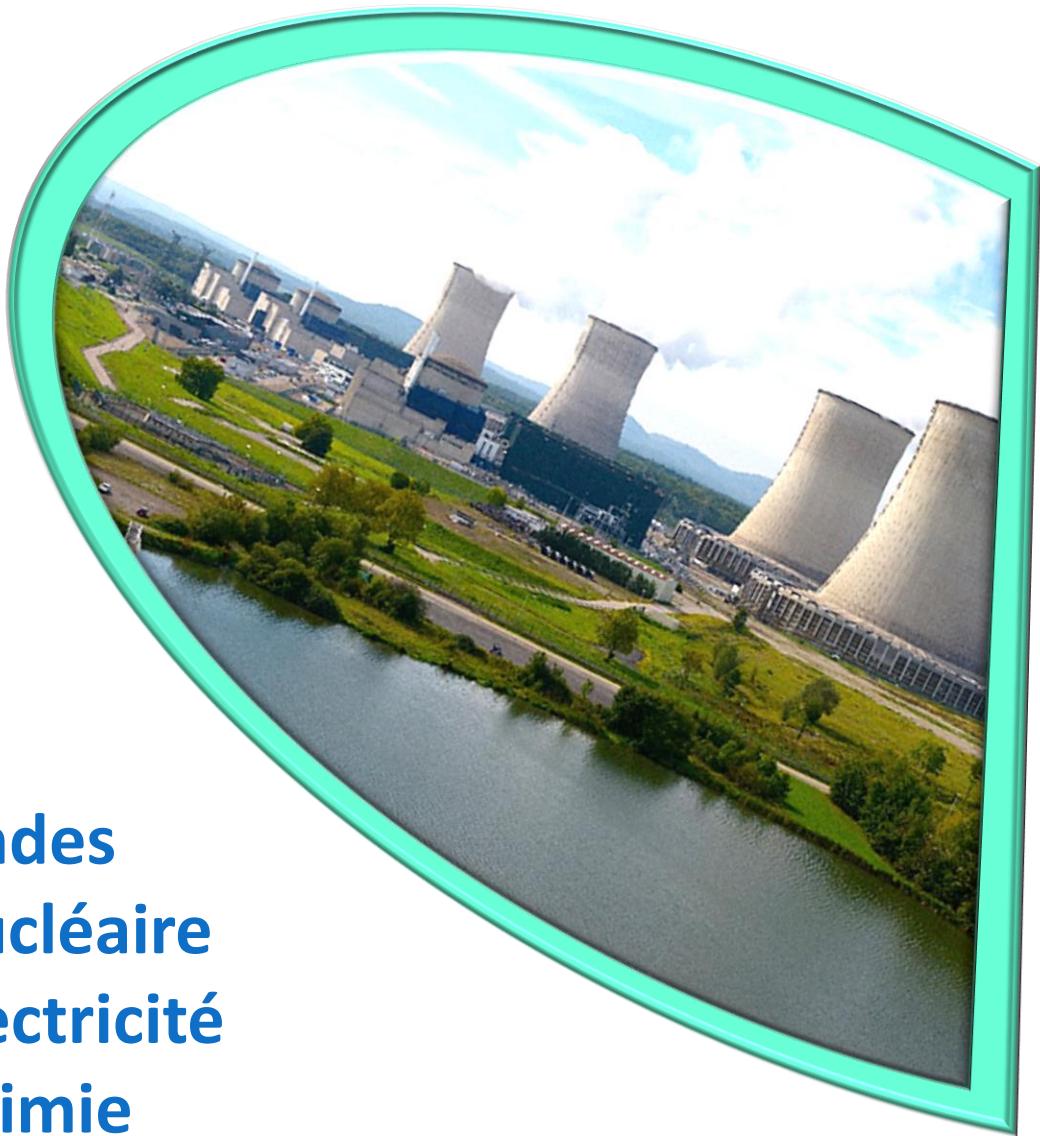


ÉLECTRON

PHYSIQUE-CHIMIE



- Ondes
- Nucléaire
- Électricité
- Chimie

Partie 1 → Guide de prof → 2BACF

Option → Sciences physiques

Réalisé par :

Sommaire

Physique

❖ Ondes	4
▪ Les ondes mécaniques progressives.....	5
▪ Les ondes mécaniques progressives périodiques.....	13
▪ Propagation d'une onde lumineuse	23
❖ Nucléaire	35
▪ Décroissance radioactive	36
▪ Noyaux –masse et énergie.....	48
❖ Électricité	60
▪ Dipôle RC	61
▪ Dipôle RL	76
▪ Les oscillations libres dans un circuit RLC série	89
▪ Transmission d'informations – Modulation d'amplitude	99

Chimie

❖ Transformations rapides et transformations lentes d'un système chimique	113
▪ Transformations rapides et transformation lentes	114
▪ Suivi temporel d'une transformation chimique – Vitesse de réaction	124
❖ Transformations non totales d'un système chimique	136
▪ Transformations chimiques s'effectuant dans les deux sens.....	137
▪ État d'équilibre d'un système chimique	149
▪ Transformations liées aux réactions acidobasiques dans une solution aqueuse	159

Devoirs..........175

Bibliographies utilisées213

Préface

Ce livre est destiné aux élèves de la deuxième année du baccalauréat série sciences expérimentales option sciences physiques et aux enseignants de la matière physique-chimie. Il a été conçu selon les approches et les orientations officielles marocaines.

D'autre part l'élève peut répondre aux exercices et activités directement sur les pages du livre ou les couper et les coller dans son cahier.

Nous espérons que vous trouverez dans ce livre un outil qui vous aidera à améliorer vos apprentissages et à renforcer vos compétences et d'assurer une bonne performance.

PARTIE I : LES ONDES

1

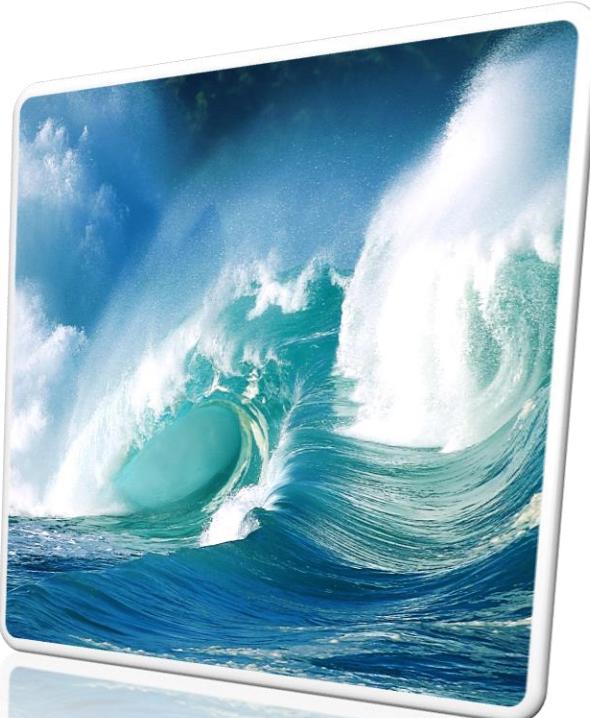
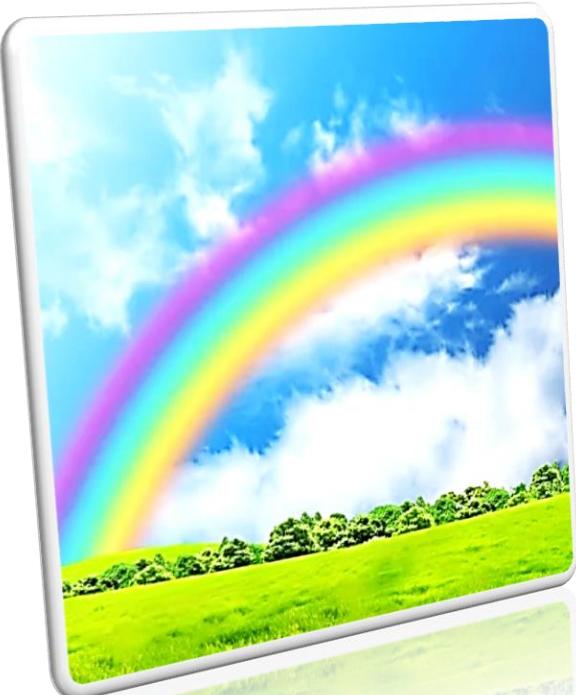
Les Ondes Mécaniques Progressives

2

Les Ondes Mécaniques Progressives Périodiques

3

Propagation d'une Onde Lumineuse





Situation-problème

Lorsqu'on laisse tomber un caillou sur la surface de l'eau , des rides (des vagues) se forment et se propagent à la surface de l'eau . Ce sont des ondes mécaniques .

- 💡 Qu'est-ce qu'une onde mécanique ?
- 💡 Quelles sont ses caractéristiques ?
- 💡 Quels sont les différents types d'ondes mécaniques ?

Objectifs

- 💡 Définir l'onde mécanique et sa célérité .
- 💡 Définir et reconnaître une onde transversale et longitudinale .
- 💡 Connaitre et exploiter les propriétés générales des ondes .
- 💡 Utiliser un dispositif expérimental pour mesurer un retard temporel ou une distance lors de propagation d'une onde mécanique .
- 💡 Exploiter la relation entre le retard , la célérité et la distance .

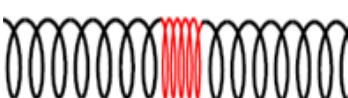
I Ondes mécaniques progressives et ses caractéristiques

① Activité : Notion d'onde mécanique

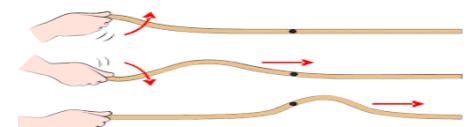
On laisse tomber un caillou sur la surface de l'eau .



On comprime quelques spires d'un ressort puis on les libère .



On provoque une perturbation à l'extrémité d'une corde .



Exploitation

- ① Donner une description de ce qui se propage sur la surface de l'eau après la chute du caillou.
- ② Quelle est la nature du milieu de propagation dans chacune des trois expériences ?
- ③ Proposer une définition de l'onde mécanique.
- ④ La propagation de l'onde est- elle accompagnée du transport de matière ?
 - ① On observe que , l'impact du caillou à la surface provoque une déformation au point d'impact . Cette déformation se propage à la surface de l'eau sous forme des anneaux circulaires dont leur centre est le point d'impact .
 - ② Le milieu de propagation dans l'expérience 1 est l'eau , dans l'expérience 2 est le ressort , et dans l'expérience 3 est la corde ; ces trois milieux sont des milieux matériel élastiques .
 - ③ Le phénomène de propagation d'une perturbation(déformation) dans un milieu matériels élastique est appelé onde mécanique .
 - ④ On observe que les points constituant le milieu de propagation se déplacent lors de propagation de l'onde puis ils reviennent à leurs positions initiales , ce qui montre que la propagation de l'onde n'est pas accompagnée du transport de la matière .

② Définition

L'onde mécanique : Est le phénomène de propagation d'une perturbation dans un milieu matériel élastique sans transport de la matière constituant ce milieu mais avec transfert d'énergie .

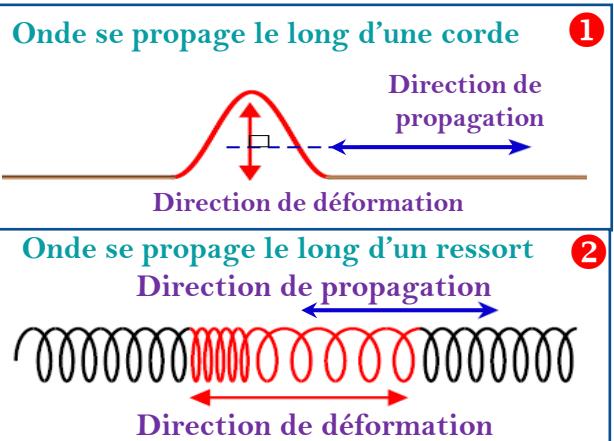
③ Les différents types d'ondes mécaniques

A-Activité

- L'onde est dite transversale si la direction de perturbation est perpendiculaire à celle de propagation .
- L'onde est dite longitudinale si la direction de perturbation et la direction de propagation sont parallèles entre elles .

Exploitation

- ① Pour les deux expériences comparer la direction de déformation avec celle de propagation , puis identifier la nature de chacune des deux ondes .



- Dans l'expérience ① , la direction de perturbation est perpendiculaire à celle de propagation. Donc l'onde se propageant le long de la corde est transversale .
- Dans l'expérience ② , la direction de perturbation est parallèle à celle de propagation. Donc l'onde se propageant le long du ressort est longitudinale .

B-Conclusion

- L'onde transversale** : Est celle dont la direction de perturbation est perpendiculaire à la direction de propagation .
- L'onde longitudinale** : Est celle dont la direction de perturbation et la direction de propagation sont parallèles entre elles .

❖ **Exemple :** L'onde qui se propage à la surface de l'eau est une onde mécanique transversale



II Ondes sonores

① Activité : Mise en évidence de l'onde sonore

Expérience 1 : Propagation d'une onde sonore

On met une source sonore sous la cloche , puis on crée le vide dans la cloche à l'aide d'une pompe

Observation

Lorsqu'on crée le vide dans la cloche , on remarque que le son émet par la source sonore a disparu .

① Que peut-t-on dire sur la nature du son ?

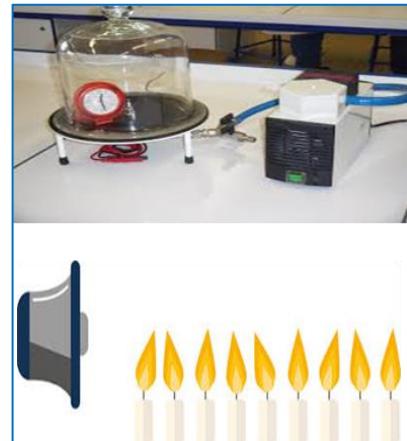
Expérience 2 : nature de l'onde sonore

Lorsqu'on fonctionne le haut-parleur on remarque que la flamme de bougie se déplace horizontalement suivant la direction de propagation de l'onde sonore

② L'onde sonore est-elle transversale où longitudinale ?

① La disparition du son après avoir vidé la cloche d'air , montre que le son nécessite un milieu matériel pour se propager. On conclut que le son est une onde mécanique .

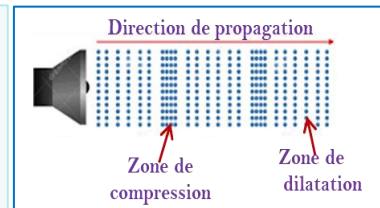
② Puisque la flamme de bougie se déplace horizontalement suivant la direction de propagation de l'onde sonore, alors le son est une onde mécanique longitudinale .



② Conclusion :

Le son est une onde mécanique progressive longitudinale se propage dans les milieux matériels élastiques (solide , liquide et gaz) et ne se propage pas dans le vide .

L'onde sonore se propage grâce à une compression et un dilatation des couches constituants le milieu de propagation .



III Les propriétés générales d'une onde mécanique

① Direction de propagation d'une onde mécanique

Une onde mécanique se propage , à partir de sa source , dans toutes les directions qui lui sont offertes .

Le long de la corde et le ressort , l'onde se propage dans un milieu unidimensionnel .

À la surface de l'eau , l'onde se propage dans un milieu bidimensionnel (un plan) .

L'onde sonore se propage dans un milieu tridimensionnel (l'espace)

② La superposition de deux ondes mécaniques

Lorsque deux ondes mécaniques (d'une perturbation très faible) se croisent , elles se superposent et continuent à se propager après leur rencontre sans de perturber (elles gardent la même forme et la même célérité).

Lors de leur rencontre , les amplitudes des deux s'ajoutent .



IV La vitesse de propagation d'une onde mécanique

① Définition

On définit la vitesse de propagation d'une onde mécanique dans un milieu matériel élastique homogène par la relation suivant : $V = \frac{d}{\Delta t}$ avec d (en mètre m) est la distance parcourue par l'onde pendant la durée Δt en (seconde s) .

❖ Application

On crée en un point **S** de la surface de l'eau , à un instant $t_0 = 0$, une onde mécanique ; cette onde atteint un point **M** situé à une distance $d = 8\text{cm}$ de **S** à un instant $t_M = 15\text{ms}$

① Calculer la vitesse de propagation de l'onde à la surface de l'eau .

② Trouver la valeur de la date t_N correspond au passage de l'onde par un point **N** situé à une distance $d' = 12\text{cm}$ de la source **S** .

③ Calculons la vitesse de propagation de l'onde à la surface de l'eau .d'

$$\text{On a : } V = \frac{d}{\Delta t}$$

$$\text{A.N: } V = \frac{8 \times 10^{-2}}{15 \times 10^{-3}} = 5,33 \text{m.s}^{-1}$$

$$\text{② On a : } V = \frac{d'}{\Delta t'}$$

$$\text{Donc : } \Delta t' = \frac{d'}{V} \text{ avec } \Delta t' = t_N - t_0 = t_N$$

$$\text{D'où : } t_N = \frac{d'}{V} = \frac{12 \times 10^{-2}}{5,33} = 22,5\text{ms}$$

② Facteur influençant la vitesse de propagation d'une onde mécanique

Dans un milieu matériel élastique et homogène , la vitesse de propagation d'une onde mécanique est constante et indépendante de la forme de la perturbation . Tandis qu'elle dépend de la nature du milieu : son élasticité , son inertie et sa température .

❖ Exemples

- La vitesse de propagation d'une onde mécanique le long d'une corde est : $\mathbf{v} = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$ où F est la tension de la corde et μ sa masse linéique ($\mu = \frac{m}{L}$ avec L la longueur de la corde en mètre (m) et m sa masse en kilogramme (kg)).
- La vitesse de propagation d'une onde mécanique à la surface de l'eau est : $\mathbf{v} = \sqrt{g \cdot h}$ où g est l'intensité de la pesanteur en ($m \cdot s^{-2}$) et h la profondeur de l'eau en (m).

❖ Application

Une onde se propage le long d'une corde tendue de masse $m = 60g$ et de longueur $L = 4m$ et de tension $F = 3N$

- ① Calculer la vitesse de propagation de l'onde le long de la corde .
- ② Quel est le temps mis par l'onde pour parcourir la corde tout entière ?

① Calculons la vitesse de propagation de l'onde le long de la corde .

$$\text{On a : } \mathbf{v} = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \text{ avec } \mu = \frac{m}{L}$$

$$\text{Donc : } \mathbf{v} = \sqrt{\frac{F \cdot L}{m}}$$

$$\text{A.N : } \mathbf{v} = \sqrt{\frac{3 \times 4}{60 \times 10^{-3}}} = 19,15 \text{ m.s}^{-1}$$

② Calculons le temps mis par l'onde pour parcourir la corde tout entière.

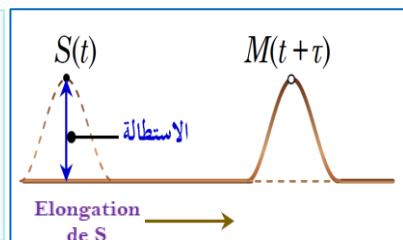
$$\text{On a : } V = \frac{d}{\Delta t} \text{ avec } d = L$$

$$\text{Donc : } \Delta t = \frac{L}{V}$$

$$\text{A.N : } \Delta t = \frac{4}{19,15} \approx 0,21 \text{ s}$$

③ Le retard temporel

Lors de propagation d'une onde mécanique non amortie (l'amplitude de la perturbation se conserve au cours du la propagation de l'onde), tous les points du milieu de propagation subissent la même perturbation que la source , mais avec un retard temporel τ_M tel que : $\tau_M = t_M - t_S = \frac{s_M}{v}$

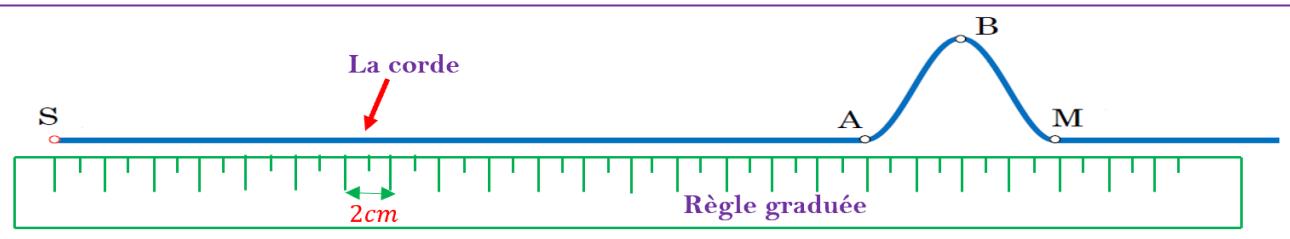


La relation entre l'élongation d'un point M du milieu de propagation et celle de la source S est : $y_M(t) = y_S(t - \tau)$ ou $y_S(t) = y_M(t + \tau)$

Série d'exercices

Exercice 1

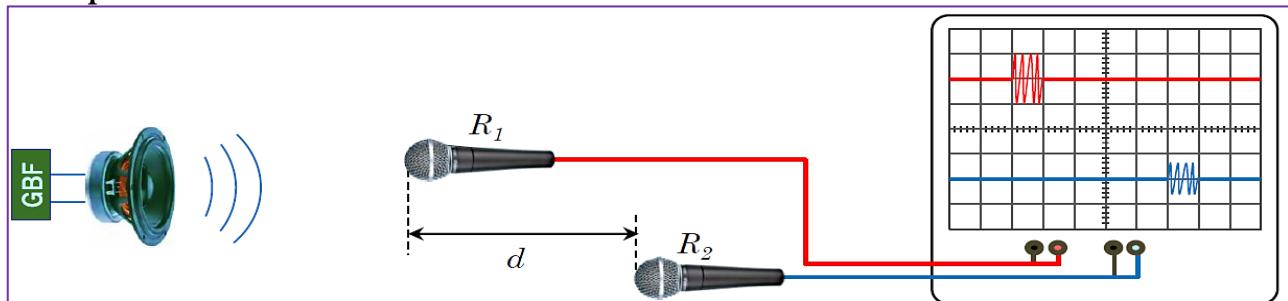
On crée à l'extrémité **S** d'une corde à un instant $t_0 = 0$, une onde mécanique. La figure ci-dessous représente l'aspect de la corde à un instant $t_1 = 15\text{ms}$



- ① Quelle est la nature de l'onde ? (longitudinale ou transversale). Justifier votre réponse
- ② Déterminer à l'instant t_1 les points qui se dirigeront vers le bas ainsi que ceux se dirigeront vers le haut.
- ③ Calculer la valeur de la vitesse de propagation de l'onde le long de la corde .
- ④ Pendant quelle durée un point de la corde est-il affecté par le passage de l'onde ?
- ⑤ À quel instant s'arrête le point **M** ?
- ⑥ À quel instant l'onde arrive au point **N**, tel que $SN = 20\text{cm}$?

Exercice 2

Pour mesurer la vitesse de propagation des ondes sonores dans l'air on réalise le montage expérimental représentant ci-dessous, la distance entre les deux microphones R_1 et R_2 est $d = 1,7\text{m}$. La courbe ci-dessous représente la variation de la tension aux bornes de chaque microphone .



Données

- La sensibilité horizontale : $S_x = 1\text{ms/div}$
- La célérité des ondes sonores dans l'eau : $V_{eau} = 1500\text{m/s}$
- La température : $T = 25^\circ\text{C}$

- ① Quelle est la nature de l'onde sonore ?(longitudinale ou transversale). Justifier la réponse .
- ② Déterminer la valeur du retard temporel τ entre les microphones R_1 et R_2 .
- ③ Déduire la valeur de V_{air} la célérité des ondes sonores dans l'air .
- ④ Déterminer la valeur du retard temporel τ' , lorsqu'on déplace le microphone R_2 vers la droite à partir de sa position initiale d'une distance $d' = 51\text{cm}$
- ⑤ Comparer V_{air} et V_{eau} . Que peut-t-on déduire ?



Situation-problème

La houle (onde de la mer) peut être considérée comme une onde mécanique périodique.

Lorsque cette onde traverse un détroit sa forme change lorsqu'elle se propage dans l'autre côté.

- ☞ Qu'est-ce qu'une onde mécanique périodique ?
- ☞ Quelles sont ses caractéristiques ?
- ☞ Que se passe-t-il lorsqu'une onde rencontre un obstacle avec une ouverture ?

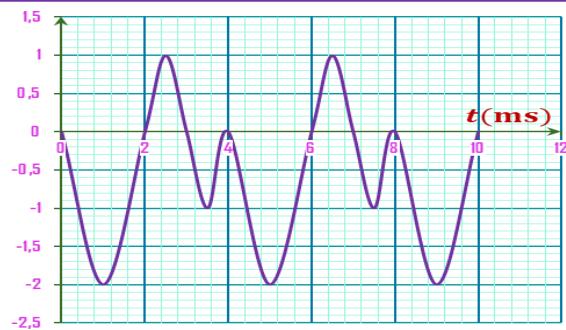
Objectifs

- 💡 Définir l'onde mécanique progressive périodique et sinusoïdale
- 💡 Connaitre la période , la longueur d'onde , et la relation entre elles.
- 💡 Mise en évidence expérimentale du phénomène de diffraction des ondes mécaniques .
- 💡 Mise en évidence de la notion de milieu dispersif .

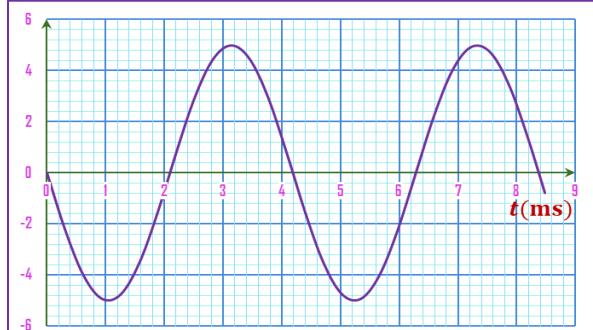
I Ondes mécaniques progressives et ses caractéristiques

① Activité : Onde mécanique périodique et sinusoïdale

Un microphone capte le son émis par un instrument de musique jouant une note continue, puis le son émis par un diapason. A l'aide d'un oscilloscope relié au microphone, on visualise les deux signaux sonores.



① Onde émise par un instrument de musique



② Onde émise par un diapason

Exploitation

- ① Est-ce que les ondes obtenues sont-elles périodiques.
 - ② Comparer les deux oscillogrammes.
 - ③ Calculer la période T pour chaque oscillogramme.
 - ④ En déduire la fréquence N pour l'onde émise par le diapason.
- ① Les ondes obtenues sont périodiques , car la perturbation de chaque point du milieu de propagation change d'une manière périodique au cours du temps .
- ② L'onde émise par l'instrument de musique est une onde mécanique progressive périodique , tandis que l'onde émise par le diapason est une onde mécanique progressive sinusoïdale ?
- ③ Pour l'onde émise par l'instrument de musique on a : $T = 4\text{ms}$
Pour l'onde émise par le diapason on a : $T' = 4,2\text{ms}$
- ④ Pour l'onde émise par le diapason on a : $N' = \frac{1}{T'} = \frac{1}{4,2 \times 10^{-3}} = 238,1\text{Hz}$

② Définitions

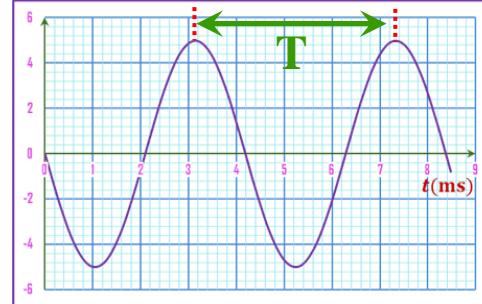
- Une **onde mécanique progressive** est dite périodique si l'évolution temporelle de l'élargissement de chaque point du milieu de propagation est périodique .
- Une **onde mécanique progressive** est dite sinusoïdale si l'évolution temporelle de l'élargissement de chaque point du milieu de propagation varie selon une fonction sinusoïdale :

$$y(t) = A \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi\right) \text{ avec :}$$

$y(t)$: L'élargissement en **m**
 A : L'amplitude en **m**
 T : La période en **s**
 φ : La phase à l'origine des dates ($t = 0$)

③ La périodicité temporelle d'une onde mécanique périodique

La périodicité temporelle T (la période) d'une onde mécanique progressive périodique est la plus petite durée au bout de laquelle un point du milieu de propagation se retrouve dans le même état vibratoire. La fréquence N est le nombre de perturbation effectuer par un point du milieu de propagation par seconde : $N = \frac{1}{T}$; avec T est en seconde (s) et N en Hertz (Hz)



④ La périodicité spatiale d'une onde mécanique périodique

❖ Activité

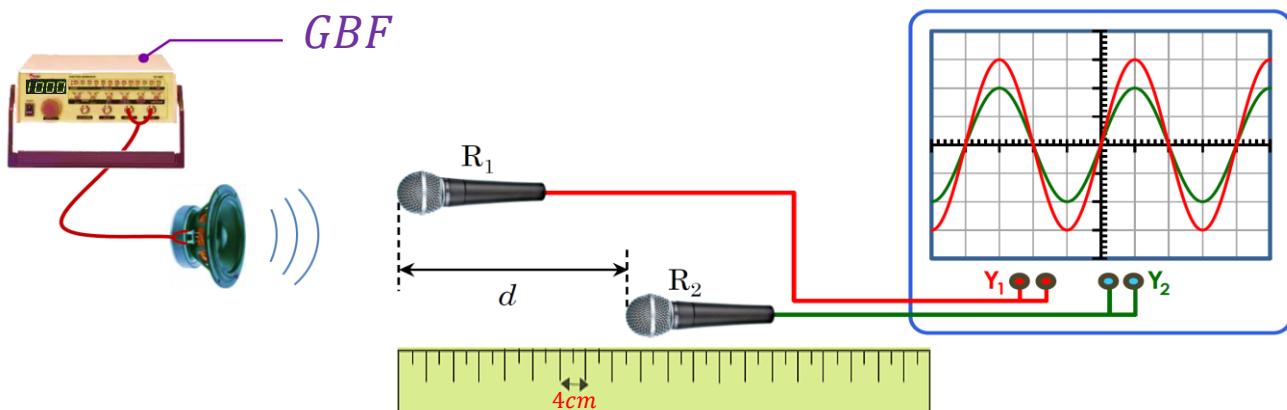
Mise en évidence la périodicité spatiale d'une onde mécanique .

Pour mettre en évidence la périodicité spatiale d'une onde mécanique , on réalise le montage expérimental ci-dessous qui est constitué par :

- Deux microphones R_1 et R_2 placés côte à côté et reliés avec les entrées de l'oscilloscope
- Un haut-parleur relié à un générateur de basse fréquence (GBF)
- Une règle graduée

On fixe le microphone R_1 et on déplace le microphone R_2 le long de la règle graduée , en observant les oscillogrammes sur l'écran de l'oscilloscope .

- Données**
- La célérité du son dans l'air $V = 340m/s$
 - La sensibilité horizontale $S_x = 0,25ms/div$



Observations expérimentales

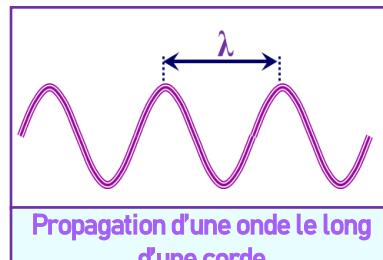
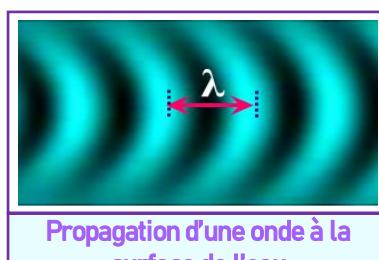
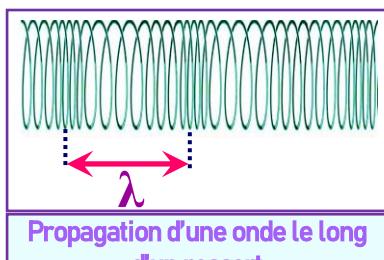
- Les deux courbes sont en phase pour la première fois , lorsque la distance entre les deux microphones R_1 et R_2 est : $d_1 = 34cm$.
- Les deux courbes sont en phase pour la deuxième fois , lorsque la distance entre les deux microphones R_1 et R_2 est : $d_2 = 68cm$.
- Les deux courbes sont en phase pour la troisième fois , lorsque la distance entre les deux microphones R_1 et R_2 est : $d_3 = 102cm$.
- Les deux courbes sont en opposition de phase pour la première fois , lorsque la distance entre les deux microphones R_1 et R_2 est : $d'_1 = 17cm$.
- Les deux courbes sont en opposition de phase pour la deuxième fois , lorsque la distance entre les deux microphones R_1 et R_2 est : $d'_2 = 51cm$.

Exploitation

- ① Déterminer la courbe correspondant au signal capté par le microphone R_1
 - ② La distance d_1 est appelée longueur d'onde ou périodicité spatiale et notée λ elle s'exprime en mètre (m). Définir la longueur d'onde
 - ③ Calculer les rapports $\frac{d_2}{\lambda}$ et $\frac{d_3}{\lambda}$, que remarquez-vous ?
 - ④ Calculer les rapports $\frac{d'_1}{\lambda}$ et $\frac{d'_2}{\lambda}$, que remarquez-vous ?
 - ⑤ Déterminer la période T des ondes sonores .
 - ⑥ Calculer le rapport $\frac{\lambda}{T}$, et le comparer avec la valeur de célérité V . Déduire la nouvelle définition de la célérité V .
- ① La courbe représentée en rouge est celle qui correspond à l'onde reçue du microphone R_1 car les ondes sonores s'amortissent en éloignant de la source .
- ② La longueur d'onde λ est la petite distance séparant deux points du milieu de propagation qui vibrent en phase
- ③ On a : $\frac{d_2}{\lambda} = \frac{68}{34} = 2$ et $\frac{d_3}{\lambda} = \frac{102}{34} = 3$. On remarque deux points du milieu de propagation qui vibrent en phase si la distances qui les sépare est : $d = k \cdot \lambda$ où $k \in \mathbb{N}^*$
- ④ On a : $\frac{d'_1}{\lambda} = \frac{17}{34} = \frac{1}{2}$ et $\frac{d'_2}{\lambda} = \frac{51}{34} = \frac{3}{2}$. On remarque deux points du milieu de propagation qui vibrent en opposition phase si la distances qui les sépare est : $d = (k + \frac{1}{2}) \cdot \lambda$ où $k \in \mathbb{N}$
- ⑤ Graphiquement , on trouve $T = 1ms$
- ⑥ On a : $\frac{\lambda}{T} = \frac{34 \times 10^{-2}}{1 \times 10^{-3}} = 340 m.s^{-1}$. On déduit que : $V = \frac{\lambda}{T}$

❖ Définition

La périodicité spatiale (longueur d'onde) λ d'une onde mécanique progressive périodique est la petite distance séparant deux points successifs du milieu de propagation ayant le même état vibratoire .



❖ La vitesse de propagation d'une onde mécanique progressive périodique

On définit la vitesse de propagation d'une onde mécanique progressive périodique dans un milieu matériel élastique par la relation suivante : $v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot N$

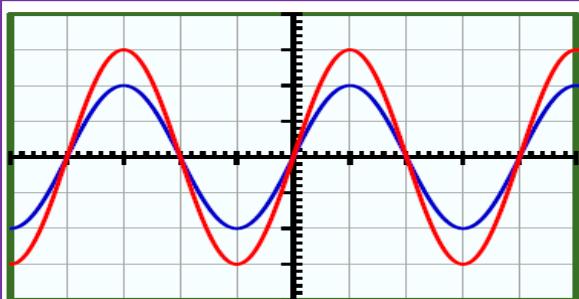
v : est la vitesse de propagation en **m/s** ; T : est la période en **s** ; N : la fréquence en **Hz**

❖ Comparaison de l'état vibratoire de deux points du milieu de propagation

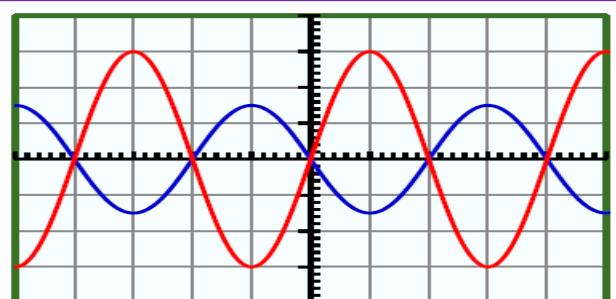
Soient **A** et **B** deux points du milieu de propagation .

- **A** et **B** vibrent en phase si la distance qui les sépare est : $d = k \cdot \lambda$ où ($k \in \mathbb{N}^*$)
- **A** et **B** vibrent en opposition de phase si la distance qui les sépare est :

$$d = (k + \frac{1}{2}) \cdot \lambda \text{ où } (k \in \mathbb{N})$$



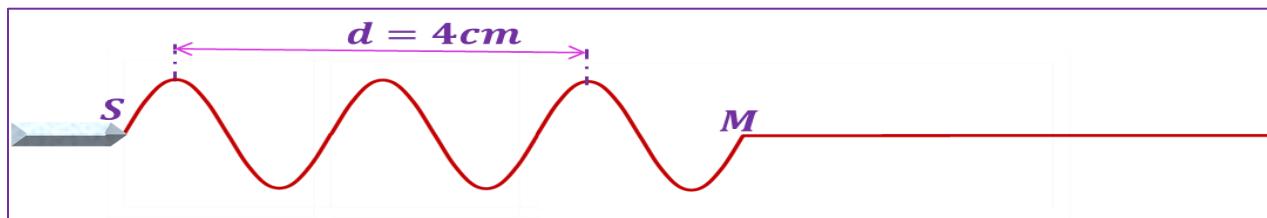
1 Les courbes sont en phase



2 Les courbes sont en opposition de phase

❖ Application

On fixe l'extrémité de la corde à la lame d'un vibreur où son mouvement rectiligne sinusoïdale de fréquence $N = 20\text{Hz}$. On fait fonctionner le vibreur à un instant $t_0 = 0$, La figure ci-contre représente la forme de la corde à un instant t



- ① Déterminer la valeur de la longueur d'onde λ .
- ② Calculer la célérité de propagation de l'onde le long de la corde.
- ③ Comparer les états vibratoires des points **S** et **M** .
- ④ Quel est l'instant t , où l'aspect de la corde est présenté ?

- ① D'après la figure on a : $d = 2\lambda$

$$\text{Donc : } \lambda = \frac{d}{2} = 2\text{cm}$$

- ② Calculons la célérité de propagation de l'onde le long de la corde

$$\text{On a : } V = \lambda \cdot N$$

$$\text{A.N: } V = 0,02 \times 20 = 0,4\text{m.s}^{-1}$$

- ③ D'après la figure on a : $SM = 3\lambda$

Donc les point **S** et **M** vibrent en phase.

- ④ Détermions l'instant t , où l'aspect de la corde est présentée .

$$\text{On a : } \tau = \frac{SM}{V} \text{ avec } \tau = t - t_0$$

$$\text{Donc : } t = \frac{SM}{V}$$

$$\text{A.N: } t = \frac{0,06}{0,4} = 0,15\text{s}$$

II

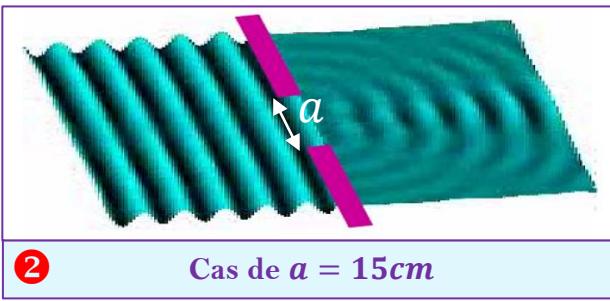
Phénomène de diffraction

① Activité

Mise en évidence le phénomène de diffraction des ondes mécaniques

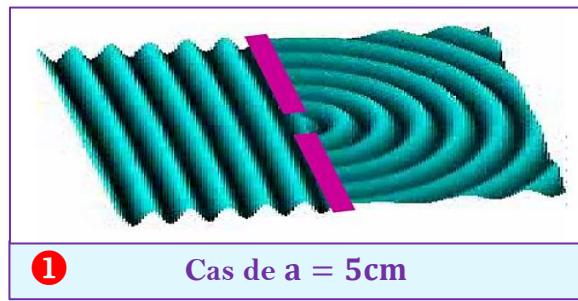
On fait créer dans la cuve à ondes, des ondes rectilignes qui se propagent avec une vitesse $V = 1\text{m/s}$, puis on éclaire la surface de l'eau avec un stroboscope de tel sorte que sa fréquence est égale à celle des ondes $N = 10\text{Hz}$, et on voit que tous les points de la surface de l'eau apparaissent immobiles. On place deux plaques parallèles dans la cuve de manière à former une fente de largeur a modifiable.

On fait varier a et on obtient les deux figures ci-dessous .



②

Cas de $a = 15\text{cm}$



①

Cas de $a = 5\text{cm}$

Exploitation

- ① Calculer la longueur λ d'onde incidente et la comparer avec la largeur a de la fente pour chaque figure.
- ② Décrire pour chaque figure, ce qui arrive aux ondes lorsqu'elles traversent la fente.
- ③ Le phénomène observé dans la figure ① s'appelle phénomène de diffraction . Quelles sont les conditions pour que ce phénomène soit réalisé ?
- ④ Comparer la longueur d'onde diffractée avec la longueur d'onde incidente et déduire .

① On calcule la valeur de la longueur d'onde se propageant à la surface de l'eau .

$$\text{On a : } V = \lambda \cdot N \text{ donc : } \lambda = \frac{V}{N}$$

$$\text{A N : } \lambda = \frac{1}{10} = 0,1\text{m} = 10\text{cm}$$

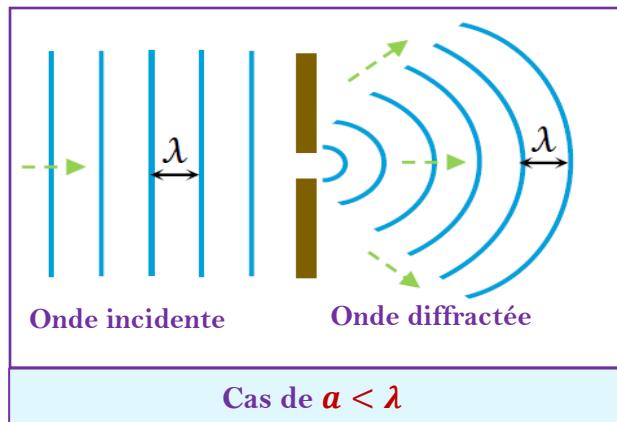
Pour la figure ① on a : $a = 5\text{cm}$ donc : $\lambda > a$

Pour la figure ② on a : $a = 15\text{cm}$ donc : $\lambda < a$

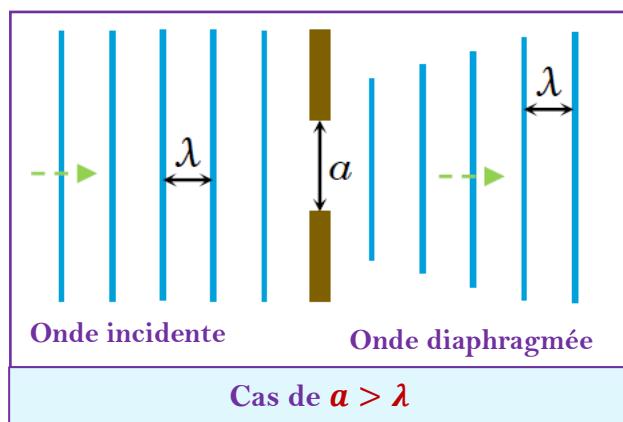
- ② Dans la figure ① , l'onde obtenue après avoir traversé la fente est circulaire , tandis que dans la figure ② , l'onde obtenue après avoir traversé la fente n'est pas circulaire
- ③ Pour que le phénomène de diffraction des ondes mécaniques soit observable ; il faut que la dimension de la fente est inférieur à la longueur d'onde ($a < \lambda$)
- ④ Londe incidente et l'onde diffractée ont la même longueur d'onde .

② Définition

Lorsqu'une onde mécanique progressive périodique rencontre un obstacle avec une ouverture de largeur a , une modification de la structure de l'onde se produit (un changement de direction de propagation de l'onde), si $a < \lambda$ où λ est la longueur d'onde incidente sur l'obstacle, ce phénomène s'appelle phénomène de diffraction.



Cas de $a < \lambda$



Cas de $a > \lambda$

③ Propriétés de l'onde diffractée

Les ondes incidente et diffractée ont la même fréquence, la même célérité et la même longueur d'onde, si le milieu de propagation n'est pas changé

III Le milieu dispersif

① Activité

On provoque une onde circulaire dans la cuve à ondes à l'aide d'un vibreur, et on éclaire la surface de l'eau par un stroboscope dont la fréquence est réglée sur une valeur égale à la fréquence de source vibrante

$N(\text{Hz})$	20	25	30	35
$\lambda(m)$	1	0,9	0,8	0,7
$V(m/s)$				

Exploitation

- ① Compléter le tableau ci-dessus
- ② On dit qu'un milieu est dispersif si la vitesse de propagation d'une onde dans ce milieu dépend de sa fréquence. L'eau est-elle un milieu dispersif?
 - ① Voir le tableau ci-dessus
 - ② On constate que la vitesse de propagation de l'onde dépend de sa fréquence. Donc l'eau est un milieu dispersif.

② Définition

Le milieu est dispersif si la vitesse de propagation d'une onde dans ce milieu dépend de sa fréquence

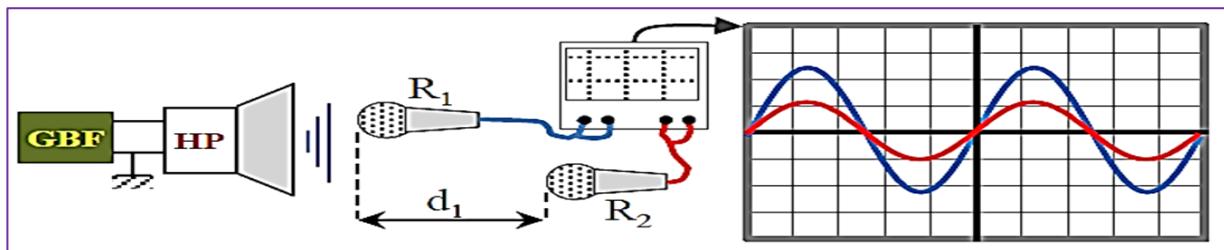
Exercice 1

Pour déterminer la vitesse de propagation des ondes sonores dans l'aire on réalise le montage expérimental ci-dessous .

On visualise sur l'écran de l'oscilloscope les ondes captées par les microphones R_1 et R_2 .

Données

- Les deux courbes sont en phase lorsque la distance qui sépare les deux microphones R_1 et R_2 est $d_1 = 17\text{cm}$
- La sensibilité horizontale $S_h = 0,1\text{ms/div}$



① Définir la longueur d'onde .

② Choisir les bonnes réponses :

- Les ondes sonores et les ultrasons sont des ondes transversales .
- Les ultrasons sont des ondes audibles par l'Homme .
- La fréquence des ondes sonores varie avec le changement du milieu de propagation .
- Les ondes sonores se propagent dans le vide et dans les milieux matériels .
- L'onde sonore est tridimensionnelle .

③ Déterminer la période de l'onde sonore et déduire sa fréquence .

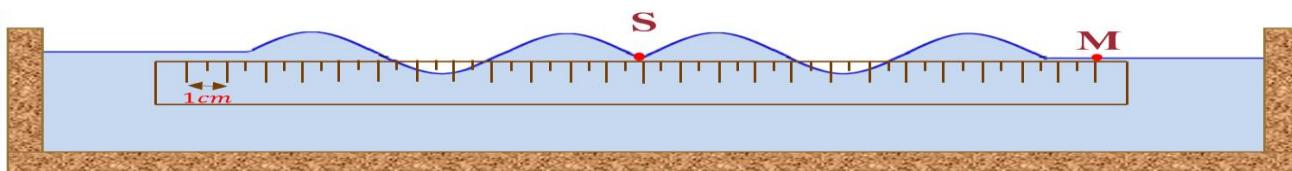
④ On déplace le microphone R_2 horizontalement jusqu'à ce que les courbes deviennent en phase pour une distance $d_2 = 34\text{cm}$.

a – Déterminer la longueur d'onde λ de l'onde sonore .

b – Déduire la vitesse V de propagation des ondes sonores dans l'air .

Exercice 2

On crée à l'instant $t = 0$, en un point S de la surface de l'eau , une onde mécanique progressive sinusoïdale de fréquence $N = 50\text{Hz}$. La figure ci-dessous représente une coupe verticale de la surface de l'eau à un instant t . La règle graduée sur le schéma indique l'échelle utilisé



① Déterminer la longueur d'onde λ .

② Calculer la valeur de la vitesse de propagation de l'onde à la surface de l'eau .

③ Quel est l'instant t , où la coupe de la surface de l'eau est présentée ?

④ On considère un point M de la surface de l'eau , éloigné de la source S d'une distance $SM = 12\text{cm}$. Le point M reprend le mouvement de S après un retard temporel τ . Calculer la valeur de τ

⑤ Ecrire la relation entre l'elongation du M et celle de la source S



Situation-problème

L'arc en ciel est un phénomène optique qui se produit dans le ciel et qui rend visible le spectre continu de la lumière du soleil .

- 💡 Comment mettre en évidence l'aspect ondulatoire de la lumière ?
- 💡 L'onde lumineuse possède-t-elle les mêmes propriétés des ondes mécaniques ou non ?

Objectifs

- 💡 Mise en évidence expérimentale de la diffraction de la lumière
- 💡 Savoir exploiter un document de diffraction et décrire la lumière comme une onde .
- 💡 Définir une lumière monochromatique et une lumière polychromatique .
- 💡 Mise en évidence expérimentale du phénomène de dispersion de la lumière par un prisme .

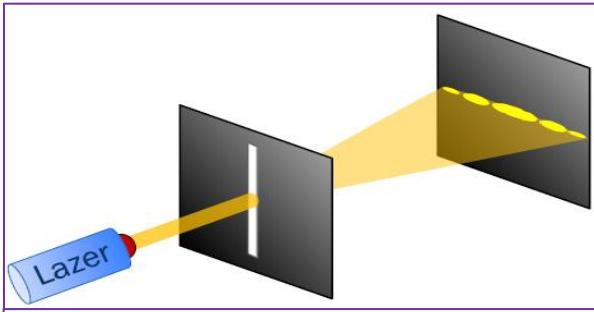
I

Le module ondulatoire de la lumière

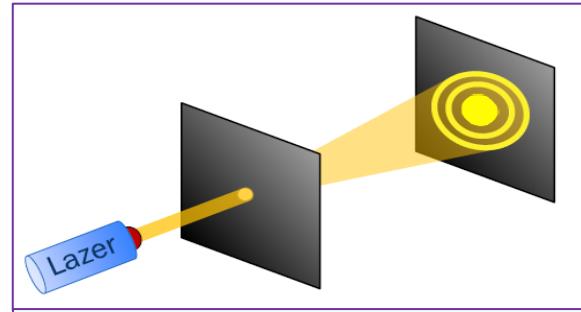
① Mise en évidence l'aspect ondulatoire de la lumière

❖ Activité

On éclaire une fente, de largeur a variable (ou un trou de diamètre variable), par un faisceau de laser comme illustré par la figure ci-contre



① Cas d'une fente rectangulaire



② Cas d'un trou circulaire

Exploitation

- ① Qu'observez-vous sur l'écran lorsque la largeur de la fente devient grande ?
- ② Qu'observez-vous sur l'écran lorsque la largeur de la fente devient petite ?
- ③ Rappeler le principe de propagation rectiligne de la lumière. Est-il vérifié ?
- ④ Avez-vous déjà rencontré comme ce phénomène dans le cas des ondes mécaniques .
Donner le nom, de ce phénomène.
- ⑤ Que peut-on conclure à propos de la nature de la lumière ?
 - ① On voit la formation d'une seul tache lumineuse sur l'écran .
 - ② On voit sur l'écran la formation de plusieurs taches lumineuses brillantes séparées par des taches sombres .
 - ③ Le principe de propagation rectiligne de la lumière : dans un milieu homogène et transparent la lumière se propage en ligne droite .
Le principe de propagation rectiligne de la lumière est vérifié lorsque la largeur de la fente est grande . Mais ce principe n'est pas vérifié lorsque la largeur de la fente devient petite , car la formation des taches lumineuses à des endroits au-delà de l'obstacle montre que la lumière n'a pas suivi un chemin rectiligne lors de sa propagation de la source à l'écran
 - ④ Oui c'est le phénomène de diffraction des ondes mécaniques .
 - ⑤ Par analogie avec les ondes mécaniques on considère que la lumière a un aspect ondulatoire .

❖ Conclusion

Si on se limite à la propagation rectiligne de la lumière , on ne peut pas expliquer l'arrivée de la lumière à des endroits au-delà de l'obstacle . Et par analogie avec les ondes mécaniques , on considère que la lumière a un aspect ondulatoire

② Module ondulatoire de la lumière

La lumière est une onde électromagnétique (association d'un champ magnétique et d'un champ électrique) progressive transversale se propage dans les milieux transparents matériels ou non matériels.

L'onde lumineuse possède double périodicité :

- **Périodicité temporelle** : est caractérisée par sa période T ou sa fréquence v telle que $v = \frac{1}{T}$
- **Périodicité spatiale** : est caractérisée par sa longueur d'onde λ

II Propriétés de l'onde lumineuse

① Lumière monochromatique et lumière polychromatique

Toute radiation lumineuse ayant une seule couleur est dite monochromatique. Elle est caractérisée par sa fréquence v qui ne dépend pas du milieu de propagation.

La lumière polychromatique est composée de plusieurs radiations monochromatiques.

❖ Exemples

- Le laser est une source de la lumière monochromatique
- La lumière blanche est une lumière polychromatique

② Le spectre visible de la lumière blanche

Le spectre visible de la lumière blanche est le domaine auquel l'œil humain est sensible.

Ce domaine est tel que : $400\text{nm} < \lambda < 800\text{nm}$



③ La vitesse de propagation d'une onde lumineuse

❖ La vitesse de propagation de la lumière dans le vide

Dans le vide (ou dans l'air) la lumière se propage avec une vitesse (nommée célérité) tel que $c = \lambda_0 \cdot v = \frac{\lambda_0}{T}$ avec $c = 29979245 \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

c : la vitesse de l'onde en m/s ; λ_0 : la longueur d'onde en m ; v : la fréquence en Hz

❖ La vitesse de propagation de la lumière dans un milieu matériel

Dans un milieu matériel transparent la lumière se propage avec une vitesse v tel que

$$v = \lambda \cdot v = \frac{\lambda}{T}$$

v : la vitesse dans le milieu en m/s ; λ : la longueur d'onde dans le milieu en m

❖ L'indice de réfraction du milieu

Chaque milieu matériel transparent est caractérisé par un indice de réfraction noté n tel que : $n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_0}{\lambda}$ avec v : la vitesse dans le milieu en m/s ; c : la vitesse dans le vide en m/s n : est un facteur sans unité et $n \geq 1$

❖ Application

On éclaire un morceau de verre par deux sources lumineuses monochromatiques , l'une est rouge et l'autre est jaune

Données

La célérité de la lumière dans le vide : $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

La longueur d'onde de la radiation rouge dans le verre est : $\lambda_r = 475 \text{ nm}$

La fréquence de la radiation rouge est : $v_r = 3,91 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$

La longueur d'onde de la radiation jaune dans le verre est : $\lambda_j = 362 \text{ nm}$

La longueur d'onde de la radiation jaune dans le vide est : $\lambda_{0j} = 589 \text{ nm}$

① Calculer la fréquence v_j de la radiation jaune .

② Calculer les célérités v_j et v_r des radiations jaune et rouge dans le morceau de verre

③ Comparer les célérités v_j et v_r que peut-on déduire à-propos du verre constituant le morceau ?

① Calculons la fréquence v_j de la radiation jaune.

$$\text{On a : } v_j = \frac{c}{\lambda_{0j}}$$

$$\text{A.N : } v_j = \frac{3 \times 10^8}{589 \times 10^{-9}} = 5,09 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

② Calculons les célérités v_j et v_r des radiations jaune et rouge dans le morceau de verre

$$\text{On a : } v_j = \lambda_j \cdot v_r$$

$$\text{A.N: } v_j = 362 \times 10^{-9} \times 5,09 \times 10^{14}$$

$$\text{On trouve : } v_j = 1,86 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\text{On a : } v_r = \lambda_r \cdot v_r$$

$$\text{A.N: } v_r = 475 \times 10^{-9} \times 3,91 \times 10^{14}$$

$$\text{On trouve : } v_r = 1,86 \times 10^8 \text{ m/s}$$

③ On constate que $v_j \neq v_r$ ce qui montre que la vitesse de propagation de l'onde lumineuse monochromatique dans ce morceau de verre dépend de sa fréquence

III Etude de diffraction d'une onde lumineuse monochromatique

① Activité

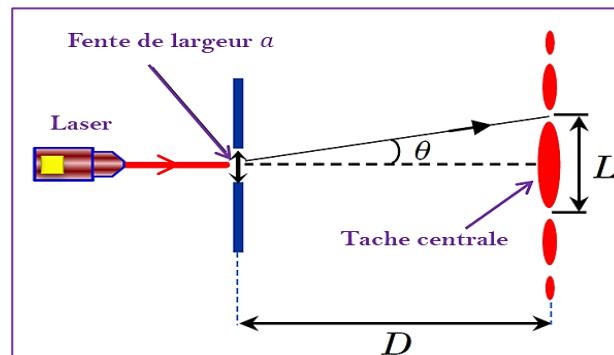
On éclaire une fente, de largeur a variable située à une distance $D = 1,5 \text{ m}$ d'un écran E , par un faisceau de laser de longueur d'onde $\lambda = 667 \text{ nm}$.

On fait varier la largeur de la fente a , et on mesure les valeurs de L la largeur de la tache centrale , et on obtient le tableau ci-contre.

Exploitation

① L'écart angulaire θ est l'angle sous lequel est vu la moitié de la tache centrale depuis la fente. Sachant que pour des petits angles θ , on a $\tan \theta \approx \theta$. Montrer que $\theta = \frac{L}{2D}$.

② En utilisant le résultat de la question précédant, compléter le tableau ci-contre .



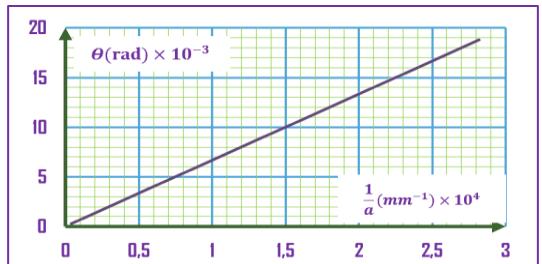
$a(\mu\text{m})$	40	60	80	100	120
$1/a(\text{mm}^{-1})$	25	16,67	12,5	10	8,33
$L(\text{mm})$	50,5	33,7	25,3	20,2	16,8
$\theta = (\text{rad}) \times 10^{-3}$	16,8	11,2	8,43	6,73	5,60

③ La courbe ci-contre représente les variations de θ en fonction de $\frac{1}{a}$

a – Quelle est la nature de la courbe $\theta = f(\frac{1}{a})$.

b – Calculer k la pente de fonction $\theta = f(\frac{1}{a})$.

c – En déduire la relation entre L , D , λ et a .



