

# Électricité

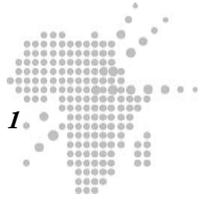
## Magnétisme 2



Préparé par Henri RASOLONDRAMANITRA



African Virtual university  
Université Virtuelle Africaine  
Universidade Virtual Africana



## NOTE

Ce document est publié sous une licence Creative Commons 2.5 de paternité (la moins restrictive).

[http://en.wikipedia.org/wiki/Creative\\_Commons](http://en.wikipedia.org/wiki/Creative_Commons)

Attribution

<http://creativecommons.org/licenses/by/2.5/>

License (abbreviated “cc-by”), Version 2.5.



## TABLE DES MATIÈRES

I. Électricité - Magnétisme 2	3
II. Pré requis	3
III. Temps	3
IV. Matériels didactiques	3
V. Justification	4
VI. Contenu	4
6.1 Résumé	4
6.2 Grandes lignes	5
6.3 Représentation graphique	5
VII. Objectifs Généraux	6
VIII. Objectifs spécifiques	7
IX. Activités d'enseignement et d'apprentissage	10
X. Activités d'apprentissage	20
XI. Concepts-clé (glossaire)	162
XII. Lectures obligatoires	165
XIII. Liens utiles	168
XIV. Synthèse du module	190
XV. Évaluation sommative	192
XVI. Références	264
XVII. Auteur du module	267



## I. Électricité - Magnétisme 2

par Dr. Henri RASOLONDRAMANITRA

## II. Cours d'introduction ou connaissances de base requises

**Pour suivre ce cours, l'apprenant(e) doit avoir suivi avec succès le module**

Electricité- Magnétisme 1 et maîtriser les notions suivantes :

- La loi d'Ohm ;
- Les lois de Kirchoff ;
- L'action d'un champ électrique sur une particule chargée ;
- L'action d'un champ magnétique sur une particule chargée en mouvement ;
- le flux magnétique ;
- le théorème d'Ampère.

## III. Temps

120 heures réparties entre les unités d'apprentissage comme suit :

1. Les circuits à courant alternatif- Les ponts en courant alternatif : **30heures**
2. Le champ magnétique et les particules chargées- Inductance : **30heures**
3. Les propriétés magnétiques de la matière : **30heures**
4. Les équations de Maxwell- Les ondes électromagnétiques : **30heures**

## IV. Matériel

Ordinateur avec connexion Internet, imprimante, Microsoft office, logiciel MathType.





## V. Justification du module

L'électromagnétisme est une partie de la physique dont les applications dans la vie quotidienne sont innombrables et fascinantes. On peut citer entre autres la télévision, la radio, la téléphonie mobile qui utilisent les ondes électromagnétiques pour leur fonctionnement. Le présent module aidera l'apprenant(e) à acquérir quelques bases indispensables pour la compréhension de ce domaine. Il permettra également à l'apprenant(e) de renforcer ses compétences dans la perspective de l'enseignement de cette discipline.

## VI. Contenu

### 6.1 Aperçu général



La première partie de ce module aborde les circuits en courant alternatif, circuits comportant diverses combinaisons de résistance, d'inductance et de capacité.

La deuxième partie est consacrée au mouvement des particules chargées dans un champ électrique et dans un champ magnétique. Elle décrit et explique l'expérience de J.J. Thompson, l'effet Hall, et le principe de fonctionnement des accélérateurs de particules tels que les cyclotrons et les synchrotrons. Elle est suivie d'une section qui étudie le phénomène d'induction électromagnétique, la loi de Lenz, les phénomènes d'autoinduction et d'induction mutuelle et les applications qui s'y rapportent. La troisième partie décrit et analyse les propriétés des trois classes de substances magnétiques : le paramagnétique, le ferromagnétique et le diamagnétique. La dernière partie du module expose les quatre équations fondamentales (équations de Maxwell) qui sous-tendent l'électromagnétisme et traite les ondes électromagnétiques, leur polarisation et l'énergie qu'elles transportent.

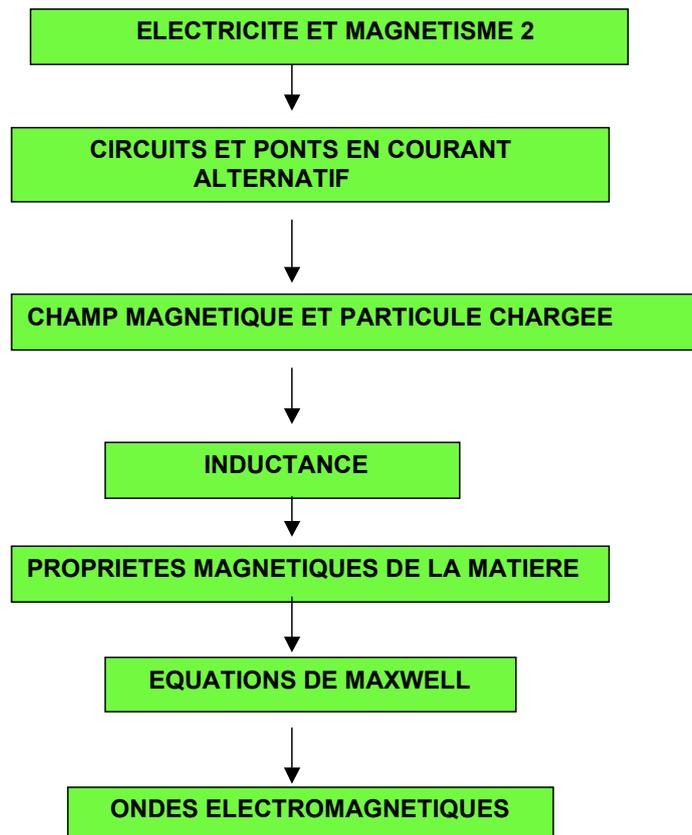


## 6.2 Contenu/contour

Le module comprend quatre parties dont la progression est ainsi qu'il suit :

1. Les circuits à courant alternatif- Les ponts en courant alternatif
2. Le champ magnétique et les particules chargées- Inductance
3. Les propriétés magnétiques de la matière
4. Les équations de Maxwell- Les ondes électromagnétique

## 6.3 Plan graphique

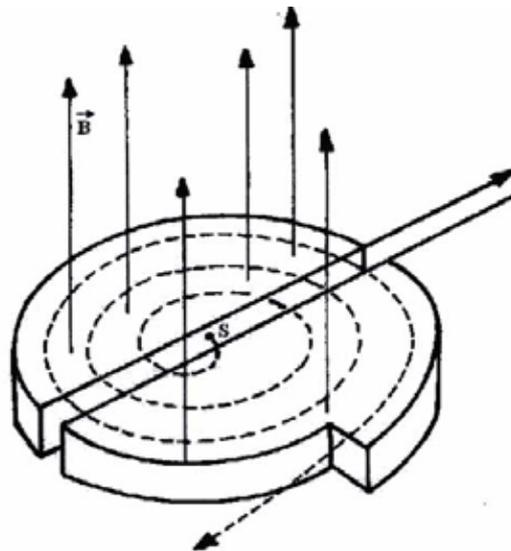




## VII. Objectifs Généraux

L'apprenant(e) doit être capable de :

- Comprendre les relations de phase entre la tension appliquée aux bornes d'un circuit à courant alternatif et le courant qui le parcourt
- Comprendre la notion d'impédance
- Comprendre le phénomène de résonance dans un circuit RLC série
- Connaître l'Effet Hall
- Comprendre le principe de fonctionnement d'un cyclotron
- Connaître la loi de Lenz
- Connaître le phénomène d'autoinduction
- Connaître le phénomène d'induction mutuelle
- Connaître les propriétés magnétiques de la matière
- Connaître les équations de Maxwell
- Comprendre le phénomène de transport d'énergie par une onde électromagnétique
- Comprendre la notion de polarisation d'une onde électromagnétique





