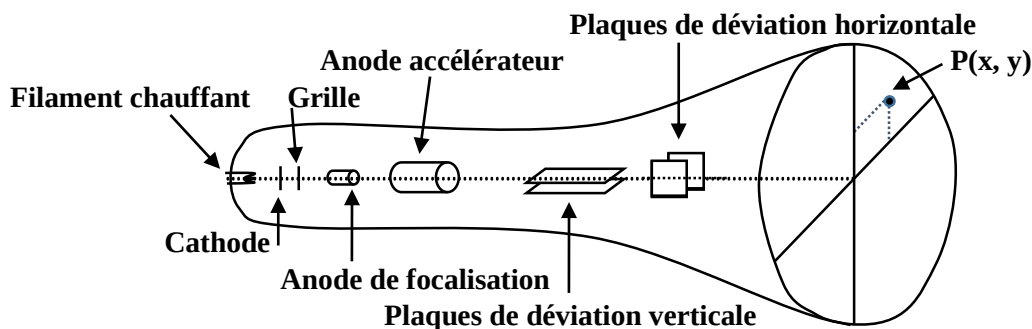
L'oscilloscope comprend :

- Un canon (de filament chauffant à l'Anode accélérateur) d'électrons : qui produit, accélère et focalise un faisceau d'électron homocinétique (même vitesse) ;
- Les plaques de déflexion horizontale et de déflexion verticale ;
- Un écran fluorescent pour visualiser les courbes représentatives de variation de tension électrique en fonction de temps.

**Consigne :** Explique le principe de fonctionnement de l'oscilloscope.

#### Synthèse 4 :

##### IV. Principe de fonctionnement de l'oscilloscope :



Le point  $O$  est le spot lumineux lorsqu'aucune tension n'est appliquée entre les plaques de déflexion. Pour faire apparaître sur l'écran la courbe donnant la variation d'une tension  $U(t)$  en fonction de temps ; on applique la tension  $U = U(t)$  entre les plaques de déflexion verticale ; le circuit électrique incorporé à l'oscilloscope applique entre les plaques de déflexion horizontale une tension en dent de scie ou sinusoïdale, dite tension de balayage ou base de tension (fonction affine du temps).

Le point  $P$  du spot à un instant  $t$  est tel que :  $p = \begin{cases} x \text{ proportionnelle à } U(t) \\ y \text{ proportionnelle à } U(t) \end{cases}$

Le point  $P$  se déplace dans le temps, et la courbe  $y(x)$  visualise les variations de la tension  $U(t)$  en fonction du temps. Pour chaque système de deux plaques parallèles (de déflexion horizontales ou verticales), on aura des déviations électriques correspondantes :

$$x = \left( \frac{e l D_x}{m d V_0^2} \right) U(t) \text{ et } y = \left( \frac{e l D_y}{m d V_0^2} \right) U(t) \text{ c'est le principe de la déflexion électriques suivant les axes (OX) et (OY).}$$

## Séquence 4

**Unité d'Apprentissage 2 :** Application de la Relation Fondamentale de la Dynamique

**Concept 3 :** Mouvement d'une Particule Chargée dans le Champ Magnétique Uniforme

**Pré-évaluation :**

- Rappelle l'expression du vecteur-accélération dans la base de Frenet et la relation fondamentale de la dynamique.
- Définis les isotopes d'un même élément et donne un exemple.
- Donne les caractéristiques de la force magnétique ou force de Lorentz exercée sur une particule de charge  $q$  se déplaçant dans un champ magnétique uniforme  $B$  avec une vitesse  $V$ , en fonction de :  $q$ ,  $V$  et  $B$

**Rappels :**

- Dans la base de Frenet, le vecteur-accélération est défini par :  $\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_N$  avec  $\vec{a}_t = \frac{dv}{dt}$  et  $\vec{a}_N = \frac{v^2}{r}$
- A.R.F.D sur un solide en rotation dans la base de Frenet :  $\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a} \Rightarrow \vec{a} = \frac{1}{m} \sum \vec{F} \Rightarrow \vec{a} = \begin{cases} \vec{a}_t = \frac{1}{m} \sum \vec{F}_u \\ \vec{a}_N = \frac{1}{m} \sum \vec{F}_n \end{cases}$
- Les isotopes d'un même élément sont des atomes du même élément, de même numéro atomique mais de masses atomiques différentes. Par exemple :  $^{35}_{17}\text{Cl}$  et  $^{37}_{17}\text{Cl}$
- Dans un champ magnétique uniforme, une particule de charge  $q$  en mouvement est soumise à une force magnétique appelée force de Lorentz telle que :  $\vec{F} = q\vec{V} \wedge \vec{B} \Rightarrow F = |q|V.B.\sin\alpha$  avec  $\alpha = (\vec{V}; \vec{B})$

Elle est perpendiculaire au plan formé par le vecteur-vitesse et le vecteur-champ magnétique (c'est-à-dire le vecteur-force est à la fois perpendiculaire au vecteur-vitesse et au champ magnétique) et de sens déterminé par la règle de la main droite : (la paume indique le sens de  $\vec{B}$ , le pouce indique le sens de  $\vec{F}$  et les autres doigts indiquent le sens de  $q\vec{V}$ ).

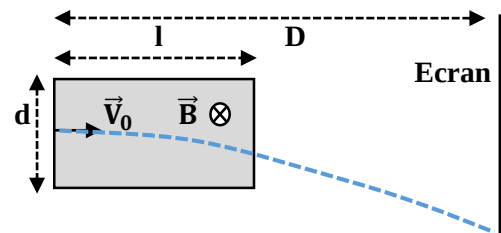
**Remarque :** Si  $\alpha = 90^\circ \Rightarrow F = |q|V.B$  et Si  $\alpha = 0^\circ \Rightarrow \sin 0^\circ = 0 \Rightarrow F = 0$

**Situation d'apprentissage :**

Considérons une zone de longueur  $l$  et de largeur  $d$ , dans laquelle, il y règne un champ magnétique  $B$ . L'ensemble est placé parallèlement à une distance  $D$  d'un écran opaque.

Les expériences montrent que toute particule de charge  $q$  et de masse  $m$  pénétrant dans cette zone avec une vitesse  $V_0$  faisant un angle  $\alpha \neq 0$  avec le vecteur champ magnétique, décrit un arc de cercle.

Un résumé des observations sur certaines expériences est édifié par la figure suivante :



Quelle est la nature du mouvement d'une particule de charge  $q$  et de masse  $m$  dans un champ magnétique uniforme ?

**Activité 1 :** Un électron pénètre dans le champ magnétique avec une vitesse perpendiculaire au champ

De façon analogue à un projectile

**Consigne :**

- Représente les forces extérieures exercées sur l'électron ;
- Détermine la nature du mouvement en appliquant la relation fondamentale de la dynamique, puis en déduis la nature de la trajectoire ;
- Détermine la déviation angulaire magnétique à la sortie, puis en déduis l'ordonnée du point d'impact de l'électron sur l'écran.

**A savoir :** le poids de l'électron est négligeable devant la force électromagnétique.

**Synthèse 1 :**

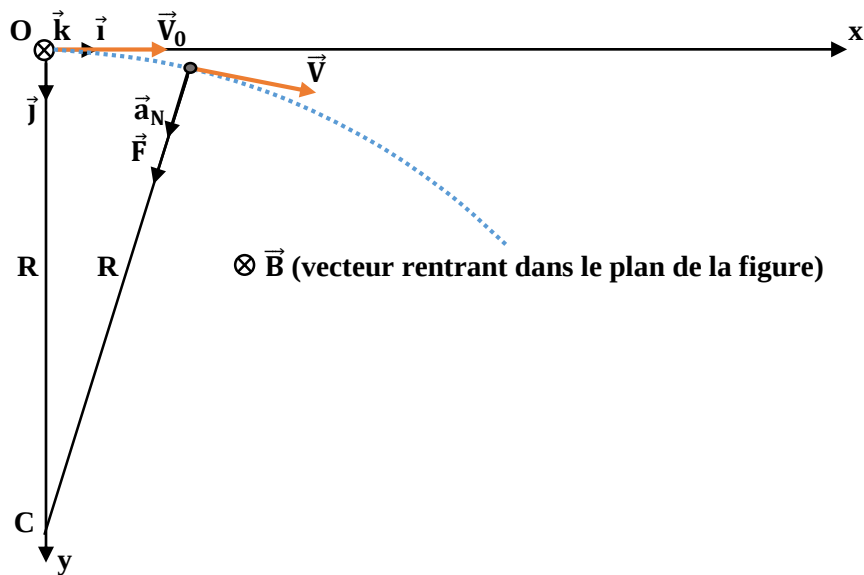
**I. Electron pénètre dans le champ avec une vitesse perpendiculaire au champ magnétique :**

L'électron pénètre dans un champ magnétique uniforme avec une vitesse initiale  $\vec{V}_0$  perpendiculaire au champ  $\vec{B}$ .

- Le système {électron} de charge  $q = -e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$  et de masse  $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{kg}$  ;
- Le repère terrestre  $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  ;
- L'origine des espaces et des temps coïncident avec le point à l'instant d'entrée dans le champ magnétique ;
- La force appliquée : La force magnétique ( $\vec{F} = q(\vec{V}_0 \wedge \vec{B})$ ) et  $F = |q|VB \sin \alpha$  car le poids est très petit devant la force magnétique, donc négligeable.

Le vecteur-champ magnétique  $\vec{B}$  est perpendiculaire au plan  $(O, \vec{i}, \vec{j})$  et le vecteur-vitesse  $\vec{V}_0$  est dans ce plan, donc l'angle  $\alpha$  entre  $\vec{V}_0$  et  $\vec{B}$  est  $90^\circ$  alors  $\sin \alpha = 1 \Rightarrow F = eVB$  force de Lorentz. Elle est en fonction de la vitesse.

Le vecteur-vitesse  $\vec{V}_0$  est perpendiculaire au vecteur champ magnétique et comme le vecteur-force magnétique  $\vec{F}$  est dans le plan contenant le vecteur-vitesse  $\vec{V}_0$  et perpendiculaire au champ magnétique. Le mouvement de l'électron se fait donc dans le plan  $(O, \vec{i}, \vec{j})$  vertical perpendiculaire au champ magnétique (**la trajectoire est plane**).



Le vecteur-force magnétique  $\vec{F}$  est toujours perpendiculaire au plan  $(\vec{V}_0, \vec{B})$  alors toujours perpendiculaire aussi à  $\vec{V}_0$ .

Le vecteur-vitesse étant toujours porté par la tangente à la trajectoire, la force magnétique  $\vec{F}$  est donc portée par la normale à la trajectoire, sa direction et son sens sont ceux du vecteur unitaire  $\vec{N}$  dans la base de Frenet :  $\vec{F} = F_N \vec{N}$  et  $F_t = 0$ .

### A savoir :

La force magnétique  $\vec{F}$  est portée par la normale à la trajectoire alors son travail est nul :  $\vec{W}_F = 0$  donc l'énergie cinétique se conserve (c'est une constante) :  $\Delta E_C = 0 \Rightarrow V = V_0$  alors le mouvement est uniforme.

- Application de la relation fondamentale de la dynamique dans la base de Frenet :

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} \Rightarrow \vec{F} = m\vec{a} \Rightarrow \vec{a} = \frac{1}{m}\vec{F} \quad \text{et} \quad \vec{F} = \begin{cases} F_t = 0 \\ F_N = eVB \end{cases} \Rightarrow \vec{a} = \begin{cases} a_t = 0 \\ a_N = \frac{eVB}{m} \end{cases}$$

$$a_t = \frac{dV}{dt} = 0 \Rightarrow V = V_0 \text{ est une constante alors le mouvement est uniforme}$$

$$\text{Et } a_N = \frac{V_0^2}{R} = \frac{F_N}{m} = \frac{eV_0 B}{m} \Rightarrow R = \frac{mV_0}{eB} \text{ est une constante alors le mouvement circulaire.}$$

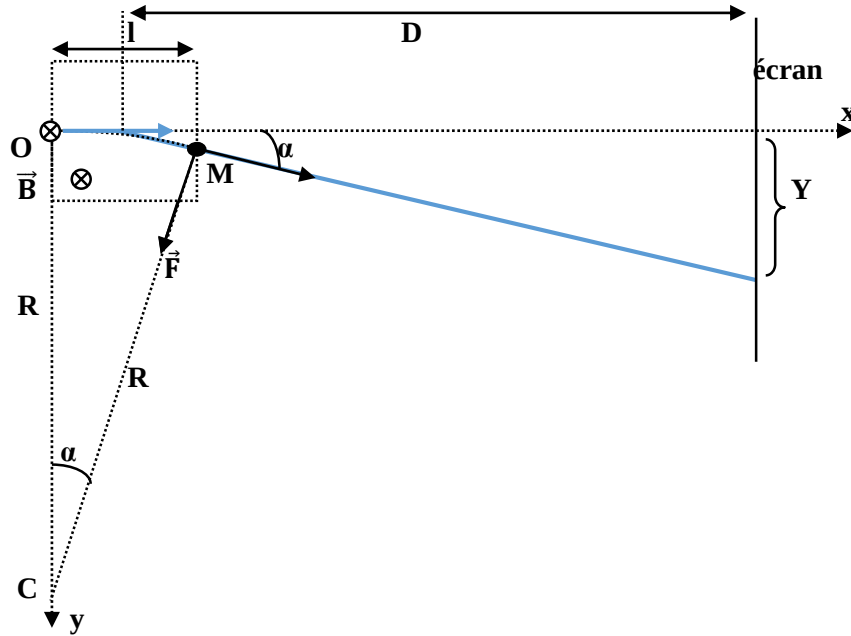
Dans le champ magnétique uniforme tel que la vitesse initiale  $\vec{V}_0$  est perpendiculaire au champ magnétique  $\vec{B}$ , l'électron à un mouvement circulaire uniforme dont la trajectoire est un cercle de rayon  $R$ .

### A savoir :

Le mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme est périodique. La période  $T$  est le temps mis pour effectuer un tour complet.

$$\text{Par définition : } T = \frac{2\pi}{\omega} \text{ et } \omega = \frac{V_0}{R} \Rightarrow T = 2\pi \cdot \frac{R}{V_0} \text{ et } R = \frac{mV_0}{eB} \Rightarrow T = \frac{2\pi}{V_0} \cdot \frac{mV_0}{eB} \text{ alors } T = \frac{2\pi m}{eB} \Rightarrow f = \frac{eB}{2\pi m}$$

A la sortie du champ, l'électron n'est plus soumis à la force magnétique ( $\vec{F} = \vec{0}$ ), son mouvement est donc rectiligne et uniforme ; il a donc subi une déviation angulaire  $\alpha$ . Il intercepte l'arc de cercle  $\widehat{OM}$ .



- L'arc est tel que :  $\alpha = \frac{\widehat{OM}}{R}$ , si  $\alpha$  est faible alors  $\widehat{OM} = l$  et  $\tan \alpha = \alpha$  (en rad)  $\Rightarrow \alpha = \frac{l}{R} \Rightarrow \alpha = \frac{e l B}{m v_0}$  la déviation angulaire ou magnétique.
- La déflexion est telle que :  $\tan \alpha = \frac{Y}{D}$  et  $\tan \alpha = \alpha \Rightarrow \alpha = \frac{Y}{D} \Rightarrow Y = D \cdot \alpha$  et  $\alpha = \frac{e l B}{m v_0} \Rightarrow Y = \left( \frac{e l D}{m v_0} \right) B$  la déflexion magnétique.

## Activité 2 : Spectrographe de Masse

Le spectrographe de masse comprend :

- Une chambre d'ionisation où l'on produit avec une vitesse nulle des ions de mêmes charges et de masses différentes.
- Une chambre d'accélération dans laquelle les ions sont accélérés par un champ électrique E.
- Une chambre de déviation où les ions sont soumis à la force de Lorentz.

### Consigne :

Décris le principe de fonctionnement du spectrographe de masses, sachant que le rayon de la trajectoire circulaire d'une particule dans un champ magnétique uniforme est une fonction de masse.

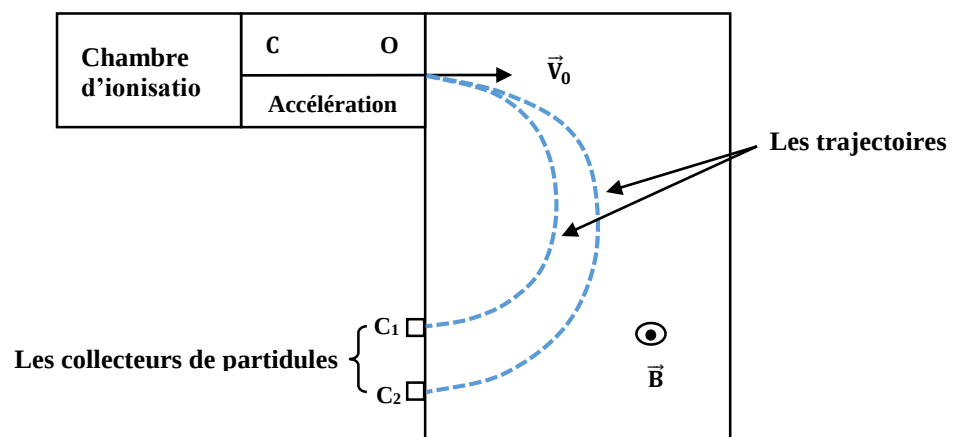
## Synthèse 2 :

### II. Spectrographe :

#### 1. Définition :

Le spectrographe de masse permet de séparer les ions de masses différentes ; donc de séparer les isotopes d'un même élément.

#### 2. Principe de fonctionnement :



Les ions de masses différentes, produits dans la chambre d'ionisation, pénètrent dans la chambre d'accélération en C avec une vitesse presque nulle et où ils sont accélérés par le champ électrique qui y règne. Les ions pénètrent dans la chambre de déviation en O avec une vitesse initiale  $\vec{V}_0$ .

Leurs trajectoires sont de demi-cercles de rayons différents. Ce qui permet de les recueillir sur les différents collecteurs  $C_1$  et  $C_2$  : d'où leur séparation.

$$R_1 = \left( \frac{V_{01}}{eB} \right) m_1 \text{ et } R_2 = \left( \frac{V_{02}}{eB} \right) m_2$$

### A savoir :

Dans le champ électrique  $E$  issu de la tension  $U$  entre les plaques de la chambre d'accélération, la force électrostatique est l'unique force extérieure car le poids est négligeable.

La variation de l'énergie cinétique est :

$$\Delta E_C = \sum W_{(\vec{f}_e)} = W_{(\vec{f}_e)} \Rightarrow \frac{1}{2} m V_0^2 - \frac{1}{2} m V_C^2 = |q|U \text{ où } V_0^2 - V_C^2 = \frac{2|q|U}{m}$$

Avec  $\vec{V}_C = \vec{0}$  c'est-à-dire sans vitesse initiale alors :  $V_0^2 = \frac{2|q|U}{m} \Rightarrow V_0 = \sqrt{\frac{2|q|U}{m}} \Rightarrow V_{01} = \sqrt{\frac{2|q|U}{m_1}} \Rightarrow V_{02} = \sqrt{\frac{2|q|U}{m_2}}$

### Activité 3 : Cyclotron

Le cyclotron est constitué de deux demi-cylindres de métal creux appelés Dés dans lesquels on fait un vide. Ils sont placés dans un champ magnétique uniforme perpendiculaire au plan de la base. Une tension alternative est appliquée aux dés.

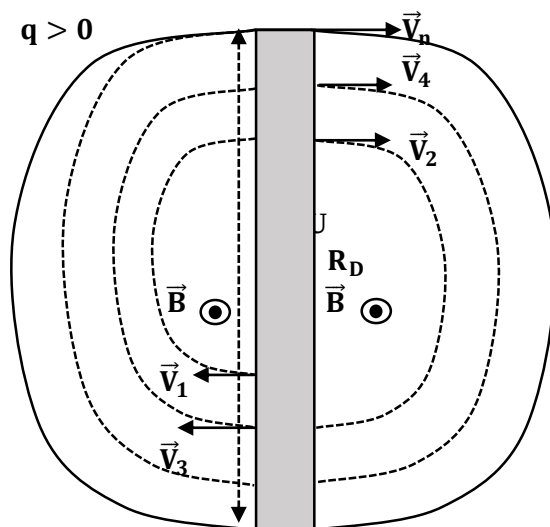
#### Consigne :

Décris le principe de fonctionnement de cyclotron, sachant que la tension électrique alternative entre les demi-cylindres permet d'accélérer les particules.

### Synthèse 3 :

#### III. Principe de fonctionnement du cyclotron :

Une source d'ions est placée dans la région centrale sans vitesse initiale. La tension alternative ( $U = U_m \cos \omega t$ ) accélère rectilignement pendant une très courte durée. Les ions entrent ensuite dans un Dé et décrivent un demi-cercle. Quand ils sortent d'un Dé, l'autre devient attractif. A chaque demi-tour, ils acquièrent un supplément d'énergie électrique :  $W = |q|U_m$ . Comme la tension change de signe à chaque demi-tour, sa période  $T$  est égale à la durée d'un tour. Par suite la vitesse angulaire  $\omega$  des ions est égale à la pulsation de la tension alternative. A la sortie des Dés ( $R_n = R_D$  est le rayon des Dés), la vitesse  $\vec{V}_n$  est maximale.



- Pour la 1<sup>ère</sup> accélération on a :  $\Delta E_C = \frac{1}{2} m V_1^2 - \frac{1}{2} m V_0^2 = |q|U_m \Rightarrow \text{et } V_0 = 0 \Rightarrow V_1^2 = \frac{2|q|U_m}{m} \Rightarrow V_1 = \sqrt{\frac{2|q|U_m}{m}}$
- Pour la 2<sup>ème</sup> accélération on a :  $\frac{1}{2} m V_2^2 - \frac{1}{2} m V_1^2 = |q|U_m \Rightarrow V_2^2 - V_1^2 = \frac{2|q|U_m}{m} \Rightarrow V_2^2 = \frac{2|q|U_m}{m} + V_1^2$

alors  $V_2^2 = V_1^2 + V_1^2 \Rightarrow V_2^2 = 2V_1^2$  Par conséquent  $V_n^2 = \frac{2n|q|U_m}{m} \Rightarrow V_n = \sqrt{\frac{2n|q|U_m}{m}} \Rightarrow V_n = V_1\sqrt{n}$

- Le rayon  $R_1 = \frac{mV_1}{|q|B} \Rightarrow R_n = \frac{mV_n}{|q|B} \Rightarrow R_n = \frac{mV_1\sqrt{n}}{|q|B} \Rightarrow R_n = R_1\sqrt{n}$
- L'énergie cinétique à la nième tour est telle que :  $V_n = V_1\sqrt{n} \Rightarrow V_n^2 = nV_1^2 \Rightarrow E_{Cn} = nE_{C1}$   
 $\Rightarrow \Delta E_C = E_{Cn} - E_{C1} = nE_{C1} - E_{C1} \Rightarrow \Delta E_C = E_{C1}(n - 1)$  avec  $E_{C1} = \frac{1}{2}mV_1^2$
- La période  $T_n = \frac{2\pi R_n}{V_n} \Rightarrow T_n = \frac{2\pi R_1\sqrt{n}}{V_1\sqrt{n}} \Rightarrow T_n = \frac{2\pi R_1}{V_1} \Rightarrow T_n = T_1$  c'est une constante

Où n est le nombre d'accélération entre les dés par la tension  $U_m$ . Et un tour correspond à deux accélérations par conséquent le nombre de tour correspond  $t_r = n/2$  à la sortie.

#### A savoir :

- Dans le cyclotron, la particule chargée subit une accélération à chaque demi-tour ;
- Le champ magnétique ne modifie pas la vitesse des particules ;
- Le champ électrique permet d'augmenter la vitesse des particules dans le cyclotron.

## Séquence 5

**Unité d'Apprentissage 2 :** Application de la Relation Fondamentale de la Dynamique

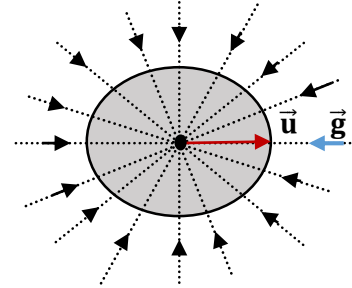
**Concept 4 :** Mouvement d'un Satellite Terrestre dans le Champ de Pesanteur

**Pré-évaluation :**

Donne l'expression et les lignes du champ gravitationnel terrestre à l'altitude  $h$  (à grande distance) autour de la terre.

**Rappels :**

- A l'altitude  $h$ , le champ gravitationnel terrestre est  $\vec{g} = -G \frac{M_T}{r^2} \vec{u}$  avec  $r = R_T + h$  (où  $h$  est l'altitude).
- En module :  $g = G \frac{M_T}{(R_T + h)^2}$
- Avec :  $\vec{g} = -G \frac{M_T}{r^2} \vec{u}$ ,  $M_T > 0$  alors  $\vec{g}$  et  $\vec{u}$  sont de sens inverse, donc les lignes de champ terrestre sont radiales et centripètes à l'altitude  $h$  (à grande distance) autour de la terre.



**Situation d'apprentissage :**

De nos jours, il est édifié par les sciences physiques que la lune est un satellite qui fait une révolution autour de la terre durant un mois lunaire. Quelle est la nature du mouvement des satellites artificiels utilisés en télécommunication pour les relais téléphoniques, de télévisions, et autres ?

**Activité 1 :** Détermination de la nature du mouvement d'un satellite terrestre

Soit un satellite de masse  $m$  se déplaçant à l'altitude  $h$  autour de la terre sans frottements.

**Consigne :**

- Représente les forces extérieures exercées sur le satellite ;
- Détermine la nature du mouvement en appliquant la relation fondamentale de la dynamique, puis en déduis la nature de la trajectoire.

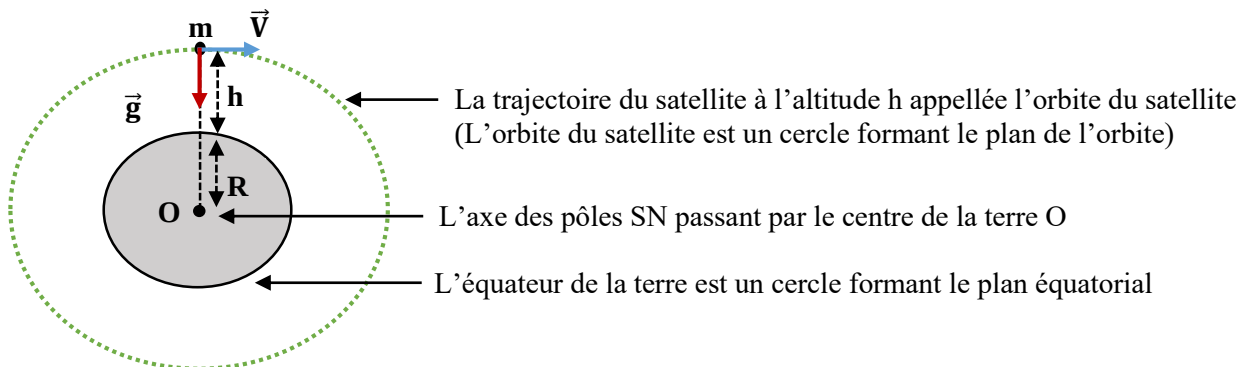
**Synthèse 1 :**

**I. La nature du mouvement d'un satellite terrestre dans le champ de pesanteur :**

Un satellite est un projectile lancé depuis la terre avec une vitesse initiale lui permettant d'échapper à l'attraction terrestre et évoluant dans l'espace autour de la terre en mouvement circulaire ou mouvement elliptique.

Considérons un satellite de masse  $m$  situé à l'altitude  $h$  et possédant le vecteur vitesse  $\vec{V}$ .

- Le système : {satellite},
- Le repère choisi est géocentrique et supposé galiléen ;
- La force appliquée est le poids  $\vec{P} = m\vec{g}$



- Dans la base de Frenet, on a :  $\vec{g} = \begin{cases} \vec{g}_t = 0 \\ \vec{a}_N = g \end{cases}$  à l'altitude  $h$ , le vecteur-champ gravitationnel est radial et centripète.

- A  $t \neq 0s$

$$\sum \vec{F} = \vec{P} = m\vec{g} \Rightarrow m\vec{a} = m\vec{g} \Rightarrow \vec{a} = \vec{g} \Rightarrow \vec{a} = \begin{cases} \vec{a}_t = 0 \\ \vec{a}_N = g \end{cases} \text{ à l'altitude } h, \text{ l'accélération est radiale et centripète.}$$

Alors :  $a_t = \frac{dv}{dt} = 0 \Rightarrow V$  est une constante alors le mouvement est uniforme.

$$\text{Et } a = a_N = \frac{v^2}{R_T+h} \text{ et } a = g = \frac{G M_T}{(R_T+h)^2} \Rightarrow \frac{v^2}{R_T+h} = \frac{G M_T}{(R_T+h)^2} \Rightarrow v^2 = \frac{G M_T}{R_T+h} \Rightarrow R_T + h = \frac{G M_T}{v^2}$$

est une constante alors le mouvement est circulaire donc le mouvement du satellite terrestre est circulaire et uniforme dont la trajectoire est un cercle de rayon :  $r = R_T + h$

### **Activité 2 : Détermination de la vitesse linéaire d'un satellite terrestre**

A la surface terrestre ( $h = 0$  et  $g = g_0 = 9,8 \text{ N/kg}$ ).

**Consigne** : Détermine la vitesse linéaire  $V$  du satellite en fonction de :  $R_T$ ,  $g_0$  et  $h$

### **Synthèse 2 :**

#### **II. La vitesse linéaire d'un satellite terrestre :**

$$\text{A la surface terrestre : } h = 0 \Rightarrow g_0 = \frac{G M_T}{R_T^2} \Rightarrow G M_T = g_0 R_T^2 \text{ et } a = \frac{v^2}{R_T+h} = \frac{G M_T}{(R_T+h)^2} \Rightarrow a = \frac{v^2}{R_T+h} = \frac{g_0 R_T^2}{(R_T+h)^2}$$

$$\text{Alors : } v^2 = \frac{g_0 R_T^2}{R_T + h} \Rightarrow v = R_T \sqrt{\frac{g_0}{R_T + h}}$$

La vitesse diminue quand l'altitude croît et elle est indépendante de la masse du satellite.

### **Activité 3 : Détermination de la période de révolution d'un satellite terrestre autour de la terre**

La trajectoire du satellite étant un cercle,

**Consigne** : détermine le temps mis pour effectuer un tour complet autour de la terre.

### **Synthèse 3 :**

#### **III. La période de révolution d'un satellite terrestre autour de la terre :**

La période est le temps qu'il met pour effectuer un tour complet sur sa trajectoire.

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \text{ et } \omega = \frac{v}{R_T+h} \Rightarrow T = \frac{2\pi(R_T+h)}{v} \text{ et } v = R_T \sqrt{\frac{g_0}{R_T+h}} \Rightarrow T = \frac{2\pi(R_T+h)}{R_T} \sqrt{\frac{R_T+h}{g_0}}, \text{ elle croît quand } h \text{ croît.}$$

$$\text{Alors : } T^2 = \frac{2\pi^2(R_T+h)^2}{R_T^2} \cdot \frac{(R_T+h)}{g_0} \Rightarrow \frac{T^2}{(R_T+h)^3} = \frac{4\pi^2}{R_T^2 g_0} \text{ est un constant d'où la troisième loi de Kepler.}$$

### **Activité 4 : Satellite Géostationnaire**

En utilisant l'expression de la période ou la troisième loi de Kepler,

**Consigne** : détermine l'expression de l'altitude d'un satellite évoluant à la même période que la rotation de la terre autour d'elle-même puis calcule.

### **Synthèse 4 :**

#### **IV. Satellite Géostationnaire :**

##### **1. Définition :**

Un satellite Géostationnaire est un satellite, qui semble immobile pour un observateur terrestre, il a la même période que la terre autour d'elle-même.

##### **2. L'expression de l'altitude d'un satellite terrestre :**

$$\text{On sait que : } \frac{T^2}{(R_T+h)^3} = \frac{4\pi^2}{R_T^2 g_0} \Rightarrow (R_T + h)^3 = \frac{T^2 R_T^2 g_0}{4\pi^2} \Rightarrow R_T + h = \sqrt[3]{\frac{T^2 R_T^2 g_0}{4\pi^2}} \Rightarrow h = \sqrt[3]{\frac{T^2 R_T^2 g_0}{4\pi^2}} - R_T$$

##### **3. Application numérique pour un satellite géostationnaire :**

On donne :  $g_0 = 9,8 \text{ N/kg}$ ,  $T = 24 \text{ h} = 86\,400 \text{ s}$ ,  $R_T = 6\,400 \text{ km} = 6\,400\,000$  et  $\pi = 3,14$

$$h = \sqrt[3]{\frac{T^2 R_T^2 g_0}{4\pi^2}} - R_T \Rightarrow h = \sqrt[3]{\frac{86400^2 \times 6400000^2 \times 9,8}{4 \times 3,14^2}} - 6400000 = 35\,954\,355 \text{ m} = 35\,954,355 \text{ km}$$

L'altitude d'un satellite géostationnaire est voisine de **36 000 km**

**A savoir :**

La terre tourne autour d'elle-même avec une vitesse angulaire  $\omega_T$  dans le sens de l'aiguille d'une montre en l'observant suivant l'axe des pôles dans le sens Sud-Nord.

Pour tout observateur terrestre la terre semble immobile, alors il voit les satellites tournant autour de la terre dans le même sens que celui de la terre avec une vitesse angulaire relative (ou apparente)  $\omega_r = \omega_s - \omega_T$  (où  $\omega_T$  est aussi la vitesse angulaire d'un observateur terrestre autour de l'axe des pôles de la terre et  $\omega_s$  est celle du satellite).

Par conséquent pour tout satellite géostationnaire  $\omega_s = \omega_T \Rightarrow \omega_r = 0$  donc il semble immobile pour un observateur terrestre et impossible pour lui de tourner autour d'un même observateur terrestre dans le même sens que la terre. Le plan orbital du satellite est confondu au plan équatorial.

Si  $\omega_s < \omega_T$  alors le satellite se déplace vers l'Ouest pour un observateur terrestre et toujours aperçu de la même manière comme la lune.