① D'après la figure on a : $\tan(\theta) = \frac{L}{D} = \frac{L}{2D}$
et puisque θ est faible on a : $\tan \theta \approx \theta$

$$\text{Donc : } \theta = \frac{L}{2D}$$

② Voir le tableau

③

a – La courbe $\theta = f(\frac{1}{a})$ est une fonction linéaire d'équation : $\theta = K \cdot \frac{1}{a}$ Où K est le coefficient directeur

b – On calcule le coefficient directeur de la courbe $\theta = f(\frac{1}{a})$

$$\text{Graphiquement on : } K = \frac{10-0}{1,5-0} = 6,67 \times 10^{-7} \text{ m} = 667 \text{ nm}$$

④ D'après la question (③ b –) on a : $K = \lambda$

$$\text{Donc : } \theta = \frac{\lambda}{a}$$

$$\text{Et d'après la question (①) on a } \theta = \frac{L}{2D}$$

$$\text{D'où : } \frac{\lambda}{a} = \frac{L}{2D}$$

② Conclusion

Au cours de la diffraction d'une onde lumineuse monochromatique de longueur d'onde λ , par une fente de largeur a (ou par un fil de diamètre a), l'écart angulaire θ est l'angle entre le centre de la tâche centrale et la première tâche sombre tel que : $\theta = \frac{L}{2D} = \frac{\lambda}{a}$

❖ Remarques

- Le phénomène de diffraction est plus important lorsque la largeur de la fente est petite ou la longueur d'onde de la lumière monochromatique utilisée est grande
- Dans le cas de diffraction par un trou circulaire de diamètre d , l'écart ongulaire est : $\theta = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{d}$
- Dans le cas de diffraction par un fil mince de diamètre d , l'écart ongulaire est : $\theta = \frac{\lambda}{d}$

❖ Application

On réalise le phénomène de diffraction des ondes lumineuses , en éclairant une fente de largeur a par un laser de longueur d'onde λ_0 , et on observe des taches lumineuses , dont la tache centrale est de largeur L

- Données :
- La largeur de la fente $a = 40 \mu\text{m}$
 - La largeur de la tache centrale $L = 4,5 \text{ cm}$
 - La distance entre la fente et l'écran $D = 1,5 \text{ m}$

- Quelle est la nature de la lumière que montre cette expérience ?
 - Rappeler la relation qui lie θ , λ_0 et a .
 - Donner l'expression de λ_0 en fonction de D , L et a (on suppose θ petit). Calculer λ_0
 - Cette lumière est-elle visible ? Justifier votre réponse.
 - On remplace la fente par un trou de diamètre $d = 0,5\text{mm}$. Calculer la valeur de L' la largeur de la tache centrale
- ① L'expérience montre que la lumière a un aspect ondulatoire.
- ② La relation entre l'écart angulaire, la largeur de la fente et la longueur d'onde est : $\theta = \frac{\lambda_0}{a}$
- ③ On a $\theta = \frac{L}{2D}$ et d'après la question précédente, on a $\theta = \frac{\lambda_0}{a}$
 Donc : $\frac{\lambda_0}{a} = \frac{L}{2D}$
 D'où : $\lambda_0 = \frac{L}{2D} \cdot a$
 A.N: $\lambda_0 = \frac{4,5 \times 10^{-2}}{2 \times 1,5} \times 40 \times 10^{-6} = 6 \times 10^{-6}\text{m}$
- ④ On a $\lambda_0 = 600\text{nm}$
 Donc : $400\text{nm} < \lambda_0 < 600\text{nm}$
- ⑤ Lorsqu'on remplace le trou par un trou de diamètre $d = 0,5\text{mm}$, l'écart ongulaire devient $\theta = 1,22 \cdot \frac{\lambda_0}{d}$ avec : $\theta = \frac{L'}{2D}$
 Donc : $\frac{L'}{2D} = 1,22 \cdot \frac{\lambda_0}{d}$
 D'où : $L' = 1,22 \cdot \frac{\lambda_0}{d} \cdot 2D$
 A.N: $L' = 1,22 \times \frac{6 \times 10^{-6}}{0,5 \times 10^{-3}} \times 2 \times 1,5 = 4,4\text{cm}$

IV Dispersion des ondes lumineuses

① Réfraction de la lumière

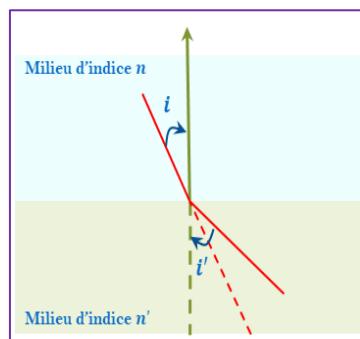
❖ Définition

La réfraction de la lumière est le changement de direction que subit un rayon lumineux quand il traverse la surface séparant deux milieux transparents d'indices de réfraction différents.



❖ Les lois de Descartes de réfraction

- Le rayon incident **SI** et le rayon réfracté **IR** se trouvent dans le même plan.
- L'angle d'incidence **i** et l'angle de réfraction **i'** sont liés par la relation suivante : $n \sin(i) = n' \sin(i')$



❖ Remarque

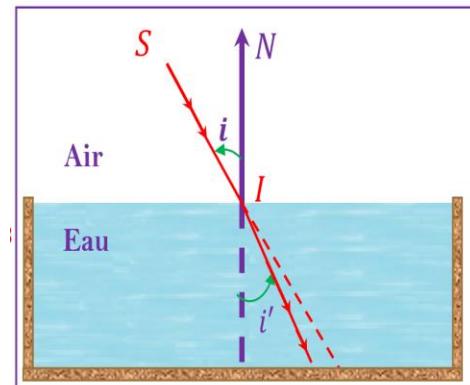
Un rayon perpendiculaire à la surface de séparation des deux milieux ($i = 0^\circ$) n'est pas dévié

❖ Application

On envoie un faisceau **SI** d'une lumière monochromatique avec un angle d'incidence $i = 35^\circ$ par rapport à la normale **IN** à la surface de l'eau (la figure ci-contre)

Données :

- L'indice de réfraction de l'air est : $n_{air} = 1$
- L'indice de réfraction de l'eau est : $n_{eau} = 1,33$



- Calculer l'angle de réfraction i' .
- Quelle sera la valeur de l'angle d'incidence si l'angle de réfraction est $i' = 40^\circ$

- Calculons l'angle de réfraction i' .

D'après la loi de Descartes on a : $n_{air} \cdot \sin(i) = n_{eau} \cdot \sin(i')$

$$\text{Donc : } \sin(i') = \frac{n_{air} \cdot \sin(i)}{n_{eau}}$$

$$\text{D'où : } i' = \sin^{-1}\left(\frac{n_{air} \cdot \sin(i)}{n_{eau}}\right)$$

$$\text{A.N: } i' = \sin^{-1}\left(\frac{\sin(35)}{1,33}\right) = 25,55^\circ$$

- On a : $\sin(i) = \frac{n_{eau} \cdot \sin(i')}{n_{air}}$

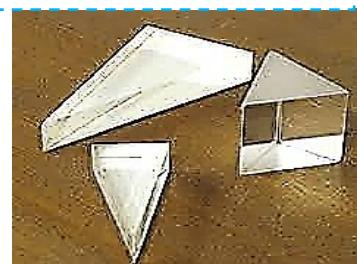
$$\text{Donc : } i = \sin^{-1}\left(\frac{n_{eau} \cdot \sin(i')}{n_{air}}\right)$$

$$\text{A.N: } i' = \sin^{-1}(1,33 \times \sin(40)) = 58,75^\circ$$

② Relations caractéristiques du prisme

❖ Définition du prisme

Le **prisme** est un **milieu transparent** et **homogène**, limité par deux plans inclinés définis entre eux un angle **A** s'appelle l'angle du prisme .

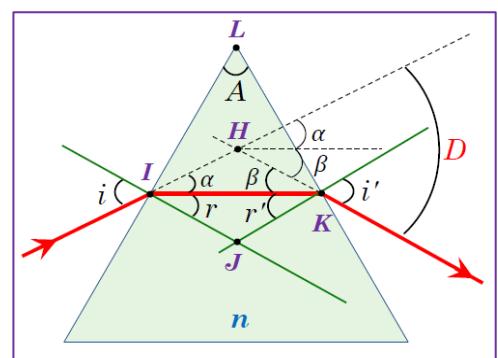


❖ Activité

On envoie un faisceau émis de la source du laser à la face du prisme (la figure ci-contre)

Exploitation

- Combien de réfraction a subi le faisceau lumineux après avoir traversé le prisme ?
- Rappeler la deuxième loi de réfraction
- Ecrire la deuxième loi de réfraction aux points **I** et **K**.
- Monter que $A = r + r'$
- Déduire que $D = i + i' - A$



i : L'angle d'incidence sur la 1^{ère} face **r** : L'angle de réfraction sur la 1^{ère} face

r' : L'angle d'incidence sur la 2^{ème} face **i'** : L'angle de réfraction sur la 2^{ème} face

A : L'angle du prisme **D** : L'angle de déviation **n** : L'indice de réfraction du prisme

n_{air}: L'indice de réfraction de l'aire($n_{air} = 1$)

- ① La lumière a subit le phénomène de réfraction deux fois après avoir traversée le prisme .
- ② L'angle d'incidence i et l'angle de réfraction i' sont lié par la relation suivante :

$$n \sin(i) = n' \sin(i')$$
- ③ Application de la deuxième loi de réfraction
 Au point I on a : $\sin(i) = n \sin(r)$.
 Au point K on a : $n \sin(r') = \sin(i')$.

- ④ Dans le triangle AIK on a : $\left(\frac{\pi}{2} - r\right) + \left(\frac{\pi}{2} - r'\right) + A = \pi$
 Donc : $r + r' + A = 0 \Leftrightarrow r + r' = A$
- ⑤ On a : $D = \alpha + \beta$
 Au point I on a : $i = r + \alpha \Leftrightarrow \alpha = i - r$
 Au point K on a : $i' = r' + \beta \Leftrightarrow \beta = i' - r'$
 Donc : $D = i - r + i' - r' \Leftrightarrow D = i + i' - A$

❖ Conclusion

Le prisme est caractérisé par les relations suivantes :

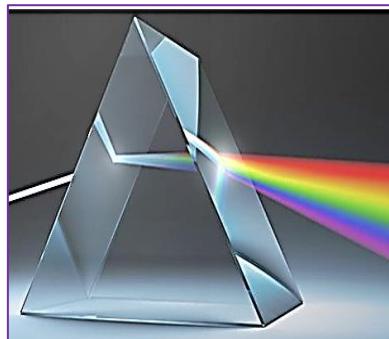
- $\sin(i) = n \sin(r)$
- $n \sin(r') = \sin(i')$
- $r + r' = A$
- $D = i + i' - A$

③ Dispersion de la lumière blanche par un prisme

❖ Activité

On envoie un faisceau de la lumière blanche à la face du prisme (la figure ci-dessous) .

Exploitation

- ① Décrire la figure observée sur l'écran
 - ② Quelle est la couleur la plus déviée et celle la moins déviée ?
 - ③ L'indice de réfraction du prisme n est le même pour toutes les couleurs visibles ?
 - ④ Sachant que l'indice du milieu est : $n = \frac{c}{v}$ (C : La célérité de la lumière dans le vide est une constante) . Montrer que la vitesse V de propagation d'une radiation monochromatique dépend de sa fréquence .
 - ⑤ Le verre constituant le prisme , est-il un milieu dispersif pour la lumière blanche ?
- ① On observe sur l'écran la formation d'une tache colorée
- ② Le rayon le plus dévié est le violet et le rayon le moins dévié est le rouge .
- ③ Puisque les radiations constituant la lumière blanche ne sont pas déviées de la même façon ($D_R \neq D_B \neq D_V \neq \dots$) alors leurs indices de réfraction dans le prisme sont différents . On conclut que l'indice de réfraction d'une radiation monochromatique dans le prisme dépend de sa fréquence .
- ④ On a $n = \frac{c}{v}$ donc : $V = \frac{c}{n}$ avec c est une constante .
- Puisque l'indice de réfraction d'une radiation monochromatique dans le prisme dépend de sa fréquence , alors la vitesse de propagation d'une radiation monochromatique dans le prisme dépend est aussi de sa fréquence .
- 

- ⑤ La vitesse de propagation de d'une radiation monochromatique dans le prisme dépend de sa fréquence , alors le verre constituant le prisme est un milieu dispersif pour les ondes lumineuses .

❖ Conclusion

Lorsqu'un **faisceau de la lumière blanche** traverse un **prisme**, on obtient sur un écran, une **tache colorée** appelée **spectre** de la **lumière blanche**, chaque **radiation** correspond une **couleur** précise et qui est caractérisée par sa **fréquence** .

Puisque les **radiations** de différentes **fréquences** composant la lumière blanche **ne sont pas déviées** de la même **façon** ($D_R \neq D_B \neq D_V \neq \dots$) par le prisme , cela signifier que **l'indice de réfraction** du **verre** constituant le **prisme** dépend de la **fréquence** ($n_R \neq n_V \neq \dots$).

Comme $n = \frac{c}{v}$, donc la **vitesse** de **V** la lumière dans le **prisme** dépend de la **fréquence** de **radiation** alors le **verre** constituant le **prisme** est un milieu **dispersif** .

Exercice 1

Pour déterminer la longueur d'onde λ_0 lors d'une séance de travaux pratiques , le professeur demande à deux groupes de ses élèves de proposer des expériences permettent de déterminer la valeur de λ_0

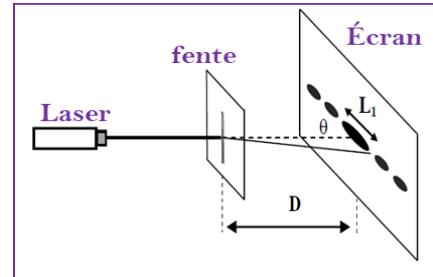
I-L 'expérience proposée par le groupe "A"

On réalise le phénomène de diffraction des ondes lumineuses , en éclairant une fente de largeur a par le laser , et on observe des taches lumineuses , dont la tache centrale est de largeur L

- La largeur de la fente $a = 40\mu m$

Données :

- La largeur de la tache centrale $L = 94,5mm$
- La distance entre la fente et l'écran $D = 3m$



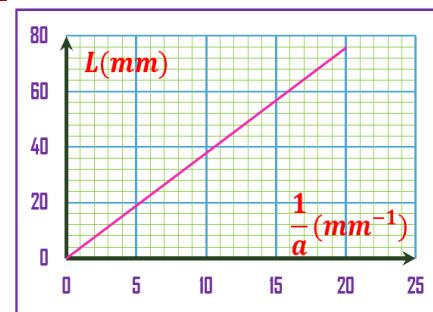
- Quelle est la nature de la lumière que montre cette expérience ?
- Rappeler la relation qui lie θ , λ_0 et a .
- Donner l'expression de λ_0 en fonction de D , L et a (on suppose θ petit et prend $\tan \theta \approx \theta$). Calculer λ_0
- Décrire la figure observée sur l'écran , lorsqu'on remplace le laser par une source de la lumière blanche

II-L 'expérience proposée par le groupe "B"

On réalise l'expérience de diffraction , en utilisant des fils de différentes diamètres à la place de la fente , et on mesure la largeur L' de la tache centrale pour chaque fil , et on trace le diagramme qui représente les variations de

L' en fonction de $\frac{1}{d}$ la courbe ci-contre

- Exprime la largeur L' en fonction de d diamètre du fil et la distance entre le fil et l'écran et la longueur d'onde λ_0 .
- En utilisant le diagramme ci-contre , déterminer la valeur de λ_0 .



Exercice 2

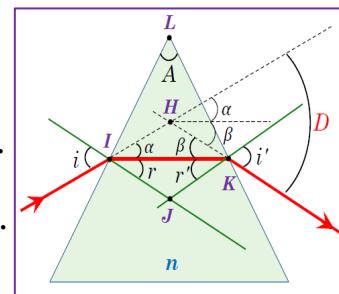
Un rayon monochromatique arrive sur l'une des deux faces d'un prisme avec un angle d'incidence $i = 55^\circ$

- L'indice de réfraction du prisme pour cette radiation $n = 1,64$

Données :

- L'indice de réfraction de l'air $n_{\text{air}} = 1$
- L'angle du prisme $A = 60^\circ$

- Ecrire la loi de réfraction aux points I et I' .
- Calculer la valeur de r , l'angle de réfraction sur la première face .
- Calculer la valeur de r' , l'angle d'incidence sur la deuxième face .
- Calculer la valeur de i' , l'angle de réfraction sur la deuxième face .
- Déduire la valeur de D l'angle de déviation .



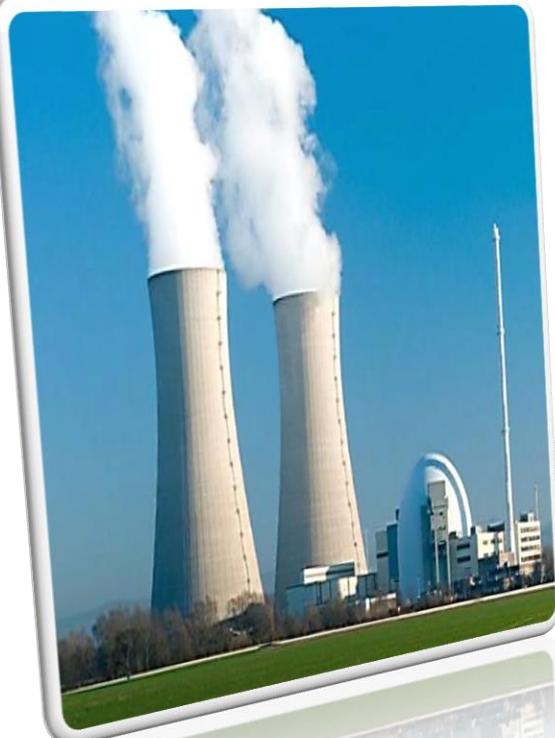
PARTIE II : TRANSFORMATIONS NUCLEAIRES

1

Décroissance Radioactive

2

Noyaux – Masse et Energie





Situation-problème

L'évolution temporelle d'un ensemble de noyaux radioactifs obéit à la loi de décroissance radioactive , dont l'une des applications majeures est la datation des roches et d'estimer la date de la mort de certains êtres vivants , telles que les momies pharaoniques par exemple .



- Qu'est-ce qu'un noyau radioactif ?
- Comment évolue la radioactivité au cours du temps ?
- Comment peut-on dater un événement ancien ?

Objectifs



Connaître et le symbole et la composition d'un noyau .



Connaitre l'élément chimique et les isotopes .



Savoir exploiter le diagramme (N,Z) pour déterminer la stabilité et l'instabilité des noyaux .



Savoir utiliser les lois de conservation de Soddy pour écrire les équations de désintégration nucléaire .



Savoir utiliser la loi de décroissance radioactive pour dater un événement spécifique .



Définir l'activité nucléaire .

I

Stabilité et instabilité des noyaux

① Composition du noyau

L'atome est constitué d'un noyau, autours duquel tournent des électrons qui forment un nuage électronique.

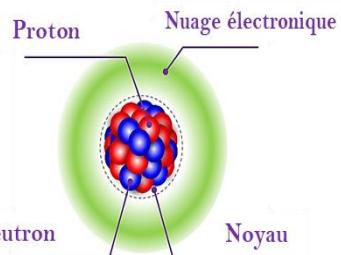
Le noyau d'un atome est constitué des protons et des neutrons appelés nucléons.

Le noyau d'un atome est représenté par le symbole ${}^A_Z X$ avec :

A: est le nombre de masse et représente le nombre de nucléons (protons et neutrons).

Z: est le nombre de charge, et représente le nombre de protons.

N: est le nombre de neutrons tel que : $N = A - Z$



❖ Quelques propriétés du proton et du neutron

Nucléon	Masse en (Kg)	Charge en (C)	Découvreur	Date de découverte
Proton	$1,6726 \cdot 10^{-27}$	$1,6 \cdot 10^{-19}$	Rutherford	1910
Neutron	$1,6749 \cdot 10^{-27}$	0	Chadwick	1932

② Élément chimique

On appelle élément chimique, l'ensemble des atomes et des ions ayant le même nombre de protons **Z**.

③ Les nucléides

On appelle nucléides en physique nucléaire, l'ensemble des atomes identiques ayant le même nombre de protons **Z** et le même nombre de nucléons **A**.

④ Les isotopes

On appelle les isotopes d'un élément chimique, l'ensemble des atomes qui possèdent le même nombre de protons **Z** mais de nombre de nucléons **A** différent.

❖ Exemple : les isotopes d'uranium et leur abondance naturelle

L'élément chimique	Les isotopes		
L'uranium	${}^{238}_{92} U$	${}^{234}_{92} U$	${}^{235}_{92} U$
Abondance naturelle %	99,276	0,718	0,006

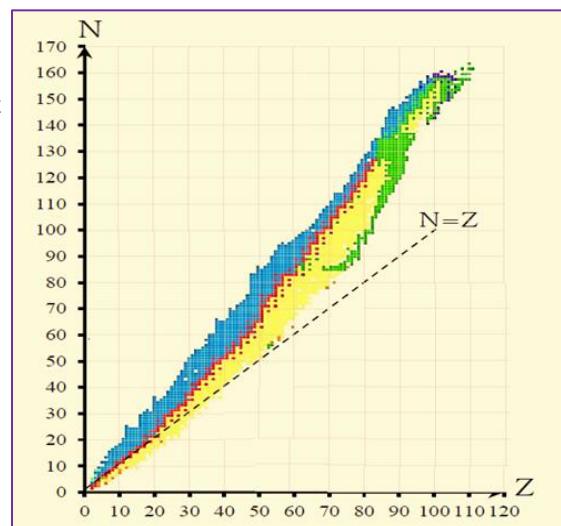
⑤ Le diagramme (N,Z) : Diagramme de Segré

❖ Activité

Certains noyaux gardent la même structure (même composition), on dit qu'ils sont stables . Par contre il y a des noyaux qui se transforment spontanément en autres noyaux après l'amission d'un rayonnement , on dit qu'ils sont instables ou radioactifs .

Le diagramme de Segré permet d'étudier la stabilité des noyaux atomiques en fonction de leur nombre de proton Z et de neutron N , et de fournir le type d'émission radioactifs . De sorte que chaque noyau (stable ou instable) est représenté par un petit carré d'abscisse Z et d'ordonnée N .

La zone centrale en rouge est appelée vallée de stabilité elle correspond aux noyaux stables



Exploitation

- ① Rappeler la signification de la lettre A qui est motionnée dans la représentation ${}^A_Z X$ et donner la relation entre A et Z et N .
 - ② Quels sont les caractéristiques des noyaux stables de $Z < 20$? Déduire que $\frac{A}{Z} \approx 2$ pour ces noyaux .
 - ③ Comment devient le rapport $\frac{A}{Z}$ pour les noyaux lourds stables ($Z > 20$)
 - ④ La zone bleue correspond les noyaux de radioactivité β^- . Comparer Z et N
 - ⑤ Pour cette zone .Que concluez-vous ?
 - ⑥ Comparer Z et N pour la zone jaune et conclure .
 - ⑦ Les noyaux lourds ($Z > 82$ et $A > 200$) ,sont-ils stables ? Si la réponse est non quel est leur type radioactif ?
-
- ① La lettre A indique le nombre de nucléons (protons +neutrons) : $A=N+Z$ tel que Z est le nombre du protons , et N est le nombre de neutrons .
 - ② Les noyaux stables de $Z < 20$ ont un nombre de protons Z égale au nombre de neutrons N . Et comme $A=N+Z$, on aura $A = N + Z = 2Z$ alors $\frac{A}{Z} \approx 2$
 - ③ Les noyaux stables de $Z > 20$ ont plus de neutrons que de protons $N > Z$. Donc $\frac{A}{Z} > 2$
 - ④ Les noyaux de la zone bleue possèdent plus de neutrons que de protons ($N > Z$) .
 - ⑤ Pour se stabiliser , ils doivent transformer certains de leurs neutrons en protons .
 - ⑥ Les noyaux de la zone jaune possèdent plus de protons que de neutrons ($Z > N$) . pour se stabiliser , ils doivent transformer certains de leurs protons en neutrons .
 - ⑦ Les noyaux lourds ($Z > 82$ et $A > 200$) sont instables , pour se stabiliser ils doivent perdre des particules d'hélium ${}^4_2 He$ (notées particules α)

❖ Conclusion

- Les isotopes d'un élément chimique se trouvent sur la même droite parallèle à l'axe des ordonnées .
- Pour les noyaux de $Z < 20$: la vallée de stabilité se situe au voisinage du premier médiateur ($Z = N$) c'est-à-dire que les noyaux légers stables possèdent de protons que de neutrons .
- Pour les noyaux de $Z > 20$: la vallée de stabilité se déplace au-dessus du premier médiateur c'est-à-dire que les noyaux stables possèdent plus de neutrons que protons.
- Tous les noyaux de $Z > 20$ (noyaux lourds $A > 200$) sont instables .
- Le domaine β^- : se trouve au-dessus de la vallée de stabilité . Ces noyaux émettent des électrons (transforment un neutron en un proton) selon l'équation : ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0e$
- Le domaine β^+ : se trouve au-dessous de la vallée de stabilité . Ces noyaux émettent des positrons (transforment un proton en un neutron) selon l'équation : ${}_1^1p \rightarrow {}_0^1n + {}_1^0e$
- La domaine α : comprend les noyaux lourds émettent le noyau d'hélium ${}_2^4He$

II La radioactivité

① Définitions

Un noyau radioactif est un noyau instable qui se désintègre spontanément en émettant une particule .

La radioactivité est désintégration naturelle d'un noyau radioactif à un noyau fils plus stable avec émission d'une particule .

En générale pour décrire une transformation nucléaire on utilise l'équation suivante :

${}_{Z_1}^{A_1}X \rightarrow {}_{Z_2}^{A_2}Y + {}_{Z_3}^{A_3}P$ avec ${}_{Z_1}^{A_1}X$ et le symbole du noyau père , ${}_{Z_2}^{A_2}Y$ est le symbole du noyau fils et ${}_{Z_3}^{A_3}P$ celui de la particule émise .

② Propriétés de la radioactivité

La radioactivité est une transformation :

Aléatoire : on ne peut pas prédire l'instant exact où un noyau va se désintégrer .

Spontanée : la désintégration se fait sans intervention extérieur .

Inévitable : le noyau radioactif sera désintégré tôt ou tard , rien ne peut l'empêcher .

③ Lois de conservation (lois de Soddy)

Lors d'une transformation nucléaire il y a conservation du nombre de protons **Z** et du nombre de nucléons **A**

❖ Application : compléter les transformations nucléaires suivantes



① Les différents types d'émissions radioactives

❖ La radioactivité β^-

La radioactivité β^- est une désintégration nucléaire naturelle spontanée , dans laquelle un noyau père ${}^A_Z X$ se transforme en un noyau fils ${}^{A+1}_{Z+1} Y$ en émettant un électron ${}^{-1}_0 e$ appelé β^-

L'équation de cette transformation est:

$${}^A_Z X \rightarrow {}^{A+1}_{Z+1} Y + {}^{-1}_0 e$$

Exemple : ${}^{60}_{27} Co \rightarrow {}^{60}_{28} Ni + {}^{-1}_0 e$

❖ La radioactivité β^+

La radioactivité β^+ est une désintégration nucléaire naturelle spontanée , dans laquelle un noyau père ${}^A_Z X$ se transforme en un noyau fils ${}^{A-1}_{Z-1} Y$ en émettant un positron ${}^0_1 e$ appelé β^+

L'équation de cette transformation est:

$${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-1}_{Z-1} Y + {}^0_1 e$$

Exemple ${}^{13}_6 C \rightarrow {}^{13}_7 N + {}^0_1 e$

❖ La radioactivité α

La radioactivité α est une désintégration nucléaire naturelle spontanée , dans laquelle un noyau père ${}^A_Z X$ se transforme en un noyau fils ${}^{A-4}_{Z-2} Y$ en émettant un noyau d'Hélium ${}^4_2 He$ appelé α

L'équation de cette transformation est:

$${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 He$$

Exemple ${}^{210}_{84} Po \rightarrow {}^{206}_{82} Pb + {}^4_2 He$

❖ La radioactivité γ

Le rayonnement γ est émission des ondes électromagnétiques de très grande énergie , lors des désintégrations β^- , β^+ et α , le noyau fils est généralement produit dans un état excité (il possède un excès d'énergie par rapport à son état fondamental) . Ce noyau libère un rayonnement γ selon l'équation suivante : ${}^A_Z X^* \rightarrow {}^A_Z X + \gamma$

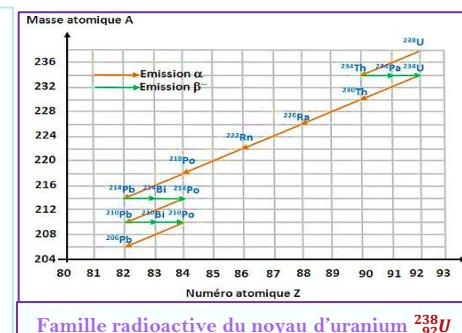
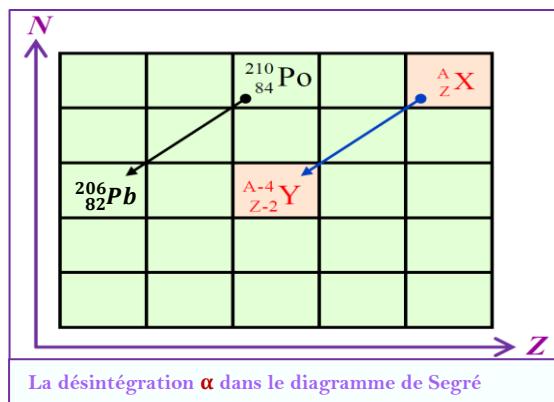
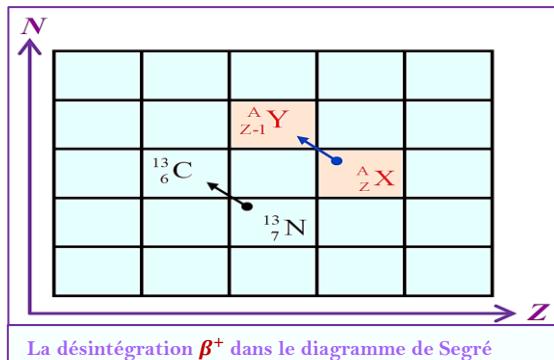
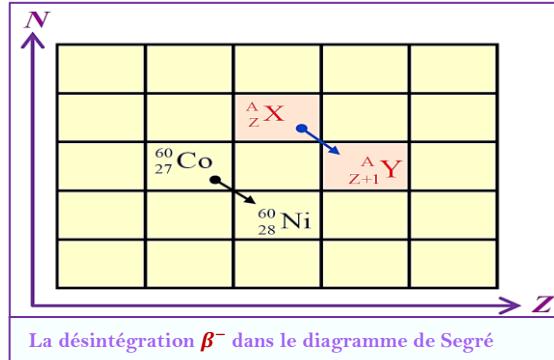
Exemple ${}^{16}_7 N \rightarrow {}^{16}_8 O^* + {}^{-1}_0 e^- (\beta^-) \Rightarrow {}^{16}_8 O^* \rightarrow {}^{16}_7 O + \gamma$

② La famille radioactive

Le noyau fils obtenu après désintégration d'un noyau père peut parfois , à son tour de se désintégrer en un nouveau noyau fils (le fils de fils) , et ainsi de suite , jusqu'à ce qu'on obtienne un noyau stable .

L'ensemble de ces noyaux forme ce qu'on appelle une famille radioactive du noyau père de départ .

Il existe quatre familles radioactives naturelles provenant des noyaux suivants: ${}^{238}_{92} U$, ${}^{235}_{92} U$, ${}^{232}_{90} Th$, ${}^{237}_{93} Np$



III

La loi de décroissance radioactive

① Définition

La décroissance radioactive est la réduction du nombre de noyaux radioactifs dans un échantillon. La décroissance radioactive se produit jusqu'à ce que tous les noyaux radioactifs de l'échantillon deviennent stables.

Le nombre de noyaux non désintégrés d'un échantillon radioactif obéit la loi de décroissance suivante : $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$.

$N(t)$: le nombre de noyaux restant à l'instant t

N_0 : le initial du noyaux radioactifs .

λ : la constante radioactive (est un facteur caractérisant le noyau radioactif), son unité dans le (SI) est : s^{-1}

❖ Application

On dispose un échantillon de césium $^{137}_{55}Cs$, dont le nombre initial de noyaux est : $N_0 = 10^{24}$

La constante radioactive du césium 137 est $\lambda = 7,3 \times 10^{-10} s^{-1}$.

① Calculer le nombre de noyaux restant dans cet échantillon au bout de **30ans** et déduire le nombre de noyaux du césium désintégrés à cet instant .

② Déterminer l'instant t où le nombre de noyaux restant est : $N = 40\% N_0$

③ Calculer la masse initiale de césium contenant cet échantillon .

④ Le césium 137 est radioactif, dont le noyau fils est l'isotope $^{137}_{56}Ba$ du baryum . Écrire l'équation de désintégration du césium 137 en précisant sa nature.

Données : $N_A = 6,02 \times 10^{23} mol^{-1}$, la masse molaire de césium 137 est : $M = 137 g.mol^{-1}$

① D'après la loi de la décroissance radioactive

$$\text{On a : } N_1 = N_0 e^{-\lambda t_1}$$

$$\text{A.N : } N_1 = 10^{24} e^{-7,3 \times 10^{-10} \times 30 \times 365 \times 24 \times 3600}$$

$$\text{On trouve : } N_1 = 5,01 \times 10^{24}$$

② On a : $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$

$$\Leftrightarrow e^{-\lambda t} = \frac{N(t)}{N_0} \text{ avec } N(t) = 0,4 N_0$$

$$\Leftrightarrow \ln(e^{-\lambda t}) = \ln(\frac{0,4 N_0}{N_0})$$

$$\Leftrightarrow -\lambda t = \ln(0,4)$$

$$\Leftrightarrow t = -\frac{1}{\lambda} \ln(0,4)$$

$$\text{A.N : } t = -\frac{1}{7,3 \times 10^{-10}} \ln(0,4) = 1,26 \times 10^{29} s$$

② Calculons la masse initiale de césium contenant cet échantillon .

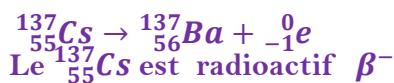
$$\text{On a } \frac{m_0}{M} = \frac{N_0}{N_A}$$

$$\text{Donc : } m_0 = \frac{N_0}{N_A} M \text{ avec}$$

$$\text{A.N: } m_0 = \frac{10^{24}}{6,02 \times 10^{23}} \times 137$$

$$\text{On trouve : } m_0 = 227,6 g$$

④ L'équation de désintégration du césium 137 est :



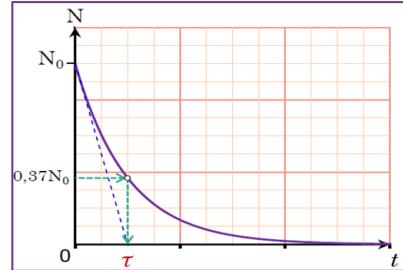
❖ Remarques

- On peut exprimer la loi de décroissance radioactive en fonction de la quantité de matière de l'échantillon radioactif tel que : $n(t) = n_0 e^{-\lambda t}$ avec $m(t)$ la quantité de matière restante à l'instant t et n_0 la quantité de matière initiale de l'échantillon .
- À chaque instant, la somme du nombre de noyaux restants et désintégrés est égale au nombre du noyau initial : $N(t) + N(t)' = N_0$,
- On peut exprimer la loi de décroissance radioactive en fonction de de nombre de noyaux désintégrés tel que $N(t)' = (1 - e^{-\lambda t})$ avec $N(t)'$ est le nombre de noyaux désintégrés à l'instant t .

② La constante du temps

On définit la constante du temps d'un substance radioactif par la relation suivante : $\tau = \frac{1}{\lambda}$, son unité dans le (SI) est la seconde **s**

À l'instant $t = \tau$ on a $N(t) = N_0 e^{-\lambda\tau} = N_0 e^{-1} = 0,37 N_0$
Alors la constant du temps est la duré correspond à la désintégration de **63% N_0**



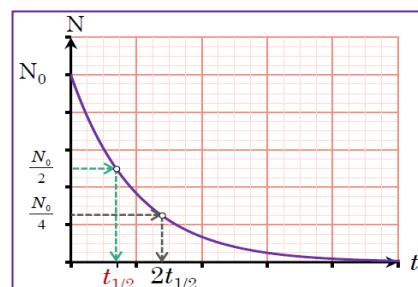
❖ Remarque

La tangente à la courbe $N = f(t)$ à l'instant $t = 0$ coupe l'axe des abscisses à l'instant $t = \tau$

③ La demi-vie

❖ Définition

La demi-vie , notée $t_{1/2}$ d'un noyau radioactif , est la durée au bout de laquelle le nombre de noyaux radioactifs restants est égale à la moitié de sa valeur initiale . $N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$



❖ La relation entre la demi-vie $t_{1/2}$ et la constante radioactive λ

D'après la loi de la décroissance radioactive

$$\text{On a : } N(t_{1/2}) = N_0 e^{-\lambda \cdot t_{1/2}}$$

$$\text{Et on a } N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$$

$$\text{Donc : } N_0 e^{-\lambda \cdot t_{1/2}} = \frac{N_0}{2}$$

$$\Leftrightarrow e^{-\lambda \cdot t_{1/2}} = \frac{1}{2}$$

$$\Leftrightarrow \ln(e^{-\lambda \cdot t_{1/2}}) = \ln\left(\frac{1}{2}\right)$$

$$\Leftrightarrow -\lambda \cdot t_{1/2} = -\ln(2)$$

$$\Leftrightarrow t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$

❖ Valeurs de demi-vie $t_{1/2}$ pour quelques noyaux radioactifs

Noyau	Type d'émission radioactif	Demi-vie $t_{1/2}$
$^{212}_{84}Po$	α	$3.10^{-7}s$
$^{30}_{16}S$	β^+	$3min$
$^{219}_{82}Pb$	β^-	$10,6h$
$^{235}_{92}U$	α	7.10^8ans

④ L'activité nucléaire

❖ Définition

L'activité nucléaire $a(t)$ (vitesse de désintégration) d'une substance radioactive , est égale au nombre moyen de désintégration par seconde : $a(t) = -\frac{dN(t)}{dt}$

Avec $a(t)$ est en Becquerel Bq et le temps en seconde s .

1Bq = une désintégration par seconde

❖ L'évolution temporelle de l'activité d'une substance radioactive

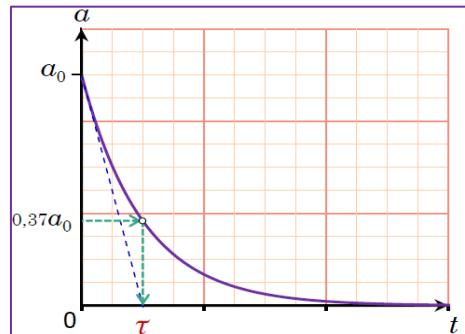
On a : $a(t) = -\frac{dN(t)}{dt}$ avec $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$

Donc : $a(t) = \lambda \cdot N_0 e^{-\lambda \cdot t_{1/2}}$

D'où : $a(t) = \lambda \cdot N(t)$

Ou bien : $a(t) = a_0 e^{-\lambda t}$ avec $a_0 = \lambda \cdot N_0$

On constate que, l'activité nucléaire d'un échantillon à est proportionnelle au nombre de noyaux radioactifs restants dans cet échantillon.



❖ Application

Un échantillon radioactif de plomb $^{209}_{82}Pb$ a une activité $a_0 = 1,5 \cdot 10^6 Ba$

- ① Calculer l'activité de cet échantillon au bout de deux jours . On donne : $t_{1/2} = 3,25 h$.
- ② Calculer le nombre de noyaux radioactifs du plomb au bout de deux jours .
- ③ Le plomb $^{209}_{82}Pb$ est radioactif β^- dont le noyau fil est un isotope de Bismuth $^{83}_A Bi$. Écrire l'équation de désintégration de $^{209}_{82}Pb$ en déterminant les valeurs des nombres A et Z .

① On a: $a(t) = a_0 e^{-\lambda t}$ avec $\lambda = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}}$

Donc : $a(t) = a_0 e^{-\frac{\ln(2)t}{t_{1/2}}}$

A.N : $a(t) = 1,5 \times 10^6 e^{-\frac{\ln(2)}{3,25} \times 48}$

On trouve :: $a(t) = 53,72 Bq$

② On a : $a(t) = \lambda \cdot N(t)$

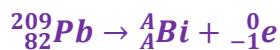
Donc: $N(t) = \frac{a(t)}{\lambda}$

Ou bien : $N(t) = \frac{a(t)}{\ln(2)} \cdot t_{1/2}$

A.N : $N(t) = \frac{53,72}{\ln(2)} \times 3,25 \times 3600$

On trouve : $N(t) = 9,07 \times 10^5$

③ L'équation de désintégration de $^{209}_{82}Pb$



D'après les lois de Soddy on a :

$$209 = A + 0 \text{ et } 82 = Z - 1$$

Donc: $A = 209$ et $Z = 83$

Donc l'équation de désintégration devient:



⑤ La datation par la radioactivité

Les géologues et les archéologues utilisent différentes techniques pour déterminer l'âge des fossiles et des roches . Parmi ces techniques , on compte celles qui reposent sur la radioactivité . Ainsi , un échantillon peut être daté en comparant s'activité à celle de l'autre échantillon témoin .

Plus l'échantillon à dater est ancien , plus la demi-vie de nucléide utilisé est élevée .

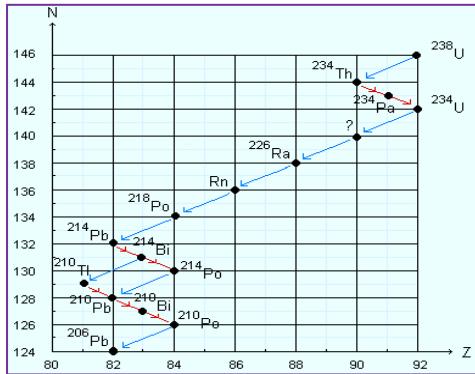
Le carbone 14 est produit en permanence par le rayonnement cosmique à partir de l'azote dans la haute atmosphère . Les échanges qui se produisent entre l'atmosphère et le monde vivant maintiennent quasiment constante le rapport entre la quantité de carbone 14 et celle de carbone 12 . Mais dès qu'un organisme meurt , le carbone 14 qu'il contient n'est plus renouvelé puisque les échanges avec le monde extérieur cessent , sa proportion se met à décroître car il est radioactif .

On peut déterminer l'âge d'un échantillon par la relation suivante : $a(t) = a_0 \cdot e^{-\lambda t}$

$$\text{Donc } t = -\frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{a(t)}{a_0} \right) = \frac{t_{1/2}}{\ln(2)} \ln \left(\frac{a_0}{a(t)} \right)$$

Exercice 1

La figure ci-contre représente la famille radioactive de l'uranium **238**, c'est-à-dire les noyaux résultant des désintégrations successives de l'uranium **238** et de ses noyaux fils, petit-fils etc....



- ① Donner, en justifiant vos réponses, la nature de désintégrations qui conduisent de l'uranium **238** à l'uranium **234** (on ne demande pas d'écrire les équations de ces désintégrations).
- ② La désintégration de l'uranium **234** conduit à un noyau manquant. Donner, en justifiant votre réponse, le symbole complet de ce noyau.
- ③ Compléter le symbole **Rn** du noyau de radon (il manque les valeurs de **A** et **Z**).
- ④ Un noyau de la famille peut donner lieu à deux types de désintégrations radioactives. Écrire les équations de ces désintégrations.
- ⑤ La famille radioactive s'arrête au plomb **206**. A votre avis pourquoi ?

Exercice 2

La demi-vie radioactive d'uranium **239** est $t_{1/2} = 23\text{min}$.

- ① Déterminer l'activité **a₀** d'un échantillon d'uranium **239** à la date **t=0** si le nombre de noyaux initialement présents est **N₀ = 16. 10²⁴**.
- ② Déterminer son activité au bout de **23min** et au bout **46min**.
- ③ D'une façon plus générale, exprimer son activité au bout de **n** demi-vie en fonction de **a₀**.
- ④ Calculer **m** la masse de l'échantillon à l'instant **t = 23min**.
- ⑤ Déterminer à quel instant **t'** l'activité de cet échantillon devient **5%a₀**.
- ⑥ L'uranium **₉₂U** est radioactif, dont le noyau fils est un isotope de Neptunium **₉₃Np**. Écrire l'équation de désintégration d'uranium **239** en précisant sa nature.

Exercice 3

L'iode est indispensable à l'organisme humain. Il participe à la synthèse des hormones thyroïdiennes. L'assimilation de cet iode **127** non radioactif se fait sous forme d'ion iodure dans la glande thyroïde.

Lors des accidents nucléaires, il y a émission dans l'atmosphère d'iode **131**, radioactif **β^-** de demi-vie **$t_{1/2} = 8,1\text{jours}$** . Lors de sa désintégration l'iode **131** donne du Xénon (**Xe**).
Données : $M(\text{I-}_{53}) = 131\text{g/mol}$; $N_A = 6,02 \times 10^{23}\text{mol}^{-1}$

- ① Écrire l'équation de désintégration de l'iode **131**.
- ② La population française vivant dans les environs des centrales nucléaires a reçu des comprimés d'iode **127** (sous forme d'iodure de potassium) à prendre en cas d'accident nucléaire. Justifier cette mesure.
- ③ L'iode **131** est aussi utilisé en médecine, par exemple pour l'examen par scintigraphie des glandes surrénales. Déterminer l'activité **a** de **m = 1,0g** d'iode **131**.
- ④ Sachant que pour cet examen il faut une solution d'iode **131** d'activité **a₀ = 37Bq**. Quelle est alors la masse **m₀** d'iode **131** injectée au patient?



Situation-problème

L'énergie nucléaire et une source plus importante que l'énergie fossile mais elle est parfois destructive .

- 💡 Comment effectuer le bilan énergétique d'une réaction nucléaire?
- 💡 Quelles sont les applications et les dangers de la radioactivité ?

Objectifs

- 💡 Connaitre la relation d'équivalence « masse -énergie» .
- 💡 Connaitre les différentes unités de masse et d'énergie .
- 💡 Savoir calculer le défaut de masse et l'énergie de liaison d'un noyau .
- 💡 Savoir analyser la courbe d'Aston .
- 💡 Connaitre les réactions de fusion et de fission .
- 💡 Savoir calculer la variation de l'énergie d'une transformation nucléaire.
- 💡 Connaitre quelques applications et dangers de la radioactivité .

I

Equivalence “masse –énergie”

① Relation d'Einstein

Toute particule de masse m , au repos possède une énergie E appelée énergie de masse donnée par la relation $E = mc^2$

- C : La célérité de la lumière dans le vide $C = 2,99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$
- m : La masse de la particule en Kg
- E : L'énergie de la masse en joule (J)

❖ Application

① Calculer l'énergie de masse du neutron sachant que $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

On a : $E = m_n C^2$

$$\text{A.N: } E = 1,6749 \cdot 10^{-27} \times (2,99792458 \times 10^8)^2$$

$$\text{On trouve : } E = 1,5 \times 10^{-10} \text{ J}$$

❖ Remarque

Toute variation de la masse du système par la grandeur Δm s'accompagne d'une variation d'énergie ΔE tel que : $\Delta E = \Delta m C^2$

Lorsque la masse du système diminue, alors $\Delta m < 0$ donc $\Delta E < 0$; on dit que le système cède de l'énergie au milieu extérieur .

Lorsque la masse du système augmente, alors $\Delta m > 0$ donc $\Delta E > 0$; on dit que le système reçoit de l'énergie du milieu extérieur .

② Unité de masse et de l'énergie dans la physique nucléaire

Dans le système international , la masse s'exprime en kilogramme(**Kg**) et l'énergie en joule (**J**)

Dans la physique nucléaire ces unités sont inadaptables , les particules ont des masses et des énergies très faibles , alors on privilégie des unités adaptables à l'échelle du noyau pour la masse et pour l'énergie .

- **Électronvolt (unité d'énergie)** : est égal à l'énergie acquise par un électron accéléré par une tension d'un volt $1\text{eV} = 1,60205 \times 10^{-19} \text{ J}$
- **Unité de masse atomique (u)** : est égale à un douzième de la masse d'un atome de carbone 12 : $1u = \frac{1}{12} m(^{12}_6C) = \frac{M(^{12}_6C)}{12 \times N_A} = \frac{12}{12 \times 6,022} = 1,66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$

❖ L'énergie correspond à l'unité de la masse atomique

Soit un système nucléaire de masse $m = 1u$

L'énergie de masse associée à ce système est :

$$E = m \cdot C^2 \text{ avec } m = 1u$$

Donc : $E = u \cdot C^2$

$$\text{A.N : } E = 1,66054 \times 10^{-27} \times (2,99792458 \times 10^8)^2 = 1,4924 \times 10^{-10} \text{ J}$$

$$\text{Ou bien: } E = \frac{1,4924 \times 10^{-10}}{1,60205 \times 10^{-19}} = 931,5 \times 10^6 \text{ eV} = 931,5 \text{ MeV}$$

On déduit que $u \cdot C^2 = 931,5 \text{ MeV}$

Ou bien : $u = 931,5 \text{ MeV}/C^2$

① Défaut de masse

❖ Activité

Un noyau d'Hélium ${}_2^4He$ possède deux protons et deux neutrons .

Exploitation

- ① Calculer la masse totale des nucléons séparés au repos .
- ② Comparer la masse du noyau d'Hélium avec la masse totale des nucléons séparés
- ③ Cette différence de masse est appelée défaut de masse noté Δm
 - a – Calculer le défaut de masse $\Delta m({}_3^7Li)$ du noyau de lithium ${}_3^7Li$
 - b – Interpréter ces résultats

Données :

$$m({}_2^4He) = 4,00150u ; m({}_3^7Li) = 7,0160u ; m_p = 1,00728u ; m_n = 1,00866u$$

- ① On calcule la masse des nucléons séparés :

$$m = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n$$

$$m = 2 \times 1,00728 + (4 - 2) \times 1,00866$$

$$m = 4,03188u$$

- ② On a : $m({}_2^4He) = 4,00150u$ et $m = 4,03188u$

$$\text{on a } m - m({}_2^4He) = 4,03188 - 4,00150$$

$$m - m({}_2^4He) = 3,038 \cdot 10^{-2} u > 0$$

donc la somme des masses des nucléons séparés est supérieur à la masse du noyau

③

a –On calcule le défaut de masse du noyau de lithium ${}_3^7Li$

$$\Delta m({}_3^7Li) = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m({}_3^7Li)$$

$$\Delta m({}_3^7Li) = 3 \times 1,00728 + (7 - 3) \times 1,00866 - 7,0160$$

$$\Delta m({}_3^7Li) = 4,048 \cdot 10^{-2} u$$

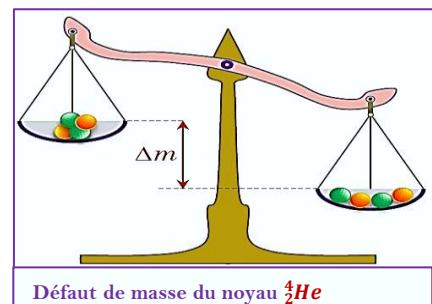
b – On constate que le défaut de masse d'un noyau ${}_Z^AX$ est toujours positif $\Delta m({}_Z^AX) > 0$.

❖ Définition

Le défaut de masse d'un noyau ${}_Z^AX$ est donné par la relation suivante :

$$\Delta m({}_Z^AX) = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m({}_Z^AX)$$

- m_p : La masse de proton : $m_p = 1,00728u$
- m_n : La masse de neutron : $m_n = 1,00866u$
- Z : Le nombre de protons
- A : Le nombre de nucléons
- $\Delta m({}_Z^AX)$: Le défaut de masse du noyau ${}_Z^AX$



❖ Remarque : Le défaut de masse d'un noyau ${}_Z^AX$ est toujours positif ($\Delta m({}_Z^AX) > 0$)

② Énergie de liaison

❖ Définition

L'énergie de liaison d'un noyau ${}^A_Z X$, est l'énergie qu'il faut fournir à ce noyau au repos pour le dissocier en ses nucléons pris au repos $E_l({}^A_Z X) = \Delta m({}^A_Z X) \times C^2$

❖ Remarque

- L'énergie de liaison d'un noyau ${}^A_Z X$ est toujours positive.
- L'énergie de liaison d'un nucléon isolé est toujours nulle

❖ Application

❶ Calculer l'énergie de liaison pour les noyaux ${}^4_2 H_e$ et ${}^7_3 L_i$

Calculons l'énergie de liaison du noyau ${}^4_2 H_e$

On a : $E_l({}^4_2 H_e) = \Delta m({}^4_2 H_e) \times C^2$ avec $\Delta m({}^4_2 H_e) = 3,038 \cdot 10^{-2} u$ et $1u = 931,5 MeV/C^2$

Donc: $E_l({}^4_2 H_e) = 3,038 \cdot 10^{-2} \times 931,5 \frac{MeV}{C^2} \times C^2 = 28,29 MeV$

Calculons l'énergie de liaison du noyau ${}^7_3 L_i$

On a : $E_l({}^7_3 L_i) = \Delta m({}^7_3 L_i) \times C^2$ avec $\Delta m({}^7_3 L_i) = 4,048 \cdot 10^{-2} u$ et $1u = 931,5 MeV/C^2$

Donc: $E_l({}^7_3 L_i) = 4,048 \cdot 10^{-2} \times 931,5 \frac{MeV}{C^2} \times C^2 = 37,71 MeV$

③ Énergie de liaison par nucléon

❖ Définition

L'énergie de liaison par nucléon d'un noyau notée ξ est : $\xi({}^A_Z X) = \frac{E_l({}^A_Z X)}{A}$

- $E_l({}^A_Z X)$: L'énergie de liaison en : **Mev**
- A : Le nombre de nucléons
- $\xi({}^A_Z X)$: L'énergie de liaison par nucléon en : **Mev/nucléon**

Un noyau est d'autant plus stable que son énergie de liaison par nucléon est grande.

❖ Application

❶ Calculer l'énergie de liaison par nucléon pour les noyaux ${}^4_2 H_e$ et ${}^7_3 L_i$ et déduire le noyau le plus stable

❷ Calculons l'énergie de liaison par nucléon pour les noyaux ${}^4_2 H_e$ et ${}^7_3 L_i$.

Pour le noyau ${}^4_2 H_e$

On a : $\xi({}^4_2 H_e) = \frac{E_l({}^4_2 H_e)}{A}$ avec $E_l({}^4_2 H_e) = 28,29 MeV$

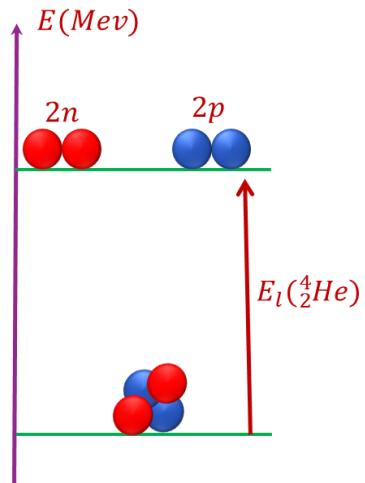
A.N : $\xi({}^4_2 H_e) = \frac{28,29}{4} = 7,07 MeV/nucléon$

Pour le noyau ${}^7_3 L_i$

On a : $\xi({}^7_3 L_i) = \frac{E_l({}^7_3 L_i)}{A}$ avec $E_l({}^7_3 L_i) = 37,71 MeV$

A.N : $\xi({}^7_3 L_i) = \frac{37,71}{7} = 5,39 MeV/nucléon$

Puisque $\xi({}^4_2 H_e) > \xi({}^7_3 L_i)$, donc ${}^4_2 H_e$ est plus stable que ${}^7_3 L_i$



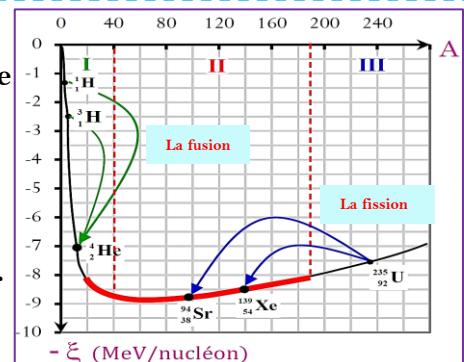
① La courbe d'Aston

❖ Activité

La courbe d'Aston représente la variation de l'opposé de l'énergie de liaison par nucléon $\frac{-E_l}{A}$ en fonction de nombre de nucléons A

Exploitation

- ① Dans quelle région de la courbe d'Aston se situent les noyaux stables
- ② Citer deux noyaux pour lesquels l'énergie de liaison par nucléon est très importante .
- ③ Comparer la stabilité des noyaux $^{56}_{26}Fe$ et $^{235}_{92}U$.

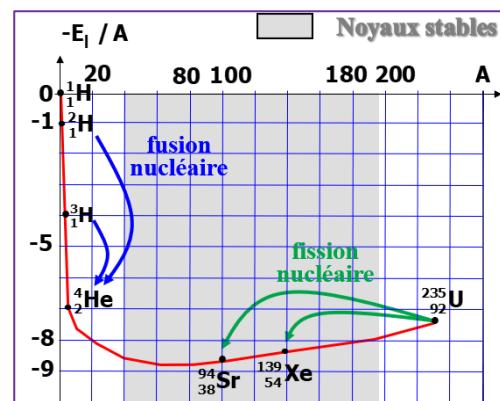


- ① Les noyaux stables se situent dans la région où $40 < A < 195$ (la région II)
- ② Les noyaux $^{56}_{26}Fe$ et $^{94}_{38}Sr$ ont une énergie de liaison par nucléon très importante
- ③ D'après la courbe d'Aston on a $\xi(^{56}_{26}Fe) > \xi(^{235}_{92}U)$. Donc le noyau $^{56}_{26}Fe$ est plus stable que $^{235}_{92}U$

❖ Conclusion

La courbe d'Aston représente la variation de l'opposé de l'énergie de liaison par nucléon $\frac{-E_l}{A}$ en fonction de nombre de nucléons A

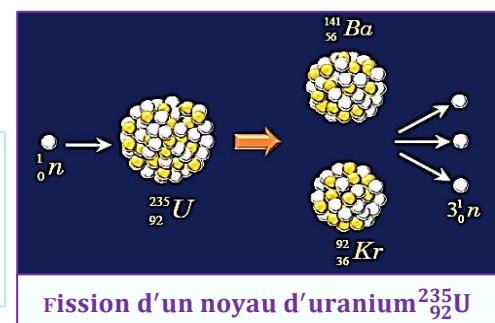
- Les noyaux stables se situent dans la région où $40 < A < 195$
- Les réactions de fusion nucléaire affecteront les noyaux les plus légers ($A < 40$)..
- Les réactions de fission nucléaire affecteront les noyaux les plus lourds ($A > 195$) .



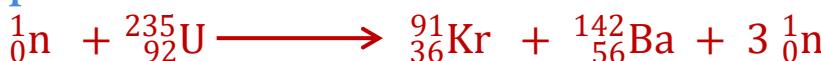
② La fission nucléaire

❖ Définition

La fission est une réaction nucléaire provoquée, au cours de laquelle un noyau lourd éclate, généralement en deux noyaux plus légers, sous l'impact d'un neutron thermique .