## VIII. Objectifs spécifiques d'apprentissage (Objectifs d'apprentissage)

Unité	Objectif(s) d'apprentissage
<p>1. Circuits en courant alternatif-Ponts en courant alternatif : <b>30 heures</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Déterminer la résultante de deux ou plusieurs vecteurs par la construction de Fresnel</li> <li>- Etablir le déphasage entre tension et courant dans un circuit comprenant une résistance</li> <li>- Etablir le déphasage entre tension et courant dans un circuit comprenant une bobine</li> <li>- Etablir le déphasage entre tension et courant dans un circuit comprenant un condensateur</li> <li>- Etablir le déphasage entre tension et courant dans un circuit RLC</li> <li>- Calculer l'impédance d'un circuit RLC</li> <li>- Calculer le facteur de qualité d'un circuit RLC série</li> <li>- Calculer la bande passante d'un circuit RLC série</li> <li>- Calculer la fréquence de résonance</li> <li>- Distinguer les valeurs efficaces et les valeurs instantanées de la tension et de l'intensité du courant électrique</li> <li>- Calculer la valeur instantanée de l'intensité du courant traversant un circuit</li> <li>- Calculer la valeur instantanée de la tension aux bornes d'un circuit</li> <li>- Rappeler la relation entre la valeur efficace de l'intensité et l'amplitude du courant qui traverse un circuit</li> <li>- Rappeler la relation entre la valeur efficace et l'amplitude de la tension aux bornes d'un circuit</li> </ul>



<p>2. Champ magnétique et particule chargée – Inductance : <b>30 heures</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rappeler la loi de Lenz.</li> <li>- Appliquer la loi de Lenz.</li> <li>- Décrire l'Effet Hall.</li> <li>- Interpréter l'Effet Hall.</li> <li>- Déterminer le rapport <math>\frac{e}{m}</math>.</li> <li>- Calculer le rayon de la trajectoire d'un porteur de charge en mouvement dans un cyclotron.</li> <li>- Calculer la vitesse d'une particule chargée à la sortie d'un cyclotron.</li> <li>- Calculer l'inductance d'un circuit</li> <li>- Calculer le coefficient d'induction mutuelle de deux circuits</li> </ul>
<p>3. Propriétés magnétiques de la matière : <b>30 heures</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Décrire le phénomène de paramagnétisme</li> <li>- Interpréter le phénomène de paramagnétisme</li> <li>- Décrire le phénomène de diamagnétisme</li> <li>- Interpréter le phénomène de diamagnétisme</li> <li>- Décrire le phénomène de ferromagnétisme</li> <li>- Interpréter le phénomène de ferromagnétisme</li> <li>- Rappeler la relation entre les vecteurs champ d'induction magnétique, excitation magnétique et aimantation</li> <li>- Rappeler le phénomène d'Hystérésis</li> <li>- Calculer l'aimantation d'une substance magnétique</li> </ul>



<p>4. Equations de Maxwell- Ondes électromagnétiques : <b>30 heures</b></p>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Appliquer les équations de Maxwell</li><li>- Déterminer la polarisation d'une onde électromagnétique plane</li><li>- Déterminer le vecteur de Poynting associé à une onde électromagnétique plane</li><li>- Déterminer la densité d'énergie d'une onde électromagnétique plane</li><li>- Déterminer l'intensité d'une onde électromagnétique plane</li><li>- Déterminer la pression de radiation d'une onde électromagnétique</li></ul>
---	---



## IX. Activités d'enseignement et d'apprentissage

### 9.1 Evaluation prédictive

#### Titre de l'évaluation prédictive :

#### Test des Prerequis

#### Electricite-magnetisme 2

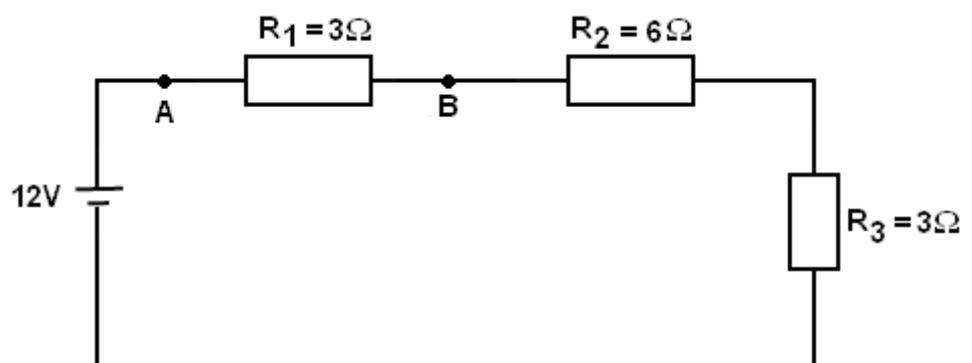
**Justification** : Ce test permet de verifier la maîtrise des connaissances préalables pour comprendre ce module. Il est donc obligatoire pour tous/toutes les apprenant(e)s

#### Questions

Dans tout ce qui suit, cocher les bonnes réponses

#### Exercice 1

On considère le circuit ci-dessous

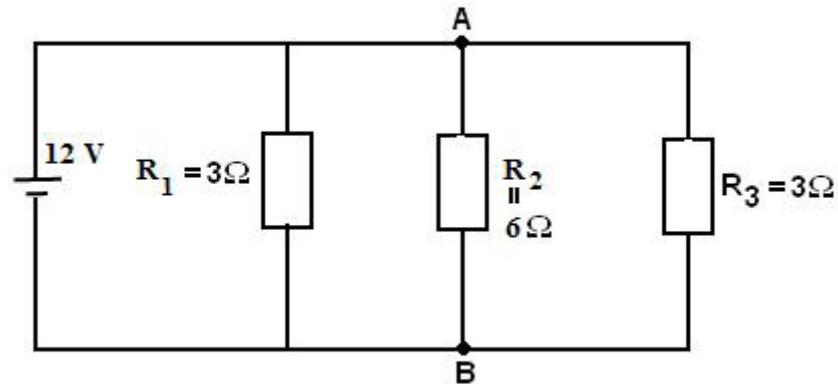


L'intensité du courant  $I$  qui parcourt le circuit et la différence de potentiel  $V_{AB}$  aux bornes de  $R_1$  sont :

- 1 :  $I = 2\text{A}$  et  $V_{AB} = 6\text{V}$
- 2 :  $I = 1\text{A}$  et  $V_{AB} = 3\text{V}$
- 3 :  $I = 1,33\text{A}$  et  $V_{AB} = 3,99\text{V}$


**Exercice 2 :**

On considère le circuit

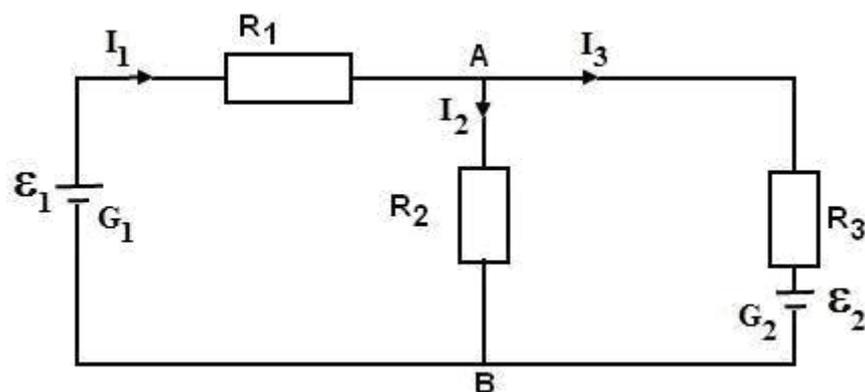


La différence de potentiel  $V_{AB}$  aux bornes de la résistance  $R_2$  et l'intensité du courant  $I_2$  qui parcourt cette résistance sont :

- 1 :  $V_{AB} = 2 \text{ V}$  et  $I_2 = 12 \text{ A}$
- 2 :  $V_{AB} = 4 \text{ V}$  et  $I_2 = 24 \text{ A}$
- 3 :  $V_{AB} = 12 \text{ V}$  et  $I_2 = 2 \text{ A}$

**Exercice 3 :**

Soit le circuit ci-dessous :



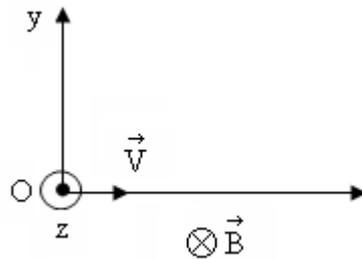
$G_1$  et  $G_2$  sont deux générateurs de f.é.m.  $\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_2$ . On parcourt la maille  $G_1AG_2BG_1$  dans le sens

$G_1 \rightarrow A \rightarrow G_2 \rightarrow B \rightarrow G_1$ . La loi de Kirchhoff relative à cette maille donne :

- 1 :  $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = R_1 I_1 + R_3 I_3$
- 2 :  $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = R_1 I_1 + R_3 I_3$
- 3 :  $\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = R_1 I_1 + R_3 I_3$



### Exercice 4

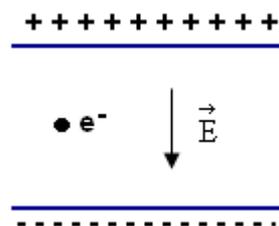


Considérer la figure ci-dessus. Un électron pénètre avec une vitesse  $\vec{V}$  horizontale dans une région où règnent un champ électrique  $\vec{E}$  et un champ magnétique  $\vec{B}$ .  $\vec{B}$  est perpendiculaire à la direction de  $\vec{V}$  comme l'indique la figure. Sachant que l'électron n'est pas dévié de sa trajectoire initiale,  $\vec{E}$  est dirigé suivant :

- 1 : l'axe des y dans le sens positif
- 2 : l'axe des y dans le sens négatif
- 3 : l'axe des z dans le sens négatif

### Exercice 5

Un électron est placé entre les armatures d'un condensateur plan chargé comme l'indique la figure. On suppose qu'il est initialement au repos et on néglige son poids. La force qui s'exerce sur l'électron est  $\vec{F} = e \vec{E}$ .