Si  $\omega_s > \omega_T$  alors le satellite se déplace vers l'Est pour un observateur terrestre. Il tourne autour d'un même observateur terrestre dans le même sens que la terre pendant une durée  $T_r = \frac{2\pi}{\omega_r}$ .

L'énergie cinétique d'un satellite à l'altitude h est  $E_C = \frac{1}{2}mV^2$  avec  $V^2 = \frac{g_0 \cdot R_T^2}{R_T + h} \Rightarrow E_C = \frac{m \cdot g_0 \cdot R_T^2}{2(R_T + h)}$

L'énergie potentielle d'un satellite à l'altitude h est  $E_P = mgr$  avec  $r = R_T + h$  et  $g = \frac{g_0 \cdot R_T^2}{(R_T + h)^2} \Rightarrow E_P = \frac{m \cdot g_0 \cdot R_T^2}{R_T + h}$

Le poids est normal à la trajectoire alors son travail est nul :  $\mathbf{W_P} = \mathbf{0}$  donc l'énergie cinétique se conserve (c'est une constante) :  $\Delta E_C = 0$

## Séquence 6

### Unité d'Apprentissage 3 : Energie Interne d'un Système

#### Concept 1 : Premier Principe de la Thermodynamique

##### Pré-évaluation :

Définis une glacière.

##### Rappel :

Une glacière est un récipient (ou système) fixe ou mobile, présentant des propriétés isothermes (en gardant la température constante) grâce auxquelles elle permet de maintenir des aliments ou des boissons au froid, ou de stoker de la glace.

##### Situation d'apprentissage :

Dans ce vingt-unième siècle, nous utilisons tous, selon le besoin, les glacières pour la conservation des glaces (de la fraîcheur) et les thermos pour la conservation du thé ou café (de la chaleur). Quel est le principe de variation de l'énergie interne d'un système ?

##### Activité 1 : Système

Les thermos et les glacières sont des systèmes isothermes dans lesquelles la température, la chaleur ou plus particulièrement l'énergie interne reste presque constante (échange de chaleur entre ses contenus).

##### Consigne :

- Définis un système,
- Donne les différents types de système et donne un exemple pour chacun d'eux.

##### Synthèse 1 :

###### I. Système :

###### 1. Définition :

Un système est une partie de l'espace limitée par une surface réelle ou fictive, au sein de laquelle s'effectue une transformation thermodynamique.

Tout ce qui ne fait pas partie du système est appelé environnement ou milieu extérieur.

Un système peut être ouvert, fermé ou isolé et chacun a une signification bien précise.

###### 2. Système ouvert :

Un système est ouvert s'il échange de la matière et de l'énergie (mécanique, électrique, magnétique, chimique, nucléaire, calorifique, ...) avec le milieu extérieur.

##### Exemple :

Un feu de bois, un réacteur ouvert à l'air libre et non isolé thermiquement.

###### 3. Système fermé :

Un système fermé est un système qui échange uniquement de l'énergie avec le milieu extérieur.

##### Exemple :

L'ensemble cylindre piston, le circuit de fluide d'un réfrigérateur.

###### 4. Système isolé :

Un système isolé est un système qui n'échange ni énergie ni matière avec le milieu extérieur.

##### Exemple :

Un réacteur clos, de volume invariable et isolé thermiquement.

### Activité 2 : Premier principe de la thermodynamique

A partir de tes connaissances

##### Consigne :

- Définis : l'état d'un système, la transformation, la thermodynamique, et l'énergie interne d'un système.
- Énonce le premier principe de la thermodynamique.

**Synthèse 2 :****II. Premier Principe de la Thermodynamique :****1. Etat d'un système :**

L'état d'un système est défini par des grandeurs appelées variables d'état (Pression, Volume, Température, Quantité de matière). Les autres grandeurs sont des fonctions d'état. Entre les variables d'état d'un système, il existe une relation appelée équation caractéristique du système. Par exemple : l'équation caractéristique d'un gaz parfait :  $PV = nRT$

**2. Transformation :**

Elle est le passage d'un système d'un état initial, à un autre état dit final.

Au cours d'une transformation d'un système, d'un état initial à un état final, la variation de la fonction d'état ne dépend que des états définis par les variables d'état et non des étapes intermédiaires. Et le système est en équilibre quand ses variables d'état sont constantes.

**3. Thermodynamique :**

La thermodynamique est la partie de la physique et de la chimie qui étudie les fonctions d'état (chaleur, travail, ...) c'est-à-dire les échanges entre l'énergie thermique (chaleur) et l'énergie mécanique (travail), entre deux états.

**4. Energie interne :**

L'énergie interne d'un système apparaît comme une grandeur qui caractérise l'état actuel de ce système.

Elle reprend la même valeur chaque fois que le système se trouve dans le même état. C'est une fonction d'état.

**5. Enoncé du premier principe de la thermodynamique :**

Pour tout système fermé, il existe une fonction d'état appelée énergie interne dont la variation est égale à la somme du travail  $W$  et de la chaleur  $Q$  échangés avec le milieu extérieur :  $\Delta U = U_F - U_I = W + Q$

**A savoir :**

Le travail  $W$  et la chaleur  $Q$  sont des grandeurs algébriques :  $W$  ou  $Q$  est positive si le système reçoit et négative si le système fournit. Donc l'énergie interne augmente quand le système reçoit plus qu'il fournit et elle diminue quand le système fournit plus qu'il reçoit.

Pour une transformation isochore, le travail des forces pressantes est nul. Par conséquent s'il n'y a pas autre travail que celui des forces pressantes alors :  $\Delta U = U_F - U_I = Q$

Dans une transformation cyclique l'état initial (I) coïncide avec l'état final (F) :  $U_F = U_I$

Par conséquent  $\Delta U = U_F - U_I = W + Q = 0 \Rightarrow W = -Q \Rightarrow |W| = |Q|$

Dans un système isolé le travail et la chaleur échangés avec l'extérieur sont nuls :  $W = 0$  et  $Q = 0$

Par conséquent  $\Delta U = U_F - U_I = W + Q = 0$  donc  $U_F = U_I$  l'énergie interne ne varie pas, elle se conserve.

***Dans la pratique il est impossible de réaliser un système parfaitement isolé en empêchant totalement les échanges d'énergie.***

## Séquence 7

### Unité d'Apprentissage 3 : Energie Interne d'un Système

#### Concept 2 : La Calorimétrie

#### Pré-évaluation :

Donne les unités de la température et de la chaleur. Puis donne la température de fusion de la glace en eau.

#### Rappels :

- L'unité de la température est le Kelvin (**K**) ou le degré Celsius (**°C**) telle que :  $T_K = T^{\circ}C + 273$ .
- Tout comme le travail, l'unité de la chaleur est le Joule (**J**) ou la calorie (Cal) telle que :  $1\text{Cal} = 4,186\text{ J}$ .
- La température de fusion de la glace est **0°C** ou **273K**.

#### Situation d'apprentissage :

En réalisant une expérience thermodynamique par la quelle, nous mettons une quantité de glace à **-20°C** et quelques bouteilles de jus d'orange à **30°C** dans une glacière de température interne  $T_i = 25^{\circ}\text{C}$ , munie d'un thermomètre. Les observations montrent qu'après un certain temps, la glace fond, la température des boissons diminue et qu'en fin la température de l'enceinte demeure en chemin (constante). Quelle est la variation de l'énergie interne d'un système isolé ?

#### Activité 1 : Transformation mutuelle de l'énergie mécanique et de la chaleur

Consigne : Donne un exemple de transformation de l'énergie mécanique en chaleur et réciproquement de la chaleur en énergie mécanique.

#### Synthèse 1 :

##### I. Exemples de Transformation :

##### 1. Transformation de l'énergie mécanique en chaleur :

Considérons un cycliste qui, dans une forte pente, conserve une vitesse constante grâce à la mise en action des feins. Juste après le freinage nous pouvons observer que les patins et les tambours des freins ont une température plus élevée (énergie thermique) que celle de l'air : l'énergie mécanique est alors transformée en chaleur par frottement.

Donc la variation de l'énergie mécanique se dissipe en chaleur :  $|\Delta E_m| = |\Delta E_C + \Delta E_P| = |\sum W_f| = Q$

##### A savoir : Un exemple de transformation de l'énergie électrique en chaleur

La chaleur dissipée par une résistance **R** traversée par un courant d'intensité **I**, sous une tension **U**, par effet Joule durant un temps **T**, est :  $Q = W = P.T$  telle que la puissance  $P = U.I$  et  $U = R.I$  alors  $P = R.I^2$

##### 2. Transformation de la chaleur en énergie mécanique :

Un moteur de locomotrice à vapeur ou de locomotrice diesel, un moteur d'automobile, une turbine à vapeur ou à gaz, un réacteur d'avion, sont appelés moteurs thermiques par ce qu'ils produisent du travail quand on leur fournit de la chaleur : on dit que le moteur thermique transforme de la chaleur en travail. Mais le rendement est inférieur à **60%**.

#### Activité 2 : Quantité de chaleur

En fonction de la température finale (d'équilibre),

Consigne : donne

- L'expression de la quantité de chaleur reçue par les glaces. Puis durant la fusion.
- L'expression de la quantité de chaleur cédée par les boissons.
- L'expression de la quantité de chaleur cédée par l'intérieure de la glacière.

#### Synthèse 2 :

##### II. Quantité de chaleur :

##### 1. Quantité de chaleur reçue :

La quantité de chaleur **Q** absorbée par un corps qui s'échauffe de  $t_1$  à  $t_2$  telle que  $t_1 < t_2$ , est proportionnelle à l'élévation ( $t_2 - t_1 > 0$ ) de sa température :  $Q = k(t_2 - t_1) > 0$  où **k** est une constante qui dépend de ce corps, appelée la capacité calorifique ou thermique de ce corps.

##### 2. Quantité de chaleur perdue :

La quantité de chaleur **Q** perdue par un corps qui refroidit de  $t_1$  à  $t_2$  telle que  $t_1 > t_2$ , est proportionnelle à l'abaissement ( $t_2 - t_1 < 0$ ) de sa température :  $Q = k(t_2 - t_1) < 0$ .

**3. Capacité calorifique ou thermique :**

La capacité calorifique ou thermique  $K$  d'une substance est la chaleur nécessaire pour augmenter la température de la substance de  $1^\circ$  kelvin. Elle s'exprime en  $J/^\circ C$  ou en  $J/K$ .

**4. Chaleur massique ou chaleur spécifique massique :**

La chaleur massique  $C$  est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de  $1K$  la température de  $1g$  de ce corps.

A l'échelle d'une masse quelconque  $m$ , la chaleur massique est  $C = k/m$  alors  $k = m \cdot C$ . Elle s'exprime en  $J \cdot ^\circ C^{-1} g^{-1}$  ou  $J \cdot K^{-1} g^{-1}$ .

La chaleur spécifique molaire  $C_{mol}$  d'un corps est la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré Kelvin la température d'une mole de ce corps.

A l'échelle d'un certain nombre de moles  $n$ , la chaleur spécifique molaire est  $C_{mol} = k/n$  alors  $k = n \cdot C_{mol}$  et  $C_{mol} = M \cdot C$  avec  $M$  est la masse molaire. Elle s'exprime en  $J \cdot ^\circ C^{-1} mol^{-1}$  ou  $J \cdot K^{-1} mol^{-1}$ .

**Quelques valeurs de chaleurs spécifiques massiques ou molaires :**

| Corps                              | Eau   | Glace | Aluminium | Fer   | Cuivre |
|------------------------------------|-------|-------|-----------|-------|--------|
| $C(J \cdot K^{-1} g^{-1})$         | 4,184 | 2,06  | 0,897     | 0,449 | 0,385  |
| $C_{mol}(J \cdot K^{-1} mol^{-1})$ | 75,4  | 37,1  | 24,2      | 25,1  | 24,5   |

**Remarque :**

La calorie est la quantité de chaleur qu'un gramme d'eau absorbe pour s'échauffer de  $1^\circ C$  (ou cède pour se refroidir de  $1^\circ C$ ). Son unité dans le SI est « la Calorie ». On utilise aussi les multiples de la calorie :  $1Kcal = 10^3 cal$  et la thermie  $1th = 10^6 cal$

**5. Chaleur latente :**

Lorsqu'un corps change d'état physique à température constante la quantité de chaleur mise en jeu du dit corps s'appelle respectivement :

- La chaleur latente de fusion si le corps passe de l'état solide à l'état liquide  $L_F > 0$  ;
- La chaleur latente de vaporisation si le corps passe de l'état liquide à l'état gazeux  $L_V > 0$  ;
- La chaleur latente de sublimation si le corps passe de l'état solide à l'état gazeux  $L_S > 0$ .

Pour l'inverse de chacun de ces phénomènes la chaleur latente sera prise négativement.

La chaleur latente est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à l'unité de masse de ce corps pris à la même température constante sous une pression donnée pour le faire changer d'état physique. Donc à l'échelle d'une masse quelconque  $m$  qui, en changement d'état reçoit ou fournit de chaleur :  $Q = m \cdot L$

**6. Chaleur :**

La chaleur est la forme d'énergie qui passe d'un corps à un autre quand il y a d'échange de température. C'est un mode de transfert d'énergie.

**Remarque :**

Il existe trois types de transfert thermique : la conduction thermique (entre deux régions d'un même milieu), la convection thermique (au sein d'un fluide ou entre un fluide et un solide) et le rayonnement thermique (cas du soleil).

**Activité 3 : Calorimétrie**

La quantité de matière contenant dans la glacière est restée constante durant tout le processus.

**Consigne :**

- Le système en question a-t-il échangé de chaleur avec le milieu extérieur ? Caractérise-le.
- Et que penses-tu de son énergie interne ?
- Donne le bilan de son énergie interne.
- Alors définis la calorimétrie.

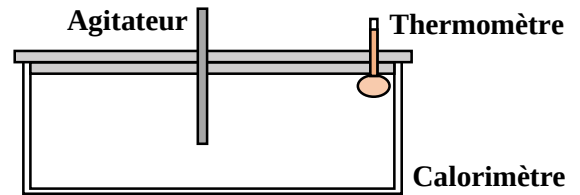
**Synthèse 3 :****III. Calorimétrie :****1. Enceinte adiabatique :**

Une enceinte adiabatique est une enceinte fermée, isolée thermiquement, dont les parois sont constituées d'un matériau « imperméable à la chaleur ». Donc elle n'échange pas de chaleur avec le milieu extérieur alors  $Q = 0$ .

**Exemple :** Bouteille thermique ; glacière, thermos.....

## 2. Calorimètre :

Un calorimètre est un système isolé donc adiabatique à l'intérieur duquel les transformations isochores (à volume constant) effectuées, s'accompagneront alors d'un bilan thermique nul.



L'enceinte intérieure et les accessoires du calorimètre (agitateur et thermomètre plus mercure) interviennent dans les échanges thermiques, puisque leur température varie de la valeur initiale  $T_i$  à la valeur finale  $T_f$  donc échange une quantité de chaleur :  $Q_c = K_c (T_f - T_i)$  où  $K_c$  est la capacité calorifique du calorimètre.

Cette capacité calorifique  $K_c$  est la somme des capacités calorifiques de ses constituants (calorimètre, agitateur et thermomètre plus mercure) :  $K_c = \sum K = \sum m \cdot C = m_1 C_1 + m_2 C_2 + \dots + m_n C_n$

La valeur en eau  $\mu$  d'un calorimètre est la masse d'eau fictive qui aurait la même capacité calorifique que le calorimètre (intérieure et les accessoires).

Avec  $K_c$  la capacité thermique du calorimètre et  $C_e$  la capacité thermique massique de l'eau, alors:  $k_c = \mu \cdot C_e$  dont la chaleur échangée par le calorimètre est :  $Q_c = k_c (T_f - T_i) = \mu \cdot C_e (T_f - T_i)$

Cette chaleur échangée par le calorimètre peut être négligée en mettant une quantité d'eau ( $m$ ) en début d'expérience pour ne pas avoir à tenir compte du calorimètre (intérieure et les accessoires) dans l'équation calorimétrique, dont le rapport  $\frac{\mu}{m}$  est de l'ordre de  $10^{-2}$  c'est-à-dire au plus 0,04 (au maximum) :  $\frac{\mu}{m} \leq 0,04$

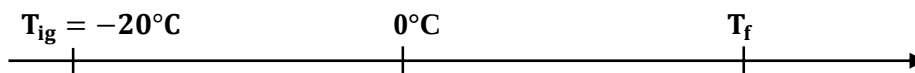
Par conséquent l'équation calorimétrique du calorimètre est alors :  $\Delta U = \sum Q = 0$  un bilan thermique nul.

**Par exemple :** le cas de l'expérience

- La quantité de chaleur échangée par l'enceinte intérieure (l'intérieure et les accessoires du calorimètre) :

Entre  $T_i = 25^\circ\text{C}$  et  $T_f$  :  $Q_c = k_c (T_f - T_i) = \mu \cdot C_e (T_f - T_i)$

- La chaleur échangée par la glace :



Entre  $T_{ig}$  et  $0^\circ\text{C}$  :  $Q_g = m_g \cdot C_g (0^\circ - T_{ig}) = -m_g \cdot C_g T_{ig}$  : La quantité de chaleur échangée par la glace ;

A  $0^\circ\text{C}$  :  $Q_L = m_g \cdot L_F$  : La chaleur latente de la fusion des glaces (dû au changement d'état) ;

Entre  $0^\circ\text{C}$  et  $T_f$  :  $Q_{gf} = m_g \cdot C_e (T_f - 0^\circ\text{C}) = m_g \cdot C_e T_f$  : La quantité de chaleur échangée par l'eau (glace fondue) ;

- La quantité de chaleur échangée par les boissons :

Entre  $T_{ib} = 30^\circ\text{C}$  et  $T_f$  :  $Q_b = m_b \cdot C_b (T_f - T_{ib})$ .

Le bilan thermique ou l'équation calorifique est :  $\Delta U = \sum Q = 0 \Rightarrow \sum Q = Q_c + Q_g + Q_e + Q_b + Q_L = 0$

## 3. Calorimétrie :

La calorimétrie est l'étude des mesures ou échanges de chaleur dans une enceinte thermique isolée.

**A savoir :**

Pour un système fermé non isolé le bilan thermique ou l'équation calorifique est :  $\Delta U = \sum Q = E$  (chaleur échangée)

## Séquence 8

### Unité d'Apprentissage 4 : Auto-induction Electromagnétique

#### Concept 1 : Induction Electromagnétique

##### Pré-évaluation :

Définis la force électromotrice puis donne l'expression du vecteur surface d'un contour fermé.

##### Situation d'apprentissage :

Les expériences montrent que tout circuit traversé par un courant électrique, crée à son voisinage un champ magnétique. Ce phénomène est-il réversible ? C'est-à-dire est-il possible de mettre les porteurs de charge en mouvement dans un conducteur sous l'effet d'un champ magnétique ?

##### Activité 1 : Notion de flux magnétique

Considère un contour plan plongé dans un champ magnétique  $\vec{B}$  uniforme. Le vecteur  $\vec{n}$  est le vecteur unitaire normal à la surface dont le sens est donné par la règle de la main droite : La main droite en poigne le contour dans le sens positif choisi arbitrairement et le pouce indique le sens de  $\vec{n}$ .

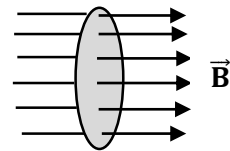
**Consigne :** Donne l'expression et la définition de la grandeur définie par le produit scalaire du vecteur-champ magnétique par le vecteur-surface, à travers ce contour.

##### Synthèse 1 :

#### I. Notion de flux magnétique :

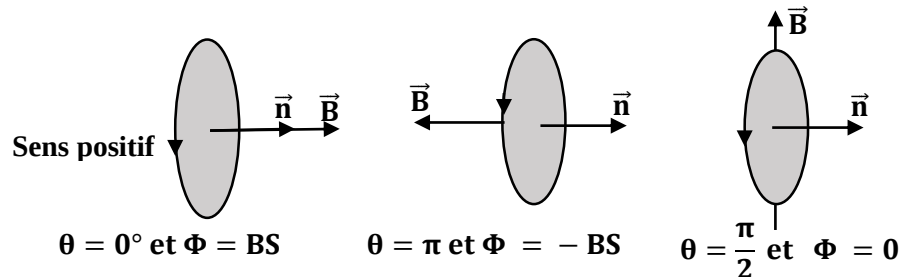
##### 1. Définition :

On appelle flux magnétique à travers un circuit fermé, le nombre de ligne de champ par section de ce circuit.



##### 2. Expression :

- Le flux magnétique est défini par :  $\Phi(\text{weber}) = \vec{B} \cdot S\vec{n} = BS \cos \theta$  avec  $\theta = \widehat{\vec{B}, \vec{n}}$
- Les cas particuliers :

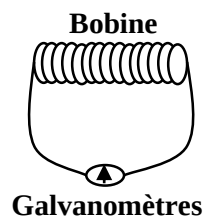


Lorsque le circuit comprend N spires le flux magnétique à travers le circuit est  $\Phi = NBS \cos \theta$

##### Activité 2 : Mise en évidence du phénomène d'induction électromagnétique

Réalisons le dispositif expérimental ci-dessous comprenant une bobine, dont les deux bornes sont reliées à un galvanomètre à zéro central et un aimant.

- Approche le pôle nord de l'aimant de façon rapide à l'un des faces de la bobine.
- La bobine revenue à sa position initiale ; approche maintenant le pôle sud de l'aimant.
- Reprend en gardant l'aimant fixe et en déplaçant la bobine.



**Consigne :** Que constates-tu ? Interprète ces expériences puis caractérise les grandeurs engendrées.

##### Synthèse 2 :

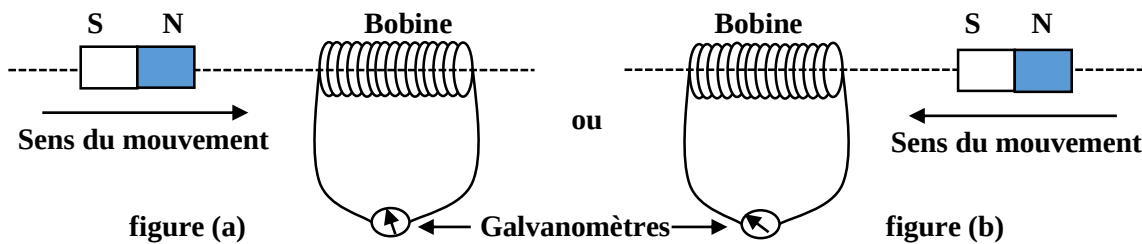
#### II. Phénomène induction électromagnétique :

##### 1. Observation :

Lorsqu'on approche le pôle nord de l'aimant de façon rapide à l'un des faces de la bobine, le galvanomètre décèle un courant temporaire qui s'annule dès que le mouvement de l'aimant cesse : figure (a).

La bobine revenue à sa position initiale ; approchons maintenant le pôle sud de l'aimant, le galvanomètre indique un courant temporaire dans le sens contraire que celui observé dans le cas précédent et s'annule dès que le mouvement de l'aimant cesse : figure (b).

On observe le même résultat en gardant l'aimant fixe et en déplaçant la bobine.



## 2. Interprétation :

Toutes ces expériences permettent de donner naissance à des courants électriques dans un circuit électrique ne comportant pas de générateur. Ces courants sont appelés courants induits. Le phénomène physique qui engendre ces courants s'appelle l'induction électromagnétique ou l'induction. Le circuit dans lequel le courant induit apparaît est le circuit induit ou induit (bobine). Le circuit qui permet de créer le courant induit est le circuit inducteur ou l'inducteur (aimant).

On remarque dans l'expérience précédente, lorsque l'aimant ou la bobine se déplace, le flux magnétique à travers la bobine varie en même temps, il apparaît un courant induit dans le circuit. Toute variation du flux magnétique à travers un circuit y fait apparaître un courant induit ou une force électromotrice induite (f.e.m).

Variation du flux =>  $\begin{cases} \text{Un courant induit (circuit fermé)} \\ \text{Une f.e.m induite (circuit ouvert)} \end{cases}$

- **L'induction électromagnétique** est un phénomène physique conduisant à l'apparition d'une force électromotrice (ou un courant) dans un circuit électrique soumis à un flux de champ magnétique variable.
- **Le courant induit** est un courant qui résulte de la variation d'un flux magnétique à travers un circuit fermé.

Dans tout circuit où circule un courant, il doit exister un générateur qui se manifeste par une f.e.m. Dans le circuit ne comportant aucun générateur les f.e.m qui prennent naissance sont appelées f.e.m induite.

- **La force électromotrice induite** est la cause de mise en mouvement des porteurs de charges dans un circuit électrique soumis à un flux de champ magnétique variable.

$$\text{La f.e.m induite moyenne : } \mathbf{E} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - \frac{(\Phi_2 - \Phi_1)}{t_2 - t_1}$$

$$\text{La f.e.m induite instantanée : } \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \mathbf{E} = \mathbf{e} = - \frac{d\Phi}{dt} \text{ d'où la loi de Faraday.}$$

### Activité 3 : Loi de Lenz

A partir de ces expériences

**Consigne :** Énonce la loi relative au sens du courant induit par rapport à la variation du flux magnétique à travers le circuit.

### Synthèse 3 :

#### III. Loi de Lenz :

##### 1. Énoncé de la loi :

Loi qualitative de l'induction électromagnétique, selon laquelle « les courants induits tendent par leurs effets (champ magnétique créé) à s'opposer à la cause (variation du flux magnétique) qui leurs a donné naissance ».

##### 2. Sens du courant induit :

- Si la force électromotrice induite est positive alors le courant induit circule dans le sens positif.
- Si la force électromotrice induite est négative alors le courant induit circule dans le sens contraire.

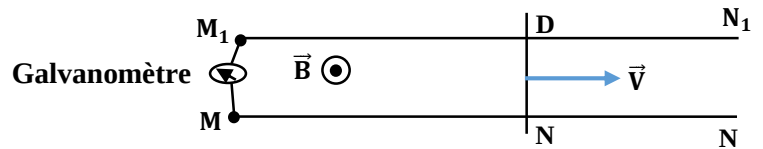
**Remarque :**

La quantité d'électricité  $Q = I\Delta t$  et ou  $|E| = RI \Rightarrow I = \frac{|E|}{R}$  (R est la résistance totale)  $\Rightarrow Q = \frac{E}{R}\Delta t$  et  $E = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$   
 $\Rightarrow Q = \frac{|\Delta\Phi|}{R}$

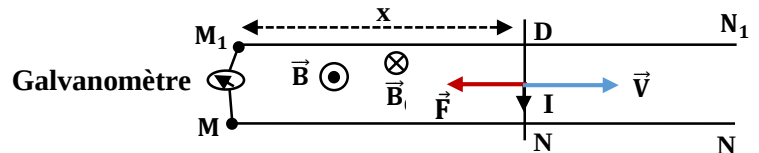
**Activité 4 : Etude d'un cas particulier**

Considérons un conducteur CD rectiligne, posé perpendiculairement sur deux rails parallèles et horizontaux. L'ensemble est placé dans le champ magnétique uniforme  $\vec{B}$  crée dans l'entre fer d'un aimant en U. Un galvanomètre est branché aux extrémités M et M<sub>1</sub>, et déplaçons le conducteur CD avec une vitesse constante V.

**Consigne :** Que constates-tu ? Interprète puis donne l'expression du champ électrique, la force électromotrice et l'intensité du courant, engendré dans ce circuit.

**Synthèse 4 :****IV. Etude d'un cas particulier : Cas de deux rails parallèles****1. Observation :**

Un courant électrique circule dans le circuit ne comportant pas de générateur lorsqu'on déplace la barre CD. On a le phénomène d'induction électromagnétique.

**2. Interprétation :**

Lorsque la barre se déplace dans le champ magnétique, les porteurs de charge (électrons) possèdent une certaine vitesse par rapport au champ, ils sont alors soumis à la force électromagnétique qui en provoque leur mouvement à l'intérieur du fil : On a une circulation de courant si le circuit est fermé.

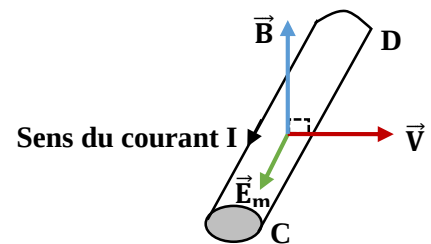
**3. Champ électromoteur :**

Le porteur de charge q est soumis à la force de Lorentz :  $\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$  lorsque le conducteur CD est en translation.

Pour le porteur de charge q, tout se passe comme s'il est soumis à la force électrostatique :  $\vec{F}_m = q\vec{E}_m$

On a :  $\vec{F} = \vec{F}_m \Rightarrow q\vec{E}_m = q\vec{v} \wedge \vec{B} \Rightarrow \vec{E}_m = \vec{v} \wedge \vec{B}$  en module :  
 $E_m = VB \sin\beta$  tel que  $\beta = (\vec{v}, \vec{B})$  pour  $\beta = 90^\circ \Rightarrow E_m = VB$

Le courant électrique et le champ électromoteur ont le même sens.

**4. Force électromotrice induite :**

Le flux magnétique à travers le circuit M<sub>1</sub>DCM<sub>1</sub> est  $\Phi = BS$  et  $S = CD \cdot x = L \cdot x$  avec  $CD = L \Rightarrow \Phi = BLx$

La force électromotrice est :  $e = -\frac{d\Phi}{dt} = -BL\frac{dx}{dt}$  et  $\frac{dx}{dt} = v \Rightarrow e = -BLV$

**Remarque :**

Si la distance x diminue alors la force électromotrice devient :  $e = -\frac{d\Phi}{dt} = -BL\frac{dx}{dt}$  et  $\frac{dx}{dt} = -v \Rightarrow e = BLV$

**A savoir :**

Lorsque la résistance totale du circuit est R le courant induit a pour intensité :  $i = \frac{|e|}{R}$

La tension u aux bornes d'un conducteur de résistance r est  $u = r \cdot i - e$

Si  $r = 0 \Rightarrow u = -e$  (u et e sont de sens opposé)

**5. Intensité du courant induit :**

Si R est la résistance totale du circuit alors l'intensité du courant est :  $i = \frac{|e|}{R}$  et  $|e| = VBL \Rightarrow i = \frac{VBL}{R}$

**6. Intensité de la force d'origine magnétique :**

Le conducteur CD est soumis à la force de Laplace  $\vec{F}$  dont le sens est l'opposé du celui de la vitesse  $\vec{V}$  et de l'intensité :

$$F = iBL \text{ et } i = \frac{VBL}{R} \Rightarrow F = LB \times \frac{VBL}{R} \Rightarrow \mathbf{F = \frac{VB^2L^2}{R}}$$

**7. Champ magnétique induit :**

Le courant induit circulant dans le conducteur CD crée un champ magnétique  $\vec{B}_0$  s'opposant à  $\vec{B}$  (sa direction et son sens peuvent être aussi déterminés par la règle de l'observateur d'ampère) dont son intensité  $\mathbf{B = 2.10^{-7} \frac{i}{d}}$  avec d la distance entre CD et le point où  $\vec{B}_0$  est créé.

## Séquence 9

### Unité d'Apprentissage 4 : Auto-induction Electromagnétique

#### Concept 2 : Applications de l'Induction Electromagnétique

#### Pré-évaluation :

Comment peut-on réduire une de 220V à une tension de 110V.

#### Situation d'apprentissage :

Les transformateurs et les alternateurs sont des appareils électriques statiques à induction électromagnétique : fonctionnant sous l'effet de variation de flux magnétique à travers d'au moins un bobinage. Comment fonctionnent-ils ces appareils électriques ?

#### Activité : Transformateurs et Alternateurs

##### Consigne :

- Définis un transformateur puis donne sa description et son principe de fonctionnement.
- Définis un alternateur puis donne sa description et son principe de fonctionnement.

#### Synthèse : Applications de l'Induction Electromagnétique

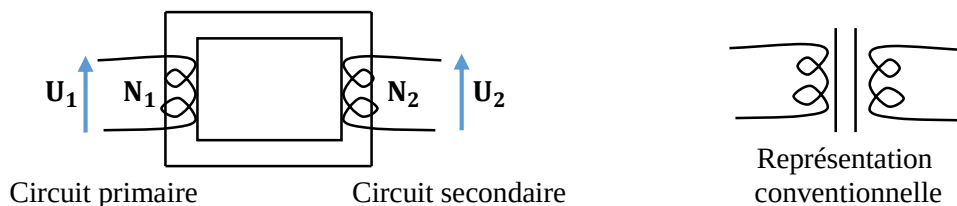
##### I. Transformateurs :

###### 1. Définition :

Est un appareil à induction électromagnétique qui transforme un système (tension, courant) de courant alternatif (variable) en un autre système de courant alternatif de même fréquence mais d'intensités et de tensions différentes.

###### 2. Description :

Le transformateur se compose d'une carcasse de fer doux de section constante sur laquelle on enroule deux bobines distinguées  $b_1$  et  $b_2$  comportant respectivement  $N_1$  et  $N_2$  spires. La bobine jouant le rôle d'induction est le circuit primaire et l'autre qui joue le rôle d'induit est le circuit secondaire. Un transformateur est quadripôle réversible. La carcasse de fer doux canalise les lignes d'induction de champ magnétique et diminue les pertes magnétiques.



###### 3. Fonctionnement :

En envoyant dans le circuit primaire un courant alternatif, il se crée un flux d'induction alternatif dans le fer doux qui traversera les spires du secondaire. L'intensité du champ magnétique  $\vec{B}$  créée est la même en tout point de la carcasse.

Les circuits, primaire et secondaire sont le siège d'une force électromotrice induite.

La loi d'ohm dans le primaire est :  $U_1 = r_1 i_1 - e_1$

La loi d'ohm dans le secondaire est :  $U_2 = r_2 i_2 - e_2$

Soit  $\Phi$  le flux à travers une spire de résistance négligeable, on : 
$$\begin{cases} e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \Rightarrow U_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \Rightarrow U_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \end{cases} \Rightarrow \frac{d\Phi}{dt} = \frac{U_1}{N_1} = \frac{U_2}{N_2}$$

$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$  est le rapport de transformateur.

Le rapport des tensions efficaces aux bornes des bobines est égal au rapport de leur nombre respectif de spires.