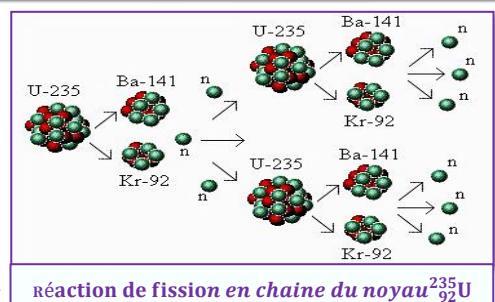


❖ Exemples



❖ Remarque

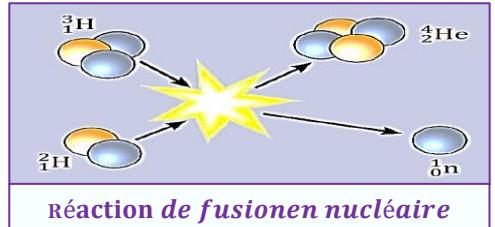
- La fission nucléaire est une réaction en chaîne . Elle produit des neutrons qui peuvent provoquer d'autre réactions de fission .
- La réaction en chaîne doit être contrôlée pour qu'elle ne soit pas explosive (*le cas de la bombe A*). lorsque la fission est contrôlée c'est le cas des réacteur nucléaire.



③ La fusion nucléaire

❖ Définition

La fusion est une réaction nucléaire provoquée, au cours de laquelle deux noyaux légers s'assemblent, pour former un noyau plus lourd .



❖ Exemples



❖ Remarques

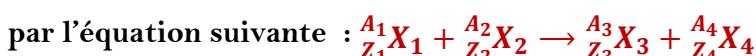
- La fusion n'est possible que si les deux noyaux possèdent une grande énergie cinétique pour vaincre les forces de répulsion électriques.
- La fusion se produit naturellement dans les étoiles. Dans une bombe thermonucléaire (*appelée bombe H*), la fusion nucléaire est incontrôlée et explosive.

IV

Bilan massique et énergétique d'une transformation nucléaire

① Cas générale d'une réaction nucléaire

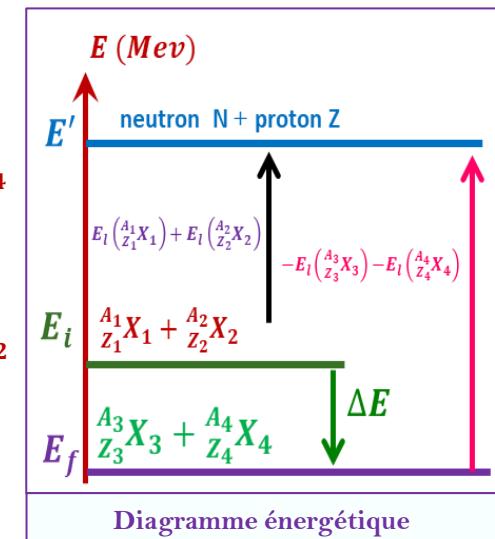
On considère la transformation nucléaire modélisée



L'énergie de cette réaction est :

$$\Delta E = [m(\text{produits}) - m(\text{réactifs})] \times C^2$$

$$\Delta E = \left[m\left({}_{Z_3}^{A_3}\text{X}_3\right) + m\left({}_{Z_4}^{A_4}\text{X}_4\right) - m\left({}_{Z_1}^{A_1}\text{X}_1\right) - m\left({}_{Z_2}^{A_2}\text{X}_2\right) \right] \times C^2$$



❖ Remarques

- Si $\Delta E < 0$: la réaction est exoénergétique .
- Si $\Delta E > 0$: la réaction est endoénergétique .
- L'énergie libérée (produite) par une réaction nucléaire est: $E_{libérée} = |\Delta E|$
- On peut calculer l'énergie de la réaction à partir des énergies de liaison , en utilisant la relation suivante : $\Delta E = E_l\left({}_{Z_1}^{A_1}\text{X}_1\right) + E_l\left({}_{Z_2}^{A_2}\text{X}_2\right) - E_l\left({}_{Z_3}^{A_3}\text{X}_3\right) - E_l\left({}_{Z_4}^{A_4}\text{X}_4\right)$

② Applications

❖ Bilan énergétique d'une réaction de fission

Calculer l'énergie produite par la réaction de fission suivante : $^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{94}_{38}\text{Sr} + ^{140}_{54}\text{Xe} + 2^1_0\text{n}$

On donne : $m(^{235}_{92}\text{U}) = 234,9935 \text{ u}$; $m(\text{n}) = 1,0087 \text{ u}$; $m(^{94}_{38}\text{Sr}) = 93,8945 \text{ u}$; $m(^{140}_{54}\text{Xe}) = 139,8920 \text{ u}$; $1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$

❖ Bilan énergétique d'une réaction de fusion

Calculer l'énergie produite par la réaction de fission suivante : $^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^1_0\text{n}$

On donne : $m(^2_1\text{H}) = 2,01355 \text{ u}$; $m(^3_1\text{H}) = 3,01550 \text{ u}$; $m(\text{n}) = 1,00866 \text{ u}$; $m(^4_2\text{He}) = 4,00150 \text{ u}$; $1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$

❖ Bilan énergétique d'une réaction β^-

Calculer l'énergie produite par la réaction de fission suivante : $^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + ^0_{-1}\text{e}$

On donne : $m(^{14}_6\text{C}) = 13,9999 \text{ u}$; $m(^{14}_7\text{N}) = 13,9992 \text{ u}$; $m(^0_{-1}\text{e}) = 0,00055 \text{ u}$

❖ Bilan énergétique d'une réaction β^+

Calculer l'énergie produite par la réaction de fission suivante : $^{13}_7\text{N} \rightarrow ^{13}_6\text{C} + ^0_{+1}\text{e}$

On donne : $m(^{13}_6\text{C}) = 13,00006 \text{ u}$; $m(^{13}_7\text{N}) = 13,00574 \text{ u}$; $m(^0_{+1}\text{e}) = 0,00055 \text{ u}$

❖ Bilan énergétique d'une réaction α

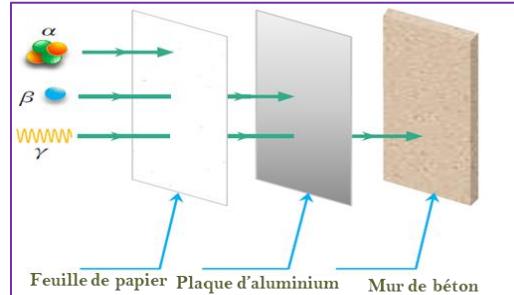
Calculer l'énergie produite par la réaction de fission suivante : $^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{222}_{86}\text{Rn} + ^4_2\text{He}$

On donne : $m(^{226}_{88}\text{Ra}) = 225,9770 \text{ u}$; $m(^{222}_{86}\text{Rn}) = 221,9702 \text{ u}$; $m(^4_2\text{He}) = 4,0015 \text{ u}$

① Le pouvoir de pénétration des rayonnements nucléaires

Le pouvoir de pénétration dépend du type de rayonnement et du pouvoir d'arrêt de la matière. Cela définit des épaisseurs différentes de matériaux pour s'en protéger, si nécessaire et si possible.

- Les rayons α : peuvent être arrêtés par une feuille de papier
- Les rayons β : peuvent être arrêtés par une plaque d'aluminium
- Les rayons γ peuvent être arrêtés par un mur de béton ou de plomb



② Les dangers de la radioactivité

Les effets de la radioactivité sur l'organisme humain dépendent du type de rayonnement et des doses d'exposition. "A très fortes doses, les rayons peuvent tuer des cellules et entraîner des modifications aiguës, une perte de capacité d'un organe. Ces effets sont appelés "réactions tissulaires". Ils ne surviennent pas dans l'exposition que l'on a tous les jours mais seulement de façon accidentelle" évoque notre interlocuteur. En revanche, même à faible dose, le risque de cancer est majoré chez les personnes exposées. Une étude coordonnée par le Centre International de recherche sur le cancer (CIRC) et publiée en juin 2015 dans la revue scientifique « *The Lancet Haematology* » a montré que l'exposition prolongée à de faibles doses de radioactivité accroît le risque de décès par leucémie chez les travailleurs du nucléaire. 300.000 travailleurs du nucléaire aux Etats-Unis, en France et au Royaume-Uni ont été suivis sur une période allant de 1943 à 2005 (62 ans). L'exposition à la radioactivité modifie l'ADN et augmente ainsi la fréquence du cancer.

③ Les applications de la radioactivité

❖ Les usages agricoles et industriels

Dans les secteurs agricole et agroalimentaire, la radioactivité est utilisée par exemple pour la protection des cultures contre les insectes ou la conservation des aliments. Dans l'industrie, on l'utilise pour des tâches variées (contrôle des soudures, détection de fuites ou d'incendies, etc.)

la production d'électricité par les centrales nucléaires, incluant toutes les étapes du cycle du combustible nucléaire (mineraux, enrichissement, fabrication du combustible, gestion des déchets et du combustible usé), la radiographie industrielle ainsi que la fabrication et l'utilisation de différentes jauge de mesure (épaisseur, niveau, densité etc.).

❖ Les usages en médecine

En médecine, la radioactivité est utilisée pour poser des diagnostics (radiographie, scanner, scintigraphie etc.), pour la stérilisation du matériel médical et également dans des buts thérapeutiques, principalement la radiothérapie externe ou interne.

❖ Les usages en géologie

Les radionucléides possèdent de nombreux usages en géologie, océanographie ou climatologie. Ils ont notamment permis de déterminer l'âge de la Terre et de découvrir l'histoire du climat. La radioactivité est aussi un moyen de prévoir les éruptions volcaniques et les séismes, et de suivre à la trace les courants océaniques.

Série d'exercices

Exercice 1

Le Cobalt $^{60}_{27}Co$ est radioactif β^- , dont le noyau fils est le Nikel $^{60}_{28}Ni$

- ① Écrire l'équation de désintégration du cobalt $^{60}_{27}Co$, en déterminant les nombres **A** et **Z**.
- ② Calculer en **Mev** l'énergie libérée lors de cette désintégration.
- ③ Déduire l'énergie libérée lors de la désintégration d'un gramme du cobalt $^{60}_{27}Co$.
- ④ Tracer le diagramme énergétique de cette désintégration.
- ⑤ Calculer en **Mev** l'énergie de liaison de $^{60}_{27}Co$ et celle de $^{60}_{28}Ni$. Déduire le noyau le plus stable.

Noyau	$^{60}_{27}Co$	$^{60}_{28}Ni$	$^{-1}_0e$	1_1p	1_0n
Masse en (<i>u</i>)	59,9190	59,9154	0,000549	1,00728	1,00866
$N_A = 6,02 \times 10^{23} mol^{-1}$; $1u = 931,5 Mev/c^2$					

Exercice 2

On considère la réaction de fusion : $^2_1H + ^3_1H \rightarrow ^4_2He + y^1_0n$

- ① En appliquant les lois de conservation ,déterminer les nombres **x** et **y**.
- ② Calculer en **Mev** l'énergie libérée lors de cette fusion .
- ③ Déduire l'énergie libérée lors de la réaction de fusion de **n = 2mol** de tritium .
- ④ Tracer le diagramme énergétique de cette fusion .
- ⑤ Calculer en **Mev** l'énergie de liaison de 3_1H et celle de 4_2He . Déduire le noyau le plus stable .

Noyau	2_1H	3_1H	4_2He	1_0n
Masse en (<i>u</i>)	2,01355	3,0155	1,0015	1,00866
$N_A = 6,02 \times 10^{23} mol^{-1}$; $1u = 931,5 Mev/c^2$				

Exercice 3

Dans des centrales nucléaire , l'énergie électrique est produite en utilisant l'énergie thermique générée par la fission nucléaire des noyaux d'uranium **235** . Parmi les réactions peuvent se produire on a : $^1_0n + ^{235}_{92}U \rightarrow ^{131}_{53}I + ^{99}_{a}Y + b^1_0n$

Noyau ou particule	$^{235}_{92}U$	$^{99}_{a}Y$	$^{131}_{53}I$	1_1p	1_0n
Masse en (<i>u</i>)	234,99346	98,90174	130,8770	1,00728	1,00866
$N_A = 6,02 \times 10^{23} mol^{-1}$; $1u = 931,5 Mev/c^2$; $1eV = 1,6 \times 10^{-19} J$; $\xi(^{131}_{53}I) = 8,451 MeV/nucléon$					

- ① En appliquant les lois de conservation ,déterminer les nombres **a** et **b**
- ② Vérifier que le défaut de masse du noyau d'uranium est : $\Delta m(^{235}_{92}U) = 1,91468 u$. Déduire la valeur de $E_l(^{235}_{92}U)$ l'énergie de liaison d'uranium **235** .
- ③ Parmi les deux noyaux $^{235}_{92}U$ et $^{131}_{53}I$, lequel le plus stable ? Justifier la réponse
- ④ Calculer en deux unités (**MeV** et **J**) ΔE l'énergie libérée lors de cette réaction de la fission
- ⑤ En déduire (en **J**) E_T l'énergie libérée lors de la fission d'un kilogramme d'uranium **235** .
- ⑥ Comparer E_T avec $E_P = 4,5 \times 10^5 J$; l'énergie libérée par la combustion d'un kilogramme de pétrole

PARTIE III : ÉLECTRICITÉ

1

Dipôle RC

2

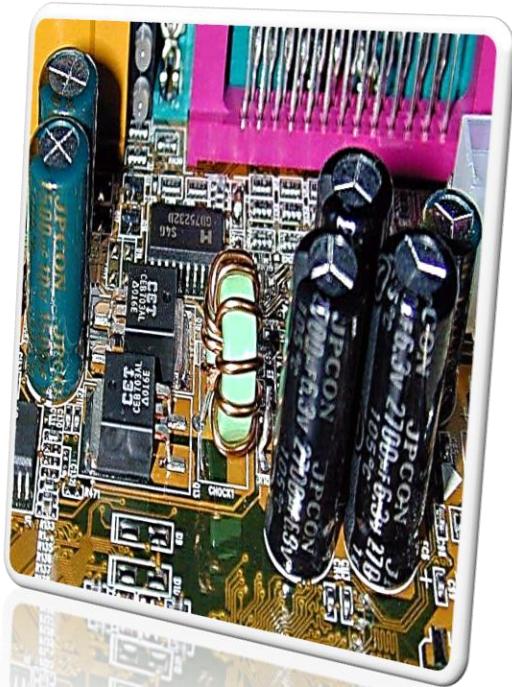
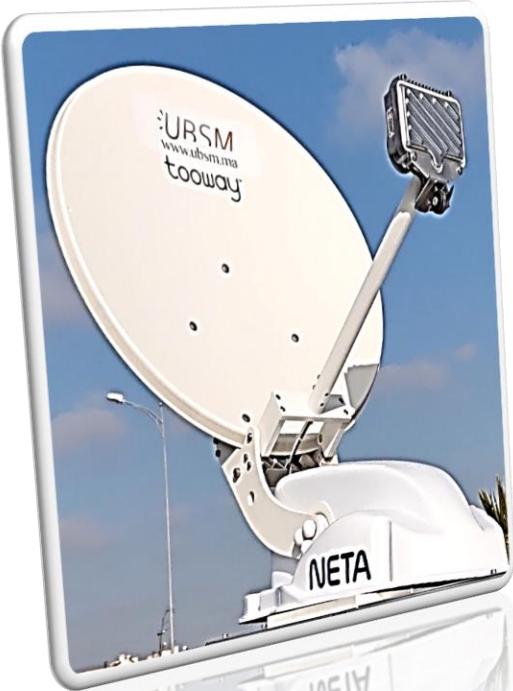
Dipôle RL

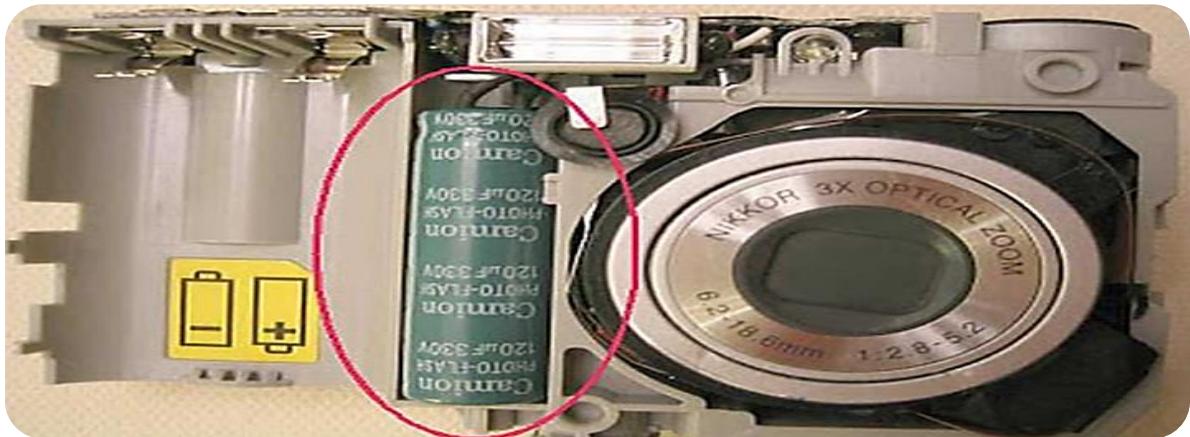
3

Oscillations Libres dans un Circuit RLC Série

4

Transmission d'informations – Modulation d'amplitude





Situation-problème

Les condensateurs sont caractérisés par le fait de stockage de l'énergie électrique pour l'utilisée au besoin . Cette propriété permet d'utiliser les condensateurs dans beaucoup d'appareils notamment dans les appareils photographiques

- 👉 Qu'est-ce qu'un condensateur ?
- 👉 Comment se comporte dans un circuit comprend un générateur et un conducteur ohmique ?

Objectifs

- 👉 Connaître les composants du condensateur et son symbole .
- 👉 Savoir déterminer la charge d'une armature d'un condensateur.
- 👉 Connaître la relation entre la charge et l'intensité de courant .
- 👉 Connaître la relation entre la charge et la tension aux bornes du condensateur .
- 👉 Savoir déterminer la capacité équivalente des condensateurs montés en série ou parallèle .
- 👉 Établir l'équation différentielle et sa solution pour un dipôle RC soumis à un échelon de tension .

I

Le condensateur

① Définition

Le condensateur est un dipôle constitué de deux plaques conductrices, appelées armatures, séparées par un isolant diélectrique.

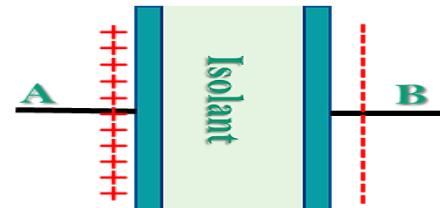
Le symbole du condensateur est :



Exemples des condensateurs

② Charge du condensateur

La charge du condensateur ou la quantité d'électricité emmagasiner dans le condensateur est la charge de l'armature positive du condensateur, son symbole est q et son unité est la coulomb (C) : $q = +q_A = -q_B$

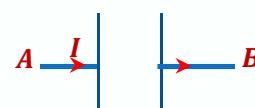


Un condensateur chargé

③ Relation entre la charge du condensateur et l'intensité du courant

L'intensité du courant électrique est le débit de porteurs de charge qui traversent la section du conducteur par unité du temps.

- Cas du courant continu : $I = \frac{q}{\Delta t}$
- Cas du courant variable : $i(t) = \frac{dq}{dt}$

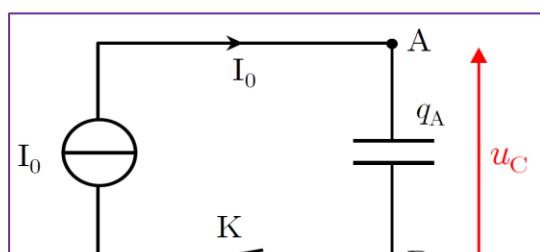


l'unité de l'intensité du courant est l'ampère (A)

④ Relation entre la charge et la tension aux bornes du condensateur

❖ Activité

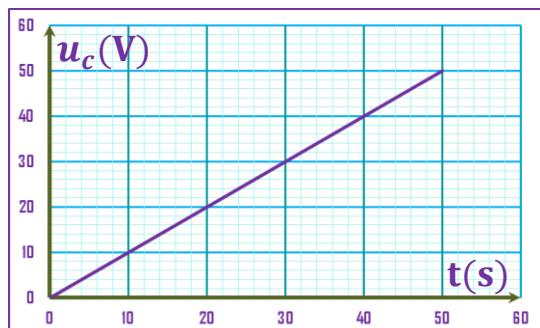
On charge un condensateur avec un générateur de courant qui débite un courant d'intensité constante $I_0 = 1mA$; on ferme l'interrupteur K et on visualise la tension u_c aux bornes du condensateur, et par un système d'acquisition adéquat, on obtient la courbe ci-contre qui représente les variations de la tension u_c en fonction du temps. Le condensateur étudier porte les informations suivantes : $[10^{-3}F; 100V]$



Charge du condensateur

Exploitation

- ① Donner l'expression de u_c en fonction de t .
- ② Montrer que la charge du condensateur à l'instant t est $q_A(t) = I_0 \cdot t$.
- ③ Déduire que $q_A(t) = k u_c(t)$
- ④ Le coefficient k est appelé la capacité et on la note C . Calculer la valeur de C et la comparer avec la valeur indiquée par le fabricant.



- La courbe $u_C = f(t)$ est une fonction linéaire d'équation : $u_C(t) = a \cdot t$ (a : est le coefficient directeur)
- On sait que $I_0 = \frac{dq_A}{dt}$ par intégration on trouve que : $q_A(t) = I_0 \cdot t + cte$
et puisque le condensateur est initialement déchargé on aura : $q_A(0) = 0 \Rightarrow cte = 0$
D'où $q_A(t) = I_0 \cdot t$
- On a $q_A(t) = I_0 \cdot t$ et d'après la question 1 on a $t = \frac{u_C}{a}$
Donc : $q_A(t) = \frac{I_0}{a} \cdot u_C(t) \Leftrightarrow q_A(t) = K \cdot u_C(t)$ (avec $K = \frac{I_0}{a}$)
- Le coefficient k est appelé la capacité et on la note C .
D'après la courbe on a : $a = \frac{50-40}{50-40} = 1V.s^{-1}$
Donc : $C = \frac{I_0}{a} = \frac{1.10^{-3}}{1} = 1.10^{-3}F$

❖ Conclusion

La **charge** $q(t)$ du condensateur est **proportionnelle** avec la **tension** $u_C(t)$ entre ses bornes , le **coefficient de proportionnalité** est appelé **capacité** du **condensateur** , on la note **C** , son unité en (S.I) est **Farad (F)** tel que : $q(t) = C \cdot u_C(t)$

❖ Remarque

La capacité du condensateur est une grandeur positive , elle distingue le condensateur et elle ne dépend pas de la tension entre ses bornes ni de la durée de charge .

- millifarad : $1mF = 10^{-3}$
- microfarad : $1\mu F = 10^{-6}$
- nanofarad : $1nF = 10^{-9}$
- picofarad : $1pF = 10^{-12}$

Sous-multiple de Farad

II Association des condensateurs

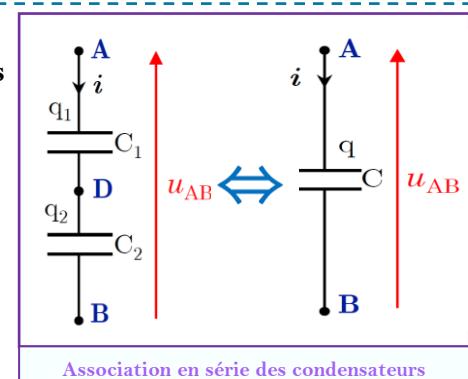
① Association en série

❖ Activité

On branche en série , deux condensateurs de capacités respectivement C_1 et C_2 , en série et on applique entre leurs bornes une tension U_{AB} (la figure ci-contre)

Exploitation

- Montrer $q_1 = q_2 = q$
- En appliquant la loi d'additivité des tensions , exprimer la capacité équivalente C en fonction de C_1 et C_2 .
- Déduire l'expression de la capacité de n condensateurs branchés en série
- Quelle est l'utilité de l'association en série .



- Les deux condensateurs branchés en série : $I = I_1 = I_2$ donc : $I \cdot t = I_1 \cdot t = I_2 \cdot t$
d'où : $q = q_1 = q_2$

- D'après la loi d'additivité des tensions , on a : $u_C = u_{C1} + u_{C2}$ avec $u_C = \frac{q}{C}$
Donc : $\frac{q}{C} = \frac{q_1}{C_1} + \frac{q_2}{C_2}$.

D'où la capacité C des deux condensateurs vérifiée l'équation : $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$

- La capacité de n condensateurs branchés en série vérifiée l'équation : $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$

- ④ L'association en série des condensateurs permet d'obtenir un condensateur de capacité plus petite pouvant supporter une tension plus grande qui ne peut pas être supportée par chaque condensateur s'il est utilisé séparément .

❖ Conclusion

La capacité du condensateur équivalent à un ensemble de condensateurs de capacités C_1 , C_2 , C_3 et C_n branchés en série est : $\frac{1}{C} = \sum \frac{1}{C_i} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}$

L'association en en série des condensateurs permet d'obtenir un condensateur de capacité plus petite pouvant supporter une tension plus grande qui ne peut pas être supportée par chaque condensateur s'il est utilisé séparément .

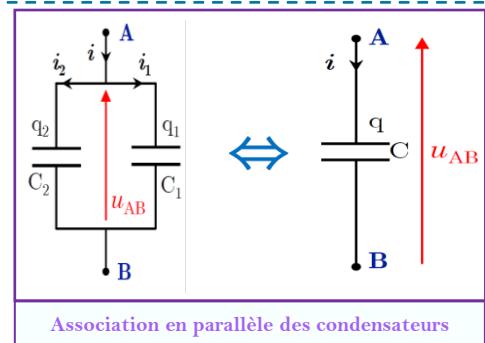
① Association en parallèle

❖ Activité

On branche en parallèle deux condensateurs de capacités respectivement C_1 et C_2 , en parallèle et on applique entre ces bornes une tension U_{AB} (la figure ci-contre)

Exploitation

- ① Montrer $q = q_1 + q_2$
- ② Exprimer la capacité équivalente C en fonction de C_1 et C_2 , et déduire l'expression de la capacité équivalente de n condensateurs branchés en parallèle .
- ③ Quelle est l'utilité de l'association en parallèle .



- ① D'après la loi des nœuds on a : $I = I_1 + I_2$ donc : $I \cdot t = I_1 \cdot t + I_2 \cdot t$
d'où : $q = q_1 + q_2$
- ② On a : $q = q_1 + q_2$ avec $q = C \cdot u_C$
donc: $C \cdot u_{AB} = C_1 \cdot u_{C1} + C_2 \cdot u_{C2}$ avec $u_{AB} = u_{C1} = u_{C2}$ (les condensateurs branchés en parallèle)
on aura : $C \cdot u_{AB} = C_1 \cdot u_{AB} + C_2 \cdot u_{AB} \Leftrightarrow C = C_1 + C_2$
- ③ La capacité de n condensateurs branchés en parallèle est : $C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$
- ④ L'association en parallèle des condensateurs permet d'obtenir un condensateur de capacité plus grande pouvant emmagasinée une charge plus grande sous une tension plus petite .

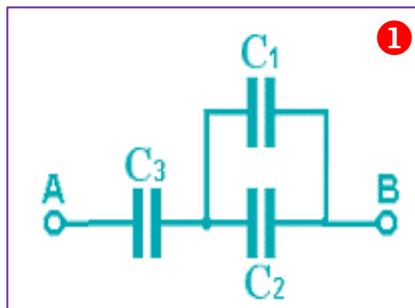
❖ Conclusion

La capacité du condensateur équivalent à un ensemble de condensateurs de capacités C_1 , C_2 , C_3 et C_n branchés en parallèle est : $C = \sum C_i = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$

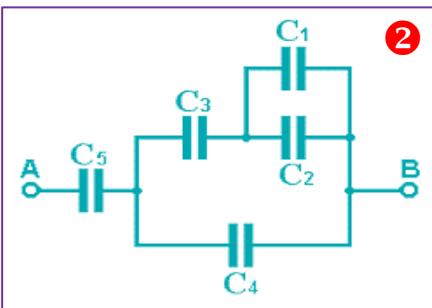
L'association en parallèle des condensateurs permet d'obtenir un condensateur de capacité plus grande pouvant emmagasiné une charge plus grande sous une tension plus petite .

❖ Application

① Calculer la capacité équivalente entre A et B dans les cas suivants



①



②

Données

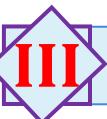
$$\begin{aligned}C_1 &= 2 \mu F \\C_2 &= 2,5 \mu F \\C_3 &= 0,5 \mu F \\C_4 &= 1,5 \mu F \\C_5 &= 1 \mu F\end{aligned}$$

□ Calculons la capacité équivalente du montage ①

- Les deux condensateurs de capacités C_1 et C_2 sont montés dérivation, donc ils sont équivalents à un condensateur de capacité $C' = C_1 + C_2 = 2 + 2,5 = 4,5 \mu F$
- Les deux condensateurs de capacités C_3 et C' sont montés série, donc ils sont équivalents à un condensateur de capacité $C_{eq1} = \frac{C' \cdot C_3}{C' + C_3} = \frac{0,5 \times 4,5}{0,5 + 4,5} = 0,45 \mu F$

□ Calculons la capacité équivalente du montage ②

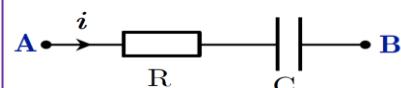
- La capacité équivalente des trois condensateurs C_1 , C_2 et C_3 est $C_{eq1} = 0,45 \mu F$
- Les deux condensateurs de capacités C_4 et C_{eq1} sont montés dérivation, donc ils sont équivalents à un condensateur de capacité $C'' = C_4 + C_{eq1} = 0,45 + 1,5 = 1,95 \mu F$
- Les deux condensateurs de capacités C_5 et C'' sont montés série, donc ils sont équivalents à un condensateur de capacité $C_{eq2} = \frac{C_5 \cdot C''}{C'' + C_5} = \frac{1 \times 1,95}{1 + 1,95} = 0,66 \mu F$



Réponse d'un dipôle RC série à un échelon de tension

① Le dipôle RC

Le dipôle RC série est l'association en série d'un conducteur ohmique de résistance R et d'un condensateur de capacité C



② Échelon de tension

On dit qu'un dipôle RC est soumis à un échelon de tension si la tension entre ses bornes varie instantanément de zéro jusqu'à une valeur constante E (échelon montant) où l'inverse (échelon descendant)

Échelon montant	Échelon descendant
<p>pour $t \leq 0 : u(t) = 0$ pour $t > 0 : u(t) = E$</p>	<p>pour $t \leq 0 : u(t) = E$ pour $t > 0 : u(t) = 0$</p>

③ Étude expérimentale de la réponse d'un dipôle RC à un échelon de tension

❖ Activité

On réalise le montage électrique ci-contre : Le condensateur est initiallement déchargé. On prend $E = 6V$; $C = 100\mu F$; $R = 2k\Omega$

À l'aide d'un oscilloscope on visualise la tension u_c aux bornes du condensateur lors de la charge (courbe A) et lors de la décharge (courbe B)

Exploitation

I- Charge du condensateur

A l'instant $t = 0$, on place K à la position ① et on visualise les variations de la tension u_c en fonction du temps. On obtient la courbe A.

- ① Quelle est la valeur maximale de la tension u_c
- ② Comparer cette valeur avec la f.e.m. du générateur
- ③ Le dipôle RC est caractérisé par une constante τ appelée la constante du temps et son expression est $\tau = RC$. Calculer la valeur de τ .
- ④ Vérifier que la tension u_c est atteint 63% de sa valeur maximale à l'instant $t = \tau$
- ⑤ Déterminer, graphiquement, la durée Δt nécessaire pour atteindre le régime permanent, et comparer cette valeur avec la durée 5τ

II-Décharge du condensateur

Après la charge totale du condensateur on bascule l'interrupteur K à la position ② et on obtient la courbe B

- ① Quelle est la valeur finale de la tension u_c
- ② Vérifier que la tension u_c est atteint 37% de sa valeur initiale à l'instant $t = \tau$
- ③ Déterminer, graphiquement, la durée Δt nécessaire pour atteindre le régime permanent, et comparer cette valeur avec la durée 5τ

I- Charge du condensateur

- ① La valeur maximale de la tension est : $u_{cmax} = 6V$

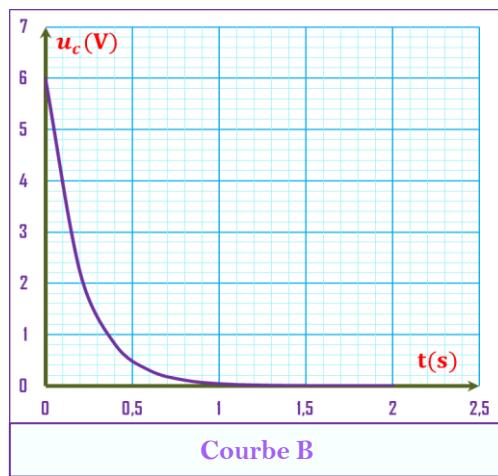
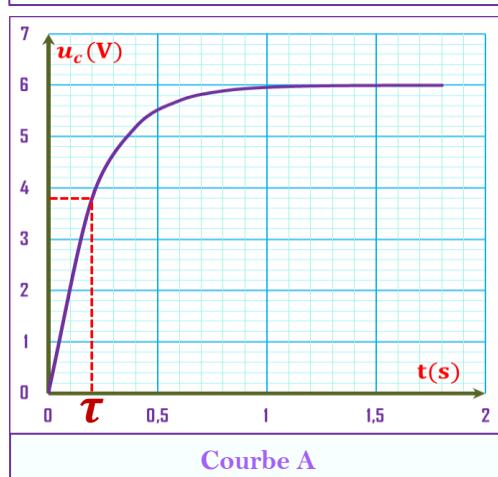
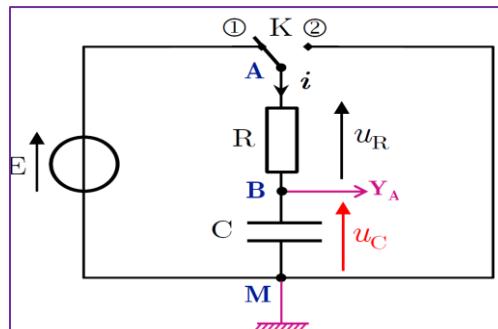
- ② On constate que : $u_{cmax} = E$

- ③ On a $\tau = RC = 100 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^3 = 0,2s$.

- ④ D'après la courbe A on a : $u_c(\tau) \approx 3,8V$ donc : $\frac{u_c(\tau)}{u_{cmax}} = \frac{3,8}{6} = 0,63$

$$\text{D'où : } u_c(\tau) = 63\% u_{cmax}$$

- ⑤ La durée Δt nécessaire pour atteindre le régime permanent est : $\Delta t = 1s$ et on a $5\tau = 5 \times 0,2 = 1s$ donc : $\Delta t = 5\tau$



II-Décharge du condensateur

- ① La valeur finale de la tension est : $u_{cf} = 0V$
- ② D'après la courbe A on a : $u_c(\tau) \approx 2,2 V$ donc : $\frac{u_c(\tau)}{u_{cmax}} = \frac{2,3}{6} = 0,37$
D'où : $u_c(\tau) = 37\% u_{cmax}$
- ③ La durée Δt nécessaire pour atteindre le régime permanent est : $\Delta t = 1s$
et on a $5\tau = 5 \times 0,2 = 1s$ donc : $\Delta t = 5\tau$

❖ Conclusion

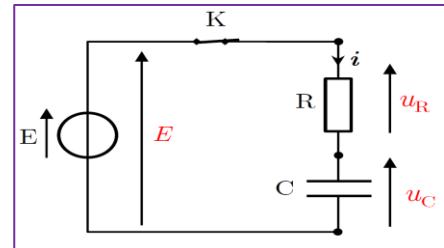
- La tension u_c aux bornes du condensateur est une fonction continue .
- La tension u_c aux bornes du condensateur croît pendant la charge et décroît pendant la décharge .
- On distingue entre deux régimes :
 - Régime transitoire : pendant lequel la tension u_c croît (ou décroît) et on l'obtient lorsque $t < 5\tau$
 - Régime permanent : pendant lequel La tension u_c reste constante et a pour valeur E (ou 0) et on l'obtient lorsque $t \geq 5\tau$
- La durée de charge ou décharge du condensateur augmente lorsque la valeur de R ou C augmente .

④ Réponse d'un dipôle RC à un échelon de tension montant (charge du condensateur) – étude théorique

❖ Équation différentielle

On réalise le montage électrique ci-contre : Le condensateur est initiallement déchargé.

À $t = 0$, on ferme l'interrupteur K



D'après la loi d'additivité des tensions on a : $u_C + u_R = E$

Et d'après la loi d'Ohm on $u_R = Ri$

Donc : $u_C + Ri = E$ avec $i = \frac{dq}{dt}$ et $q = Cu_C$

Alors $u_C + R \frac{dq}{dt} = E$

$$\Leftrightarrow u_C + R \frac{d(Cu_C)}{dt} = E$$

$$\Leftrightarrow u_C + RC \frac{du_C}{dt} = E$$

→ C'est l'équation différentielle vérifiée par la tension u_C aux bornes du condensateur .

▪ Remarque

Si on remplace u_C par $\frac{q}{C}$ dans l'équation différentielle on trouve :

$$\frac{q}{C} + RC \frac{d(\frac{q}{C})}{dt} = E \Leftrightarrow \frac{q}{C} + \frac{R.C}{C} \frac{dq}{dt} = E$$

$$\Leftrightarrow q + R.C \frac{dq}{dt} = CE$$

→ C'est l'équation différentielle vérifiée par la charge $q(t)$ du condensateur .

❖ La solution de l'équation différentielle

On admet que la solution de l'équation différentielle vérifiée par la tension u_c s'écrit sous la forme suivante : $u_c(t) = A \cdot e^{-mt} + B$ avec A , B et m sont des constantes à déterminer

▪ On détermine B et m en utilisant l'équation différentielle

On remplace la solution $u_c(t) = A \cdot e^{-mt} + B$ dans l'équation différentielle suivante :

$$\Leftrightarrow u_c + RC \frac{du_c}{dt} = E$$

$$\Leftrightarrow A \cdot e^{-mt} + B + RC \frac{d(A \cdot e^{-mt} + B)}{dt} = E$$

$$\Leftrightarrow A \cdot e^{-mt} - RC A m e^{-mt} = E - B$$

$$\Leftrightarrow A \cdot e^{-mt} (1 - RCm) = E - B$$

Pour que cette équation soit vérifiée $\forall t \geq 0$ il faut que : $1 - RCm = 0$ et $E - B = 0$

$$\text{Donc : } m = \frac{1}{RC} = \frac{1}{\tau} \text{ et } E = B$$

Alors la tension aux bornes du condensateur devient : $u_c(t) = A \cdot e^{-t/\tau} + E$

▪ On détermine A en utilisant les conditions initiales

À $t = 0$ le condensateur est initialement

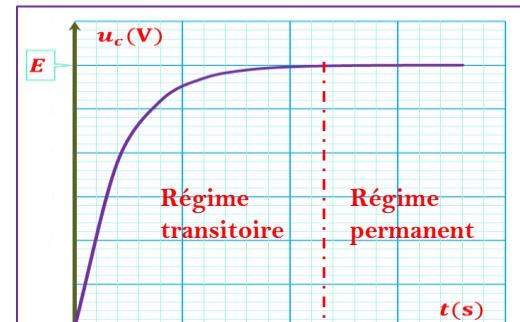
déchargé donc : $u_c(0) = 0$

Et on a $u_c(0) = A \cdot e^0 + E$

$$\Leftrightarrow A + E = 0$$

$$\Leftrightarrow A = -E$$

Finalement on aura : $u_c(t) = E(1 - e^{-t/\tau})$



Les variations de la tension u_c au cours du temps

❖ L'expression de la charge du condensateur

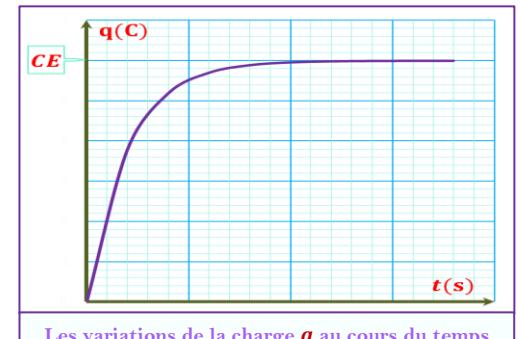
On sait que $q(t) = Cu_c(t)$

Et on a : $u_c(t) = E(1 - e^{-t/\tau})$

Donc : $q(t) = CE(1 - e^{-t/\tau})$

Ou bien : $q(t) = Q_m(1 - e^{-t/\tau})$

Q_m : est la charge maximale stockée dans le condensateur .



Les variations de la charge q au cours du temps

❖ L'expression de l'intensité du courant

On sait que $i(t) = \frac{dq}{dt}$

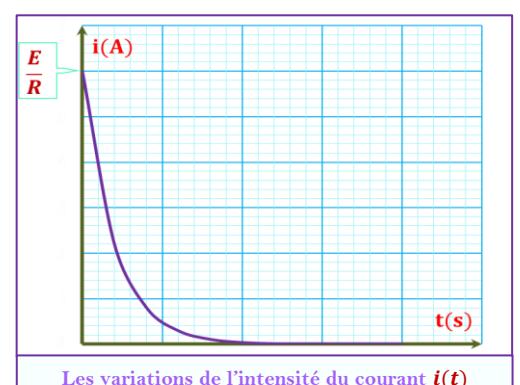
Et on a : $q(t) = CE(1 - e^{-t/\tau})$

Donc : $i(t) = \frac{CE}{\tau} e^{-t/\tau}$ avec $\tau = RC$

$$\Leftrightarrow i(t) = \frac{E}{R} e^{-t/\tau}$$

$$\Leftrightarrow i(t) = I e^{-t/\tau}$$

I est l'intensité du courant en régime permanent : $I = \frac{E}{R}$



Les variations de l'intensité du courant $i(t)$

⑤ Réponse d'un dipôle RC à un échelon de tension descendant (décharge du condensateur) – étude théorique

❖ Équation différentielle

On réalise le montage électrique ci-contre : Le condensateur est initiallement chargé.

À $t = 0$, on bascule l'interrupteur **K** à la position ②

D'après la loi d'additivité des tensions on a : $u_C + u_R = 0$

Et d'après la loi d'Ohm on $u_R = Ri$

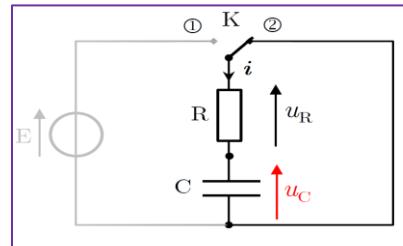
Donc : $u_C + Ri = 0$ avec $i = \frac{dq}{dt}$ et $q = Cu_C$

Alors $u_C + R \frac{dq}{dt} = 0$

$$\Leftrightarrow u_C + R \frac{d(Cu_C)}{dt} = 0$$

$$\Leftrightarrow u_C + RC \frac{du_C}{dt} = 0$$

→ C'est l'équation différentielle vérifiée par la tension u_C aux bornes du condensateur.



▪ Remarque

Si on remplace u_C par $\frac{q}{C}$ dans l'équation différentielle on trouve :

$$\begin{aligned} \frac{q}{C} + RC \frac{d(\frac{q}{C})}{dt} = E &\Leftrightarrow \frac{q}{C} + \frac{R.C}{C} \frac{dq}{dt} = E \\ &\Leftrightarrow q + R.C \frac{dq}{dt} = CE \end{aligned}$$

→ C'est l'équation différentielle vérifiée par la charge $q(t)$ du condensateur.

❖ La solution de l'équation différentielle

On admet que la solution de l'équation différentielle vérifiée par la tension u_C s'écrit sous la forme suivante : $u_C(t) = A \cdot e^{-mt} + B$ avec A , B et m sont des constantes à déterminer

▪ On détermine B et m en utilisant l'équation différentielle

On remplace la solution $u_C(t) = A \cdot e^{-mt} + B$ dans l'équation différentielle suivante :

$$\Leftrightarrow u_C + RC \frac{du_C}{dt} = 0$$

$$\Leftrightarrow A \cdot e^{-mt} + B + RC \frac{d(A \cdot e^{-mt} + B)}{dt} = 0$$

$$\Leftrightarrow A \cdot e^{-mt} - RC A m e^{-mt} = -B$$

$$\Leftrightarrow A \cdot e^{-mt}(1 - RCm) = -B$$

Pour que cette équation soit vérifiée $\forall t \geq 0$ il faut que : $1 - RCm = 0$ et $-B = 0$

$$\text{Donc : } m = \frac{1}{RC} = \frac{1}{\tau} \text{ et } B = 0$$

Alors la tension aux bornes du condensateur devient : $u_C(t) = A \cdot e^{-t/\tau}$

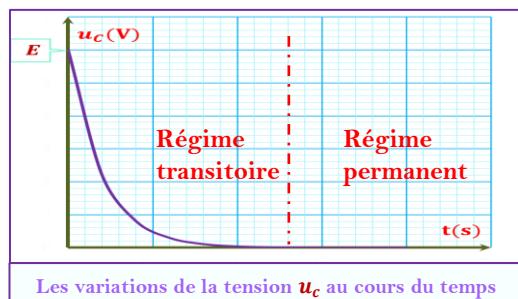
▪ On détermine A en utilisant les conditions initiales

À $t = 0$ le condensateur est initiallement déchargé donc : $u_C(0) = E$

Et on a $u_C(0) = A \cdot e^0$

$$\Leftrightarrow E = A$$

Finalement on aura : $u_C(t) = E e^{-t/\tau}$



❖ L'expression de la charge du condensateur

On sait que $q = Cu_C$

Et on a : $u_C(t) = Ee^{-t/\tau}$

Donc : $q(t) = CEe^{-t/\tau}$

Ou bien : $q(t) = Q_m e^{-t/\tau}$

Q_m : est la charge maximale stockée dans le condensateur .

❖ L'expression de l'intensité du courant

On sait que $i(t) = \frac{dq}{dt}$

Et on a : $q(t) = -CEe^{-t/\tau}$

Donc : $i(t) = -\frac{CE}{\tau} e^{-t/\tau}$

$$\Leftrightarrow i(t) = -\frac{E}{R} e^{-t/\tau}$$

$$\Leftrightarrow i(t) = -I e^{-t/\tau}$$

⑥ Constante du temps

❖ Définition

On définit la constante du temps du **dipôle RC série** par la relation suivante $\tau = R.C$

❖ La dimension de la constante du temps

On a : $\tau = R.C \Leftrightarrow [\tau] = [R][C]$

Et on sait que : $R = \frac{u_R}{i(t)} \Leftrightarrow [R] = \frac{[U]}{[I]}$

Et : $i(t) = C \frac{du_C}{dt} \Leftrightarrow [I] = \frac{[C][U]}{[T]}$

$$\Leftrightarrow [C] = \frac{[I][T]}{[U]}$$

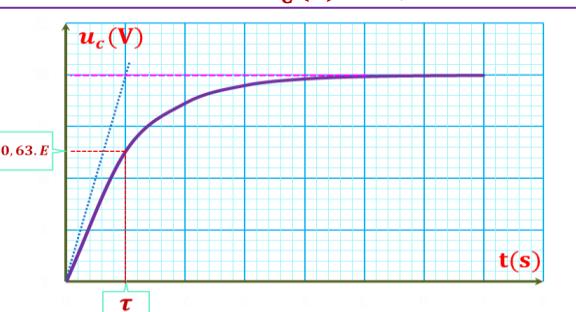
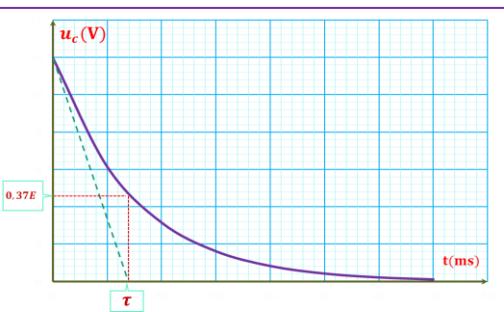
On remplace ② et ③ dans ① on

$$\text{trouve : } [\tau] = \frac{[U]}{[I]} \frac{[I][T]}{[U]} = [T]$$

Donc : $[\tau] = [T]$

La dimension de la constante
du temps τ est le temps

❖ La détermination graphique de constante du temps

Cas de la charge	Cas de la décharge
<p>Méthode 1: τ : Représente l'abscisse du point d'intersection de la tangente à la courbe $u_C = f(t)$ à $t = 0$ et la asymptote $u_C = E$</p> <p>Méthode 2: on a : $u_C(t) = E \cdot (1 - e^{-\tau \cdot t})$ donc $u_C(\tau) = E \cdot (1 - e^{-1})$ alors $u_C(\tau) = 0,63 \cdot E$</p> 	<p>Méthode 1: τ : Représente le point d'intersection de la tangente à la courbe $u_C = f(t)$ à $t = 0$ et l'axe des abscisses</p> <p>Méthode 2: on $u_C(t) = E \cdot e^{-\tau \cdot t}$ donc $u_C(\tau) = E \cdot e^{-1}$ alors $u_C(\tau) = 0,37 \cdot E$</p> 

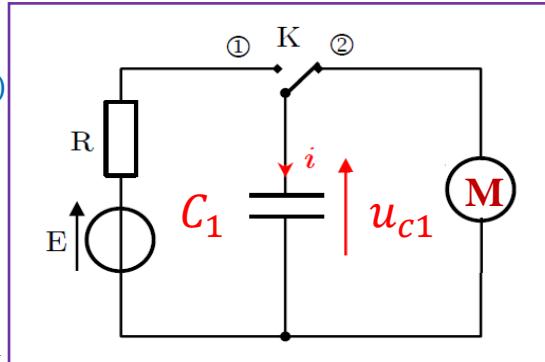
IV

L'énergie stockée dans le condensateur

① Mise en évidence l'énergie électrique stockée dans le condensateur

On réalise le montage schématisé ci-contre

- Deux générateurs de tension (6V; 12V)
- Conducteur ohmique ($R = 12\Omega$)
- Deux condensateurs ($C_1 = 100\mu F$; $C_2 = 4700\mu F$)
- Interrupteur double
- Moteur électrique
- Fils de connexion



Exploitation

On place l'interrupteur à la position ① jusqu'à la charge totale du condensateur de capacité C_1 , puis on bascule l'interrupteur à la position ②

- ① Quelle est la source d'énergie qui fait tourner le moteur électrique ?
 - ② Quels sont les différents transferts d'énergie mises en jeu par cette expérience ?
 - ③ Remplacer le condensateur de capacité C_1 par celui de capacité C_2 . Que remarquez-vous à propos du nombre de tours du moteur ?
 - ④ Changer la f.e.m. du générateur (12V au lieu de 6V) Que remarquez-vous à propos du nombre de tours du moteur ?
-
- ① La source d'énergie qui fait tourner le moteur électrique est l'énergie emmagasinée dans le condensateur
 - ② Lorsqu'on bascule l'interrupteur à la position ②, l'énergie stockée initialement dans le condensateur se transforme en énergie mécanique dans le moteur (énergie utile) et une énergie thermique (énergie dissipée par l'effet joule)
 - ③ Lorsqu'on remplace le condensateur de capacité C_1 par autre de capacité C_2 . On constate que le nombre de tours effectués par le moteur augmente .
 - ④ Lorsqu'on change la f.e.m. du générateur (12V au lieu de 6V) On constate que le nombre de tours effectués par le moteur augmente .²

② Définition

L'énergie stockée dans le condensateur à un instant t est donnée par la relation suivante :

$$E_e = \frac{1}{2} C \cdot u_C^2 = \frac{1}{2 \cdot C} \cdot q^2$$

- E_e : l'énergie électrique en joule (J)
- u_C : la tension aux bornes du condensateur en volt (V)
- C : la capacité du condensateur en farad (F)
- q : la charge du condensateur en coulomb (C)

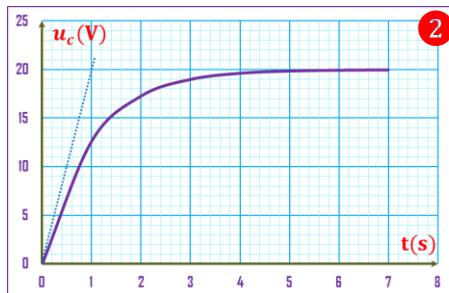
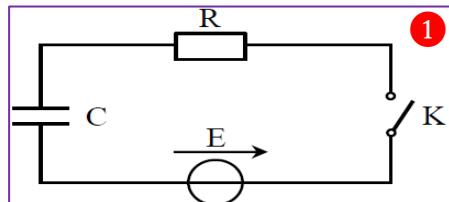
Exercice 1

Pour déterminer la capacité d'un condensateur on réalise la figure ① qui est formée des éléments suivants :

- Générateur idéal de tension de f.e.m. $E = 20V$
- Conducteur ohmique de résistance $R = 1K\Omega$
- Condensateur déchargé de capacité C
- Interrupteur K
- Filles de connexion

À l'instant $t = 0$, on ferme l'interrupteur K et on visualise par un dispositif convenable les variations de tension u_C appliquée aux bornes du condensateur en fonction du temps et on obtient la courbe de la figure ②

- ① Représenter sur la figure ① dans la convention de récepteur les tensions u_C et u_R .
- ② Déterminer l'équation différentielle vérifiée par la tension u_C aux bornes du condensateur.
- ③ Trouver les expressions de A et τ pour que l'expression $u_C = A(1 - e^{-t/\tau})$ soit solution de l'équation différentielle.
- ④ Déterminer l'expression de la charge $q(t)$ ainsi de l'intensité $i(t)$.
- ⑤ Par l'analyse dimensionnelle, montrer que τ a une dimension du temps.
- ⑥ Déterminer graphiquement la valeur de τ , et déduire la valeur de capacité C .
- ⑦ Calculer l'énergie électrique E_e stockée dans le condensateur dans le régime permanent.

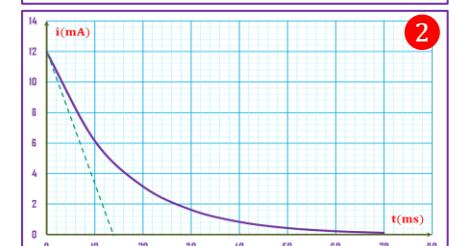
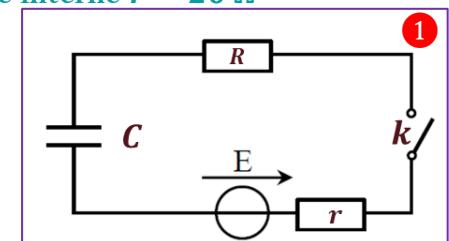


Exercice 2

Pour déterminer la capacité C d'un condensateur, on réalise le montage électrique schématisé sur la figure ① qui comporte :

- Générateur de tension de f.e.m. $E = 12V$ et de résistance interne $r = 20 \Omega$
- Conducteur ohmique de résistance R
- Condensateur déchargé de capacité C
- Interrupteur K

À l'instant $t = 0$, on ferme l'interrupteur K et par un système d'acquisition convenable, on visualise la variation de l'intensité du courant $i(t)$ en fonction du temps (la courbe de la figure ②).



- ① Représenter sur la figure ① dans la convention réceptrice les différentes tensions.
- ② Déterminer l'équation différentielle vérifiée par la tension u_C aux bornes du condensateur.
- ③ Trouver les expressions de A et τ pour que l'expression $u_C = A(1 - e^{-t/\tau})$ soit solution de l'équation différentielle.
- ④ L'intensité du courant électrique s'écrit sous la forme $i(t) = I_0 e^{-t/\tau}$. Trouver l'expression de I_0 en fonction de E , r , R .
- ⑤ En exploitant la courbe de la figure ② :
 - a – Trouver la valeur de la résistance R
 - b – Déterminer la valeur de τ et déduire la valeur de la capacité C .



Situation-problème

Les bobines sont des éléments principaux dans le fonctionnement des moteurs électriques et dans les allumages de voitures

- 👉 Qu'est-ce qu'une bobine ?
- 👉 Comment se comporte dans un circuit comprend un générateur et un conducteur ohmique ?

Objectifs

- 👉 Connaître le symbole de la bobine .
- 👉 Connaître l'expression de la tension aux bornes de la bobine .
- 👉 Savoir déterminer l'inductance de la bobine et sa résistance interne .
- 👉 Établir l'équation différentielle et sa solution pour un dipôle RL soumis à un échelon de tension .
- 👉 Savoir déterminer la constante du temps du dipôle RL .
- 👉 Connaître l'expression de l'énergie stockée dans la bobine .
- 👉 Connaître le comportement d'une bobine dans un circuit électrique .

I

La bobine

① Définition

La **bobine** est un **dipôle** constitué d'un **enroulement** non connecté de **fil conducteur** de cuivre autour d'un **noyau**.



Exemples des bobines

② La représentation de la bobine

La bobine est symbolisée par : (L, r) ——————
Ou L r

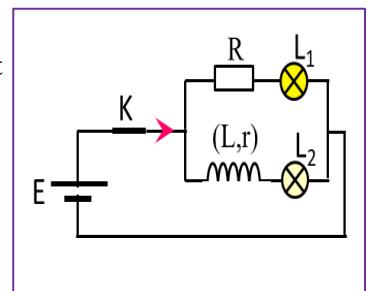
L : est l'inductance de la bobine son unité en (S.I) est **Henry (H)**

r : est la résistance interne de la bobine son unité en (S.I) est **Ohm (Ω)**

③ Le comportement d'une bobine dans un circuit électrique

❖ Activité

On réalise le montage électrique schématisé sur la figure ci-contre. Une des dérivation comporte une bobine de résistance interne **r** et d'inductance **L** et une lampe **L₁**. La deuxième dérivation comporte un conducteur ohmique de résistance **R** ($R = r$) et , une lampe **L₂**, identique à **L₁**. On ferme l'interrupteur et on observe l'éclat des lampes .



Exploitation

- ① Les deux lampes brillent-elles instantanément ? Conclure .
- ② Que peut-on déduire ?
- ① La lampe **L₂** brille en retard par rapport à la lampe **L₁** .
- ② On déduit que la bobine résiste l'établissement du courant lors de fermeture de l'interrupteur **K**

❖ Conclusion

La **bobine résiste l'établissement** ou **l'annulation** du **courant** qui la traverse , cette résistance augmente lorsqu'un noyau de fer forgé est inséré dans la bobine

④ La tension aux bornes de la bobine

❖ Activité

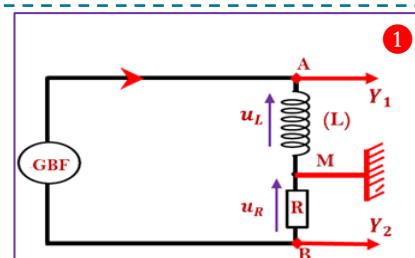
❖ Manipulation I

On réalise le montage électrique schématisé par la figure ①.