- 1 : vrai
- 2 : faux



### Exercice 6

Dans le système international, le flux magnétique est exprimé en Wb

- 1 : vrai  
 2 : faux

### Exercice 7

Dans le système international, l'induction magnétique  $\vec{B}$  est exprimée en Wb

- 1 : vrai  
 2 : faux

### Exercice 8

Une spire, d'aire égale à  $5,0\text{cm}^2$  est placée dans un champ magnétique  $\vec{B} = (40 \vec{i} - 18 \vec{k}) 10^{-4} \text{ T}$  et parallèlement au plan xy. Le flux qui traverse cette spire est  $900\text{nWb}$

- 1 : vrai  
 2 : faux

### Exercice 9

Une spire de section  $\vec{S} = 30 \vec{k} \text{ m}^2$  est placée dans un champ magnétique  $\vec{B} = 2 \times 10^{-2} \vec{i} \text{ T}$ . Le flux de  $\vec{B}$  à travers cette spire est  $60 \times 10^{-2} \text{ Wb}$

- 1 : vrai  
 2 : faux

### Exercice 10

Une bobine circulaire de rayon  $3\text{cm}$ , comportant 50 spires est placée dans un champ magnétique uniforme  $B = 0,10 \text{ T}$  et parallèle à la normale à sa section. Le flux magnétique qui traverse cette bobine est  $2,83 \times 10^{-4} \text{ Wb}$

- 1 : vrai  
 2 : faux



### Exercice 11

La loi d'Ampère est :  $\oint_{(C)} \vec{B} \cdot d\vec{l} = 0$

- 1 : vrai  
 2 : faux

### Exercice 12

Un conducteur rectiligne, linéique, infini est parcouru par un courant d'intensité I. Le module du champ magnétique en un point situé à une distance r du fil est :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2 \pi r}$$

- 1 : vrai  
 2 : faux

### Exercice 13

Un conducteur cylindrique  $C_1$ , de longueur infinie et de rayon a est parcouru par un courant d'intensité I. Il est placé à l'intérieur d'un cylindre métallique creux  $C_2$  de même axe.  $C_2$  a pour rayon intérieur b, et c pour rayon extérieur ( $b < c$ ).

Le courant d'intensité I circulant dans  $C_1$  revient avec la même intensité dans  $C_2$ . Le champ magnétique créé par ce système est nul en un point situé à une distance r de l'axe et tel que  $r > c$ .

- 1 : vrai  
 2 : faux

### Exercice 14

Reprendre l'exercice précédent (exercice n°13). Le champ en un point situé à une distance r de l'axe telle que  $a < r < b$  est nul

- 1 : vrai  
 2 : faux



### Exercice 15

Reprendre l'exercice n° 13. Le champ en un point situé à une distance  $r$  telle que  $r < a$  est nul.

1 : vrai

2 : faux

### Réponses clés

#### Solution de l'exercice 1

La bonne réponse est « 2 :  $I = 1\text{A}$  et  $V_{AB} = 3\text{V}$  »

En effet nous avons ici un groupement en série. La résistance équivalente du circuit

est  $R = R_1 + R_2 + R_3 = 12\ \Omega$ . Le courant qui parcourt le circuit est  $I = \frac{12\text{V}}{12\ \Omega} = 1\text{A}$  et la différence de potentiel aux bornes de  $R_1$  est  $V_{AB} = R_1 I = (3\ \Omega)(1\text{A}) = 3\text{V}$ .

#### Solution de l'exercice 2 :

La bonne réponse est « 1 :  $V_{AB} = 12\text{V}$  et  $I_2 = 2\text{A}$  ».

En effet nous avons ici des résistances branchées en parallèle aux bornes du générateur de f.é.m. 12V. La différence de potentiel  $V_{AB}$  est donc 12 V et le courant  $I_2$  est donné par

$$I_2 = \frac{V_{AB}}{R_2} = \frac{12\text{V}}{6\ \Omega} = 2\text{A}$$

#### Solution de l'exercice 3 :

La bonne réponse est « 1 :  $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = R_1 I_1 + R_3 I_3$  »

En effet lorsqu'on parcourt la maille  $G_1AG_2BG_1$  dans le sens  $G_1 \rightarrow A \rightarrow G_2 \rightarrow B \rightarrow G_1$ , on sort du générateur  $G_1$  par sa borne positive et du générateur  $G_2$  par sa borne négative. Les deux résistances  $R_1$  et  $R_3$  sont traversées dans le sens du courant. On obtient donc :

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - R_1 I_1 - R_3 I_3 = 0 \Rightarrow \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = R_1 I_1 + R_3 I_3$$


**Solution de l'exercice 4 :**

La réponse est « 2 : l'axe des y dans le sens négatif »

En effet l'électron est soumis à la force  $\vec{F} = -e \vec{E} - e \vec{v} \wedge \vec{B}$ . Comme il reste sur sa trajectoire initiale  $\Rightarrow e \vec{E} = -e \vec{v} \wedge \vec{B}$ . Il s'ensuit que  $\vec{E} = -\vec{v} \wedge \vec{B}$ .  $\vec{E}$  est perpendiculaire au plan défini par  $\vec{v}$  et  $\vec{B}$  alors il est dirigé suivant l'axe des y et à cause du signe « moins », il prend le sens négatif de l'axe y.

**Solution de l'exercice 5 :**

La bonne réponse est « 2 : faux »

En effet l'électron est chargé négativement, donc la force qu'il subit est :

$$\vec{F} = -e \vec{E}$$

**Solution de l'exercice 6 :**

La réponse est « 1 : vrai »

En effet le flux magnétique est  $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$ , or le champ B est en  $\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$  et la surface S en  $\text{m}^2$

**Solution de l'exercice 7 :**

Le Weber est l'unité du flux magnétique et l'unité du champ magnétique est le Tesla ou le Weber par mètre carré. La bonne réponse est donc « 2 : faux »

**Solution de l'exercice 8 :**

Le flux qui traverse la spire est donné par  $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$ . Le vecteur  $\vec{S}$  est ici dirigé suivant z, la spire étant placée parallèlement au plan xy. Le vecteur  $\vec{S}$  s'écrit donc :

$$\vec{S} = (5,0) \times 10^{-4} \vec{k} \text{ m}^2. \text{ On a alors :}$$

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = (40 \vec{i} - 18 \vec{k}) 10^{-4} \cdot (5,0) \times 10^{-4} \vec{k} = -900 \text{ nWb}.$$

La bonne réponse est donc « 2 : faux ». (Remarquez bien le signe « moins »)



**Solution de l'exercice 9 :**

La bonne réponse est « 2 : faux »

En effet le flux est  $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$ . Comme  $\vec{B}$  et  $\vec{S}$  sont perpendiculaires entre eux,  $\Phi = 0$

**Solution de l'exercice 10 :**

Soit  $\Phi_1$  le flux à travers une spire. Le flux à travers la bobine est  $\Phi = 50 \Phi_1$ . La valeur

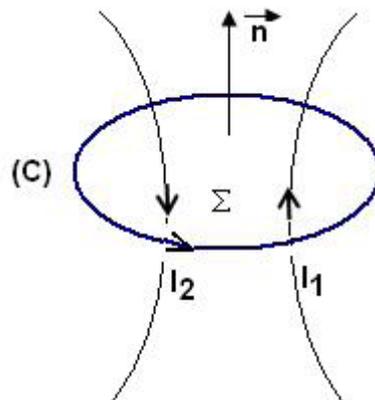
( $2,83 \times 10^{-4} \text{Wb}$ ) est égale au flux  $\Phi_1$ . En effet  $\vec{B}$  et  $\vec{S}$  étant parallèles entre, le flux  $\Phi_1$  est :

$$\Phi_1 = B S = (0,10\text{T}) (3,14) (0,03)^2 \text{m}^2 = 2,83 \times 10^{-4} \text{Wb}$$

La bonne réponse est donc « 2 : faux ».