- Si  $\frac{N_2}{N_1} > 1 \Rightarrow \frac{U_2}{U_1} > 1 \Rightarrow U_2 > U_1$  alors le transformateur est survolteur (ou éleveur de tension).  
Il transformateur est utilisé dans le transport de l'énergie électrique à grande distance.
- Si  $\frac{N_2}{N_1} < 1 \Rightarrow \frac{U_2}{U_1} < 1 \Rightarrow U_2 < U_1$  alors le transformateur est sous volteur (ou abaisseur de tension).  
Il est utilisé pour la sécurité des jouets électriques.

**A savoir :**

Le rendement de transformation est le rapport de la puissance consommée par le secondaire, par la puissance fournie par le primaire :  $r = \frac{P_2}{P_1}$  (où  $P_1 = U_1 I_1$  et  $P_2 = U_2 I_2$ ) alors  $r = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1}$

Un transformateur est dit parfait si  $r = 1 \Rightarrow U_1 I_1 = U_2 I_2 \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$

Un transformateur non parfait a le rendement inférieur à un ( $r < 1$ ) et l'énergie perdue ( $P_p = P_1 - P_2$ ) se transforme en chaleur par effet joule.

**II. Alternateurs :****1. Définition :**

Les alternateurs sont des générateurs de courants alternatifs. Ils transforment l'énergie mécanique en énergie électrique.

**2. Description :**

Un alternateur comprend essentiellement deux parties :

- Un inducteur produisant un champ magnétique,
- Un induit dans lequel est engendré le courant produit par une induction électromagnétique.

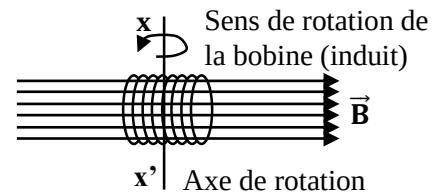
**3. Principe de fonctionnement :**

Tout déplacement relatif de l'inducteur ou de l'induit crée un flux variable dont la variation de ce flux engendre un courant de même nature que ce dernier.

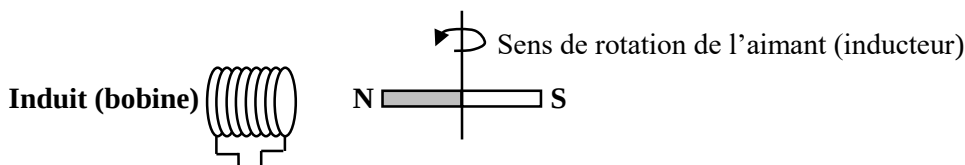
On distingue deux types d'alternateurs :

**a. Alternateur à induit tournant :**

Soit une bobine tournant à la vitesse angulaire  $\omega$  autour d'un axe  $xx'$  dans un champ uniforme horizontal  $\vec{B}$ . La position de la bobine est à tout instant est repérée par l'angle  $\alpha = (\vec{B}, \vec{S}) = \omega t$ . La bobine tourne alors le flux varie donc la force électromotrice :



$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \text{ et } \Phi = NBS \cos \omega t \Rightarrow e = -\frac{d(NBS \cos \omega t)}{dt} \Rightarrow e = \omega NBS \sin \omega t \text{ d'où } e_{\max} = \omega NBS \Rightarrow e = e_{\max} \sin \omega t$$

**b. Alternateur à induit fixe :**

Soit un aimant tourne à vitesse angulaire constante ( $\omega = 2\pi n_s$ ) devant une bobine fixe. La bobine est traversée par un courant alternatif dont la fréquence ( $f$ ) est égale à celle de la rotation ( $n_s$ ) de la bobine :  $n_s = f \Rightarrow \omega = 2\pi f$

Pour les alternateurs à plusieurs bobines, la fréquence de rotation des bobines (ou la vitesse du synchronisme)  $n_s = \frac{f}{p}$  (en tour/s) tel que  $p$  est le nombre de paires de pôles.

## Séquence 10

### Unité d'Apprentissage 4 : Auto-induction Electromagnétique

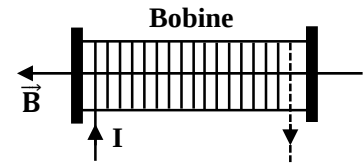
#### Concept 3 : Auto-induction

##### Pré-évaluation :

- Donne l'expression du champ magnétique créé à l'intérieur d'une bobine de rayon  $R$  comportant  $N$  spires et traversée par courant d'intensité  $I$ .
- Donne l'expression du nombre de spires  $N$  en fonction de la longueur totale  $L$  du fil enroulé puis en fonction de la longueur  $l$  de la bobine, du diamètre  $d$  du fil et du nombre de couche  $x$  d'enroulement.

##### Rappels :

- L'intensité de l'induction magnétique  $\vec{B}$  au centre d'une bobine est proportionnelle à l'intensité  $I$  du courant dans les spires et inversement proportionnelle au rayon  $R$  de la bobine.



Elle est donnée par la relation :  $B = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{R}$  avec  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  d'où  $B(T) = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{N \cdot I(A)}{R(m)}$

Le sens de l'induction magnétique est donné par l'observateur d'Ampère, placé sur une spire et qui regarde à l'intérieur du solénoïde, voit les lignes d'induction traversent la bobine de sa droite vers sa gauche.

- Un solénoïde est comme une bobine longue de longueur  $l$  et de rayon  $R$ , comportant  $N$  spires.

L'intensité de l'induction magnétique  $\vec{B}$  au centre du solénoïde est proportionnelle à l'intensité  $I$  du courant dans les spires et inversement proportionnelle à la longueur  $l$  du solénoïde. Elle est donnée par la relation :

$$B = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{l} \quad \text{avec} \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad \text{d'où} \quad B = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{N \cdot I}{l}$$

Pour un solénoïde infiniment long comportant  $n = \frac{N}{l}$  spires par mètre de longueur alors on aura :  $B = 4\pi \cdot 10^{-7} n \cdot I$

- Si  $L$  est la longueur totale du fil enroulé,  $R$  le rayon de la bobine (ou du solénoïde) et  $2\pi R$  la longueur d'une spire, alors :

$$N = \frac{L}{2\pi R}$$

- Si  $d$  est le diamètre du fil conducteur enroulé,  $l$  la longueur de la bobine (ou du solénoïde) et  $x$  le nombre de couche, alors :

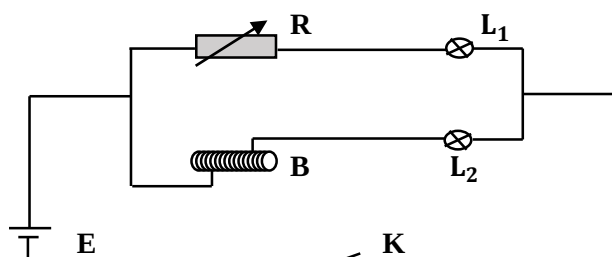
$$x \cdot l = d \cdot N \Rightarrow N = \frac{l \cdot x}{d}$$

##### Situation d'apprentissage :

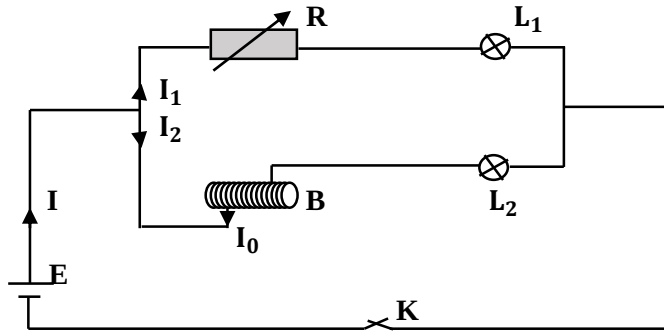
Les expériences montrent que toute bobine placée dans un circuit s'oppose à l'établissement ou à la rupture du courant dans celui-ci. C'est un phénomène d'Auto-induction. Comment la bobine s'oppose à l'établissement ou à la rupture du courant dans un circuit électrique ?

##### Activité 1 : Mise en évidence du phénomène d'auto-induction

Réalisons le montage ci-dessous.



**Consigne** : Ferme l'interrupteur  $K$ , que constates-tu? Interprète alors puis conclus.

**Synthèse 1 :****I. Mise en évidence du phénomène d'auto-induction :****1. Observation :**

Lorsqu'on ferme l'interrupteur K, le courant traverse les deux dérivation comprenant d'une part une lampe  $L_1$  et une résistance R, et d'autre part une lampe  $L_2$  identique à  $L_1$  et une bobine B ayant même résistance R.

On constate que :

- La lampe  $L_1$  brille immédiatement.
- La lampe  $L_2$  s'allume avec retard : la bobine s'oppose à l'installation du courant dans le circuit.

**2. Interprétation :**

La bobine parcourue par un courant électrique, crée un champ magnétique  $\vec{B}$  dont le flux magnétique est  $\Phi$ . L'intensité du courant électrique passe de la valeur 0 à  $I_2$ , le flux passe alors de 0 à  $\Phi$  ; Il existe donc une force électromotrice induite. Le courant  $I_0$  circulant dans la bobine est la cause de la variation du flux, c'est le phénomène de l'auto induction.

**3. Conclusion :**

Il apparait une force électromotrice induite dans un circuit lorsque celui-ci est parcouru par un courant variable faisant varier le flux magnétique qui le traverse. La force électromotrice (f.é.m) induite s'oppose par ses effets à la cause qui lui a donné naissance (Loi de Lenz).

Dans le phénomène d'auto-induction, le circuit induit et inducteur sont confondus.

**Activité 2 : Auto inductance L d'auto induction****Consigne :**

- En te servant de la définition du flux magnétique, précise celle du flux propre à travers la bobine.
- Quelle relation lie le flux magnétique à travers la bobine au courant ?
- Le flux magnétique à travers la bobine étant proportionnel au courant, détermine la constante de proportionnalité.

**Synthèse 2 :****II. Auto inductance L d'auto induction :****1. Le flux propre :**

Le flux propre  $\Phi_p$  est le flux magnétique envoyé à travers le circuit par le courant qui y circule.

**2. L'Auto-inductance :**

Par définition le flux  $\Phi = N.S.B$  pour  $\theta = 0^\circ$ . On sait que le champ magnétique B crée par un courant i dans une bobine est proportionnel à ce courant i tel que  $B = K.i \Rightarrow \Phi = (N.S.K).i$ .

Donc le flux magnétique est proportionnel à l'intensité i du courant :  $\Phi_p = Li \Rightarrow L = \frac{\Phi_p}{i}$  par identification ( $L = N.S.K$  est une constante positive qui ne dépend que de la géométrie du circuit ; elle est appelé inductance ou auto-inductance ou self et s'exprime en Henry (H)). Conventionnellement une inductance est représentée par une bobine.

**3. L'inductance d'une bobine :**

Le flux propre est  $\Phi_p = NBS \cdot \cos \theta$  pour  $\theta = 0^\circ \Rightarrow \Phi_p = NBS$  et le module du champ magnétique  $\vec{B}$  à l'intérieure

$$\text{d'une bobine est : } B = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{R} i \Rightarrow \Phi = NS4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{R} i = (4\pi 10^{-7} S \frac{N^2}{R}) i \Rightarrow L = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N^2 S}{R}$$

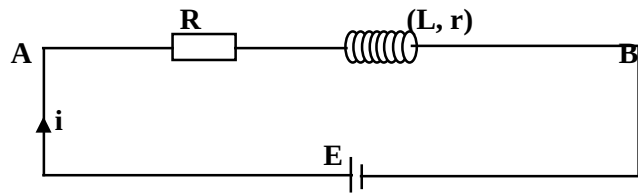
**A savoir :** Cas d'un solénoïde

Le flux propre est  $\Phi_p = NBS \cdot \cos \theta$  pour  $\theta = 0^\circ \Rightarrow \Phi_p = NBS$  et le module du champ magnétique  $\vec{B}$  à l'intérieur d'un solénoïde est :  $B = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{l} i \Rightarrow \Phi = NS 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{l} i = (4\pi 10^{-7} S \frac{N^2}{l}) i \Rightarrow L = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N^2 S}{l}$

**Activité 3 :** Force électromotrice et différences de potentiel (tensions)

Réalisons le montage ci-dessous dans lequel l'intensité du courant passe de 0 à la valeur  $i$  à l'installation du courant.

Le circuit comprend une résistance  $R$  ; un générateur de tension  $E$  ; et une bobine d'inductance  $L$  et de résistance  $r$ .

**Consigne :**

- Ecris l'expression de la f.é.m induite d'auto-induction à travers la bobine et la tension aux bornes de la bobine.
- Ecris l'expression de la tension aux bornes du générateur puis en déduis celle de l'intensité du courant.

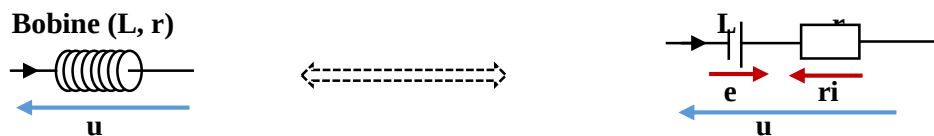
**Synthèse 3 :****III. Force électromotrice et différences de potentiel :****1. La force électromotrice d'auto-induction :**

A l'installation du courant dans la bobine, le flux propre à travers la bobine varie, il apparaît alors une force électromotrice d'auto-induction :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \text{ et } \Phi = Li \Rightarrow e = -\frac{d(Li)}{dt} \Rightarrow e = -L \frac{di}{dt}$$

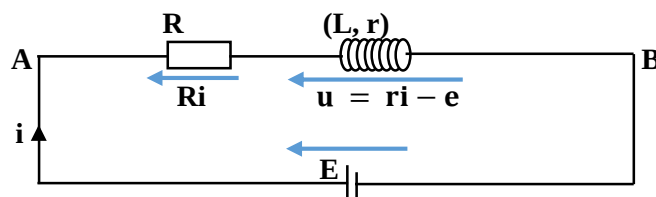
**2. La tension aux bornes de la bobine :**

Une bobine est l'ensemble d'une résistance et d'un générateur de force électromotrice  $e$  en série :



La tension aux bornes de la bobine est :  $u = ri - e$  et  $e = L \frac{di}{dt} \Rightarrow u = ri + L \frac{di}{dt}$

- Si la résistance interne de la bobine est négligeable alors  $u = L \frac{di}{dt}$
- Si l'intensité du courant est constante (en courant continu) alors  $u = ri$  (car  $L$  ne fonction pas en courant continu).

**3. La tension aux bornes du générateur :**

Soit  $R_T = R + r$  la résistance totale du circuit y compris la bobine.

D'après la loi d'unicité de la tension entre A et B, aux bornes du générateur on a :  $E = U_{AB}$  et  $U_{AB} = Ri + u \Rightarrow$

$$E = Ri + u \text{ et } u = ri + L \frac{di}{dt} \Rightarrow E = Ri + ri + L \frac{di}{dt} = i(R + r) + L \frac{di}{dt} \Rightarrow E = R_T i + L \frac{di}{dt} \text{ une équation différentielle}$$

**4. L'intensité du courant :** à l'installation du courant dans le circuit

Soit l'équation différentielle :  $E = R_T i + L \frac{di}{dt}$

La solution de cette équation différentielle est :

$$i = \frac{E}{R_T} (1 - e^{-\frac{R_T t}{L}}) \text{ une fonction du temps } t \text{ où la constante de temps est : } \tau = \frac{L}{R_T} \Rightarrow i = \frac{E}{R_T} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

**A savoir :** à l'annulation du courant dans le circuit

A l'annulation, le courant dans le circuit diminue progressivement dont l'intensité est :  $i = \frac{E}{R_T} e^{\frac{-R_T t}{L}}$

A  $t = 0s \Rightarrow i = \frac{E}{R_T}$  la valeur maximale de l'intensité du courant à l'annulation ainsi qu'à la fermeture du circuit.

**Activité 4 :** L'énergie emmagasinée par la bobine

**Consigne :** Trouve l'expression de l'énergie magnétique emmagasinée dans une bobine d'inductance  $L$  et de résistance interne  $r$ , à partir de la puissance électrique échangée par la bobine traversée par un courant d'intensité  $i$ .

**Synthèse 4 :**

**IV. L'énergie emmagasinée par la bobine :**

La puissance électrique échangée par une bobine avec le reste du circuit est :  $P = Ui = \left( Ri + L \frac{di}{dt} \right) i \Rightarrow P = Ri^2 + Li \frac{di}{dt}$

Avec  $P_j = Ri^2$  la puissance par effet joule et  $P_m = Li \frac{di}{dt}$  la puissance magnétique alors l'énergie magnétique est telle

que :  $P_m = \frac{dE_m}{dt} \Rightarrow dE_m = P_m dt \Rightarrow E_m = \int P_m dt \Rightarrow E_m = L \int i \frac{di}{dt} dt \Rightarrow E_m = L \int i di = \frac{1}{2} Li^2$  ;

Alors l'énergie magnétique emmagasinée par une bobine est :  $E_m = \frac{1}{2} Li^2$

## Séquence 11

### Unité d'Apprentissage 5 : Vibrations

#### Concept 1 : Nature Vibratoire du Son

#### Pré-évaluation :

Définis la célérité de la lumière et donne sa valeur.

#### Situation d'apprentissage :

Dans ce concept, nous rappelons quelques caractéristiques des mouvements vibratoires (onde, milieu de propagation, diffraction, réfraction, célérité, longueur d'onde) étudiées en classe précédente, afin de caractériser le Son et de pouvoir déterminer la vitesse de propagation du Son dans les gaz. Quelle est la nature du Son ?

#### Activité 1 : Définitions

A partir de tes connaissances

**Consigne** : définis : onde, milieu de propagation, diffraction, réfraction, célérité, longueur d'onde.

#### Synthèse 1 :

##### I. Définitions :

##### 1. Mouvement vibratoire :

Un mouvement périodique est un mouvement qui se répète identique à lui-même, à des intervalles de temps successifs de même durée appelée périodique.

Un mouvement vibratoire est un mouvement oscillatoire périodique de faible amplitude, d'équation :

$$x = x_m \sin(\omega t + \varphi) \text{ ou } x = x_m \sin(2\pi Nt + \varphi) \text{ ou } x = x_m \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi\right) \text{ où :}$$

- $T$  est la période, le temps par lequel le mouvement périodique se reproduit de façon identique ;
- $\omega = 2\pi N = \frac{2\pi}{T}$  est la pulsation, elle est aussi la vitesse angulaire du mouvement ;
- $N = \frac{1}{T}$  est la fréquence, le nombre de période effectuée en seconde (en Hertz ou Hz) ;
- $\varphi$  est la phase initiale (en rd) ;
- $x$  est l'élongation, la position du mobile en un instant, elle a pour valeur maximale  $x_m$  appelée l'amplitude du mouvement (en m).

##### 2. Onde progressive :

On appelle onde l'ensemble des perturbations imposées à un milieu matériel par la propagation d'un signal périodique. La longueur d'onde notée  $\lambda$  est la distance parcourue par un mouvement vibratoire pendant une période.

#### Exemples :

##### ▪ Onde transversale :

Une onde est transversale si les déformations du milieu sont perpendiculaires à la direction de propagation.

##### ▪ Onde longitudinale :

Une onde est longitudinale si les déformations sont parallèles à la direction de propagation.

##### 3. Milieu de propagation :

Un milieu de propagation est un milieu élastique capable de transmettre un signal. Il est solide, liquide ou gazeux.

##### 4. Diffraction :

La diffraction est le comportement d'une onde lorsqu'elle rencontre un obstacle ou un orifice dont la dimension est du même ordre de grandeur que leur longueur d'onde. Elle s'observe avec la lumière, le son, ...

Elle se manifeste par le fait qu'après la rencontre, d'un objet, la densité de l'onde n'est pas conservée contrairement aux lois de l'optique géométrique.

##### 5. Réfraction :

La réfraction est le changement de direction subit par une onde à la traversée de la surface de séparation de deux milieux différents.

##### 6. Célérité :

La célérité  $C$  ou vitesse de la lumière est la distance parcourue par unité de temps.

Elle ne dépend pas de l'amplitude de la déformation, est caractéristique du milieu. Dans un milieu homogène et isotrope, la célérité d'un signal est constante.

### Exemples :

La célérité du son dans l'air à 15°C est  $v = 340 \text{ m/s}$

### 7. Longueur d'onde :

La longueur d'onde notée  $\lambda$  (lambda) est la distance parcourue par un mouvement vibratoire pendant une période :

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f}$$

### Activité 2 : Nature vibratoire du Son

Faisons vibrer un diapason en frappant légèrement l'une de ses branches : nous percevons un son. Si nous immobilisons les branches du diapason en les touchant du doigt, la sensation sonore cesse immédiatement, preuve que la vibration du diapason est la cause du son perçu.

#### Consigne :

- Comment peut-on produire le Son ?
- Définis le Son.
- Donne quelques propriétés du Son.
- Donne l'expression de la vitesse du Son dans l'air en fonction de la température.

### Synthèse 2 :

#### II. Nature vibratoire du Son :

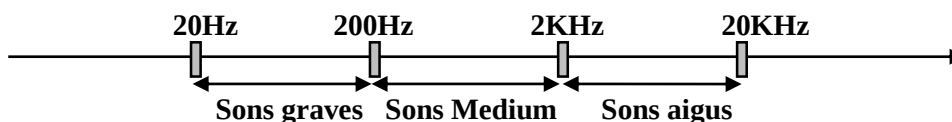
##### 1. Production :

Le son est produit par un mouvement vibratoire.

Un générateur de son, ou source sonore est :

- **Un solide**, tel qu'une corde tendue, une plaque métallique, une cloche, une membrane de haut-parleur ou d'écouteur téléphonique.
- **Une masse d'air**, soufflée sur le biseau d'un soufflet ou à travers les orifices d'une sirène.

#### A savoir : Domaine de l'audibilité du Son



##### 2. Définition du son :

Le son est une impression subjective produit sur le sens de l'ouïe par des vibrations de pression, due à un mouvement vibratoire de fréquence et d'amplitude comprises entre certaines limites, et transmises à l'oreille par une suite de milieux élastiques.

##### 3. Propriétés du son :

- Le son est une onde longitudinale.
- Le son ne se propage pas dans le vide.
- Le son transporte l'énergie de l'émetteur (haut-parleur, cordes vocales,...) vers le récepteur (oreille, microphone).

##### 4. Célérité du son dans un gaz :

###### a. Formule de Laplace :

La célérité du son dans un gaz est donnée par la relation dite formule de Laplace :  $v = \sqrt{\gamma \left( \frac{p}{\rho} \right)}$ .

Le rapport  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$  est le même pour les gaz de même atomicité (molécules possédant le même nombre d'atomes).

$p$  est la pression du gaz,  $\rho$  sa masse volumique ;  $C_p$  et  $C_v$  sont respectivement les chaleurs massiques du gaz pour un échauffement à pression constante et pour un échauffement à volume constant.

- Pour les gaz monoatomiques (Argon, Néon) :  $\gamma = 1,67$
- Pour les gaz diatomiques ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2$ , l'air) :  $\gamma = 1,4$
- Pour les gaz triatomique ( $CO_2$ ,  $H_2O$ ) :  $\gamma = 1,33$

Avec  $\rho = a_0 \cdot d \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T}$ , la célérité est :  $v = \sqrt{\gamma \frac{P_0}{a_0 d} \cdot \frac{T}{T_0}}$

$P_0 = 10,13 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$  est la pression atmosphérique normale.

$a_0 \approx 1,293 \text{ Kg/m}^3$  est la masse volumique de l'air dans les conditions normales.

$T_0 = 273\text{K}$

$T = (t^\circ\text{C} + 273) \text{ K}$  est la température absolue du gaz.

$d = \frac{M}{29}$  est la densité du gaz par rapport à l'air dans les conditions normale de température et de pression.  
M est la masse molaire du gaz.

### b. Facteur de la célérité du son :

La célérité du son est indépendante de la pression du gaz. Elle ne dépend ni de la fréquence, ni de l'amplitude, ni de la forme des ondes sonores.

La célérité du son dépend de l'atomicité du gaz, de sa température et de sa densité par rapport à l'air.

### c. Conséquences :

#### ▪ Influence de la température :

Pour un même gaz, pris aux températures **T** et **T'**, la célérité est proportionnelle à la racine carrée de la température

absolue du gaz :  $\frac{v'}{v} = \sqrt{\frac{T'}{T}}$

En effet si nous désignons par  $V_0$  la célérité du son dans le gaz à  $0^\circ\text{C}$  ( $273^\circ\text{K}$ ) :  $\frac{v}{v_0} = \sqrt{\frac{T'}{T_0}} \Rightarrow v = v_0 \sqrt{\frac{T'}{273}}$

### Exemple :

Calculer la célérité du son dans l'air à  $10^\circ\text{C}$ . On donne  $V_0 = 331\text{m/s}$  et  $T = 15 + 273 = 288^\circ\text{K}$  :

$$V = 331 \times \sqrt{\frac{288}{273}} = \mathbf{340 \text{ m/s}}$$

#### ▪ Influence de la densité :

Pour des gaz différents de même atomicité, pris à la même température, la célérité du son est inversement

proportionnelle à la racine carrée de la densité :  $\frac{v'}{v} = \sqrt{\frac{d}{d'}}$

Pour des gaz différents d'atomicité différente, pris à la même température, la célérité du son est inversement

proportionnelle à la racine carrée de la densité :  $\frac{v'}{v} = \sqrt{\frac{\gamma' \cdot d}{\gamma \cdot d'}}$

## Séquence 12

### Unité d'Apprentissage 5 : Vibrations

#### Concept 2 : Interférences

Le phénomène d'interférence est caractérisé par la superposition de deux ou plusieurs ondes cohérentes de même fréquence. Il se rencontre dans de très nombreux domaines : ondes sonores, ondes radio, ondes à la surface de l'eau, ondes lumineuses. Lorsque plusieurs vibrations se superposent en un même point, leurs amplitudes s'ajoutent : on dit qu'il y a interférence. Pour observer les interférences il faut la présence de deux (2) sources synchrones et cohérentes. Deux sources sont dites cohérentes si leur déphasage reste constant. Et elles sont synchrones si elles ont la même période.

#### Sous Concept 1 : Interférences Mécaniques

##### Pré-évaluation :

A partir de vos connaissances, définis : Le mouvement rectiligne sinusoïdal suivant un axe, dans une base cartésienne.

##### Rappels :

Le mouvement rectiligne sinusoïdal suivant un axe, est défini dans la base cartésienne par :

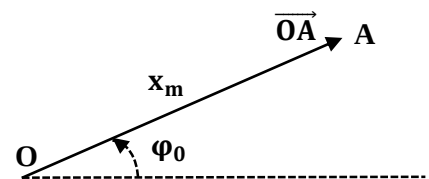
$$\begin{cases} x(t) = x = x_m \cos(\omega t + \varphi_0) \\ \dot{x} = v = \frac{dx}{dt} = -\omega x_m \sin(\omega t + \varphi_0) \\ \ddot{x} = a = -\omega^2 x_m \cos(\omega t + \varphi_0) \Rightarrow a = -\omega^2 x \end{cases}$$

- $\varphi = \omega t + \varphi_0$  est la phase à l'instant  $t$  (en rd),
- $x$  est appelée élongation (en m),
- $x_m$  est l'amplitude ou la valeur maximale de  $x$  (en m),
- $\omega$  est la pulsation (en rd/s).
- $\varphi_0$  est la phase initiale (en rd), elle est déterminée par les conditions initiales :
- Si à  $t = 0$ , le mobile est à la position d'équilibre (ou au repos) alors  $x = x_0 = x_m \cos \varphi_0 = 0 \Rightarrow \cos \varphi_0 = 0 \Rightarrow \varphi_0 = \pm \frac{\pi}{2}$  et partant dans le sens positif alors  $v = \frac{dx}{dt} = -\omega x_m \sin \varphi_0 > 0 \Rightarrow \sin \varphi_0 < 0 \Rightarrow \varphi_0 = -\frac{\pi}{2}$
- Si à  $t = 0$ , le mobile est à la position d'équilibre (ou au repos) alors  $x = x_0 = x_m \cos \varphi_0 = 0 \Rightarrow \cos \varphi_0 = 0 \Rightarrow \varphi_0 = \pm \frac{\pi}{2}$  et partant dans le sens négatif alors  $v = \frac{dx}{dt} = -\omega x_m \sin \varphi_0 < 0 \Rightarrow \sin \varphi_0 > 0 \Rightarrow \varphi_0 = \frac{\pi}{2}$
- Si à  $t = 0$ , l'élongation  $x$  est maximale alors  $x = x_0 = x_m \cos \varphi_0 = x_m \Rightarrow \cos \varphi_0 = 1 \Rightarrow \varphi_0 = 0$
- Si à  $t = 0$ , l'élongation  $x$  est minimale alors  $x = x_0 = x_m \cos \varphi_0 = -x_m \Rightarrow \cos \varphi_0 = -1 \Rightarrow \varphi_0 = \pi$

##### A Savoir :

D'après la représentation de Fresnel, on associe à chaque fonction sinusoïdale  $x = x_m \cos(\omega t + \varphi_0)$  un vecteur tournant ( $\vec{OA}$ ) défini par son module (amplitude  $X_m$ ) et son argument (phase initiale

$$\varphi_0) : \vec{OA} = \begin{cases} \|\vec{OA}\| = x_m \\ (\vec{Ox}, \vec{OA}) = \varphi_0 \end{cases}$$



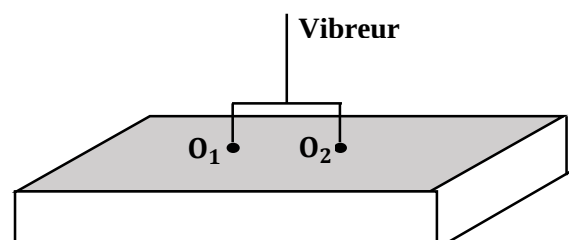
##### Situation d'apprentissage :

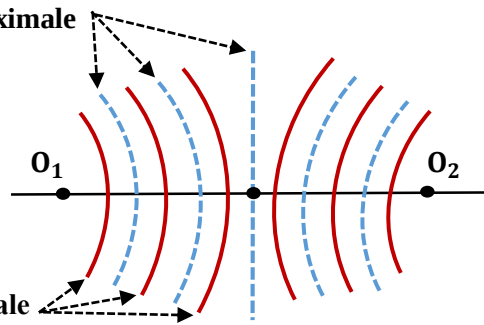
Quand nous jetons un caillou dans une mare sur laquelle est posée une feuille, en toute rigueur, la feuille reste immobile dans la direction de la propagation des rides (mais elle bouge de haut en bas, suite au passage de l'onde). Quel est le mouvement résultant de la superposition de deux rides en un point de la surface libre de l'eau au repos ?

##### Activité : Interférences mécaniques

Réalisons l'expérience suivante : Une fourche munie de deux (2) pointes est fixée à l'extrémité d'un vibreur. Les points  $O_1$  et  $O_2$  ont ainsi même fréquence (synchrones) et constituent deux (2) sources cohérentes c'est-à-dire même période. Elles font naître à la surface de l'eau des ondes circulaires.

**Consigne :** Qu'observes-tu ? Interprète.



**Synthèse** : Interférences mécaniques**I. Mise en évidence :****Franges d'amplitude maximale****Franges d'amplitude minimale**

On observe à la surface libre du liquide des rides fixes, bien nette entre  $O_1$  et  $O_2$  dont la forme est hyperbolique issues de deux sources cohérentes de vibration. On les appelle des lignes (ou franges) d'interférences.

**II. Interprétation :**

Supposons que les deux (2) points frappent l'eau exactement au même instant :  $O_1$  et  $O_2$  constituent alors deux sources synchrones de longueur d'onde  $\lambda = CT$ . Si elles pénètrent à la même profondeur dans l'eau, elles constituent des sources synchrones de même amplitude. Donc il y a superposition de deux petits mouvements.

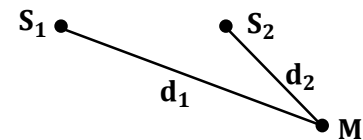
**1. Equation du mouvement résultant :**

Soit M un point de la surface de l'eau situé à la distance  $d_1$  de  $O_1$  et à la distance  $d_2$  de  $O_2$ .

Avec un choix convenable, l'instant initial  $t = 0$ , l'élongation des deux (2) sources  $O_1$  et  $O_2$  a pour expression

$$y_{O_1} = y_{O_2} = y_0 = a \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = a \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right)$$

Pour  $\varphi_0 = 0 \Rightarrow y_0 = a \cos \omega_0 t$  ou  $y_0 = a \cos \frac{2\pi}{T}t$



Si ces distances sont petites on pourra négliger l'amortissement des ondes.