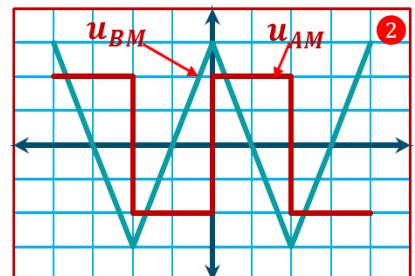
- $R = 150\Omega$; $L = 10mH$ (r est négligeable)

Données

- Sensibilité horizontale : $S_H = 1ms/div$
- Sensibilité verticale de Y_1 est : $S_1 = 0,1V/div$
- Sensibilité verticale de Y_2 est : $S_2 = 1V/div$



On règle le **GBF** pour qu'il délivre un courant électrique triangulaire de fréquence $f = 250Hz$ et l'amplitude de sa tension est : $U_m = 3V$ et obtient l'oscillogramme de la figure ② qui représente les tensions visualisées aux voix Y_1 et Y_2 de l'oscilloscope



Exploitation

- Exprimer la tension u_{BM} en fonction de $i(t)$ et R

- On considère une demi-période d'oscillations. En utilisant

l'oscillogramme de la figure ②. Montre que l'intensité du courant peut s'écrire sous la forme : $i(t) = at + b$

a - Déterminer la valeur de a .

b - Déterminer graphiquement la valeur de u_L

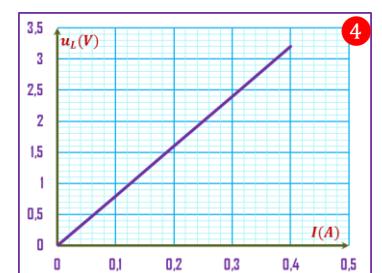
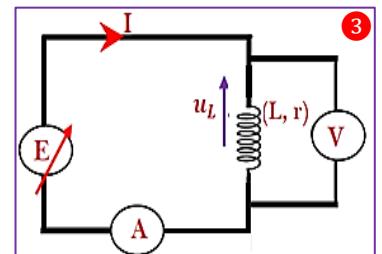
c - Calculer la valeur du rapport $\frac{u_L}{di}$ et la comparer avec la valeur de L et déduire

l'expression de u_L en fonction de L et $\frac{di}{dt}$

❖ Manipulation II

On réalise le montage schématisé dans la figure ③

On change les valeurs de la tension du générateur, et à chaque fois on mesure la tension u_L aux bornes de la bobine et ainsi l'intensité du courant I qui la traverse lorsque le régime permanent est établi. La courbe de la figure ④ représente les variations de la tension u_L en fonction de l'intensité du courant I.



- Déterminer la valeur du coefficient directeur de la fonction $u_L = f(I)$ et la comparer avec la valeur de r et déduire la relation entre u_L , r et I. On donne $r = 8\Omega$

- Comment la bobine se comporte en régime permanent

En se basant sur les deux manipulations. Proposer une expression de la tension u_L aux bornes de la bobine

❖ Manipulation I

- D'après le schéma de la figure ① on a : $u_{BM} = -u_R$ donc : $u_{BM} = -Ri(t)$.

- a - D'après la courbe de la figure ② on a : dans la première demi-période d'oscillations $[0; \frac{T}{2}]$. La tension $u_{BM} = f(t)$ est affine d'équation $u_{BM} = Kt + c$ et puisque

$u_{BM} = -Ri(t)$ donc $i(t)$ est aussi une fonction affine d'équation $i(t) = -\frac{K}{R}t - \frac{c}{R}$

d'où $i(t) = at + b$ avec : $a = -\frac{K}{R}$ et $b = -\frac{c}{R}$

On a : $K = \frac{(3-0) \times 1}{(0-1) \times 10^{-3}} = -3 \times 10^3 V.s^{-1}$ donc : $a = -\frac{K}{R} = -\frac{(-3 \times 10^3)}{150} = 20V.s^{-1}. \Omega^{-1}$

b – D'après la courbe de la figure ② dans la première demi-période d'oscillations

$$\left[0; \frac{T}{2}\right] \text{ on a : } u_L = 2 \times 0,1 = 0,2V$$

c – On a $\frac{di}{dt} = a \Leftrightarrow \frac{u_L}{\frac{di}{dt}} = \frac{u_L}{a} = \frac{0,2}{20} = 0,01H$ et on a $L = 10mH = 0,01H$ donc : $\frac{u_L}{\frac{di}{dt}} = L \Leftrightarrow u_L = L \frac{di}{dt}$

❖ Manipulation II

① D'après la courbe de la figure on a la fonction $u_L = f(I)$ est linéaire d'équation : $u_L = \alpha I$

$$\text{avec : } \alpha = \frac{0-0,8}{0-0,1} = 8\Omega \text{ on remarque que : } \alpha = r \text{ d'où : } u_L = rI$$

② La bobine se comporte en régime permanent comme un conducteur ohmique de résistance r

En se basant sur les deux manipulations . On déduit que la tension u_L aux bornes de la bobine est : $u_L = r \cdot i + L \frac{di}{dt}$

❖ Conclusion

Pour une bobine sans noyau de fer , et on convention réceptrice , la tension aux bornes de la bobine est : $u_L = r \cdot i + L \frac{di}{dt}$

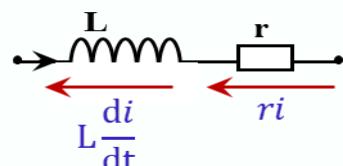
u_L : la tension aux bornes de la bobine en (V)

L : est l'inductance de la bobine en (H)

r : est la résistance interne de la bobine en (Ω)

i : l'intensité du courant en (A)

t : le temps en (s)



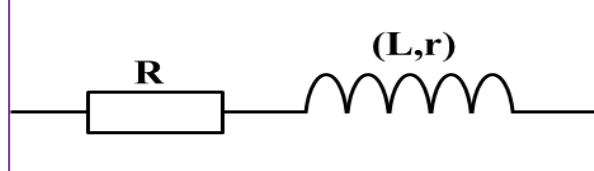
❖ Remarques

- En régime permanent la bobine se comporte comme un conducteur ohmique de résistance r
- La bobine résiste l'établissement ou l'annulation du courant qui la traverse à cause du produit $L \frac{di}{dt}$
- Si l'intensité du courant est variée très rapide , la dérivé $\frac{di}{dt}$ prend une valeur très grande et ainsi que u_L , d'où elle apparaître une surtension aux bornes de la bobine . Ce phénomène est utilisé par exemple pour provoquer des étincelles aux bornes de la bougie d'un moteur à essence et l'allumage des lampes au néon .

II Réponse d'un dipôle RL à un échelon de tension

① Le dipôle RL série

Le dipôle RL série est l'association en série d'un conducteur ohmique de résistance R et d'une bobine d'inductance L et de résistance interne r .



② Étude expérimentale de la réponse d'un dipôle RL à un échelon de tension

❖ Activité

On réalise le montage électrique ci-contre :

$$E = 6V ; L = 0,2H ; r = 8\Omega ; R = 92\Omega$$

À l'aide d'un système d'acquisition convenable on visualise l'évolution temporelle de l'intensité $i(t)$ lors de l'établissement du courant (courbe A) et lors de l'annulation du courant (courbe B)

Exploitation

I-Etablissement du courant

A l'instant $t = 0$, on place K à la position ① et on visualise les variations de l'intensité $i(t)$ en fonction du temps , et on obtient la courbe A .

- ① Déterminer la valeur maximale de l'intensité du courant ,et la comparer avec la valeur de $\frac{E}{R_T}$
- ② Le dipôle RL est caractérisé par une constante τ appelée la constante du temps et son expression est $\tau = \frac{L}{R_T}$. Calculer la valeur de τ .
- ③ Vérifier que l'intensité $i(t)$ atteint 63% de sa valeur maximale à l'instant $t = \tau$
- ④ Déterminer , graphiquement , la durée Δt nécessaire pour atteindre le régime permanent , et comparer cette valeur avec la durée 5τ

II-Annulation du courant

Lorsque le régime permanent est établi , on bascule l'interrupteur k en position ② et on obtient la courbe B

- ① Quelle est la valeur finale de la tension u_L
- ② Vérifier que l'intensité $i(t)$ atteint 37% de sa valeur initiale à l'instant $t = \tau$
- ③ Déterminer , graphiquement , la durée Δt nécessaire pour atteindre le régime permanent , et comparer cette valeur avec la durée 5τ

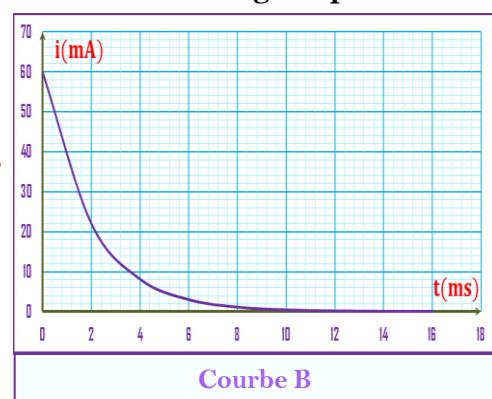
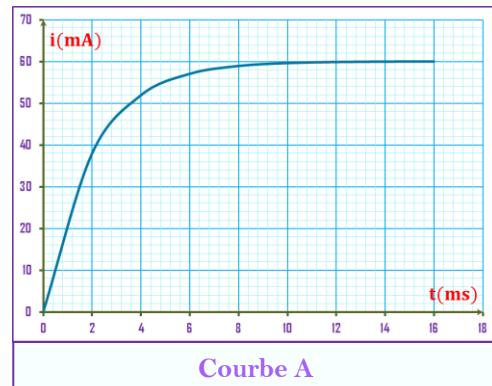
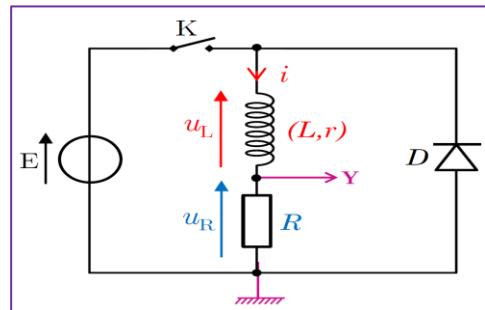
I-Etablissement du courant

- ① La valeur maximale de l'intensité du courant est : $I_{max} = 60mA$

$$② \text{ On a } \tau = \frac{L}{R_T} = \frac{0,2}{92+8} = 2 \times 10^{-3} s$$

$$③ \text{ D'après la courbe (A) on a : } i(\tau) \approx 37,8 mA \text{ donc : } \frac{i(\tau)}{I_{max}} = \frac{37,8}{60} = 0,63 \\ \text{ D'où : } i(\tau) = 63\% I_{max}$$

- ④ La durée Δt nécessaire pour atteindre le régime permanent est : $\Delta t = 10ms$ et on a $5\tau = 5 \times 2 \times 10^{-3} = 0,01s = 10ms$ donc : $\Delta t = 5\tau$



II-Annulation du courant

- ① D'après la loi d'additivité des tensions on : $u_L + u_R = 0 \Leftrightarrow u_L = -u_R$
on régime permanent on $i(t) = 0A$ donc : $u_R = Rt(t) = 0V$ d'où : $u_L(t) = 0V$
- ② D'après la courbe (B) on a : $i(\tau) \approx 22,2mA$ donc : $\frac{i(\tau)}{I_{max}} = \frac{22,2}{60} = 0,37$
D'où : $i(\tau) = 37\%I_{max}$
- ③ La durée Δt nécessaire pour atteindre le régime permanent est : $\Delta t = 10mss$
et on a $5\tau = 5 \times 2 \times 10^{-3} = 0,01s = 10ms$ donc : $\Delta t = 5\tau$

❖ Conclusion

- L'intensité du courant $i(t)$ traversant la bobine est une fonction continue .
- On distingue entre eux régimes :
 - **Régime transitoire** : pendant lequel l'intensité du courant $i(t)$ croît (ou décroît) et on l'obtient lorsque $t < 5\tau$
 - **Régime permanent** : pendant lequel l'intensité du courant $i(t)$ reste constante et a pour valeur $\frac{E}{R_T}$ (ou 0) et on l'obtient lorsque $t > 5\tau$
- La durée de l'établissement ou l'annulation du courant augmente lorsque la valeur de L augmente ou la valeur de R diminue .

③ Réponse d'un dipôle RL à un échelon de tension montant (Etablissement du courant) – étude théorique

❖ Équation différentielle

On réalise le montage électrique ci-contre :
À $t = 0$, on ferme l'interrupteur K

D'après la loi d'additivité des tensions on a : $u_R + u_L = E$

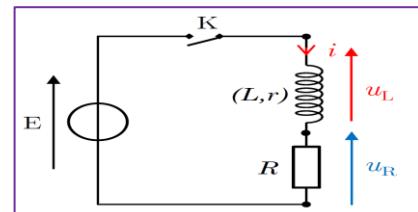
Et d'après la loi d'Ohm on $u_R = Ri$

Donc : $Ri(t) + u_L = E$ avec $u_L = L \frac{di(t)}{dt} + ri(t)$

Alors $ri(t) + Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} = E$

$\Leftrightarrow R_T i(t) + L \frac{di(t)}{dt} = E$ avec $R_T = R + r$

$\Leftrightarrow i(t) + \frac{L}{R_T} \frac{di(t)}{dt} = \frac{E}{R_T}$



→ C'est l'équation différentielle vérifiée par l'intensité du courant $i(t)$ traversant le dipôle **RL** lors de l'établissement du courant.

▪ Remarque

On remplace l'intensité du courant $i(t)$ par $\frac{u_R}{R}$ dans l'équation différentielle, on trouve :

$$\begin{aligned} \frac{u_R}{R} + \frac{L}{R_T} \frac{d(\frac{u_R}{R})}{dt} &= \frac{E}{R_T} \Leftrightarrow \frac{u_R}{R} + \frac{L}{R_T} \frac{du_R}{dt} = \frac{E}{R_T} \\ \Leftrightarrow u_R + \frac{L}{R_T} \frac{du_R}{dt} &= \frac{RE}{R_T} \end{aligned}$$

→ C'est l'équation différentielle vérifiée par tension u_R aux bornes du conducteur ohmique lors de l'établissement du courant.

❖ La solution de l'équation différentielle

On admet que la solution de l'équation différentielle vérifiée par l'intensité du courant $i(t)$ s'écrit sous la forme suivante : $i(t) = A \cdot e^{-mt} + B$ avec A , B et m sont des constantes à déterminer

■ On détermine B et m en utilisant l'équation différentielle

On remplace la solution $i(t) = A \cdot e^{-mt} + B$ dans l'équation différentielle suivante :

$$\begin{aligned} i(t) + \frac{L}{R_T} \frac{di(t)}{dt} &= \frac{E}{R_T} \\ \Leftrightarrow A \cdot e^{-mt} + B + \frac{L}{R_T} \frac{d(A \cdot e^{-mt} + B)}{dt} &= \frac{E}{R_T} \\ \Leftrightarrow A \cdot e^{-mt} - \frac{L}{R_T} A m e^{-mt} &= \frac{E}{R_T} - B \\ \Leftrightarrow A \cdot e^{-mt} \left(1 - \frac{L}{R_T} m\right) &= \frac{E}{R_T} - B \end{aligned}$$

Pour que cette équation soit vérifiée $\forall t \geq 0$ il faut que : $1 - \frac{L}{R_T} m = 0$ et $\frac{E}{R_T} - B = 0$

Donc : $m = \frac{E}{R_T} = \frac{1}{\tau}$ et $B = \frac{E}{R_T}$

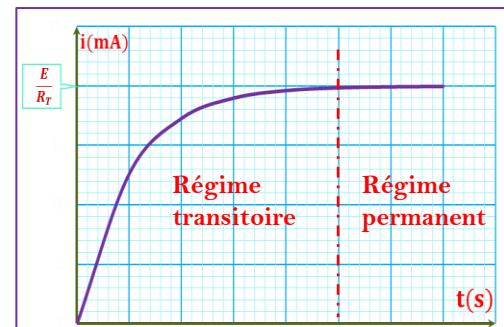
Alors l'expression de l'intensité du courant devient : $u_c(t) = A \cdot e^{-t/\tau} + \frac{E}{R_T}$

■ On détermine A en utilisant les conditions initiales

À $t = 0$ la bobine résiste l'établissement du courant donc : $i(0) = 0$

$$\begin{aligned} \text{Et on a } i(0) &= A \cdot e^0 + \frac{E}{R_T} \\ \Leftrightarrow A + \frac{E}{R_T} &= 0 \\ \Leftrightarrow A &= -\frac{E}{R_T} \end{aligned}$$

finalement on aura : $i(t) = \frac{E}{R_T} (1 - e^{-t/\tau})$



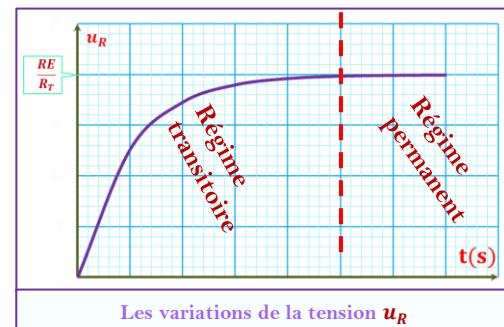
Les variations de l'intensité du courant $i(t)$

❖ L'expression de la tension u_R aux bornes de la résistance

On a : $u_R = R_i(t)$ avec $i(t) = \frac{E}{R_T} (1 - e^{-t/\tau})$

Donc : $u_R = \frac{RE}{R_T} (1 - e^{-t/\tau})$

Ou bien : $u_R = U (1 - e^{-t/\tau})$ avec : $U = \frac{RE}{R_T}$



Les variations de la tension u_R

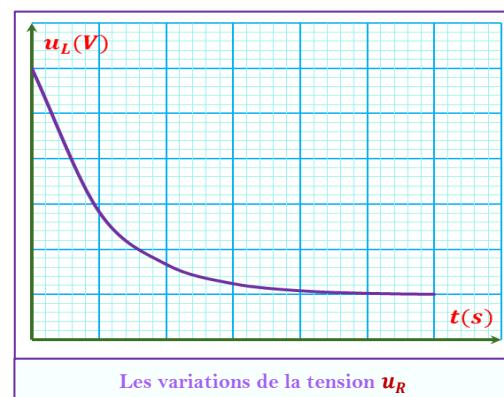
❖ L'expression de la tension u_L aux bornes de la bobine

On a $u_R + u_L = E$

Donc : $u_L = E - u_R$ avec $u_R = \frac{RE}{R_T} (1 - e^{-t/\tau})$

Alors : $u_L = E - \frac{RE}{R_T} (1 - e^{-t/\tau})$

$$\Leftrightarrow u_L = \frac{rE}{R_T} + \frac{RE}{R_T} e^{-t/\tau}$$



Les variations de la tension u_R

④ Réponse d'un dipôle RL à un échelon de tension descendant (annulation du courant) – étude théorique

❖ Équation différentielle

On réalise le montage électrique ci-contre

À $t = 0$, on ouvre l'interrupteur K à la position ②

D'après la loi d'additivité des tensions on a : $u_R + u_L = 0$

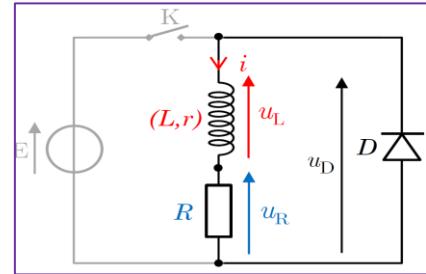
Et d'après la loi d'Ohm on $u_R = Ri$

Donc : $Ri(t) + u_L = 0$ avec $u_L = L \frac{di(t)}{dt} + ri(t)$

Alors $ri(t) + Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} = 0$

$$\Leftrightarrow R_T i(t) + L \frac{di(t)}{dt} = 0 \text{ avec } R_T = R + r$$

$$\Leftrightarrow i(t) + \frac{L}{R_T} \frac{di(t)}{dt} = 0$$



→ C'est l'équation différentielle vérifiée par l'intensité du courant $i(t)$ traversant le dipôle RL lors de l'annulation du courant.

▪ Remarque

On remplace l'intensité du courant $i(t)$ par $\frac{u_R}{R}$ dans l'équation différentielle, on trouve :

$$\frac{u_R}{R} + \frac{L}{R_T} \frac{d(\frac{u_R}{R})}{dt} = 0 \Leftrightarrow \frac{u_R}{R} + \frac{L.R}{R_T} \frac{du_R}{dt} = 0$$

$$\Leftrightarrow u_R + \frac{L}{R_T} \frac{du_R}{dt} = 0$$

→ C'est l'équation différentielle vérifiée par tension u_R aux bornes du conducteur ohmique lors de l'annulation du courant.

❖ La solution de l'équation différentielle

On admet que la solution de l'équation différentielle vérifiée l'intensité du courant $i(t)$ s'écrit sous la forme suivante : $i(t) = A \cdot e^{-mt} + B$ avec A , B et m sont des constantes à déterminer

▪ On détermine B et m en utilisant l'équation différentielle

On remplace la solution $i(t) = A \cdot e^{-mt} + B$ dans l'équation différentielle suivante :

$$i(t) + \frac{L}{R_T} \frac{di(t)}{dt} = 0$$

$$\Leftrightarrow A \cdot e^{-mt} + B + \frac{L}{R_T} \frac{d(A \cdot e^{-mt} + B)}{dt} = 0$$

$$\Leftrightarrow A \cdot e^{-mt} - \frac{L}{R_T} A m e^{-mt} = B$$

$$\Leftrightarrow A \cdot e^{-mt} (1 - \frac{L}{R_T} m) = B$$

Pour que cette équation soit vérifiée $\forall t \geq 0$
il faut que : $1 - \frac{E}{R_T} m = 0$ et $B = 0$

$$\text{Donc : } m = \frac{E}{R_T} = \frac{1}{\tau} \text{ et } B = 0$$

d'où $i(t) = A \cdot e^{-t/\tau}$

▪ On détermine A en utilisant les conditions initiales

À $t = 0$ résiste l'annulation du courant

$$\text{donc : } i(0) = \frac{E}{R_T}$$

$$\text{Et on a } i(0) = A \cdot e^0 \Leftrightarrow A = \frac{E}{R_T}$$

$$\text{Finalement on aura : } i(t) = \frac{E}{R_T} e^{-t/\tau}$$



Les variations de l'intensité du courant $i(t)$

❖ L'expression de la tension u_R aux bornes de la résistance

On a : $u_R = Ri(t)$ avec $i(t) = \frac{E}{R_T} e^{-t/\tau}$

Donc : $u_R = \frac{RE}{R_T} e^{-t/\tau}$

Ou bien : $u_R = U e^{-t/\tau}$ avec : $U = \frac{RE}{R_T}$

⑤ Constante du temps

❖ Définition

On définit la constante du temps du dipôle RL série par la relation suivante $\tau = \frac{L}{R_T}$

❖ La dimension de la constante du temps

$$\text{On a : } \tau = \frac{L}{R_T} \Leftrightarrow [\tau] = \frac{[L]}{[R]} \quad ①$$

$$\text{Et on sait que : } R = \frac{u_R}{i(t)} \Leftrightarrow [R] = \frac{[U]}{[I]}$$

$$\text{Et : } u = L \frac{di(t)}{dt} \Leftrightarrow [U] = \frac{[L][I]}{[T]} \quad ②$$

$$\Leftrightarrow [L] = \frac{[U][T]}{[I]} \quad ③$$

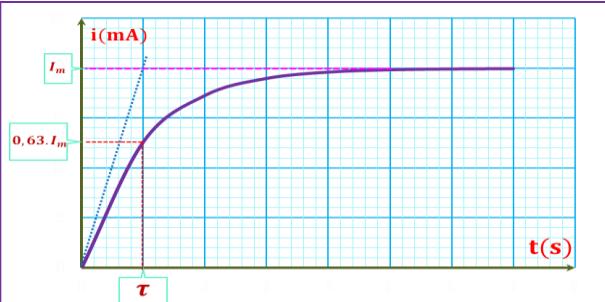
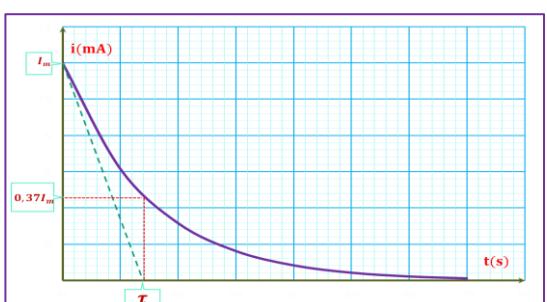
On remplace ② et ③ dans ① on

$$\text{trouve : } [\tau] = \frac{[I]}{[U]} \frac{[U][T]}{[I]} = [T]$$

$$\text{Donc : } [\tau] = [T]$$

La dimension de la constante du temps τ est le temps

❖ La détermination graphique de constante du temps

Cas de l'établissement du courant	Cas de l'annulation du courant
<p>Méthode 1: τ : Représente l'abscisse du point d'intersection de la tangente à la courbe $i(t) = f(t)$ à $t = 0$ et la asymptote $i(t) = I_m = \frac{E}{R_T}$</p>	<p>Méthode 1: τ : Représente le point d'intersection de la tangente à la courbe $i(t) = f(t)$ à $t = 0$ et l'axe des abscisses</p>
<p>Méthode 2: on a : $i(t) = I_m \cdot (1 - e^{-\tau \cdot t})$ donc $i(\tau) = I_m \cdot (1 - e^{-1})$ alors $i(\tau) = 0,63 \cdot I_m$</p> 	<p>Méthode 2: on $i(t) = I_m \cdot e^{-\tau \cdot t}$ donc $i(\tau) = I_m \cdot e^{-1}$ alors $i(\tau) = 0,37 \cdot I_m$</p> 

III L'énergie stockée dans la bobine

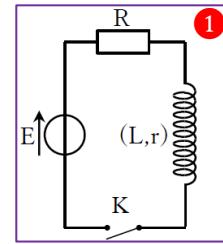
L'énergie magnétique stockée dans la bobine à un instant t est donnée par la relation suivante : $E_m = \frac{1}{2} L \cdot i^2 = \frac{L}{2 \cdot R^2} \cdot u_R^2$

- E_m : l'énergie magnétique en joule (J)
- u_R : la tension aux bornes de la résistance en volt (V)
- L : L'inductance de la bobine en (H)
- i : l'intensité du courant traversant la bobine en (A)

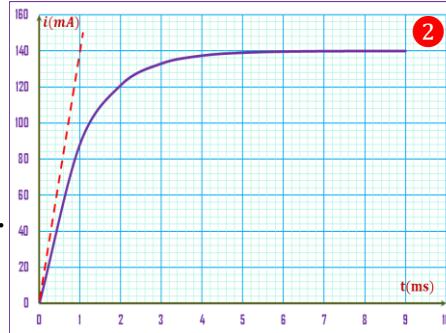
Exercice 1

Pour déterminer les caractéristique d'une bobine , on réalise le montage de la figure ① qui comporte un générateur idéal de tension de f.e.m. $E = 12V$, un conducteur ohmique de résistance $R = 60\Omega$, un interrupteur K , et une bobine d'inductance L et de résistance interne r .

À l'instant $t = 0$, on ferme l'interrupteur K et par un système d'acquisition convenable on obtient les variations de l'intensité $i(t)$ en fonction du temps la figure ②



- ① Représenter sur la figure ① dans la convention de récepteur les tensions u_L et u_R .
- ② Déterminer l'équation différentielle vérifiée par l'intensité $i(t)$
- ③ Trouver les expressions de I et τ pour que l'expression $i(t) = I(1 - e^{-t/\tau})$ soit solution de l'équation différentielle .
- ④ Par l'analyse dimensionnelle , montrer que τ a une dimension du temps .
- ⑤ En utilisant la courbe de la figure ② , déterminer la constance du temps τ , et l'intensité du courant en régime permanent I.
- ⑥ Calculer la valeur de la résistance interne r de la bobine et ainsi de l'inductance L
- ⑦ Calculer l'énergie magnétique E_m stockée dans la bobine dans le régime permanent .



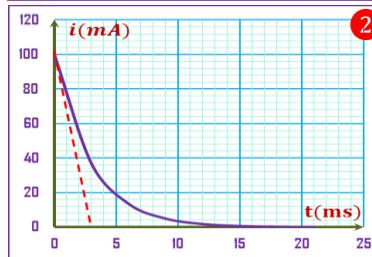
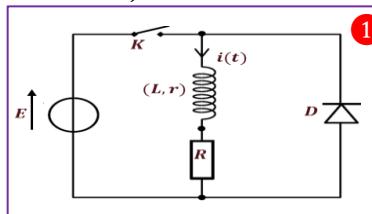
Exercice 2

Pour étudier la réponse d'un dipôle RL à un échelon de tension descendant , on réalise le montage électrique schématisé sur la figure ① qui comporte :

- Générateur idéal de tension de f.e.m. $E = 6V$
- Conducteur ohmique de résistance $R = 50\Omega$
- Bobine d'inductance L et de résistance interne r
- Interrupteur K
- Diode idéal ($u_D = 0$)

Lorsque le régime permanent est atteint , on ouvre l'interrupteur K à un 'instant $t = 0$, et par un système d'acquisition convenable , on visualise la variation de l'intensité du courant $i(t)$ en fonction du temps (la courbe de la figure ②).

- ① Trouver l'expression de l'intensité du courant initiale I_0 en fonction de E , r , R .
- ② Déterminer l'équation différentielle vérifiée par l'intensité du courant $i(t)$.
- ③ Trouver l'expression de τ pour que l'expression $i(t) = I_0 e^{-t/\tau}$ soit solution de l'équation différentielle .
- ④ L'intensité du courant électrique s'écrit sous la forme $i(t) = I_0 e^{-t/\tau}$.
- ⑤ En exploitant la courbe de la figure ② déterminer la valeur l'intensité du courant initiale de I_0 et celle de la constante du temps τ
- ⑥ Calculer la valeur d'inductance L de la bobine et de sa résistance interne r
- ⑦ Déterminer l'instant t où l'énergie emmagasinée dans la bobine est égale à 60% de sa valeur initiale .





Situation-problème

Les condensateurs les bobines sont des réservoirs de l'énergie électrique que l'on trouve dans des nombreux appareils électriques.

- 👉 Que se passe-t-il lorsqu'on relie une bobine aux bornes d'un condensateur chargé ?
- 👉 Quels sont les régimes d'oscillations ? Et comment peut-on les entretenir ?

Objectifs

- 👉 Connaître les régimes d'oscillations .
- 👉 Connaître l'influence de la capacité et de la résistance sur les oscillations.
- 👉 Savoir établir l'équation différentielle et sa solution dans le cas d'absence amortissement.
- 👉 Savoir établir l'équation différentielle dans le cas des amortissements faibles .
- 👉 Connaître la période propre des oscillations .
- 👉 Connaître le rôle du générateur d'entretien des oscillations .

I

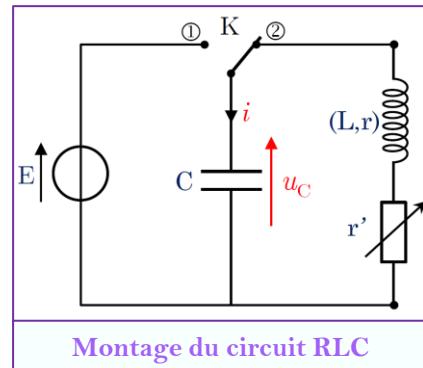
Décharge d'un condensateur dans une bobine

① Montage expérimental

On réalise le montage électrique ci-contre :

On place l'interrupteur en position ① , le condensateur se charge , puis on bascule l'interrupteur à la position ② . Le Condensateur se décharge dans un dipôle RL ou $R = r + r'$

On a des oscillations dont l'amplitude diminue (amortissement) donc le circuit RLC est le siège d'oscillations libres amorties

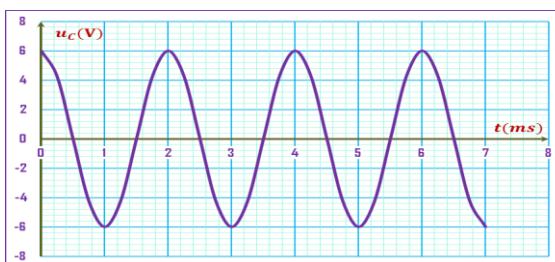


② Régimes d'oscillations

On distingue trois régimes d'oscillations selon la valeur de la résistance totale R

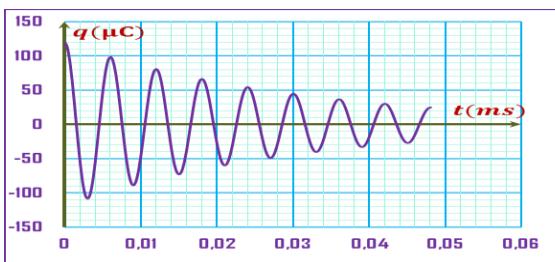
❖ Régime périodique

La résistance totale est nulle ($R = 0$), les oscillations sont périodiques . Le circuit LC est alors le siège d'oscillations libres non amorties dont le régime est périodique caractérisé par sa période propre T_0



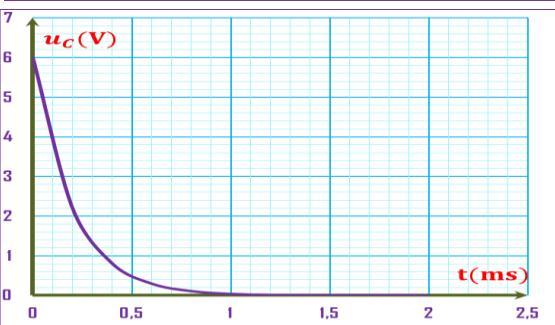
❖ Régime pseudo-périodique

La résistance totale est faible , l'amplitude des oscillations décroît au cours du temps . Les oscillations s'amortissent et le régime est pseudo-périodique caractérisé par sa pseudo-période T avec $T \approx T_0$



❖ Régime apériodique

Si la résistance totale du circuit est grande les oscillations disparaissent , car l'amortissement est fort , le condensateur perd sa charge sans oscillations



❖ Conclusion

La décharge d'un condensateur chargé , dans un circuit RLC série , conduit à créer des oscillations libres (La seule source d'énergie est l'énergie électrique initialement stockée dans le condensateur) .

On dit que le circuit RLC série est un oscillateur électrique libre et amorti .

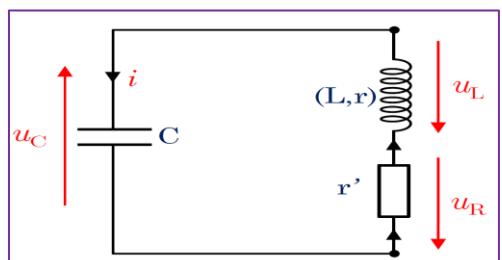
③ L'équation différentielle

On considère le montage électrique ci-contre

Le condensateur est initialement chargé .

À $t = 0$, on ferme l'interrupteur K

D'après la loi d'additivité des tensions on :



D'après la loi d'additivité des tensions on

On a : $\mathbf{u}_C + \mathbf{u}_R + \mathbf{u}_L = \mathbf{0}$ avec $\mathbf{u}_R = R\mathbf{i}$ et $\mathbf{u}_L = L\frac{di(t)}{dt}$

Donc : $\mathbf{u}_C + R\mathbf{i}(t) + L\frac{di(t)}{dt} = \mathbf{0}$ avec $\mathbf{i}(t) = C\frac{du_C}{dt}$

Alors : $\mathbf{u}_C + R_T C \frac{du_C}{dt} + LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} = \mathbf{0}$ avec $R_T = R + r$

C'est l'équation différentielle vérifiée par la tension \mathbf{u}_C aux bornes du condensateur dans un circuit RLC série

❖ Remarque

On remplace \mathbf{u}_C par $\frac{q}{C}$ dans l'équation différentielle précédente, on trouve :

$$\begin{aligned} \frac{q}{C} + R_T C \frac{dq}{dt} + LC \frac{d^2 q}{dt^2} = \mathbf{0} &\Leftrightarrow \frac{q}{C} + \frac{R_T C}{C} \frac{dq}{dt} + \frac{LC}{C} \frac{d^2 q}{dt^2} = \mathbf{0} \\ &\Leftrightarrow q + R_T C \frac{dq}{dt} + LC \frac{d^2 q}{dt^2} = \mathbf{0} \end{aligned}$$

C'est l'équation différentielle vérifiée par la charge q du condensateur dans un circuit RLC série

II Les oscillations libres non amortie dans un circuit idéal LC série

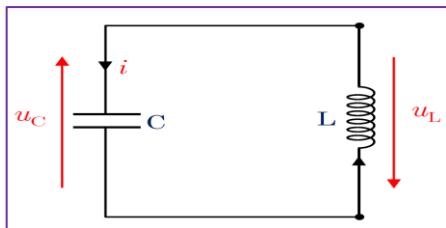
① L'équation différentielle

On considère le montage électrique ci-contre

Le condensateur est initialement chargé .

À $t = 0$, on ferme l'interrupteur K

D'après la loi d'additivité des tensions on :



On a : $\mathbf{u}_C + \mathbf{u}_L = \mathbf{0}$ avec $\mathbf{u}_L = L\frac{di(t)}{dt}$

Donc : $\mathbf{u}_C + L\frac{di(t)}{dt} = \mathbf{0}$ avec $i(t) = C\frac{du_C}{dt}$

Alors : $\mathbf{u}_C + LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} = \mathbf{0}$ ou bien : $\frac{1}{LC} u_C + \frac{d^2 u_C}{dt^2} = \mathbf{0}$

C'est l'équation différentielle vérifiée par la tension \mathbf{u}_C aux bornes du condensateur dans un circuit idéal LC série

❖ Remarque

On remplace \mathbf{u}_C par $\frac{q}{C}$ dans l'équation différentielle précédente, on trouve :

$$\frac{1}{LC} \frac{q}{C} + \frac{d^2 q}{dt^2} = \mathbf{0} \Leftrightarrow \frac{1}{LC} q + \frac{d^2 q}{dt^2} = \mathbf{0}$$

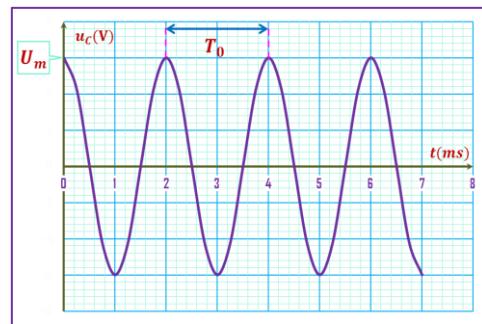
C'est l'équation différentielle vérifiée par la charge q du condensateur dans un circuit idéal LC série

② La solution de l'équation différentielle

On admet que la solution de l'équation différentielle vérifiée par la tension u_c s'écrit sous la forme

suivante : $u_c(t) = U_m \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{T_0} + \varphi\right)$

- U_m : l'amplitude des oscillations en (V)
- φ : la phase à l'origine des dates en (s)
- T_0 : la période propre des oscillations en (s)



- On détermine U_m et φ en utilisant les conditions initiales

$$\text{On a } u_c(t) = U_m \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{T_0} + \varphi\right) \text{ et } i(t) = C \frac{du_c(t)}{dt} = -\frac{2\pi}{T_0} U_m \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{T_0} + \varphi\right)$$

Les conditions initiales sont :

- Le condensateur est initialement chargé à l'aide d'un générateur de force électromotrice E donc : $u_c(0) = E$
- La bobine résiste l'établissement du courant lors du fermeture du circuit donc : $i(0) = 0$

$$\text{Alors : } \begin{cases} U_m \cdot \cos(\varphi) = E \\ -\frac{2\pi}{T_0} U_m \cdot \sin(\varphi) = 0 \end{cases}$$

Et puisque $\cos(0) = 1$ et $\cos(\pi) = -1$, on déduit que : $\varphi = 0$ et par conséquence $U_m \cos(0) = E \Leftrightarrow U_m = E$

- On détermine T_0 en utilisant l'équation différentielle

$$\text{On a : } u_c(t) = U_m \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{T_0} + \varphi\right)$$

$$\Leftrightarrow \frac{du_c(t)}{dt} = -\frac{2\pi}{T_0} U_m \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{T_0} + \varphi\right)$$

$$\Leftrightarrow \frac{d^2u_c(t)}{dt^2} = -\left(\frac{2\pi}{T_0}\right)^2 U_m \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{T_0} + \varphi\right)$$

$$\Leftrightarrow \frac{d^2u_c(t)}{dt^2} = -\left(\frac{2\pi}{T_0}\right)^2 u_c(t)$$

$$\Leftrightarrow \frac{d^2u_c(t)}{dt^2} + \left(\frac{2\pi}{T_0}\right)^2 u_c(t) = 0$$

$$\text{Et on a : } \frac{1}{LC} u_c + \frac{d^2u_c}{dt^2} = 0$$

$$\text{Alors : } \left(\frac{2\pi}{T_0}\right)^2 = \frac{1}{LC}$$

$$\text{Donc : } T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$$

- La dimension de la période propre T_0

$$\text{On a : } T_0 = 2\pi\sqrt{LC} \text{ donc : } \Leftrightarrow [T_0] = \sqrt{[L][C]} \quad ①$$

$$\text{Et on sait que : } i(t) = C \frac{du_c}{dt} \Leftrightarrow [I] = \frac{[C][U]}{[T]} \quad ②$$

$$\Leftrightarrow [C] = \frac{[I][T]}{[U]}$$

$$\text{Et : } u = L \frac{di(t)}{dt} \Leftrightarrow [U] = \frac{[L][I]}{[T]} \quad ③$$

$$\Leftrightarrow [L] = \frac{[U][T]}{[I]}$$

On remplace ② et ③ dans ① on

$$\text{trouve : } [T_0] = \sqrt{\frac{[I][T]}{[U]} \frac{[U][T]}{[I]}}$$

$$\text{Donc : } [T_0] = \sqrt{[T]^2} = [T]$$

La dimension de la période propre T_0 est le temps

② L'expression de la charge du condensateur

On a : $q(t) = Cu_c(t)$ avec $u_c(t) = E \cos(\frac{2\pi t}{T_0})$

Donc $q(t) = CE \cos(\frac{2\pi t}{T_0})$

Ou bien : $q(t) = Q_m \cos(\frac{2\pi t}{T_0})$ avec Q_m est la charge maximale du condensateur tel que : $Q_m = CE$

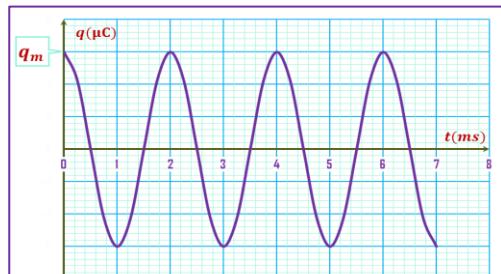
③ L'expression de l'intensité du courant

On a : $i(t) = C \frac{du_c}{dt}$ avec $u_c(t) = E \cos(\frac{2\pi t}{T_0})$

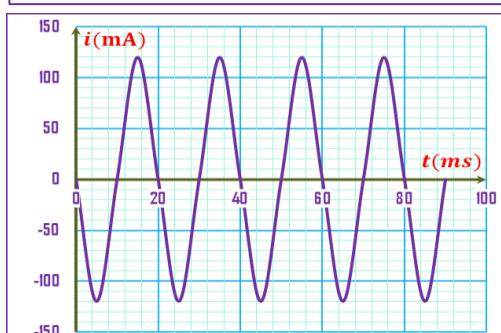
Alors : $i(t) = -\frac{2\pi}{T_0} CES \sin(\frac{2\pi t}{T_0})$

Donc : $i(t) = I_m \cos(\frac{2\pi t}{T_0} + \frac{\pi}{2})$ avec I_m est l'intensité maximale circulant dans le circuit tel que :

$$I_m = CE \frac{2\pi}{T_0} = CE \frac{2\pi}{2\pi\sqrt{LC}} ; \text{ ou bien } I_m = E \sqrt{\frac{C}{L}}$$



Les variations de la charge q au cours du temps



Les variations de l'intensité du courant $i(t)$

III Echange de l'énergie entre le condensateur et la bobine

① L'énergie dans le circuit LC

❖ Définition

L'énergie totale d'un circuit idéal

LC série à, un instant t est égale à la somme de l'énergie électrique emmagasinée dans le condensateur et l'énergie magnétique emmagasinée dans la bobine à cet instant : $E_t = E_m + E_e$ avec

$$E_e = \frac{1}{2} C(u_c(t))^2 \text{ et } E_m = \frac{1}{2} L(i(t))^2$$

$$\text{Donc : } E_t = \frac{1}{2} C(u_c(t))^2 + \frac{1}{2} L(i(t))^2$$

❖ Montrons que l'énergie totale du circuit LC se conserve

On a : $E_t = \frac{1}{2} C(u_c(t))^2 + \frac{1}{2} L(i(t))^2$

$$\Leftrightarrow \frac{dE_t}{dt} = \frac{1}{2} 2Cu_c(t) \frac{du_c(t)}{dt} + \frac{1}{2} L 2i(t) \frac{di(t)}{dt}$$

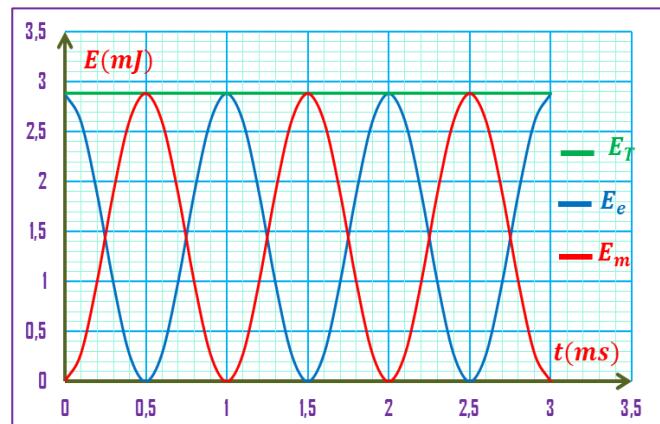
$$\Leftrightarrow \frac{dE_t}{dt} = Cu_c(t) \frac{du_c(t)}{dt} + Li(t) \frac{di(t)}{dt} \text{ avec : } i(t) = C \frac{du_c(t)}{dt}$$

$$\Leftrightarrow \frac{dE_t}{dt} = Cu_c(t) \frac{du_c(t)}{dt} + LC \frac{du_c(t)}{dt} C \frac{d^2u_c(t)}{dt^2}$$

$$\Leftrightarrow \frac{dE_t}{dt} = C \frac{du_c(t)}{dt} (u_c(t) + LC \frac{d^2u_c(t)}{dt^2})$$

Et puisque : $u_c(t) + LC \frac{d^2u_c(t)}{dt^2} = 0$ (l'équation différentielle)

Donc : $\frac{dE_t}{dt} = 0$ donc l'énergie totale du circuit **LC** se conserve ($E_t = Cte$) .



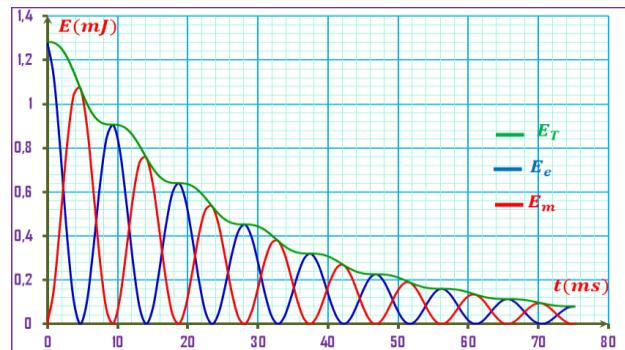
② L'énergie dans le circuit LRC

❖ Définition

L'énergie totale d'un circuit **RLC** série à un instant t est égale à la somme : $E_t = E_m + E_e$ avec

$$E_e = \frac{1}{2}C(u_c(t))^2 \text{ et } E_m = \frac{1}{2}L(i(t))^2$$

$$\text{Donc : } E_t = \frac{1}{2}C(u_c(t))^2 + \frac{1}{2}L(i(t))^2$$



❖ Montrons que l'énergie totale du circuit RLC décroît avec le temps

$$\text{On a : } E_t = \frac{1}{2}C(u_c(t))^2 + \frac{1}{2}L(i(t))^2$$

$$\Leftrightarrow \frac{dE_t}{dt} = \frac{1}{2}2Cu_c(t)\frac{du_c(t)}{dt} + \frac{1}{2}L2i(t)\frac{di(t)}{dt}$$

$$\Leftrightarrow \frac{dE_t}{dt} = Cu_c(t)\frac{du_c(t)}{dt} + Li(t)\frac{di(t)}{dt} \text{ avec : } i(t) = C\frac{du_c(t)}{dt}$$

$$\Leftrightarrow \frac{dE_t}{dt} = Cu_c(t)\frac{du_c(t)}{dt} + LC\frac{du_c(t)}{dt}C\frac{d^2u_c(t)}{dt^2}$$

$$\Leftrightarrow \frac{dE_t}{dt} = C\frac{du_c(t)}{dt}(u_c(t) + LC\frac{d^2u_c(t)}{dt^2})$$

$$\text{Et puisque : } u_c(t) + LC\frac{d^2u_c(t)}{dt^2} = -R_T C \frac{du_c(t)}{dt} \text{ (D'après l'équation différentielle)}$$

$$\text{Donc : } \frac{dE_t}{dt} = -C\frac{du_c(t)}{dt}RC\frac{du_c(t)}{dt} \Leftrightarrow \frac{dE_t}{dt} = -R_T i(t)^2 < 0$$

Puisque $\frac{dE_t}{dt} < 0$ alors l'énergie totale du circuit **RLC** diminue avec le temps, car elle est dissipée par effet Joule dans les résistances du circuit.

IV

Entretien des oscillations

On peut entretenir les oscillations du circuit **RLC** série et obtenir des oscillations périodiques d'amplitude constante, en utilisant un dispositif qui compense l'énergie dissipée par effet joule.

Le dispositif d'entretien est un générateur qui fournit au circuit une tension u_g proportionnelle à l'intensité du courant $u_g = K \cdot i(t)$

On considère le montage électrique ci-contre

Le condensateur est initialement chargé.

À $t = 0$, on ferme l'interrupteur **K**

D'après la loi d'additivité des tensions on :

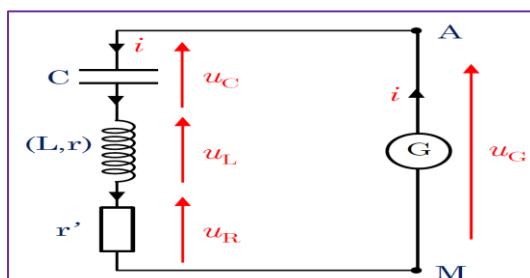
$$\text{On a : } u_C + u_R + u_L = u_g$$

$$\text{Donc : } u_C + Ri(t) + ri(t) + L\frac{di(t)}{dt} = Ki(t)$$

$$\text{Alors : } u_C + (R_T - K)i(t) + L\frac{di(t)}{dt} = 0$$

Les oscillations sont sinusoïdales si : $R_T = K$

$$\text{Donc l'équation différentielle devient : } u_C + LC\frac{d^2u_C}{dt^2} = 0$$

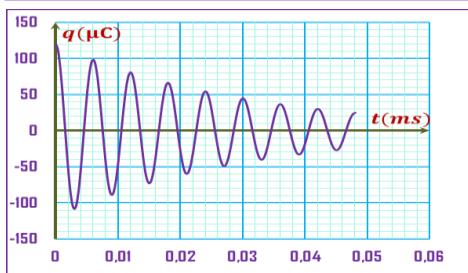
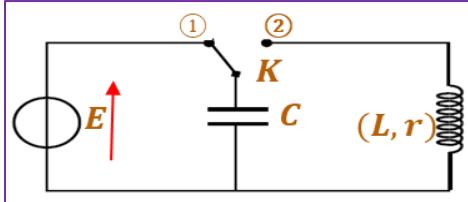


→ Un circuit **RLC** entretenu se comporte comme un circuit idéal **LC**

Exercice 1

On réalise le montage électrique ci-contre . Une fois le condensateur est totalement chargé , on bascule l'interrupteur **K** en position **②** à un instant $t = 0$. La courbe ci-contre représente la variation de la charge du condensateur en fonction du temps .

- ① Déterminer l'équation différentielle vérifiée par la charge $q(t)$.
- ② Quel est le régime des oscillations .
- ③ Déterminer la pseudo-période **T** .
- ④ On suppose que la résistance du circuit est petite et n'a aucune influence sur les oscillations . Calculer la valeur de **L** .
- ⑤ Calculer l'énergie dissipée par l'effet joule entre les instants $t_1 = 0,006\text{s}$ et $t_2 = 0,03\text{s}$. On donne $C = 1\mu\text{F}$

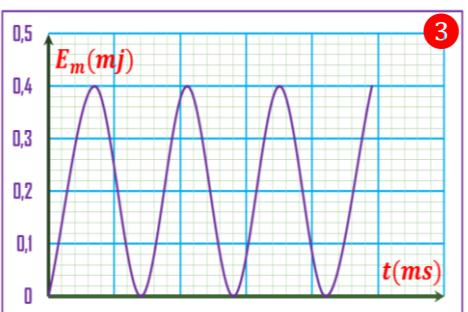
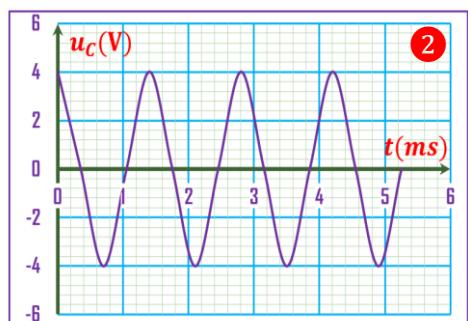
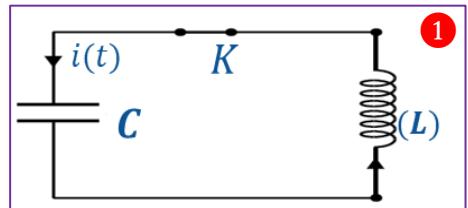


Exercice 2

Le condensateur et la bobine changent l'énergie lorsqu'ils sont tous deux .

On étudie le circuit idéal **LC** . Un groupe ont chargés totalement un condensateur de capacité **C** sous une tension **U** puis ils ont montés ce condensateur aux bornes d'une bobine d'inductance **L** et de résistance négligeable .(la figure ①)

- ① Indiquer le régime observé .
- ② Représenter sur le schéma dans la convention réceptrice les tension u_C et u_L .
- ③ Déterminer l'équation différentiel vérifiée par la tension u_C .
- ④ La figure ② représente les variations de la tension u_C aux cours du temps . En exploitant la courbe écrire l'expression $u_C(t)$.
- ⑤ L'énergie E_m stockée dans la bobine varie en fonction du temps selon la courbe représentée dans la figure ③ .
 - a - Montrer que $E_m = \frac{cu^2}{4} (1 - \cos(\frac{4\pi}{T_0}t))$.
(rappel : $\sin^2(x) = \frac{1-\cos(2x)}{2}$)
 - b - Déduire l'expression de l'énergie maximale $E_{m,max}$ en fonction de **C** et **U** .
 - c - En exploitant la courbe de la figure ③ . Déterminer la valeur de **C** .
 - d - Trouver la valeur de l'inductance **L** .





Situation-problème

L'émission et la réception des informations sont indispensables pour mieux communiquer

- ☞ Comment crypter et envoyer une information ?
- ☞ Comment déchiffrer une information lors de sa réception ?

Objectifs

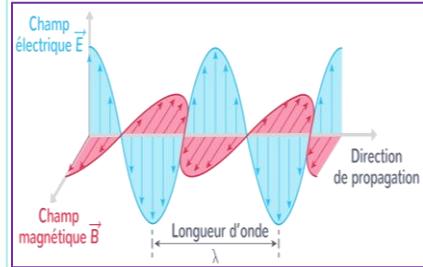
- ☞ Connaître la façon selon laquelle les informations sont transmises.
- ☞ Connaître quelques propriétés des ondes électromagnétiques utilisées dans la transmission des informations .
- ☞ Connaître les différents types de modulation .
- ☞ Connaître le rôle du multiplicateur .
- ☞ Connaître le dispositif de démodulation et le rôle de ses composantes (filtre passe haut , détecteur d'enveloppe).
- ☞ Connaître les conditions nécessaires permettant d'avoir une bonne modulation et démodulation d'amplitude .
- ☞ Connaître les composantes d'un récepteur radio simple

I Ondes électromagnétiques –transmission d'informations

① Caractéristiques des ondes électromagnétiques

Une onde électromagnétique est composée d'un champs magnétique et un champs électrique se propagent tous deux à la même vitesse .

Les ondes électromagnétiques sont caractérisées par : une fréquence f , une longueur d'onde λ , et une célérité v tel que : $v = \lambda \cdot f = \frac{\lambda}{T}$, avec $f = \frac{1}{T}$.



② Transmission d'informations par une onde lumineuse

❖ Activité

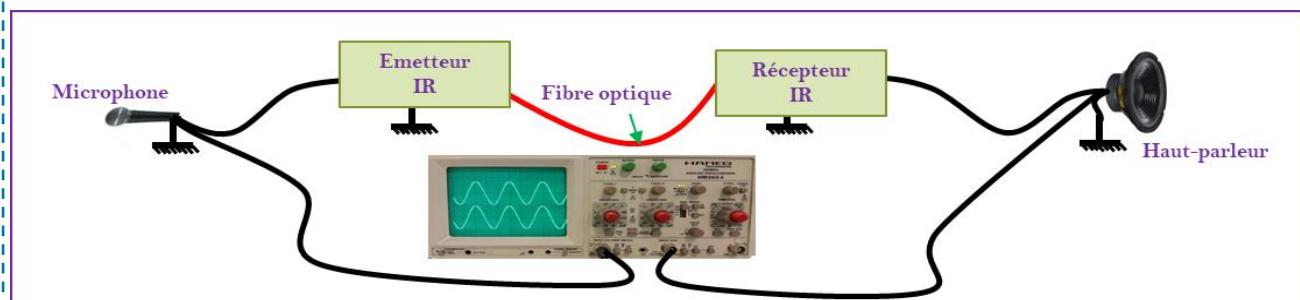
On réalise le montage expérimental schématisé dans la figure ci-dessous .

On crée un signal sonore devant un microphone et on écoute le son à l'aide d'un haut-parleur . À l'aide d'un oscilloscope on visualise les deux signaux :

Signal ① : Celui capté par le microphone

Signal ② : Celui capté par l'haut parleur .

Une fibre optique est un fil de verre ou de plastique très fine qui a la propriété de conduire la lumière . Donc c'est un guide d'onde lumineuse .



① Le son crée devant le microphone est l'information à envoyer .

a – Quel est le rôle du microphone et du l'haut-parleur

b – Comparer les deux signaux ① et ② .

c – Quel est le rôle de fibre optique .

② Pour transmettre une information on a besoin d'une onde porteuse de haute fréquence .

La poteuse se modifie par le signal électrique (l'information) qu'on veut transmettre . On dit quelle est modulée , et le signal transmis est un signal modulant , et l'opération est dite la modulation

a – Quel est le signal modulé et le signal modulant dans cette expérience .

b – Proposer une définition de la modulation .

③ À la réception il faut séparer le signal (information) de l'onde porteuse . Nommer cette opération .

① Le son crée devant le microphone est l'information à envoyer .

a – Le microphone convertit le signal sonore qu'il reçoit en un signal électrique .

L'haut-parleur convertit le signal électrique qu'il reçoit en un signal sonore .

b – Les deux signaux ① et ② sont identique .

c – La fibre optique est un guide (milieu de propagation) de l'onde lumineuse .

2

- a – Le signal modulé c'est l'onde lumineuse se propagent dans la fibre optique , et le signal modulant c'est l'onde sonore (information).
- b – La modulation consiste à fixer une information (signal modulant) sur une onde porteuse de haut fréquence .
- ③ À la réception il faut séparer le signal (information) de l'onde porteuse . Cette opération est appelée la démodulation .

❖ Conclusion

D'après l'expérience, il est donc possible d'envoyer l'information (le son) d'un émetteur (le microphone) vers un récepteur (haut parleur) à l'aide d'une fibre optique . Donc on dit que la lumière est une onde porteuse du signal électrique (l'information) et la fibre optique est un guide d'onde lumineuse .