**Solution de l'exercice 11 :**

La loi d'Ampère dit que : la circulation du champ magnétique  $\vec{B}$  le long d'une courbe fermée (C) est égale au produit par  $\mu_0$  de la somme algébrique des intensités I des courants qui traversent une surface  $\Sigma$  définie par (C). Le signe de I est lié au sens de parcours sur (C). Un exemple est donné ci-dessous.



$$\oint_{(C)} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (I_1 - I_2)$$

La bonne réponse ici est donc « 2 : faux ».



### Solution de l'exercice 12 :

Appliquons le théorème d'Ampère. On prend comme courbe fermée (C) une ligne de champ : un cercle ayant pour axe le fil et de rayon r.

On a :  $\oint_{(C)} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I$ . Ici  $\vec{B}$  et  $d\vec{l}$  sont parallèles. Le module de  $\vec{B}$  est le même en tout point de (C)  $\Rightarrow B \oint_{(C)} dl = \mu_0 I$

On obtient après l'intégration :

$$B (2\pi r) = \mu_0 I \Rightarrow B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

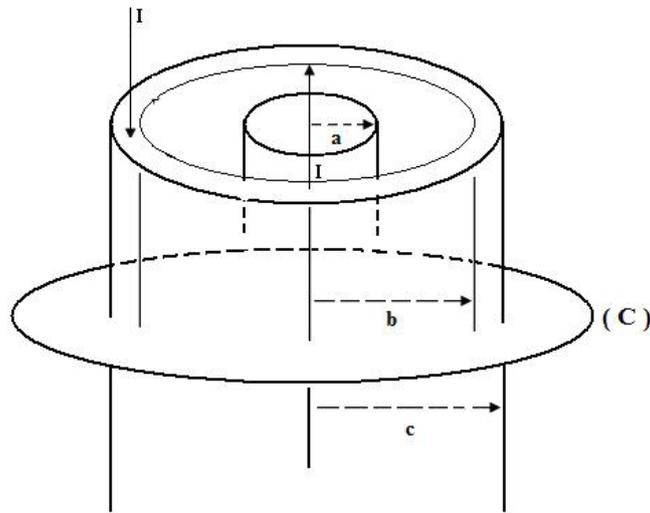
La réponse est donc « 1 : vrai »

### Solution de l'exercice 13

Appliquons le théorème d'Ampère sur la circonférence (C) de rayon  $r > c$ . La somme

algébrique des courants enlacés par (C) ici est nulle, d'où :  $\oint_{(C)} \vec{B} \cdot d\vec{l} = 0 \Rightarrow B = 0$

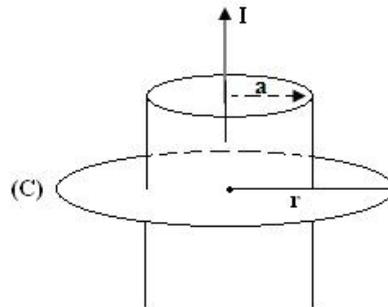
La réponse est donc « 1 : vrai »



**Solution de l'exercice 14**

Appliquons la loi sur la circonférence (C) de rayon  $r$  avec  $a < r < b$ . Tout le courant

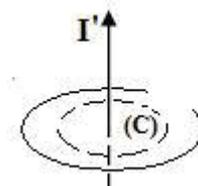
$I$  est enlacé par (C), donc on a  $\oint_{(C)} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I \Rightarrow B$  ne peut pas être nul.



La bonne réponse ici est alors « 2 : faux ».

**Solution de l'exercice 15**

Le champ  $B$  n'est pas nul car une fraction du courant  $I$  est enlacée par (C).



La bonne réponse est « 2 : faux ».



### **Commentaire pédagogique pour les étudiants (100-200 mots).**

Vous avez au moins **75 %**, votre intérêt pour le module est évident, Je vous encourage à persévérer dans le travail.

Vous avez entre **50 % et 75 %**, votre résultat est très encourageant. Alors Bon courage.

Vous avez entre **35 % et 50 %**, bien sûr ce n'est pas parfait. Mais vous avez vraiment la volonté de réussir dans ce domaine il me semble. C'est cette volonté dont nous aurons besoin. Je ne vous le cache pas, le domaine que vous avez choisi est très passionnant, mais il demande beaucoup de travail. Pour commencer, il y a un certain nombre de rattrapages que vous devez faire. C'est à ce prix que nous pourrons réussir.

Vous avez moins de **35 %**, vous avez de gros efforts à faire, puisqu'en plus du module vous devez revoir vos précédents cours..

## **X. Activités d'apprentissage**

### **Unité 1 : Circuits à courant alternatif**

#### **Activité d'apprentissage 1-1**

##### **Titre de l'activité**

Déphasage entre la tension appliquée aux bornes d'un circuit et le courant qui le parcourt - Impédance d'un circuit

##### **Temps d'apprentissage : 15H**

**Consigne :** Pour cette activité, si vous avez au **moins  $\frac{3}{4}$  des points**, vous avez fait du très bon travail, vous pouvez continuer.

Si vous avez **moins de la moitié des points**, vous devez relire les lectures proposées et refaire l'activité.

Si vous avez **plus de la moitié des points et moins de  $\frac{3}{4}$  des points**, vous avez fait du bon travail, mais vous devez faire des efforts pour la suite.



## Objectifs spécifiques

A l'issue de cette activité, l'apprenant(e) être capable de (d'):

- Représenter par la construction de Fresnel le déphasage entre la tension appliquée aux bornes d'un circuit et le courant qui le parcourt
- calculer le déphasage entre la tension appliquée aux bornes d'un circuit et le courant qui le parcourt
- établir l'expression du courant instantané qui parcourt un circuit comportant diverses combinaisons de résistance, d'inductance et de capacité
- calculer les amplitudes de tension
- calculer les amplitudes de courant qui parcourt un circuit
- rappeler la relation qui décrit la réactance capacitive
- rappeler la relation qui décrit la réactance inductive
- calculer l'impédance d'un circuit comportant diverses combinaisons de résistance, d'inductance et de capacité
- déterminer l'impédance d'un circuit à partir de la représentation de Fresnel
- établir l'expression de l'impédance complexe d'un circuit
- déduire l'impédance d'un circuit connaissant son impédance complexe

## Résumé de l'activité

Cette activité est consacrée à l'étude des circuits à courant alternatif et comportant diverses combinaisons de résistance, d'inductance et de capacité. Vous aurez à examiner les courants  $I$  qui s'établissent dans ces circuits lorsqu'ils sont alimentés par des f.é.m. sinusoïdales  $U$ . L'accent sera en particulier mis sur les oscillations de  $I$  et de  $U$  pour dégager le déphasage entre eux. En courant alternatif, l'impédance joue le même rôle qu'une résistance en courant continu et il existe plusieurs démarches pour la trouver. Vous apprendrez à déterminer l'impédance d'un circuit en :

- considérant la relation qui lie les amplitudes de la tension  $U$  et du courant  $I$  ou la relation qui lie leurs valeurs efficaces
- construisant la représentation de Fresnel qui lui correspond
- utilisant son impédance complexe

## Lectures appropriées

RASOLONDRAMANITRA, H. (2007). Circuits à courant alternatif. Madagascar. Université d'Antananarivo. Cours inédit.