L'onde venant de  $O_1$  impose au point M avec un retard de temps  $\tau$ , un mouvement d'élongation  $y_1 = a \cos \frac{2\pi}{T}(t - \tau)$

$$\Rightarrow y_1 = a \cos\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{T}\tau\right) \text{ (d'où la double périodicité du mouvement) avec } \tau = \frac{d_1}{C} \text{ et } C = \frac{\lambda}{T} \Rightarrow \tau = \frac{Td_1}{\lambda}$$

$$\Rightarrow y_1 = a \cos\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{T} \times \frac{Td_1}{\lambda}\right) \Rightarrow y_1 = a \cos\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi d_1}{\lambda}\right) \text{ si elle existait seule et celle de } O_2 \text{ au point M aussi}$$

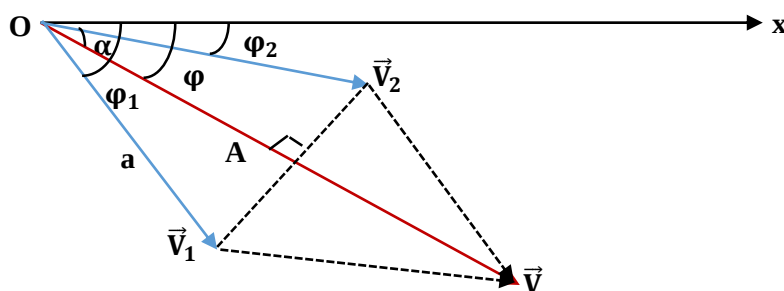
$$y_2 = a \cos\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi d_2}{\lambda}\right) \text{ si elle existait seule. Lorsque les deux vibrent simultanément, l'élongation est } y = y_1 + y_2$$

**2. Construction de Fresnel :**

D'après Fresnel :  $y_1 = a \cos(2\pi \frac{t}{T} + \varphi_1)$  à cette vibration on associe un vecteur tournant :  $\vec{V}_1 \begin{cases} a \\ \varphi_1 = -2\pi \frac{d_1}{\lambda} \end{cases}$

Et  $y_2 = a \cos(2\pi \frac{t}{T} + \varphi_2)$  à cette vibration on associe un vecteur tournant :  $\vec{V}_2 \begin{cases} a \\ \varphi_2 = -2\pi \frac{d_2}{\lambda} \end{cases}$

La vibration résultante est alors :  $y = A \cos 2\pi(\frac{t}{T} + \varphi)$  dont le vecteur tournant est :  $\vec{V} \begin{cases} A \\ \varphi \end{cases} = \vec{V}_1 + \vec{V}_2$



Dans le triangle rectangle contenant  $\alpha$ , on a :  $\cos \alpha = \frac{\frac{A}{2}}{a} \Rightarrow \frac{A}{2} = a \cos \alpha \Rightarrow A = 2a \cos \alpha$  et  $\alpha = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}$

$$\Rightarrow A = 2a \cos \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \quad \text{et} \quad \varphi_1 - \varphi_2 = -2\pi \frac{d_1}{\lambda} - \left(-2\pi \frac{d_2}{\lambda}\right) \Rightarrow \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda}(d_2 - d_1) \Rightarrow \alpha = \frac{\pi}{\lambda}(d_2 - d_1)$$

Alors :  $A = 2a \cos \frac{\pi}{\lambda}(d_2 - d_1)$  ou  $A = 2a \cos \pi \frac{d_2 - d_1}{\lambda}$  est l'amplitude de la vibration résultante y.

$$\text{Et } \varphi = \varphi_2 + \alpha \Rightarrow \varphi = \varphi_2 + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \Rightarrow \varphi = \frac{2\varphi_2 + \varphi_1 - \varphi_2}{2} \Rightarrow \varphi = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \Rightarrow \varphi = \frac{-2\pi \frac{d_1}{\lambda} - 2\pi \frac{d_2}{\lambda}}{2}$$

Alors :  $\varphi = -\pi \frac{d_1 + d_2}{\lambda}$  est la phase de la vibration résultante y.

$$\text{Donc : } y = A \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} + \varphi\right) \text{ s'écrit } y = 2a \cos \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \cos \left(2\pi \frac{t}{T} + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right) = 2a \cos \pi \frac{d_2 - d_1}{\lambda} \cos \left(2\pi \frac{t}{T} - \pi \frac{d_2 + d_1}{\lambda}\right)$$

### A savoir :

L'amplitude (A) de la vibration résultante est en fonction de la différence de marche ( $d_2 - d_1$ ) des distances du point considéré aux deux (2) sources.

Le déphasage  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = -\frac{2\pi}{\lambda}(d_2 - d_1)$  est aussi en fonction de la différence de marche  $d_2 - d_1$ .

- ▣ Si  $d_2 - d_1 = 0 \Rightarrow \Delta\varphi = 0$  alors  $y_1$  et  $y_2$  sont en phase ;
- ▣ Si  $d_2 - d_1 < 0 \Rightarrow \Delta\varphi > 0$  alors  $y_2$  est en avance sur  $y_1$  ou  $y_1$  est en retard sur  $y_2$  ;
- ▣ Si  $d_2 - d_1 > 0 \Rightarrow \Delta\varphi < 0$  alors  $y_1$  est en avance sur  $y_2$  ou  $y_2$  est en retard sur  $y_1$  ;
- ▣ Si  $\Delta\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$  alors  $y_1$  et  $y_2$  sont en quadrature de phase et Si  $\Delta\varphi = \pm \pi$  alors  $y_1$  et  $y_2$  sont en opposition de phase.

### 3. Interférence constructive :

La valeur de l'amplitude (OA) est maximale si et seulement si :

$$\cos \pi \frac{d_2 - d_1}{\lambda} = \pm 1 \Rightarrow \pi \frac{d_2 - d_1}{\lambda} = K\pi \Rightarrow d_2 - d_1 = K\lambda \text{ avec } K \in \mathbb{Z}$$

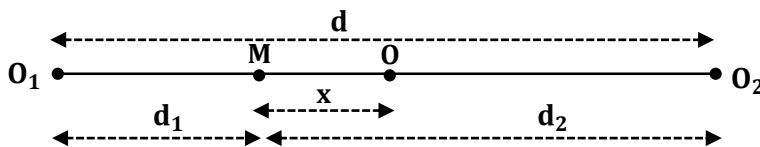
A chaque valeur de K correspond une hyperbole (une frange) :

- Pour  $K = 0$  les points appartiennent à la médiatrice de  $O_1O_2$  (frange centrale).
- Pour  $K \neq 0$  les points appartiennent à une famille d'hyperboles dont les centres sont  $O_1$  et  $O_2$ .

### A savoir :

Ainsi le mouvement résultant est maximal aux points de la surface libre pour lesquels la différence de marche est nulle ou égale à un multiple entier de la longueur d'onde. Les deux (2) mouvements sont donc en phases.

Les points d'intersection des franges (des hyperboles) d'amplitude maximale  $M \begin{cases} d_1 \\ d_2 \end{cases}$  avec le segment  $O_1O_2$  sont tels que :



$$O_1O_2 = d \quad \text{et} \quad d_2 + d_1 = d \Rightarrow \begin{cases} d_2 - d_1 = K\lambda \\ d_2 + d_1 = d \end{cases} \Rightarrow 2d_2 = d + K\lambda \Rightarrow d_2 = \frac{d + K\lambda}{2}$$

- Quel que soit la position d'un point quelconque M sur le segment  $O_1O_2$  :

$$\text{On a : } 0 < d_2 < d \Rightarrow 0 < \frac{d + K\lambda}{2} < d \Rightarrow 0 < d + K\lambda < 2d \Rightarrow -d < K\lambda < d \Rightarrow -\frac{d}{\lambda} < k < \frac{d}{\lambda}$$

- Quel que soit la position x d'un point quelconque M par rapport au milieu O du segment  $O_1O_2$  :

$$\text{On a : } x = d_2 - \frac{d}{2} \quad \text{et} \quad d_2 = \frac{d + K\lambda}{2} \Rightarrow x = \frac{d + K\lambda}{2} - \frac{d}{2} \Rightarrow x = \frac{K\lambda}{2}$$

Alors pour  $k = 0 \Rightarrow x_0 = 0$  ; pour  $k = 1 \Rightarrow x_1 = \frac{\lambda}{2}$  et pour  $k = 2 \Rightarrow x_2 = \lambda$

**4. Interférence destructive :**

L'amplitude de la vibration résultante est nulle et par conséquent le point M ne vibre plus (point immobile) :

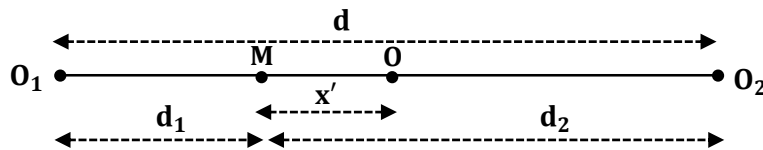
$$\cos \pi \frac{d_2 - d_1}{\lambda} = 0 \Rightarrow \pi \frac{d_2 - d_1}{\lambda} = (2K' + 1) \frac{\pi}{2} \Rightarrow d_2 - d_1 = \frac{(2K' + 1)\lambda}{2} \text{ avec } K \in \mathbb{Z}$$

Les points qui obéissent à cette condition appartiennent à une autre famille d'hyperboles (de franges) de centre  $O_1$  et  $O_2$  qui s'intercalent entre les précédentes. A chaque valeur de  $K'$  correspond une hyperbole (frange).

**A savoir :**

Le mouvement est nul au point de la surface libre pour lesquels la différence de marche est égale à un multiple impair de la demi-longueur d'onde. L'amplitude est donc nulle. Les deux (2) mouvements sont donc en opposition de phases.

Les points d'intersection des franges (des hyperboles) d'amplitude nulle  $M_{\begin{smallmatrix} d_1 \\ d_2 \end{smallmatrix}}$  avec le segment  $O_1 O_2$  sont tels que :



$$O_1 O_2 = d \text{ et } d_2 + d_1 = d \Rightarrow \begin{cases} d_2 - d_1 = \frac{(2K' + 1)\lambda}{2} \\ d_2 + d_1 = d \end{cases} \Rightarrow 2d_2 = d + \frac{(2K' + 1)\lambda}{2} \Rightarrow d_2 = \frac{2d + (2K' + 1)\lambda}{4}$$

- Quel que soit la position d'un point quelconque M sur le segment  $O_1 O_2$  :

$$\text{On a : } 0 < d_2 < d \Rightarrow 0 < \frac{2d + (2K' + 1)\lambda}{4} < d \Rightarrow 0 < 2d + (2K' + 1)\lambda < 4d \Rightarrow -2d < (2K' + 1)\lambda < 2d$$

$$\Rightarrow -\frac{2d}{\lambda} < 2K' + 1 < \frac{2d}{\lambda} \Rightarrow -\frac{2d}{\lambda} - 1 < 2K' < \frac{2d}{\lambda} - 1 \Rightarrow -\frac{d}{\lambda} - \frac{1}{2} < K' < \frac{d}{\lambda} - \frac{1}{2}$$

- Quel que soit la position  $x'$  d'un point quelconque M par rapport au milieu O sur le segment  $O_1 O_2$  :

$$\text{On a : } x' = d_2 - \frac{d}{2} \text{ et } d_2 = \frac{2d + (2K' + 1)\lambda}{4} \Rightarrow x' = \frac{2d + (2K' + 1)\lambda}{4} - \frac{d}{2} \Rightarrow x' = \frac{(2K' + 1)\lambda}{4}$$

$$\text{Alors pour } k' = 0 \Rightarrow x'_0 = \frac{\lambda}{4} ; \text{ pour } k = 1 \Rightarrow x'_1 = \frac{3\lambda}{4} \text{ et pour } k = 2 \Rightarrow x'_2 = \frac{5\lambda}{4}$$

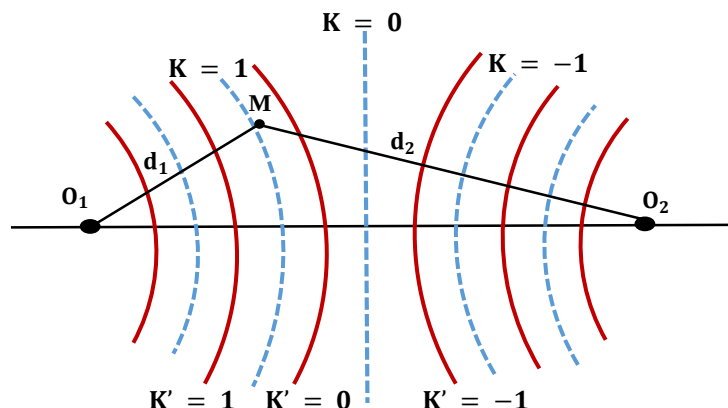
**Remarque :**

L'état de vibration dépend donc de la différence de distances du point M aux deux (2) sources :  $d_2 - d_1 = \delta$  est appelée différence de marche.

Si  $\delta$  est un nombre entier relatif de la longueur d'onde alors on a l'interférence constructive (amplitude est maximale).

Si  $\delta$  est un nombre demi-entier relatif de la longueur d'onde alors on a l'interférence destructive (amplitude est nulle).

Les franges sont comptées positivement vers  $O_1$  et négativement vers  $O_2$ , à partir de la frange centrale constructive.



**A savoir** : Interfrange

- Interfrange est la distance qui sépare deux franges consécutives de même nature (franges d'amplitude maximale ou frange d'amplitude nulle) :  $i = x_2 - x_1 = \lambda - \frac{\lambda}{2} \Rightarrow i = \frac{\lambda}{2}$  ou  $i = x'_2 - x'_1 = \frac{5\lambda}{4} - \frac{3\lambda}{4} \Rightarrow i = \frac{\lambda}{2}$
- La distance entre deux franges consécutives de nature différentes est :  $i' = x'_1 - x_1 = \frac{3\lambda}{4} - \frac{\lambda}{2} \Rightarrow i' = \frac{\lambda}{4} \Rightarrow i = 2i'$

## Séquence 13

### Unité d'Apprentissage 5 : Vibrations

#### Concept 2 : Interférences

#### Sous Concept 2 : Interférences lumineuses

#### Pré-évaluation :

Enonce le théorème de Pythagore et donne son expression dans un triangle ABC rectangle en A.

#### Situation d'apprentissage :

En optique, l'interférence lumineuse est responsable des couleurs observées sur des films de savon, de l'iridescence des ailes de papillons, et des arcs surnuméraires de l'arc-en-ciel observés juste en dessous de l'arc primaire. La superposition de deux ondes lumineuses peut-elle provoquer l'obscurité ?

#### Activité : Expérience des fentes de Young

Eclairons deux fentes fines  $S_1$  et  $S_2$  par une source de lumière monochromatique  $S$  placée sur la médiatrice du segment  $S_1S_2$ . La lumière provenant de  $S$  est diffractée par les fentes  $S_1$  et  $S_2$  appelées source secondaires.

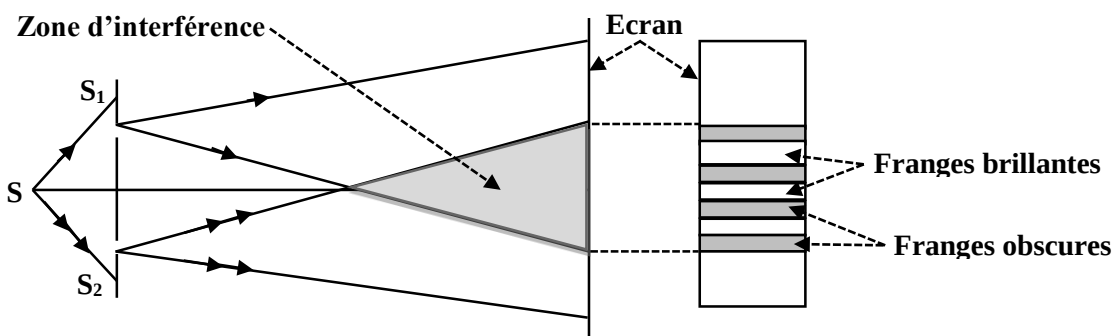
**Consigne** : Qu'observes-tu ? Interprète et fais l'étude théorique (positions des franges).



#### Synthèse : Expérience des fentes de Young

##### I. Observation :

Sur un écran parallèle à  $S_1S_2$ , on aperçoit dans la partie commune (zone d'interférence) aux deux faisceaux diffractés, des bandes rectilignes, parallèles, alternativement brillantes et obscures. Elles sont appelées franges d'interférence non localisées car observables quelle que soit la position de l'écran dans la zone d'interférence.



##### II. Interprétation :

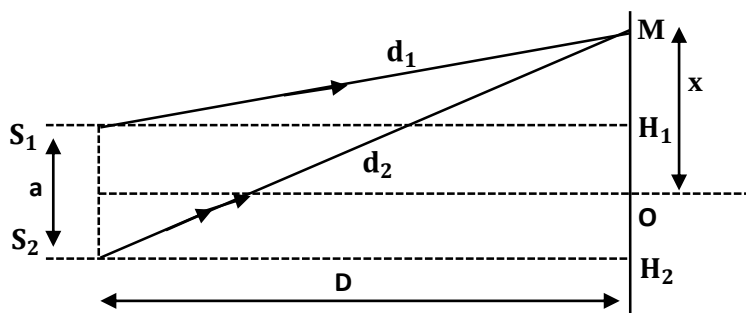
$S_1$  et  $S_2$  constituent deux sources de vibration synchrones et cohérentes (ou même fréquence et même phase initiale). Dans la partie commune, les deux vibrations se superposent : c'est le phénomène d'interférences lumineuses.

Les franges brillantes correspondent aux franges d'amplitude maximale et les franges obscures correspondent aux franges d'amplitude nulle.

##### III. Etude théorique :

###### 1. Différence de marche :

Les deux sources  $S_1$  et  $S_2$  distantes de  $a$  sont situées à la distance  $D$  de l'écran. Soit  $O$  le point de l'écran situé sur la médiatrice de  $S_1S_2$  et  $M$  un point de l'écran situé dans la zone d'interférence à la distance  $x$  de  $O$ .



Posons  $d_1 = S_1M$ ,  $d_2 = S_2M$  et la distance  $\Delta d = d_2 - d_1$  appelée différence de marche.

Application du théorème de Pythagore :

▪ Au triangle  $S_1H_1M$  :  $d_1^2 = D^2 + \left(x - \frac{a}{2}\right)^2 = D^2 + x^2 + \frac{a^2}{4} - ax$

▪ Au triangle  $S_2H_2M$  :  $d_2^2 = D^2 + \left(x + \frac{a}{2}\right)^2 = D^2 + x^2 + \frac{a^2}{4} + ax$

$$d_2^2 - d_1^2 = D^2 + x^2 + \frac{a^2}{4} + ax - \left(D^2 + x^2 + \frac{a^2}{4} - ax\right) = 2ax$$

$$\Rightarrow d_2^2 - d_1^2 = (d_2 - d_1)(d_2 + d_1) = 2ax \Rightarrow d_2 - d_1 = \frac{2ax}{d_2 + d_1}$$

La distance  $S_1S_2 = a$  étant très petit alors  $d_2 + d_1 \approx 2D \Rightarrow d_2 - d_1 = \frac{2ax}{d_2 + d_1} = \frac{2ax}{2D} = \frac{ax}{D}$

La différence de marche est  $\Delta d = d_2 - d_1 = \frac{ax}{D}$

Le rapport  $p = \frac{ax}{\lambda}$  est appelé ordre d'interférence.

## 2. Positions des franges :

### a. Les abscisses des franges brillantes :

Les milieux des franges brillantes sont des points de vibrations composantes en phase et d'amplitudes de vibration résultante maximales, pour lesquels la différence de marche est de la forme :  $\Delta d = K\lambda$  leur abscisse est donc de la forme :  $\Delta d = d_2 - d_1 = \frac{ax}{D} = K\lambda \Rightarrow x = K \frac{\lambda D}{a}$

Pour  $K = 0$ ,  $x_0 = 0$  correspond la frange centrale brillante.

Les autres franges brillantes :  $x_1 = \frac{\lambda D}{a}$  ;  $x_2 = 2 \frac{\lambda D}{a}$  ;  $x_3 = 3 \frac{\lambda D}{a}$  etc. ...

### b. Les abscisses des franges obscures :

Les milieux des franges obscures sont des points de vibrations composantes en opposition de phase et d'amplitude de vibration résultante nulle, pour lesquels la différence de marche est de la forme :  $\Delta d = (2K + 1) \frac{\lambda}{2}$  leur abscisse est tel que :  $\Delta d = d_2 - d_1 = \frac{ax}{D} = (2K + 1) \frac{\lambda}{2} \Rightarrow x = \frac{(2K+1)}{2} \times \frac{\lambda D}{a}$

Les milieux des franges obscures sont situés de part et d'autre de la frange brillante centrale à des distances :

$$x_0 = \frac{1}{2} \times \frac{\lambda D}{a} ; x_1 = \frac{3}{2} \times \frac{\lambda D}{a} ; x_2 = \frac{5}{2} \times \frac{\lambda D}{a} \text{ etc. ...}$$

## 3. Interfranges :

Dans ce cas on voit que les franges de même nature sont équidistantes, l'interfrange a donc pour valeur :  $i = x_1 - x_0 = \frac{\lambda D}{a}$

## 4. Déplacement des franges :

Lorsque nous recouvrons l'une des sources par une lame mince d'indice de réfraction ( $n$ ) et d'épaisseur ( $e$ ). Le système de franges se déplace du côté de la source recouverte. La nouvelle différence de marche a pour expression :

$$\Delta d = d_2 - d_1 = \frac{ax}{D} - e(n - 1)$$

Cas particulier le déplacement de la frange brillante centrale :  $\Delta d = K\lambda$  et  $k = 0 \Rightarrow \Delta d = 0 \Rightarrow \frac{ax}{D} - e(n - 1) = 0$

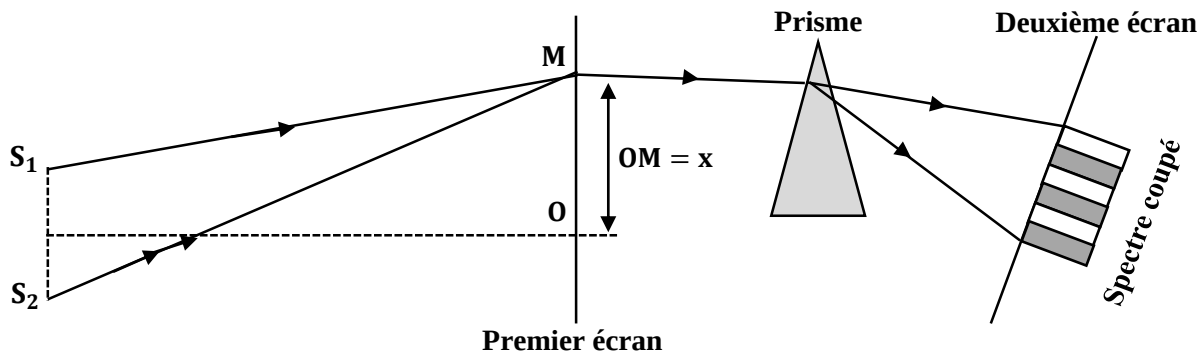
### A savoir : Interférence en lumière blanche (visibles)

Les longueurs d'ondes des radiations visibles (lumière blanche) varient entre  $0,4\mu\text{m}$  à  $0,8\mu\text{m}$  ; (c'est-à-dire du violet extrême au rouge extrême).

Dans l'expérience de Young, lorsqu'on utilise une lumière blanche (lumière polychromatique), chaque radiation monochromatique donne son propre système de franges. On observe ainsi sur l'écran :

- Une frange centrale unique très blanche qui résulte de la superposition de toutes radiations monochromatiques.

- De part et d'autre de la frange centrale, on obtient des franges brillantes irisées.
- Lorsqu'on s'éloigne de la frange centrale, la zone d'interférence prend une teinte d'un blanc impur appelé blanc d'ordre supérieur.



Une ouverture dans l'écran au niveau de la zone du blanc d'ordre supérieur, nous permet d'observer après dispersion par un prisme, sur le deuxième écran, un spectre coupé de bandes noires correspondant à des franges obscures (radiations manquantes) appelées cannelures.

Leurs longueurs d'ondes sont telles que :

$$\frac{ax}{D} = (2K + 1) \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \lambda = \frac{2ax}{D(2K + 1)} \text{ et } 0,4 \cdot 10^{-6} \leq \lambda \leq 0,810^{-6} \Rightarrow 0,4 \cdot 10^{-6} \leq \frac{2ax}{D(2K + 1)} \leq 0,810^{-6}$$

La connaissance de K permet de déterminer le nombre de radiations manquantes dans le blanc d'ordre supérieur. A chacune des valeurs de K, correspondre à une longueur d'onde manquante.

## Séquence 14

### Unité d'Apprentissage 5 : Vibrations

#### Concept 3 : Rayonnement Laser

##### Pré-évaluation :

- Définis l'alumine et donne sa formule moléculaire.
- Définis : rayon lumineux, faisceau lumineux, faisceau lumineux cylindrique et pinceau lumineux.

##### Situation d'apprentissage :

Dans ce vingt-unième siècle, l'utilisation des Rayonnements Lasers est très diverse, selon les puissances et les couleurs utilisées, et se retrouvent dans de nombreux aspects de la vie quotidienne. Comment faire le Laser ?

##### Activités : Rayonnement Laser

A partir de tes connaissances

##### Consigne :

- Donne le principe de l'émission Laser.
- Décrit comment faire un Laser.
- Donne les propriétés du Laser.
- Donne quelques applications du Laser.

##### Synthèse : Rayonnement Laser

#### I. Principe de l'émission Laser :

Le Laser est une source de lumière émise par la matière (solide, liquide ou gaz).

Dans un matériau d'accueil, on met une impureté (ou élément dopant). Les électrons de cette impureté ont plusieurs états d'énergie possibles : ils peuvent être dans l'état le plus bas et le plus stable (état fondamental) ou dans des états plus ou moins excités. On peut leur fournir de l'énergie pour les faire passer du niveau fondamental au niveau excité : où l'émission du rayonnement Laser.

#### II. Pour faire un Laser :

Un exemple simple est celui d'un Laser solide, constitué d'un cristal (matière régulièrement ordonnée) dopé par un élément qui présente des niveaux d'énergie excités aisément accessibles (atome excitable).

C'est le choix de ce dopant qui donnera la couleur du rayonnement Laser.

##### Exemple : le Laser à rubis (pierre précieuse transparente)

Le « matériau pur » est incolore ; c'est un solide composé d'un empilement régulier d'atomes d'aluminium(Al) et d'oxygène (O) de formule ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (appelé alumine ou corindon). Dans ce cristal incolore, l'introduction de faibles quantités (environ un pour cent) de certaines impuretés, provoque une coloration (on appelle cela le dopage) :

- Un peu de nickel (Ni) suffit à lui donner une coloration jaune,
- Un peu de chrome (Cr) suffit à lui donner une coloration rouge,
- Un peu de vanadium (V) suffit à lui donner une coloration verte,
- Un peu de nickel (Ni) et de chrome (Cr) donne une coloration orange,
- Un peu de titane (Ti) et de fer (Fe) donne une coloration bleue,
- Un peu de chrome (Cr), de titane (Ti) et fer (Fe) donne une coloration violette.

#### III. Propriétés du rayonnement Laser :

Le rayonnement Laser est monochromatique : il contient une seule couleur parce que l'on choisit comme dopant un élément qui offre un seul type de niveau excité accessible (en principe). En se désexcitant, les électrons libèrent tous la même énergie, d'où le caractère monochrome.

La lumière Laser est monodirectionnelle : toutes les ondes lumineuses se déplacent dans la même direction. Le rayon Laser est très peu divergent.



Dans un Laser, la source de lumière est concentrée, et l'énergie possède une seule longueur d'onde. On a donc une énergie lumineuse intense concentrée dans un faible volume et d'une seule couleur.

##### A savoir :

Le grain d'énergie (ou photon) que transporte un rayonnement Laser de puissance  $P$  est :  $E = h\nu$  et  $\nu = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow E = \frac{hc}{\lambda}$  (où  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  J.s est la constante de Planck,  $\nu$  est la fréquence et  $\lambda$  est la longueur d'onde du rayonnement).

Et l'énergie totale  $W_t$  transportée par un rayonnement Laser de puissance  $P$  pendant un temps  $t$  est :  $W_t = P \times t$  composée d'un certain nombre  $n$  de photon  $E$  tel que :  $W_t = n \times E$

#### IV. Application du rayonnement Laser :

Les applications technologiques des Lasers sont très diverses, selon les puissances et les couleurs utilisées, et se retrouvent dans de nombreux aspects de la vie quotidienne.

- En médecine :

En ophtalmologie, on utilise un Laser à impulsion pour traiter le décollement de la rétine.

- En industrie (la découpe et l'usinage des pièces industrielles) :

La découpe, le perçage, la soudure, le nettoyage des matériaux sont réalisées avec des Lasers de puissance moyenne.

- En télécommunication (la télécommunication par fibre optique) :

Le faisceau Laser est utilisé comme vecteur de l'information à travers une fibre optique avec un débit important et une atténuation faible.

- En informatique :

Le Laser est utilisé pour : **la lecture sur support disque** et **la lecture des codes-barres** (Qui utilise un rayonnement Laser muni d'un mouvement automatique de balayage à vitesse constante : elle permettra de connaître le prix de l'article analysé).

- En topographie (l'alignement d'objets) :

Qui exploite la directivité du rayonnement Laser ; la finesse du faisceau Laser et sa directivité en font une matérialisation de la ligne droite. Il peut ainsi servir de guide d'alignement par exemple lors du percement des tunnels.

- En télémétrie (la mesure de distance) :

Qui utilise également la faible divergence du faisceau. Il n'y a rien de plus simple : on envoie vers l'objet un rayon Laser qui rebondit dessus et, comme il va en ligne droite, et qu'il ne s'élargit pas, il revient d'où il est parti. Or la lumière se déplace à peu près 300000 km/s, et l'on connaît cette valeur avec une grande précision. On mesure donc le temps que le rayon a mis pour faire l'aller-retour pour calculer la distance à laquelle se trouve l'objet. L'expérience a été effectuée dans le cas de la lune, qui se trouve à peu près de 400000 km de la terre ; il a fallu à peine plus de deux secondes et demi pour que la lumière fasse un aller-retour depuis la terre.

La distance aller-retour parcourue par un rayonnement Laser est :  $2D = Ct$  (où  $D$  est la distance aller simple ou retour simple,  $C = 3.10^8$  m/s est la célérité de la lumière et  $t$  est le temps mis).

#### A savoir :

Les Lasers sont des sources lumineuses très intenses. Les faisceaux Laser sont dangereux pour les yeux.

## Séquence 15

### Unité d'apprentissage 6 : Oscillateurs Libres

Les oscillateurs libres sont des oscillateurs non amortis, c'est-à-dire l'énergie totale du système à étudier est constante dans le temps, alors la variation de cette énergie est nulle, donc un transfert d'énergie par le système d'un milieu à un autre, d'où le phénomène d'oscillations libres.

### Concept 1 : Oscillateurs Mécaniques Libres

#### Sous-concept 1 : Oscillateurs Mécaniques Libres de Translation

#### Pré-évaluation :

Soit une fonction :  $x = x_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$

#### Consigne :

- Dérive cette fonction.
- Transforme cette fonction dérivée en fonction cosinus.

#### Rappels :

- Soit une fonction :  $x = x_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \Rightarrow \dot{x} = \frac{dx}{dt} = -\omega_0 x_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$
- Soit la fonction :  $\dot{x} = -\omega_0 x_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \Rightarrow \dot{x} = \omega_0 x_m \cos\left(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right)$

### Situation d'apprentissage :

Les mouvements de translation pour lesquels l'énergie mécanique se conserve par une transformation mutuelle entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle ; ils sont apparemment permanents et périodiques ; ce sont des oscillations mécaniques libres de translation. Quelle est la nature du mouvement d'un pendule de translation ?

### Activité 1 : Définitions

A partir de tes connaissances

Consigne : définis : un oscillateur, un oscillateur mécanique, un oscillateur amorti.

### Synthèse 1 :

#### I. Définitions :

- Un oscillateur, est un système mécanique, ou électrique, qui est le siège d'un phénomène périodique.
- Un oscillateur mécanique, est un mouvement de va et vient autour d'une position d'équilibre.
- Un oscillateur mécanique libre, est un système qui n'est influencé par aucune force après sa mise en oscillation. Son énergie mécanique reste constante durant tout le mouvement. Un tel oscillateur est dit harmonique.
- Un oscillateur amorti, est un système soumis à des forces de frottements, le système perd de l'énergie mécanique, l'amplitude du mouvement diminue progressivement.

### Activités 2 : Pendule élastique vertical

Un solide de masse (m) est suspendu à l'extrémité libre d'un ressort de masse négligeable et de raideur (K). A partir de sa position d'équilibre, on tire verticalement le solide vers le bas d'une distance  $x_m$  puis on le lâche sans vitesse initiale.

#### Consigne :

- Qu' observes-tu ?
- Définis alors un pendule élastique.
- Ecris la condition d'équilibre.
- Applique la relation fondamentale de la dynamique à l'instant  $t \neq 0$ , puis détermine l'équation différentielle du mouvement, dans le repère d'axe (OX).
- En déduis : la pulsation, la période, la fréquence du mouvement sachant qu'une solution de ladite équation différentielle est de la forme  $x = x_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ .
- Détermine l'énergie mécanique du système.

**Ressort de raideur K**



**Solide de masse m**

### Synthèse 2 :

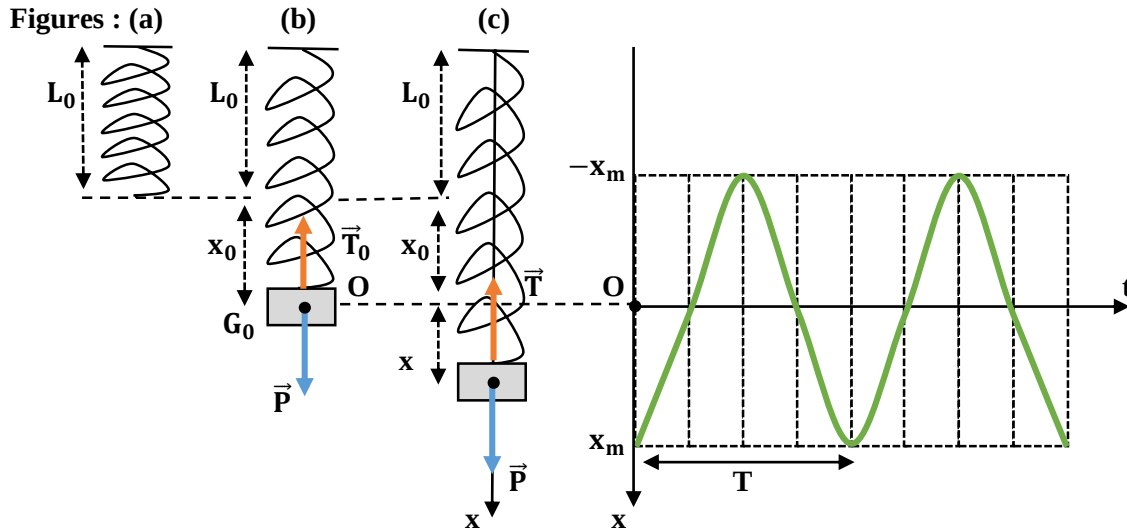
#### II. Pendule élastique vertical : Oscillateur mécanique de translation

##### 1. Définition :

Le pendule élastique, est un système de ressort et de masse capable de se mettre en mouvement d'oscillation.

**2. Equation différentielle :**

Le système est le solide de masse  $m$ , le repère d'axe (OX) est galiléen :

**a. A l'équilibre : figure (b)**

Le solide est soumis au poids  $\vec{P} = m\vec{g}$  et la tension  $\vec{T}_0 = -K\vec{x}_0$ .