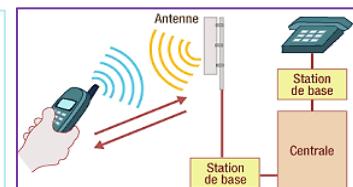
❖ Remarque

Les fibres optiques permettant de transmettre des radiations sur des grandes distances . Elles sont utilisées dans les télécommunications ou en médecine pour observer certaines parties internes du corps (fibroscopie)

③ Transmission d'informations par une onde hertzienne

❖ Définition

Les ondes hertziennes sont des ondes électromagnétiques , dont les fréquences sont comprises entre $3 \cdot 10^{11}$ Hz et $3 \cdot 10^5$ Hz.
Ces ondes sont utilisées dans le domaine de la transmission d'informations .



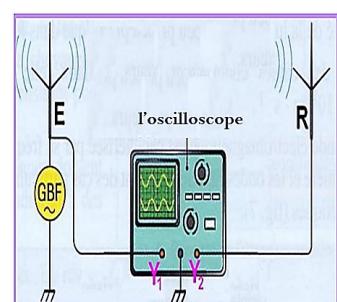
❖ Activité

Dans le montage ci-contre les fils conducteurs E et R jouent le rôle d'un émetteur et d'un récepteur .

On visualise sur l'entrée Y_1 de l'oscilloscope un signal sinusoïdale émis par le **GBF** ,et on obtient sur l'entrée Y_2 un signal reçu par le récepteur **R** .

Exploitation

- 1 Identifier le rôle de chaque fil conducteur .
- 2 Comparer les aspects et les fréquences des deux signaux
- 3 Quelle est la nature de l'onde qui se propage entre l'émetteur **E** et le récepteur **R** et quelle est sa vitesse ?
- 4 Pour que le récepteur **R** capte une onde électromagnétique il faut que sa longueur **L** est de l'ordre de la moitié de la longueur d'onde émise ($L \approx \frac{\lambda}{2}$).
 - a – Déterminer la longueur **L** d'une antenne réceptrice nécessaire pour capter une onde électromagnétique de fréquence $f = 30\text{KHz}$.
 - b . Que peut on déduire ?



- 1 L'antenne émettrice E convertit un signal électrique en une onde électromagnétique puis l'envoie dans toutes les directions .
- 2 L'antenne émettrice R capte une onde électromagnétique et la convertit en signal électrique
- 3 Le signal émis par E et celui capté par R sont identique .
- 4 Pour que le récepteur R capte une onde électromagnétique il faut que sa longueur **L** est de l'ordre de la moitié de la longueur d'onde émise ($L \approx \frac{\lambda}{2}$) .

a – On a : $C = \lambda \cdot f$ donc $\lambda = \frac{C}{f} = \frac{3 \times 10^8}{30 \times 10^3} = 10^4 m$

et puisque $L \approx \frac{\lambda}{2}$ donc : $L \approx 5 \times 10^3 m \approx 5 Km$

b – Pratiquement on ne peut pas construire une antenne réceptrice de longueur **L = 5Km** .
Par conséquent, les signaux de basses fréquences doivent être modulés avant d'être transmis

④ La nécessité de la modulation

On veut transporter un signal(son , image ,musique) . Ces signaux ont une basse fréquence de l'ordre de **1KHz** , en fait ces signaux ne peuvent pas être transmises directement pour plusieurs raisons :

- Les ondes de basse fréquence sont fortement amorties
- Les antennes réceptrices nécessaires pour capter ces ondes sont irréalisables (onde de fréquence **f = 30KHz** nécessite une antenne de longueur **L = 5Km**)
- L'intervalle des basses fréquences est très étroites qui a pour effet de rendre l'antenne incapable de sélectionner le signal transmis parmi d'autres . Il y aurait brouillage de l'information .

Ainsi l'idée de transmettre les informations par une onde de fréquence élevée est naturellement apparue . Les informations à transmettre (signal modulant) sont alors inscrites dans une onde électromagnétique sinusoïdale de haute fréquence (onde porteuse) ; on obtient ainsi un signal modulé .

⑤ Les types de modulation

La porteuse est une onde électromagnétique sinusoïdale : $P(t) = P_m \cos(2\pi F t + \varphi)$

La modulation consiste à transmettre le signal en faisant modifier son amplitude P_m ou sa fréquence F ou bien sa phase φ

Modulation de phase	Modulation de fréquence	Modulation d'amplitude
$u(t) = U_m \cos(2\pi f \cdot t + \varphi(t))$	$u(t) = U_m \cos(2\pi \cdot f(t) \cdot t + \varphi)$	$u(t) = U_m(t) \cdot \cos(2\pi f \cdot t + \varphi)$

II La modulation d'amplitude

① Principe de modulation d'amplitude

L'information à transmettre est contenue dans un signal électrique $s(t)$ de basse fréquence BF. Pour le transporter, on utilise une onde porteuse de haut fréquence HF. L'amplitude de la porteuse est modulée par le signal informatif de basse fréquence BF. Ceci est effectué par un modulateur d'amplitude.

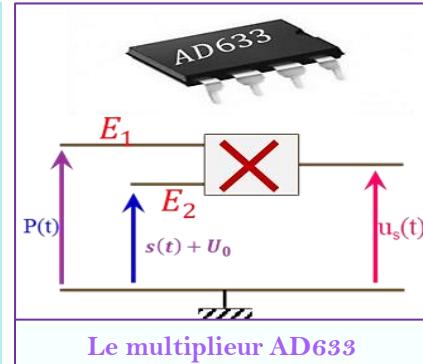
② Le modulateur d'amplitude

Pour moduler l'amplitude de l'onde porteuse on utilise un multiplieur AD633(amplificateur opérationnel) qui réalise le produit du signal informatif décalé $[s(t) + U_0]$ (le signal modulant) par le signal porteuse $P(t)$.

La tension à la sortie du multiplieur (tension modulée) est : $u_s(t) = K \cdot [s(t) + U_0] \cdot P(t)$

K : est une constante caractérisant le multiplieur son unité est : (V^{-1})

U_0 : est la composante continue en (V)



❖ Remarque

On a : $u_s(t) = K \cdot [s(t) + U_0] \cdot P(t)$ avec $P(t) = P_m \cos(2\pi F t)$

Donc : $u_s(t) = [K P_m s(t) + K P_m U_0] \cos(2\pi F t) \Leftrightarrow u_s(t) = (a \cdot s(t) + b) \cos(2\pi F t)$

Avec : $a = K P_m$ et $b = K P_m$

L'amplitude de la tension modulée est : $U_m(t) = a \cdot s(t) + b$

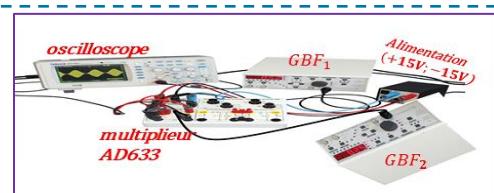
La modulation d'amplitude consiste rendre l'amplitude de la tension modulée une fonction affine de la tension modulante.

③ Application : modulation d'amplitude d'une tension sinusoïdale

❖ Activité

On réalise le montage expérimental suivant :

- Deux générateurs à basse fréquence GBF_1 et GBF_2
- Un oscilloscope
- Un multiplieur AD633
- Alimentation symétrique ($+15V; -15V$)

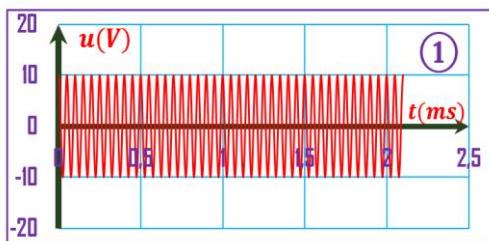
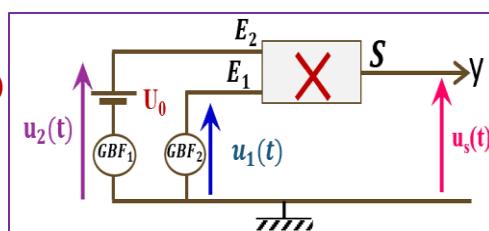


Le GBF_1 relié à l'entrée E_1 du multiplieur, délivre une tension $u_1(t) = U_0 + s(t)$; telle que $s(t) = s_m \cos(2\pi f t)$ d'amplitude $s_m = 0,5V$ et de fréquence $f = 200Hz$, et U_0 est la composante contenue. On prend : $U_0 = 1,5V$

Le GBF_2 relié à l'entrée E_2 du multiplieur, délivre une tension $u_2(t)$; telle que $u_2(t) = P_m \cos(2\pi F t)$ est une tension sinusoïdale d'amplitude $P_m = 10V$ et de fréquence $F = 20KHz$.

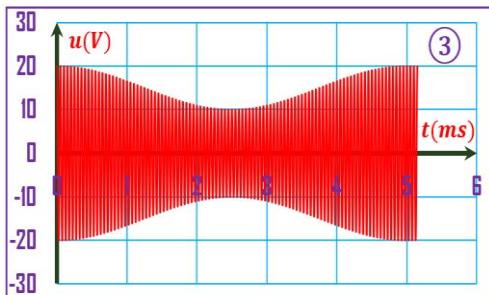
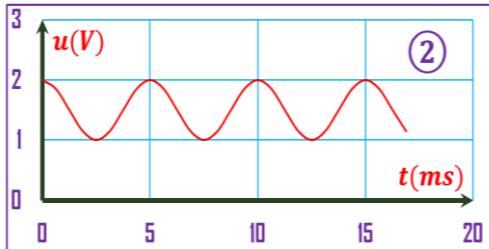
Le multiplieur **AD633** est alimenté par l'alimentation symétrique ($+15V; -15V$)

À l'aide de l'oscilloscope on visualise les tensions $u_1(t)$, $u_2(t)$ et $u_s(t)$ et on obtient les courbes : ①, ②, ③.



Exploitation

- 1 Déterminer la tension de la porteuse et celle de la modulante .
 - 2 La tension à la sortie du multiplicateur est
 $u_s(t) = Ku_1(t) \times u_2(t)$. On prend : $K = 1V^{-1}$
 Montrer que $u_s(t) = A[1 + m\cos(2\pi ft)]\cos(2\pi Ff t)$
 en précisant les expressions de A et de m
 - 3 Identifier les courbes ① , ② , ③ .
 - 4 En exploitant les courbes ; déterminer la fréquence de la porteuse et celle de la modulante .
 - 5 Le coefficient m est appelé le taux de modulation
 son expression est $m = \frac{U_{smax} - U_{smin}}{U_{smax} + U_{smin}}$ avec U_{smax} et U_{smin} sont les valeurs maximale et minimale de la tension modulée . Calculer m
 - 6 La modulation est de bonne qualité si la fréquence de la porteuse est très supérieure à celle de la modulante et $m < 1$. Que peut-on dire à-propos de la modulation étudiée ?
- 1 La tension de la porteuse est : $u_2(t) = P_m \cos(2\pi Ff t)$
 La tension de la modulante est : $u_1(t) = U_0 + s(t)$
- 2 La tension à la sortie du multiplicateur est: $u_s(t) = Ku_1(t) \times u_2(t)$
 Donc : $u_s(t) = K(U_0 + s(t)) \times P_m \cos(2\pi Ff t)$
 $\Leftrightarrow u_s(t) = KP_m[U_0 + S_m \cos(2\pi ft)]\cos(2\pi Ff t)$
 $\Leftrightarrow u_s(t) = KP_m U_0 \left[1 + \frac{S_m}{U_0} \cos(2\pi ft) \right] \cos(2\pi Ff t)$
 $\Leftrightarrow u_s(t) = A[1 + m\cos(2\pi ft)]\cos(2\pi Ff t)$
 Avec $A = KP_m U_0$ et de $m = \frac{S_m}{U_0}$
- 3 La courbe ① représente la porteuse $u_2(t) = P_m \cos(2\pi Ff t)$
 La courbe ② représente la tension modulante $u_1(t) = U_0 + s(t)$
 La courbe ③ représente la tension modulée $\Leftrightarrow u_s(t) = A[1 + m\cos(2\pi ft)]\cos(2\pi Ff t)$
- 4 D'après la courbe ① on a : $10T_P = 0,5ms$ donc $T_P = 5 \times 10^{-5}s$
 Alors : $F = \frac{1}{5 \times 10^{-5}} = 2 \times 10^4 Hz$
 D'après la courbe ② on a : $T_s = 5ms$ donc $T_s = 5 \times 10^{-3}s$
 Alors : $f = \frac{1}{5 \times 10^{-3}} = 2 \times 10^2 Hz$
- 5 Déterminons le taux de modulation m a partir de la courbe ③ $m = \frac{U_{smax} - U_{smin}}{U_{smax} + U_{smin}}$
 $m = \frac{20 - 10}{20 + 10} = 0,5$
- 6 La modulation étudiée est de bonne qualité car la fréquence de la porteuse est très supérieure à celle de la modulante ($F \gg f$) et $m < 1$.



❖ Conclusion

La tension obtenue à la sortie du multiplieur(modulée) lors de modulation d'amplitude d'une tension sinusoïdale est : $u_s(t) = A[1 + m\cos(2\pi ft)]\cos(2\pi F t)$ avec :

- **f** : la fréquence de la tension modulante .
- **F** : la fréquence de la porteuse .
- **A** : est constante positive en (**V**) tel que $A = KP_m U_0$ avec **k** un facteur caractérisant le multiplieur , **P_m** l'amplitude de la porteuse , et **U₀** est la composante continue .
- **m** : est le taux de modulation tel que : $m = \frac{s_m}{U_0}$ où **s_m** est l'amplitude de la tension modulante .

❖ Le taux de modulation

On définit le taux de modulation par $m = \frac{s_m}{U_0} = \frac{U_{smax}-U_{smin}}{U_{smax}+U_{smin}}$ avec :

U_{smax} : est la valeur maximale de la tension modulée .

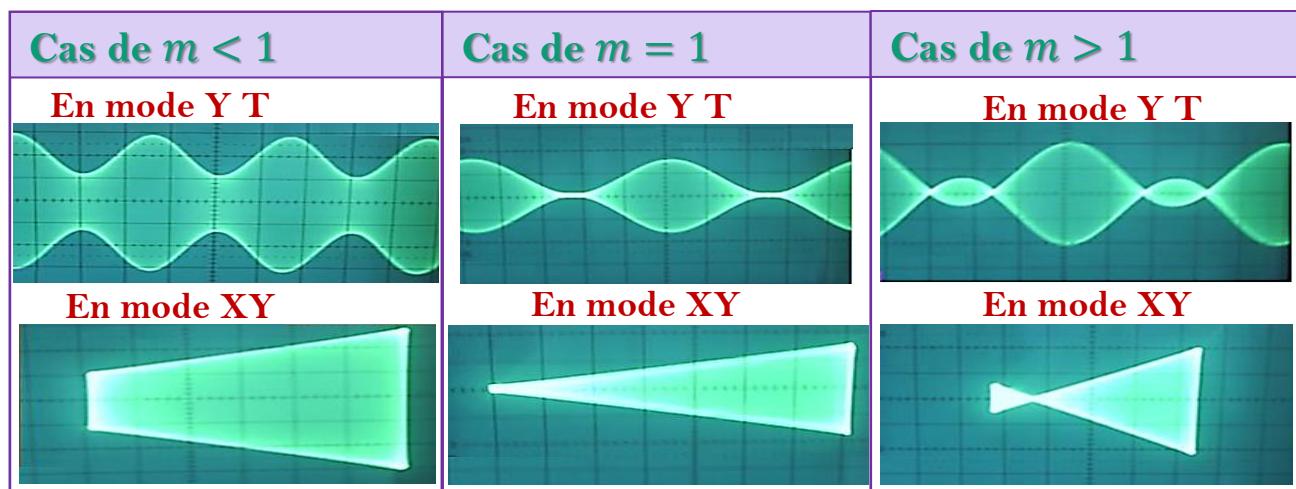
U_{smin} : est la valeur minimale de la tension modulée .

Le taux de modulation **m** : est une constante positive sans unité .

④ Qualité de modulation

❖ Activité

Pour s'assurer que la modulation est de bonne qualité , on visualise à la voie **X** de l'oscilloscope la tension modulante **s(t) + U₀** et la voie **Y** sur la tension modulée **u_s(t)** , puis on fait varier la tension de décalage **U₀** et on obtient les courbes ci-dessous .



Exploitation

- ① Déterminer à partir des oscillogrammes observés en mode balayage , celui correspondant à une bonne modulation d'amplitude .
 - ② Quelle est la forme l'oscillogramme correspondant à une bonne modulation d'amplitude lorsque l'oscilloscope est utilisé en mode **XY** .
- ① L'oscillogramme correspondant à une bonne modulation d'amplitude est celui de $m < 1$.
 - ② L'oscillogramme correspondant à une bonne modulation d'amplitude lorsque l'oscilloscope est utilisé en mode **XY** a la forme d'un trapèze.

❖ Conclusion

Pour réaliser une modulation d'amplitude de bonne qualité, l'enveloppe du signal modulé doit reproduire les variations du signal modulant en termes de forme et de fréquence.

En général la modulation d'amplitude est de bonne qualité si :

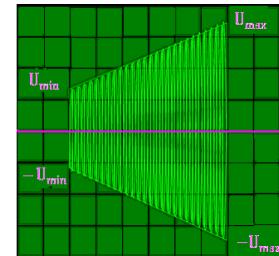
- Le taux de modulation est : $m < 1$ (c.à.d. $s_m < U_0$)
- La fréquence de la porteuse est très supérieur à celle de la modulante $F \gg f$ (ou moins $F \geq 10f$)

❖ Remarque

Lorsque l'oscilloscope est utilisé en mode **XY**, et on visualise la tension modulante

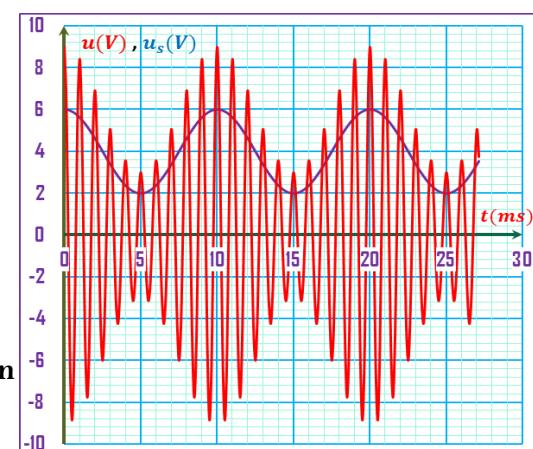
$(s(t) + U_0)$ et la tension modulée ($u_s(t)$) respectivement aux voix **X** et **Y**, on constate que :

- L'oscillogramme obtenue a la forme d'un trapèze lorsque la modulation est de bonne qualité.
- L'oscillogramme obtenue n'a pas la forme d'un trapèze lorsque la modulation est de mauvaise qualité .



❖ Application

La figure ci-contre indique les variations : d'une tension modulante $u(t) = s(t) + U_0$ et d'une tension modulée en amplitude $u_s(t)$.



- ① Calculer la fréquence de la porteuse et celle de la modulante .
- ② Calculer le taux de modulation **m** .
- ③ La modulation est-elle de bonne qualité ? Justifier .
- ④ Déterminer la tension de décalage U_0 .
- ⑤ Écrire l'expression de la tension modulée en fonction du temps .

① D'après la courbe, on a :

$$T_s = 10\text{ms} \text{ et } T_p = 1\text{ms}$$

$$\text{Donc } f = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{10 \times 10^{-3}} = 100\text{Hz} \text{ et } F = \frac{1}{T_p} = \frac{1}{1 \times 10^{-3}} = 1000\text{Hz}$$

② Calculons le taux de modulation **m**.

$$\text{On a : } m = \frac{U_{smax} - U_{smin}}{U_{smax} + U_{smin}}$$

$$\text{A.N: } m = \frac{9-3}{9+3} = 0,5$$

③ Puisque $m < 1$ et $F \gg f$, donc la modulation est de bonne qualité.

④ Déterminons la tension de décalage U_0 .

$$U_0 = \frac{U_{max} + U_{min}}{2} \text{ où } U_{max} \text{ est la valeur maximale de la tension modulante } u(t) \text{ et } U_{min} \text{ est sa valeur minimale.}$$

$$\text{A.N: } U_0 = \frac{6+2}{2} = 4V$$

⑤ L'expression de la tension modulée en fonction du temps.

$$\text{On a } u_s(t) = A[1 + m\cos(2\pi ft)]\cos(2\pi Ft) \text{ avec } A = \frac{U_{smax}}{m+1} = \frac{9}{0,5+1} = 6V$$

$$\text{Donc : } u_s(t) = 6[1 + 0,5\cos(200\pi t)]\cos(2000\pi t)$$

III La démodulation d'amplitude

① Activité

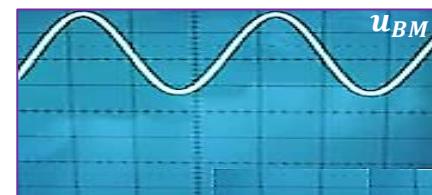
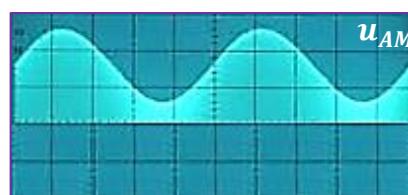
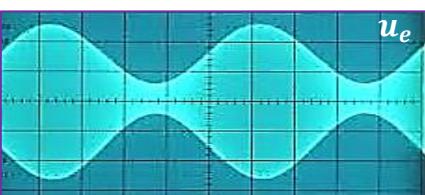
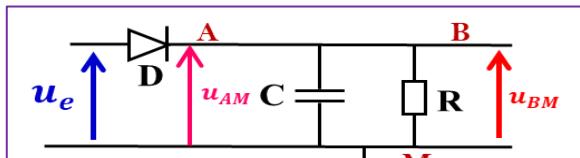
■ Expérience I : Détection d'enveloppe

Le détecteur d'enveloppe est un quadripôle composé d'une diode (D), et un dipôle R_1C_1 parallèle. En appliquant à l'entrée d'un détecteur d'enveloppe un signal $u_e(t)$ modulé en amplitude .

À l'aide d'un oscilloscope on visualise la tension modulée $u_e(t)$ et la tension u_{AM} à la sortie de la diode , et la tension u_{BM} aux bornes du dipôle R_1C_1 et on obtient les oscillogrammes suivants ci-dessous .

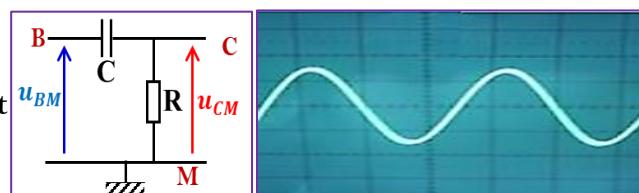
Exploitation

- ① Quel est le rôle de la diode (D) .
- ② Quel est le rôle du dipôle R_1C_1 parallèle .
- ③ Déduire le rôle du détecteur d'enveloppe .



■ Expérience II: Suppression de U_0

On ajoute à la sortie du détecteur d'enveloppe un dipôle R_2C_2 qui constitue un filtre passe haut et on visualise à l'aide de l'oscilloscope la tension u_{CM} à la sortie de ce dipôle .



- ④ Comparer la courbe de u_{CM} avec celle de u_{BM}
- ⑤ Déduire le rôle du filtre basse haut R_2C_2

- ① La diode (D) bloque les alternances négatives (supprime la partie négative de la tension modulée $u_e(t)$).
- ② Le dipôle R_1C_1 parallèle est un filtre passe bas , il supprime le reste de l' onde porteuse et laisse passer l'enveloppe basse fréquence.
- ③ Le détecteur d'enveloppe permet d'obtenir une tension analogue à l'enveloppe de la tension modulée .
- ④ La courbe de u_{CM} est décalée vers le bas d'une U_0 valeur par rapport à celle de u_{BM}
- ⑤ Le filtre basse haut R_2C_2 supprime la composante continue U_0

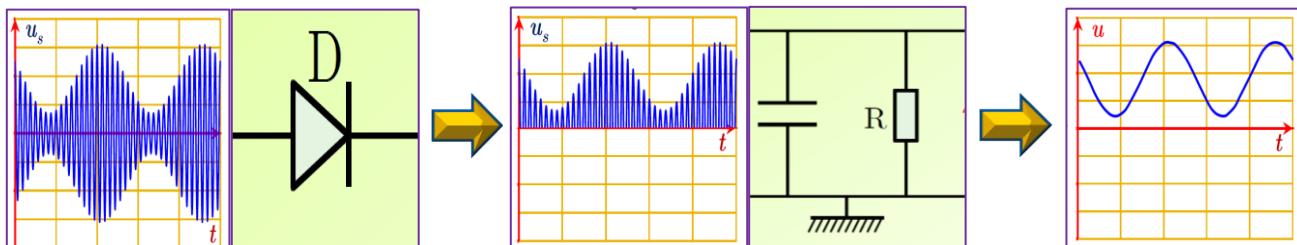
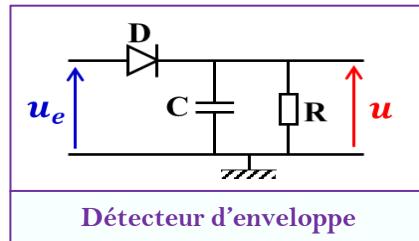
② Résumé

La démodulation d'amplitude consiste à récupérer le signal informatif qui est contenu dans la partie supérieur de l'enveloppe du signal modulé en amplitude.

La démodulation d'amplitude s'opère en deux partie :

■ La détection d'enveloppe

Le montage utilisé nommé détecteur d'enveloppe est constitué d'une diode qui bloque les alternances négatives et un filtre passe-bas (dipôle RC parallèle) qui élimine la partie restante de la porteuse .



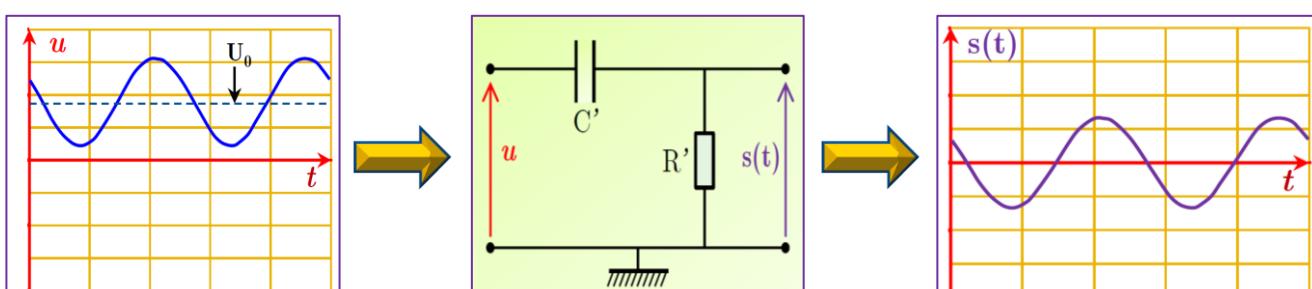
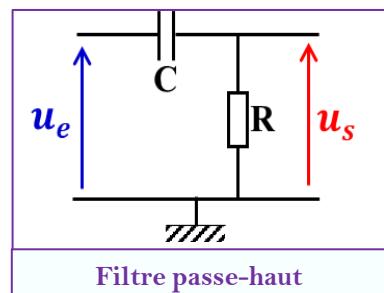
Pour que la détection d'enveloppe est de bonne qualité il faut que la constante du temps du filtre passe bas vérifiée la condition suivante : $T_s \leq RC \ll T_p$ avec

T_s : est la période de la tension modulante .

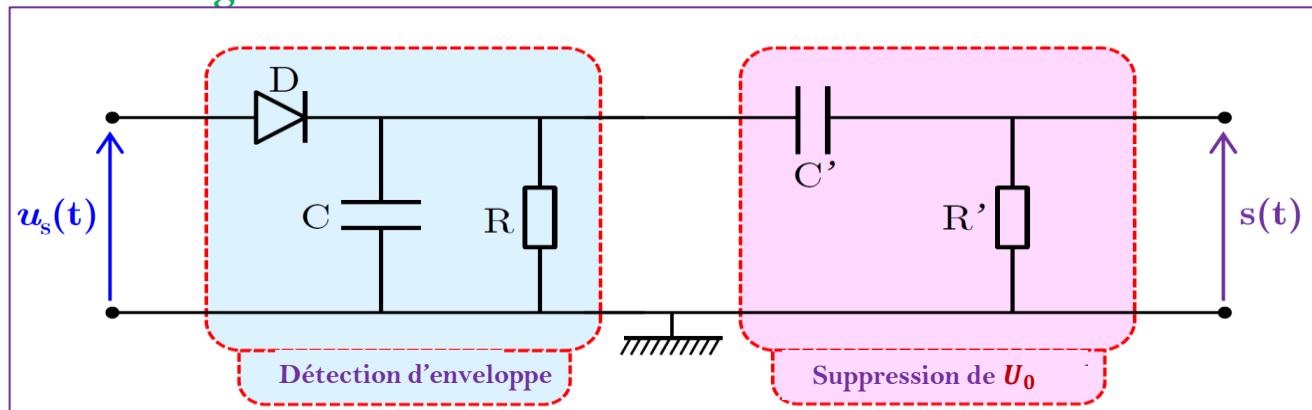
T_p : est la période de la porteuse

■ La suppression de la composante continue U_0

Le montage utilisé comporte un filtre passe-haut (dipôle RC série) qui ne laisse passer que les tensions de fréquences élevées et élimine la composante continue (de fréquence nulle)



③ Le montage de démodulation



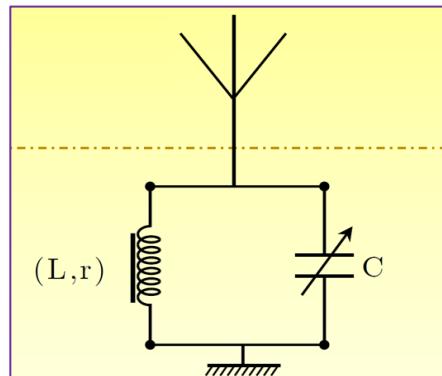
IV Les éléments d'un récepteur radio

① Le filtre passe-bande

Le filtre passe-bande permet de sélectionner l'onde radio issue de la station choisie.

Pour sélectionner un signal émet, il faut faire un accord entre la fréquence propre f_0 du circuit LC parallèle et la fréquence F_p porteuse de la station $F_p = f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

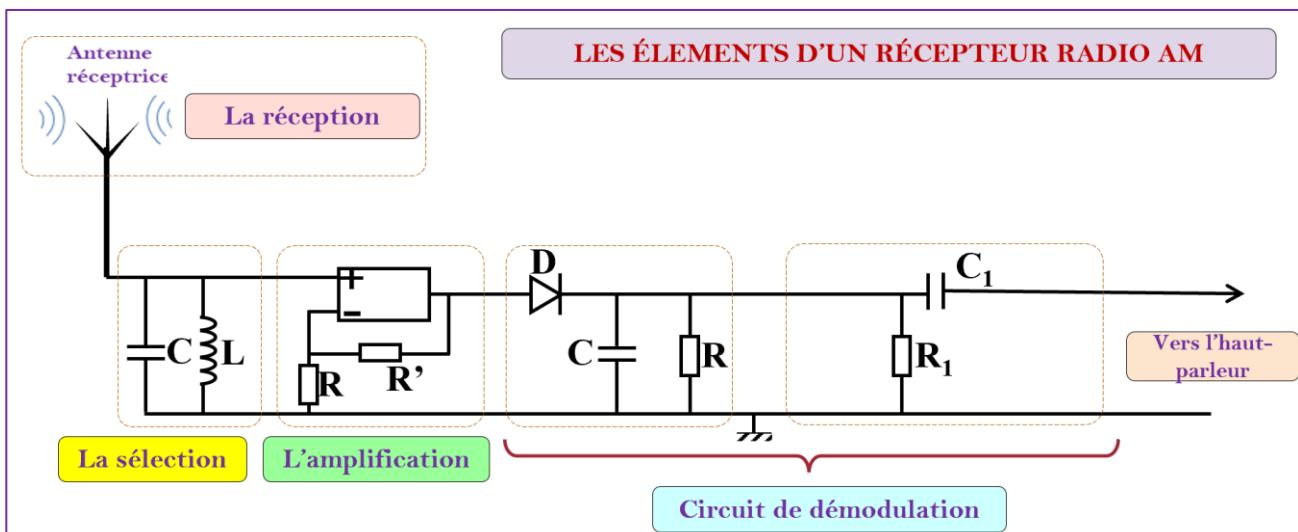
Cette sélection se fait en faisant varier le coefficient d'induction L de la bobine ou la capacité C du condensateur



② Les éléments d'un récepteur radio AM simple

Un modèle de réception radio (AM) est représenté par le schéma ci-dessous dans lequel on distingue cinq parties :

- Une antenne réceptrice d'ondes radio qui capte les ondes électromagnétiques modulées en amplitude .
- Un filtre passe-bande pour sélectionner la station souhaitée .
- Un modèle d'amplification du signal modulé sélectionné .
- Un circuit démodulateur d'amplitude formé d'un détecteur d'enveloppe et un filtre passe-haut .
- Un dispositif d'écoute (haut parleur)



Exercice 1

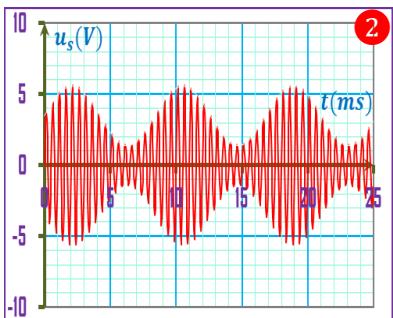
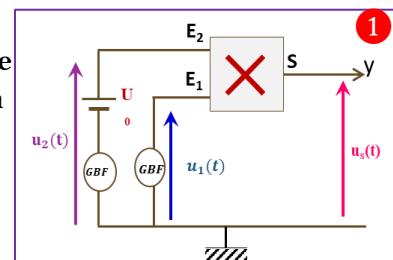
- ① Répondre par vrai ou faux :
 - a – Lors de la modulation , un signal informatif modifie l'une des caractéristiques de l'onde porteuse
 - b – L'onde électromagnétique captée par une antenne , et le signal électrique qui en résulte ont de fréquences différentes .
- ② L'expression d'un signal modulé est : $u(t) = [1 + 0,8\cos(160t)]\cos(25000t)$
 - a – Ce signal est-il modulé en amplitude , en fréquence ou en phase ? Justifier votre réponse
 - b – Déterminer la fréquence F de la porteuse et la fréquence f du signal modulant .
 - c – Déterminer le taux de modulation m que peut-on déduire ?

Exercice 2

Les ondes sonores audibles ont une faible fréquence , leur transmission à des longues distances nécessite qu'elle soient modulante à une onde électromagnétique de haute fréquence . Cet exercice vise à étudier la modulation et la démodulation d'amplitude .

I : La modulation d'amplitude

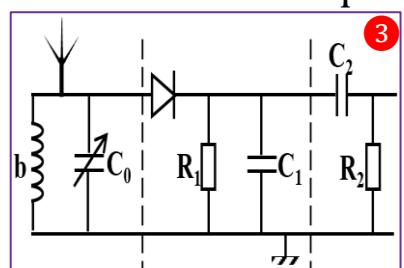
Pour étudier la modulation d'amplitude , au cours d'une séance de TP , le professeur a utilisé avec ses élèves ; un multiplieur (X) en appliquant une tension sinusoïdale $u_1(t) = P_m\cos(2\pi F t)$ à son entrée E_1 et une tension $u_2(t) = s(t) + U_0$ à son entrée E_2 , avec U_0 est la composante continue de la tension et $s(t) = s_m\cos(2\pi f t)$ est la tension modulante (figure ①) .



- ① Montrer en précisant les expressions de A et m ,que la tension modulée $u_s(t)$ s'écrit sous la forme
 $u_s(t) = A[1 + m\cos(2\pi f t)]\cos(2\pi F t)$
- ② Trouver l'expression du taux de modulation m en fonction de U_{smin} et U_{smax}
- ③ En exploitant la courbe de la figure ② :
 - a – Déterminer les fréquences F et f .
 - b – Déterminer le taux de modulation m .
 - c – Que peut-on dire sur la qualité de modulation ?
- ④ Expliquer comment vérifier que la modulation est de bonne qualité à l'aide d'oscilloscope

II : La démodulation d'amplitude

Pour recevoir l'onde modulée en amplitude , le professeur et ses élèves utilisent le dispositif simplifié ci-contre (figure ③)



- ① Identifier le rôle de chaque partie .
- ② Trouver la valeur de la capacité C_0 pour que la sélection de l'onde soit bonne .On donne $L = 3,7mH$
- ③ Pour réaliser une détection d'enveloppe de bonne qualité , on utilise un condensateur de capacité $C_1 = 47nF$ et un conducteur ohmique de résistance R_1 . Parmi les valeurs suivantes déterminer la résistance R_1 convenable : $680K\Omega$; $470K\Omega$; $20K\Omega$; $160K\Omega$; $10K\Omega$

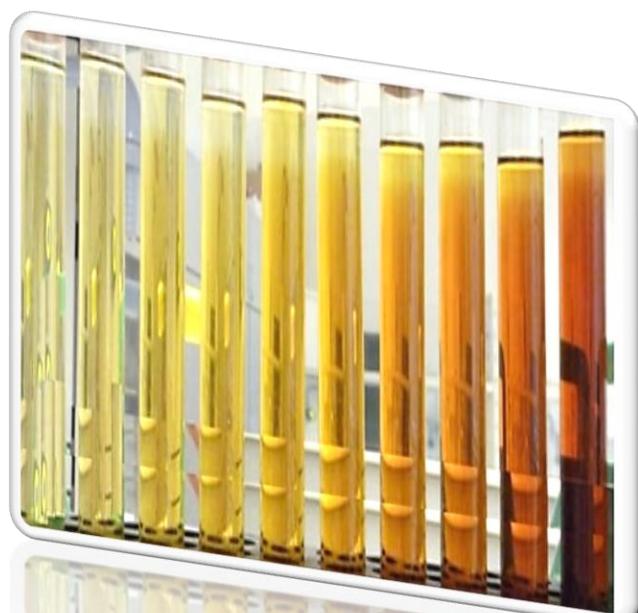
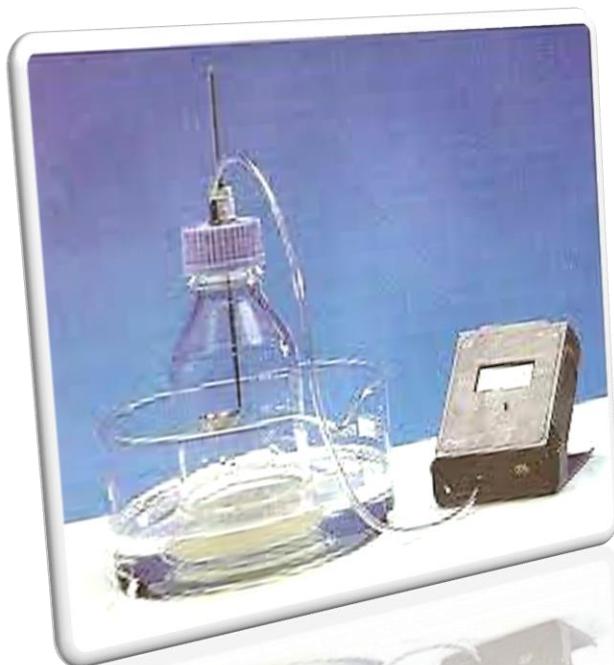
PARTIE I : Transformations rapides et transformations lentes d'un système chimique

1

Transformations rapides et transformations lentes

2

Suivi temporel d'une transformation chimique –
Vitesse de réaction





Situation-problème

La combustion du butane est une transformation rapide , et la formation de rouille est une transformation lente .

- ☞ Qu'est-ce qu'une transformation rapide et une transformation lente ?
- ☞ Peut-on accélérer ou ralentir une transformation chimique ?

Objectifs

- ☞ Savoir écrire une réaction d'oxydoréduction .
- ☞ Connaître les transformations rapides et les transformations lentes
- ☞ Connaître et exploiter les facteurs cinétiques pour accélérer ou ralentir une transformation chimique .

I

Les réactions d'oxydoréduction

① Définitions

- **L'oxydant (Ox)** : est une espèce chimique susceptible d'acquérir des électrons lors d'une transformation chimique selon la demi-équation suivante : $Ox + ne^- \rightleftharpoons red$.
Exemple : $Ag_{(aq)}^+ + e^- \rightleftharpoons Ag_{(s)}$
- **Le réducteur (red)** : est une espèce chimique susceptible de perdre des électrons lors d'une transformation chimique selon la demi-équation suivante : $red \rightleftharpoons Ox + ne^-$.
Exemple : $Cu_{(s)} \rightleftharpoons Cu_{(aq)}^{2+} + 2e^-$
- **Les espèces chimiques (Ox) et (red)** sont conjugués et forment un couple Ox/red s'il est possible de passer d'une espèce chimique à l'autre en gagnant ou en perdant des électrons selon la demi-équation suivante : $Ox + ne^- \rightleftharpoons red$
Exemples : $Ag_{(aq)}^+ / Ag_{(s)}$; $Cu_{(aq)}^{2+} / Cu_{(s)}$; $H_{(aq)}^+ / H_{2(g)}$.
- **La réaction d'oxydoréduction:** est une transformation chimique qui fait intervenir un échange des électrons entre l'oxydant **Ox₁** d'un couple **Ox₁/red₁** et le réducteur **red₂** d'un autre couple **Ox₂/red₂** selon l'équation suivante :
 - Demi-équation de réduction : $(Ox_1 + n_1 e^- \rightleftharpoons red_1) \times n_2$
 - Demi-équation d'oxydation : $(red_2 \rightleftharpoons Ox_2 + n_1 e^-) \times n_1$
 - Équation bilan : $n_2 Ox_1 + n_1 red_2 \rightleftharpoons n_2 red_1 + n_1 Ox_2$

❖ Application

- 1 Écrire la demi-équation d'oxydation pour chacun des couples suivants:
 $Al_{(aq)}^{3+} / Al_{(s)}$; $I_{2(aq)}^- / I_{(aq)}$; $S_2O_{8(aq)}^{2-} / SO_{4(aq)}^{2-}$
- 2 Écrire la demi-équation de réduction pour chacun des couples suivants:
 $Fe_{(aq)}^{3+} / Fe_{(aq)}^{2+}$; $Br_{2(aq)}^- / Br_{(aq)}$; $H_{(aq)}^+ / H_{2(g)}$
- 3 Écrire l'équation de la réaction d'oxydoréduction qui se produit entre les ions $H_{(aq)}^+$ et l'aluminium $Al_{(s)}$

1 Les demi-équations d'oxydation :

Pour le couple $Al_{(aq)}^{3+} / Al_{(s)}$ on a : $Al_{(s)} \rightleftharpoons Al_{(aq)}^{3+} + 3e^-$

Pour le couple $I_{2(aq)}^- / I_{(aq)}$ on a : $2I_{(aq)}^- \rightleftharpoons I_{2(aq)} + 2e^-$

Pour le couple $S_2O_{8(aq)}^{2-} / SO_{4(aq)}^{2-}$ on a : $2SO_{4(aq)}^{2-} \rightleftharpoons S_2O_{8(aq)}^{2-} + 2e^-$

$Al_{(aq)}^{3+} / Al_{(s)}$; $I_{2(aq)}^- / I_{(aq)}$; $S_2O_{8(aq)}^{2-} / SO_{4(aq)}^{2-}$

2 Les demi-équations de réduction :

Pour le couple $Fe_{(aq)}^{3+} / Fe_{(aq)}^{2+}$ on a : $Fe_{(aq)}^{3+} + e^- \rightleftharpoons Fe_{(aq)}^{2+}$

Pour le couple $Br_{2(aq)}^- / Br_{(aq)}$ on a : $Br_{2(aq)}^- + 2e^- \rightleftharpoons 2Br_{(aq)}$

Pour le couple $H_{(aq)}^+ / H_{2(g)}$ on a : $2H_{(aq)}^+ + 2e^- \rightleftharpoons H_{2(g)}$

3 L'équation de la réaction d'oxydoréduction qui se produit entre les ions $H_{(aq)}^+$ et l'aluminium $Al_{(s)}$

La demi-équation d'oxydation de $Al_{(s)}$ est : $(Al_{(s)} \rightleftharpoons Al_{(aq)}^{3+} + 3e^-) \times 2$

La demi-équation de réduction des ions $H_{(aq)}^+$ est : $(2H_{(aq)}^+ + 2e^- \rightleftharpoons H_{2(g)}) \times 3$

L'équation bilan de la réaction : $6H_{(aq)}^+ + 2Al_{(s)} \rightleftharpoons 3H_{2(g)} + 2Al_{(aq)}^{3+}$

② Équilibre d'une demi-équation d'oxydoréduction dans un milieu acide

Pour établir une demi-équation d'oxydoréduction dans un milieu acide , nous suivons les étapes suivantes :

- Équilibrer tous les atomes autres que l'oxygène O et l'hydrogène H .
- Équilibrer les atomes d'oxygène O en ajoutant des molécules d'eau H₂O .
- Équilibrer les atomes d'hydrogène H en ajoutant des protons H⁺ .
- Équilibrer les charges électriques en ajoutant des électrons .

❖ Application

① Écrire la demi-équation d'oxydation dans un milieu acide pour chacun des couples suivants: $MnO_4^{-}(aq)/Mn^{2+}(aq)$; ; $CO_2(aq)/H_2C_2O_4(aq)$

② Écrire la demi-équation de réduction un milieu acide pour chacun des couples suivants:

$O_2(aq)/H_2O(l)$; $Cr_2O_7^{2-}(aq)/Cr^{3+}(aq)$

③ Écrire l'équation de la réaction d'oxydoréduction qui se produit entre les ions $Cr_2O_7^{2-}(aq)$ et l'acide oxalique $H_2C_2O_4(aq)$

① La demi-équation d'oxydation dans un milieu acide:

Pour le couple $MnO_4^{-}(aq)/Mn^{2+}(aq)$ On a : $Mn^{2+}(aq) + 4H_2O(l) \rightleftharpoons MnO_4^{-}(aq) + 8H^+(aq) + 5e^-$

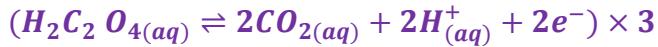
Pour le couple $CO_2(aq)/H_2C_2O_4(aq)$ On a : $H_2C_2O_4(aq) \rightleftharpoons 2CO_2(aq) + 2H^+(aq) + 2e^-$

② La demi-équation de réduction un milieu acide :

Pour le couple $Cr_2O_7^{2-}(aq)/Cr^{3+}(aq)$ On a : $Cr_2O_7^{2-}(aq) + 14H^+(aq) + 6e^- \rightleftharpoons 2Cr^{3+}(aq) + 7H_2O(l)$

Pour le couple $O_2(aq)/H_2O(l)$ On a : $O_2(aq) + 4H^+(aq) + 4e^- \rightleftharpoons 2H_2O(l)$

③ L'équation de la réaction d'oxydoréduction qui se produit entre les ions $Cr_2O_7^{2-}(aq)$ et l'acide oxalique $H_2C_2O_4(aq)$:



II Les transformations rapides et les transformations lentes

① Transformation rapide

❖ Activité

Mise en évidence d'une transformation chimique rapide

On verse un volume $V_1 = 20\text{mL}$ de solution de sulfate de cuivre II ($\text{Cu}_{(aq)}^{2+} + \text{SO}_{4(aq)}^{2-}$) dans le tube à essai , et on ajoute un volume $V_2 = 10\text{mL}$ de la soude ($\text{Na}_{(aq)}^+ + \text{HO}_{(aq)}^-$).



Exploitation

- ① Qu'observez-vous ? Quel est le nom du composé produit ?
- ② Écrire l'équation chimique de cette réaction .
- ③ Cette réaction peut-elle être suivie à l'œil nu ? Conclure .

- ① On observe , la formation d'un précipité bleu , c'est l'hydroxyde de cuivre II ($\text{Cu(OH)}_{2(s)}$)
- ② L'équation bilan de cette réaction est : $\text{Cu}_{(aq)}^{2+} + 2\text{HO}_{(aq)}^- \rightarrow \text{Cu(OH)}_{2(s)}$
- ③ La réaction étudiée ne peut pas être suivi à l'œil nu . On conclut que cette réaction est rapide

❖ Conclusion

Les transformations rapides (instantanées) sont des transformations qui se produisent rapidement , de sorte que ne nous pouvons pas suivre leur évolution à l'œil nu ou avec les appareils de mesure courants disponibles en laboratoire . C-à-d on ne peut pas distinguer des états intermédiaires entre l'état initial et l'état final .

② Transformations lentes

❖ Activité

Mise en évidence d'une transformation chimique lente

On mélange , dans un bêcher , $V_1 = 50\text{ml}$ de solution d'iodure de potassium de concentration molaire $C_1 = 0,02\text{mol.L}^{-1}$ acidifiée par l'acide sulfurique , et un volume $V_2 = 50\text{ml}$ de l'eau oxygénée de concentration $C_2 = 0,01\text{mol.L}^{-1}$



Exploitation

- ① Qu'arrive-t-il au mélange avec le temps ?
- ② Écrire l'équation de cette réaction . On donne les couples mis en jeu : $\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ et I_2/I^-
- ③ Cette réaction peut-elle être suivie à l'œil nu ? Conclure .

① On observe que , la couleur de la solution change au cours du temps .

② L'équation bilan de cette réaction :

- Pour le couple : $I_{2(aq)} / I_{(aq)}^-$ on a : $2I_{(aq)}^- \rightleftharpoons I_{2(aq)} + 2e^-$
- Pour le couple : $H_2O_{2(aq)} / H_2O_{(l)}$ on a : $H_2O_{2(aq)} + 2H_{(aq)}^+ + 2e^- \rightleftharpoons 2H_2O_{(l)}$
- L'équation bilan : $H_2O_{2(aq)} + 2H_{(aq)}^+ + 2I_{(aq)}^- \rightarrow 2H_2O_{(l)} + I_{2(aq)}$

③ Le changement de couleur de la solution est progressif (apparition progressive de la diiode formée) . c-à-d l'évolution de cette réaction peut être suivi à l'œil nu . On conclut que cette réaction est lente .

❖ Conclusion

Les transformations lentes sont des transformations qui durent de quelques secondes à plusieurs heures , de sorte que nous pouvons suivre leur évolution à l'œil nu ou avec les appareils de mesure courants disponibles en laboratoire . C-à-d on peut distinguer des états intermédiaires entre l'état initial et l'état final .

III Les facteurs cinétiques

① Définition

On appelle facteur cinétique tout paramètre capable de modifier la vitesse de l'évolution d'une transformation chimique .

Exemple de quelques facteurs cinétiques :La température ; le catalyseur ; les concentrations initiales des réactifs ; l'agitation ;

② Influence de la température

❖ Activité

On verse dans deux tubes à essais (1) et (2) ,**10mL** de solution d'acide oxalique ($H_2C_2O_{4(aq)}$) de concentration **0,5 mol.L⁻¹**. Dans le bécher de droite le mélange de tube (1) et plongé dans un bain Marie à **40°C**, et dans le bécher de gauche le mélange de tube (2) et plongé dans un bain Marie à **20°C**

Au même moment on ajoute aux deux tubes **5mL** de solution de permanganate de potassium ($K_{(aq)}^+ + MnO_{4(aq)}^-$) et on obtient les résultats suivants

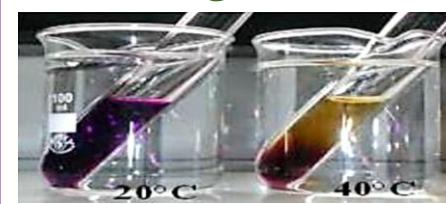
Exploitation

- 1 Qu'observez-vous ? Que concluez-vous ?
- 2 Ecrire l'équation chimique de cette réaction .

Les couples mis en jeu sont :



Les mélanges à t=0



Les mélanges après 5 min

① On observe que , la disparition de la couleur violette dans le tube(1) à une température **40°C** est plus rapide que celle dans le tube (2) à une température **20°C** . On conclut que l'évolution de la réaction est plus rapide si la température du milieu réactionnel est élevée

② L'équation bilan de cette réaction :

- Pour le couple : MnO_4^- / Mn^{2+} on a : $MnO_4^- + 8H^+ + 5e^- \rightleftharpoons Mn^{2+} + 4H_2O(l)$
- Pour le couple : $CO_2(aq) / H_2C_2O_4(aq)$ on a : $H_2C_2O_4(aq) + \rightleftharpoons 2CO_2(aq) + 2H^+ + 2e^-$
- L'équation bilan : $2MnO_4^{2-} + 5H_2C_2O_4(aq) + 6H^+ \rightarrow 2Mn^{2+} + 10CO_2(aq) + 8H_2O(l) + I_2(aq)$

❖ Conclusion

D'une manière générale , plus la température du milieu réactionnel est élevée plus la transformation est rapide et vice versa .

③ Influence des concentrations initiales des réactifs

❖ Activité

On verse , dans un bécher (A) , un volume **$V = 20ml$** de solution d'iodure de potassium de concentration molaire **$C_1 = 0,2 mol \cdot L^{-1}$** , et on verse , dans un bécher (B) , un volume **$V = 20ml$** de solution d'iodure de potassium de concentration molaire **$C_2 = 0,1 mol \cdot L^{-1}$**

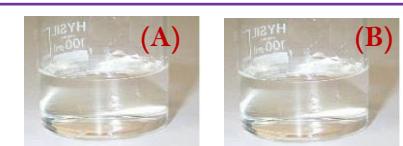
Dans le même temps on ajoute aux bêchers (A) et (B) un volume **$V' = 10ml$** de l'eau oxygénée de concentration

$C' = 0,01 mol \cdot L^{-1}$, acidifiée par l'acide sulfurique

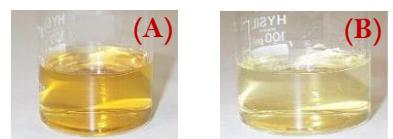
Exploitation

① Qu'observez-vous ? Que concluez-vous ?

① On constate que , le changement de couleur de la solution est plus avancée dans le tube (A) dont la concentration est élevée par rapport à celui dans le tube (B) dont la concentration est faible . On conclut que la transformation est d'autant plus rapide que les concentrations initiales des réactifs sont élevées



Les mélanges à $t=0$



Les mélanges après
5 min

Exercice 1

On mélange à 25°C , un volume $V_1 = 10\text{mL}$ de l'eau oxygénée H_2O_2 de concentration $C_1 = 0,5\text{mol.L}^{-1}$ acidifier par l'acide sulfurique , et un volume $V_2 = 20\text{mL}$ d'iodure de potassium ($\text{K}^+ + \text{I}^-$) de concentration molaire $C_2 = 0,8\text{mol.L}^{-1}$

- 1 Déterminer les deux couples qui interviennent dans la réaction , et écrire la demi-équation de chaque couple .
- 2 Déduire l'équation bilan de cette réaction d'oxydoréduction .
- 3 Quelle est l'évolution du mélange qui se produit qui nous pouvons distinguer à l'œil nu?
- 4 Dresser le tableau d'avancement associé à cette réaction .
- 5 Calculer l'avancement maximal x_{max} , et déduire le réactif limitant .
- 6 Déduire la quantité de matière du diiode à la fin de l'expérience .
- 7 On répète l'expérience précédente toute en gardant la même température et en augmentant la concentration de la solution iodure de potassium à $C_2' = 1\text{mol.L}^{-1}$. Qu'arrivera-t-il à la durée de réaction ?
- 8 Que se passerait-il si on met le mélange premier mélange dans l'eau glacée ?

Exercice 2

Le fer est attaqué par les acides , lorsque l'on place un clou de fer de masse $m = 1,5\text{ g}$ dans un volume $V = 10\text{mL}$ d'une solution acide chlorhydrique ($\text{H}^+ + \text{Cl}^-$) de concentration $C = 0,8\text{mol.L}^{-1}$, on observe un dégagement gazeux de dihydrogène (H_2) et la formation d'ions fer II (Fe^{2+}).

- 1 Ecrire l'équation bilan de la réaction et indiquer les couples mise en jeu .
- 2 Faire le bilan des espèces présentes à l'état initial.
- 3 Le clou a-t-il été entièrement détruit ?
- 4 Indiquer avec précision les quantités de matières présentent dans la solution lorsque la réaction est terminée .
- 5 Quel est le volume de dihydrogène dégagé par cette réaction ?
- 6 Quelle est la concentration en ions fer II et en ions H^+ lorsque la réaction est terminée ?

Données : □ Le volume molaire dans les conditions expérimentales : $V_M = 24\text{L/mol}$
 □ La masse molaire du fer : $M(\text{Fe}) = 55,8\text{g/mol}$

Exercice 3

On plonge une lame de zinc Zn de masse $m = 2\text{g}$ dans une solution d'acide chlorhydrique ($\text{H}^+ + \text{Cl}^-$) en excès . Au cours de la réaction , il y a formation des ions Zn^{2+} et dégagement d'un gaz qui donne une détonation en présence d'une flamme .

- 1 Écrire les demi-équations redox et déduire l'équation bilan entre l'acide chlorhydrique et le zinc .
- 2 Dresser le tableau d'avancement associé à cette réaction , et déterminer l'avancement maximal x_{max} .
- 3 Calculer le volume du gaz libéré , ainsi que la masse du zinc restant à la fin de la réaction .

Données : □ Le volume molaire dans les conditions expérimentales : $V_M = 25\text{ L/mol}$
 □ La masse molaire du zinc : $M(\text{Zn}) = 64,5\text{g/mol}$



Situation-problème

La surveillance en continu des réactions chimiques est nécessaire pour garantir la sécurité et la qualité des produits alimentaires .

- ☞ Comment assurer le contrôle d'une réaction chimique ?
- ☞ Comment définir la vitesse d'une réaction chimique ?

Objectifs

- ☞ Connaître la définition de la vitesse de la réaction et savoir la déterminer graphiquement .
- ☞ Connaître l'évolution de la vitesse d'une réaction chimique au cours du temps .
- ☞ Connaître le temps de demi -réaction d'une transformation chimique, et savoir le déterminer graphiquement .
- ☞ Connaître les différentes méthodes de suivi temporel d'une transformation chimique .

I

Vitesse volumique de réaction et le temps de demi-réaction

① Vitesse de réaction

❖ Définition

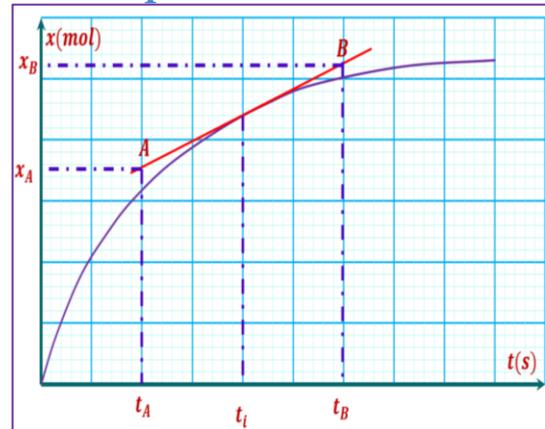
La vitesse volumique d'une réaction chimique correspond à la quantité de matière formée ou consommée par unité de temps et de volume ; tel que $v(t_i) = \frac{1}{V} \left(\frac{dx}{dt} \right)$ avec

- V : le volume de la solution en m^3
- $\frac{dx}{dt}$: la variation de l'avancement de la réaction en $mol \cdot s^{-1}$
- $v(t_i)$: la vitesse volumique dans (SI) est $mol \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$

❖ Détermination graphique de la vitesse volumique de la réaction

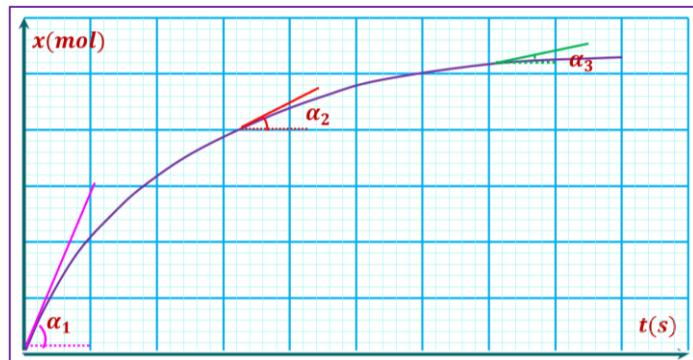
Pour déterminer la valeur de la vitesse volumique de réaction à un instant t_i il faut suivre les étapes suivantes :

- On trace la tangente à la courbe $x = f(t)$ à l'instant t_i .
- On calcule la valeur du rapport $\frac{dx}{dt}$ qui représente le coefficient directeur de la tangente : $\frac{dx}{dt} = a = \frac{x_A - x_B}{t_A - t_B}$
- On divise le rapport $\frac{dx}{dt}$ par le volume V de la solution .