### Ressources appropriées

- BEISER, A. (1979). Physique appliquée : Cours et problèmes. Serie Schaum . Traduction française par LOBENBERG M. McGraw-Hill, Paris
- BRAMAND, P., FAYE, P. et THOMASSIER, G. (1983). Physique- Terminales C et E. Collection Eurin-Gié. Hachette, Paris.
- BREITHAUPT, J. (2000). New Understanding : Physics for Advanced Level. Fourth Edition, Stanley Thornes Publishers Ltd, England ,
- HALPERN, A. (1991) Maxi Schaum Physique 2. Traduction française par BABES, V. McGraw-Hill, Paris
- KALACHNIKOV, S. (1980). Electricité. Traduction française. Editions Mir, Moscou, Réédition : 1983
- NELKON, M. and PARKER, P. (1998). Advanced Level Physics. Seventh Edition, Heinemann, (Oxford ?)
- RESNICK, R. et HALLIDAY, D. (1979). Electricité et magnétisme, physique 2. Traduit par André Lebel et Claudine Thériault. Editions du Renouveau Pédagogique. Inc. Montréal (Québec) Canada
- SEARS.F.W., ZEMANSKY, M. W. and YOUNG. H. D. (1987). University Physics. Seventh Edition, Addison-Wesley Publishing Company, USA.
- SEARS.F.W., ZEMANSKY, M. W. and YOUNG, H. D. (1974). College Physics. Fourth Edition. Addison-Wesley Publishing Company, USA.
- TIPLER, P.-A. and Company. (1999). Physics for Scientists and Engineers. Fourth Edition. W.H. FREEMAN and company. Worth Publishers Inc., New York, USA
- TIPLER, P. A. (1982). Physics. Second Edition. Worth Publishers Inc, New York, USA

### Liens utiles

[http://perso.orange.fr/daniel.robert9/tension\\_alternative0.html](http://perso.orange.fr/daniel.robert9/tension_alternative0.html)

[http://perso.orange.fr/daniel.robert9/tension\\_alternative1.html](http://perso.orange.fr/daniel.robert9/tension_alternative1.html)

[http://www.walter-fendt.de/ph11f/accircuit\\_f.htm](http://www.walter-fendt.de/ph11f/accircuit_f.htm)

<http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/electri/rlcsinus.html>



## Description de l'activité

Cette activité comporte deux exercices sous forme de QCM et des exercices à correction subjective (exercices à réponses divergentes) qui vont permettre à l'apprenant(e) de savoir son degré de maîtrise des thèmes d'étude : *Circuits à courant alternatif - Déphasage entre la tension appliquée aux bornes d'un circuit et le courant qui le parcourt – Impédance*, et des résumés de ce qu'il faut retenir après chaque exercice résolu. L'exercice 1 comporte deux parties

Les exercices sont obligatoires. Chaque réponse fautive des deux premiers exercices est associée à un exercice de remédiation résolu permettant à l'apprenant(e) de connaître l'origine de son erreur.

## Évaluation formative

Les apprenant(e)s font obligatoirement tous les exercices en travail collaboratif. La note du groupe est commune aux différents membres du groupe.

**L'exercice 1 compte pour 60% des points et l'exercice 2 pour 40% des points**

### Exercice 1

Cocher la bonne réponse.

On dispose d'une bobine d'inductance  $L = 0,3\text{H}$ , d'une résistance  $R = 80\Omega$  et d'un condensateur de capacité  $C = 50\ \mu\text{F}$ .

a- La bobine et la résistance sont montées en série avec une tension  $U = U_m \sin\omega t$  de valeur efficace  $120\text{V}$  et de fréquence  $60\text{Hz}$ . L'impédance de ce circuit est :

- $113\ \Omega$
- $53\ \Omega$
- $80\ \Omega$



138,5  $\Omega$

96  $\Omega$

100  $\Omega$

b- La bobine, la résistance et le condensateur sont montées en série avec la source U. le courant instantané qui parcourt ce circuit est :

$I = 1,70 \sin (120 \pi t - 0,6458)$

$I = 1,70 \sin (120 \pi t + 0,6458)$

### Exercice 2

Une résistance R et une inductance L sont montées en série aux bornes d'une source de tension alternative  $U = U_m \sin \omega t$ . L'impédance complexe de ce circuit est :

$R + \frac{1}{jC\omega}$

$R + jL\omega$

$\frac{1}{R} + \frac{1}{jL\omega}$



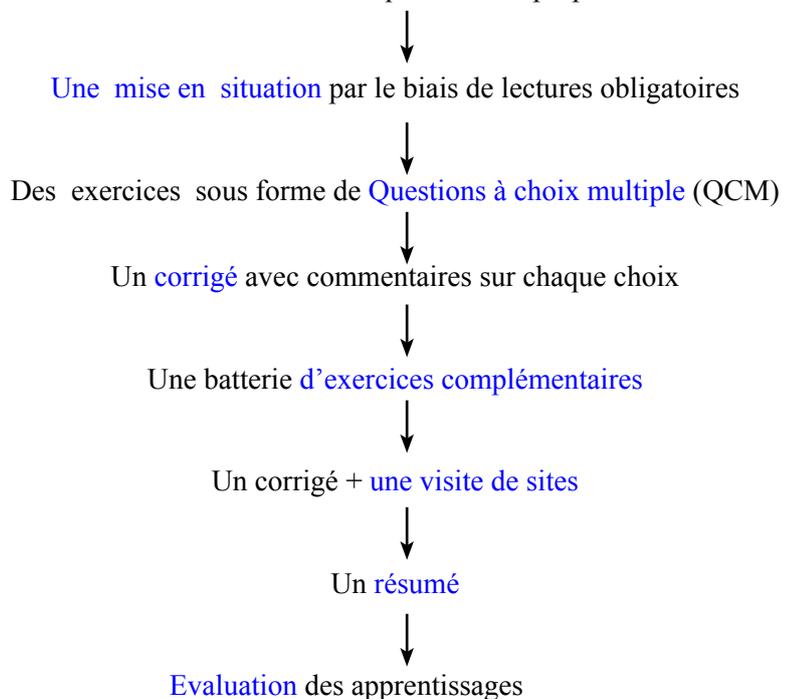
## Activités d'apprentissage

- consulter les objectifs à atteindre pour identifier les points essentiels dans les cours à lire
- lire attentivement les « lectures appropriées »
- procéder à un travail collaboratif pour résoudre les exercices

Les apprenants seront répartis en groupe de travail suivant leur nombre. Chaque groupe désigne un rapporteur. Tous les groupes cherchent en même temps l'exercice 1. Au bout d'une heure de temps et sous la direction d'un tuteur, les rapporteurs échangent par chat les solutions proposées par leur groupe. Les autres membres du groupe ont accès au chat. Le chat est enregistré. Le professeur titulaire du cours ou le tuteur corrigeront le chat ensuite rendront accessible le corrigé de l'exercice 1 dans l'espace de travail réservé aux apprenant(e)s.

Pour l'exercice 2, les groupes cherchent séparément la solution qu'ils envoient par leurs rapporteurs au professeur titulaire du cours par e-mail en fichier attaché. Après correction des différentes productions, le professeur met à la disposition des différents groupes le corrigé dans un espace de travail réservé aux apprenant(e)s

Le schéma suivant résume l'itinéraire qui vous est proposé dans cette activité.





## Réponses clés

### Exercice 1-a

113  $\Omega$ . Ce n'est pas la bonne réponse. Cette valeur correspond à la réactance inductive de la bobine d'inductance  $L = 0,3\text{H}$  branchée aux bornes de la source de tension alternative  $U = U_m \sin\omega t$  de fréquence 60Hz.

Pour en savoir plus et pour renforcer vos acquis :

- établissez la relation de phase entre la tension aux bornes de l'inductance  $L$  et le courant qui la traverse.
- Donnez l'expression de la réactance inductive et calculez-la.

53  $\Omega$ . Mauvaise réponse. Cette valeur est la réactance capacitive du condensateur de capacité  $C = 50\mu\text{F}$  relié à la source de tension  $U = U_m \sin\omega t$ .

Pour en savoir plus et pour renforcer vos acquis :

- établissez la relation de phase entre la tension aux bornes du condensateur et le courant qui traverse le circuit.
- Donnez l'expression de la réactance capacitive et calculez-la.

80  $\Omega$ . Cette valeur correspond au cas où le circuit ne comporte que la résistance  $R = 80 \Omega$  branchée aux bornes de la tension  $U = U_m \sin\omega t$ .

Pour en savoir plus et pour renforcer vos acquis :

- Etablissez la relation de phase entre la tension aux bornes de  $R$  et le courant qui la traverse.

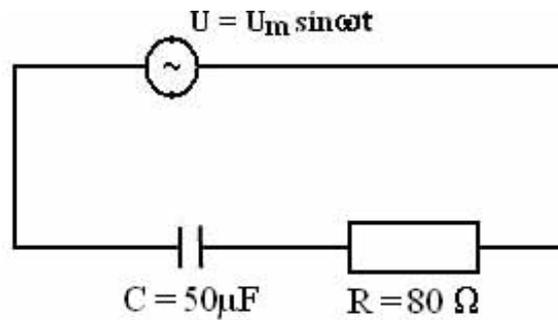
138,5 $\Omega$ . [Bonne réponse](#). C'est bien l'impédance que l'on cherche.