La condition d'équilibre est :  $\vec{P} + \vec{T}_0 = \vec{0} \Rightarrow m\vec{g} - K\vec{x}_0 = \vec{0} \Rightarrow m\vec{g} = K\vec{x}_0 \Rightarrow m\vec{g} = K\vec{x}$

**b. En mouvement : figure (c)**

A l'instant  $t \neq 0$ , le solide est soumis au poids  $\vec{P} = m\vec{g}$  et la tension  $\vec{T} = -K(\vec{x}_0 + \vec{x})$ .

D'après la relation fondamentale de la dynamique :  $\vec{P} + \vec{T} = m\vec{a} \Rightarrow m\vec{g} - K(\vec{x}_0 + \vec{x}) = m\vec{a}$   
 $\Rightarrow (m\vec{g} - K\vec{x}_0) - K\vec{x} = m\vec{a} \Rightarrow -K\vec{x} = m\vec{a} \Rightarrow m\vec{a} + K\vec{x} = \vec{0} \Rightarrow ma + Kx = 0$  et  $a = \frac{d^2x}{dt^2} = \ddot{x}$   
 $\Rightarrow m\ddot{x} + Kx = 0 \Rightarrow \ddot{x} + \frac{K}{m}x = 0$  d'où l'équation différentielle du mouvement

**3. Equation horaire :**

L'équation différentielle  $\ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0$ , est une équation linéaire du second degré de  $x$  ; La solution ou l'équation horaire, est de la forme  $x = x_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ ,  $x_m$ ,  $\omega_0$  et  $\varphi_0$  sont des constantes qui dépendent des conditions initiales, et de l'oscillateur.

**4. Pulsation propre :**

On a :  $x = x_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \Rightarrow \dot{x} = V = \frac{dx}{dt} = -\omega_0 x_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \Rightarrow \ddot{x} = a = \frac{dV}{dt} = -\omega_0^2 x_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$   
 $\Rightarrow \ddot{x} = -\omega_0^2 x \Rightarrow \ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$  et  $\ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0$  alors par identification :  $\omega_0^2 = \frac{k}{m} \Rightarrow \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$  la pulsation

Ainsi la période :  $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$  et la fréquence :  $f_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$

**5. Energie mécanique :**

Energie mécanique totale :  $E_m = E_c$  (énergie cinétique) +  $E_p$  (énergie potentielle)

où  $E_c = \frac{1}{2}mV^2$  et  $V = \dot{x} \Rightarrow E_c = \frac{1}{2}m\dot{x}^2$  et  $E_p = \frac{1}{2}kx^2$

$\Rightarrow E_m = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}mx_m^2\omega_0^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{1}{2}kx_m^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)$  et  $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$

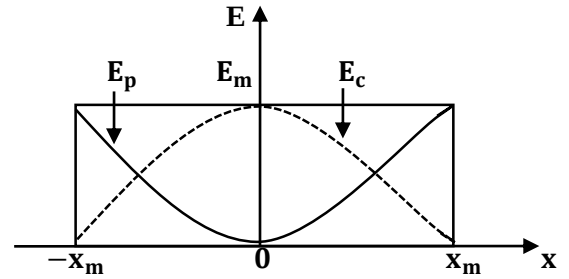
$\Rightarrow \frac{1}{2}kx_m^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{1}{2}kx_m^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0) = \frac{1}{2}kx_m^2 [\sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)]$

$\Rightarrow E_m = \frac{1}{2}kx_m^2$  ou  $E_m = \frac{1}{2}m\omega_0^2 x_m^2$  c'est une constante.

L'énergie mécanique totale se conserve, c'est une transformation mutuelle de l'énergie  $E_c$  et  $E_p$  et vice versa.

La courbe de  $E_m$  est une droite horizontale,  $E_c$  et  $E_p$  sont inversement proportionnelles.

- Pour  $x = 0 \Rightarrow E_p = 0 \Rightarrow E_m = E_{cmax}$ , l'énergie cinétique est maximale alors la vitesse est maximale :  $V = V_m$
- Pour  $x = x_m \Rightarrow E_m = E_{pmax}$ , l'énergie potentielle est maximale alors  $E_c = 0 \Rightarrow V = 0$  la vitesse est nulle



**A savoir :** Détermination de l'équation différentielle à partir de l'énergie mécanique totale :  $\frac{dE_m}{dt} = 0$

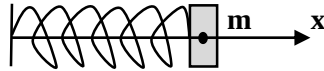
On sait que :  $E_m = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}kx^2$  c'est une constante alors :  $\frac{dE_m}{dt} = m\dot{x}\ddot{x} + kx\dot{x} = 0 \Rightarrow \dot{x}(m\ddot{x} + kx) = 0 \Rightarrow \dot{x} \neq 0$   
 $\Rightarrow m\ddot{x} + kx \Rightarrow \ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0$

### Activité 3 : Pendule élastique horizontal

Un solide de masse ( $m$ ) accroché à l'extrémité d'un ressort horizontal de masse négligeable et de raideur ( $K$ ). Le solide se déplace sans frottement sur le plan horizontal. On écarte ce solide de sa position d'équilibre d'une longueur  $x_m$  puis on le lâche sans vitesse initiale.

#### Consigne :

- Quel est son mouvement ?
- Ecris la condition d'équilibre.
- Applique la relation fondamentale de la dynamique à l'instant  $t \neq 0$ , puis détermine l'équation différentielle du mouvement, dans le repère d'axe (OX).

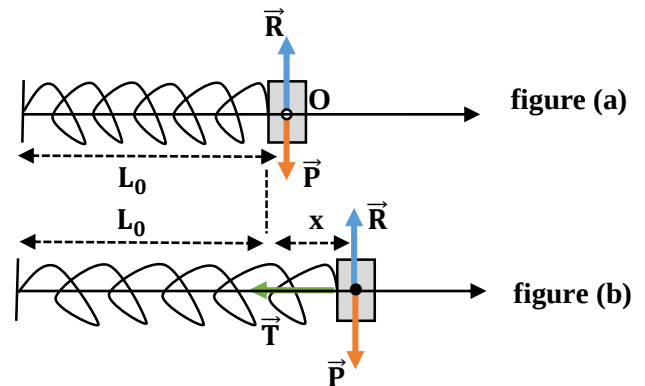


### Synthèse 3 :

#### III. Pendule élastique horizontal : Oscillateur mécanique de translation

Le repère d'axe (OX) est galiléen :

- **A l'équilibre (figure a) :** Le solide est soumis au poids  $\vec{P}$  et la réaction  $\vec{R}$ . La condition d'équilibre est :  $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$
- **En mouvement (figure b) :** à l'instant  $t \neq 0$ , le solide est soumis au poids  $\vec{P}$ , la réaction du plan  $\vec{R}$  et la tension :  $\vec{T} = -K\vec{x}$



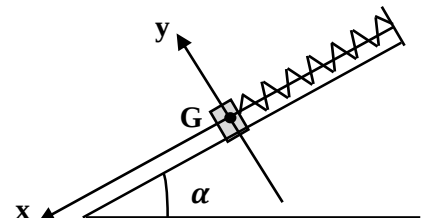
D'après la relation fondamentale de la dynamique :  $(\vec{P} + \vec{R}) + \vec{T} = m\vec{a} \Rightarrow -K\vec{x} = m\vec{a} \Rightarrow m\vec{a} + K\vec{x} = \vec{0}$   
 $\Rightarrow ma + Kx = 0$  et  $a = \ddot{x} \Rightarrow m\ddot{x} + Kx = 0 \Rightarrow \ddot{x} + \frac{K}{m}x = 0$  d'où l'équation différentielle du mouvement.

### Activité 4 : Pendule élastique oblique

Un solide de masse ( $m$ ) peut glisser sans frottement sur un plan incliné d'un angle ( $\alpha$ ) par rapport à l'horizontale. Il est attaché à l'extrémité inférieure d'un ressort de raideur ( $K$ ) à spires non jointives, l'autre extrémité du ressort est fixée à un support. On écarte ce solide de sa position d'équilibre d'une longueur  $x_m$  puis on le lâche sans vitesse initiale.

#### Consigne :

- Qu'observes-tu ?
- Ecris la condition d'équilibre.
- Applique la relation fondamentale de la dynamique à l'instant  $t \neq 0$ , puis détermine l'équation différentielle du mouvement dans le repère (O, X, Y).



**Synthèse 4 :****IV. Pendule élastique oblique :** Oscillateur mécanique de translation

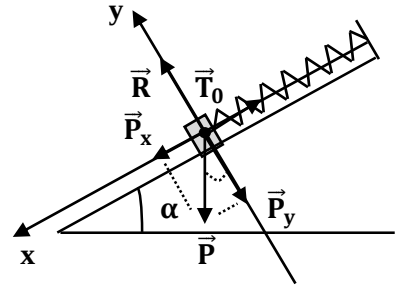
Le repère (O, X, Y) est galiléen :

- A l'équilibre :**

Le solide est soumis au poids :  $\vec{P} \begin{cases} P_x = P \sin \alpha \\ P_y = -P \cos \alpha \end{cases}$  ;

A la réaction du plan :  $\vec{R} \begin{cases} R_x = 0 \\ R_y = R \end{cases}$

Et à la tension du ressort :  $\vec{T}_0 \begin{cases} T_{0x} = -T_0 = -Kx_0 \\ T_{0y} = 0 \end{cases}$



La condition d'équilibre est :  $\vec{P} + \vec{R} + \vec{T}_0 = \vec{0} \Rightarrow \vec{P} \begin{cases} P_x = P \sin \alpha \\ P_y = -P \cos \alpha \end{cases} + \vec{R} \begin{cases} R_x = 0 \\ R_y = R \end{cases} + \vec{T}_0 \begin{cases} T_{0x} = -T_0 = -Kx_0 \\ T_{0y} = 0 \end{cases} = \vec{0} \begin{cases} 0 \\ 0 \end{cases}$

$$\Rightarrow \begin{cases} P \sin \alpha - T_0 = 0 \\ -P \cos \alpha + R = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P \sin \alpha - Kx_0 = 0 \\ R - P \cos \alpha = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P \sin \alpha = Kx_0 \Rightarrow mg \sin \alpha = Kx_0 & \text{par rapport à (OX)} \\ R = P \cos \alpha \Rightarrow R = mg \cos \alpha & \text{par rapport à (OY)} \end{cases}$$

- En mouvement :** à l'instant  $t \neq 0$  :

Le solide est soumis au poids  $\vec{P} \begin{cases} P_x = P \sin \alpha \\ P_y = -P \cos \alpha \end{cases}$  ; à la réaction du plan  $\vec{R} \begin{cases} R_x = 0 \\ R_y = R \end{cases}$

Et à la tension :  $\vec{T} \begin{cases} T_x = -T = -K(x_0 + x) \\ T_y = 0 \end{cases}$

D'après la relation fondamentale de la dynamique :

$$\vec{P} + \vec{R} + \vec{T} = m\vec{a} \Rightarrow \vec{P} \begin{cases} P_x = P \sin \alpha \\ P_y = -P \cos \alpha \end{cases} + \vec{R} \begin{cases} R_x = 0 \\ R_y = R \end{cases} + \vec{T} \begin{cases} T_x = -T = -K(x_0 + x) \\ T_y = 0 \end{cases} = m\vec{a} \begin{cases} a_x = a \\ a_y = 0 \end{cases}$$

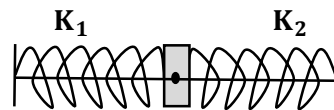
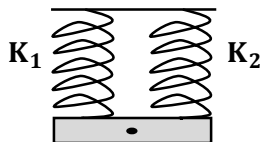
car le mouvement s'effectue uniquement sur l'axe (OX)

$$\text{On a : } \begin{cases} P \sin \alpha - T = ma_x \\ R - P \cos \alpha = 0 \end{cases} \Rightarrow P \sin \alpha - K(x_0 + x) = ma \Rightarrow (P \sin \alpha - Kx_0) - Kx = ma \Rightarrow -Kx = ma$$

$$\Rightarrow ma + Kx = 0 \text{ et } a = \ddot{x} \Rightarrow m\ddot{x} + Kx = 0 \Rightarrow \ddot{x} + \frac{K}{m}x = 0 \text{ d'où l'équation différentielle du mouvement}$$

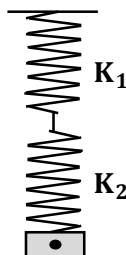
**Remarque :**

- Si les ressorts sont montés en parallèle c'est-à-dire chacun d'entre eux a une extrémité accrochée au solide :



La constante de raideur équivalente du ressort pouvant remplacer l'ensemble de ces deux ressorts est  $K = K_1 + K_2$

- Si les ressorts sont montés en série c'est-à-dire l'un d'entre eux a une extrémité accrochée au solide :



La constante de raideur équivalente du ressort pouvant remplacer l'ensemble de ces deux ressorts est  $\frac{1}{K} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}$

## Séquence 16

### Unité d'apprentissage 6 : Oscillateurs Libres

#### Concept 1 : Oscillateurs Mécaniques Libres

#### Sous-concept 2 : Oscillateurs Mécaniques Libres de Rotation

#### Pré-évaluation :

Définis le moment du couple de torsion et donne son expression.

#### Situation d'apprentissage :

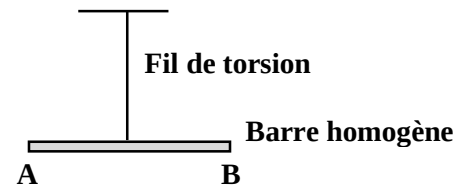
Les mouvements de rotation pour lesquels l'énergie mécanique se conserve par une transformation mutuelle entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle ; ils sont apparemment permanents et périodiques ; ce sont des oscillations mécaniques libres de rotation. Quelle est la nature du mouvement d'un pendule de rotation ?

#### Activité 1 : Pendule de torsion

Une barre homogène, horizontale (AB), est suspendue en son milieu par un fil de constante de torsion (C). La barre écartée d'un angle positif de sa position d'équilibre puis lâchée, sans vitesse initiale.

#### Consigne :

- Qu'observes-tu ?
- Ecris la condition d'équilibre.
- Applique la relation fondamentale de la dynamique  $\sum \mathcal{M}_A = J\ddot{\theta}$  à l'instant  $t \neq 0$ , puis détermine l'équation différentielle du mouvement.
- En déduis : la pulsation, la période, la fréquence du mouvement sachant qu'une solution de ladite équation différentielle est de la forme  $\theta = \theta_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ .
- Détermine l'énergie mécanique du système.



#### Synthèse 1 :

#### I. Pendule de torsion : Oscillateur mécanique de rotation

##### 1. Définition :

Un pendule de torsion est une barre homogène suspendue par un fil de torsion, qui, effectuée des oscillations si l'on écarte de sa position d'équilibre d'un angle et abandonnée sans vitesse initiale.

##### 2. Equation différentielle :

- **A l'équilibre** : le solide est soumis au poids  $\vec{P}$  et à la tension  $\vec{T}$  du fil :  $\vec{P} + \vec{T} = \vec{0}$
- **En mouvement** : à l'instant  $t \neq 0$ , le solide est soumis au poids  $\vec{P}$ , la tension du fil  $\vec{T}$  et la force de rappel  $\vec{R}$  (ou la force du couple de torsion de moment du couple de torsion  $\mathcal{M}_C = \mathcal{M}_{\vec{R}/O} = -C\theta$ )

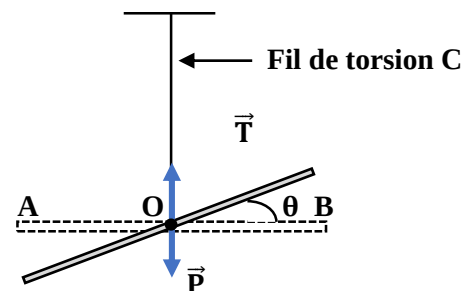
D'après la relation fondamentale de la dynamique (sur le solide en rotation autour d'un axe fixe) :

$\sum \mathcal{M}_O = J\ddot{\theta}$  avec (J) le moment d'inertie du solide par rapport à l'axe de rotation, alors  $\mathcal{M}_{\vec{P}/O} + \mathcal{M}_{\vec{T}/O} + \mathcal{M}_C = J\ddot{\theta}$ .

Le poids  $\vec{P}$  et la tension du fil  $\vec{T}$  rencontrent l'axe de rotation donc :  $\mathcal{M}_{\vec{P}/O} = \mathcal{M}_{\vec{T}/O} = 0 \Rightarrow \mathcal{M}_C = J\ddot{\theta} \Rightarrow -C\theta = J\ddot{\theta} \Rightarrow J\ddot{\theta} + C\theta = 0 \Rightarrow \ddot{\theta} + \frac{C}{J}\theta = 0$  d'où l'équation différentielle du mouvement.

##### 3. Equation horaire :

L'équation différentielle  $\ddot{\theta} + \frac{C}{J}\theta = 0$ , est une équation linéaire du second degré de  $\theta$ . La solution ou l'équation horaire, est de la forme  $\theta = \theta_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ ,  $\theta_m$ ,  $\omega_0$  et  $\varphi_0$  sont des constantes qui dépendent des conditions initiales et de l'oscillateur.



**4. Pulsation propre :**

$$\text{On a : } \theta = \theta_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \Rightarrow \dot{\theta} = \omega = \frac{d\theta}{dt} = -\omega_0 \theta_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \Rightarrow \ddot{\theta} = a = \frac{d\omega}{dt} = -\omega_0^2 \theta_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

$$\Rightarrow \ddot{x} = -\omega_0^2 x \Rightarrow \ddot{\theta} + \omega_0^2 \theta = 0 \quad \text{et} \quad \ddot{\theta} + \frac{C}{J} \theta = 0 \quad \text{alors par identification : } \omega_0^2 = \frac{C}{J} \Rightarrow \omega_0 = \sqrt{\frac{C}{J}} \quad \text{la pulsation}$$

$$\text{Ainsi la période : } T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{C}} \quad \text{et la fréquence : } f_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{J}}$$

**5. Énergie mécanique :**

$$\text{Énergie mécanique totale : } E_m = E_c (\text{énergie cinétique}) + E_p (\text{énergie potentielle}) \quad \text{où} \quad E_c = \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 \quad \text{et} \quad E_p = \frac{1}{2} C \theta^2$$

$$\text{Alors : } E_m = \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} C \theta^2 = \frac{1}{2} J \omega_m^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{1}{2} C \theta_m^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0) \quad \text{et} \quad \omega_0^2 = \frac{C}{J}$$

$$\Rightarrow E_m = \frac{1}{2} C \theta_m^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{1}{2} C \theta_m^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0) = \frac{1}{2} C \theta_m^2 [\sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)]$$

$$\Rightarrow E_m = \frac{1}{2} C \theta_m^2 \quad \text{où} \quad E_m = \frac{1}{2} J \omega_0^2 \theta_m^2 \quad \text{c'est une constante.}$$

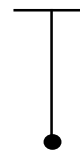
L'énergie mécanique, totale est une transformation mutuelle de l'énergie  $E_c$  et  $E_p$  et vice versa.

**A savoir :** Analogie entre le pendule élastique et le pendule de torsion

| Grandeur           | Equation différentielle                  | Solution de l'équation différentielle            | Constante |   | Pulsation                       | Énergie Mécanique                |
|--------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------|---|---------------------------------|----------------------------------|
| Pendule Élastique  | $\ddot{x} + \frac{K}{m} x = 0$           | $x = x_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$           | m         | K | $\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}}$ | $E_m = \frac{1}{2} K x_m^2$      |
| Pendule de Torsion | $\ddot{\theta} + \frac{C}{J} \theta = 0$ | $\theta = \theta_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ | J         | C | $\omega_0 = \sqrt{\frac{C}{J}}$ | $E_m = \frac{1}{2} C \theta_m^2$ |

**Activité 2 : Pendule simple**

Un point matériel (M) de masse m, est suspendu par un fil de longueur (L) disposé verticalement à l'aide d'un support. On écarte ce point matériel (M) de sa position d'équilibre d'un angle  $\theta_m > 0$  puis on le lâche sans vitesse initiale.



Point matériel (M) de masse (m)

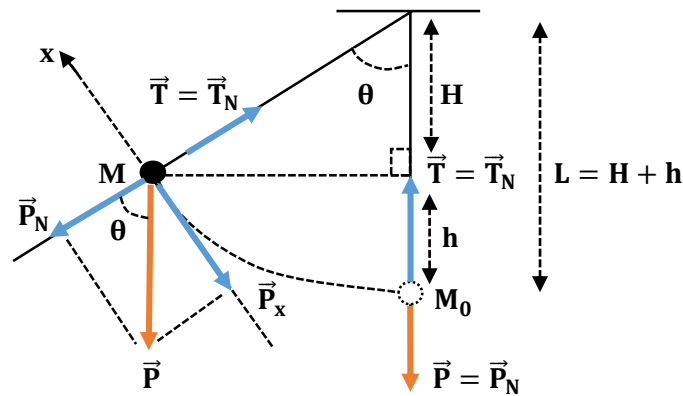
**Consigne :**

- Qu'observes-tu ?
- Définis un pendule simple.
- Donne la condition d'équilibre.
- Applique la relation fondamentale de la dynamique  $\sum \vec{F}_{\text{ext}} = m\vec{a}$  dans la base de Frenet, à l'instant  $t \neq 0$ , puis détermine l'équation différentielle du mouvement.
- En déduis : la pulsation, la période, la fréquence du mouvement sachant qu'une solution de ladite équation différentielle est de la forme  $\theta = \theta_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ .
- Détermine l'énergie mécanique du système.

**Synthèse 2 :****II. Pendule simple :****1. Définition :**

Un pendule simple est un point matériel suspendu par un fil, qui, effectue des oscillations si l'on écarte de sa position d'équilibre d'un angle et abandonné sans vitesse initiale.

**2. Équation différentielle :**



**a. A l'équilibre (à la position  $M_0$ ) :** Dans la base de Frenet

Le solide est soumis au poids  $\vec{P} = \vec{P}_N$  et la tension du fil  $\vec{T} = \vec{T}_N$  (elles sont normale à la trajectoire circulaire)

La condition d'équilibre est :  $\vec{P} + \vec{T} = \vec{0} \Rightarrow \vec{P}_N + \vec{T}_N = \vec{0}$

**b. En mouvement (à la position  $M$ ) :** Dans la base de Frenet

A l'instant  $t \neq 0$ , le solide est soumis au poids  $\vec{P} = \vec{P}_N + \vec{P}_x$  ( $\vec{P}_N$  est la composante normale du poids et  $\vec{P}_x$  sa composante tangentielle) et la tension  $\vec{T} = \vec{T}_N$ .

D'après la relation fondamentale de la dynamique :  $\vec{P} + \vec{T} = m\vec{a} \Rightarrow \vec{P}_N + \vec{P}_x + \vec{T}_N = m\vec{a} \Rightarrow (\vec{P}_N + \vec{T}_N) + \vec{P}_x = m\vec{a} \Rightarrow \vec{P}_x = m\vec{a} \Rightarrow -P_x = ma \Rightarrow ma + P_x = 0$

On a :  $a = \frac{d^2x}{dt^2} = \ddot{x}$  et  $P_x = P \sin \theta \Rightarrow m\ddot{x} + P \sin \theta = 0 \Rightarrow \ddot{x} + \frac{P}{m} \sin \theta = 0$  et  $P = mg \Rightarrow \ddot{x} + g \sin \theta = 0$ .

Pour les oscillations de faible amplitude on a :  $\sin \theta \approx \theta$  et  $x = L\theta \Rightarrow \ddot{x} = L\ddot{\theta} \Rightarrow L\ddot{\theta} + g\theta = 0 \Rightarrow \ddot{\theta} + \frac{g}{L}\theta = 0$  d'où l'équation différentielle.

**3. Equation horaire :**

L'équation différentielle  $\ddot{\theta} + \frac{g}{L}\theta = 0$ , est une équation linéaire du second degré de  $\theta$ . La solution ou l'équation horaire, est de la forme  $\theta = \theta_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ ,  $\theta_m$ ,  $\omega_0$  et  $\varphi_0$  sont des constantes qui dépendent des conditions initiales et de l'oscillateur.

**4. Pulsation propre :**

On a :  $\theta = \theta_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \Rightarrow \dot{\theta} = -\omega_0 \theta_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \Rightarrow \ddot{\theta} = a = \frac{d\dot{\theta}}{dt} = -\omega_0^2 \theta_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$

$\Rightarrow \ddot{x} = -\omega_0^2 x \Rightarrow \ddot{\theta} + \omega_0^2 \theta = 0$  et  $\ddot{\theta} + \frac{g}{L}\theta = 0$  alors, par identification :  $\omega_0^2 = \frac{g}{L} \Rightarrow \omega_0 = \sqrt{\frac{g}{L}}$  la pulsation

Ainsi la période :  $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$  et la fréquence :  $f_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L}}$

**5. Energie mécanique :**

Energie mécanique totale :  $E_m = E_c$  (énergie cinétique) +  $E_p$  (énergie potentielle)

L'énergie cinétique est :  $E_c = \frac{1}{2} mV^2$

L'énergie potentielle est :  $E_p = Ph$  et  $P = mg \Rightarrow E_p = mgh$  avec  $h = L - H$  et  $H = L \cos \theta$

$\Rightarrow h = L - L \cos \theta \Rightarrow h = L(1 - \cos \theta) \Rightarrow E_p = mgL(1 - \cos \theta)$

■ Pour toute position quelconque :  $E_m = E_c + E_p \Rightarrow E_m = \frac{1}{2} mV^2 + mgL(1 - \cos \theta)$

- Pour les oscillations de faible amplitude :

$$\text{On a : } 1 - \cos \theta = \frac{\theta^2}{2} \Rightarrow E_P = mgL\left(\frac{\theta^2}{2}\right) \Rightarrow E_P = \frac{1}{2} mgL\theta^2$$

$$\text{Et l'arc : } x = L\theta \Rightarrow V = \dot{x} = \dot{\theta}L \Rightarrow E_C = \frac{1}{2} mL^2\dot{\theta}^2$$

$$\text{Alors l'énergie mécanique est : } E_m = E_C + E_P = \frac{1}{2} mL^2\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} mgL\theta^2 \Rightarrow E_m = \frac{1}{2} mL(L\dot{\theta}^2 + g\theta^2)$$

$$\text{On a : } \theta = \theta_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \Rightarrow \dot{\theta} = -\omega_0 \theta_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

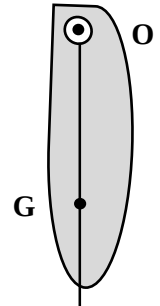
$$E_m = \frac{1}{2} mL [L\omega_0^2 \theta_m^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) + g\theta_m^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)] \text{ et } \omega_0^2 = \frac{g}{L} \Rightarrow$$

$$E_m = \frac{1}{2} mL [g\theta_m^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) + g\theta_m^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)] \Rightarrow E_m = \frac{1}{2} mLg\theta_m^2 [\sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)]$$

$$\text{On sait que : } \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0) = 1 \text{ par conséquent : } E_m = \frac{1}{2} mLg\theta_m^2 \text{ c'est une constante}$$

### Activité 3 : Pendule pesant

Un solide (S) de masse (M), est mobile autour d'un axe fixe passant par (O) situé à la distance (L) de son centre d'inertie (G). On écarte ce solide de sa position d'équilibre d'un angle  $\theta_m > 0$  puis on le lâche sans vitesse initiale.



#### Consigne :

- Qu'observes-tu ?
- Définis un pendule pesant.
- Donne la condition d'équilibre.
- Applique la relation fondamentale de la dynamique  $\sum \mathcal{M}_A = J\ddot{\theta}$  à l'instant  $t \neq 0$ , puis détermine l'équation différentielle du mouvement.
- En déduis : la pulsation, la période, la fréquence du mouvement sachant qu'une solution de ladite équation différentielle est de la forme  $\theta = \theta_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ .
- Détermine l'énergie mécanique du système.

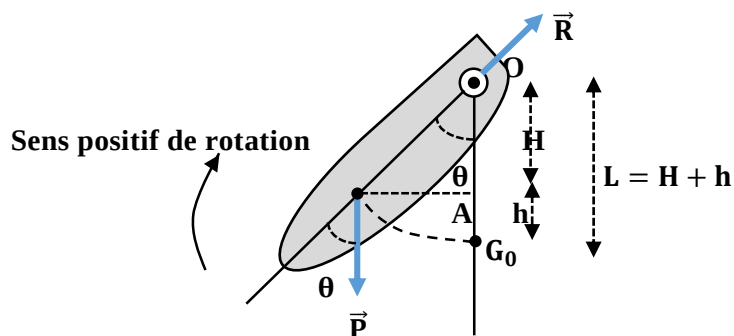
### Synthèse 3 :

#### III. Pendule pesant :

##### 1. Définition :

Un pendule pesant ou pendule composé, est un solide qui oscille autour d'un axe fixe ne passant pas par son centre d'inertie, sous la seule action de la pesanteur.

##### 2. Equation différentielle :



- A l'équilibre :** le solide est soumis au poids  $\vec{P}$  et à la réaction  $\vec{R}$  de l'axe de rotation :  $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$
- En mouvement :** à l'instant  $t \neq 0$ , le solide est soumis au poids  $\vec{P}$  et la réaction de l'axe de rotation  $\vec{R}$ .

D'après la relation fondamentale de la dynamique (sur le solide en rotation autour d'un axe fixe) :  $\sum \mathcal{M}_O = J\ddot{\theta}$  avec  $J$  le moment d'inertie du solide par rapport à l'axe de rotation, alors  $\mathcal{M}_{\vec{P}/O} + \mathcal{M}_{\vec{R}/O} = J\ddot{\theta}$ .

La réaction  $\vec{R}$  rencontre l'axe de rotation donc :  $\mathcal{M}_{\vec{R}/O} = 0 \Rightarrow \mathcal{M}_{\vec{P}/O} = J\ddot{\theta}$  et  $\mathcal{M}_{\vec{P}/O} = -L \cdot P \sin \theta$

$$\Rightarrow -L \cdot P \sin \theta = J\ddot{\theta} \Rightarrow J\ddot{\theta} + L \cdot P \sin \theta = 0 \Rightarrow \ddot{\theta} + \frac{L \cdot P}{J} \sin \theta = 0 \text{ cette équation n'est pas linéaire.}$$

Cependant Pour les oscillations de faible amplitude :  $\sin \theta \approx \theta$  et  $P = Mg$ , alors l'équation devient  $\ddot{\theta} + \frac{LMg}{J} \theta = 0$  d'où l'équation différentielle.

### 3. Equation horaire :

L'équation différentielle  $\ddot{\theta} + \frac{LMg}{J} \theta = 0$ , est une équation linéaire du second degré de  $\theta$ . La solution ou l'équation horaire, est de la forme  $\theta = \theta_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ ,  $\theta_m$ ,  $\omega_0$  et  $\varphi_0$  sont des constantes qui dépendent des conditions initiales et de l'oscillateur.

### 4. Pulsation propre :

$$\text{On a : } \theta = \theta_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \Rightarrow \dot{\theta} = -\omega_0 \theta_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \Rightarrow \ddot{\theta} = a = \frac{d\dot{\theta}}{dt} = -\omega_0^2 \theta_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

$$\Rightarrow \ddot{x} = -\omega_0^2 x \Rightarrow \ddot{\theta} + \omega_0^2 \theta = 0 \text{ et } \ddot{\theta} + \frac{LMg}{J} \theta = 0 \text{ alors, par identification } \omega_0^2 = \frac{LMg}{J} \Rightarrow \omega_0 = \sqrt{\frac{LMg}{J}} \text{ la pulsation}$$

$$\text{Ainsi la période : } T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{LMg}} \text{ et la fréquence : } N_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{LMg}{J}}$$

**A savoir :** l'expression du moment d'inertie

$$\text{Un pendule simple qui a la même période qu'un pendule pesant tel que : } \omega_0^2 = \frac{g}{L} = \frac{LMg}{J} \Rightarrow J = ML^2$$

### 5. Energie mécanique :

Energie mécanique totale :  $E_m = E_c$  (énergie cinétique) +  $E_p$  (énergie potentielle)

$$\text{L'énergie cinétique est : } E_c = \frac{1}{2} MV^2$$

$$\text{L'énergie potentielle est : } E_p = Ph \text{ et } P = Mg \Rightarrow E_p = Mgh \text{ avec } h = L - H \text{ et } H = L \cos \theta \\ \Rightarrow h = L - L \cos \theta \Rightarrow h = L(1 - \cos \theta) \Rightarrow E_p = MgL(1 - \cos \theta)$$

- Pour toute oscillation quelconque :  $E_m = E_c + E_p \Rightarrow E_m = \frac{1}{2} MV^2 + MgL(1 - \cos \theta)$
- Pour les oscillations de faible amplitude on a :  $1 - \cos \theta = \frac{\theta^2}{2} \Rightarrow E_p = MgL(\frac{\theta^2}{2}) \Rightarrow E_p = \frac{1}{2} MgL\theta^2$

$$\text{Et l'arc : } x = L\theta \Rightarrow V = \dot{x} = \dot{\theta}L \Rightarrow E_c = \frac{1}{2} ML^2 \dot{\theta}^2$$

$$\text{Alors l'énergie mécanique est : } E_m = E_c + E_p = \frac{1}{2} ML^2 \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} MgL\theta^2 \Rightarrow E_m = \frac{1}{2} ML(L\dot{\theta}^2 + g\theta^2)$$

$$\text{On a : } \theta = \theta_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \Rightarrow \dot{\theta} = -\omega_0 \theta_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

$$E_m = \frac{1}{2} ML [L\omega_0^2 \theta_m^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) + g\theta_m^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)] \text{ avec } \omega_0^2 = \frac{LMg}{J} \text{ et } J = ML^2 \Rightarrow \omega_0^2 = \frac{LMg}{ML^2} = \frac{g}{L}$$

$$E_m = \frac{1}{2} ML [L \frac{g}{L} \theta_m^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) + g\theta_m^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)] \Rightarrow E_m = \frac{1}{2} MLg\theta_m^2 [\sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)]$$

$$\text{On sait que : } \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0) = 1 \text{ par conséquent : } E_m = \frac{1}{2} MLg\theta_m^2 \text{ c'est une constante}$$

## Séquence 17

### Unité d'apprentissage 6 : Oscillateurs Libres

#### Concept 2 : Oscillateurs Electriques Libres

#### Pré-évaluation :

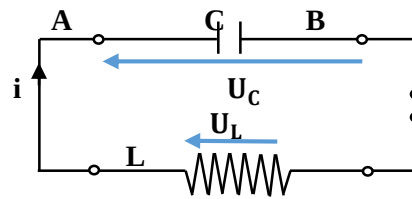
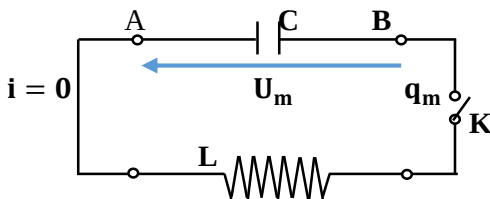
Définis un condensateur et donne l'expression de sa charge en fonction de la tension à ses bornes et de sa capacité.