❖ L'évolution de la vitesse volumique de la réaction au cours du temps

On remarque que l'angle α diminue avec le temps et par conséquence les valeurs du coefficient directeur de la tangente ($\frac{dx}{dt} = a = \tan \alpha$) diminuent avec le temps , et puisque le volume du mélange est constant , alors la vitesse volumique de la réaction diminue au cours du temps.



② Le temps de demi-réaction

❖ Définition

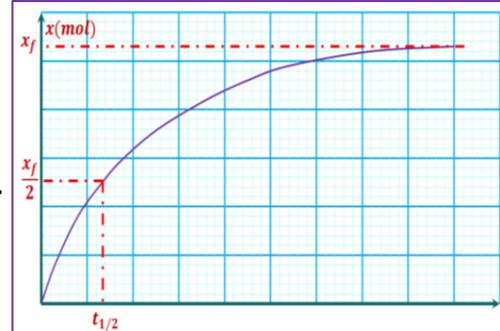
Le temps de demi-réaction d'une réaction chimique est la durée nécessaire pour que l'avancement de la réaction parvienne à la moitié de sa valeur final . $x(t_{1/2}) = \frac{x_f}{2}$

Si la transformation est totale on : $x_f = x_{max}$, donc on aura : $x(t_{1/2}) = \frac{x_{max}}{2}$

❖ Détermination graphique du temps de demi-réaction

Pour déterminer la valeur du temps de demi-réaction $t_{1/2}$, il faut suivre les étapes suivantes :

- On détermine sur la courbe $x = f(t)$ la valeur de l'avancement finale x_f .
- On détermine sur la courbe $x = f(t)$ la valeur $\frac{x_f}{2}$.
- Le temps de demi-réaction $t_{1/2}$ représente l'abscisse du point d'ordonnée $\frac{x_f}{2}$.



❖ Remarque

- Le temps de demi-réaction permet d'estimer la durée nécessaire à l'achèvement de la transformation chimique étudiée $t_f \approx 10t_{1/2}$.
- Lors du suivi temporel d'une transformation chimique, la durée entre chaque mesure doit être beaucoup plus courte que le temps de demi-réaction pour garantir l'intégrité de l'étude.

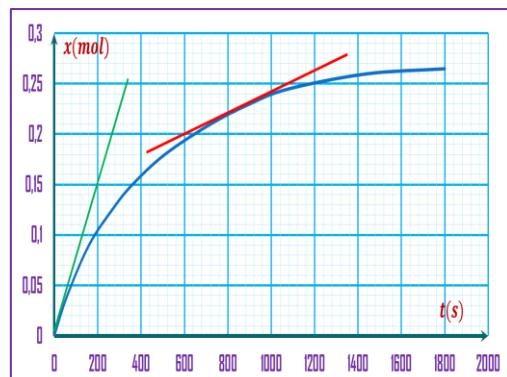
❖ Application

La courbe ci-contre représente les variations de l'avancement x d'une transformation chimique se produisant en solution aqueuse en fonction du temps.

Le volume du mélange réactionnel est $V = 100mL$

1) Déterminer les valeurs de la vitesse volumique de la réaction aux instants : $t_0 = 0s$ et $t_1 = 900s$

2) Déterminer le temps de demi-réaction $t_{1/2}$



1) D'après la définition, on a $v(t_i) = \frac{1}{V} \left(\frac{dx}{dt} \right)_{t_i}$

À : $t_0 = 0s$ on a $v(t_0) = \frac{1}{V} \left(\frac{dx}{dt} \right)_{t_0}$

$$\text{A.N: } v(t_0) = \frac{1}{100 \times 10^{-3}} \times \frac{(0,15 - 0)}{(200 - 0)}$$

$$\text{On trouve: } v(t_0) = 7,5 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}\text{s}^{-1}$$

À : $t_1 = 900s$ on a $v(t_1) = \frac{1}{V} \left(\frac{dx}{dt} \right)_{t_1}$

$$\text{A.N: } v(t_1) = \frac{1}{100 \times 10^{-3}} \times \frac{(0,225 - 0,2)}{(900 - 600)}$$

$$\text{On trouve: } v(t_1) = 8,33 \times 10^{-4} \text{ mol.L}^{-1}\text{s}^{-1}$$

2) D'après la courbe, on trouve $t_{1/2} = 280s$

II Suivi temporel d'une transformation chimique

Pour suivre temporellement l'évolution d'une transformation chimique, on doit connaître sa composition à chaque instant. Il existe plusieurs méthodes permettant de suivre l'évolution d'une transformation chimique parmi lesquelles il y a :

- **Méthodes physiques** : sont utilisées lorsque certaines grandeurs physiques mesurables dans le milieu réactionnel sont liées à la concentration de certaines espèces chimiques présentes dans ce milieu. Parmi ces méthodes on trouve : la conductimétrie; mesure de pression; mesure de volume; pH-métrie; spectrophotométrie.
- **Méthodes chimiques** : sont basées sur le dosage.

Ces méthodes permettent de suivre l'évolution temporelle de la transformation chimique, en particulier à déterminer et tracer la variation de l'avancement de la réaction en fonction de temps $x = f(t)$

① Suivi temporel d'une transformation chimique par dosage

❖ Activité

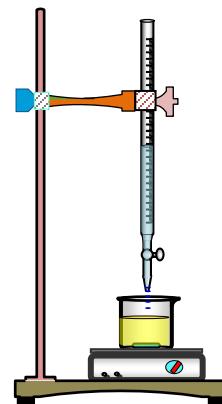
On verse, dans un bêcher, un volume $V = 100\text{mL}$ de solution d'iodure de potassium ($I_{(aq)}^- + K_{(aq)}^+$) de concentration $C_1 = 0,4\text{mol.L}^{-1}$, puis on ajoute un volume $V = 100\text{mL}$ de solution de peroxydisulfate de potassium ($S_2O_8^{2-}_{(aq)} + 2K_{(aq)}^+$) de concentration $C_2 = 0,036\text{mol.L}^{-1}$ acidifiée par 1mL d'acide sulfurique concentré.

Immédiatement, en préparant le mélange, on prélève un volume $V' = 10\text{mL}$ du mélange réactionnel et on le verse dans un bêcher à l'instant $t = 0$, et on ajoute dans ce bêcher 50mL d'eau glacée (0°C) et quelques gouttes d'empois d'amidon.

On dose la diiode formée à l'instant t par une solution de thiosulfate de sodium ($S_2O_3^{2-}_{(aq)} + 2Na_{(aq)}^+$) de concentration $C_3 = 0,02\text{mol.L}^{-1}$.

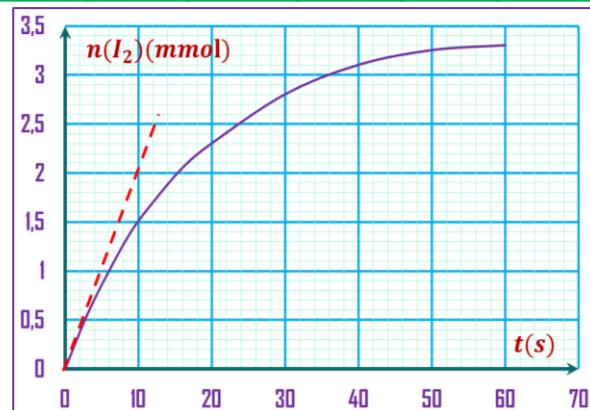
On refait les opérations précédentes à différents instants, comme l'indique le tableau suivant :

$t(s)$	0	3	6	9	12	16	20	30	40	50	60
$n(I_2)\text{(mmol)}$	0	0,5	1	1,4	1,7	2,1	2,3	1,7	3,1	3,2	3,3



Exploitation

- Pourquoi on verse l'échantillon du mélange réactionnel dans l'eau glacée avant chaque dosage ?
- Dresser le tableau d'avancement de la réaction des ions peroxydisulfate et des ions iodure. On donne : $S_2O_8^{2-}_{(aq)}/SO_4^{2-}_{(aq)}$ et $I_2(aq)/I_{(aq)}^-$
- Quelle est la relation entre la quantité de matière de la diiode formée à l'instant t et l'avancement x au même instant ?
- La courbe ci-contre représente les variations de la quantité de matière de diiode I_2 formée en fonction du temps. En exploitant ce courbe déterminer : le temps de demi-réaction et la vitesse de réaction à l'instants $t = 0$



- Cette opération s'appelle la plongée, son objectif est d'arrêter la transformation par dilution et refroidissement.

- Le tableau d'avancement associé à la réaction étudiée.

- Pour le couple : $I_2(aq)/I_{(aq)}^-$ on a : $2I_{(aq)}^- \rightleftharpoons I_2(aq) + 2e^-$
- Pour le couple : $S_2O_8^{2-}_{(aq)}/SO_4^{2-}_{(aq)}$ on a : $S_2O_8^{2-}_{(aq)} + 2e^- \rightleftharpoons 2SO_4^{2-}_{(aq)}$
- L'équation bilan : $2I_{(aq)}^- + S_2O_8^{2-}_{(aq)} \rightarrow I_2(aq) + 2SO_4^{2-}_{(aq)}$

Équation		$2I_{(aq)}^- + S_2O_8^{2-}_{(aq)}$	$\rightarrow I_2(aq) + 2SO_4^{2-}_{(aq)}$		
État	Avancement	Les quantités de matière en mole (mol)			
Initial	0	$4 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	0	0
Intermédiaire	x	$4 \cdot 10^{-2} - 2x$	$3,3 \cdot 10^{-3} - x$	x	$2x$
Final	x_m	$4 \cdot 10^{-2} - 2x_m$	$3,3 \cdot 10^{-3} - x_m$	x_m	$2x_m$

③ D'après le tableau d'avancement on a : $n(I_2) = x$.

- ②
- On calcule la vitesse volumique de la réaction à l'instant $t = 0\text{min}$

on sait que : $v_0 = \frac{1}{V_s} \frac{dx}{dt}$ avec $x = n(I_2)$

$$\text{donc : } v_0 = \frac{1}{V_s} \frac{dn(I_2)}{dt}$$

$v_0 = \frac{1}{V_s} a_0$ où $a_0 = \frac{dn(I_2)}{dt}$ est le coefficient directeur de la tangente à la courbe $n(I_2) = f(t)$ à $t = 0\text{min}$

d'après la courbe $n(I_2) = f(t)$ on trouve : $v_0 = \frac{1}{2 \times 100 \times 10^{-3}} \times \frac{(0-2) \times 10^{-3}}{(0-10)}$

$$\text{Alors : } v_0 = 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}\text{min}^{-1}$$

- On détermine la valeur du temps de demi-réaction

d'après le tableau d'avancement on a : $x_m = 3,6 \times 10^{-3} \text{ mol}$

Donc $x(t_{1/2}) = \frac{x_m}{2} = \frac{3,3 \times 10^{-3}}{2} = 1,65 \times 10^{-3} \text{ mol}$. graphiquement on trouve : $t_{1/2} \approx 11\text{min}$

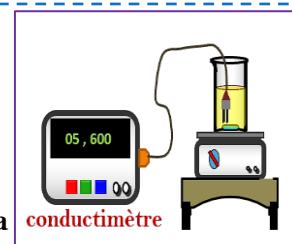
❖ Conclusion

Le dosage permet de suivre l'évolution temporelle de l'avancement de la réaction x , où x peut être calculé à chaque instant à partir de la connaissance de la quantité de matière de l'un des réactifs ou des produits formés à cet instant

② Suivi temporel d'une transformation chimique par mesure de la conductivité

❖ Activité

On verse, dans un bêcher, **25mL** de l'eau distillée et **23mL** d'alcool, et on met le bêcher dans un bain Marie à température de **20°C**. Puis on ajoute, dans ce bêcher, **1mL** de **2-chloro-2-méthylpropane** noté **RCl**. On fait l'étalonnage du conductimètre et on immerge la cellule de mesure dans le mélange après l'agitation et après chaque **3min**, on enregistre les valeurs de la conductivité σ de la solution. et on obtient la courbe ci-contre qui représente les variations de σ en fonction du temps.



L'équation de la réaction chimique qui se déroule dans le milieu réactionnel est : $\text{RCl} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cl}^- + \text{H}^+ + \text{ROH}$

1 Calculer la quantité de matière initiale de **RCl**.

2 Dresser le tableau d'avancement de cette réaction.

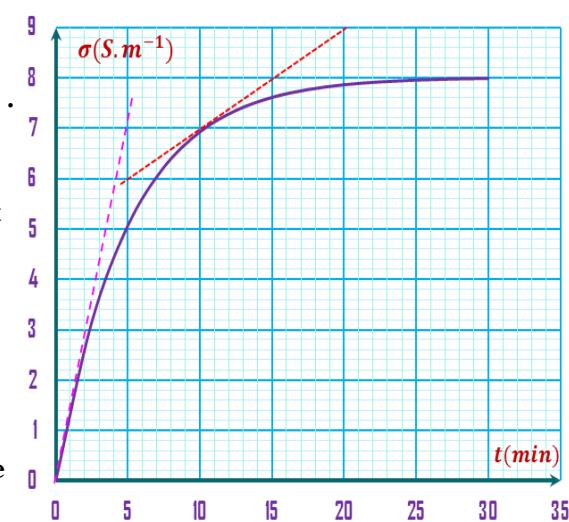
3 Quelles sont les espèces chimiques responsables de la conductivité de la solution ?

4 Soit σ est la conductivité de la solution à l'instant t et σ_f est la conductivité de la solution à l'état final. Trouver l'expression de σ en fonction de l'avancement x et le volume du mélange réactionnel V et les conductivités molaires ioniques λ_{H^+} et λ_{Cl^-} . Déduire que $x = \frac{\sigma}{\sigma_f} x_{\max}$.

5 Déterminer les valeurs de la vitesse volumique de la réaction aux instants : $t_0 = 0\text{s}$ et $t_1 = 10\text{min}$

6 Déterminer le temps de demi-réaction.

On donne : $M(\text{RCl}) = 92,6 \text{ g.mol}^{-1}$ et $\rho_{\text{RCl}} = 0,85 \text{ g.cm}^{-3}$



① On calcule la quantité de matière initiale de RCl

$$\text{on a : } n_i(RCl) = \frac{m_{RCl}}{M(RCl)} = \frac{\rho_{RCl} \cdot V_{RCl}}{M(RCl)}$$

$$n_i(RCl) = \frac{0,85 \times 1}{92,6} = 9,18 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

② Le tableau d'avancement associé à la réaction étudiée .

Équation		RCl	+	H_2O	\rightarrow	Cl^-	+	H^+	+	ROH
État	Avancement	Les quantités de matière en mole (mol)								
Initial	0	$9,18 \times 10^{-3}$				0		0		0
Intermédiaire	x	$9,18 \times 10^{-3} - x$	En excès			x		x		x
Final	x_m	$9,18 \times 10^{-3} - x$				x_m		x_m		x_m

③ Les espèces chimiques responsables de la conductivité de la solution sont les ions : Cl^- et H^+

$$\text{On a } \sigma = \lambda_{H^+} \cdot [H^+] + \lambda_{Cl^-} \cdot [Cl^-]$$

$$\text{Et d'après le tableau d'avancement on a : } n(H^+) = n(Cl^-) = x \Leftrightarrow [H^+] = [Cl^-] = \frac{x}{V}$$

$$\text{Donc la conductivité de la solution devient : } \sigma = (\lambda_{H^+} + \lambda_{Cl^-}) \cdot \frac{x}{V} \quad ①$$

$$\text{À l'état final la conductivité de la solution devient : } \sigma_f = (\lambda_{H^+} + \lambda_{Cl^-}) \cdot \frac{x_f}{V} \quad ②$$

$$\text{D'après les équations } ① \text{ et } ② \text{ on trouve : } x = \frac{\sigma}{\sigma_f} x_{max}$$

④ On calcule les valeurs de la vitesse volumique de la réaction aux instants : $t_0 = 0\text{s}$ et $t_1 = 10\text{min}$

$$\text{On sait que : } v = \frac{1}{V} \frac{dx}{dt} \text{ avec } x = \frac{\sigma}{\sigma_f} x_{max}$$

$$\text{Donc : } v = \frac{x_{max} \frac{d\sigma}{dt}}{V \cdot \sigma_f}$$

$$\text{À } t_0 = 0\text{s} \text{ on a : } v_0 = \frac{x_{max} \frac{d\sigma}{dt}}{V \cdot \sigma_f} \Big|_{t=0}$$

$$v_0 = \frac{9,18 \times 10^{-3}}{49 \times 10^{-3} \times 8} \times \frac{(7-0)}{(5-0)}$$

$$v_0 = 3,27 \times 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}\text{min}^{-1}$$

$$\text{À } t_1 = 10\text{min} \text{ on a : } v_1 = \frac{x_{max} \frac{d\sigma}{dt}}{V \cdot \sigma_f} \Big|_{t=10}$$

$$v_1 = \frac{9,18 \times 10^{-3}}{76 \times 10^{-3} \times 8} \times \frac{(7-9)}{(10-20)}$$

$$v_1 = 4,68 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}\text{min}^{-1}$$

⑤ On détermine le temps de demi-réaction :

$$\text{On a } x = \frac{\sigma}{\sigma_f} x_{max} \text{ donc : } \sigma = \frac{x}{x_{max}} \sigma_f$$

$$\text{Alors : } \sigma(t_{1/2}) = \frac{x(t_{1/2})}{x_{max}} \sigma_f \text{ avec } x(t_{1/2}) = \frac{x_{max}}{2}$$

$$\text{Donc : } \sigma(t_{1/2}) = \frac{x_{max}}{2 \cdot x_{max}} \sigma_f = \frac{\sigma_f}{2}$$

$$\text{A.N : } \sigma(t_{1/2}) = \frac{8}{2} = 4 \text{ S.m}^{-1}$$

Graphiquement on trouve : $t_{1/2} = 3,5\text{min}$

❖ Conclusion

La mesure de la conductivité σ d'une solution ionique permet de suivre l'évolution temporelle de l'avancement x de la réaction d'une manière continue pour les réactions dans lesquelles la différence entre la conductivité des produits et des réactifs est importante.

③ Suivi temporel d'une transformation chimique par mesure de pression

❖ Activité

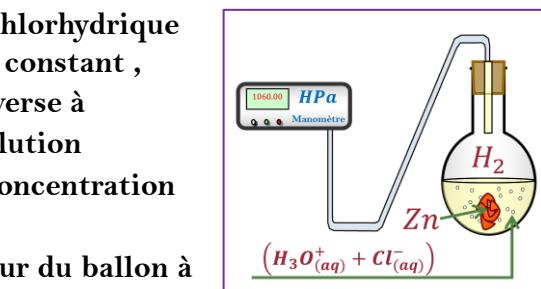
Pour étudier la cinématique de la réaction de l'acide chlorhydrique avec le zinc , on introduit dans un ballon de volume V constant , une masse $m = 0,5\text{g}$ de zinc en poudre $\text{Zn}_{(s)}$ et on y verse à l'instant $t_0 = 0\text{min}$ un volume $V_A = 75\text{mL}$ d'une solution aqueuse d'acide chlorhydrique($\text{H}_3\text{O}_{(aq)}^+ + \text{Cl}_{(aq)}^-$) de concentration $C_A = 0,4\text{mol.L}^{-1}$.

On mesure à chaque instant t la pression P_t à l'intérieur du ballon à l'aide d'un capteur de pression .

La courbe ci-contre représente les variations de la pression de H_2 en fonction du temps .

Données :

- On considère que tous les gaz sont parfaits .
- La constante des gaz parfaits : $R = 8,314(\text{SI})$.
- Toutes les mesures ont été prises à 20°C .
- L'équation d'état des gaz parfaits : $PV = nRT$.
- La masse molaire de zinc : $M(\text{Zn}) = 65,4\text{g/mol}$
- Les couples intervenants : $\text{H}_3\text{O}_{(aq)}^+/\text{H}_{2(g)}$;
 $\text{Zn}^{2+}_{(aq)}/\text{Zn}_{(s)}$



Exploitation

- ① Ecrire l'équation bilan de la réaction étudiée.
- ② Citer d'autres techniques qui peuvent utiliser pour suivre temporellement l'évolution de cette réaction.
- ③ Calculer la quantité de matière initiale des réactifs.
- ④ Dressez le tableau d'avancement de cette réaction.
- ⑤ Déterminer l'avancement maximal x_{max} de la réaction et en déduire le réactif limitant.
- ⑥ En appliquant l'équation des gaz parfaits, et en se basant sur le tableau d'avancement.

Monter que $P_{\text{H}_2} = \frac{x(t)RT}{V_g}$. En déduire que $P_{\text{H}_2} = P_{\text{maxH}_2} \frac{x(t)}{x_{max}}$, où V_g est le volume des gaz .

- ⑦ Déterminer le temps de demi-réaction $t_{1/2}$
- ⑧ Déterminer la vitesse volumique de réaction aux instants $t_0 = 0\text{min}$ et t_1

- ① L'équation bilan de la réaction étudiée.



- ② Cette transformation chimique peut être suivi par :

- Une méthode conductimétrique, car la conductivité du mélange change avec le temps.
- Une méthode pH-métrique car l'ions oxonium intervient dans cette réaction.
- Une méthode basée sur la mesure du volume du dihydrogène formé avec le temps

- ③ Calculons les quantités de matière initiales des réactifs.

$$\text{On a : } n_0(\text{Zn}_{(s)}) = \frac{m}{M(\text{Zn})}$$

$$\text{A.N : : } n_0(\text{Zn}_{(s)}) = \frac{0,5}{65,4}$$

$$\text{On trouve : } n_0(\text{Zn}_{(s)}) = 7,64 \times 10^{-3}\text{mol}$$

$$\text{Et on a : } n_0(\text{H}_3\text{O}_{(aq)}^+) = C_A \cdot V_A$$

$$\text{A.N : : } n_0(\text{Zn}_{(s)}) = 0,4 \times 75 \times 10^{-3}$$

$$\text{On trouve : } n_0(\text{H}_3\text{O}_{(aq)}^+) = 3 \times 10^{-2}\text{mol}$$

④ Le tableau d'avancement de cette réaction.

Équation		$\text{Zn}_{(s)} + 2\text{H}_3\text{O}_{(aq)}^+ \rightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{H}_{2(g)} + 2\text{H}_2\text{O}_{(l)}$						
État	Avancement	Les quantités de matière en mole (mol)						En excès
Initial	0	$7,64 \times 10^{-3}$	3×10^{-2}		0	0		
Intermédiaire	x	$7,64 \times 10^{-3} - x$	$3 \times 10^{-2} - 2x$		x	x		
Final	x_m	$7,64 \times 10^{-3} - x_m$	$3 \times 10^{-2} - 2x_m$		x_m	x_m		

⑤ Déterminons l'avancement maximal x_{max} de la réaction et le réactif limitant.

❖ Si $\text{Zn}_{(s)}$ est le réactif limitant, alors $7,64 \times 10^{-3} - x_{m1}$

Donc : $x_{m1} = 7,64 \times 10^{-3} \text{ mol}$

❖ Si $\text{H}_3\text{O}_{(aq)}^+$ est le réactif limitant, alors $3 \times 10^{-2} - 2x_{m2}$

Donc : $x_{m2} = \frac{3 \times 10^{-2}}{2} = 1,5 \times 10^{-2} \text{ mol}$

❖ Puisque $x_{m1} < x_{m2}$ donc $x_m = x_{m1} = 7,64 \times 10^{-3} \text{ mol}$ et $\text{Zn}_{(s)}$ est le réactif limitant.

⑥ D'après l'équation des gaz parfaits, on a $P_{\text{H}_2} \cdot V_g = n(\text{H}_2) \cdot R \cdot T$.

et d'après le tableau d'avancement, on a : $n(\text{H}_2) = x(t)$

Donc $P_{\text{H}_2} \cdot V_g = x(t) \cdot R \cdot T$.

D'où : $P_{\text{H}_2} = \frac{x(t)RT}{V_g} \cdot (a)$

À l'état final on aura donc : $P_{max\text{H}_2} = \frac{x(t)RT}{V_g} \quad (\text{b})$

Donc $\frac{(a)}{(b)}$ donne : $\frac{P_{\text{H}_2}}{P_{max\text{H}_2}} = \frac{x(t)}{x_{max}}$

D'où : $P_{\text{H}_2} = P_{max\text{H}_2} \frac{x(t)}{x_{max}}$

⑦ On a : $P(t_{1/2})_{\text{H}_2} = P_{max\text{H}_2} \frac{x(t_{1/2})}{x_{max}}$ avec $x(t_{1/2}) = \frac{x_{max}}{2}$

Donc $P(t_{1/2})_{\text{H}_2} = \frac{P_{max\text{H}_2}}{2} = \frac{740}{2} = 370 \text{ HPa}$

Graphiquement on trouve : $t_{1/2} \approx 40 \text{ min}$

$$\text{A.N: } v_0 = \frac{7,64 \times 10^{-3}}{100 \times 10^{-3} \times 740} \times \frac{(400-0)}{(40-0)}$$

On trouve $v_0 = 1,0310^{-3} \text{ mol.L}^{-1}\text{min}^{-1}$

À $t_1 = 100 \text{ s}$ on a : $v_0 = \frac{x_{max}}{V_A \cdot P_{max\text{H}_2}} \frac{dP_{\text{H}_2}}{dt} \Big|_{t=100}$

$$\text{A.N: } v_1 = \frac{7,64 \times 10^{-3}}{100 \times 10^{-3} \times 740} \times \frac{(800-660)}{(150-100)}$$

On trouve $v_0 = 2,8910^{43} \text{ mol.L}^{-1}\text{min}^{-1}$

❖ Conclusion

La mesure de pression du gaz permet de suivre temporellement l'évolution de l'avancement de la réaction d'une manière continue.

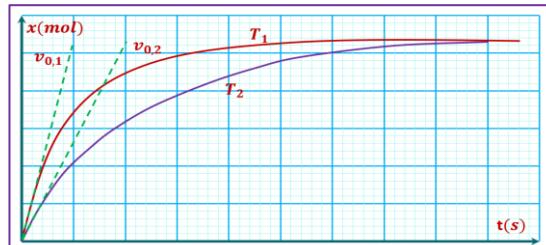
III

Facteurs influençant la vitesse volumique de réaction

① Influence de la température

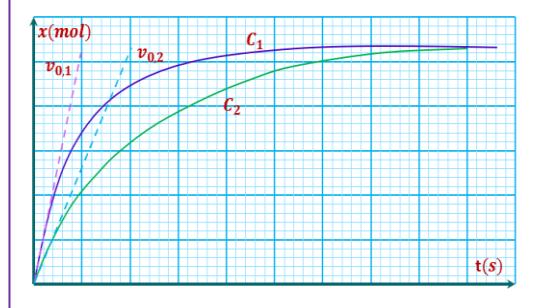
En général, l'élévation de la température du milieu réactionnel entraîne une augmentation de la vitesse volumique de la réaction sans changer l'état final de la réaction :

$$T_1 > T_2 \Rightarrow v_{0,1} > v_{0,2}$$



② Influence de l'état initial

En général, une augmentation des concentrations initiales des réactifs entraîne une augmentation de la vitesse volumique de la réaction : $c_1 > c_2 \Rightarrow v_{0,1} > v_{0,2}$



② Interprétation microscopique

- Les espèces chimiques se déplacent dans la solution d'une manière aléatoire, ce qui conduit à l'apparition des chocs entre elles .
- La vitesse de la réaction dépend du nombre de chocs efficaces , plus le nombre de chocs efficaces est élevé, plus la transformation est rapide
- Plus la température du milieu réactionnel est élevée , plus le nombre de chocs efficaces est élevée, donc la transformation est plus rapide
- Plus les concentrations des réactifs sont élevées, plus le nombre de chocs efficaces est élevé , donc la transformation est plus rapide

Exercice 1

Choisir les bonnes réponses .

- ① La vitesse d'une réaction chimique augmente avec l'augmentation des concentrations des produits .
- ② La vitesse d'une réaction augmente quand la température diminue .
- ③ Le trempe consiste à rajouter l'acide au milieu réactionnel .
- ④ Le temps de demi-réaction , noté $t_{1/2}$ est la durée au bout de laquelle , l'avancement de la réaction est égale à la moitié de l'avancement final .
- ⑤ Le suivi d'une transformation chimique par titrage est une méthode non destructrice .
- ⑥ Le suivi d'une transformation chimique par mesure de pression est une méthode non destructrice .

Exercice 2

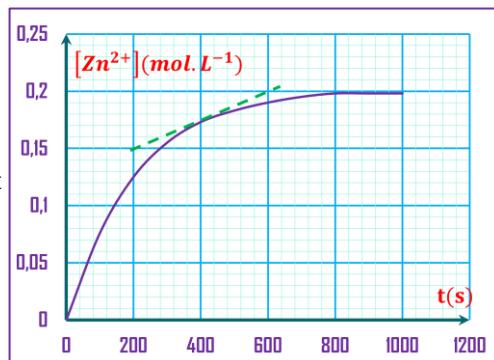
On fait réagir une solution d'acide chlorhydrique sur le Zinc . L'équation de cette réaction est :



À l'instant $t = 0$, on introduit une masse

$m = 1,04\text{g}$ de poudre de zinc dans un flacon contenant un volume $V_A = 80\text{mL}$ d'une solution d'acide chlorhydrique de concentration

$C_A = 0,5\text{mol.L}^{-1}$. On recueille le gaz de dihydrogène formé au cours du temps et on mesure son volume V



- ① Calculer la quantité de matière initiale de de chaque réactif .
- ② Dresser le tableau d'avancement de cette réaction .
- ③ Calculer la valeur de l'avancement maximal x_{max} , et déduire le réactif limitant .
- ④ Calculer la valeur de la quantité de matière de Zn^{2+} lorsque volume de dihydrogène formé est $V = 0,103\text{L}$.
- ⑤ L'ensembls des résultats de cette expérience permet de tracer la courbe ci-contre qui représente l'évolution de la concentration de Zn^{2+} en fonction du temps .
 - a – Vérifier que cette réaction est totale .
 - b – Déterminer à l'instant $t = 100\text{s}$ la concentration en ion Zn^{2+} dans le mélange réactionnel et la masse de zinc restant .
 - c – Définir le temps de demi-réaction , et déterminer sa valeur .
 - d – Calculer la valeur de la vitesse volumique de la réaction à l'instant $t' = 400\text{s}$.
- ⑥ On refait la même expérience dans les mêmes conditions mais avec une solution de l'acide chlorhydrique de concentration $C_A' = 0,25\text{mol/L}$. Tracer , en justifiant , sur le même courbe précédente , l'allure de la courbe obtenue dans ce cas .

Données

- La masse molaire de Zinc est : $M(Zn) = 65,4\text{g/mol}$
- Le volume molaire dans les conditions expérimentales $V_M = 24\text{L/mol}$

PARTIE II : Transformations non totales d'un système chimique

1

Transformations chimiques s'effectuant dans les deux sens

2

État d'équilibre d'un système chimique

3

Transformations liées aux réactions acidobasiques dans une solution aqueuse





Situation-problème

Pour obtenir un bon rendement, le pH du sol agricole doit prendre des valeurs spécifiques .

- ☞ Comment définir et mesurer le pH d'une solution aqueuse ?
- ☞ Une transformation chimique est-elle toujours totale ?

Objectifs

- ☞ Définir et mesurer le pH d'une solution aqueuse .
- ☞ Connaître et savoir expliquer la relation : $pH = -\log[H_3O^+]$
- ☞ Définir le taux d'avancement final d'une transformation chimique .
- ☞ Exploiter le taux d'avancement final pour distinguer une transformation limitée d'une transformation totale .
- ☞ Définir l'état d'équilibre d'un système chimique .

I

Les réactions acidobasique

① Définitions

- **L'acide ($HA; BH^+$)** : Selon Bronsted est toute espèce chimique susceptible de perdre un proton H^+ lors d'une transformation chimique selon la demi-équation suivante : $HA \rightleftharpoons A^- + H^+$. Exemple : $HCl_{(g)} \rightleftharpoons Cl^-_{(aq)} + H^+_{(aq)}$
- **La base ($A^-; B$)** : Selon Bronsted est toute espèce chimique susceptible acquière un proton H^+ lors d'une transformation chimique selon la demi-équation suivante : $A^- + H^+ \rightleftharpoons HA$. Exemple : $NH_3_{(g)} + H^+_{(aq)} \rightleftharpoons NH_4^+_{(aq)}$

② Le couple acide/base

- **Les espèces** chimiques HA et A^- sont conjugués et forment un couple HA/A^- s'il est possible de passer d'une espèce chimique à l'autre en gagnant ou en perdant un proton H^+ selon la demi-équation suivante : $HA \rightleftharpoons A^- + H^+$. Exemples : $H_3O^+_{(aq)}$ / $H_2O_{(l)}$; $H_2O_{(l)}$ / $HO^-_{(aq)}$; $CH_3COOH_{(aq)}$ / $CH_3COO^-_{(aq)}$.
- **L'ampholyte** : est une espèce chimique qui joue le rôle d'acide dans un couple et le rôle de la base dans un autre couple selon les conditions expérimentales. Les solutions correspondantes sont appelées amphotères. Exemple : l'eau $H_2O_{(l)}$ est un ampholyte parce qu'il joue le rôle d'une base dans le couple $H_3O^+_{(aq)}$ / $H_2O_{(l)}$, et le rôle d'un acide dans le couple $H_2O_{(l)}$ / $HO^-_{(aq)}$.

③ L'équation de réaction acidobasique

- **La réaction acidobasique** : est une transformation chimique qui fait intervenir un échange d'un proton H^+ entre l'acide HA_1 d'un couple HA_1/A_1^- et la base A_2^- d'un autre couple HA_2/A_2^- selon l'équation suivante :
 - Demi-équation du couple HA_1/A_1^- : $HA_1 \rightleftharpoons A_1^- + H^+$
 - Demi-équation du couple HA_2/A_2^- : $A_2^- + H^+ \rightleftharpoons HA_2$
 - Équation bilan : $HA_1 + A_2^- \rightleftharpoons A_1^- + HA_2$

❖ Application

- ➊ Écrire l'équation de la réaction acidobasique de l'acide méthanoïque $HCOOH_{(aq)}$ avec l'eau
 - ➋ Écrire l'équation de la réaction acidobasique de l'ammoniac $NH_3_{(g)}$ avec l'eau
 - ➌ Écrire l'équation de la réaction acidobasique de la méthylamine $CH_3NH_3_{(g)}$ avec l'acide éthanoïque $CH_3COOH_{(aq)}$
- ➊ Déterminons l'équation de la réaction acido-basique de l'acide méthanoïque et l'eau
La demi-équation du couple $HCOOH / HCoo^-$ est : $HCOOH \rightleftharpoons HCoo^- + H^+$
La demi-équation du couple H_2O / HO^- est : $H_2O + H^+ \rightleftharpoons H_3O^+$
L'équation bilan de la réaction est : $HCOOH + H_2O \rightarrow HCoo^- + H_3O^+$
- ➋ Déterminons l'équation de la réaction acido-basique entre l'acide éthanoïque et l'eau
La demi-équation du couple : NH_4^+ / NH_3 est : $NH_3 + H^+ \rightleftharpoons NH_4^+$
La demi-équation du couple : H_2O / HO^- est : $H_2O + H^+ \rightleftharpoons H_3O^+$
L'équation bilan de la réaction est : $NH_3 + H_2O \rightarrow NH_4^+ + HO^-$
- ➌ L'équation de la réaction acidobasique de la méthylamine $CH_3NH_3_{(g)}$ avec l'acide éthanoïque $CH_3COOH_{(aq)}$ est :
- $$CH_3COOH_{(aq)} + CH_3NH_3_{(g)} \rightarrow CH_3COO^-_{(aq)} + CH_3NH_4^+$$

II Le pH d'une solution aqueuse

① La solution aqueuse

La **solution aqueuse** est un **mélange homogène** obtenu par la **dissolution** d'une **espèce chimique** (appelée **soluté**) dans **l'eau** (appelée **solvant**).

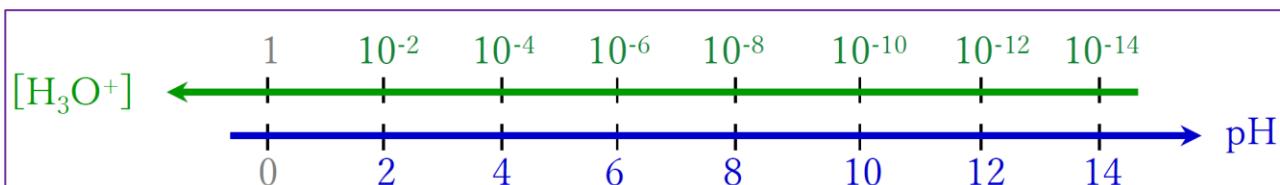
② Le pH d'une solution aqueuse

❖ Définition

Pour des solutions diluées ($[H_3O^+] \leq 5 \cdot 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$), le **pH** d'une solution aqueuse est défini par la relation suivante : , $pH = -\log[H_3O^+]$ avec : $[H_3O^+]$ est la concentration effective des ions oxonium H_3O^+ dans la solution exprimée en mol.L^{-1}

❖ Remarque

- Le **pH** est une grandeur sans unité
- La mesure de **pH** d'une solution permet de déterminer la concentration des ions H_3O^+ dans cette solution , en utilisant la relation suivante : $[H_3O^+] = 10^{-pH}$
- Pratiquement , les valeurs de **pH** évoluent entre **0** et **14**



❖ Application

- ① Déterminer la valeur de **pH** d'une solution aqueuse dont la concentration des ions H_3O^+ est : $[H_3O^+] = 2 \cdot 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$
- ② Déterminer la valeur de **pH** d'une solution aqueuse dont la concentration des ions H_3O^+ est : $[H_3O^+] = 3,5 \cdot 10^{-1} \text{ mol.m}^{-3}$
- ③ Calculer la concentration des ions H_3O^+ dans une solution aqueuse de **pH = 4,23**

① On a : $pH = -\log[H_3O^+]$

A.N: $pH = -\log(2 \cdot 10^{-3}) = 2,7$

② On a : $pH = -\log[H_3O^+]$

A.N: $pH = -\log(3,5 \cdot 10^{-1} \times 10^{-3}) = 3,46$

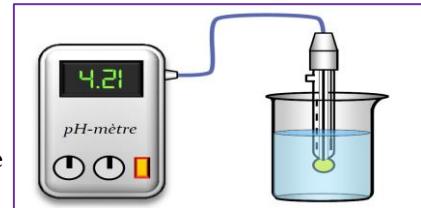
③ On a : $[H_3O^+] = 10^{-pH}$

A.N: $[H_3O^+] = 10^{-4,23} = 5,89 \times 10^{-5} \text{ mol.L}^{-1}$

② Mesure de pH d'une solution aqueuse

Le **pH** d'une solution aqueuse est très utile , car il permet de déterminer la concentration en ions oxonium $[H_3O^+]$, ainsi que l'état final d'une réaction chimique .

- On peut simplement avoir une indication de la valeur de **pH** en utilisant un **papier-pH** qui prend une couleur plus ou moins rougeâtre selon l'acidité de la solution .
- Pour être précis , on utilise un **pH-mètre** qui se compose d'une sonde de mesure reliée à un voltmètre électronique gradué en **pH** .



❖ Remarque

Pour mesurer le **pH** d'une solution à l'aide d'un **pH-mètre** nous suivons les étapes suivantes :

- Rincer la sonde avec de l'eau distillée .
- Étalonner le **pH-mètre** avec deux solutions d'étalonnage , de **pH** connu :
 - Le premier réglage se fait avec une solution étalonnée de **pH = 7** .
 - Le deuxième réglage se fait avec une solution de **pH = 4** dans le cas d'une solution acide et de **pH = 9** dans le cas d'une solution basique .
- Lorsqu'on termine nos mesures , on rince la sonde avec de l'eau distillée et on la met dans sa pochette .

III Les transformations totales et non totales

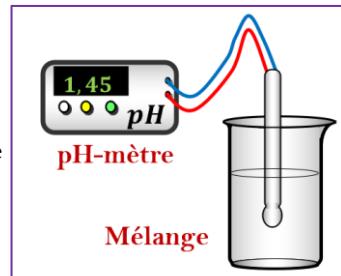
① Mise en évidence la transformation totale

❖ Activité

On verse , dans un bêcher , un volume $V = 100ml$ de l'acide chlorhydrique $(H_3O_{(aq)}^+ + Cl_{(aq)}^-)$ de concentration

$C = 3,5 \times 10^{-2} mol \cdot L^{-1}$, puis on immerge l'électrode de pH-mètre dans cette solution et on attend que le **pH** se stabilise , le pH-mètre indique la valeur : **pH = 1,45**

Les couples mis en jeu sont : $HCl_{(g)} / Cl_{(aq)}^-$ et $H_3O_{(aq)}^+ / H_2O_{(l)}$



Exploitation

- 1) Calculer la quantité de matière initiale du chlorure d'hydrogène .
- 2) Écrire l'équation de la réaction acido-basique entre le chlorure d'hydrogène **HCl** et l'eau .
- 3) Dresser le tableau d'avancement de cette réaction , et déterminer l'avancement maximal x_{max} de cette réaction .
- 4) Déterminer l'avancement final x_f de cette réaction , et la comparer avec la valeur de x_{max} Que peut-on déduire ?
- 5) On définit le taux d'avancement final τ d'une réaction chimique par la relation suivante : $\tau = \frac{x_f}{x_{max}}$. Calculer τ en % et conclure .
- 1) On calcule la quantité de matière initiale du chlorure d'hydrogène .
On $n_0(HCl) = C \cdot V = 3,5 \times 10^{-2} \times 100 \times 10^{-3} = 3,5 \times 10^{-3} mol$
- 2) L'équation de réaction acidobasique du chlorure d'hydrogène avec l'eau :
$$HCl_{(g)} + H_2O_{(aq)} \rightarrow H_3O_{(aq)}^+ + Cl_{(aq)}^-$$

③ Le tableau d'avancement de la réaction étudiée .

Équation		$HCl_{(g)}$	+	$H_2O_{(aq)}$	\rightarrow	$H_3O_{(aq)}^+$	+	$Cl_{(aq)}^-$
État	Avancement	Les quantités de matière en mole (mol)						
Initial	0	$n_0(HCl)$				0		0
Intermédiaire	x	$n_0(HCl) - x$				x		x
Final	x_f	$n_0(HCl) - x_f$				x_f		x_f

④ On détermine l'avancement maximal

Si la réaction est totale , le réactif limitant est $HCl_{(g)}$ (l'eau est en excès) Donc

$$n_0(HCl) - x_{max} = 0 \Leftrightarrow x_{max} = n_0(HCl)$$

$$x_{max} = 3,5 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

On détermine l'avancement final

$$x_f = n_f(H_3O) = [H_3O]_f \cdot V$$

$$x_f = 10^{-pH} \cdot V =$$

$$x_f = 10^{-1,45} \times 100 \times 10^{-3}$$

$$x_f = 3,5 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

On constate que $x_{max} = x_f$ donc cette réaction est totale .

⑤ On calcule le taux d'avancement final de cette réaction : $\tau = \frac{x_f}{x_{max}} = 1 = 100\%$

On conclut que si la réaction est totale , le taux d'avancement est égale à 100%

❖ Conclusion

Transformation totale est dont l'évolution s'arrête par la disparition complète d'au moins un des réactifs du système chimique .

Pour une transformation totale on a : $x_f = x_{max}$

② Mise en évidence la transformation limitée

❖ Activité

Dans une fiole jaugée de **500mL** , on verse un volume **$V = 1mL$** d'acide éthanoïque pur **CH_3COOH** , et on complète avec l'eau distillée jusqu'au trait de jauge , et on obtient une solution aqueuse de l'acide éthanoïque . À l'aide d'un pH-mètre on mesure le **pH** de cette solution on trouve la valeur : **$pH = 3,10$**

Les couples mis en jeu sont : **$CH_3COOH_{(aq)}/CH_3COO^-_{(aq)}$** et **$H_3O^+_{(aq)}/H_2O_{(l)}$**

Exploitation

- 1 Calculer la quantité de matière initiale d'acide éthanoïque .
- 2 Écrire l'équation de la réaction acido-basique entre l'acide éthanoïque et l'eau .
- 3 Dresser le tableau d'avancement de cette réaction , et déterminer l'avancement maximal x_{max} de cette réaction .
- 4 Déterminer l'avancement final x_f de cette réaction , et la comparer avec la valeur de x_{max} . Que peut-on déduire ?
- 5 Calculer la valeur du taux d'avancement final τ en % de cette réaction et conclure .

- La masse volumique de l'eau $\rho_{eau} = 1 \text{ g cm}^{-3}$.

Données : ▪ La masse molaire de l'acide d'éthanoïque : $M = 60,05 \text{ g mol}^{-1}$.
▪ La densité de l'acide d'éthanoïque étudié : $d = 1,05$

- 1 On calcule la quantité de matière de l'acide éthanoïque .

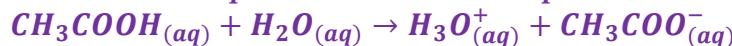
$$\text{On } n_0(CH_3COHO) = \frac{m}{M} = \frac{\rho_{eau} \cdot d \cdot V}{M}$$

$$\text{Donc : } n_0(CH_3COHO) = \frac{\rho \cdot V}{M} = \frac{\rho_{eau} \cdot d \cdot V}{M}$$

$$\text{A.N : } n_0(CH_3COHO) = \frac{1 \times 1,05 \times 1}{60}$$

$$n_0(CH_3COHO) = 1,75 \times 10^{-2} \text{ mol}$$

② L'équation de réaction acidobasique de l'acide éthanoïque avec l'eau :



③ Le tableau d'avancement de la réaction étudiée .

Équation		$CH_3COOH_{(aq)} + H_2O_{(aq)} \rightarrow H_3O^+_{(aq)} + CH_3COO^-_{(aq)}$			
État	Avancement	Les quantités de matière en mole (mol)			
Initial	0	$n_0(CH_3COHO)$		0	0
Intermédiaire	x	$n_0(CH_3COHO) - x$	En excès	x	x
Final	x_f	$n_0(CH_3COHO) - x_f$		x_f	x_f

④ On détermine l'avancement maximal

Si la réaction est totale , le réactif limitant est $HCl_{(g)}$ (l'eau est en excès) Donc

$$\begin{aligned} n_0(CH_3COHO) - x_{max} &= 0 \\ \Leftrightarrow x_{max} &= n_0(CH_3COHO) \\ \Leftrightarrow x_{max} &= 1,75 \times 10^{-2} mol \end{aligned}$$

On détermine l'avancement final

$$x_f = n_f(H_3O) = [H_3O]_f \cdot V$$

$$x_f = 10^{-pH} \cdot V =$$

$$x_f = 10^{-3,10} \times 500 \times 10^{-3}$$

$$x_f = 3,97 \times 10^{-4} mol$$

On constate que $x_f < x_{max}$, alors l'acide éthanoïque CH_3COOH n'est pas consommé totalement . On dit que la transformation n'est pas totale ou limitée

⑤ On calcule la valeur du taux d'avancement final associé à cette réaction

$$\begin{aligned} \text{On a : } \tau &= \frac{x_f}{x_{max}} = \frac{3,97 \times 10^{-4}}{1,75 \times 10^{-2}} \\ \tau &= 2,27 \times 10^{-2} = 2,27\% \end{aligned}$$

On conclut que le taux d'avancement final d'une transformation limitée est : $\tau < 100\%$

❖ Conclusion

Transformation non totale ou limitée est donc l'évolution s'arrête sans disparition de tout réactifs du système chimique .

Pour une transformation limitée on a : $x_f < x_{max}$

③ Le taux d'avancement final

❖ Définition

Le taux d'avancement final τ d'une réaction chimique est égale au quotient de

l'avancement final x_f par l'avancement maximale x_{max} de cette réaction : $\tau = \frac{x_f}{x_{max}}$

τ : est une grandeur sans unité et $0 \leq \tau \leq 1$ et peut être exprimé en pourcentage .

❖ Utilisation du taux d'avancement final

Le taux d'avancement final τ permet de distinguer la transformation limitée de la transformation totale tel que :

- Si $\tau < 1$: alors la transformation étudiée est limitée .
- Si $\tau = 1$: alors la transformation étudiée est totale .

④ Sens d'évolution d'un système chimique

❖ Activité

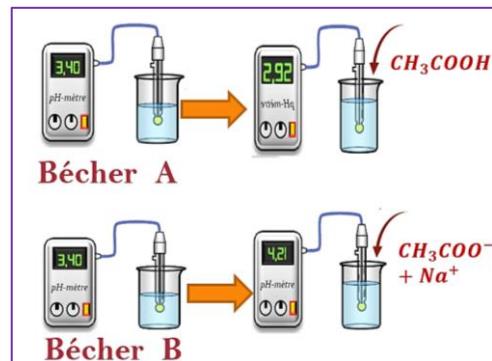
On prépare une solution aqueuse (S) de l'acide éthanoïque CH_3COOH de concentration

$C = 0,01 \text{ mol.L}^{-1}$, puis on mesure le pH de cette solution et on obtient $pH = 3,40$.

On verse dans deux bêchers A et B le même volume $V = 20 \text{ mL}$ de la solution (S).

On ajoute avec précaution, dans le bêcher A quelques gouttes d'acide éthanoïque CH_3COOH , et on observe que le pH prend la valeur $pH = 2,92$.

On ajoute dans le bêcher B, des cristaux d'éthanoate de sodium CH_3COONa , on observe que le pH prend la valeur $pH = 4,21$



Exploitation

- ① Écrire l'équation acido-basique qui se fait pendant la préparation de la solution (S).
 - ② Déterminer le sens d'évolution du système chimique dans le bêcher A.
 - ③ Déterminer le sens d'évolution du système chimique dans le bêcher B.
 - ④ Que peut-on déduire ?
- ① L'équation de la réaction acidobasique qui se produit lors de préparation de la solution (S)
- $$\text{CH}_3\text{COOH}_{(aq)} + \text{H}_2\text{O}_{(aq)} \rightarrow \text{H}_3\text{O}_{(aq)}^+ + \text{CH}_3\text{COO}_{(aq)}^-$$
- ② On remarque que : $pH_A < pH_S$ c-à-d la concentration des ions d'oxonium H_3O dans le bêcher A est supérieur à celle dans le bêcher (S). Donc le système contenant le bêcher A a évolué dans le sens de formation des ions H_3O c'est le sens direct.
- $$\text{CH}_3\text{COOH}_{(aq)} + \text{H}_2\text{O}_{(aq)} \rightarrow \text{H}_3\text{O}_{(aq)}^+ + \text{CH}_3\text{COO}_{(aq)}^-$$
- ③ On remarque que : $pH_B < pH_S$ c-à-d la concentration des ions d'oxonium H_3O dans le bêcher B est inférieur celle dans le bêcher (S). Donc le système contenant le bêcher B a évolué dans le sens de consommation des ions H_3O c'est le sens indirect.
- $$\text{H}_3\text{O}_{(aq)}^+ + \text{CH}_3\text{COO}_{(aq)}^- \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH}_{(aq)} + \text{H}_2\text{O}_{(aq)}$$
- ④ On déduit que la transformation chimique limitée peut se produire dans les deux sens c'est pour cette raison que on la modélise par deux flèches (\rightleftharpoons)
- $$\text{CH}_3\text{COOH}_{(aq)} + \text{H}_2\text{O}_{(aq)} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}_{(aq)}^+ + \text{CH}_3\text{COO}_{(aq)}^-$$

❖ Conclusion

Au cours de chaque transformation limitée une réaction se produite dans les deux sens (sens direct et sens indirect de l'équation de la réaction). On l'exprime par l'écriture

suivante : $aA + bB \rightleftharpoons cC + dD$

⑤ État d'équilibre d'un système chimique

❖ Définition

À l'état final d'une transformation limitée , le système cesse de s'évoluer et se caractérise par la présence de tous les réactifs et les produits à des proportions fixes (les quantités de matière des réactifs et des produits deviennent constantes) au cours du temps . Cet état est appelé : état d'équilibre dynamique

❖ Interprétation de l'état d'équilibre

On considère la transformation chimique suivante : $aA + bB \rightleftharpoons cC + dD$

À l'état initial , le système contient les espèces chimiques **A** et **B** , et la réaction se produit dans le sens ① avec une vitesse v_1 .

Au cours du temps l'avancement du système augmente et par conséquence :

- Les quantités de matière des espèces chimiques **A** et **B** ainsi que les chocs entre elles diminuent donc la vitesse v_1 diminue aussi .
- Les espèces chimiques **C** et **D** apparaissent et la réaction se produit dans le sens ② avec une vitesse v_2 , et leurs quantités de matière ainsi que les chocs entre elles augmentent donc augmentation de v_2 .

Lorsque les deux vitesses v_1 et v_2 s'égalisent : le système n'évolue plus . C'est l'état d'équilibre dynamique .

Exercice 1

Un volume $V = 50,0 \text{ mL}$ d'une solution aqueuse a été obtenu en apportant $n_1 = 2,50 \text{ mmol}$ d'acide méthanoïque $\text{HCOOH}_{(aq)}$ et $n_2 = 5 \text{ mmol}$ d'éthanoate de sodium ($\text{Na}^+_{(aq)} + \text{CH}_3\text{COO}^-_{(aq)}$). Dans l'état d'équilibre, à 25°C , sa conductivité vaut $\sigma = 0,973 \text{ S.m}^{-1}$.

- ① Écrire l'équation de la réaction et établir son tableau d'avancement.
- ② Exprimer la conductivité σ en fonction de l'avancement $x_{éq}$ dans l'état d'équilibre. En déduire la valeur de $x_{éq}$.
- ③ Déterminer, à l'état d'équilibre, les concentrations molaires effectives des espèces chimiques participant à la réaction.
- ④ Calculer la valeur du τ taux d'avancement final, conclure.

Données : Les conductivités molaires ioniques à 25°C :

$$\lambda(\text{CH}_3\text{COO}^-) = \lambda_1 = 4,09 \times 10^{-3} \text{ S.m}^2.\text{mol}^{-1}; \lambda(\text{HCOO}^-) = \lambda_2 = 5,46 \times 10^{-3} \text{ S.m}^2.\text{mol}^{-1}$$

$$; \lambda(\text{Na}^+) = \lambda_3 = 5,01 \times 10^{-3} \text{ S.m}^2.\text{mol}^{-1}$$

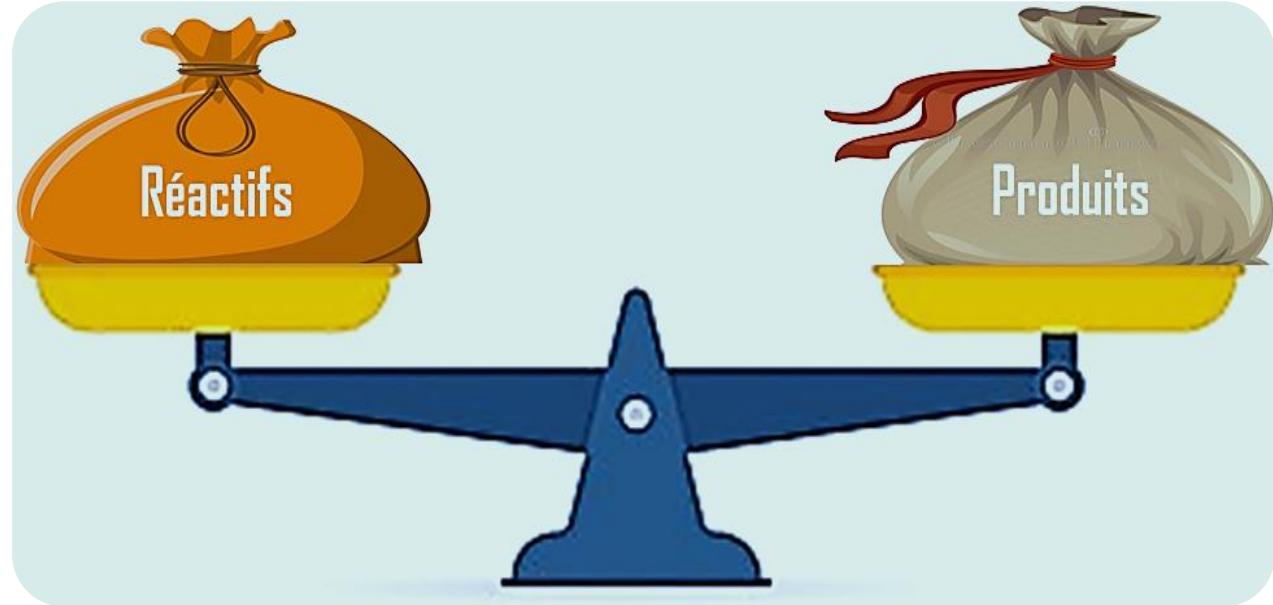
Exercice 2

Dans une fiole jaugée de volume $V_0 = 100 \text{ mL}$, on introduit une masse m d'acide éthanoïque CH_3COOH , puis on complète cette fiole avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge et on l'homogénéise; On obtient une solution (S_0) d'acide éthanoïque de concentration molaire $C_0 = 5 \times 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$. $M(\text{CH}_3\text{COOH}) = 60 \text{ g.mol}^{-1}$

- ① Calculer la masse m .
- ② Ecrire l'équation de la réaction acido-basique de l'acide éthanoïque avec d'eau.
- ③ Construire le tableau d'avancement, en fonction de C_0 , V_0 , $x_{éq}$.
- ④ Exprimer le taux d'avancement final τ_0 en fonction de la concentration en ions oxonium à l'équilibre $[\text{H}_3\text{O}^+_{(aq)}]_{éq}$ et C_0 .
- ⑤ La mesure de la conductivité de la solution (S_0) donne $\sigma_0 = 34,3 \text{ mS.m}^{-1}$ à 25°C .
 - a – Exprimer la conductivité σ_0 de la solution (S_0), à l'état d'équilibre en fonction des conductivités molaires ioniques des ions présents et de la concentration $[\text{H}_3\text{O}^+_{(aq)}]_{éq}$.
 - b – Calculer le pH de la solution et déduire la valeur du τ_0 taux d'avancement final de la réaction.
- ⑥ On réalise la même étude, en utilisant une solution (S_1) d'acide éthanoïque de concentration $C_1 = 5 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$. La mesure de la conductivité de cette solution est : $\sigma_1 = 10,7 \text{ mS.m}^{-1}$ à 25°C . Calculer τ_0 le taux d'avancement de la réaction.
- ⑦ En déduire l'influence de la concentration de la solution sur le taux d'avancement.

Données : Les conductivités molaires ioniques à 25°C :

$$\lambda(\text{CH}_3\text{COO}^-) = \lambda_1 = 4,09 \times 10^{-3} \text{ S.m}^2.\text{mol}^{-1} \text{ et } \lambda(\text{H}_3\text{O}^+) = \lambda_2 = 35 \times 10^{-3} \text{ S.m}^2.\text{mol}^{-1}$$



Situation-problème

Un état d'équilibre d'un système chimique est l'état dans lequel les réactifs et les produits présentent en quantités constantes .