Pour renforcer vos acquis :

- Donnez la représentation de Fresnel qui correspond à ce circuit et en déduire son impédance  $Z$  et la relation de phase entre la tension appliquée  $U$  et le courant.

96  $\Omega$ . C'est l'impédance du circuit ci-dessous

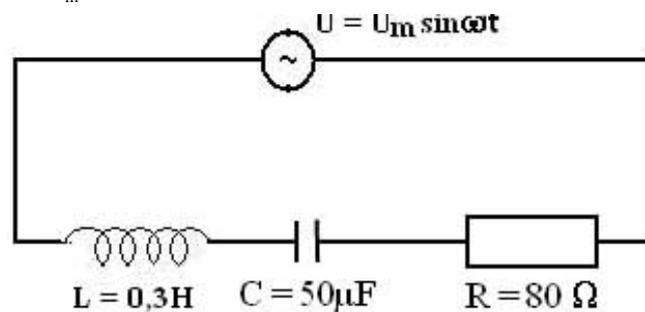
$U = U_m \sin\omega t$  ;  $f = 60\text{Hz}$ .



Pour renforcer vos acquis, utilisez la représentation de Fresnel pour établir l'expression de son impédance et décrire la relation de phase entre la tension appliquée  $U$  et le courant.

□  $100 \Omega$ . C'est l'impédance du circuit R-L-C série ci-dessous

$U = U_m \sin \omega t$  ;  $f = 60 \text{ Hz}$ .

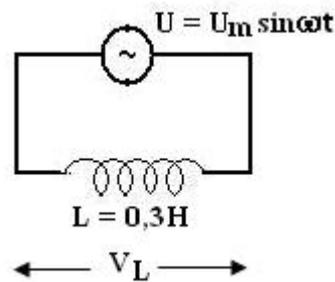


Pour renforcer vos acquis, donnez la représentation de Fresnel qui correspond à ce circuit et en déduire son impédance  $Z$  et le déphasage entre la tension appliquée et le courant.



### Exercices de remédiation

113Ω. Relation de phase entre la tension aux bornes de l'inductance L et le courant qui la traverse.



La différence de potentiel instantanée bornes de la bobine est :

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = U_m \sin \omega t$$

$I_L$  est le courant instantané qui parcourt le circuit.

En intégrant, on obtient :

$$I_L = -\frac{U_m}{\omega L} \cos \omega t = \frac{U_m}{\omega L} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) = I_{Lm} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

La tension est en avance sur le courant de  $90^\circ$ .

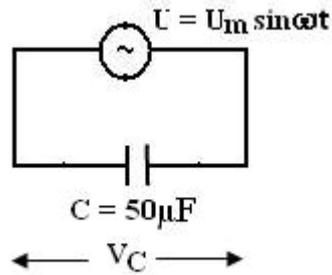
$I_{Lm} = \frac{U_m}{\omega L} = \frac{U_m}{X_L}$  (1) est l'amplitude de courant. Cette relation (1) nous rappelle la forme de la loi d'Ohm ( $U = RI$ ).

$X_L = \omega L$  est appelée Réactance inductive et joue le rôle d'une résistance.

$$\text{A.N. } X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 60\text{Hz} \times 0,3H = 113 \Omega.$$



53Ω. Relation de phase entre la tension aux bornes du condensateur et le courant qui traverse le circuit.



$$V_C = \frac{q}{C} = U_m \sin \omega t \text{ (d.d.p aux bornes du condensateur)}$$

$$\text{Le courant instantané qui parcourt ce circuit est : } I_C = \frac{dq}{dt}$$

On obtient :

$$I_C = \omega C U_m \cos \omega t = \omega C U_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

Le courant est en avance sur la tension de  $90^\circ$ .

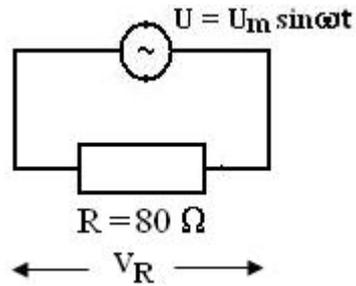
$$I_{Cm} = \omega C U_m = \frac{U_m}{\left( \frac{1}{\omega C} \right)} = \frac{U_m}{X_C} \text{ (amplitude de courant).}$$

$X_C$  est appelée réactance capacitive.

$$\text{A.N. } X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \times 60\text{Hz} \times 5010^{-6}\text{F}} \approx 53 \Omega.$$



80Ω. Relation de phase entre la tension aux bornes de la résistance et le courant qui la parcourt.



La d.d.p aux bornes de cette résistance dans ce cas est :

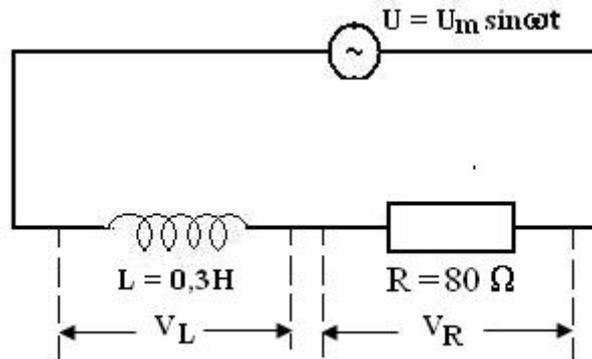
$$V_R = RI_R = U_m \sin \omega t \Rightarrow I_R = \frac{U_m}{R} \sin \omega t. \text{ Le courant et la tension sont en phase.}$$

$$\text{Ou } I_R = I_{Rm} \sin \omega t \text{ avec } I_{Rm} = \frac{U_m}{R}$$

$R = 80 \Omega$  d'après l'énoncé



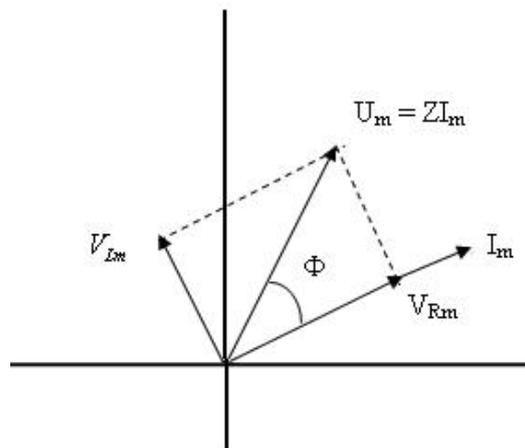
138,5  $\Omega$  : Etude du circuit LR : représentation de Fresnel, impédance et relation de phase.



$V_L$  est en avance de  $90^\circ$  sur le courant.

$V_R$  est en phase avec le courant.

La représentation de Fresnel correspondant à ce circuit est :



En utilisant le théorème de Pythagore, on a :

$$U_m^2 = V_{Rm}^2 + V_{Lm}^2$$

Mais  $V_{Rm} = R I_m$  et  $V_{Lm} = X_L I_m$

$$\Rightarrow U_m^2 = I_m^2 (R^2 + X_L^2)$$

$$U_m = I_m \sqrt{R^2 + X_L^2} = I_m Z \text{ avec}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$



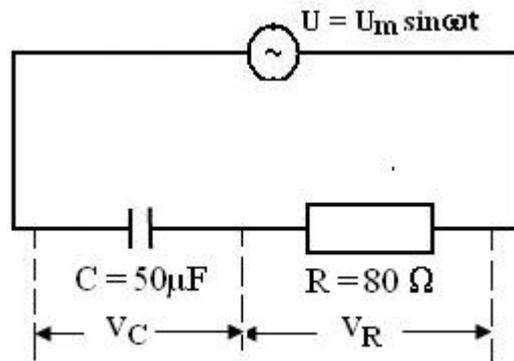
$$\text{A.N. : } Z = \sqrt{(80)^2 + (113)^2} = 138,5\Omega$$

$$\tan\Phi = \frac{V_{Lm}}{V_{Rm}} = \frac{X_L}{R} = \frac{113}{80} = 1,4125.$$

Le courant est en retard de  $\Phi = 54^{\circ},70$  sur la tension appliquée.



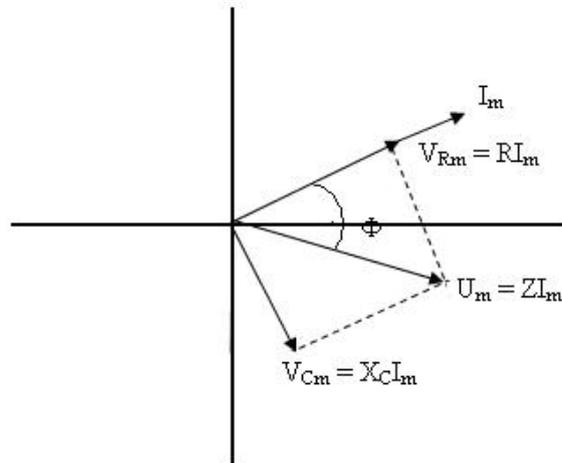
96  $\Omega$  : Etude du circuit CR.