#### Situation d'apprentissage :

Les circuits pour lesquels l'énergie électrique totale se conserve par une transformation mutuelle entre l'énergie électrostatique et l'énergie magnétique ; ils sont apparemment permanents et périodiques ; ce sont des oscillations électriques libres. Comment l'énergie électrique oscille entre une bobine et un condensateur ?

#### Activités : Oscillateur électrique libre (Circuit L, C)

Un oscillateur électrique est constitué d'un condensateur de capacité (C) initialement chargé et d'une bobine de résistance négligeable et d'inductance (L) en parallèle.



Quand on ferme l'interrupteur, le condensateur chargé se décharge dans la bobine. Un courant de charge  $i$  circule dans la bobine et crée une force électromotrice d'auto-inductance. Quand le condensateur se décharge totalement, un courant induit circule et le charge à nouveau en sens inverse. Le condensateur se décharge à nouveau et ainsi de suite.

#### Consigne :

- En appliquant la loi d'unicité de la tension, détermine l'équation différentielle du circuit.
- En déduis : la pulsation, la période, la fréquence du mouvement sachant qu'une solution de ladite équation différentielle est de la forme  $q = q_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ .
- Détermine l'énergie totale du système.
- Quelle serait l'influence de la résistance de la bobine si elle n'était pas négligeable ?

### Synthèse : Oscillateur Electrique Libre (Circuit L, C) en parallèle

#### I. Equation différentielle :

Le condensateur chargé, se décharge dans une bobine de résistance négligeable et d'induction L.

A chaque instant la tension aux bornes de la bobine est égale à celle aux bornes du condensateur :  $U_C = U_L$

Aux bornes du condensateur on a :  $q = CU_C \Rightarrow U_C = \frac{q}{C}$

Aux bornes de la bobine on a :  $U_L = -\left(ri + L \frac{di}{dt}\right)$  dans le sens du courant,  $r = 0$  (résistance négligeable) alors on aura  $U_L = -L \frac{di}{dt}$

On sait que :  $i = \frac{dq}{dt} = \dot{q} \Rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{d^2q}{dt^2} = \ddot{q} \Rightarrow U_L = -L\ddot{q}$

On a :  $U_C = U_L \Rightarrow \frac{q}{C} = -L\ddot{q} \Rightarrow L\ddot{q} + \frac{q}{C} = 0 \Rightarrow \ddot{q} + \frac{1}{LC}q = 0$  appelée équation différentielle.

A savoir : On sait que :  $q = CU_C = CU$  alors  $\ddot{q} = C\ddot{U}$  alors  $\ddot{q} + \frac{1}{LC}q = 0$  dévient :  $C\ddot{U} + \frac{1}{LC}CU = 0 \Rightarrow \ddot{U} + \frac{1}{LC}U = 0$

#### II. Equation horaire :

L'équation différentielle  $\ddot{q} + \frac{1}{LC}q = 0$ , est une équation linéaire du second degré de  $q$  ; La solution ou l'équation horaire est de la forme  $q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ ,  $q_m$ ,  $\omega_0$  et  $\varphi_0$  sont des constantes qui dépendent des conditions initiales, et de l'oscillateur.

**III. Pulsation propre :**

$$\text{On a : } q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \Rightarrow \dot{q} = -q_m \omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \Rightarrow \ddot{q} = -q_m \omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \Rightarrow \ddot{q} = -\omega_0^2 q$$

$$\Rightarrow \ddot{q} + \omega_0^2 q = 0 \quad \text{et} \quad \ddot{q} + \frac{1}{LC} q = 0 \quad \text{alors par identification : } \omega_0^2 = \frac{1}{LC} \Rightarrow \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \text{ la pulsation}$$

$$\text{Ainsi la période : } T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} \Rightarrow T_0 = 2\pi\sqrt{LC} \text{ la et la fréquence : } f_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

**Remarque :**

$$i = I_m \cos(\omega_0 t + \varphi_i) \text{ on sait que } i = \dot{q} = -q_m \omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \Rightarrow i = q_m \omega_0 \cos\left(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$\text{Alors } I_m = q_m \omega_0 \text{ et } \varphi_i = \varphi_0 + \frac{\pi}{2} \Rightarrow \Delta\varphi = \varphi_{i/q} = \varphi_i - \varphi_0 = \frac{\pi}{2} \text{ donc } i \text{ et } q \text{ sont en quadrature de phase } \varphi_{i/q} = \frac{\pi}{2}$$

Le décalage horaire  $\Delta t$  entre les deux courbes représentatives des deux fonctions sinusoïdales, allant dans le même sens est tel que :  $\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{|\Delta\varphi|}{\Delta t}$

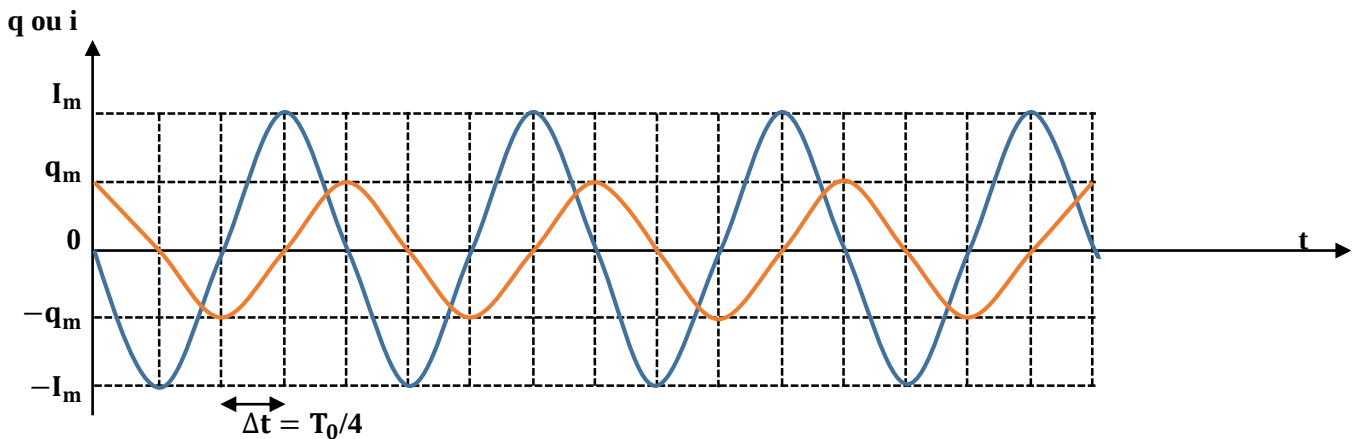
$$\text{On sait que } \Delta\varphi = \frac{\pi}{2} \text{ et } \omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{|\Delta\varphi|}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{T \cdot |\Delta\varphi|}{2\pi} = \frac{T}{2\pi} \times \frac{\pi}{2} \Rightarrow \Delta t = \frac{T}{4}$$

Représentation de  $q$  et  $i$  en fonction du temps dans un même repère pour  $\varphi_0 = 0$  alors on aura :

$$q = q_m \cos(\omega_0 t) \text{ avec } i = I_m \cos\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right) \text{ avec } \omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} \Rightarrow q = q_m \cos\left(\frac{2\pi}{T_0} t\right) \text{ avec } i = I_m \cos\left(\frac{2\pi}{T_0} t + \frac{\pi}{2}\right)$$

| t            | 0     | $T_0/4$ | $T_0/2$ | $3T_0/4$ | $T_0$  |
|--------------|-------|---------|---------|----------|--------|
| $\omega_0 t$ | 0     | $\pi/2$ | $\pi$   | $3\pi/2$ | $2\pi$ |
| q            | $q_0$ | 0       | $-q_m$  | 0        | $q_m$  |

| t                    | 0       | $T_0/4$ | $T_0/2$  | $3T_0/4$ | $T_0$    |
|----------------------|---------|---------|----------|----------|----------|
| $\omega_0 t + \pi/2$ | $\pi/2$ | $\pi$   | $3\pi/2$ | $2\pi$   | $5\pi/2$ |
| i                    | 0       | $-I_m$  | 0        | $I_m$    | 0        |

**IV. Energie électrique totale :**

$$\text{Energie électrique totale } E_t = E_s + E_m$$

$$E_s = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} \text{ est l'énergie électrostatique } \Leftrightarrow \text{l'énergie potentielle (électrostatique)}$$

$$E_m = \frac{1}{2} Li^2 \text{ est l'énergie électromagnétique } \Leftrightarrow \text{l'énergie cinétique (électromagnétique)}$$

$$\text{On a : } q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \Rightarrow i = \dot{q} = -q_m \omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

$$\text{Alors } E_t = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} + \frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{2} \frac{q_m^2}{C} \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{1}{2} L \omega_0^2 q_m^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) \text{ et } \omega_0^2 = \frac{1}{LC} \Rightarrow$$

$$E_t = \frac{1}{2} \frac{q_m^2}{C} \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{1}{2} L \frac{1}{LC} q_m^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) = \frac{1}{2} \frac{q_m^2}{C} [\cos^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0)]$$

Alors  $E_t = \frac{1}{2} \frac{q_m^2}{C}$  c'est une constante.

L'énergie électrique totale du circuit LC se conserve. Il y a transfert d'énergie entre le condensateur et la bobine.

### V. Influence de la résistance :

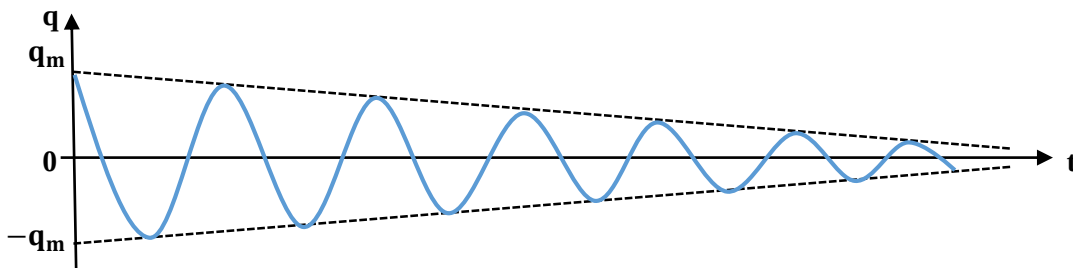
Si la résistance de la bobine est  $r$  (non négligeable)

$$U_{AB} = -(ri + L \frac{di}{dt}) \Rightarrow U_{AB} = -L \frac{di}{dt} - ri = \frac{q}{C} \Rightarrow U_{AB} = -L\ddot{q} - r\dot{q} = \frac{1}{C} q$$

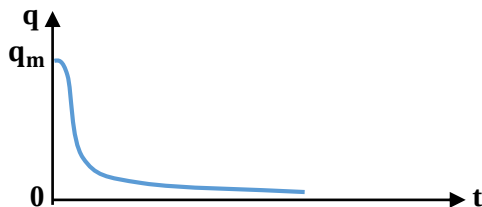
$$\Rightarrow \ddot{q} + \frac{r}{L} \dot{q} + \frac{1}{LC} q = 0 \Leftrightarrow \ddot{q} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{q} + \omega_0^2 q = 0 \text{ par identification } \frac{\omega_0}{Q} = \frac{r}{L} \Rightarrow Q = \frac{L\omega_0}{r} \text{ Appelé facteur de qualité.}$$

La résistance joue le rôle d'amortisseur :

- Si  $r$  est faible, l'oscillation, est pseudopériodique



- Si  $r$  est très grande, l'oscillation, est apériodique (critique).



### A savoir :

$r$  peut être la résistance de la bobine plus la résistance totale des conducteurs du circuit (ou la résistance du circuit).

## Séquence 18

### Unité d'apprentissage 6 : Oscillateurs Libres

#### Concept 3 : Ondes Electromagnétiques

#### Pré-évaluation :

Définis l'espace champ électrique et l'espace champ magnétique puis donne la composition de la lumière blanche.

#### Situation d'apprentissage :

En général, une onde est la propagation d'une perturbation produisant sur son passage une variation réversible des propriétés physique locales du milieu. Elle se déplace avec une vitesse déterminée qui dépend des caractéristiques du milieu de propagation. Bien que suivant tout le principe du « transport d'énergie sans transport de matière », les ondes constituent une vaste famille à l'intérieur de laquelle se distinguent des catégories aux propriétés physiques variées. Différemment aux ondes mécaniques (rides provoquées par le caillou qui tombe dans l'eau) propageant à travers une matière physique dont la substance se déforme, nous allons étudier les ondes électromagnétiques ne nécessitant pas de support physique. Que peut émettre les ondes électromagnétiques ?

#### Activité : Ondes électromagnétiques

##### Consigne :

- Définis une onde électromagnétique.
- Donne les propriétés des ondes électromagnétiques.
- Comment se propagent-elles.
- Quels sont les différents types d'ondes électromagnétiques ?

#### Synthèse :

##### I. Définition :

Une onde est un signal ou un ébranlement entretenu périodiquement.

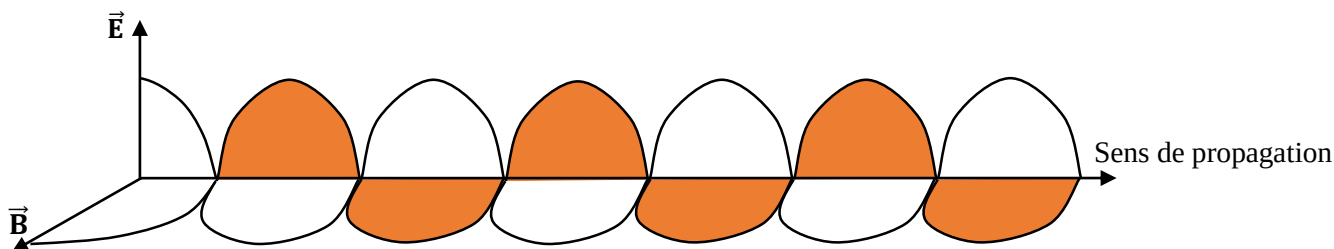
Une onde électromagnétique est le phénomène résultant de la propagation simultanée dans l'espace d'un champ électrique  $\vec{E}$  et d'un champ magnétique  $\vec{B}$ , tous deux étant des grandeurs vibratoires de fréquence élevée. Elle se propage dans l'espace avec une célérité ( $C$ ) égale à celle de la lumière dans le vide.

Les ondes se propagent avec la célérité  $C = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ . La longueur d'onde des ondes électromagnétiques est donnée par :  $\lambda = C \cdot T$  ou  $\lambda = \frac{C}{N}$  ( $C$  : célérité,  $N$  : fréquence).

La longueur d'onde des ondes électromagnétiques sont prises entre  $10^{-13} \text{ m}$  et  $2 \cdot 10^3 \text{ m}$ .

##### II. Propagation :

Les ondes électromagnétiques ne nécessitent aucun support matériel pour se propager. Elle se propage dans le vide avec la même célérité  $C$ .



##### III. Propriétés générales :

Les ondes électromagnétiques sont plus ou moins absorbées ou réfléchies. Leur réflexion, leur absorption dépendent de l'ordre de la longueur d'onde.

##### IV. Les types d'onde électromagnétique :

Les ondes portent des noms différents suivant leur mode d'émission.

###### 1. Les ondes hertziennes :

Elles sont émises par des circuits électriques comprenant un générateur électrique à haute fréquence, capable d'entretenir des oscillations électriques dans le circuit et de les communiquer aux électrons libres d'un fil émetteur appelé antenne.

Elles ne se propagent pas dans le milieu conducteur d'électricité. Elles sont diffractées et sont utilisées dans la communication de la radiodiffusion des radars...etc.

## 2. Les rayons $\gamma$ :

Ils sont émis par les noyaux des atomes au cours des désintégrations radioactives naturelles. Leur longueur d'onde est comprise entre  $10^{-13}\text{m}$  et  $10 \cdot 10^{-10}\text{m}$  dans le vide.

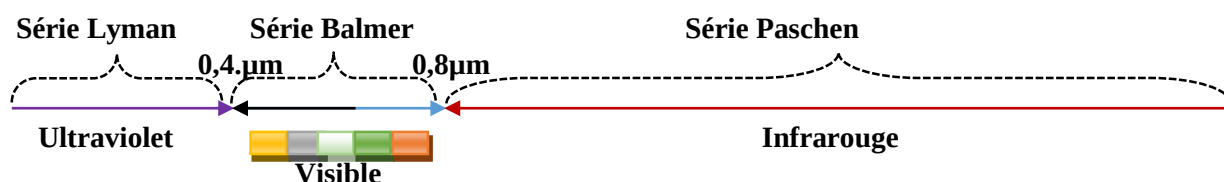
Ils sont pénétrants et traversent les solides, y compris les métaux de quelques cm d'épaisseur. Ils sont responsables des méfaits physiologiques et excitent la fluorescence de certaines substances.

## 3. Les rayons X :

Ils sont émis par un métal soumis à un bombardement intense des électrons. Leurs longueurs d'onde sont comprises entre  $10^{-10}\text{m}$  et  $10 \cdot 10^{-8}\text{m}$  dans le vide.

Ils sont capables de traverser un matériau mais plus difficilement que le numéro atomique de la substance est plus élevé (principe de la radiographie médicale, car les rayons X sont absorbés de manière différentes par les tissus et par les os qui apparaissent opaques). La diffraction des rayons X est utilisée dans la détermination des structures cristallines. Ils impressionnent les plaques photographiques et excitent la fluorescence de certaines substances.

## 4. La lumière visible :



Elle est émise au cours du réarrangement des électrons des atomes par des corps très chauds. Leur longueur d'onde est comprise entre  $0,4 \cdot 10^{-6}\text{m}$  et  $0,8 \cdot 10^{-6}\text{m}$ . Son domaine est strictement limité par les qualités physiologiques.

La dispersion de la lumière blanche par un arc électrique réalisée à l'aide d'une lentille convergente et d'un prisme à quartz montre que le spectre visible de la lumière blanche est délimité par le rouge ( $\lambda_R = 0,76\mu\text{m}$ ) et le violet ( $\lambda_V = 0,4\mu\text{m}$ ).

Déplaçons une pile thermoélectrique P au deçà du rouge, l'intensité du courant croît : la lumière de l'arc contient des radiations invisibles dites infrarouges ( $\lambda > 0,76\mu\text{m}$ ). Un écran fluorescence E placé dans le violet et au-delà permet de constater que la partie de l'écran placée au-delà du violet s'illumine : la lumière de l'arc contient des radiations invisibles dites ultraviolettes ( $\lambda < 0,4\mu\text{m}$ ).

## 5. Radiations infrarouges : (I.R)

Elles sont émises par les corps chauds (le soleil, une flamme, un filament de lampe, un radiateur de chauffage central, un mur chauffé par le soleil...) et dépendent de la température du corps. Leur longueur d'onde est comprise entre  $0,8 \cdot 10^{-6}\text{m}$  et  $10^{-4}\text{m}$ .

Elles sont absorbées par l'eau : lorsqu'elles sont absorbées, une partie de leur énergie est transformée en chaleur au sein de l'eau. La plus part des substances transparentes au visible absorbent les radiations infrarouges de façon variable selon la longueur d'onde de la radiation considérée.

Elles traversent le verre, le quartz et l'atmosphère. Le verre et le quartz sont respectivement opaques à la longueur d'onde supérieure à  $1,3\mu\text{m}$  et  $3\mu\text{m}$  dans le vide. L'air atmosphérique est transparent pour les longueurs d'onde comprises entre  $9\mu\text{m}$  et  $14\mu\text{m}$ .

Elles se manifestent sous forme d'énergie calorifique, elles sont utilisées dans l'échauffement serres vitrées, dans la photographie dans l'obscurité (photographiques des objets éloignés de plus de 100km) dans les fours à infrarouges (séchés très rapidement et économiquement les peintures, les denrées alimentaires, les produits pharmaceutiques ...).

## 6. Les radiations ultraviolettes : (U.V)

Elles sont émises au cours des réarrangements des électrons des couches électroniques externes ou par les corps portés à des températures très élevées : (les arcs électriques, les lampes spectrales au mercure, le soleil). Leurs longueurs d'onde sont comprises entre  $10^{-8}\text{m}$  et  $0,4 \cdot 10^{-6}\text{m}$ .

Elles sont absorbées par le verre. L'atmosphère terrestre absorbe une grande partie des radiations U.V émises par le soleil grâce à la couche d'ozone ( $\text{O}_3$ ), notamment les plus dangereuses pour l'organisme humain ( $\lambda < 0,30\mu\text{m}$ ). La partie

de la radiation U.V non arrêtée par l'atmosphère terrestre ( $\lambda > 0,30\mu\text{m}$ ) provoque la pigmentation de la peau (bronzage) et des coups de soleil allant jusqu'aux brûlures.

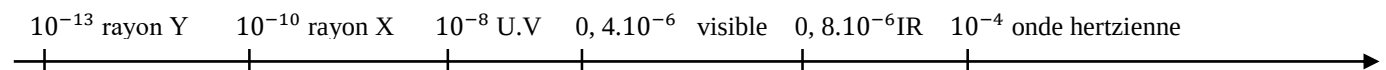
Elles sont utilisées :

- Sous forme d'énergie électrique dans les cellules photoélectriques.
- Sous forme d'énergie chimique dans les réactions chimiques (synthèse de HCl ou de l' $\text{O}_3$ ), la photosynthèse et l'impression des plaques photographique.
- Sous forme d'énergie rayonnant dans la fluorescence (contrôle des produits commerciaux).

### A savoir :

Les cellules vivantes en particulier les cellules microbiennes sont très sensibles au rayonnement UV d'où la pigmentation. Elle provoque dans les tissus superficiels de la peau, la synthèse d'une substance nécessaire à l'édification du squelette (analogue à la vitamine D).

### En résumé :



## Séquence 19

### Unité d'apprentissage 7 : Oscillateurs Forcés

Dans le chapitre précédent, nous avons simplement écarté l'ensemble fil-masse d'un pendule simple puis laissé le système osciller librement, il s'agissait d'une excitation « statique ». Nous allons considérer que l'oscillateur constitué de l'ensemble fil-masse subisse une excitation sinusoïdale liée à un dispositif extérieur : on est dans le cas d'un oscillateur mécanique en oscillations forcées. Ce phénomène d'oscillations forcées est d'une grande importance dans la pratique et intervient sur tous les types d'oscillateurs : mécaniques, acoustiques, électriques, optiques, etc.

Les ondes électromagnétiques captées par une antenne, mettent en oscillation forcée le circuit électronique de notre téléphone portable ou de notre récepteur de télévision.

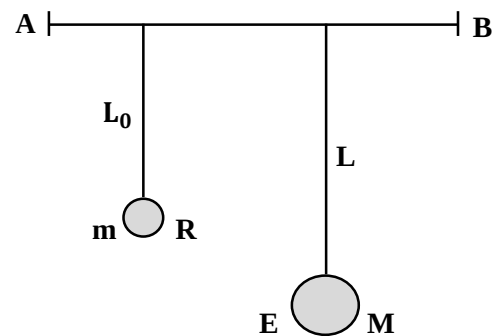
### Concept 1 : Oscillateurs Mécaniques Forcés

#### Pré-évaluation :

Définis : oscillateur libre et oscillateur amorti.

#### Situation d'apprentissage :

Réalisons le montage ci-dessous dans lequel, deux pendules présents (E) et (R) sont suspendus à un même support élastique constitué par un fil d'acier (AB) tendue horizontalement. Le pendule E possède une masse (M) importante et une longueur de suspension (L) initialement grande, le pendule (R) à une masse m petite et une longueur de suspension ( $L_0$ ) fixe et faible.



Que constates-tu ? Sachant que les périodes propres des oscillations de E et R sont connues.

### Activité 1 : Oscillations forcées

**Consigne :** Ecarte le pendule (E) de sa position d'équilibre et lâche sans vitesse initiale. Que constates-tu ?

#### Synthèse 1 :

##### I. Oscillation forcée :

Les périodes propres des oscillations de E et R sont T et  $T_0$ . Le pendule E, écarté de sa position d'équilibre effectue des oscillations de période T. On remarque que le pendule R initialement immobile se met spontanément à osciller avec la période T de E et non avec sa période propre  $T_0$ . Le pendule E qui excite R à osciller, est l'excitateur et le pendule R, le résonateur. L'excitateur force le résonateur à osciller et lui impose sa période : on a des oscillations forcées. Le fil d'acier AB qui réalise l'interdépendance est due au couplage. Lorsque l'excitateur n'est pas entretenu, il cesse d'osciller quand toute son énergie est fournie au résonateur et dissipée par frottement, les rôles ont tendance à s'inverser, l'excitateur devient résonateur et vice versa.

### Activité 2 : Phénomène de résonance

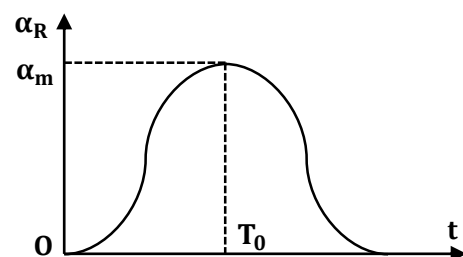
#### Consigne :

Fais varier la période T de l'excitateur en diminuant la longueur (L) et intéressons-nous à l'amplitude ( $\alpha_R$ ) des oscillations du résonateur pour amplitude ( $\alpha_E$ ) donnée de l'excitateur.

#### Synthèse 2 :

##### II. Phénomène de résonance :

On constate que  $\alpha_R$  passe par un maximum quand les deux pendules ont sensiblement la même période ( $T \approx T_0$ ) : on dit qu'il y a résonance. Il y a une résonance lorsque l'amplitude du mouvement pris par le résonateur est maximale.



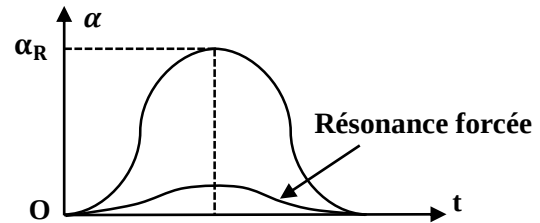
**Activité 3 : Influence de l'amortissement****Consigne :**

Plongez la masse  $m$  du résonateur plus ou moins dans un fluide (eau). Ecartez le pendule E de sa position d'équilibre et lâchez sans vitesse initiale puis reprenons sans le fluide. Que constatez-vous ?

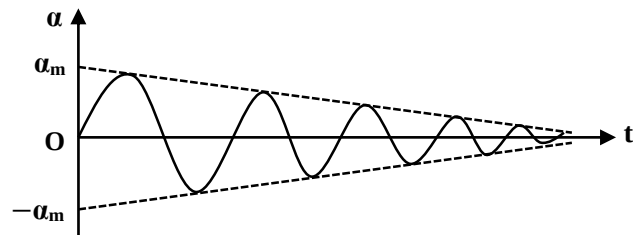
**Synthèse 3 :****III. Influence de l'amortissement :**

Les amplitudes successives décroissent progressivement, dans une deuxième phase ;  $f \approx f_0 = \text{résonance}$ .

Sortons (R) de la cuve à eau, on constate que R se met à osciller avec une amplitude qui augmente en passant par un maximum.

**Remarque :**

- Si le résonateur est peu amorti, la résonance devient aigue.
- Si le résonateur est amorti, il y a résonance moyenne.
- Si le résonateur est très amorti, il y a résonance floue.



**Séquence 20****Unité d'apprentissage 7 : Oscillateurs Forcés****Concept 2 : Oscillateurs Electriques Forcés****Pré-évaluation :**

Fais la construction de Fresnel pour  $x = x_1 + x_2$  tels que :  $x_1 = x_{1m} \cos(\omega t + \varphi_1)$  et  $x_2 = x_{2m} \cos(\omega t + \varphi_2)$

**Rappel : Construction de Fresnel**

D'après la représentation de Fresnel :

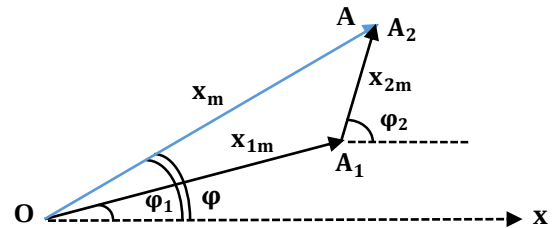
$$x_1 = x_{1m} \cos(\omega t + \varphi_1) \text{ est associé à } \overrightarrow{OA_1} = \begin{cases} x_{1m} \\ \varphi_1 \end{cases}$$

$$\text{Et } x_2 = x_{2m} \cos(\omega t + \varphi_2) \text{ est associé à } \overrightarrow{OA_2} = \begin{cases} x_{2m} \\ \varphi_2 \end{cases}$$

On a :  $x = x_1 + x_2$  est aussi associé au vecteur :

$$\overrightarrow{OA} = \overrightarrow{OA_1} + \overrightarrow{OA_2} = \begin{cases} x_m \\ \varphi \end{cases}$$

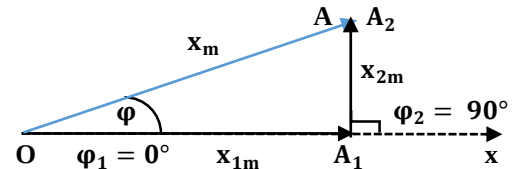
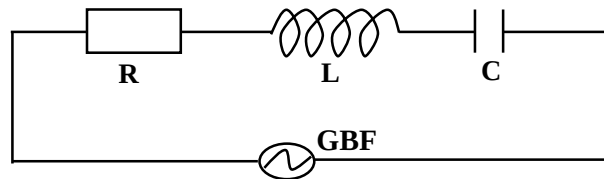
$x_m$  et  $\varphi$  sont à déterminer mathématiquement selon les valeurs de :  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $x_{m1}$  et  $x_{m2}$

**Un cas particulier :**

Pour :  $\varphi_1 = 0^\circ$  et  $\varphi_2 = \frac{\pi}{2} = 90^\circ$

D'après le théorème de Pythagore :  $x_m^2 = x_{m1}^2 + x_{m2}^2$

$$\Rightarrow X_m = \sqrt{x_{m1}^2 + x_{m2}^2} \quad \text{et} \quad \tan \varphi = \frac{x_{m2}}{x_{m1}}$$

**Situation d'apprentissage :**

Dans le circuit de montage ci-dessus, lorsque le générateur de base fréquence (GBF) impose aux bornes du circuit RLC une tension alternative sinusoïdale périodique de fréquence  $N$ , le circuit RLC série devient le siège d'oscillation électrique sinusoïdale périodique à la fréquence  $N$  imposée par le GBF.

Le circuit RLC se comporte comme un oscillateur réalisant des oscillations forcées. Les oscillations sont entretenues (ne sont plus amorties) ce qui prouve qu'il y a toujours un transfert d'énergie de l'excitateur qui le GBF vers le résonateur qui est le circuit RLC. Comment évoluent les grandeurs  $u(t)$  et  $i(t)$  dans ce circuit ?

**Activité 1 : Courant alternatif sinusoïdal**

A partir de tes connaissances

**Consigne :**

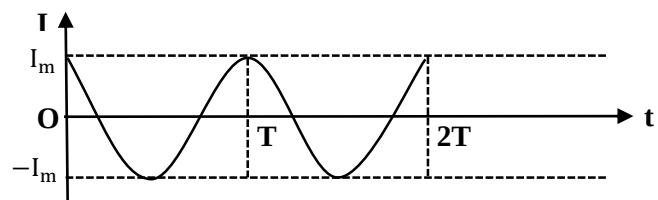
- Définis le courant alternatif.
- Donne les lois générales du courant alternatif.
- Donne les effets du courant alternatif.
- Détermine à partir de l'énergie, l'expression de l'intensité efficace, et en déduis la tension efficace.

**Synthèse 1 :****I. Courant alternatif sinusoïdal :****1. Définition :**

Un courant alternatif sinusoïdal est un courant électrique qui change de sens deux fois par période et transporte alternativement dans un sens puis dans l'autre un courant d'intensité :

$$i = I_m \cos \omega t$$

En régime variable les grandeurs variables sont représentées par des lettres minuscules.



**2. Lois du courant alternatif :**

Les deux suivantes sont admises pour un courant alternatif à base fréquente ( $B_F$ ) ( $N < 20000$  Hz).

- A chaque instant l'intensité  $i$  du courant est la même à travers chaque section du circuit.
- Les lois du courant continu s'appliquent au courant alternatif à chaque instant.

**3. Effets du courant alternatif :****a. Effet chimique :**

Si le courant est alternatif, l'électricité qui est à l'anode au cours d'une alternance part à la cathode au cours de l'alternance suivante : L'effet chimique est donc nul dans l'électrolyseur.

**b. Effet calorifique :**

L'effet joule est indépendant du sens du courant ; il se produit en courant alternatif comme en courant continu.

Tout conducteur parcouru par un courant, est le siège d'un dégagement de chaleur :  $W = Ri^2t$

**c. Effet magnétique et électromagnétique :**

Tout conducteur parcouru par un courant électrique (continu ou alternatif) crée dans son espace environnant une induction magnétique :  $B = K.i$

Tout conducteur rectiligne parcouru par un courant et placé dans une induction magnétique, est soumis à une force électromagnétique :  $f = L.i.B$

**4. Les grandeurs efficaces :****a. Intensité efficace :**

L'intensité efficace d'un courant alternatif est égale à l'intensité  $I$  d'un courant continu qui, passant dans un conducteur ohmique y produirait pendant chaque période le même dégagement de chaleur.

Soit  $R$  la résistance du conducteur ohmique traversé par le courant alternatif sinusoïdale :  $i = I_m \cos \omega t$

Pendant l'intervalle de temps  $dt$  très petit l'énergie dissipée est  $dw = Ri^2 dt \Rightarrow dw = RI_m^2 \cos^2 \omega t dt$ .