👉 Quelle est la grandeur qui caractérise un état d'équilibre ?

Objectifs

- 👉 Définir et savoir déterminer le quotient de réaction dans un état donné .
- 👉 Connaitre la constante d'équilibre d'un système chimique .
- 👉 Connaître les facteurs influençant le taux d'avancement final .

I

Le quotient de réaction

① Définitions

Le quotient de réaction est une grandeur caractérisant un système chimique dans un état donné .

On considère la réaction chimique suivante : $aA_{(aq)} + bB_{(aq)} \rightleftharpoons cC_{(aq)} + dD_{(aq)}$

Le quotient de réaction associé à cette réaction est : $Q_r = \frac{[C]^c \cdot [D]^d}{[A]^a \cdot [B]^b}$

[A] , [B] , [C] et [D] : sont les concentrations molaires effectives en mol.L^{-1}

a , b , c et d : sont les coefficients stœchiométriques .

Q_r : est une grandeur sans unité .

❖ Remarque

- $[H_2O] = 1$: dans le cas d'une solution aqueuse (H_2O est le solvant) .
- $[X] = 1$: Si X est un solide .

❖ Application

1 Donner l'expression du quotient de la réaction associée à chacune des réactions suivantes :

- ❖ $HCOO_{(aq)}^- + CH_3COOH_{(aq)} \rightleftharpoons CH_3COO_{(aq)}^- + HCOOH_{(aq)}$
- ❖ $H_2O_{2(aq)} + 2I_{(aq)}^- + 2H_{(aq)}^+ \rightleftharpoons I_{2(aq)} + 2H_2O_{(l)}$
- ❖ $H_2O_{(l)} + C_6H_5COOH_{(aq)} \rightleftharpoons C_6H_5COO_{(aq)}^- + H_3O_{(aq)}^+$
- ❖ $S_2O_{8(aq)}^{2-} + 2I_{(aq)}^- \rightleftharpoons 2SO_{4(aq)}^{2-} + I_{2(aq)}$
- ❖ $Cu_{(aq)}^{2+} + Zn_{(s)} \rightleftharpoons Zn_{(aq)}^{2+} + Cu_{(s)}$
- ❖ $3Ag_{(aq)}^+ + Al_{(s)} \rightleftharpoons Al_{(aq)}^{3+} + Ag_{(s)}$
- ❖ $H_3O_{(aq)}^+ + HO_{(aq)}^- \rightleftharpoons 2H_2O_{(l)}$

- 2 Un système chimique de volume $V = 50\text{mL}$, contient initialement une quantité $n_1 = 4 \cdot 10^{-4}\text{mol}$ d'iodure de potassium ($K_{(aq)}^+ + I_{(aq)}^-$) , et une quantité $n_2 = 1 \cdot 10^{-4}\text{mol}$ de peroxyulfate de sodium ($2Na_{(aq)}^+ + S_2O_{8(aq)}^{2-}$) . Une réaction lente et totale se produit , son équation est : $2I_{(aq)}^- + S_2O_{8(aq)}^{2-} \rightarrow I_2 + 2SO_{4(aq)}^{2-}$
- a* – Dresser le tableau d'avancement associée à cette réaction et déduire son avancement maximale .
- b* – Donner l'expression du quotient de réaction associé à la réaction étudiée .
- c* – En exploitant le tableau d'avancement trouver l'expression de Q_r en fonction de l'avancement x de la réaction .
- d* – Calculer les valeurs du quotient de réaction aux instants $t = 0$ et $t = t_{1/2}$

1 L'expression du quotient de la réaction associée à chacune des réactions suivantes :

$$Q_{r1} = \frac{[CH_3COO^{-}_{(aq)}].[HCOOH_{(aq)}]}{[HCOO^{-}_{(aq)}].[CH_3COOH_{(aq)}]}, Q_{r2} = \frac{[I_2(aq)].[HCOOH_{(aq)}]}{[H_2O_2(aq)].[I^{-}_{(aq)}]^2}, Q_{r3} = \frac{[C_6H_5COO^{-}_{(aq)}].[H_3O^+_{(aq)}]}{[C_6H_5COO^{-}_{(aq)}]}$$

$$Q_{r4} = \frac{[I_2(aq)].[SO_4^{2-}_{(aq)}]^2}{[S_2O_8^{2-}_{(aq)}].[I^{-}_{(aq)}]^2}, Q_{r5} = \frac{[Zn^{2+}_{(aq)}]}{[Cu^{2+}_{(aq)}]}, Q_{r6} = \frac{[Al^{3+}_{(aq)}]}{[Ag^+_{(aq)}]^3},$$

$$Q_{r7} = [H_3O^+_{(aq)}] \cdot [HO^{-}_{(aq)}]$$

2

a – Le tableau d'avancement associée à cette réaction.

Équation		$2I^{-}_{(aq)}$	+	$S_2O_8^{2-}_{(aq)}$	\rightarrow	I_2	+	$2SO_4^{2-}_{(aq)}$
État	Avancement	Les quantités de matière en mole (mol)						
Initial	0	$4 \cdot 10^{-4}$		$1 \cdot 10^{-4}$		0		0
Intermédiaire	x	$4 \cdot 10^{-4} - 2x$		$1 \cdot 10^{-4} - x$		x		$2x$
Final	x_m	$4 \cdot 10^{-4} - x_m$		$1 \cdot 10^{-4} - x_m$		x_m		$2x_m$

Déterminons l'avancement maximal x_{max} de la réaction.

❖ Si $I^{-}_{(aq)}$ est le réactif limitant, alors: $4 \cdot 10^{-4} - 2x_{m1}$

Donc: $x_{m1} = 2 \times 10^{-4} \text{ mol}$

❖ Si $S_2O_8^{2-}_{(aq)}$ est le réactif limitant, alors $1 \times 10^{-4} - x_{m2}$

Donc: $x_{m2} = 1 \times 10^{-4} \text{ mol}$

❖ Puisque $x_{m2} < x_{m1}$ donc $x_m = x_{m2} = 1 \times 10^{-4} \text{ mol}$.

b – L'expression du quotient de réaction associé à la réaction étudiée:

$$Q_r = \frac{[I_2(aq)].[SO_4^{2-}_{(aq)}]^2}{[S_2O_8^{2-}_{(aq)}].[I^{-}_{(aq)}]^2}$$

c – Trouvons l'expression de Q_r en fonction de l'avancement x de la réaction.

$$\text{On a : } Q_r = \frac{[I_2(aq)].[SO_4^{2-}_{(aq)}]^2}{[S_2O_8^{2-}_{(aq)}].[I^{-}_{(aq)}]^2}$$

D'après le tableau d'avancement, on a : $[S_2O_8^{2-}_{(aq)}] = \frac{n(S_2O_8^{2-}_{(aq)})}{V} = \frac{1 \cdot 10^{-4} - x}{V}$ et

$$[I^{-}_{(aq)}] = \frac{n(I^{-}_{(aq)})}{V} = \frac{4 \cdot 10^{-4} - x}{V} \text{ et } [I_2(aq)] = \frac{n(I_2)}{V} = \frac{x}{V} \text{ et } [SO_4^{2-}_{(aq)}] = \frac{n(SO_4^{2-}_{(aq)})}{V} = \frac{2x}{V}.$$

$$\text{Donc : } Q_r = \frac{\frac{x}{V} \left(\frac{2x}{V}\right)^2}{\left(\frac{4 \cdot 10^{-4} - x}{V}\right) \left(\frac{4 \cdot 10^{-4} - x}{V}\right)^2} = \frac{4x^3}{(4 \cdot 10^{-4} - x)(1 \cdot 10^{-4} - x)^2}$$

d – Calculons les valeurs du quotient de réaction aux instants $t = 0$ et $t = t_{1/2}$

$$Q_{r0} = \frac{4 \times 0}{(4 \cdot 10^{-4} - 0)(1 \cdot 10^{-4} - 0)} \text{ et } Q_{rt_{1/2}} = \frac{4 \times x_m^3}{(4 \cdot 10^{-4} - \frac{x_m}{2})(1 \cdot 10^{-4} - \frac{x_m}{2})^2} = 4,57 \times 10^{-3}$$

② Quotient de réaction à l'état d'équilibre

On appelle quotient de réaction à l'équilibre $Q_{r,\text{éq}}$ la valeur que prend le quotient de réaction lorsque l'état d'équilibre du système est atteint.

On considère la réaction chimique suivante : $aA_{(aq)} + bB_{(aq)} \rightleftharpoons cC_{(aq)} + dD_{(aq)}$

Le quotient de réaction à l'équilibre associé à cette réaction est : $Q_{r,\text{éq}} = \frac{[C]^c_{\text{éq}} [D]^d_{\text{éq}}}{[A]^a_{\text{éq}} [B]^b_{\text{éq}}}$

$[A]_{\text{éq}}$, $[B]_{\text{éq}}$, $[C]_{\text{éq}}$ et $[D]_{\text{éq}}$ sont les concentrations molaires effectives à des espèces chimiques à l'état d'équilibre en mol.L^{-1}

③ La constante d'équilibre

❖ Activité

Mise en évidence de la constante d'équilibre

On prépare trois solutions aqueuses, d'acide éthanoïque CH_3COOH , de volume V et de différentes concentrations molaires.

On mesure les conductivités des solutions d'éthanoïque présentes à la température 25°C .

On note les résultats obtenus dans le tableau ci-contre.

Données :

Les conductivités molaires ioniques à 25°C :

$$\begin{aligned}\lambda(\text{CH}_3\text{COO}^-) &= \lambda_1 = 4,09 \times 10^{-3} \text{ S.m}^2.\text{mol}^{-1} \\ \lambda(\text{H}_3\text{O}^+) &= \lambda_2 = 35 \times 10^{-3} \text{ S.m}^2.\text{mol}^{-1}\end{aligned}$$

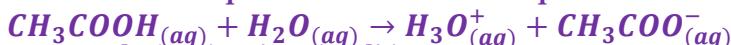
$C_i(\text{mmol.L}^{-1})$	1	5	50
$\sigma_{\text{éq}} (\text{mS.m}^{-1})$	4,9	11,4	37,2

- Écrire l'équation de la réaction acido-basique de l'acide éthanoïque avec l'eau.
- Construire le tableau d'avancement, en fonction de C , V , x et $x_{\text{éq}}$ (l'avancement à l'état d'équilibre).
- Exprimer le taux d'avancement final τ en fonction de $\sigma_{\text{éq}}$ et C et les conductivités molaires ioniques λ_1 et λ_2 .
- Montrer que le quotient de la réaction à l'équilibre s'écrit sous la forme suivante :

$$Q_{\text{éq}} = \frac{C\tau^2}{1-\tau}$$

- Calculer le quotient de réaction à l'équilibre pour chaque solution. Que peut-on déduire ?

- L'équation de réaction acidobasique de l'acide éthanoïque avec l'eau :



- Le tableau d'avancement de la réaction étudiée.

Équation		$\text{CH}_3\text{COOH}_{(aq)} + \text{H}_2\text{O}_{(aq)} \rightarrow \text{H}_3\text{O}_{(aq)}^+ + \text{CH}_3\text{COO}^-_{(aq)}$			
État	Avancement	Les quantités de matière en mole (mol)			
Initial	0	CV		0	0
Intermédiaire	x	$CV - x$		x	x
Final	$x_{\text{éq}}$	$CV - x_{\text{éq}}$		$x_{\text{éq}}$	$x_{\text{éq}}$

- La conductivité de la solution à l'état d'équilibre est : $\sigma_{\text{éq}} = \lambda_1[\text{CH}_3\text{COO}^-]_{\text{éq}} + \lambda_2[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}$

Et d'après le tableau d'avancement on a : $n_{\text{éq}}(\text{CH}_3\text{COO}^-) = n_{\text{éq}}(\text{CH}_3\text{COO}^-)$

Et puisque le volume de la solution est constant on aura : $[\text{CH}_3\text{COO}^-]_{\text{éq}} = [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}$

$$\text{D'où : } \sigma_{\text{éq}} = (\lambda_1 + \lambda_2)[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} \Leftrightarrow [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} = \frac{\sigma_{\text{éq}}}{(\lambda_1 + \lambda_2)}$$

Le taux d'avancement final associé à cette réaction est : $\tau = \frac{x_{\text{éq}}}{x_{\text{max}}}$

Si la réaction est totale , le réactif limitant est CH_3COHO (l'eau est en excès)

$$\text{Donc : } CV - x_{max} = 0 \Leftrightarrow x_{max} = C \cdot V$$

Et d'après le tableau d'avancement on a :

$$x_{éq} = n_{éq}(\text{H}_3\text{O}) = [\text{H}_3\text{O}]_{éq} \cdot V$$

$$\text{Donc : } \tau = \frac{[\text{H}_3\text{O}]_{éq} \cdot V}{CV} = \frac{[\text{H}_3\text{O}]_{éq}}{C}$$

$$\text{D'où : } \tau = \frac{\sigma_{éq}}{(\lambda_1 + \lambda_2)C}$$

④ L'expression du quotient de réaction à l'état

$$\text{d'équilibre : } Q_{éq} = \frac{[\text{H}_3\text{O}]_{éq} \cdot [\text{CH}_3\text{COO}^-]_{éq}}{[\text{CH}_3\text{COHO}]_{éq}}$$

$$\text{avec : } [\text{H}_3\text{O}]_{éq} = [\text{CH}_3\text{COO}^-]_{éq}$$

Et d'après le tableau d'avancement on a :

$$[\text{CH}_3\text{COHO}]_{éq} = \frac{CV - x_{éq}}{V} = \frac{CV - [\text{H}_3\text{O}]_{éq} \cdot V}{V}$$

$$[\text{CH}_3\text{COHO}]_{éq} = C - \frac{[\text{H}_3\text{O}]_{éq}}{V}$$

$$\text{Donc : } Q_{éq} = \frac{[\text{H}_3\text{O}]_{éq}}{C - \frac{[\text{H}_3\text{O}]_{éq}}{V}}$$

Et d'après la question précédente on a :

$$\tau = \frac{[\text{H}_3\text{O}]_{éq}}{C} \Leftrightarrow [\text{H}_3\text{O}]_{éq} = \tau \cdot C$$

$$\text{D'où : } Q_{éq} = \frac{(\tau \cdot C)^2}{C - \tau \cdot C} = \frac{\tau^2 C}{1 - \tau}$$

⑤ On calcule la valeur de

$Q_{éq}$ pour la solution (S_1)

$$\tau_1 = \frac{\sigma_{éq1}}{(\lambda_1 + \lambda_2)C_1}$$

$$\text{A.N: } \tau_1 = \frac{4,9 \times 10^{-3} \times 10^{-3}}{(35+4,09) \times 10^{-3} \times 1 \times 10^{-3}}$$

$$\text{On trouve: } \tau_1 = 12,53 \times 10^{-2} = 12,53\%$$

$$Q_{éq1} = \frac{\tau_1^2 C_1}{1 - \tau_1}$$

$$Q_{éq1} = \frac{(12,53 \times 10^{-2})^2 \cdot 1 \times 10^{-3}}{1 - 12,53 \times 10^{-2}}$$

$$Q_{éq1} = 1,8 \times 10^{-5}$$

On refait le même calcul pour les deux autres solutions et on obtient le tableau ci-après

$C_i(\text{mmol.L}^{-1})$	1	5	50
$Q_{éq}$	$1,8 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-5}$

→ On déduit que la valeur du quotient de réaction à l'état d'équilibre ne dépend pas des concentrations initiales des réactifs c'est pour cette raison qu'on l'appelle la constante d'équilibre

❖ Conclusion

Dans un état d'équilibre d'un système chimique , le quotient de réaction prend une valeur constante qui ne dépend que de la température et la nature des réactifs ; cette valeur est appelée la constante d'équilibre : $K = Q_{r,éq} = \frac{[C]^c_{éq} \cdot [D]^d_{éq}}{[A]^a_{éq} \cdot [B]^b_{éq}}$

❖ Remarques

- La relation entre les deux constantes d'équilibre K_1 et K_2 de deux réactions qui se produisent dans les deux sens est : $K_2 = \frac{1}{K_1}$.
- Si $K > 10^4$, la réaction est considérée totale .

II Facteurs influençant la valeur du taux d'avancement final

① Influence de l'état initial du système chimique

❖ Activité

Le tableau ci-contre représente les valeurs du taux d'avancement final τ des trois solutions d'acide éthanoïque étudiées précédemment .

$C_i(mmol.L^{-1})$	1	5	50
$\tau\%$	12,53	5,83	1,9

- ① En exploitant ce tableau déduire l'influence de l'état initial sur la valeur du taux d'avancement final .

La valeur du taux d'avancement final d'une transformation chimique dépend des concentrations initiales des réactifs . Plus les concentrations initiales sont élevées plus la valeur du taux d'avancement final de la réaction est petite .

❖ Conclusion

La valeur du taux d'avancement final d'une réaction dépend de l'état initial du système , plus les concentrations initiales des réactifs sont faibles plus la valeur du taux d'avancement final est élevée .

② Influence de la constante d'équilibre

❖ Activité

Le tableau ci-contre représente les valeurs du taux d'avancement final τ des trois solutions d'acides différentes mais elles ont la même concentration $C = 0,05mol.L^{-1}$

solutions de concentrartion $C = 0,05mol.L^{-1}$	acide méthanoïque	acide benzoïque	acide Éthanoïque
<u>La constante d'équilibre K à 25°C</u>	$1,8 \times 10^{-4}$	$6,4 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-5}$
<u>Le taux d'avancement finl $\tau\%$</u>	6%	3%	2%

- ① En exploitant ce tableau déduire l'influence de la constante d'équilibre K sur la valeur du taux d'avancement final .

① La valeur du taux d'avancement final d'une réaction chimique dépend de la constante d'équilibre du système, plus la constante d'équilibre est élevée , plus la valeur du taux d'avancement final est élevée .

❖ Conclusion

La valeur du taux d'avancement final d'une réaction chimique dépend de la constante d'équilibre du système , plus la constante d'équilibre est élevée , plus la valeur du taux d'avancement final est élevée .

Exercice 1

Pour préparer une solution d'acide propénoïque de volume $V = 200\text{mL}$. On fait dissoudre une masse $m = 1,48\text{g}$ d'acide propanoïque $\text{C}_2\text{H}_5\text{COOH}$ dans l'eau distillée , puis on immerge l'électrode de pH-mètre dans cette solution, et on trouve que : $\text{pH} = 3,09$.

- ① Calculer de C , la concentration initiale d'acide propanoïque .
- ② Ecrire l'équation de la réaction acido-basique de l'acide propanoïque avec d'eau.
- ③ Construire le tableau d'avancement, en fonction de C , V , x et $x_{\text{éq}}$.
- ④ Exprimer le taux d'avancement final τ en fonction de pH et C .
- ⑤ Calculer la valeur de τ . La transformation est-elle totale où limitée ?
- ⑥ Montre que l'expression du quotient de réaction à l'équilibre associé à cette réaction s'écrit sous la forme suivante : $Q_{\text{éq}} = \frac{C \cdot \tau^2}{1 - \tau}$, et calculer sa valeur .

Données : La masse molaire de l'acide propanoïque : $M(\text{C}_2\text{H}_5\text{COOH}) = 74\text{g.mol}^{-1}$

Exercice 2

L'acide formique (ou acide méthanoïque) soluble dans l'eau a pour formule semi-développée HCOOH . On fait dissoudre une masse m d'acide formique HCOOH dans un volume $V = 100\text{mL}$ de l'eau distillée , et on obtient une solution aqueuse de l'acide formique de concentration $C = 10^{-2}\text{mol.L}^{-1}$

La masse molaire de l'acide ascorbique : $M(\text{HCOOH}) = 46\text{g.mol}^{-1}$

Données : Les conductivités molaires ioniques à 25°C : $\lambda_{\text{H}_3\text{O}^+} = 34,9 \times 10^{-3} \text{S.m}^2.\text{mol}^{-1}$
 $\lambda_{\text{HCOO}^-} = 5,46 \times 10^{-3} \text{S.m}^2.\text{mol}^{-1}$

- ① Calculer la mase m .
- ② Écrire l'équation de la réaction associée à la transformation de l'acide formique avec l'eau .
- ③ Dresser le tableau d'avancement associé à cette réaction en fonction de C , V , x et $x_{\text{éq}}$.
- ④ Exprimer le taux d'avancement final τ de cette réaction en fonction de C et $[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}$.
- ⑤ Trouver l'expression du quotient de réaction à l'équilibre $Q_{\text{éq}}$ en fonction de $[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}$ et C
- ⑥ Exprimer la conductivité σ de la solution de l'acide formique à l'état d'équilibre en fonction des conductivités molaires ioniques $\lambda_{\text{H}_3\text{O}^+}$ et λ_{HCOO^-} en oxonium à l'équilibre $[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}$.
- ⑦ La mesure de la conductivité de la solution (S) donne : $\sigma = 50\text{mS.m}^{-1}$. En utilisant les relations obtenues précédemment , calculer la valeur de $Q_{\text{éq}}$ et celle de du taux d'avancement final τ et déduire la nature de cette réaction .
- ⑧ On réalise la même étude , en utilisant une solution (S') de l'acide formique de concentration C' . Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau ci-dessous .

$C'(\text{mol.L}^{-1})$	$\sigma'(\text{mS.m}^{-1})$	$\tau(\%)$	$Q'_{\text{éq}}$
0,1	170	?	?

a – Calculer le taux d'avancement τ' de la solution (S') .

b – Quelle est l'influence de la concentration initiale de la réaction sur la valeur du taux d'avancement final



Situation-problème

Pour qu'un lait soit frais , il faut que son degré d'acidité ne doive pas dépasser une valeur spécifique .

- ☞ Comment déterminer par titrage acidobasique , l'acidité d'un lait ?
- ☞ Comment distingue-on les acides forts et les bases fortes ?

Objectifs

- ☞ Connaître la réaction d'autoprotolyse de l'eau et savoir déterminer sa constante d'équilibre.
- ☞ Savoir exploiter l'échelle de pH pour classer les solutions acides , basiques et neutres .
- ☞ Connaître la constante d'acidité un couple acide/base .
- ☞ Savoir déterminer la constante d'équilibre d' une réaction acidobasique en fonctions des constantes d'acidité des couples acide/base
- ☞ Connaître et exploiter la relation $pH = pK_A + \log\left(\frac{[A^-]}{[HA]}\right)$
- ☞ Réaliser une titrage pH-métrique d'un acide ou d'une base .
- ☞ Exploiter la courbe de pH pour déterminer les coordonnées du point d'équivalence
- ☞ Choisir un indicateur coloré .

I

Le produit ionique de l'eau

① l'autoprotolyse de l'eau

❖ Activité

Des mesures montrent que le **pH** de l'eau pure est : **pH = 7 à 25°C**. C'est cette valeur qui a été prise comme référence d'un milieu acide.

■ Exploitation

- ① Calculer la concentration $[H_3O^+]$ des ions oxonium présentes dans l'eau pure à **25°C**.
- ② D'où proviennent les ions oxonium présents en très faible quantité dans l'eau pure puis écrire l'équation de cette réaction en précisant les couples mise en jeu.
- ③ Dresser le tableau d'avancement associé à cette réaction.
- ④ Il s'agit d'un transfert de proton entre deux molécules d'eau. Cette réaction acidobasique est appelée l'autoprotolyse de l'eau.
 - a** – Déterminer à **25°C**, pour un litre de l'eau pure x_{max} et $x_{éq}$.
 - b** – Calculer la valeur du taux d'avancement final associé à la réaction d'autoprotolyse de l'eau et conclure. Calculer sa valeur à **25°C**.
 - c** – La constante d'équilibre associée à la réaction d'autoprotolyse de l'eau est appelée le produit ionique de l'eau.

Données : $\rho(H_2O) = 1g.mL^{-1}$; $M(H_2O) = 18g.mol^{-1}$

- ① On calcule la concentration des ions H_3O^+ dans l'eau pur à **25°C**

On a : $[H_3O^+]_{éq} = 10^{-pH} = 10^{-7} mol.L^{-1}$

- ② La présence des ions H_3O^+ dans l'eau pur est due à la réaction entre les molécules d'eau. Cette réaction est appelée l'autoprotolyse de l'eau.

les couple mises en jeu dans cette réaction sont : $H_3O_{(aq)}^+/H_2O_{(l)}$ et $H_2O_{(l)}/HO_{(aq)}^-$

L'équation de cette réaction est : $2H_2O_{(l)} \rightleftharpoons H_3O_{(aq)}^+ + HO_{(aq)}^-$

- ③ Le tableau d'avancement associé à cette réaction .

Équation		$2H_2O_{(aq)}$	→	$H_3O_{(aq)}^+$	+	$HO_{(aq)}^-$
État	Avancement	Les quantités de matière en mole (mol)				
Initial	0	$n_0(H_2O)$		0	0	
Intermédiaire	x	$n_0(H_2O) - 2x$		x	x	
Final	$x_{éq}$	$n_0(H_2O) - 2x_{éq}$		$x_{éq}$	$x_{éq}$	

- ④ **a** – Déterminons à **25°C**, pour un litre de l'eau pure x_{max} et $x_{éq}$.

Si la réaction est complète on aura : $n_0(H_2O) - 2x_{max} = 0$

$$\text{Donc : } x_{max} = \frac{n_0(H_2O)}{2} = \frac{\rho(H_2O)V}{2M(H_2O)} = \frac{1 \times 10^3 \times 1}{2 \times 18} = 2,78 \times 10^1 \text{ mol}$$

D'après le tableau d'avancement on a : $x_{éq} = n_{éq}(H_3O^+) = [H_3O^+]_{éq}V = 10^{-7} mol$

- b** – Calculons la valeur du taux d'avancement final associé à cette réaction :

$$\text{on a : } \tau = \frac{x_{éq}}{x_{max}} = \frac{10^{-7}}{2,78 \times 10^1} = 3,6 \times 10^{-10}. \text{ Cette réaction est très limitée car } \tau \ll 1$$

- c** – La constante d'équilibre associée à cette réaction : $K_e = [H_3O^+]_{éq} \times [HO^-]_{éq}$
donc $K_e = 10^{-7} \times 10^{-7} = 10^{-14}$

❖ Conclusion

L'eau pure « eau distillée » possède un $pH = 7$ à 25°C , donc elle contient des ions oxonium à la concentration $[H_3O^+] = 10^{-7}\text{ mol.L}^{-1}$ (une mesure de la conductivité σ confirme la présence des ions car celle-ci n'est pas nulle : $\sigma = 5,5\mu\text{S.m}^{-1}$ à 25°C). Une solution étant électriquement neutre, l'eau distillée contient également des anions. La présence d'ions résulte d'une réaction acidobasique entre deux molécules d'eau selon l'équation suivante : $2H_2O_{(l)} \rightleftharpoons H_3O^+_{(aq)} + HO^-_{(aq)}$.

Cette réaction est appelée réaction d'autoprotolyse de l'eau

② Le produit ionique de l'eau

La constante d'équilibre associée à la réaction d'autoprotolyse de l'eau est appelée le produit ionique de l'eau. Elle est notée K_e et son expression est : $K_e = [H_3O^+]_{eq} \cdot [HO^-]_{eq}$ et on utilise aussi le $pK_e = -\log K_e$. À 25°C : $K_e = 10^{-14}$ et $pK_e = 14$

③ Solutions acide, basique et neutre

On définit le caractère acide, basique ou neutre de la solution en comparant le pH de cette solution au pH de l'eau pure à la même température.

❖ La solution est neutre si : $[H_3O^+] = [HO^-]$

$$\text{Donc : } [H_3O^+]^2 = [H_3O^+][HO^-]$$

$$\Leftrightarrow -\log([H_3O^+]^2) = -\log([H_3O^+][HO^-])$$

$$\Leftrightarrow -2\log([H_3O^+]) = -\log(K_e)$$

$$\Leftrightarrow 2pH = pK_e$$

$$\Leftrightarrow pH = \frac{pK_e}{2}$$

$$\text{À } 25^\circ \text{ on a : } pK_e = 14$$

$$\text{Donc : } pH = \frac{14}{2} = 7$$

❖ La solution est acide si : $[H_3O^+] > [HO^-]$

$$\text{Donc : } [H_3O^+]^2 > [H_3O^+][HO^-]$$

$$\Leftrightarrow -\log([H_3O^+]^2) < -\log([H_3O^+][HO^-])$$

$$\Leftrightarrow -2\log([H_3O^+]) < -\log(K_e)$$

$$\Leftrightarrow 2pH < pK_e$$

$$\Leftrightarrow pH < \frac{pK_e}{2}$$

$$\text{À } 25^\circ \text{ on a : } pK_e = 14$$

$$\text{Donc : } pH < 7$$

❖ La solution est basique si : $[H_3O^+] < [HO^-]$

$$\text{Donc : } [H_3O^+]^2 < [H_3O^+][HO^-]$$

$$\Leftrightarrow -\log([H_3O^+]^2) > -\log([H_3O^+][HO^-])$$

$$\Leftrightarrow -2\log([H_3O^+]) > -\log(K_e)$$

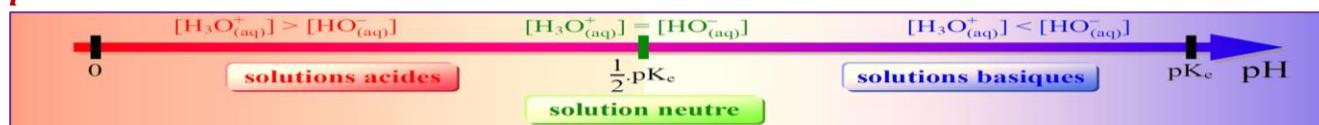
$$\Leftrightarrow 2pH > pK_e$$

$$\Leftrightarrow pH > \frac{pK_e}{2}$$

$$\text{À } 25^\circ \text{ on a : } pK_e = 14$$

$$\text{Donc : } pH > 7$$

Ainsi à **25°C** une solution est dite acide si son **pH < 7**, neutre si son **pH = 7** et basique si **pH > 7**



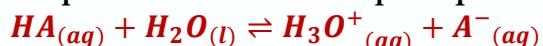
❖ Remarque

À **0°C**, $\text{pK}_e = 15$ alors la solution est une solution si son **pH < 7,5**, neutre si son **pH = 7,5** et basique si **pH > 7,5**

II La constante d'acidité du couple acide/base

① Définition

L'équation de la réaction qui se produit lors de la dissolution d'un acide **HA** dans l'eau est :



La constante d'équilibre associée à cette réaction est appelée la constante d'acidité :

$$K_A = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} \cdot [\text{A}^-]_{\text{éq}}}{[\text{HA}]_{\text{éq}}} . \text{ On définit aussi } \text{pK}_A = -\log K_A \text{ et } K_A = 10^{-\text{pK}_A}$$

La constante d'acidité d'un couple $\text{HA}_{(\text{aq})}/\text{A}^-_{(\text{aq})}$

② La relation entre la constante d'acidité et le **pH**

$$\text{On a : } K_A = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} \cdot [\text{A}^-]_{\text{éq}}}{[\text{HA}]_{\text{éq}}}$$

$$\Leftrightarrow -\log(K_A) = -\log\left(\frac{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} \cdot [\text{A}^-]_{\text{éq}}}{[\text{HA}]_{\text{éq}}}\right)$$

$$\Leftrightarrow -\log(K_A) = -\log([\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}) - \log\left(\frac{[\text{A}^-]_{\text{éq}}}{[\text{HA}]_{\text{éq}}}\right)$$

$$\Leftrightarrow \text{pK}_A = \text{pH} - \log\left(\frac{[\text{A}^-]_{\text{éq}}}{[\text{HA}]_{\text{éq}}}\right)$$

$$\Leftrightarrow \text{pH} = \text{pK}_A + \log\left(\frac{[\text{A}^-]_{\text{éq}}}{[\text{HA}]_{\text{éq}}}\right)$$

③ La constante d'équilibre associée à une réaction acidobasique

On considère la réaction acidobasique entre l'acide HA_1 du couple HA_1/A^-_1 et la base A^-_2 du couple HA_2/A^-_2 selon l'équation : $HA_{1(aq)} + A^-_{2(aq)} \rightleftharpoons A^-_{1(aq)} + HA_{2(aq)}$

La constante d'équilibre associée à cette réaction est :

La constante d'équilibre associée à cette

$$\text{réaction : } K = \frac{[A^-_1]_{\text{éq}} \cdot [HA_2]_{\text{éq}}}{[HA_1]_{\text{éq}} [A^-_1]_{\text{éq}}}$$

$$\text{Donc : } K = \frac{[A^-_1]_{\text{éq}}}{[HA_1]_{\text{éq}}} \times \frac{[HA_2]_{\text{éq}}}{[A^-_1]_{\text{éq}}}$$

$$\Leftrightarrow K = \frac{[A^-_1]_{\text{éq}}}{[HA_1]_{\text{éq}}} \times \frac{[HA_2]_{\text{éq}}}{[A^-_1]_{\text{éq}}}$$

$$\Leftrightarrow K = \frac{[A^-_1]_{\text{éq}} [H_3O^+]_{\text{éq}}}{[HA_1]_{\text{éq}}} \times \frac{[HA_2]_{\text{éq}}}{[A^-_1]_{\text{éq}} [H_3O^+]_{\text{éq}}}$$

$$\Leftrightarrow K = K_{A1} \times \frac{1}{K_{A2}}$$

$$\Leftrightarrow K = \frac{K_{A1}}{K_{A2}}$$

$$\Leftrightarrow K = \frac{10^{-pK_{A1}}}{10^{-pK_{A2}}} = 10^{pK_{A2} - pK_{A1}}$$

❖ Application

Calculer la valeur de la constante d'équilibre associée à la réaction entre l'acide méthanoïque $HCOOH$ et l'ammoniac NH_3 .

On donne $pK_A(HCOOH/HCOO^-) = 3,8$; $pK_A(NH_4^+/NH_3) = 9,21$

L'équation de la réaction entre l'acide méthanoïque $HCOOH$ et l'ammoniac NH_3 est :



La constante d'équilibre associée à cette réaction

est : $K = 10^{pK_A(NH_4^+/NH_3) - pK_A(HCOOH/HCOO^-)}$

A.N : $K = 10^{9,21 - 3,8}$

On trouve : $K = 2,57 \times 10^5$

III Force d'un acide et force d'une base

① Comparaison du comportement des acides dans une solution aqueuse

❖ Activité

On considère deux solutions acides S_1 et S_2 de même concentration $C = 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$

S_1 solution d'acide méthanoïque	$K_A = 1,8 \times 10^{-4}$	$\text{pH} = 2,9$	$\tau_1 =$	$pK_{A1} =$
S_2 solution d'acide éthanoïque	$K_A = 1,8 \times 10^{-5}$	$\text{pH} = 3,4$	$\tau_1 =$	$pK_{A2} =$

- 1 Dresser le tableau d'avancement associé à la réaction d'un acide HA et l'eau .
- 2 Exprimer le taux d'avancement final de cette réaction en fonction de pH et C .
- 3 Compléter le tableau ci-dessus .
- 4 Comment varier le taux d'avancements τ en fonction pH des solution de même concentration .
- 5 Quelle l'influence de la constante d'acidité pK_A sur la valeur du τ .

- ① Le tableau d'avancement associé à la réaction d'un acide HA et l'eau .

Équation		$HA_{(aq)} + H_2O_{(aq)} \rightarrow H_3O^+_{(aq)} + A^-_{(aq)}$			
État	Avancement	Les quantités de matière en mole (mol)			
Initial	0	CV	En excès	0	0
Intermédiaire	x	$CV - x$		x	x
Final	x_{eq}	$CV - x_{eq}$		x_{eq}	x_{eq}

② Le taux d'avancement final associé à cette réaction : $\tau = \frac{x_{eq}}{x_{max}} = \frac{[H_3O]_{eq} \cdot V}{CV} = \frac{[H_3O]_{eq}}{C} = \frac{10^{-pH}}{C}$

- ③ le tableau ci-dessus .

S_1 solution d'acide méthanoïque	$K_A = 1,8 \times 10^{-4}$	pH = 2,9	$\tau_1 = 1,26 \times 10^{-1}$	$pK_{A1} = 3,74$
S_2 solution d'acide éthanoïque	$K_A = 1,8 \times 10^{-5}$	pH = 3,4	$\tau_2 = 3,98 \times 10^{-2}$	$pK_{A2} = 4,74$

- ④ Pour des solutions de même concentration , on constate que plus pH de la solution est faible , plus le taux d'avancements final de la réaction est élevé .
 ⑤ Pour des solutions de même concentration , on constate que plus la constante d'acidité pK_A est petite , plus le taux d'avancements final de la réaction est élevé .

❖ Conclusion

Pour des solutions queuses acides de même concentration , l'acide le plus fort (qui dissocie fortement dans l'eau) est celui dont le taux d'avancement final le plus grand , donc c'est celui pour lequel le pH est le plus faible ou celui de pK_A la plus petite (c-à-d K_A la plus grande)

① Comparaison du comportement des acides dans une solution aqueuse

❖ Activité

On considère deux solutions basique S_1 et S_2 de même concentration $C = 10^{-2} mol \cdot L^{-1}$

S_1 solution da la méthylamine	$K_A = 2 \times 10^{-11}$	pH = 11,4	$\tau_1 =$	$pK_{A1} =$
S_2 solution d'ammoniac	$K_A = 6,3 \times 10^{-10}$	pH = 10,6	$\tau_1 =$	$pK_{A2} =$

- Dresser le tableau d'avancement associé à la réaction d'un acide B et l'eau .
- Exprimer le taux d'avancement final de cette réaction en fonction de pH , pK_e et C .
- Compléter le tableau ci-dessus . On donne $pK_e = 14$
- Comment varier le taux d'avancements τ en fonction pH des solution de même concentration .
- Quelle l'influence de la constante d'acidité pK_A sur la valeur du τ .

① Le tableau d'avancement associé à la réaction d'une base A^- et l'eau .

Équation		$A^-_{(aq)} + H_2O_{(aq)} \rightarrow HO^-_{(aq)} + HA_{(aq)}$			
État	Avancement	Les quantités de matière en mole (mol)			
Initial	0	CV		0	0
Intermédiaire	x	$CV - x$	En excès	x	x
Final	$x_{éq}$	$CV - x_{éq}$		$x_{éq}$	$x_{éq}$

② Le taux d'avancement final associé à cette réaction : $\tau = \frac{x_{éq}}{x_{max}} = \frac{[HO^-]_{éq} \cdot V}{CV} = \frac{[HO^-]_{éq}}{C}$

On sait que : $K_e = [HO^-]_{éq} [H_3O^+]_{éq} \Leftrightarrow [HO^-]_{éq} = \frac{K_e}{[H_3O^+]_{éq}} = \frac{10^{-pK_e}}{10^{-pH}} = 10^{pH - pK_e}$

Donc : $\tau = \frac{10^{pH - pK_e}}{C}$

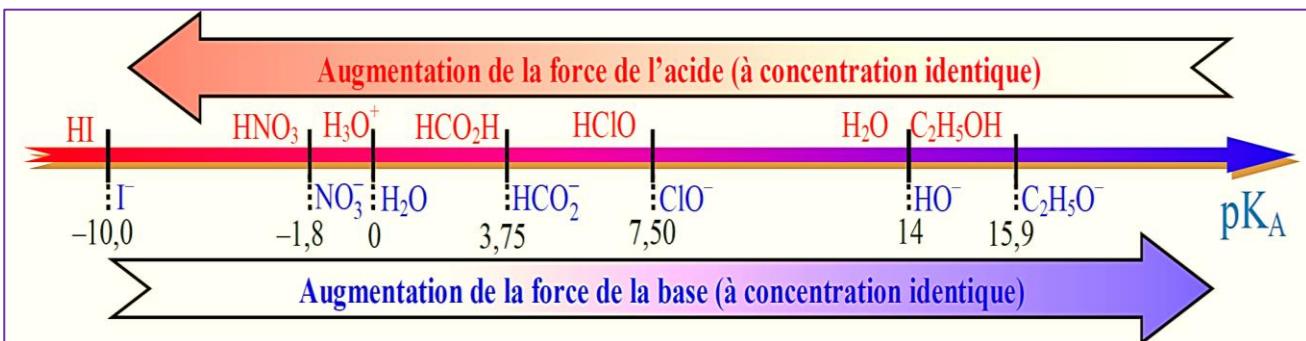
③ le tableau ci-dessus .

S_1 solution de la méthylamine	$K_A = 2 \times 10^{-11}$	$pH = 11,4$	$\tau_1 = 1,26 \times 10^{-1}$	$pK_{A1} = 10,7$
S_2 solution d'ammoniac	$K_A = 6,3 \times 10^{-10}$	$pH = 10,6$	$\tau_2 = 1,99 \times 10^{-2}$	$pK_{A2} = 9,20$

- ④ Pour des solutions de même concentration , on constate que plus pH de la solution est grand , plus le taux d'avancements final de la réaction est élevé .
- ⑤ Pour des solutions de même concentration , on constate que plus la constante d'acidité pK_A est grande , plus le taux d'avancements final de la réaction est élevé .

❖ Conclusion

Pour des solutions queuses basiques de même concentration , la base la plus forte (qui dissocie fortement dans l'eau) est celle dont le taux d'avancement final le plus grand , donc c'est celle pour lequel le pH est le plus grand ou celle de pK_A la plus grande (c-à-d K_A la plus petite)



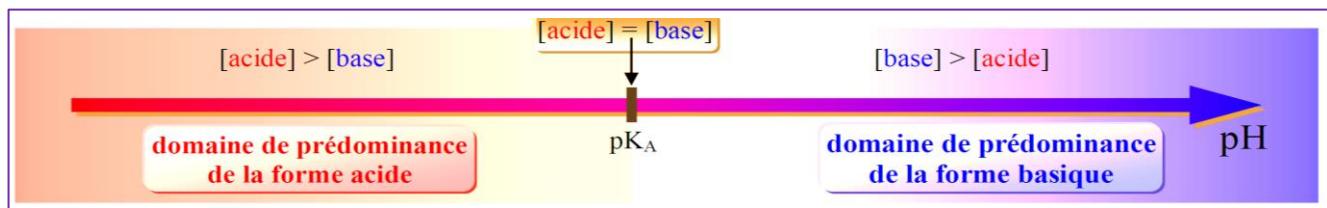
IV Domaines de prédominance et diagrammes de distribution

① Domaines de prédominance

Étudions pour un couple $HA_{(aq)}/A^-_{(aq)}$ donné l'évolution de la concentration de l'acide et celle de la base en fonction du **pH** de la solution aqueuse .

On sait que $pH = pK_A + \log \frac{[A^-]}{[HA]}$ donc : $\log \frac{[A^-]}{[HA]} = pH - pK_A$ et par suite : $\frac{[A^-]}{[HA]} = 10^{pH-pK_A}$

- Si $pH > pK_A$ donc $\frac{[A^-]}{[HA]} > 1$: dans ce cas la base A^- est prédominante dans la solution .
- Si $pH < pK_A$ donc $\frac{[A^-]}{[HA]} < 1$: dans ce cas l'acide HA est prédominant dans la solution .
- Si $pH = pK_A$ donc $\frac{[A^-]}{[HA]} = 1$: dans ce cas la concentration de la base A^- est identique à celle de l'acide HA .

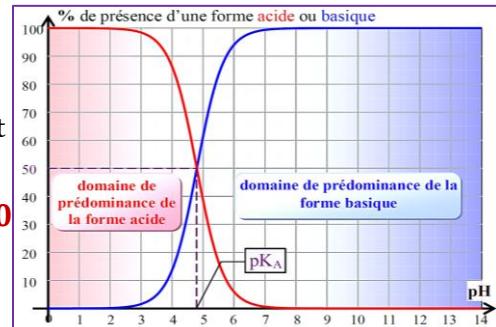


② Domaines de prédominance

Un diagramme de distribution est un diagramme qui représente l'évolution du pourcentage de l'acide $\alpha(HA)$ et celle de la base $\alpha(A^-)$ en fonction du **pH** de la solution .

Avec : $\alpha(HA) = \frac{[HA]}{[HA]+[A^-]} \times 100$ et $\alpha(A^-) = \frac{[A^-]}{[HA]+[A^-]} \times 100$

Le diagramme ci-contre représente le diagramme de distribution du couple CH_3OOH/CH_3OO^-



❖ Application

On dispose une solution aqueuse de l'acide propanoïque C_2H_5COOH de concentration $C = 10^{-2} mol \cdot L^{-1}$. La mesure de **pH** de cette solution donne la valeur $pH = 3,09$.

- ① Dresser le tableau d'avancement associé à cette réaction en fonction de C , V , x et $x_{éq}$.
- ② Calculer le pourcentage des ions propanoate $C_2H_5COO^-$ dans la solution .
- ③ Déduire le pourcentage de l'acide propanoïque C_2H_5COOH dans la solution .

- ④ Le tableau d'avancement associé à cette réaction est :

Équation		$C_2H_5COOH_{(aq)} + H_2O_{(aq)} \rightarrow C_2H_5COO^-_{(aq)} + H_3O^+_{(aq)}$			
État	Avancement	Les quantités de matière en mole (mol)			
Initial	0	CV		0	0
Intermédiaire	x			x	x
Final	$x_{éq}$	$CV - x_{éq}$		$x_{éq}$	$x_{éq}$

- ⑤ Calculons le pourcentage des ions propanoate $C_2H_5COO^-$ dans la solution.

$$\text{On a : } \alpha(C_2H_5COO^-) = \frac{[C_2H_5COO^-]}{[C_2H_5COH] + [C_2H_5COO^-]} \quad (a)$$

$$\text{D'après le tableau d'avancement, on : } [C_2H_5COO^-] = [H_3O^+] \quad (b)$$

Et $[C_2H_5COH] = \frac{CV - x_{éq}}{V}$ avec $x_{éq} = [H_3O^+].V$

Donc : $[C_2H_5COH] = C - [H_3O^+]$

On remplace (b) et (c) dans (a), on trouve :

$$\alpha(C_2H_5COO^-) = \frac{[H_3O^+]}{C} = \frac{10^{-pH}}{C}$$

$$A.N : \alpha(C_2H_5COO^-) = \frac{10^{-3,09}}{10^{-2}}$$

On trouve : $\alpha(C_2H_5COO^-) = 8,13 \times 10^{-2}$
Ou bien : $\alpha(C_2H_5COO^-) = 8,13\%$

③ Déduisons le pourcentage de l'acide propanoïque C_2H_5COOH dans la solution .

On sait que :

$$\alpha(C_2H_5COOH) + \alpha(C_2H_5COO^-) = 100\%$$

$$\text{Donc: } \alpha(C_2H_5COOH) = 100 - 8,13$$

$$\text{Alors : } \alpha(C_2H_5COOH) = 97,87\%$$

③ Cas des indicateurs colorés

Un indicateur coloré est un couple acide/base, dont la forme acide $HInd$ n'a pas la même teinte que de la forme basique Ind^- .

- Cas de $[HInd] > 10.[Ind^-]$, la solution possède la teinte de l'acide $HInd$.

$$\Leftrightarrow \frac{[HInd]}{[Ind^-]} > 10$$

$$\Leftrightarrow \frac{[Ind^-]}{[HInd]} < \frac{1}{10}$$

$$\Leftrightarrow pK_A + \log\left(\frac{[Ind^-]}{[HInd]}\right) < pK_A - \log(10)$$

$$\Leftrightarrow pH < pK_A - 1$$

→ Dans ce cas, la solution possède la teinte de l'acide $HInd$.

- Cas de $[Ind^-] > 10.[HInd]$, la solution possède la teinte de la base Ind^- .

$$\Leftrightarrow \frac{1}{10} > \frac{[HInd]}{[Ind^-]}$$

$$\Leftrightarrow 10 < \frac{[Ind^-]}{[HInd]}$$

$$\Leftrightarrow \log(10) < \log\left(\frac{[Ind^-]}{[HInd]}\right)$$

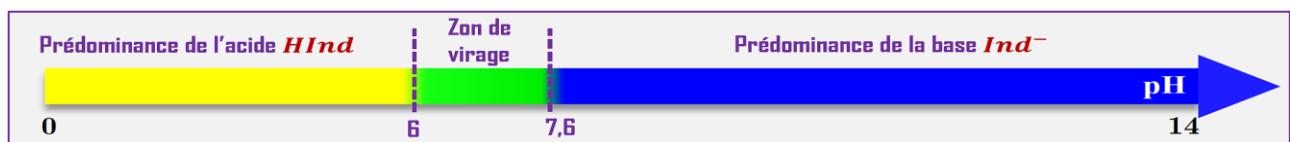
$$\Leftrightarrow pK_A + \log(10) < pK_A + \log\left(\frac{[Ind^-]}{[HInd]}\right)$$

$$\Leftrightarrow pK_A + 1 < pH$$

→ Dans ce cas, la solution possède la teinte de la base Ind^- .

- Cas $pK_A - 1 < pH < pK_A + 1$: la solution prend la teinte sensible cette zone est appelée la zone de virage de l'indicateur

Exemple : Diagramme de prédominance de bleu de bromothymol



V

Titrage acidobasique

① Définition

Le titrage d'une solution acide (ou basique) est la détermination de la concentration de l'acide utilisé (ou de la base utilisée) dans cette solution, en effectuant une réaction totale avec titrant de concentration connue.

② Caractéristique de la réaction du dosage

La réaction du titrage doit être :

- **Totale** : le réactif limitant se consomme totalement.
- **Rapide** : la disparition du réactif titrant instantanément.
- **Sélective** : le réactif titrant choisi réagit uniquement avec le réactif titré

Méthode de titrage	Variable observée
Colorimétrique	La couleur de la solution
Conductimétrique	La conductivité de la solution
pH-métrique	Le pH de la solution

③ La relation d'équivalence

Lors du titrage acidobasique, l'équivalence est atteinte lorsque les réactifs (titrant et titré) disparaissent selon les coefficients stœchiométriques correspondant l'équation de la réaction du titrage.

- On considère l'équation modélisant la réaction du dosage du titré (**A**) par un titrant (**B**) :



- Le tableau d'avancement associé à cette réaction à l'état d'équivalence est:

Équation		aA	$+ bB$	\rightarrow	cC	$+ dD$
État	Avancement	Les quantités de matière en mole (mol)				
Initial	0	$C_A \cdot V_A$	$C_B \cdot V_B$		0	0
Intermédiaire	x	$C_A \cdot V_A - ax$	$C_B \cdot V_B - bx$		cx	dx
Équivalence	x_E	$C_A \cdot V_A - ax_E$	$C_B \cdot V_B - bx_E$		cx_E	dx_E

❖ La relation d'équivalence

- À l'équivalence les réactifs titré et titrant sont totalement consommés, donc on aura :

$$\begin{cases} C_A \cdot V_A - ax_E = 0 \\ C_B \cdot V_B - bx_E = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x_E = \frac{C_A \cdot V_A}{a} & ① \\ x_E = \frac{C_B \cdot V_B}{b} & ② \end{cases}$$

- D'après les deux équations ① et ② on trouve : $\frac{C_A \cdot V_A}{a} = \frac{C_B \cdot V_B}{b}$ cette relation est appelée la relation d'équivalence

❖ Repérage du point d'équivalence

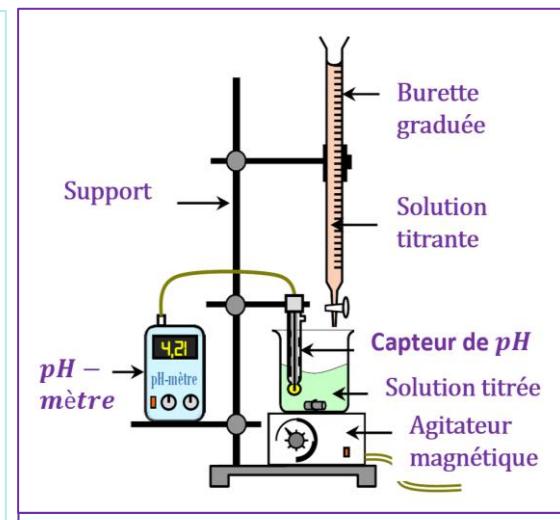
On repère l'équivalence par le changement brusque de la grandeur physique observée ou mesurée lors du titrage (la couleur de la solution, le pH, ou la conductivité de la solution)

④ Titrage acidobasique

❖ Principe de titrage

Pour titrer une espèce chimique, dans une solution aqueuse, on prélève par pro-pipete un échantillon de cette solution et on l'introduit dans un bécher; puis on effectuer une réaction totale de cette espèce avec un réactif titrant choisi de concentration connue que l'on introduit dans une burette graduée.

On étalonne le pH-mètre et on plonge sa sonde dans la solution titrée après avoir fait fonctionner l'agitateur magnétique, on ajoute progressivement des volumes de la solution titrante et on mesure à chaque fois le pH de la solution à l'état final. Les mesures effectuées ont permis de tracer la courbe $pH = f(V)$.

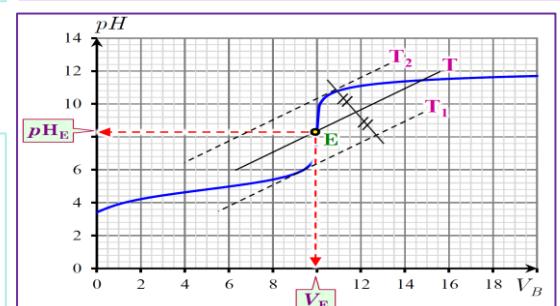


Montage du dosage pH-métrique

❖ Détermination du point d'équivalence

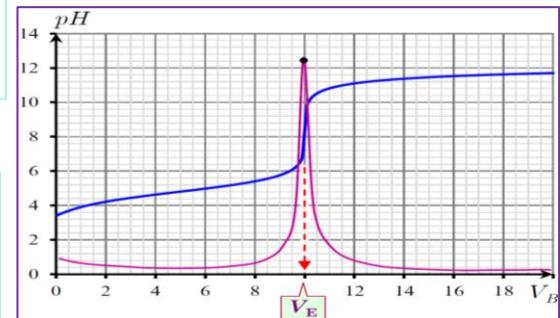
▪ Méthode des tangentes

On trace deux tangentes (T_1) et (T_2) à la courbe $pH = f(V)$ parallèles entre elles et situées de part et d'autre du point d'équivalence E , ensuite on trace la droite (T) parallèle à ces deux tangentes et équidistante de celles-ci. La droite (T) coupe la courbe de titrage $pH = f(V)$ au point d'équivalence E .



▪ Méthode de la courbe dérivée

Au point d'abscisse V_E la valeur de la fonction dérivée $\frac{dpH}{dV}$ soit extrémum (valeur maximale ou minimale)



VI Titrage acidobasique

① Principe

Pour suivre le titrage acidobasique en utilisant un indicateur coloré, on ajoute quelques gouttes d'indicateur coloré à la solution titrée, puis on introduit progressivement la solution titrante en agitant le mélange. Lorsque le mélange change de teinte, on arrête immédiatement l'ajout de la solution titrante. Ce changement de teinte montre qu'on est à l'équivalence, et on lit sur la burette la valeur du volume ajouté à l'équivalence.

② Choix de l'indicateur coloré

En général, l'indicateur coloré convient au titrage acidobasique si sa zone de virage contient la valeur de pH_E (pH du point d'équivalence)

VII

Le taux d'avancement associé à la réaction du dosage

Le taux d'avancement final associé à la réaction du titrage acidobasique est presque égal à 1 après chaque ajout de volume V de la solution titrante : $\tau = \frac{x_f}{x_{max}} \approx 1$.

La transformation liée à la réaction du titrage acidobasique est totale.

Exercice 1

Le vinaigre est une solution d'acide éthanoïque dans l'eau. Il est caractérisé par son degré d'acidité (X°) qui représente le pourcentage massique de l'acide éthanoïque contenu dans la solution . Cet exercice vise à étudier la réaction de l'acide éthanoïque avec l'eau ainsi qu'avec l'hydroxyde de sodium .

I-Étude de la réaction de l'acide éthanoïque avec l'eau .

On prépare une solution aqueuse (S) de l'acide éthanoïque de concentration $C = 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$ et de volume V . La mesure de pH de cette solution à 25°C donne la valeur : $\text{pH} = 3,4$

- ① Écrire l'équation de la réaction de l'acide éthanoïque avec l'eau .
- ② Dresser le tableau d'avancement associé à cette réaction en fonction de C , V , x , et $x_{\text{éq}}$.
- ③ Calculer le taux d'avancement final de cette réaction , et déduire .
- ④ Calculer la valeur du quotient de réaction à l'équilibre associé à cette réaction
- ⑤ Déduire la valeur de la constante d'acidité pK_A du couple $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{CH}_3\text{COO}^-$.
- ⑥ Déterminer l'espèce chimique prédominante dans la solution .

II-Dosage d'un vinaigre commercial

On lit sur l'étiquette du vinaigre commercial (S_0) « vinaigre de vin 7° ». On veut vérifier cette indication , en réalisant une dosage pH-métrique .

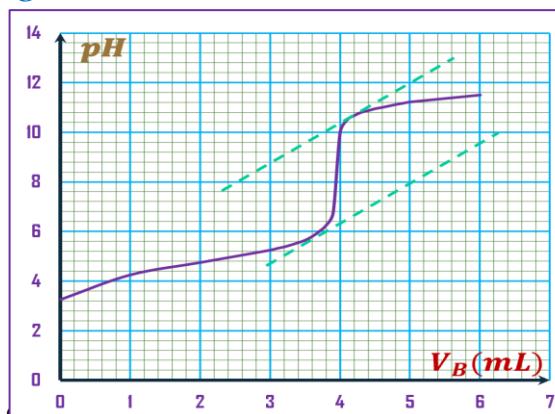
Dans le but de réaliser le dosage du vinaigre on procède d'abord à une dilution de $1/100$ d'un volume $V_0 = 1\text{mL}$ du vinaigre commercial (S_0). Soit (S_1) la solution obtenue.

On prélève un volume $V_A = 5\text{mL}$ de cette solution (S_1) et on réalise le dosage pH-métrique avec une solution de soude ($\text{Na}_{(\text{aq})}^+ + \text{HO}_{(\text{aq})}^-$), de concentration molaire

$C_B = 1,5 \times 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$. Les mesures ont permis de tracer la courbe de la figure ci-dessous

Données : ▪ La masse molaire de l'acide éthanoïque : $M = 60 \text{ g.mol}^{-1}$.
 ▪ La masse volumique du vinaigre : $\rho = 1,02 \text{ g.mL}^{-1}$.

- ① Dresser le montage expérimental du dosage .
- ② Écrire l'équation de la réaction du dosage .
- ③ En exploitant la courbe $\text{pH} = f(V_B)$, déterminer les coordonnées du point d'équivalence E
- ④ Déterminer la concentration C_A de la solution aqueuse (S_A) .
- ⑤ Déduire la masse de l'acide éthanoïque contenant la vinaigre commercial (S_0)
- ⑥ Vérifier la valeur du degré d'acidité indiqué sur l'étiquette du vinaigre commercial (S_0).
- ⑦ Pour un volume versé $V_B = 3\text{mL}$, calculer le taux
- ⑧ Parmi les indicateurs colorés du tableau ci-dessous , déterminer celui qu'il faut ajouter à la solution pour procéder le plus efficacement possible au titrage précédent par une méthode colorimétrique . Justifier ce choix .