$V_C$  est en retard de  $90^\circ$  sur le courant

$V_R$  est en phase avec le courant.

La représentation de Fresnel donne :



$$U_m^2 = I_m^2 (R^2 + X_C^2)$$

$$U_m = I_m \sqrt{R^2 + X_C^2} = I_m Z \text{ avec}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

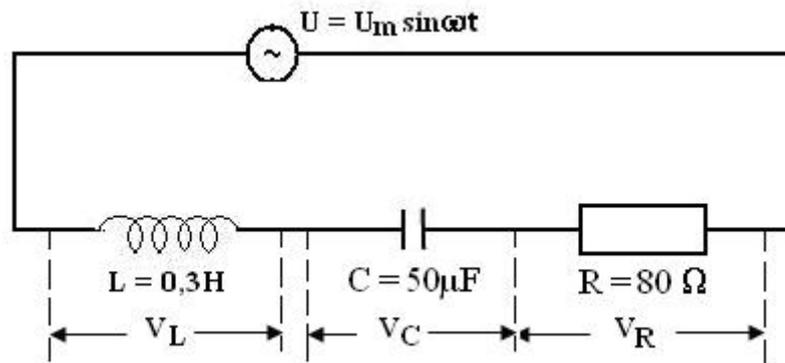
$$\text{A.N. : } Z = \sqrt{(80)^2 + (53)^2} \approx 96\Omega.$$

$$\tan\Phi = \frac{V_{Cm}}{V_{Rm}} = \frac{X_C}{R} = \frac{53}{80} = 0,6625.$$

Le courant est en avance de  $\Phi = 33^\circ 52'$  sur la tension appliquée.



= 100  $\Omega$  : Etude du circuit R-L-C série



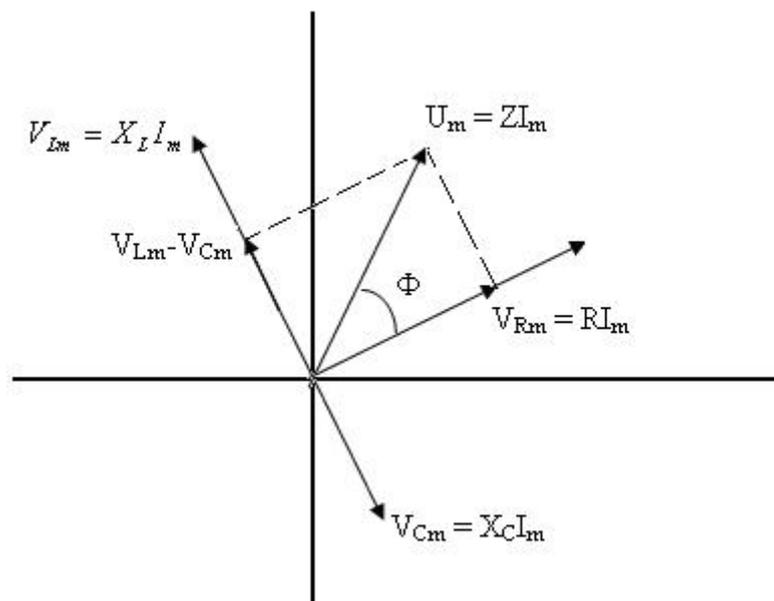
$V_L$  est en avance de  $90^\circ$  sur le courant

$V_C$  est en retard de  $90^\circ$  sur le courant.

$V_R$  est en phase avec le courant

$$X_L = 113 \Omega \text{ et } X_C = 53 \Omega \Rightarrow X_L > X_C$$

La représentation de Fresnel correspondant à ce circuit est :



$$V_{Lm} - V_{Cm} = (X_L - X_C) I_m$$



Le théorème de Pythagore donne :

$$U_m^2 = [R^2 + (X_L - X_C)^2] I_m^2$$

$$U_m = I_m \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = I_m Z \quad \text{avec} \quad Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$\text{A.N. : } Z = \sqrt{(80)^2 + (113 - 53)^2} = 100\Omega$$

$$\tan\Phi = \frac{V_{Lm} - V_{Cm}}{V_{Rm}}$$

$$= \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{113 - 53}{80} = 0,75$$

Le courant est en retard de  $\Phi = 37^\circ$  sur la tension appliquée.

$$\text{Remarquez aussi que } \cos\Phi = \frac{R}{Z}$$

### Exercice 1-b

$I = 1,70\sin(120\pi t - 0,6458)$ . **Bonne réponse.** Confrontez votre solution à celle proposée ci-dessous.

### Solution détaillée

Reprenons les résultats que nous avons trouvés dans l'étude du circuit R- L- C série :

$$Z = 100\Omega$$

$$\tan\Phi = 0,75 \Rightarrow \Phi = 37^\circ$$

$$\text{ou } \Phi = 0,6458 \text{ rad}$$

$\tan\Phi$  est positif, donc la tension est en avance de  $\Phi$  sur le courant.

Le courant instantané qui parcourt le circuit est alors :  $i = I_m \sin(\omega t - \Phi)$  (1) avec  $\Phi$  ici exprimé en radian :  $\omega = 2\pi f = 2\pi \times 60 \text{ Hz} = 120\pi \text{ rads}^{-1}$ .

$$I_m = \frac{U_m}{Z}$$

( $I_m$  : amplitude de courant ;  $U_m$  : amplitude de tension)



$$\text{On a : } U_m = U_{\text{eff}} \times \sqrt{2} = (120 \text{ V}) \times \sqrt{2}$$

$$\text{D'où } I_m = \frac{120\sqrt{2}}{100} = 1,70 \text{ A}$$

La relation (1) devient :

$$I = 1,70 \sin (120\pi t - 0,6458)$$

$I = 1,70\sin (120\pi t + 0,6458)$  **Faux !** En effet cette expression, décrit un courant qui est en avance de phase par rapport à la tension appliquée or c'est juste le contraire qui se passe ici : le courant est en retard de  $\Phi = 0,6458$  rad sur la tension.

### Visite de sites

Les sites suivants vous proposent des animations des phénomènes physiques relatifs au thème de votre étude. **Deux recommandations pour mieux progresser :**

- **observez** chaque animation attentivement
- ce que vous remarquez lors de ces animations, tâchez de le **mettre en relation** avec tout ce que vous avez appris au cours des étapes précédentes.

[http://perso.orange.fr/daniel.robert9/tension\\_alternative0.html](http://perso.orange.fr/daniel.robert9/tension_alternative0.html)

[http://perso.orange.fr/daniel.robert9/tension\\_alternative1.html](http://perso.orange.fr/daniel.robert9/tension_alternative1.html)

Ces deux sites abordent respectivement l'étude des caractéristiques des circuits capacitifs et inductifs et expliquent en détails les réactances capacitive et inductive et le déphasage entre la tension et le courant dans ces circuits.

[http://perso.orange.fr/daniel.robert9/tension\\_alternative1.html](http://perso.orange.fr/daniel.robert9/tension_alternative1.html)

[http://www.walter-fendt.de/ph11f/accircuit\\_f.htm](http://www.walter-fendt.de/ph11f/accircuit_f.htm)

Vous pouvez visualiser sur ces sites les diagrammes de Fresnel et les oscillations de tension et de courant qui correspondent à :

- un circuit comportant uniquement une résistance
- un circuit comportant uniquement une inductance
- un circuit comportant uniquement une capacité

<http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/electri/rlcsinus.html>

Il s'agit ici d'une étude des circuits RLC série. Ce site montre :

- une animation des oscillations de tension et d'intensité
- des courbes d'intensité et de déphasage



## Résumé 1

Soit un circuit branché à une source de tension alternative  $U = U_m \sin \omega t$  et I le courant d'amplitude  $I_m$  qui le parcourt.