Pendant une période  $T$  on a  $W = \int_0^T dw = \int_0^T R I_m^2 \cos^2 \omega t dt \Rightarrow W = R I_m^2 \int_0^T \cos^2 \omega t dt$  or  $\cos^2 a = \frac{1+\cos 2a}{2}$

Alors  $W = RI_m^2 \int_0^T \left( \frac{1+\cos 2\omega t}{2} \right) dt = \frac{RI_m^2}{2} \left[ \int_0^T dt + \int_0^T \cos 2\omega t dt \right] = \frac{RI_m^2}{2} [t]_0^T + \frac{RI_m^2}{2} \left[ \frac{1}{2\omega} \sin 2\frac{2\pi}{T} t \right]_0^T \Rightarrow W = \frac{RI_m^2}{2} T$

En courant continu l'énergie dissipée en une période  $T$  est :

$$W = RI^2 T \Rightarrow \frac{RI_m^2}{2} T = RI^2 T \Rightarrow I^2 = \frac{I_m^2}{2} \Rightarrow I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \text{ ou } I_m = I\sqrt{2}$$

**b. Tension efficace :**

Aux bornes du conducteur ohmique la tension efficace est telle que :  $U_m = U\sqrt{2}$

**A savoir :**

Les valeurs efficaces des grandeurs variables sont représentée par les lettres majuscules. Les appareils de mesure utilisés en courant alternatif ne mesurent que les grandeurs efficaces.

**Activité 2 : Circuit R.L.C en série**

Le générateur délivre un courant :  $i = I_m \cos \omega t$  et impose une tension :  $u = U_m \cos (\omega t + \varphi)$  dans le circuit

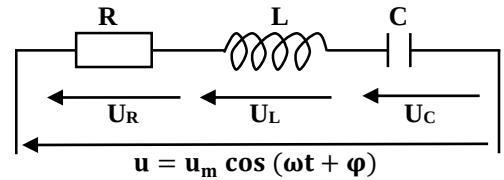
**Consigne :**

- En appliquant la loi d'additivité des tensions, détermine l'expression de  $u$  en fonction de  $R$ ,  $L$ ,  $C$  et  $i$ .
- En utilisant la construction de Frenel, détermine  $u$  (c'est-à-dire détermine  $U_m$  et  $\varphi$ ).
- En appliquant la loi d'Ohm  $u = Zi$ , déterminez l'impédance  $Z$ .
- Détermine la phase initiale de la tension  $\varphi$  en utilisant la construction de Fresnel.
- A la résonance  $L\omega = \frac{1}{C\omega}$  c'est-à-dire  $T = T_0$  (la période propre du circuit LC), caractérise la résonance.

**Synthèse 2 :****II. Circuit R.L.C en série :****1. Détermination de la tension :**

Considérons un circuit formé d'une résistance  $R$ , d'une bobine non résistive d'inductance  $L$  et d'un condensateur  $C$  montés en série aux bornes d'un générateur de tension alternative.

Déterminer  $u = u_m \cos(\omega t + \varphi)$  revient à déterminer les constantes :  $U_m$  et  $\varphi$



**a. Loi d'addition de tensions :**

Aux bornes du circuit :  $u = u_R + u_L + u_C$

on a :  $u_R = Ri$ ,  $u_L = -e$  et  $e = -L \frac{di}{dt} \Rightarrow u_L = L \frac{di}{dt}$ ,  $u_C = \frac{Q}{C}$  et  $Q = \int i dt \Rightarrow u_C = \frac{1}{C} \int i dt$

Alors  $u = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt$

**b. Construction de Fresnel :**

On a :  $i = I_m \cos \omega t$  et  $u = u_m \cos(\omega t + \varphi)$

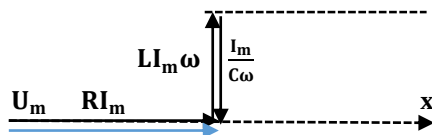
Aux bornes de la résistance :  $u_R = Ri = RI_m \cos \omega t$  est associée au vecteur  $\vec{V}_1 \left\{ \begin{matrix} RI_m \\ 0 \end{matrix} \right.$

Aux bornes de l'induction :  $u_L = L \frac{di}{dt} = -LI_m \omega \sin \omega t = LI_m \omega \cos\left(t + \frac{\pi}{2}\right)$  est associée au vecteur  $\vec{V}_2 \left\{ \begin{matrix} LI_m \omega \\ \frac{\pi}{2} \end{matrix} \right.$

Aux bornes du condensateur :  $u_C = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{1}{C} \cdot \frac{I_m}{\omega} \sin \omega t = \frac{I_m}{C\omega} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$  est associée au vecteur  $\vec{V}_3 \left\{ \begin{matrix} \frac{I_m}{C\omega} \\ -\frac{\pi}{2} \end{matrix} \right.$

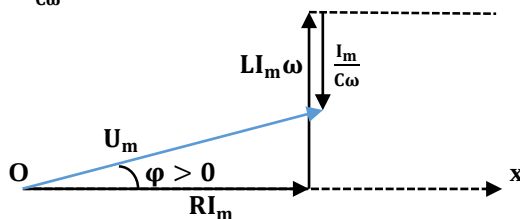
$u = RI_m \cos \omega t + LI_m \omega \cos\left(t + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{I_m}{C\omega} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$  est associée au vecteur :  $\vec{V} = \vec{V}_1 + \vec{V}_2 + \vec{V}_3 = \left\{ \begin{matrix} U_m \\ \varphi \end{matrix} \right.$

▪ Si  $LI_m \omega = \frac{I_m}{C\omega}$



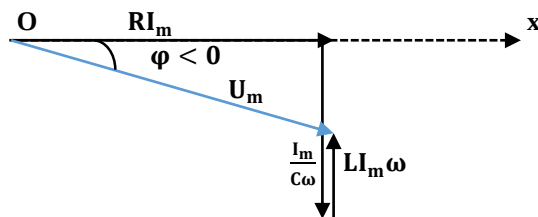
$$U_m = RI_m \text{ et } \varphi = 0$$

▪ Si  $LI_m \omega > \frac{I_m}{C\omega}$



$$U_m^2 = (I_m R)^2 + \left(I_m L\omega - \frac{I_m}{C\omega}\right)^2 = I_m^2 \left[ R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2 \right] \Rightarrow U_m = I_m \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2} \text{ et } \tan \varphi = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R} > 0$$

▪ Si  $LI_m \omega < \frac{I_m}{C\omega}$



$$U_m^2 = (I_m R)^2 + \left(I_m L\omega - \frac{I_m}{C\omega}\right)^2 = I_m^2 \left[ R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2 \right] \Rightarrow U_m = I_m \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2} \text{ et } \tan \varphi = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R} < 0$$

**2. Impédance :**

D'après la loi d'Ohm :  $u = Z i \Rightarrow U = Z I \Rightarrow U_m = Z I_m$  alors l'impédance  $Z = \frac{U_m}{I_m}$  (en  $\Omega$ )

D'une façon générale :  $U_m = I_m \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}$  alors l'impédance :  $Z = \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}$

**3. Phase initiale de la tension : Déphasage entre la tension et le courant**

La phase initiale de la tension est tel que  $\tan \varphi = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}$  où  $|\varphi| \leq \frac{\pi}{2}$

Le déphasage entre la tension et le courant est :  $\Delta\varphi = \varphi_u - \varphi_i$

- Si  $\varphi_i = 0 \Rightarrow \Delta\varphi = \varphi_u - 0 \Rightarrow \Delta\varphi = \varphi_u = \varphi$
- Si  $\varphi_u = 0 \Rightarrow \Delta\varphi = 0 - \varphi_i \Rightarrow \Delta\varphi = -\varphi_i = \varphi \Rightarrow \varphi_i = -\varphi$
- Si  $\varphi > 0$  alors  $\tan \varphi > 0 \Rightarrow L\omega - \frac{1}{C\omega} > 0 \Rightarrow L\omega > \frac{1}{C\omega}$  : **effet d'inductance l'emporte sur l'effet de capacité.**
- Si  $\varphi < 0$  alors  $\tan \varphi < 0 \Rightarrow L\omega - \frac{1}{C\omega} < 0 \Rightarrow L\omega < \frac{1}{C\omega}$  : **effet de capacité l'emporte sur l'effet d'inductance.**

**Remarque :**

La formule  $U = ZI$  s'applique pour le circuit entier et pour un dipôle appartenant à ce circuit :

▪ **Résistance pure : (R)**

Alors :  $Z = Z_R = R \Rightarrow \tan \varphi = \frac{0}{R} = 0 \Rightarrow \varphi = 0$  donc **i et u sont en phase**

▪ **Inductance pure : (L)**

Alors :  $Z = Z_L = L\omega \Rightarrow \tan \varphi = \frac{L\omega}{0} = \frac{Z_L}{0} = +\infty \Rightarrow \varphi = \frac{\pi}{2}$  donc **u est en quadrature avance sur i**

▪ **Capacité pure : (C)**

Alors :  $Z = Z_C = \frac{1}{C\omega} \Rightarrow \tan \varphi = \frac{-\frac{1}{C\omega}}{0} = \frac{-Z_C}{0} = -\infty \Rightarrow \varphi = -\frac{\pi}{2}$  donc **u est en quadrature retard sur i**

▪ **Circuit RL :**

Alors :  $Z = \sqrt{(L\omega)^2 + R^2} = \sqrt{Z_L^2 + R^2} \Rightarrow \tan \varphi = \frac{L\omega}{R} = \frac{Z_L}{R} \Rightarrow \varphi > 0$  donc **u est en avance sur i.**

▪ **Circuit RC :**

Alors :  $Z = \sqrt{(\frac{1}{C\omega})^2 + R^2} = \sqrt{Z_C^2 + R^2} \Rightarrow \tan \varphi = \frac{-1}{RC\omega} = \frac{-Z_C}{R} \Rightarrow \varphi < 0$  donc **u est en retard sur i.**

▪ **Circuit LC :**

Alors :  $Z = \sqrt{(L\omega - \frac{1}{C\omega})^2} \Rightarrow Z = |L\omega - \frac{1}{C\omega}|$  et Si  $L\omega > \frac{1}{C\omega} \Rightarrow \varphi = 90^\circ$  ou Si  $L\omega < \frac{1}{C\omega} \Rightarrow \varphi = -90^\circ$

**A savoir :**

Dans le système :  $\begin{cases} i = i_m \cos \omega t \\ u = u_m \cos (\omega t + \varphi) \end{cases}$  la phase  $\varphi$  est souvent transposée au courant :  $\begin{cases} i = i_m \cos (\omega t - \varphi) \\ u = u_m \cos \omega t \end{cases}$

**4. Résonance - bande passante - Facteur de qualité :****a. Résonance :**

A la résonance l'intensité  $I$  du courant est à sa valeur maximale.

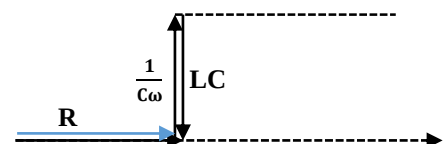
$$I = \frac{U}{Z} \text{ or } Z = \sqrt{(L\omega - \frac{1}{C\omega})^2 + R^2}$$

Si  $I$  croît  $\Rightarrow Z$  décroît  $\Rightarrow$  si  $I$  est maximale  $\Rightarrow Z$  à la plus petite valeur donc  $L\omega - \frac{1}{C\omega} = 0 \Rightarrow L\omega = \frac{1}{C\omega}$

$$\Rightarrow Lc\omega^2 = 1 \Rightarrow \omega^2 = \frac{1}{LC} \Rightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0 \Rightarrow T = T_0$$

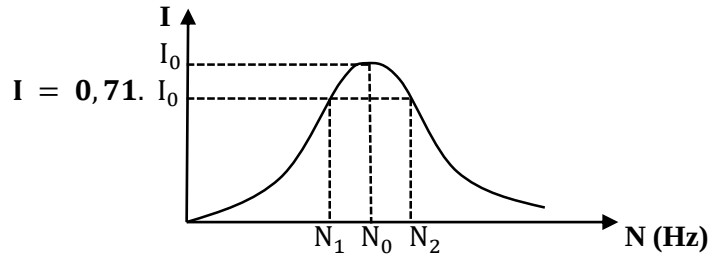
à la résonance la fréquence est égale à la fréquence propre

( $N = N_0$ ) et  $Z = R$  ;  $\tan \varphi = 0 \Rightarrow \varphi = 0$  ;  $u$  et  $i$  sont en phase.



**b. La bande passante :****■ Définition :**

- La bande passante d'un circuit RLC désigne l'ensemble des fréquences pour lesquelles la réponse en intensité est supérieure à 71% de la résonance :  $I = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = 0,71 \cdot I_0$



- La longueur de la bande passante est  $\Delta N = N_2 - N_1$ . La bande en pulsation  $\Delta \omega = 2\pi \Delta N = \omega_2 - \omega_1$

**■ Calcul de la longueur d'une bande :**

$$I = \frac{U}{Z} ; I_0 = \frac{U}{R} \text{ or } I = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \Rightarrow I = \frac{U}{R\sqrt{2}} \Rightarrow \frac{U}{Z} = \frac{U}{R\sqrt{2}} \text{ donc } Z = R\sqrt{2} \Rightarrow Z^2 = 2R^2 \text{ et } Z = \sqrt{(L\omega - \frac{1}{C\omega})^2 + R^2}$$

$$(L\omega - \frac{1}{C\omega})^2 + R^2 = 2R^2 \Rightarrow (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2 = R^2 \Rightarrow L\omega - \frac{1}{C\omega} = \pm R$$

Soient  $\omega_2$  et  $\omega_1$  les racines respectives des équations du second ordre :

$$\begin{cases} L\omega_1 - \frac{1}{C\omega_1} = -R \\ L\omega_2 - \frac{1}{C\omega_2} = R \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} LC\omega_1^2 - 1 = -RC\omega_1 \\ LC\omega_2^2 - 1 = RC\omega_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} LC\omega_1^2 - 1 + RC\omega_1 = 0 \quad (1) \\ LC\omega_2^2 - 1 - RC\omega_2 = 0 \quad (2) \end{cases} \Rightarrow$$

$$LC(\omega_2^2 - \omega_1^2) - RC(\omega_2 + \omega_1) = 0 \Rightarrow L(\omega_2 + \omega_1)(\omega_2 - \omega_1) - R(\omega_2 + \omega_1) = (\omega_2 + \omega_1)[L(\omega_2 - \omega_1) - R] = 0$$

$$L(\omega_2 - \omega_1) - R = 0 \Rightarrow \Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = \frac{R}{L} \Rightarrow \Delta\omega = \frac{R}{L} \Rightarrow 2\pi\Delta N = \frac{R}{L} \Rightarrow \Delta N = \frac{R}{2\pi L}$$

- Si R est faible alors  $\Delta N$  est faible : résonance aigue (circuit sélectif)
- Si R est grande alors  $\Delta N$  est grande : résonance floue (circuit peu sélectif)

**■ Facteur de qualité :**

Le facteur de qualité est :  $Q = \frac{N_0}{\Delta N} = \frac{\omega_0}{\Delta\omega}$

- Si Q est grand  $\Rightarrow$  resonance aigue
- Si Q est faible  $\Rightarrow$  resonance floue

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} \text{ et } \Delta\omega = \frac{R}{L} \Rightarrow Q = \frac{\omega_0 L}{R} \text{ et } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \Rightarrow Q = \frac{\frac{1}{\sqrt{LC}} L}{R} \Rightarrow Q = \frac{L}{R} \cdot \frac{1}{\sqrt{LC}} \Rightarrow Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

**■ Phénomène de surtension :**

A la résonance  $U_C = Z_C I_0$  aux bornes du condensateur or  $I_0 = \frac{U}{R}$  et  $Z_C = \frac{1}{C\omega_0}$

Alors  $U_C = \frac{1}{C\omega_0} \cdot \frac{U}{R}$  et  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \Rightarrow U_C = \frac{\sqrt{LC}}{RC} U = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} U \Rightarrow U_C = QU$

$U_L = Z_L \cdot I_0$  aux bornes de l'inductance et  $Z_L = L\omega_0 \Rightarrow U_L = L\omega_0 \frac{U}{R} = L \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot \frac{U}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} U = QU \Rightarrow U_L = QU$

Alors  $U_L = U_C$

Si  $Q > 1$  alors  $U_L$  et  $U_C$  sont nettement plus grandes que U : on a des surtensions à la résonance (phénomène de surtension). Dans les circuits très sélectifs il y a risque de claquage de condensateur.

**Activité 3 : Energie et puissance électrique**

En courant continu la puissance reçue par un circuit est  $P = UI$ . De façon analogique en courant alternatif.

**Consigne :** donne l'expression

- De la puissance instantanée p.
- De la puissance moyenne P.
- De la puissance apparente Pa tel que  $P = Pa \cdot \cos\varphi$ .
- Du facteur de puissance  $\cos\varphi$ .
- De l'énergie  $W = E$ .

**Synthèse 3 :****III. Energie et puissance électrique en courant alternatif sinusoïdal :****1. Puissance :****a. Puissance instantanée :**

En courant continu la puissance reçue par un circuit est  $P = UI$ .

En régime variable la puissance instantanée  $p = u i$  or  $i = I_m \cos \omega t$  et  $U = U_m \cos (\omega t + \varphi)$

Alors  $p = I_m U_m \cos \omega t \cos (\omega t + \varphi)$

$$\begin{aligned} \cos a \cdot \cos b &= \frac{1}{2} [\cos (a + b) + \cos (a - b)] \Rightarrow p = \frac{1}{2} I_m U_m [\cos (2\omega t + \varphi) + \cos \varphi] \\ \Rightarrow p &= \frac{1}{2} I \sqrt{2} U \sqrt{2} [\cos (2\omega t + \varphi) + \cos \varphi] \Rightarrow p = I U [\cos (2\omega t + \varphi) + \cos \varphi] \end{aligned}$$

**b. Puissance moyenne :**

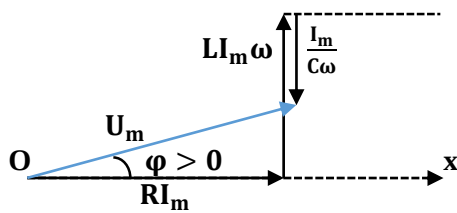
La puissance moyenne est la puissance consommée pendant une période.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \, dt = \frac{UI}{T} \left( \int_0^T \cos \varphi \, dt + \int_0^T \cos (2\omega t + \varphi) \, dt \right)$$

$$\text{On a : } \int_0^T \cos \varphi \, dt = \cos \varphi [t]_0^T = \cos \varphi \cdot T$$

$$\text{Et } \int_0^T \cos (2\omega t + \varphi) \, dt = \left[ \frac{1}{2\omega} \cdot \sin (2\omega t + \varphi) \right]_0^T = \left[ \frac{1}{2\omega} \sin \left( \frac{2\pi T}{T} + \varphi \right) - \frac{1}{2\omega} \sin \varphi \right] = \frac{1}{2\omega} \sin \varphi - \frac{1}{2\omega} \sin \varphi = 0$$

Donc  $P = \frac{UI}{T} \cos \varphi T$  et  $P = UI \cos \varphi$  et  $\cos \varphi$  est le facteur de puissance, la puissance est en Watt (W)

**A savoir :**

$$\cos \varphi = \frac{RI_m}{U_m} = \frac{RI\sqrt{2}}{U\sqrt{2}} \Rightarrow \cos \varphi = \frac{RI}{U} \Rightarrow U \cos \varphi = RI$$

$$\text{et } P = I \cdot U \cos \varphi \Rightarrow P = R \cdot I^2$$

Alors la puissance moyenne du circuit RLC est la puissance dissipée par la résistance R.

Donc la puissance moyenne d'un condensateur est nulle

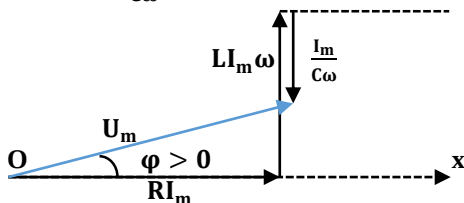
Et la puissance moyenne d'une bobine de résistance r est  $= r \cdot I^2$ , si r est négligeable alors  $P = 0W$

**c. Puissance apparente :**

$$\text{On a : } P = P_a \cdot \cos \varphi \text{ et } P = UI \cos \varphi \Rightarrow P_a = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{UI \cos \varphi}{\cos \varphi} \Rightarrow P_a = UI \text{ est la puissance apparente (en VA).}$$

**d. Facteur de puissance :**

$$\text{Pour : } LI_m \omega > \frac{I_m}{C\omega}$$



$$\cos \varphi = \frac{RI_m}{U_m} \text{ et } U_m = Z \cdot I_m \Rightarrow \cos \varphi = \frac{RI_m}{Z \cdot I_m} \Rightarrow \cos \varphi = \frac{R}{Z}$$

$$\text{Le facteur de puissance est } \cos \varphi = \frac{R}{Z}$$

$$\text{Pour L : } \varphi = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \cos \varphi = 0 \Rightarrow P = 0$$

$$\text{Pour C : } \varphi = -\frac{\pi}{2} \Rightarrow \cos \varphi = 0 \Rightarrow P = 0$$

$$\text{Pour R : } \varphi = 0 \Rightarrow \cos \varphi = 1 \Rightarrow P = UI = RI^2$$

Les inductances pures et les condensateurs ne consomment aucune puissance.

**A savoir : Importance de facteur de puissance**

$P = UI \cos \varphi \Rightarrow I = \frac{P}{U \cos \varphi}$  ; U est une constante pour une valeur de P ; I est d'autant plus grande que le facteur de puissance est plus petit.

La puissance perdue par effet joule dans les lignes de transport est  $P = rI^2$  (r la résistance totale des fils en ligne).

$$P_p = r \frac{P^2}{U^2 \cos^2 \varphi} \Rightarrow P_p = \frac{r P^2}{U^2} \cdot \frac{1}{\cos^2 \varphi}$$

Pour diminuer les pertes en énergie dans les lignes, on doit avoir  $\cos \varphi$  voisin de un (1). EDM et EDF imposent  $\cos \varphi$  comprise entre 0,7 et 0,8.

On augmente le facteur de puissance de  $\cos \varphi$  à  $\cos \varphi'$  d'une installation en branchant un condensateur de capacité  $C$  convenable à ses bornes tel que :

$$C = \frac{P. (\tan \varphi - \tan \varphi')}{\omega. U^2}$$

## 2. Energie électrique :

Energie consommée ou reçue par une portion de circuit pendant le temps  $t$  est  $E = Pt$  avec  $t = kT \Rightarrow E = P.kT$

Alors  $E = UI.kT \cos \varphi$

## Séquence 21

### Unité d'apprentissage 8 : Physique Ondulatoire et Corpusculaire

Certains phénomènes ne peuvent être expliqués complètement qu'en prenant en compte leurs caractéristiques ondulatoires et particulières. Ces deux phénomènes ne s'opposent pas, ils sont complémentaires. En pratique, l'étude du phénomène ondulatoire correspond à l'étude du flux de particules, et, l'aspect corpusculaire celui d'une particule en particulier constituant ce flux. La lumière en est l'exemple le plus connu.

### Concept 1 : Effet Photoélectrique

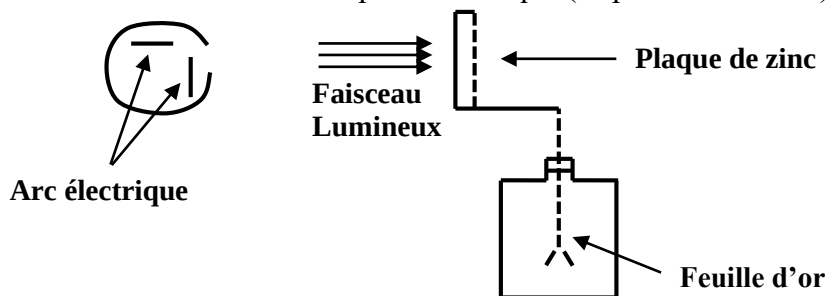
#### Pré-évaluation :

- Cite les différents types de centrale électrique que tu connais en précisant la source d'énergie.
- Cite les différents modes de transferts thermiques.

#### Situation d'apprentissage :

Le marché du panneau solaire a progressé ces dernières années à très grand rythme comme nous pouvons constater. Certes, comprendre le fonctionnement d'un panneau solaire photovoltaïque est essentiel lorsque l'on souhaite recourir à cette technologie. Le module solaire photovoltaïque est un système capable de capter l'énergie envoyée par le soleil vers la terre, et de la convertir en courant électrique continu. Comment un module composé de cellules photovoltaïques transforme l'énergie solaire en tension électrique continue ?

#### Activité 1 : Mise en Evidence de l'effet photoélectrique (Expérience d'hertz)



Une plaque de zinc P, fraîchement nettoyée est soudée à la tige d'un électroscope à feuille d'or. La plaque et les feuilles d'or sont pareillement électrisées, les feuilles d'or s'écartent alors (elles se repoussent).

Un faisceau lumineux très riche en rayon ultra-violet (UV) frappe la plaque de zinc : c'est la lumière excitatrice.

- Si l'électroscope est chargé négativement, il se décharge (les feuilles se rapprochent).
- Si l'électroscope est chargé positivement, il ne se produit rien.
- Si l'électroscope étant chargé négativement, on place lame de verre sur le trajet de la lumière, le phénomène n'est pas modifié si lame est transparente aux UV.

**Consigne** : Analyse l'expérience de l'Hertz puis définis le phénomène de l'effet photoélectrique.

#### Synthèse 1 :

##### I. Mise en évidence de l'effet photoélectrique :

##### 1. Analyse de l'expérience d'Hertz :

Ces observations montrent qu'une plaque de zinc électrisée négativement se décharge quand elle reçoit des radiations ultraviolettes : les électrons libres du métal sont repoussés par les UV (c'est l'effet photoélectrique).

##### 2. Définition :

L'effet photoélectrique est l'émission d'électron par un métal sous l'influence de la lumière.

#### A savoir :

Le phénomène photoélectrique est commun à tous les métaux, mais il ne se manifeste dans le spectre visible que pour les métaux alcalins.

#### Activité 2 : Lois de l'effet photoélectrique

A partir de tes connaissances,

##### Consigne :

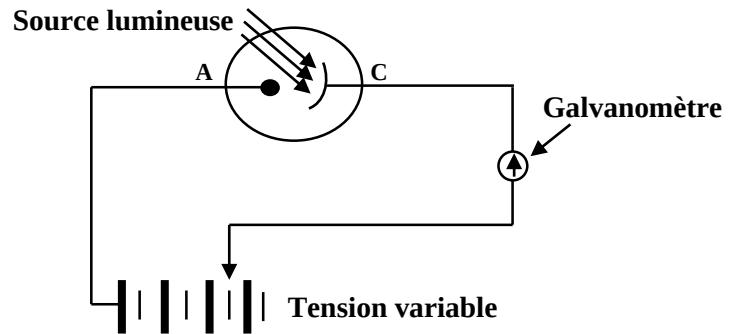
- Décris une cellule photoélectrique.
- Dégage les lois de l'émission photoélectrique.
- Donne la caractéristique de la tension  $U$  en fonction du courant  $I$  d'une cellule photoélectrique.

**Synthèse 2 :****II. Lois de l'effet photoélectrique :****1. Description de cellule photoélectrique :**

Les métaux étant oxydables, on les utilise dans une ampoule vide d'air, appelée cellule photoélectrique.

La cellule photoélectrique est constituée par un tube en verre spécial (silice) transparent aux rayons UV, dans lequel règne un vide poussée. Elle renferme :

- Une cathode métallique C (susceptible d'émettre des électrons quand elle est convenablement éclairée).
- Une anode A (un fil métallique ou une boucle) portée à un potentiel supérieur à celui de la cathode et dont le rôle est de capter les électrons.



Lorsque C, est éclairé, le galvanomètre indique le passage d'un courant très faible.

**2. Les lois de l'effet photoélectrique :****a. 1<sup>ère</sup> loi :**

Pour un métal pur, l'émission photoélectrique ne se produit que si la fréquence  $\nu$  de la lumière excitatrice est supérieure à une limite  $\nu_0$  appelé seuil d'excitation (ou seuil photoélectrique) caractéristique de ce métal :  $\nu \geq \nu_0$  alors  $\lambda \leq \lambda_0$

**Exemple :** Quelques seuils photoélectrique :

- Le zinc :  $\lambda_0 = 0,37\mu\text{m}$
- Le cuivre :  $\lambda_0 = 0,29\mu\text{m}$
- L'argent :  $\lambda_0 = 0,27\mu\text{m}$

**b. 2<sup>ème</sup> loi :**

L'émission photoélectrique est instantanée (le courant photoélectrique apparaît et cesse en même temps que l'irradiation).

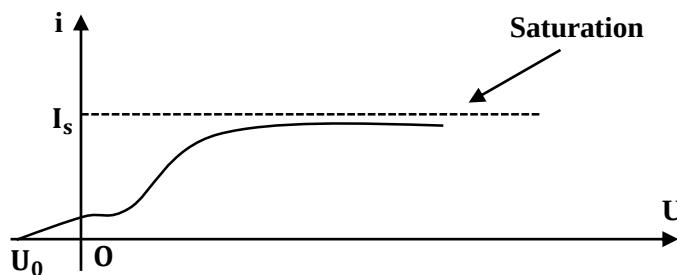
**c. 3<sup>ème</sup> loi :**

Pour toute cellule photoélectrique, il existe un courant de saturation indépendant du métal de l'anode et de la différence de potentiel entre l'anode et cathode.

L'intensité du courant de saturation dépend de l'éclairement de la cathode ; elle est proportionnelle à la puissance rayonnante reçue (ou flux énergétique reçu).

**3. Caractéristique d'une cellule photoélectrique :**

La condition du seuil photoélectrique étant remplie, on peut étudier, pour un flux énergétique invariable, les variations du courant photoélectrique en fonction de la différence de potentiel  $U$  entre l'anode et la cathode. Pour cela, on change le nombre d'élément entre l'anode A et la cathode C, et on mesure dans chaque cas,  $U$  au voltmètre.



$I_s$  est le courant de saturation. Pour  $U = 0$ , il existe un courant faible  $i$ , qu'on peut annuler en donnant à  $U$  une valeur  $U_0$  légèrement négative :  $|U_0|$  est le potentiel d'arrêt.

Quand  $U$  augmente,  $I$  augmente et tend vers une limite  $I_s$  : tous les électrons émis sont captés par l'anode.

**Activité 3 : Interprétation de l'effet photoélectrique**

A partir des lois ci-dessus

**Consigne :** donne l'expression du travail ou de l'énergie d'extraction des électrons à la Cathode puis donne le rendement quantique.

**Synthèse 3 :****III. Interprétation de l'effet photoélectrique : (le photon)**

L'interprétation de l'effet photoélectrique se fait grâce à la théorie d'Einstein.

**1. Définition du photon :**

Le photon est une particule de masse nulle, de vecteur vitesse  $\vec{V}$  tel que  $\|\vec{V}\| = C$  associé à une onde électromagnétique de fréquence  $\nu$  ; c'est le grain de lumière (ou d'énergie).

**2. Interprétation :**

Tout photon d'un faisceau de lumière monochromatique (ou radiation) transporte une quantité d'énergie ou quantum  $W = h\nu$  (proportionnelle à la fréquence  $\nu$  de la radiation et  $h$  est la constante de Planck :  $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ ).

L'extraction des électrons libres de la cathode n'est possible que si l'énergie  $W$  des photons qu'elle reçoit est supérieure au travail d'extraction  $W_0$  des électrons :

- L'énergie d'un photon est :  $W = h\nu$  et  $\nu = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow W = \frac{hc}{\lambda}$
- Le travail d'extraction est :  $W_0 = h\nu_0$  et  $\nu_0 = \frac{c}{\lambda_0} \Rightarrow W_0 = \frac{hc}{\lambda_0}$
- Condition d'extraction :  $W \geq W_0 \Rightarrow h\nu \geq h\nu_0 \Rightarrow \nu \geq \nu_0 \Rightarrow \frac{c}{\lambda} \geq \frac{c}{\lambda_0} \Rightarrow \lambda \leq \lambda_0$
- L'énergie maximale  $W_i$  d'un électron émis par la cathode est :  $W_i = W - W_0$

A l'extraction, l'électron possède une énergie cinétique (énergie initiale) à la cathode telle que :

$$E_{CC} = W_i = \frac{1}{2} m V_i^2 \Rightarrow V_i = \sqrt{\frac{2W_i}{m}} \text{ où } W_i = W - W_0 \Rightarrow E_{CC} = \frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda_0} \Rightarrow E_{CC} = \frac{1}{2} m V_i^2 = hc \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right)$$

- Si  $W = W_0 \Rightarrow E_{CC} = W_i = 0 \Rightarrow V_i = 0$  alors les électrons sont émis à la cathode sans vitesse initiale.
- Si  $W < W_0$  c'est-à-dire  $\lambda > \lambda_0$  ou  $\nu < \nu_0$  alors n'y a pas d'extraction.

La variation de l'énergie cinétique d'un électron entre la Cathode et l'Anode est :  $\Delta E_C = E_{CA} - E_{CC} = eU$

$E_{CA} = \frac{1}{2} m V^2$  l'énergie cinétique de l'électron à l'Anode,  $U$  la tension entre l'Anode et Cathode et  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

**3. Rendement quantique de la cellule :**

C'est le rapport entre le nombre ( $n'$ ) d'électron émis par seconde et le nombre ( $n$ ) de photons arrivant par seconde sur la photocathode :  $\eta = \frac{n'}{n}$

- Le nombre de photon :  $n = \frac{\text{flux énergétique total}}{W} \Rightarrow n = \frac{W_{\text{total}}}{W}$

$$W = h\nu \text{ et } W_{\text{total}} = P \cdot t \Rightarrow n = \frac{P \cdot t}{h\nu} \text{ et } \nu = \frac{C}{\lambda} \Rightarrow n = \frac{\lambda \cdot P \cdot t}{hC}$$

- Et le nombre d'électrons :  $n' = \frac{q}{e}$  et  $q = I_s \cdot t \Rightarrow n' = \frac{I_s \cdot t}{e}$

Où  $t$  est la durée de l'irradiation (en s) et  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

- Alors :  $\eta = \frac{n'}{n} \Rightarrow \eta = \frac{I_s \cdot t}{e} \times \frac{W}{W_{\text{total}}} \Rightarrow \eta = \frac{I_s \cdot t}{e} \times \frac{h\nu}{P \cdot t} \Rightarrow \eta = \frac{h\nu \cdot I_s}{P \cdot e} \Rightarrow \eta = \frac{h \cdot C \cdot I_s}{P \cdot \lambda \cdot e}$

**Activité 4 : Applications**

A partir de tes connaissances

**Consigne** : donne quelques applications de l'effet photoélectrique.

**Synthèse 4 :****IV. Applications de l'effet photoélectrique :**

L'effet photoélectrique est utilisé pour :

- La mise en marche des escaliers,
- L'enregistrement de l'arrivée des courses, du passage des voitures dans une rue,
- L'ouverture automatique des portes,
- L'avertisseur d'incendie,
- La reproduction des sons dans le cinéma parlant,
- Il est utilisé dans les photocopieuses (ou photomultiplicateurs), les cellules photovoltaïques (ou photopiles).