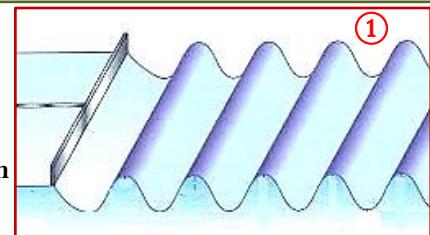
L'indicateur coloré	Bleu de bromothymol	hélianthine	Rouge de crésol
Zone de virage	6 – 7, 6	3, 1 – 4, 4	8, 8 – 7, 2

Devoirs

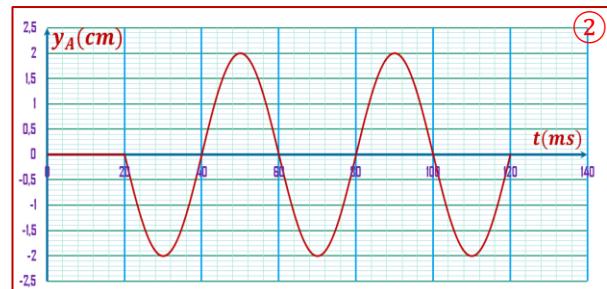


EXERCICE 1 : ONDES MÉCANIQUES PÉRIODIQUES

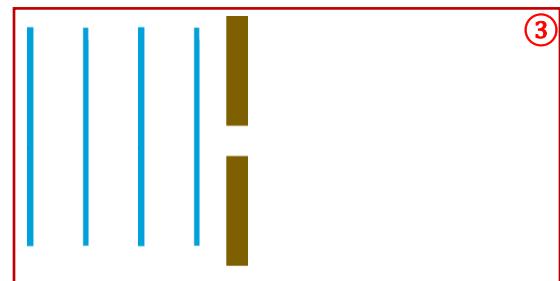
Sur une cuve à onde, on crée à un instant $t_0 = 0\text{s}$ des ondes mécaniques rectilignes sinusoïdales, grâce à une réglette plane menue d'un vibrateur. Ces ondes se propagent sur la surface d'eau sans atténuation et sans réflexion. La figure (1)



La figure (2) représente l'évolution temporelle de l'élargissement d'un point A situé à une distance $d = 2,5\text{cm}$ de la lame vibrante.



- 1 L'onde est-elle transversale ou longitudinale ? Justifier la réponse .
- 2 Calculer la vitesse de propagation de l'onde à la surface de l'eau .
- 3 Déterminer la période T et déduire le fréquence N de l'onde à la surface de l'eau .
- 4 Calculer la longueur d'onde à la surface de l'eau .
- 5 On considère un point B de la surface de l'eau tel que $AB = 5\text{cm}$.
 - a - Comparer les états vibratoires des points A et B
 - b - Sur la figure (2) tracer l'allure de l'élargissement du point B sur l'intervalle [0ms; 120ms].
- 6 On place dans la cuve à onde , un obstacle contenant une ouverture de largeur $a = 2,5\text{cm}$ la figure (3) . Représenter , en justifiant la réponse , l'aspect de la surface de l'eau lorsque les ondes dépassent l'obstacle et nommer le phénomène observé .
- 7 Lorsqu'on règle la fréquence du vibrateur sur la valeur $N' = 18\text{Hz}$, la longueur d'onde devient $\lambda' = 7,5\text{cm}$. Calculer la vitesse V' dans ce cas ,et la comparer avec la valeur précédente . Déduire .

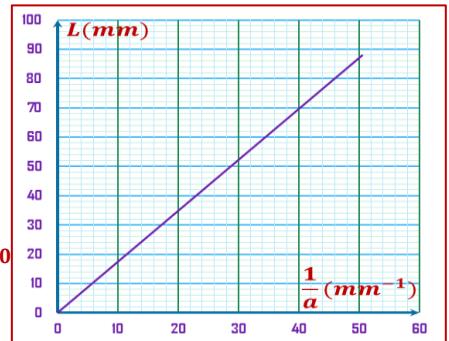
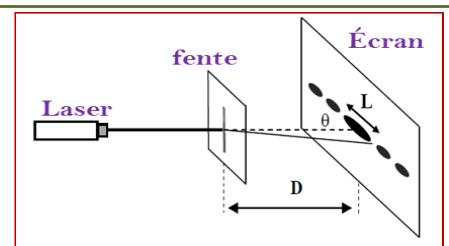
**EXERCICE 2 : ONDES LUMINEUSES****I-Diffraction d'une onde lumineuse**

Pour déterminer la longueur d'onde λ_0 d'une onde lumineuse monochromatique , on réalise l'expérience de diffraction , en utilisant un obstacle avec une fente de largeur a variable .

On fait varier la largeur a de la fente et on mesure la largeur L de la tache centrale et on trace le diagramme qui représente les variations de L en fonction de $\frac{1}{a}$ la courbe ci-contre

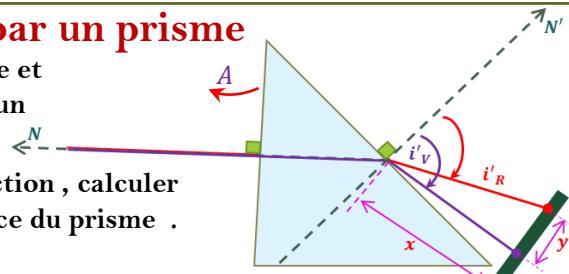
- 1 Quelle est la nature de la lumière que montre cette expérience ?
- 2 Rappeler la relation qui lie θ , λ_0 et a .
- 3 Trouver l'expression de L en fonction de D , λ_0 et a (on suppose θ petit et prend $\tan \theta \approx \theta$).
- 4 En utilisant la courbe ci-contre déterminer la longueur d'onde λ_0
- 5 Cette lumière est-elle visible ? Justifier votre réponse .

Donnée : ■ La distance entre la fente et l'écran $D = 1,5\text{m}$



II-Dispersion d'une onde lumineuse par un prisme

Un faisceau lumineux composé de deux radiations rouge et violette arrive orthogonalement ($i = 0^\circ$) sur une face d'un prisme en verre , la figure ci-contre .



- ① En appliquant la deuxième loi de Descartes de réfraction , calculer les angles de réfractions i'_R et i'_V sur la deuxième face du prisme .
 - ② Déduire les angles de déviations D_R et D_V .
 - ③ On place à la distance $x = 5\text{cm}$ un écran perpendiculaire sur le rayon violet émergé du prisme .
 - a - Calculer la distance y entre la tache rouge et la tache violette sur l'écran .
 - b - Que peut-on dire à propos du verre constituant le prisme ?
 - ④ Calculer la longueur d'onde du rayon rouge dans le prisme .
 - Les indices de réfraction du prisme pour les deux radiations: $n_V = 1,652$ et $n_R = 1,618$
 - L'indice de réfraction de l'air pour les deux radiations : $n_{\text{air}} = 1$
- Données :**
- La longueur d'onde du rayon rouge dans le vide $\lambda_{0R} = 768\text{nm}$
 - L'angle du prisme $A = 30^\circ$

EXERCICE 3 : CHIMIE

I-Question du cours

- ① Définir : L'oxydant , facteur cinétique .
- ② Écrire la demi-équation d'oxydation pour chacun des couples suivants :
 Al^{3+}/Al ; $\text{MnO}_4^-/\text{Mn}^{2+}$ (en milieu acide) ; $\text{NO}_3^-/\text{NH}_3$ (en milieu basique)

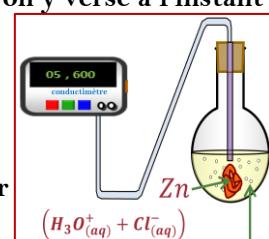
II-Suivi temporel d'une transformation chimique par la conductimétrie

Pour étudier la cinématique de la réaction de l'acide chlorhydrique avec le zinc , on introduit dans un ballon de volume V constant , une masse $m = 1,04\text{g}$ de zinc en poudre $\text{Zn}_{(s)}$ et on y verse à l'instant $t_0 = 0\text{min}$ un volume $V_A = 80\text{mL}$ d'une solution aqueuse

d'acide chlorhydrique ($\text{H}_3\text{O}_{(aq)}^+ + \text{Cl}_{(aq)}^-$) de concentration $C_A = 0,5\text{mol/L}$.

L'équation de réaction est : $2\text{H}_3\text{O}_{(aq)}^+ + \text{Zn}_{(s)} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{H}_{2(g)} + 2\text{H}_2\text{O}_{(l)}$

On mesure à chaque instant t la conductivité $\sigma(t)$ de la solution à l'aide d'un conductimètre . L'ensembles des résultats de cette expérience permet de tracer la courbe ci-contre qui représente l'évolution de la conductivité $\sigma(t)$ de la solution en fonction du temps .



- ① Calculer les quantités de matière initiales des réactifs .
- ② Dresser le tableau d'avancement de cette réaction .
- ③ Calculer la valeur de l'avancement maximal x_{\max} de la réaction , et déduire le réactif limitant .
- ④ Montrer que la conductivité du mélange à un instant t est : $\sigma = -7,42 \times 10^2 x + 21,30 (\text{Sm}^{-1})$
- ⑤ Calculer la composition du système à l'instant $t = 400\text{s}$ et déduire le volume de H_2 formé à cet instant .
- ⑥ Trouver l'expression de v la vitesse volumique en fonction de V et $\frac{d\sigma}{dt}$. Calculer sa valeur aux instants $t = 0\text{s}$ et $t = 400\text{s}$. Expliquer le résultat .
- ⑦ Déterminer en justifiant la réponse le temps de demi-réaction $t_{1/2}$
- ⑧ On refait la même expérience dans les mêmes conditions mais avec une solution de l'acide chlorhydrique de concentration $C_A' = 0,25\text{mol/L}$. Tracer , en justifiant , sur le même courbe précédente , l'allure de la courbe obtenue dans ce cas .



Données :

- La masse molaire de Zinc: $M(\text{Zn}) = 65,4\text{g/mol}$
- Le volume molaire : $V_m = 25\text{L/mol}$
- Les conductivités molaires ioniques : $\lambda_{\text{H}_3\text{O}^+} = 34,98\text{mS.m}^2.\text{mol}^{-1}$; $\lambda_{\text{Cl}^-} = 10,56\text{ mS.m}^2.\text{mol}^{-1}$; $\lambda_{\text{Zn}^{2+}} = 7,63\text{ mS.m}^2.\text{mol}^{-1}$

Exercice 1 : Propagation d'une onde sonore dans l'air

Le son est une vibration mécanique, qui se propage dans des milieux solides, liquides et gazeux et ne se propage pas dans le vide. Il se propage grâce une dilatation et une compression des couches du milieux.

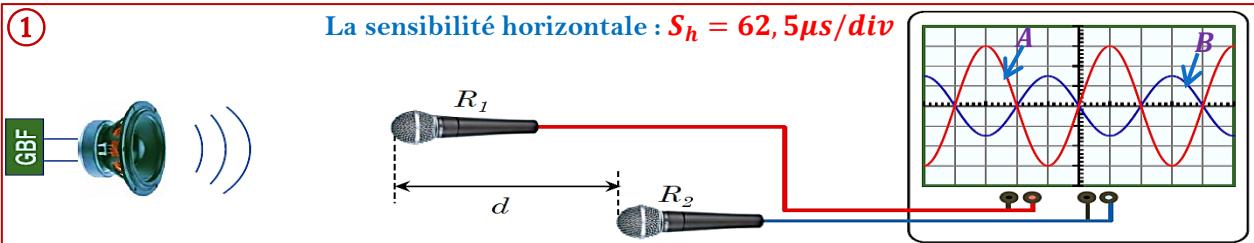
Partie I : Détermination de la célérité des ondes sonores dans l'air

Pour déterminer la célérité des sonores dans l'air on dispose un haut-parleur **E** et deux microphones **M₁** et **M₂**. (Voir la figure ①).

L'émetteur **E** émet une onde ultrasonore progressive sinusoïdale qui se propage dans l'air et reçue par les microphones **M₁** et **M₂**.

Les deux signaux qui sont reçus par les microphones **M₁** et **M₂** sont visualisés sur l'écran de l'oscilloscope.

Les deux courbes sont en opposition de phase lorsque la distance qui sépare les deux récepteur **R₁** et **R₂** est $d_1 = 76,5\text{cm}$



- ① Quelle est la nature de l'onde ultrasonore ? (longitudinale ou transversale). Justifier votre réponse
- ② Indiquer la courbe qui représente le signal reçu par **M₁** et celle qui représente le signal reçu par **M₂**.
- ③ Déterminer la période de l'onde ultrasonore étudiée et déduire sa fréquence .
- ④ On déplace le microphone **M₂** horizontalement jusqu'à ce que les courbes deviennent à nouveau en opposition de phase pour dans ce cas la distance séparant les microphones est : $d_2 = 85\text{cm}$.
 - a - Déterminer la longueur d'onde des ondes sonores dans l'air .
 - b - Calculer la célérité des ondes sonores dans l'air .

Partie II: Détermination des dimensions d'un tube métallique par les ultrasons

Pour déterminer les dimensions d'un tube métallique en utilise une sonde qui joue le rôle d'un émetteur et récepteur des ondes ultrasonores. La sonde émet un signal ultrasonore de courte durée dont la direction est perpendiculaire à l'axe du tube métallique de forme cylindrique. Le signal ultrasonore traverse le tube en se propagent et il se réfléchit tant que le milieu de propagation change et revient à la sonde où il se transforme en signal électrique, d'une durée très brève. (La figure ③).

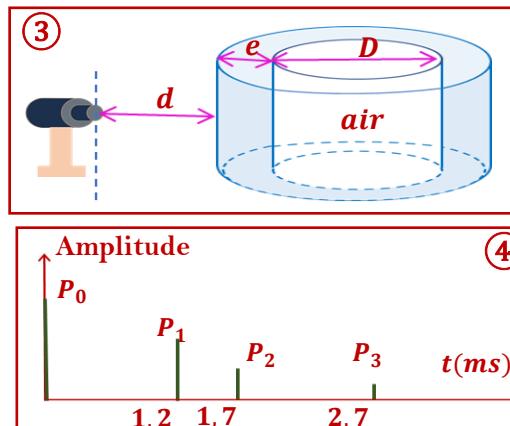
On visualise à l'aide d'un oscilloscope à mémoire le signal émet et les signaux reçus en même temps et on obtint le graphe de la figure ④.

- ① Déterminer la valeur de la distance **d** entre la sonde et le tube
- ② Déterminer la valeur d'épaisseur **e** du tube ainsi sa diamètre **D** .

Données

Célérité des ultrasons :

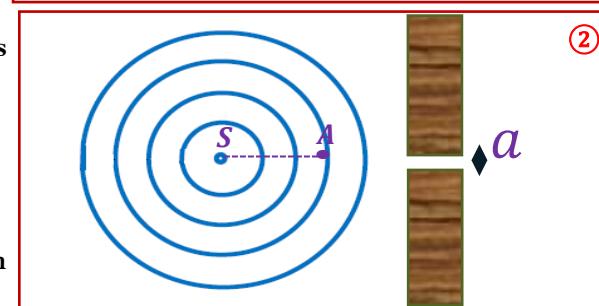
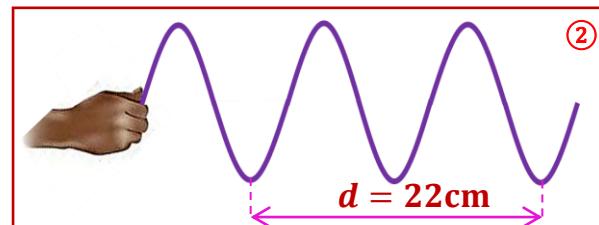
- Dans l'air : $V_{\text{air}} = 340\text{m/s}$
- Dans le métal : $V_m = 4000\text{m/s}$



Exercice 2 : propagation d'une onde mécanique

Un vibreur provoque des ondes sinusoïdales de fréquence $N = 50\text{Hz}$ à l'extrémité S d'une corde .

- ① Déterminer la longueur d'onde λ .
- ② Calculer la vitesse de propagation de l'onde .
- ③ Soit un point M de la corde tel que $SM = 33\text{cm}$
Comparer l'état vibratoire de M avec celle de S .
- ④ Mettre le point M sur la corde .
- ⑤ Dans une cuve à onde , on crée à l'aide d'un vibreur de fréquence réglable des ondes circulaires progressives sinusoïdales .
 - a - Déterminer la longueur d'onde λ' sachant que $SA = 6\text{cm}$
 - b - Les ondes arrivent à une fente de largeur $a = 05\text{cm}$ (la figure ②) . Représenter les ondes après avoir traversées la fente et donner le nom du phénomène observé .



Exercice 3 : Réaction dissociation de l'eau oxygénée

Le peroxyde d'hydrogène (l'eau oxygénée)est capable dans certaines conditions de réagir sur lui-même selon l'équation de réaction suivante : $2H_2O_{2(aq)} \rightarrow 2H_2O_{(l)} + O_{2(g)}$

Cette réaction est totale et lente à température ordinaire mais sa vitesse peut être augmenter en présence d'un catalyseur .

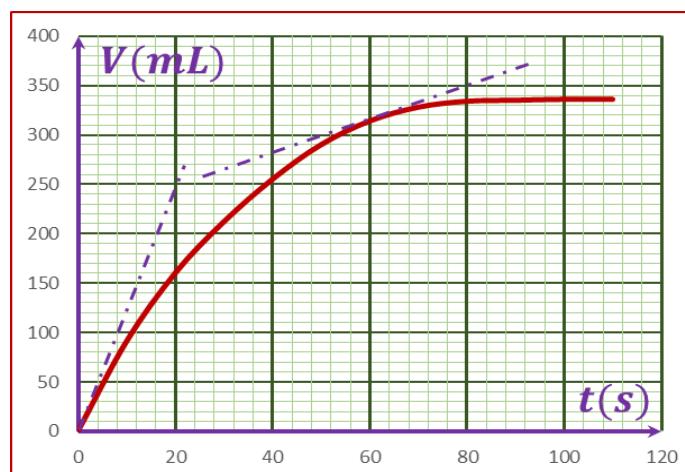
Dans un bêcher on mélange $V = 10\text{mL}$ d'une solution commerciale de concentration $C = 2,79\text{mol/L}$ avec 85mL de l'eau distillée .

À l'instant $t=0\text{s}$, on introduit dans le système 5mL d'une solution de chlorure de fer III

On suit l'évolution du système chimique par mesure du volume du gaz O_2 produit , à température $T = 293K$ constante et à la pression atmosphérique .

La courbe ci-contre représente les variations du volume de O_2 dégagé au cours du temps .

- ① Citer d'autres techniques qui peuvent utiliser pour suivre l'évolution temporelle de cette réaction .
- ② Calculer la quantité de matière initiale de H_2O_2 et déduire sa concentration initiale .
- ③ Dresser le tableau d'avancement de cette réaction et déterminer l'avancement maximale x_{max} .
- ④ Établir l'expression de l'avancement x de la réaction en fonction du $V(O_2)$ volume de O_2 dégagé et du volume molaire V_m .
- ⑤ Calculer la composition du système à l'instant $t_1 = 60\text{s}$
- ⑥ Déterminer en justifiant la réponse la valeur du temps de demi-réaction $t_{1/2}$.
- ⑦ Calculer les valeurs de la vitesse volumique de la réaction aux instants $t_0 = 0\text{s}$ et $t_1 = 60\text{s}$
- ⑧ Comparer v_0 et v_1 et conclure .
- ⑨ Quel est le rôle de chlorure de fer III dans cette réaction ?

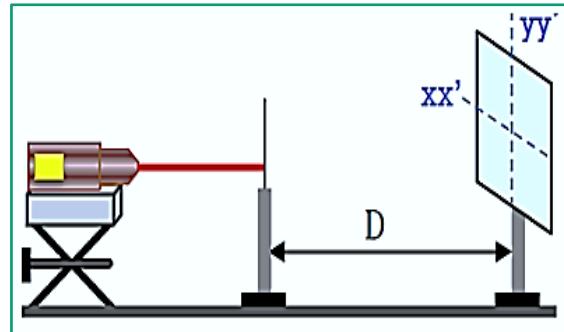


Donnée □ Volume molaire des gaz parfaits dans les conditions de l'expérience : $V_m = 24\text{L/mol}$

Exercice 1 : Diffraction d'une onde lumineuse

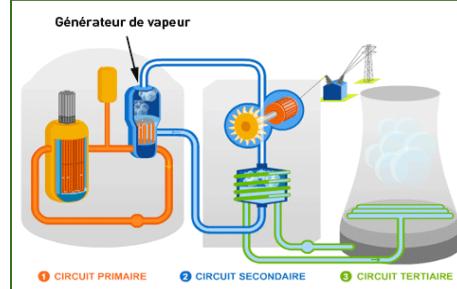
Pour déterminer la longueur d'onde λ d'une onde lumineuse monochromatique émise par un laser on éclaire un fil mince de diamètre $a = 50\mu\text{m}$ par une lumière monochromatique de longueur d'onde λ dans le vide et on pose un écran E à une distance $D = 3\text{m}$ de la fente . On observe donc une tache centrale de largeur $L = 7,6\text{cm}$.

- 1 Quelle est la nature de la lumière que montre cette expérience ?
- 2 Les tache sont étalées selon la direction xx' ou selon la direction yy' ?
- 3 Rappeler la relation qui lie θ , λ et a .
- 4 Donner l'expression de λ en fonction de D , L et a (on suppose θ petit et prend $\tan \theta \approx \theta$). Calculer λ .
- 5 Cette lumière est-elle visible ? Justifier la réponse .
- 6 On remplace la lumière monochromatique par une source de la lumière blanche . Décrire se qu'on observe sur l'écran .



Exercice 2: Production de l'énergie nucléaire

L'énergie d'une centrale nucléaire provient de la fission d'uranium 235 . Celle-ci dégage de la chaleur, qui sert dans un premier temps à vaporiser de l'eau, comme dans toute centrale thermique conventionnelle, puis la vapeur d'eau produite entraîne en rotation une turbine accouplée à un alternateur qui produit à son tour de l'électricité. C'est la principale application de l'énergie nucléaire dans le domaine civil.



Parmi les réactions de fusion d'uranium 235 on a : ${}_0^1n + {}_{92}^{235}U \rightarrow {}_{36}^{94}Sr + {}_{38}^{140}Xe + a_0^1n$

- 1 Définir la fission nucléaire .
- 2 En utilisant la loi de conservation de Soddy , déterminer les valeurs des nombres a et z .
- 3 Calculer en $\text{Mev} |\Delta E|$ l'énergie libérée par la fission d'un noyau d'uranium 235
- 4 Déduire en Mev puis en joule (J) , l'énergie E_T libérée par la fission d'une masse $m = 1\text{kg}$
- 5 Dans une centrale nucléaire , l'énergie nucléaire est transformée en énergie électrique . Une centrale fournit une puissance électrique moyenne $P_e = 1,5\text{GW}$ avec un rendement $r = 26\%$
 - a -Calculer la puissance nucléaire P_n consommée dans cette centrale .
 - b -Calculer l'énergie nucléaire (thermique) produite par cette centrale pendant une année .
 - c -Calculer en tonne la masse d'uranium consommée par cette centrale pendant une année .
 - d -Sachant que , l'énergie thermique produite par la combustion d'une **tonne** de charbon est en moyenne $E_C = 21 \times 10^3 \text{ MJ}$. Calculer en tonne la masse du charbon qu'il faut consommée pour produire une énergie égale à celle produite par la centrale nucléaire pendant une année et conclure .

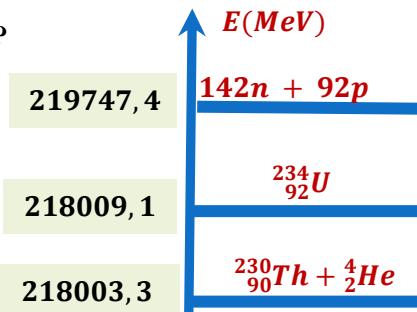
Données	Noyer ou particule	${}_{92}^{235}U$	${}_{36}^{94}Sr$	${}_{38}^{140}Xe$	${}_0^1n$
	Masse en (u)	234,9935	93,8954	139,8920	1,0087
$N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$; $1u = 931,5 \text{ Mev}/c^2$; $1 \text{ MeV} = 1,6 \times 10^{-13} \text{ J}$					

Exercice 3 : Datation d'une roche marine

Le Thorium **230** se trouve dans les roches marines , résulte de la désintégration spontanée d'Uranium **234** au cours du temps . C'est pourquoi que le Thorium et l'Uranium se trouvent dans toutes les roches marines en proportions différentes , selon leurs dates de formation .

- 1 Donner la composition du noyau d'uranium $^{234}_{92}U$.
- 2 Le noyau $^{234}_{92}U$ est radioactif , dont le noyau fils est le Thorium $^{230}_{90}Th$. Écrire l'équation de désintégration d'Uranium $^{234}_{92}U$, en précisant la particule émise .
- 3 L'étude d'un échantillon d'une roche marine à un instant t montre qu'il contient une masse $m_U = 3,27\text{mg}$ d'Uranium **234** , et une masse $m_{Th} = 0,13\text{mg}$ de Thorium **230** . On suppose que la couche ne contient pas de Thorium à l'origine des dates $t_0 = 0\text{s}$ (La date à laquelle le rocher a été formé)
 - a – Calculer l'activité nucléaire d'Uranium **234** à la date t .
 - b – Montrer que l'âge de la roche marine est : $t = \frac{t_{1/2}}{\ln(2)} \ln(1 + \frac{m_{Th} \times M(^{234}U)}{m_U \times M(^{230}Th)})$. Calculer sa valeur
- 4 Calculer l'énergie de liaison du noyau d'hélium 4_2He .
- 5 La figure ci-contre représente le diagramme énergétique associé à la désintégration d'Uranium **234**
 - a – On se basant sur le diagramme énergétique , calculer l'énergie de liaison d'Uranium **234** et celle de Thorium **230**
 - b – Parmi les deux noyaux $^{234}_{92}U$ et $^{230}_{90}Th$, quel est le plus stable ?
 - c – En utilisant le diagramme énergétique , déterminer l'énergie libérée lors de cette désintégration .

Données	Noyau ou particule	4_2He	1_1P	1_0n
	Masse en (u)	4,0015	1,0073	1,0087
	Temps de demi-vie d'Uranium 234 : $t_{1/2} = 2,445 \times 10^3\text{ ans}$			



Exercice 4 : Equilibre d'un système chimique

L'acide méthanoïque (appelé aussi acide formique) est le plus simple des acides carboxyliques. Sa formule chimique est **HCOOH**. Sa base conjuguée est l'ion méthanoate (formiate) de formule **HCOO⁻**. Il s'agit d'un acide faible qui se présente sous forme de liquide incolore à odeur pénétrante.

On prépare, à une solution aqueuse (**S**) d'acide méthanoïque de concentration $c = 5 \times 10^{-3}\text{ mol/L}$ et de volume $V = 1\text{L}$. La mesure de la conductivité de la solution (**S**) donne : $\sigma = 4,0 \times 10^{-2}\text{ S/m}$

- 1 Ecrire l'équation de la réaction entre l'acide méthanoïque et l'eau .
- 2 Dresser le tableau d'avancement de cette réaction en fonction de **C** , **V** , **x** et **x_{éq}**
- 3 Exprimer la conductivité **σ** de la solution en fonction de **λ₁** et **λ₂** et la concentration $[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}$.
- 4 Monter que le taux d'avancement final **τ** de la réaction est : $\tau = \frac{\sigma}{(\lambda_1 + \lambda_2) \times c}$. Calculer sa valeur . Et conclure .
- 5 Trouver l'expression de la constante d'équilibre **K** associée à la réaction d'acide méthanoïque et l'eau en fonction de **C** et **τ** . Calculer sa valeur .
- 6 On réalise la même étude , en utilisant une solution d'acide méthanoïque (**S'**) de concentration **C'** tel que : **C' < C**
 - a – Donner la nouvelle valeur de la constante d'équilibre **K'** (une justification est demandée)
 - b – Choisir la valeur du **τ'** de la solution (**S'**) , parmi les valeurs suivantes : 31,5% , 19,78% , 5,8%
- 7 On réalise une autre étude ,en utilisant une solution (**S'**) d'acide benzénique de concentration **C''** tel que : **C'' = C = 5 \times 10^{-3}\text{ mol/L}** . Soit **τ''** le taux d'avancement final de la réaction d'acide benzénique avec l'eau . Comparer **τ''** avec **τ** (la valeur trouvée en question ④) , justifier votre réponse . La constante d'équilibre associée à la réaction d'acide benzénique avec l'eau est :

$$K'' = 6,4 \times 10^{-5}$$

Données à 25°C: $\lambda_2 = \lambda_{\text{H}_3\text{O}^+} = 35 \times 10^{-3}\text{ Sm}^2\text{mol}^{-1}$ et $\lambda_1 = \lambda_{\text{HCOO}^-} = 5,46 \times 10^{-3}\text{ Sm}^2\text{mol}^{-1}$

Exercice 1 : Questions du cours

① Reprendre par vrai ou faux (QCM $\mp 0,25$) .

- Les noyaux stables de $Z < 20$ se trouvent en dessus du premier médiateur .
- Les noyaux lourds de $Z > 195$ se disposent sur le premier médiateur .
- La radioactivité est une désintégration contrôlée .
- Les noyaux radioactifs β^+ se disposent au dessous de la vallée de stabilité .
- Les transformations nucléaires spontanées sont endoénergétiques .
- L'énergie de liaison par nucléon est l'énergie qu'il faut fournir à un noyau pour le dissocier en ses nucléons .
- Le défaut de masse d'un noyau est toujours positif .
- Le noyau léger se fissione pour former un noyau plus lourd donc plus stable .

② Définir : La radioactivité , L'activité nucléaire .

Exercice 2: La fusion nucléaire

La fusion nucléaire est une transformation nucléaire dans laquelle deux noyaux légers s'assemblent pour former un noyau plus stable .

Cet exercice vise à étudier la réaction de fusion suivante : $_{13}^{27}Al + _2^4He \rightarrow _{15}^{30}P + _Z^AX$

- ① La réaction de fusion est dite thermonucléaire . Expliquer pourquoi ?
- ② En utilisant les lois de conservation de Soddy , déterminer la particule $_Z^AX$.
- ③ Calculer en **Mev** ΔE l'énergie consommée par cette réaction de fusion
- ④ Déduire en **Mev** puis en **joule (J)** , l'énergie E_T consommée par la fusion de deux moles d'Aluminium $_{13}^{27}Al$ avec une quantité suffisante en Hélium $_{2}^4He$.
- ⑤ Calculer l'énergie de liaison du $_{13}^{27}Al$ et celle du $_{15}^{30}P$ et déduire le noyau le plus stable .

Données	Noyau ou particule	$_{13}^{27}Al$	$_{2}^4He$	$_{15}^{30}P$	$_{0}^1n$	$_{1}^1P$
	Masse en (u)	26,97440	4,00150	29,97006	1,00866	1,00728
$N_A = 6,02 \times 10^{23} mol^{-1}$; $1u = 931,5 MeV/c^2$;				$1 MeV = 1,6 \times 10^{-13} J$		

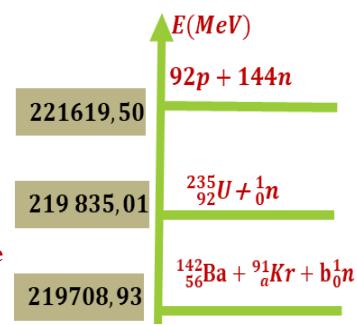
Exercice 3 La fission nucléaire

L'une des réactions de fissions de l'uranium est : $_{92}^{235}U + _0^1n \rightarrow _{56}^{142}Ba + _{36}^{91}Kr + b_0^1n$

- ① Déterminer les deux nombres **a** et **b**
- ② Vérifier que le défaut de masse du noyau de krypton $_{36}^{91}Kr$ est :
 $\Delta m(_{36}^{91}Kr) = 0,81493 u$
- ③ Déduire la valeur de $E_l(_{36}^{91}Kr)$ l'énergie de liaison du noyau $_{36}^{91}Kr$
- ④ Comparer la stabilité des noyaux : $_{92}^{235}U$, $_{36}^{91}Kr$, $_{56}^{142}Ba$
- ⑤ En exploitant le diagramme énergétique déterminer E_{Lib} l'énergie libérée par la fission d'un gramme d'uranium 235 en **MeV** puis en **joule**

Donnée

$$m(_{36}^{91}Kr) = 90,92345 u$$

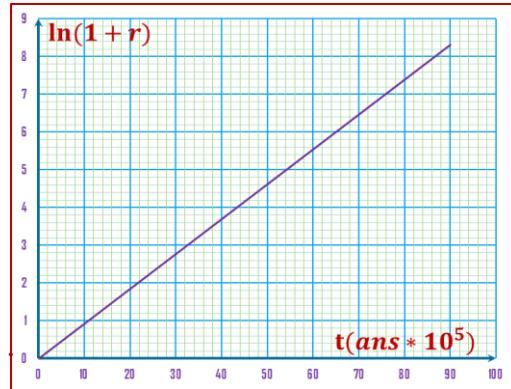


Exercice 4 : Datation d'une roche marine

Le Radium **226** se trouve dans les roches marines , résulte de la désintégration spontanée du Thorium **230** au cours du temps . C'est pourquoi que le Radium et Thorium se trouvent dans toutes les roches marines en proportions différentes , selon leurs dates de formation .

La mesure du rapport $r = \frac{N_{Ra}}{N_{Th}}$ permet de calculer l'âge de la roche marine .

- ① Donner la composition du noyau du Thorium $^{230}_{90}Th$.
- ② Le noyau $^{230}_{90}Th$ est radioactif , dont le noyau fils est le Radium $^{226}_{88}Ra$. Écrire l'équation de désintégration du Thorium $^{230}_{90}Th$, en précisant la particule émise .
- ③ La courbe ci-contre représente l'évolution de $\ln(r + 1)$ en fonction du temps
 - a – Montrer que : $\ln(r + 1) = \lambda t$
 - b – En se basant sur la courbe déterminer λ et déduire la valeur du temps de demi-vie .
 - c – L'étude d'un échantillon de la roche montre $r = 0,23$
Déterminer t_R l'âge de l'échantillon .
- ④ Calculer l'activité nucléaire $a(t_R)$ à l'instant t_R sachant que le nombre de noyaux du radium dans l'échantillon à cet instant est : $N = 4,3 \times 10^{25}$



Exercice 5 : Equilibre d'un système chimique

L'acide acétique ou acide éthanoïque est un acide organique. Sa formule chimique est CH_3COOH . L'acide acétique pur est un liquide incolore et inflammable .

On prépare , une solution aqueuse (S) d'acide éthanoïque de concentration $C = 5 \times 10^{-2} mol/L$ et de volume $V = 50mL$. La mesure de pH de la solution (S) donne : $pH = 3,02$

- ① Ecrire l'équation de la réaction entre l'acide éthanoïque et l'eau .
- ② Dresser le tableau d'avancement de cette réaction en fonction de C , V , x et $x_{éq}$
- ③ Trouver l'expression du taux l'avancement final de la réaction en fonction de pH et C . Calculer sa valeur . Et conclure .
- ④ Trouver l'expression de la conductivité $\sigma_{éq}$ de la solution en fonction de λ_1 et λ_2 et la concentration pH . Calculer $\sigma_{éq}$
- ⑤ Trouver l'expression de la constante d'équilibre K associée à la réaction d'acide éthanoïque et l'eau en fonction de C et pH . Calculer sa valeur .
- ⑥ On dilue n fois la solution (S) , et on obtient une solution (S') d'acide éthanoïque de concentration: C'
 - a –Donner la nouvelle valeur de la constante d'équilibre K' (une justification est demandée)
 - b –Choisir la valeur du τ' de la solution (S'), parmi les valeurs suivantes : **1,9%** , **1,03%** , **5,77%**
 - C – Calculer concentration C' de la solution (S'), et déduire le coefficient de dilution n .
- ⑦ On réalise une autre étude ,en utilisant une solution (S'') d'acide méthanoïque de concentration C'' tel que : $C'' = C'$. Soit τ'' le taux d'avancement final de la réaction d'acide méthanoïque avec l'eau . Comparer τ'' avec τ' (la valeur trouvée en question ⑥-b) , justifier votre réponse . La constante d'équilibre associée à la réaction d'acide méthanoïque avec l'eau est :

$$K'' = 1,8 \times 10^{-4}$$

Données à 25°C: $\lambda_2 = \lambda_{H_3O^+} = 35 \times 10^{-3} Sm^2 mol^{-1}$ et $\lambda_1 = \lambda_{CH_3COO^-} = 4,09 \times 10^{-3} Sm^2 mol^{-1}$

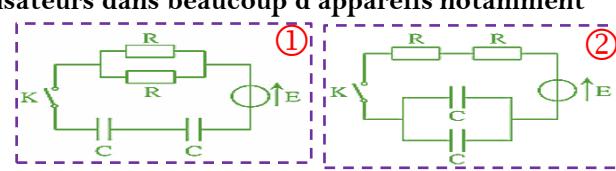
EXERCICE 1 : DIPOLE RC

Les condensateurs sont caractérisés par le fait de stockage de l'énergie électrique pour l'utilisée au besoin . Cette propriété permet d'utiliser les condensateurs dans beaucoup d'appareils notamment dans les appareils photographiques .

I-Association des condensateurs

On considère les montages électriques suivants :

Données : $E = 6V$; $R = 2K\Omega$; $C = 2\mu F$



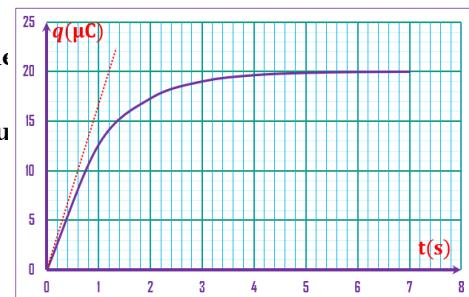
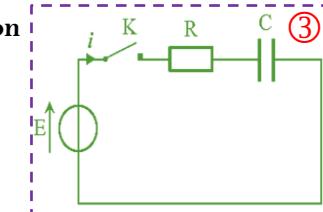
- ① Calculer la valeur de la constante du temps associée à chaque montage .
- ② Quel est le montage qui permet de charger les condensateurs plus rapidement ? Justifier votre choix ?

II- Étude de la réponse d'un dipôle RC à un échelon de tension montant .

Pour étudier la réponse d'un dipôle **RC** à un échelon de tension montant , on réalise la figure ③ qui est formée des éléments suivants :

- Générateur idéal de tension de f.e.m. E
- Conducteur ohmique de résistance $R = 1K\Omega$
- Condensateur déchargé de capacité C Interrupteur K

- ① Recopier la figure ③ , et représenter sur laquelle , comment brancher les entrées de l'oscilloscope pour visualiser la tension u_R
- ② Déterminer l'équation différentielle vérifiée par la charge $q(t)$ du condensateur .
- ③ Trouver les expressions de B et α pour que l'expression $q(t) = B(1 - e^{-\alpha t})$ soit solution de l'équation différentielle
- ④ Trouver l'expression de l'intensité $i(t)$ du courant et celle de la tension u_R tension aux bornes du conducteur ohmique
- ⑤ Montrer que τ a une dimension du temps .
- ⑥ En utilisant la courbe de $q = f(t)$, déterminer la f.e.m. du générateur ,et la constante du temps τ . Calculer la valeur de la capacité C .
- ⑦ Déterminer l'énergie stockée dans le condensateur à la date $t = 2\tau$



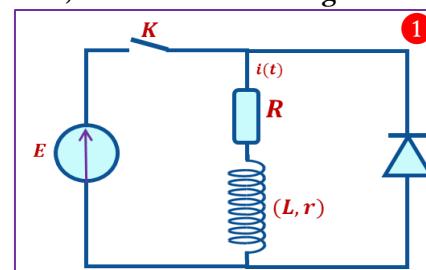
EXERCICE 2 : DIPOLE RL

Pour étudier la réponse d'un dipôle **RL** à un échelon de tension montant , on réalise le montage électrique schématisé par la figure ① qui comporte :

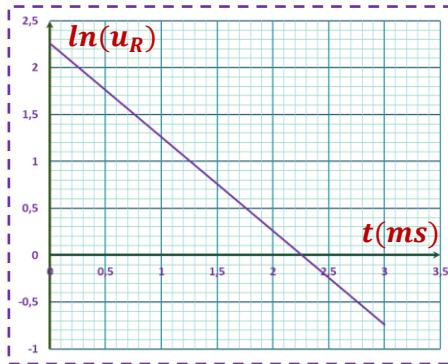
- Générateur idéal de tension de f.e.m. $E = 12V$
- Conducteur ohmique de résistance $R = 80\Omega$
- Bobine d'inductance L et de résistance interne r

Lorsque le régime permanent est établi, en ouvre l'interrupteur K à un instant $t = 0$

- ① Comment se comporte la bobine en régime permanent
- ② Montrer que l'équation différentielle vérifiée par la tension u_R s'écrit sous la forme suivante : $u_R + \tau \frac{du_R}{dt} = 0$. En déterminant l'expression de τ en fonction L , r et R .
- ③ Déterminer l'expression de U pour $u_R = U e^{-t/\tau}$ soit solution de l'équation différentielle .
- ④ Montrer que l'expression du courant s'écrit sous la forme suivante : $i(t) = I_0 e^{-t/\tau}$, en déterminant l'expression de I_0 en fonction E , r et R .



- ④ Un programme approprié a permis de tracer la courbe : $\ln(u_R) = f(t)$.
- Montrer que $\ln(u_R) = -\frac{t}{\tau} + \ln(U)$.
 - Déterminer les valeurs des U et τ .
 - Calculer la valeur de la résistance r
 - Calculer la valeur initiale de l'intensité du I_0 courant en régime permanent
 - Calculer la valeur de l'inductance L .
- ⑤ Calculer l'énergie stockée dans la bobine à l'instant $t = 2\tau$



EXERCICE 3 : LE VITAMINE C500

L'acide ascorbique(vitamine C) de formule $C_6H_8O_6$, est un réducteur naturel que l'on qualifie usuellement d'antioxydant En pharmacie il est possible de trouver l'acide ascorbique , par exemple sous forme de comprimé " de vitamine C500 "

I-Étude de la réaction de l'acide ascorbique avec l'eau .

On prépare une solution aqueuse (S) de l'acide ascorbique de concentration C , et de volume V . La mesure de pH de cette solution à 25°C donne la valeur : $pH = 3,01$ et $pK_A = 4,1$

- Dresser le tableau d'avancement associé à la réaction de l'acide ascorbique avec l'eau.
- Montrer que taux d'avancement final de cette réaction est : $\tau = \frac{1}{1+10^{pK_A-pH}}$, calculer τ et déduire.
- Calculer la valeur du quotient de réaction à l'équilibre associé à cette réaction
- Calculer le pourcentage de l'ion ascorbate $C_6H_7O_6^-$ et celle de l'acide ascorbique $C_6H_8O_6$ dans cette solution. Déduire l'espèce chimique prédominante dans cette solution.

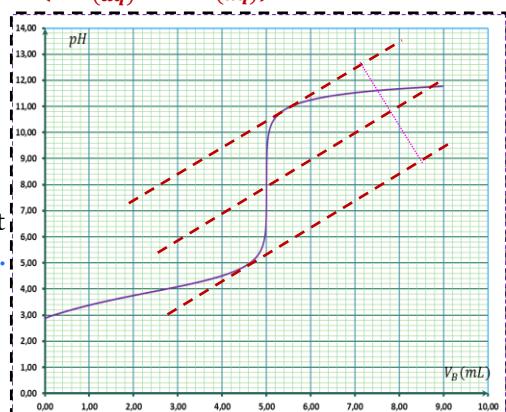
II-Dosage d'une solution d'acide ascorbique par une solution d'hydroxyde de sodium

On dissout un comprimé de vitamine C500 dans un volume $V = 200\text{mL}$ de l'eau distillée et on obtient une solution (S_A) de l'acide ascorbique . On titre un volume $V_A = 10\text{mL}$ de la solution (S_A) par une solution aqueuse (S_B) de hydroxyde de sodium ($Na_{(aq)}^+ + HO_{(aq)}^-$) de concentration $C_B = 2,84 \times 10^{-2}\text{ mol.L}^{-1}$.

- Dresser le montage expérimental du dosage .
- Écrire l'équation de la réaction du dosage .
- Déterminer les coordonnées du point d'équivalence E
- Déterminer la concentration C_A de la solution (S_A)
- Calculer en (mg) la masse de l'acide ascorbique contenant le comprimé du vitamine C étudié. Justifier le nom C500 .
- Pour un volume versé $V_{B1} = 4\text{mL}$, calculer le taux d'avancement final associé à la du dosage et déduire .
- Parmi les indicateurs colorés du tableau ci-dessous , déterminer celui qu'il faut ajouter à la solution pour procéder le plus efficacement possible au titrage précédent par une méthode colorimétrique . Justifier ce choix .

Données :

$$M(C_6H_8O_6) = 176\text{g.mol}^{-1}; pK_e = 14$$



EXERCICE 1 : DIPOLE RC

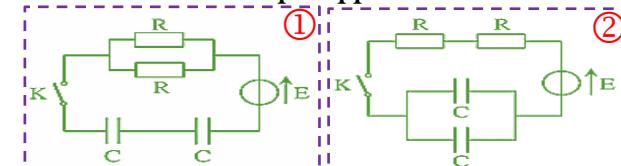
Les condensateurs sont caractérisés par le fait de stockage de l'énergie électrique pour l'utilisée au besoin . Cette propriété permet d'utiliser les condensateurs dans beaucoup d'appareils notamment dans les appareils photographiques .

I-Association des condensateurs

On considère les montages électriques suivants :

Données : $E = 12V$; $R = 1,5K\Omega$; $C = 10\mu F$

- ① Calculer la valeur de la constante du temps associée à chaque montage .
- ② Quel est le montage qui permet de charger les condensateurs plus rapidement ? Justifier votre choix ?

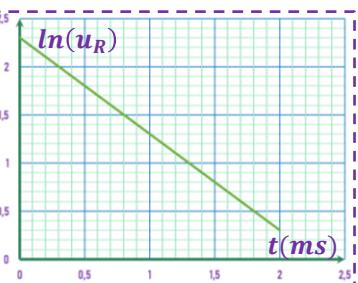


II- Étude de la réponse d'un dipôle RC à un échelon de tension montant .

Pour étudier la réponse d'un dipôle **RC** à un échelon de tension montant , on réalise la figure ③ qui est formée des éléments suivants :

- Générateur idéal de tension de f.e.m. E
- Conducteur ohmique de résistance $R = 1K\Omega$
- Condensateur déchargé de capacité C
- Interrupteur K

- ① Représenter sur la figure ③ dans la convention de récepteur les tensions u_C et u_R .
- ② Déterminer l'équation différentielle vérifiée par la tension u_C aux bornes du condensateur .
- ③ Trouver les expressions de A et τ pour que l'expression $u_C = A(1 - e^{-t/\tau})$ soit solution de l'équation différentielle .
- ④ Trouver l'expression de l'intensité $i(t)$ du courant et celle de la tension u_R tension aux bornes du conducteur ohmique
- ⑤ Un programme approprié permet de tracer $\ln(u_R) = f(t)$. Où
 - a – Montrer que $\ln(u_R) = -\frac{t}{\tau} + \ln E$.
 - b – Déterminer les valeurs des E et τ .
 - c – Calculer la valeur de la capacité C
- ⑥ Déterminer l'énergie stockée dans le condensateur à la date $t = \tau$



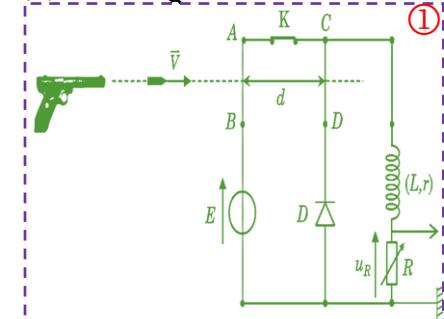
EXERCICE 2 : DIPOLE

Pour déterminer la vitesse V d'une balle de pistolet , on réalise un montage électrique basé sur l'établissement et l'annulation du courant aux bornes d'un dipôle **RL** . Voir la figure ①

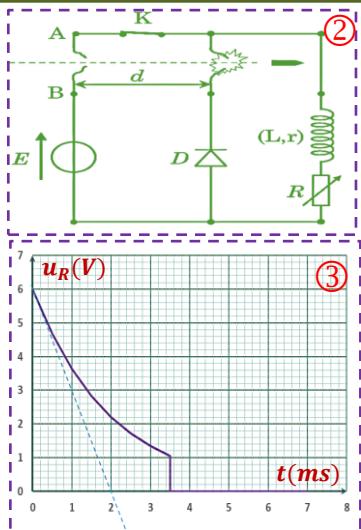
- Générateur idéal de tension de f.e.m. $E = 7,5V$
- Conducteur ohmique de résistance $R = 40\Omega$
- Bobine d'inductance L et de résistance interne r

Lorsque le régime permanent est atteint , on tire la balle qui coupera le fil AB à un instant $t_0 = 0s$

- ① Comment se comporte la bobine en régime permanent
- ② Montrer que l'équation différentielle vérifiée par la tension u_R s'écrit sous la forme suivante : $u_R + \tau \frac{du_R}{dt} = 0$. En déterminant l'expression de τ en fonction L , r et R .
- ③ Vérifier que $u_R = \frac{RE}{R+r} e^{-t/\tau}$ est une solution de l'équation différentielle .



- ④ Déduire l'expression de la tension $u_{R,0}$ à l'instant $t_0 = 0s$
- ⑤ On suppose que la balle est en mouvement rectiligne uniforme , et qu'elle coupe le fil DC à un instant t_1 . Voir la figure ②
À l'aide d'un système d'acquisition convenable , on obtient la courbe de la figure ③ qui représente les variations de la tension u_R .
- a – Lorsque la balle du pistolet coupe le fil CD une étincelle s'y produit . Expliquer cette observation .
- b – Déterminer la valeur de la constante du temps τ .
- c – Calculer la valeur de l'inductance L et celle de la résistance r .
- d – Déterminer graphiquement la valeur $u_{R,1}$ à l'instant t_1 où la balle coupe le fil CD
- e – Montrer que : $t_1 = \tau \cdot \ln\left(\frac{\tau \cdot E \cdot R}{L \cdot u_{R,1}}\right)$. Calculer t_1 .
- f – Calculer la vitesse de la balle du pistolet sachant que la distance entre les deux fil AB et CD est $d = 1,3m$
- g – Pour mesurer avec précision la vitesse de la balle il faut que la résistance R soit inférieure à une valeur limite R_{maxe} ($t_1 < 5\tau$) . Trouver l'expression de R_{maxe} en fonction de V , d , L et r .
Calculer la valeur de R_{maxe}



EXERCICE 3 : LE VITAMINE C500

L'acide ascorbique(vitamine C) de formule $C_6H_8O_6$, est un réducteur naturel que l'on qualifie usuellement d'antioxydant En pharmacie il est possible de trouver l'acide ascorbique , par exemple sous forme de comprimé de " vitamine C500 " . On donne $M(C_6H_8O_6) = 176g/mol$

I-Étude de la réaction de l'acide ascorbique avec l'eau .

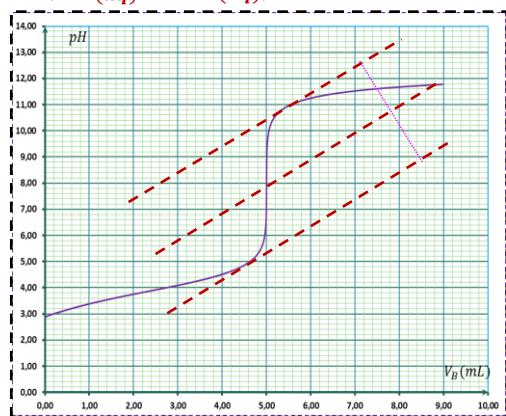
On prépare une solution aqueuse (S) de l'acide ascorbique de concentration $C = 10^{-2} mol \cdot L^{-1}$, et de volume V . La mesure de pH de cette solution à 25°C donne la valeur : $pH = 3,01$

- ① Dresser le tableau d'avancement associé à la réaction de l'acide ascorbique avec l'eau réaction .
- ② Calculer la valeur du taux d'avancement final de cette réaction et déduire .
- ③ Calculer la valeur du quotient de réaction à l'équilibre associé à cette réaction
- ④ Déduire la valeur de la constante d'acidité pK_A du couple $C_6H_8O_6/C_6H_7O^-_6$.
- ⑤ Calculer la valeur du rapport $\frac{[C_6H_7O^-_6]}{[C_6H_8O_6]}$ et déduire l'espèce chimique prédominante dans la solution .

II-Dosage d'une solution d'acide ascorbique par une solution d'hydroxyde de sodium

On dissout un comprimé de vitamine C500 dans un volume $V = 200mL$ de l'eau distillée et on obtient une solution (S_A) de l'acide ascorbique . On titre un volume $V_A = 10mL$ de la solution (S_A) par une solution aqueuse (S_B) de hydroxyde de sodium ($Na^{+}_{(aq)} + HO^-_{(aq)}$) de concentration $C_B = 2,85 \times 10^{-2} mol \cdot L^{-1}$.

- ① Dresser le montage expérimental du dosage .
- ② Écrire l'équation de la réaction du dosage .
- ③ Déterminer les coordonnées du point d'équivalence E
- ④ Déterminer la concentration C_A de la solution (S_A)
- ⑤ Calculer la masse de l'acide ascorbique contenant le comprimé de vitamine C étudié . Justifier le nom C500 .
- ⑥ Pour un volume versé $V_{B1} = 3mL$, calculer le taux d'avancement final de la réaction du dosage et déduire .
- ⑦ Parmi les indicateurs colorés du tableau ci-dessous , déterminer celui qu'il faut ajouter à la solution pour procéder le plus efficacement possible au titrage précédent par une méthode colorimétrique . Justifier ce choix .



L'indicateur coloré	Bleu de bromothymol	Phénolphthaleïne	Rouge de créosol
Zone de virage	6 – 7,6	8,2 – 10	7,2 – 8,8

tableau-périodique.fr

1	H	Hydrogène	2	He	Hélium
2	Li	Lithium	3	Be	Béryllium
3	Na	Sodium	11	Mg	Magnésium
4	K	Potassium	19	Ca	Calcium
5	Rb	Rubidium	37	Sr	Strontium
6	Cs	Césium	55	Ba	Baryum
7	Fr	Francium	87	Ra	Radium
5	B	Bore	6	C	Carbone
13	Al	Aluminium	14	Si	Silicium
15	P	Phosphore	16	S	Soufre
17	Cl	Chlore	18	Ar	Argon
5	B	Bore	6	C	Carbone
13	Al	Aluminium	7	N	Azote
15	P	Phosphore	8	O	Oxygène
17	Cl	Chlore	9	F	Fluor
10	Ne	Neon	18	Ar	Krypton

2	He	Hélium
6	C	Carbone
14	Si	Métaux alcalino-terreux
15	P	Métaux de transition
16	S	Métaux alcalins
17	Cl	Métaux pauvres
18	Ar	Métalloïdes
10	Ne	Halogènes

Légende:
Non-métaux
Métaux pauvres
Gaz nobles
Métaux alcalins
Métalloïdes
Halogènes
Métaux de transition

1	He	Hélium
2	He	Hélium
3	Li	Lithium
4	Be	Béryllium
5	B	Bore
6	C	Carbone
7	N	Azote
8	O	Oxygène
9	F	Fluor
10	Ne	Neon

1	He	Hélium
2	He	Hélium
3	Li	Lithium
4	Be	Béryllium
5	B	Bore
6	C	Carbone
7	N	Azote
8	O	Oxygène
9	F	Fluor
10	Ne	Neon

1	H	Hydrogène
2	He	Hélium
3	Li	Lithium
4	Be	Béryllium
5	B	Bore
6	C	Carbone
7	N	Azote
8	O	Oxygène
9	F	Fluor
10	Ne	Neon
11	Na	Sodium
12	Mg	Magnésium
13	Al	Aluminium
14	Si	Silicium
15	P	Phosphore
16	S	Soufre
17	Cl	Chlore
18	Ar	Argon
19	K	Potassium
20	Ca	Calcium
21	Sc	Scandium
22	Ti	Titanium
23	V	Vanadium
24	Cr	Chrome
25	Mn	Manganèse
26	Fe	Fer
27	Co	Cobalt
28	Ni	Nickel
29	Cu	Cuivre
30	Zn	Zinc
31	Ga	Gallium
32	Ge	Germanium
33	As	Arsenic
34	Se	Sélénium
35	Br	Brome
36	Kr	Krypton
37	Rb	Rubidium
38	Sr	Strontium
39	Y	Yttrium
40	Zr	Zirconium
41	Nb	Niobium
42	Tc	Molybdène
43	Ru	Technétium
44	Rh	Ruthénium
45	Pd	Rhodium
46	Ag	Palladium
47	Cd	Argent
48	In	Cadmium
49	Sn	Indium
50	Sb	Étain
51	Te	Antimoine
52	I	Tellure
53	Xe	Iode
54	La	Xénon
55	Cs	Césium
56	Ba	Baryum
57	Fr	Francium
58	Pr	Praséodyme
59	Nd	Néodyme
60	Pm	Prométhium
61	Sm	Samarium
62	Eu	Europium
63	Gd	Gadolinium
64	Tb	Terbium
65	Dy	Dysprosium
66	Ho	Holmium
67	Er	Erbium
68	Tm	Thulium
69	Yb	Ytterbium
70	Lu	Lutécium
71	Ac	Actinium
72	Th	Thorium
73	Pa	Protactinium
74	U	Uranium
75	Np	Neptunium
76	Pu	Plutonium
77	Am	Américium
78	Cm	Curium
79	Bk	Berkélium
80	Cf	Californium
81	Es	Einsteinium
82	Fm	Fermium
83	Md	Mendéléïnum
84	No	Nobélium
85	Rn	Radon
86	Uuo	Ununoctium
87	Uus	Ununseptium
88	Uuh	Ununhexium
89	Uup	Ununpentium
90	Uut	Ununquadium
91	Ung	Ununtradium
92	Ung	Ununhexadium
93	Ung	Ununpentadium
94	Ung	Ununquadium
95	Ung	Ununtradium
96	Ung	Ununhexadium
97	Ung	Ununpentadium
98	Ung	Ununquadium
99	Ung	Ununtradium
100	Ung	Ununhexadium
101	Ung	Ununpentadium
102	Ung	Ununquadium
103	Ung	Ununtradium

Bibliographies utilisées

- ❖ **Ministre de l'éducation nationale, programmes des sections internationales-Option français-Physique chimie –Première année baccalauréat Sc. Ex - Sc. M .**
- ❖ **Mohamed El Heddari et autres , Etincelle Physique chimie, deuxième année baccalauréat Sc. Ex - Sc. M . Édition Apostrophe.**
- ❖ **Abdelhak Ben Saddik et autres, collection Al Massar en Physique chimie, Première année baccalauréat Sc. Ex - Sc. M , Nadia édition 2010.**
- ❖ **Cours sur internet:**
 - **Cours de Physique chimie - d deuxième année baccalauréat Sc. Ex - Sc. M , Prof : Hicham Mahajar .**
 - **Cours de Physique chimie - deuxième année baccalauréat Sc. Ex - Sc. M ,Prof Yassine Derraz.**
 - **Cours de Physique chimie - deuxième année baccalauréat Sc. Ex - Sc. M ,Prof Abdelhakim Sbiro.**
 - **Cours de Physique chimie - Première année baccalauréat Sc. Ex - Sc. M ,Prof Rachid Jankel.**
 - **Cours de Physique chimie - deuxième année baccalauréat Sc. Ex - Sc. M ,Prof Hammou Mona.**
 - **Cours de Physique chimie - deuxième année baccalauréat Sc. Ex - Sc. M , Prof Mohammed Delahi.**
 - **Cours de Physique chimie - deuxième année baccalauréat Sc. Ex - Sc. M ,Prof Ayoub Elmardi.**
 - **Cours de Physique chimie - deuxième année baccalauréat Sc. Ex - Sc. M ,Prof Allal Mahdade.**