**A savoir :**

L'effet photovoltaïque (dont les électrons sont émis par un semi-conducteur) représente également l'un des manifestations de l'effet photoélectrique (dont les électrons sont émis par un métal).

Lorsque la lumière du soleil frappe les cellules photovoltaïques, ses photons sont absorbés par le matériau semi-conducteur, qui constitue le module solaire (voire le panneau solaire) et un courant électrique est généré.

**Activité 5 : Effet thermoélectrique**

Sachant que la lumière transporte de l'énergie et que la chaleur est une forme d'énergie.

**Consigne** : Les électrons peuvent être émis par matériau sous l'influence de la chaleur ?

**Synthèse 5 :****V. Effet thermoélectrique****1. Définition :**

L'effet thermoélectrique est l'émission d'électron par un matériau sous l'influence de la chaleur. C'est un phénomène physique qui consiste en la conversion directe d'une énergie thermique en électricité, et inversement dans des matériaux appropriés.

**▪ Effet Seebeck :**

Est un effet thermoélectrique, par lequel une différence de potentiel (une tension électrique) apparaît à la jonction de deux matériaux soumis à une différence de température.

Une jonction PN de semi-conducteur extrinsèque sous l'influence de la chaleur, provoque le déplacement des électrons de N à P d'où le passage d'un courant électrique de P à N (d'où une différence de potentiel entre P et N).

**▪ Effet Peltier :**

Est un effet thermoélectrique, par lequel une différence de température apparaît à la jonction de deux matériaux soumis à une différence de potentiel (une tension électrique).

Une jonction PN sous une différence de potentiel (une tension électrique) dégage la chaleur.

**2. Application :**

- L'effet thermoélectrique est appliqué dans l'émission du rayon X : un phénomène dans lequel les électrons s'échappent du filament chauffé (soumis à une différence de température).
- Il est aussi appliqué dans le refroidissement : de cellules de détection dans l'infrarouge et de diodes lasers d'émission utilisées dans les télécommunications par fibre optique.
- Les applications commercialisées actuellement concernent essentiellement le refroidissement (réfrigérateurs portatifs, climatisation automobile, ...).

## Séquence 22

### Unité d'apprentissage 8 : Physique Ondulatoire et Corpusculaire

#### Concept 2 : Niveau d'Energie dans l'Atome d'Hydrogène

##### Pré-évaluation :

- Définis : élément électropositif, cation, ionisation, atome poly-électronique.
- Caractérise l'interaction entre deux charges électriques élémentaires.

##### Situation d'apprentissage :

Le spectre d'un atome est l'ensemble des radiations échangées (émises ou absorbées) par l'atome avec le milieu extérieur. Ces radiations sont sous forme d'ondes électromagnétiques qui peuvent appartenir : au domaine visible, de l'ultra-violet ou de l'infra-rouge. Quelle est l'énergie d'ionisation de l'atome d'hydrogène ?

##### Activité 1 : Définitions

A partir de tes connaissances

**Consigne** : définis les termes suivants : Raie, spectre, niveau d'énergie, transition.

##### Synthèse 1 :

##### I. Définitions :

###### 1. Raie :

La raie est l'image d'une radiation monochromatique.

###### 2. Spectre :

###### a. Définition :

Le spectre est l'ensemble des raies, image des radiations monochromatiques constituant un faisceau lumineux.

###### b. Types de spectre :

Il existe deux types de spectre : Le spectre d'émission et le spectre d'absorption. Chaque type peut être continu ou discontinu.

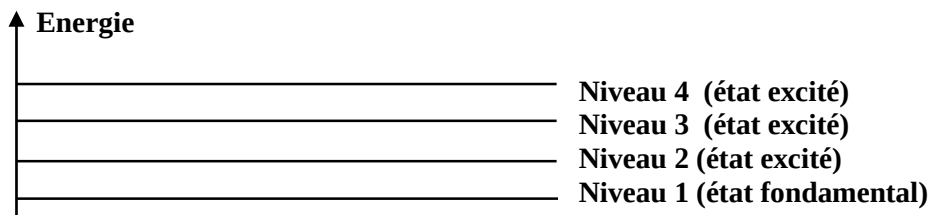
###### 3. Niveau d'énergie :

###### a. Définition :

A toute disposition déterminée des électrons d'un atome, correspond une valeur de l'énergie de l'atome. On dit que l'atome est dans un niveau d'énergie.

###### b. Diagramme énergétique :

C'est l'ensemble des niveaux d'énergie qu'un électron peut avoir dans un atome.



Le niveau d'énergie d'un atome est une disposition déterminée d'un atome correspondant à une valeur de l'énergie de cet atome.

###### 4. Transition :

###### a. Définition :

C'est le passage de l'électron d'un niveau (p) d'énergie à un autre niveau (n).

Chaque couche définie par sa position (son rang : p ou n) correspond à un niveau d'énergie et inversement. Par exemple : un électron qui passe de la première couche (p = 1) à la deuxième couche (n = 2) ou un électron qui passe de la quatrième (p = 4) à la troisième couche (n = 3).

###### b. Energie de transition :

C'est l'énergie émise ou absorbée par un électron lors de la transition, son expression est :

$$\Delta E = h\nu_{n,p} = E_n - E_p \text{ avec } h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s } \text{ c'est la constante de Planck et } \nu = \frac{c}{\lambda}$$

On a :  $E_n = -E_0 \frac{Z^2}{n^2}$  et  $E_p = -E_0 \frac{Z^2}{p^2} \Rightarrow \Delta E = h\nu_{n,p} = -E_0 \frac{Z^2}{n^2} + E_0 \frac{Z^2}{p^2} \Rightarrow \Delta E = h\nu_{n,p} = E_0 \left( \frac{Z^2}{p^2} - \frac{Z^2}{n^2} \right)$

Si  $n > p \Rightarrow \Delta E > 0$ , il y a l'absorption d'énergie ou si  $n < p \Rightarrow \Delta E < 0$ , il y a l'émission d'énergie

### Remarque :

- L'absorption d'un photon correspond au passage de l'électron d'un niveau inférieur à un niveau supérieur.
- L'émission d'un photon correspond au passage de l'électron d'un niveau supérieur à un niveau inférieur.

### Activité 2 : Niveau d'énergie dans l'atome d'hydrogène

#### Consigne :

- Donne l'expression de l'énergie correspondante à un niveau d'énergie pour l'atome d'hydrogène ( $Z = 1$ ).
- Définis l'énergie d'ionisation de l'atome d'hydrogène puis donne son expression ( $H^+$  : l'électron est à l'infini).

### Synthèse 2 :

#### II. Niveau d'énergie dans l'atome d'hydrogène :

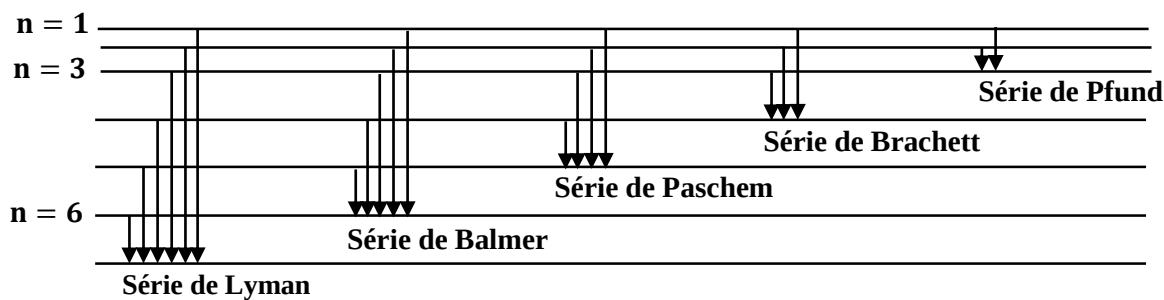
##### 1. Niveau d'énergie :

Pour l'atome d'hydrogène  $Z = 1$ . A chaque niveau correspond une énergie dont l'expression est la suivante :

$$E_n = -E_0 \frac{Z^2}{n^2} \Rightarrow E_n = -E_0 \frac{1^2}{n^2} \Rightarrow E_n = -\frac{E_0}{n^2} \text{ avec } E_0 = 13,6 \text{ eV} = 2,18 \cdot 10^{-18} \text{ J où } n \in \mathbb{N}^*$$

Où  $E_0 = Rhc = \frac{hc}{\lambda_0} \Rightarrow R = \frac{1}{\lambda_0} = \frac{E_0}{hc} = 1,0967 \cdot 10^7$  une constante en ( $m^{-1}$ ) appelée constante de Rydberg.

##### 2. Diagramme énergétique :



##### 3. Différentes types de Séries :

Les différentes séries sont : Série de **Lyman**, Série de **Balmer**, Série de **Paschem**, Série de **Brachett**, Série de **Pfund** représentées sur le diagramme ci-dessus.

##### 4. Energie d'ionisation :

###### a. Définition :

C'est l'énergie minimale qu'il faut fournir à un atome d'hydrogène pour lui arracher son électron.

###### b. Expression :

L'unique électron de l'atome d'hydrogène passe de la première couche ( $p = 1$ ) à la n-nième couche à l'infini ( $n = \infty$ ) c'est une transition à l'extérieur c'est-à-dire à l'infini.

L'expression de l'énergie d'ionisation de l'atome d'hydrogène est :

$$E_i = E_\infty - E_1 = -\frac{E_0}{\infty^2} - \left( -\frac{E_0}{1^2} \right) = 0 + E_0 \text{ d'où } E_i = E_0 \Rightarrow E_i = 13,6 \text{ eV}$$

### A savoir :

Pour l'atome d'hydrogène :  $E_n = -\frac{E_0}{n^2}$  et pour un atome poly-électronique :  $E'_n = -E_0 \frac{Z^2}{n^2} \Rightarrow E'_n = Z^2 E_n$

## Séquence 23

### Unité d'apprentissage 8 : Physique Ondulatoire et Corpusculaire

#### Concept 3 : Rayons X

#### Pré-évaluation :

Définis une onde électromagnétique et donne l'expression de l'énergie transportée une onde électromagnétique.

#### Situation d'apprentissage :

On aura tous à un moment opportun dans notre vie à prendre une ou plusieurs radiographies, que ce soit chez le dentiste ou chez le médecin. Avant tout, il serait très intéressant de comprendre le fonctionnement des rayons X qui sont à l'origine de la radiographie. Les os et les dents sont-ils opaques au rayonnement X ?

#### Activité : Rayons X

##### Consigne :

- Comment peut-on produire les Rayons X par effet thermoélectronique ?
- Quelle est la nature des Rayons X ?
- Quelles sont les propriétés des Rayons X ?
- Donne une application des Rayons X ?

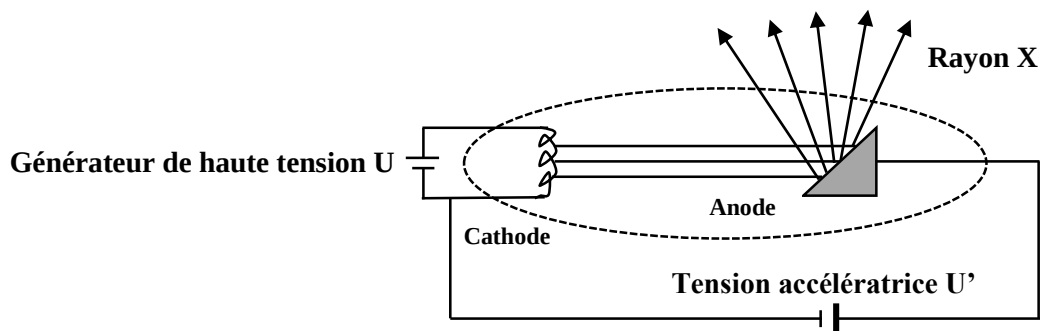
#### Synthèse :

##### I. Production :

Ils sont émis par un métal soumis à un bombardement intense des électrons.

La source usuelle des rayons X est le tube de Coolidge. Il s'agit d'un tube où règne un vide poussé et dans lequel se trouvent deux électrodes : l'anode ou l'anticathode et la cathode.

La cathode, constituée d'un filament de tungstène, émet par effet thermoélectronique, des électrons qui sont projetés sur l'anode. Une plaque de tungstène sortie dans une portion inclinée de l'anode reçoit les électrons et génère les rayons X.



Des rayons X sont générés lorsque des électrons qui s'échappent du filament chauffé (la cathode) sont accélérés par une différence de potentiel  $U'$  et frappent une cible métallique (l'anode). L'ouverture dans la chambre à vide laisse passer les rayons X. Leurs longueurs d'onde sont comprises entre  $10^{-10}\text{m}$  et  $10 \cdot 10^{-8}\text{m}$  dans le vide.

Pratiquement toute l'énergie de l'électron est transférée d'un photon unique, dont la longueur d'onde associée (la plus petite longueur d'onde possible du rayon X) est déterminée par :

$$E = h\nu \text{ et } \nu = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow E = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{avec } c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s et } h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s})$$

La variation de l'énergie cinétique d'un électron entre la Cathode et l'Anode est :  $\Delta E_C = E_{CA} - E_{CC} = eU'$

$E_{CC} = \frac{1}{2} m v_C^2$  : l'énergie cinétique de l'électron à la cathode.

$E_{CA} = \frac{1}{2} m v_A^2$  : l'énergie cinétique de l'électron à l'Anode,  $U'$  la tension entre l'Anode et Cathode et  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Du point de vue théorique : l'émission du rayon X est un échange entre la matière et la lumière ( $h\nu$ ) :  $E = h\nu = \frac{1}{2} m v_A^2$

##### II. Nature :

Les rayons X sont des radiations de même nature que la lumière. Ils sont produits en bombardant une cible avec des électrons animés d'une très grande vitesse.

Ils sont constitués par des photons de grande énergie, associés à des radiations électromagnétiques de courtes longueurs d'ondes.

### III. Propriétés :

- Les rayons X excitent la luminescence de certains corps. Ils impressionnent les émulsions photographiques ;
- Les rayons X ionisent les gaz ;
- Les rayons X se propage en ligne droite à travers les corps ;
- Les rayons X, pour une substance et une épaisseur données, l'absorption augmente avec la longueur d'onde du faisceau X.

### IV. Application :

De l'absorption découlent d'importantes applications, par exemple : Radiographie du corps humain : elle utilise le fait qu'ils sont absorbés de manière différente par les tissus et par les os qui apparaissent opaques.

Les os et les dents constitués de calcium et phosphore absorbent les rayons X plus que les autres tissus du corps humain.

## Séquence 24

### Unité d'apprentissage 9 : Physique Atomique et Nucléaire

#### Concept : Le Noyau Atomique et les Réactions Nucléaires

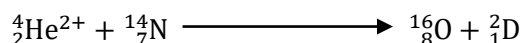
#### Pré-évaluation :

- Définis : Transformation chimique, transformation physique, élément chimique, isotopes d'un même élément chimique, nucléon.
- Donne la composition du noyau de l'atome.

#### Situation d'apprentissage :

Marie Curie a donné le nom de radioactivité à la propriété que possèdent certains éléments de se transformer spontanément en émettant de l'énergie (sous forme de rayonnement). Ce phénomène avait été découvert, en 1896, par Henri Becquerel (il avait observé que certains minerais contenant de l'uranium avaient la propriété d'émettre un rayonnement doué de caractères communs avec les rayons X). En 1898, Pierre et Marie Curie réussirent à extraire de minerais d'uranium deux éléments beaucoup plus actifs que celui-ci : le polonium et le radium.

En 1919, Rutherford réalisa l'expérience suivante : une enceinte contenant des noyaux d'azote est bombardée à l'aide des particules  $\alpha$ . Après éloignement de la source radioactive  $\alpha$ , l'enceinte contient des noyaux d'oxygène. La transformation ainsi réalisée, des noyaux d'azote en noyaux d'oxygène est appelée transmutation dont l'équation de la réaction nucléaire provoquée est :



Quel est la nature de cette réaction ?

#### Activité 1 : Noyau Atomique

A partir de tes connaissances,

##### Consigne :

- Donne : la caractéristique et la composition du noyau.
- Définis : nucléide, isotopes et l'élément chimique.
- Donne l'expression de : la masse du noyau à partir de ses nucléons et l'énergie de liaison.

#### Synthèse 1 :

##### I. Le noyau Atomique :

L'étude du noyau atomique est l'objet de la physique nucléaire.

##### 1. Caractéristique du noyau :

Le noyau est assimilé à une sphère de rayon environ égal à  $10^{-14}$  m c'est-à-dire 10Fm (Fm = fermi), 1Fm= $10^{-15}$ m.

##### 2. Composition du noyau :

Le noyau d'un atome est formé de particules appelées nucléons. Ce sont des protons (au nombre de Z) et des neutrons (au nombre N). On représente un noyau par :

$${}^A_Z\text{X} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{X} = \text{symbole de l'élément} \\ \text{A} = \text{nombre de masse} \\ \text{Z} = \text{numéro atomique de l'élément} \end{array} \right.$$

##### 3. Les nucléides :

- Tous les atomes ayant même Z et même A forment le nucléide. Un nucléide est caractérisé par les nombres A et Z.
- Deux nucléides isotopes ont même nombre de protons mais différent par leurs nombres de neutrons.
- Tous les nucléides qui ont même Z appartiennent au même élément chimique.

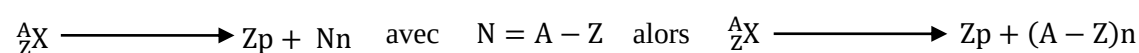
Exemple :  ${}^1_1\text{H}$ ,  ${}^2_1\text{H}$ , et  ${}^3_1\text{H}$

A savoir : On appelle composition isotopique la teneur relative en chacun des isotopes.

##### 4. Equivalence masse-énergie :

###### a. Défaut de masse d'un noyau :

Soit un noyau  ${}^A_Z\text{X}$  contenant des nucléons tel :



(dont p est le proton et n est le neutron)

La somme des masses des nucléides est :  $\sum m = Z \cdot m_p + N \cdot m_N \Rightarrow \sum m = Z \cdot m_p + (A - Z)m_N$  or la masse  $m_X$  du noyau est toujours inférieure à la somme de ses constituants pris individuellement.

$m_X < Z \cdot m_p + (A - Z)m_N$  on pose  $\Delta m = [Z \cdot m_p + (A - Z)m_N] - m_X$  est appelé le défaut de masse.

Le défaut de masse d'un noyau est la différence entre la somme des masses de ses nucléides pris séparément et la masse du noyau ; il est toujours positif.

### b. Relation d'Einstein :

Dans sa théorie sur la relativité restreinte, Albert Einstein a montré que la masse est une forme de l'énergie. Cela signifie que tout système matériel de masse  $m$ , au repos, possède une énergie  $E$  encore appelée énergie de masse telle que :  $E(J) = m(kg) \cdot C^2$  relation d'Einstein avec  $C = 3 \cdot 10^8 m/s$ .

En conséquence si un système matériel, dans un état déterminé fournit une énergie  $E$  au milieu extérieur sa masse diminue de  $m = \frac{E}{C^2}$ , si le système capte l'énergie  $E$ , sa masse augmente de  $m = \frac{E}{C^2}$ . La grandeur masse-énergie est conservée pour un système matériel isolé.

### Exemple du proton :

$$E = m_p \cdot C^2 = 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 1,50 \cdot 10^{-10} J$$

On utilise l'électron volt et son multiple (méga électron volt)  $1 MeV = 1,60 \cdot 10^{-13} J \Rightarrow E = 938 MeV$  et  $m_p = \frac{938}{C^2} MeV/c^2$

### c. Unité de masse :

Son symbole est  $U$  et  $U = \frac{M}{A \cdot N_{\text{Avogadro}}}$  tel que : carbone  $^{12}_6C$  alors  $1U = \frac{12 \cdot 10^{-3}}{12 \times 6,02 \cdot 10^{23}} \Rightarrow U = 1,66 \cdot 10^{-27} kg$

On obtient le tableau suivant :

|                             | Proton                        | Neutron                       | Electron                      |
|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Symbole                     | <b>p</b>                      | <b>n</b>                      | <b>e</b>                      |
| Masse U                     | <b>1,00728</b>                | <b>1,00866</b>                | <b>5,486.10<sup>-4</sup></b>  |
| Masse en kg                 | <b>1,672.10<sup>-27</sup></b> | <b>1,674.10<sup>-27</sup></b> | <b>9,109.10<sup>-31</sup></b> |
| Masse en MeV/c <sup>2</sup> | <b>938,280</b>                | <b>939,573</b>                | <b>0,51100</b>                |
| Charge en C                 | <b>+1,6.10<sup>-19</sup></b>  | <b>0</b>                      | <b>-1,6.10<sup>-19</sup></b>  |
| Energie en MeV              | <b>938,280</b>                | <b>939,573</b>                | <b>0,51100</b>                |

### 5. Énergie de liaison :

Au défaut de masse il correspond à  $E_l = \Delta m C^2$  appelée énergie de liaison du noyau.

Donc  $E_l = [(Z \cdot m_p + (A - Z)m_N)] - m_X] C^2$  c'est l'énergie qu'il faut fournir pour briser un noyau en ses nucléons et inversement, c'est l'énergie libérée lorsqu'un noyau se forme à partir de ses nucléons séparés.

Le rapport  $\frac{E_l}{A}$  est appelé, l'énergie de liaison par nucléon. Il caractérise la stabilité du noyau. Un atome est d'autant plus stable que  $\frac{E_l}{A}$  est plus grand.

### Activité 2 : Les réactions nucléaires

#### Consigne :

- A partir de l'expérience de Rutherford, définis la radioactivité :
- Donne les rayonnements issus de la radioactivité.
- Définis la fission et fusion nucléaires.
- Donne quelques applications de la radioactivité.

### Synthèse 2 :

#### II. Les réactions nucléaires :

##### 1. Définition de radioactivité :

Certains nucléides, naturels ou artificiels se désintègrent en émettant une énergie (sous forme de rayonnement). Ces nucléides sont dits radioactifs et le phénomène est appelé radioactivité (ou une réaction nucléaire).

Le noyau qui se désintègre est le noyau père, celui qui est obtenu est le noyau fils. L'ensemble père, fils, tous ses descendants constituent une famille radioactive.

**2. Propriétés de la désintégration :**

La désintégration radioactive est :

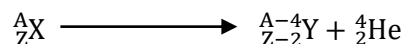
- **Aléatoire** : il est impossible de prévoir l'instant où se produira la désintégration d'un noyau,
- **Spontané** : la désintégration se produit sans aucune intervention extérieure,
- **Indélectable** : un noyau radioactif se désintégrera tôt ou tard,
- **Indépendante** : elle est indépendante de la combinaison chimique dont le noyau radioactif fait partie, et des paramètres extérieurs tels que la pression ou la température.

**3. Les principaux rayonnements :**

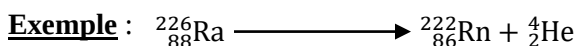
On note les rayonnements radioactifs :  $\alpha$ ,  $\beta^-$ ,  $\beta^+$  et  $\gamma$

**a. Le rayonnement  $\alpha$  :**

Ce phénomène est caractérisé par des noyaux lourds ( $A > 150$ ). Le noyau expulse un noyau d'hélium formé de deux protons et de deux neutrons.



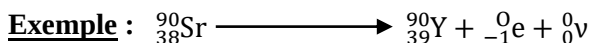
Les particules  $\alpha$  sont expulsées avec une vitesse relativement modestes et sont arrêtées par quelques centimètres d'air ou par une feuille de papier, mais elles sont très ionisantes et donc dangereuses.

**b. Le rayonnement  $\beta^-$  :**

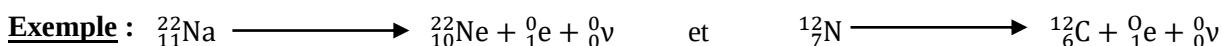
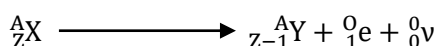
Il est formé d'électrons. Il correspond à une transformation isobarique (c'est-à-dire qu' $A$  ne change pas). Le noyau ( $A, Z, N$ ) se transforme en noyau ( $A, Z+1, N-1$ )



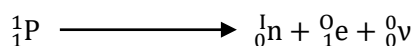
Selon Poulie, une partie de l'énergie libérée est emportée par une nouvelle particule, le neutrino de masse et de charge nulle, se déplaçant à la vitesse de la lumière et qui est représentée par le symbole  ${}^0_0\nu$ . Sa formation assure la conservation de l'énergie. Les particules  $\beta^-$  sont assez peu pénétrantes. Elles sont arrêtées par quelques millimètres d'aluminium.

**c. Le rayonnement  $\beta^+$  :**

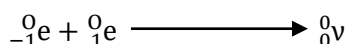
Il est constitué par des positrons, particules de même masse que l'électron (prévu par Dirac, mise en évidence posée la première fois par Anderson en 1932). Le noyau ( $A, Z, N$ ) se transforme en noyau ( $A, Z-1, N+1$ )



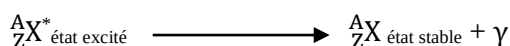
Un proton se transforme en neutron avec émission d'un positron et d'un neutrino. Le positron et neutrino se répartissent à l'énergie disponible :

**A savoir :**

Les particules  $\beta^+$  ont une durée de vie très courte. Lorsqu'elles rencontrent un électron, les deux particules s'annihilent pour donner de l'énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique  $\gamma$  suivant le bilan :

**d. Le rayonnement  $\gamma$  :**

Le noyau fils est en général obtenu dans un état excité (niveau d'énergie élevé). Le noyau fils ne reste pas dans cet état instable, il évacue cette énergie excédentaire en émettant un rayonnement électromagnétique, on dit se désexcite. Cette émission apparaît donc, comme un phénomène secondaire de la radioactivité :



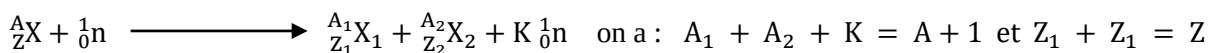
Le retour à l'état stable se fait par l'émission d'un photon. La radioactivité accompagne souvent les émissions et par rapport aux quelles elle est beaucoup plus pénétrante.

Il est formé par des rayons très pénétrants qui ne sont déviés ni par le champ électrique, ni par le champ magnétique. Ils sont de nature électromagnétique et leur vitesse est  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ , leur longueur d'onde  $\lambda = 10^{-11}$  à  $10^{-13} \text{ m}$ . Ils peuvent traverser plusieurs centimètres de plomb. Le rayonnement n'affecte ni A, ni Z, mais seulement le niveau d'énergie d'un noyau qui vient d'être perturbé dans ses profondeurs par une désintégration.

#### 4. Les réactions nucléaires provoquées (ou artificielles) :

##### a. Fission nucléaire : Réaction en chaîne

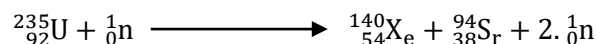
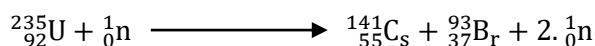
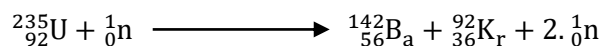
Sous l'impact d'un neutron, un noyau lourd (dit fissile) peut éclater pour donner des noyaux plus légers et des neutrons, avec libération d'énergie : c'est la fission.



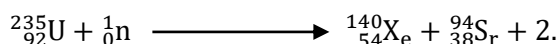
##### A savoir :

Les neutrons émis lors de la fission peuvent à leur tour provoquer la fission d'autres noyaux. Si le nombre de neutrons émis lors de chaque fission est supérieur à un, il peut se produire une réaction en chaîne qui devient rapidement incontrôlable (principe de la bombe à fission).

**Exemple de nucléide fissile :** Plusieurs réactions de fission de l'uranium 235 naturel sont possibles



##### Bilan d'énergie d'une réaction de fission :



- **Masses :** Les masses sont :

$$m({}_{92}^{235}\text{U}) ; m({}_{38}^{94}\text{Sr}) ; m({}_{54}^{140}\text{Xe}) \text{ et } m({}_0^1n)$$

- **Defaut de masse du noyau U :**

$$\Delta m = [m({}_{54}^{140}\text{Xe}) + m({}_{38}^{94}\text{Sr}) + 2m({}_0^1n)] - [m({}_{92}^{235}\text{U}) + m({}_0^1n)]$$

$$\text{Alors } \Delta m = [m({}_{54}^{140}\text{Xe}) + m({}_{38}^{94}\text{Sr}) + m({}_0^1n)] - m({}_{92}^{235}\text{U})$$

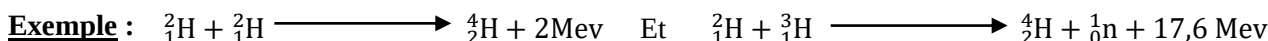
Si  $\Delta m < 0$  alors la masse du système diminue donc il fournit de l'énergie au milieu extérieur.

Si  $\Delta m > 0$  alors la masse du système augmente donc il reçoit de l'énergie.

- **Energie :**  $E = |\Delta m|c^2$

##### b. La fusion nucléaire :

C'est une réaction au cours de laquelle deux ou plusieurs noyaux légers s'unissent pour former un noyau plus lourd en libérant une énorme énergie.



Du fait de l'apport d'énergie qui peut atteindre ces réactions sont dites thermonucléaires.

#### 5. La loi de décroissance radioactive :

##### a. Etablissement de la loi :

Lors de la désintégration, nous notons :

Par  $N_0$  le nombre initial de noyau (ou atomes) radioactifs X,

Par N leur nombre à l'instant t et par  $N + dN$  leur nombre à l'instant  $t + dt$ .

$$X \rightarrow Y + P \text{ à } t = 0 \text{ on a } N_0 ; \text{ à } t \neq 0 \text{ on a } N ; \text{ à } t + dt \text{ on a } N + dN \text{ (N diminue au cours du temps car } dN < 0)$$

$$\Rightarrow N - (N - dN) = -dN \text{ nombre de noyau désintégrés entre instants } t \text{ et } t + dt.$$

Le nombre de désintégration est proportionnel au temps pendant lequel le phénomène se déroule et au nombre de noyaux présents pendant l'observation d'où on écrit :  $-dN = \lambda \cdot N \cdot dt$  ( $\lambda$  une constante) dépendant de X.

$\lambda$  est appelé constante radioactive du nucléide. N s'obtient à partir de  $\frac{dN}{N} = -\lambda \cdot dt$  par intégration

$$\int \frac{dN}{N} = -\lambda \int dt \Rightarrow N = N_0 e^{-\lambda t} \text{ c'est la loi de décroissance radioactive et la constante de temps est } \tau = \frac{1}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{1}{\tau}$$

Le nombre de noyaux radioactifs diminue exponentiellement en fonction du temps, de même on a :  $m = m_0 e^{-\lambda t}$  m étant la masse de l'échantillon radioactif.

$$\text{Alors : } \begin{cases} N = N_0 e^{-\lambda t} \\ m = m_0 e^{-\lambda t} \end{cases} \Rightarrow \frac{N}{N_0} = \frac{m}{m_0} \text{ où } N_0 = \frac{m_0}{m_{\text{noy}}} \text{ et } m_{\text{noy}} = M \cdot U \Rightarrow N_0 = \frac{m_0}{M \cdot U} \text{ ainsi que : } N = \frac{m}{M \cdot U}$$

### b. Période radioactive T d'un nucléide :

C'est le temps T nécessaire pour que la moitié des noyaux de ce nucléide subisse la désintégration :

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \text{ pour } N = \frac{N_0}{2} \Rightarrow \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda T} \Rightarrow \ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\lambda T \Rightarrow \ln 1 - \ln 2 = -\lambda T \Rightarrow \ln 2 = \lambda T$$

$$\text{Alors : } T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \text{ cette période porte également le nom de demi-vie radioactive.}$$

### c. Activité d'une source radioactive :

On appelle activité d'un échantillon radioactif, le nombre de désintégration par unité de temps.

$$a = \lambda N \Rightarrow a = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow a = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \text{ ou } a = a_0 e^{-\lambda t} \text{ tel que : } a_0 = \lambda N_0$$

### A savoir :

Plus le temps de demi-réaction est courte, plus l'activité d'une source est grande, plus elle est dangereuse.

$$\text{On a : } a = a_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow \frac{a}{a_0} = e^{-\lambda t} \Rightarrow \ln\left(\frac{a}{a_0}\right) = -\lambda t \text{ alors : } t = \frac{\ln\left(\frac{a}{a_0}\right)}{\lambda}$$

d'où le principe de la datation d'un objet très ancien à l'aide d'un radioélément.

## 6. Applications :

### a. Dans la recherche :

En détruisant certains noyaux on peut en fabriquant d'autres de masse inférieure ou supérieure. Ainsi on fabrique les éléments artificiels.

### b. Dans le domaine de la biologie et la biochimie :

La radioactivité intervient :

- dans l'étude de la mutation génétique des cellules végétales ;
- au niveau des traceurs radioactifs : Dans l'étude cinétique d'une réaction d'étude du mécanisme réactionnel, l'assimilation d'aliments dans l'organisme.

### c. Dans la médecine :

Les applications de la radioactivité portent sur : La destruction des cellules cancéreuses (curiethérapie).

### d. Couramment d'autres applications portent sur :

- le traitement des déchets radioactifs ;
- la datation au carbone 14.