### Ce qu'il faut retenir :

Le circuit ne contient qu'une résistance R.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- U et I sont en phase</li> <li>- <math>I_m = \frac{U_m}{R}</math></li> </ul>
Le circuit ne contient qu'une inductance L dont la résistance est négligeable.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- U est en avance de <math>90^\circ</math> sur I.</li> <li>- <math>I_m = \frac{U_m}{X_L}</math> ; <math>X_L = L\omega =</math> réactance inductive.</li> </ul>
Le circuit ne contient qu'une capacité C.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- U est en retard de <math>90^\circ</math> sur I.</li> <li>- <math>I_m = \frac{U_m}{X_C}</math> ; <math>X_C = \frac{1}{C\omega} =</math> réactance capacitive.</li> </ul>
Le circuit est une résistance R et une inductance L montées en série avec U.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'angle de déphasage entre la tension U et le courant I est <math>\Phi</math> tel que <math>\tan \Phi = \frac{X_L}{R}</math></li> <li>- U est en avance de <math>\Phi</math> sur I</li> <li>- <math>I_m = \frac{U_m}{Z}</math> ; impédance <math>Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}</math></li> <li>- <math>\cos \Phi = \frac{R}{Z}</math></li> </ul>



<p>Le circuit est une résistance R et une capacité C montées en série avec U.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'angle de déphasage entre U et I est <math>\Phi</math> tel que <math>\tan\Phi = \frac{X_C}{R}</math></li> <li>- U est en retard de <math>\Phi</math> sur I</li> <li>- <math>I_m = \frac{U_m}{Z}</math> ; impédance <math>Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}</math></li> <li>- <math>\cos\Phi = \frac{R}{Z}</math></li> </ul>
<p>Le circuit est constitué d'une résistance R, d'une inductance L et d'une capacité C montées en série avec U.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'angle de déphasage entre la tension U et le courant I est tel que <math>\tan\Phi = \frac{X_L - X_C}{R}</math></li> <li>Si <math>\tan\Phi</math> est positif alors U est en avance de <math>\Phi</math> sur I ; si <math>\tan\Phi</math> est négatif alors U est en retard de <math>\Phi</math> sur I.</li> <li>- <math>I_m = \frac{U_m}{Z}</math> ; <math>Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}</math></li> <li>- <math>\cos\Phi = \frac{R}{Z}</math></li> </ul>

## Corrigé de l'exercice 2

$R + \frac{1}{jC\omega}$ . Ceci ne peut être la bonne réponse car le circuit ne comporte pas de capacité. Cette expression représente plutôt l'impédance complexe d'un circuit composé d'une résistance et d'une capacité connectées en série et branché aux bornes d'une source de tension  $U = U_m \sin\omega t$ .

$R + jL\omega$ . **Bravo. Bonne réponse.** Nous avons ici un montage en série. Dans un montage en série, les impédances complexes des différents éléments s'ajoutent. Rappelez-vous aussi que le module de l'impédance complexe donne l'impédance

du circuit. Ce module est ici  $\sqrt{R^2 + L^2\omega^2} = \sqrt{R^2 + X_L^2}$  : c'est bien le résultat que nous avons trouvé dans l'exercice 1

**(consultez de nouveau la solution de cet exercice).**

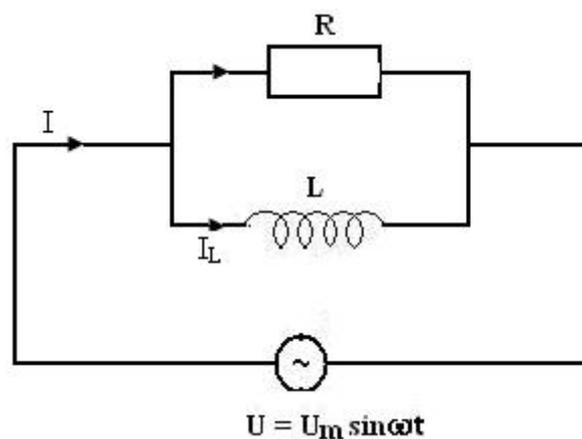


$\frac{1}{R} + \frac{1}{jL\omega}$  est relié à l'impédance complexe d'un circuit constitué d'une résis-

tance et d'une inductance montées en parallèle aux bornes d'une source de tension alternative  $U = U_m \sin \omega t$ . Ce n'est donc pas la bonne réponse.

**Exercice complémentaire :** pour en savoir plus, cherchez l'impédance de ce circuit.

### Corrigé de l'exercice complémentaire



#### 1<sup>ère</sup> méthode

Utilisons l'impédance complexe  $\bar{Z}$ .

$$\text{Nous avons } \frac{1}{\bar{Z}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{jL\omega} = \frac{1}{R} + \frac{1}{jX_L}$$

$$\rightarrow \bar{Z} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{jX_L}} = \frac{jRX_L}{R + jX_L} = \frac{jRX_L(R - jX_L)}{R^2 + X_L^2}$$

$$\bar{Z} = \frac{RX_L^2 + jR^2X_L}{R^2 + X_L^2}$$

L'impédance  $Z$  est le module de  $\bar{Z}$ .



$$Z = \sqrt{\left(\frac{RX_L}{R^2 + X_L^2}\right)^2 + \left(\frac{R^2 X_L}{R^2 + X_L^2}\right)^2} = \sqrt{\frac{R^2 X_L^2 (R^2 + X_L^2)}{(R^2 + X_L^2)^2}}$$

$$Z = \frac{RX_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

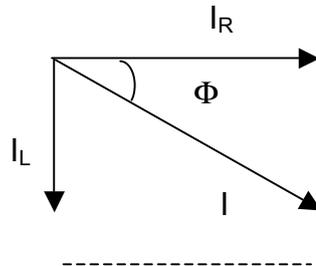
### 2<sup>ème</sup> méthode :

On utilise la représentation de Fresnel pour les courants.

Remarquons que  $V_L = V_R = U$ ,  $V_L$  et  $V_R$  étant respectivement les différences de potentiel aux bornes de l'inductance et de la résistance.

$I_R$  et  $V_R$  sont en phase.

$V_L$  est en avance de  $90^\circ$  sur  $I_L$  donc il s'ensuit que  $I_L$  est en retard de  $90^\circ$  sur  $I_R$  (voir  $V_L = V_R$  et  $I_R$  et  $V_R$  sont en phase).



$$\text{On a alors : } I^2 = I_R^2 + I_L^2 = \left(\frac{U}{R}\right)^2 + \left(\frac{U}{X_L}\right)^2$$

$$\rightarrow I = U \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_L^2}}$$

On en déduit l'impédance  $Z$  :



$$Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_L^2}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{R^2 X_L^2}{R^2 X_L^2 + X_L^2}}} = \frac{R X_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

## Résumé 2

### Ce qu'il faut retenir :

Pour trouver l'impédance complexe  $\bar{Z}$  d'un circuit en courant alternatif il faut dans ce circuit :

- Remplacer chaque inductance L par son impédance complexe  $jL\omega$ .
- Remplacer chaque capacité C par son impédance complexe  $\frac{1}{j\omega C}$ .
- Garder inchangées les résistances Ohmiques R.
- Additionner les impédances complexes de ces différents éléments pour un montage en série.
- Additionner les inverses des impédances complexes de ces différents éléments pour un montage en parallèle.

Le module de  $\bar{Z}$  donne l'impédance du circuit. L'argument  $\Phi$  de  $\bar{Z}$  est l'avance de phase de la tension appliquée sur le courant : si  $\bar{Z} = x + j y$

$$\text{alors } \tan\Phi = \frac{y}{x}$$

### Auto évaluation

Les apprenant(e)s consigneront les difficultés rencontrées et les erreurs commises pendant la recherche des solutions des exercices afin de pouvoir les éviter plus tard. Ils/Elles pourront revoir les parties du cours qu'ils n'ont pas bien comprises et préparer l'évaluation sommative.

### Guide de l'enseignant

Le Professeur corrigera les productions des groupes. Il dépose la correction dans un espace de travail accessible aux apprenant(e)s. La correction est accompagnée d'un feedback adéquat. Les notes obtenues pour chaque groupe sont attribuées aux membres du groupe et vont compter pour 10% de l'évaluation finale du module.



## Unité 1 : Circuits à courant alternatif

### Activité d'apprentissage 1-2

#### Titre de l'activité

Résonance série : bande passante et facteur de qualité

#### Temps d'apprentissage : 15H

**Consigne :** Pour cette activité, si vous avez au **moins  $\frac{3}{4}$  des points**, vous avez fait du très bon travail, vous pouvez continuer.

Si vous avez **moins de la moitié des points**, vous devez relire les lectures proposées et refaire l'activité.

Si vous avez **plus de la moitié des points et moins de  $\frac{3}{4}$  des points**, vous avez fait du bon travail, mais vous devez faire des efforts pour la suite.

#### Objectifs spécifiques

A l'issue de cette activité, vous devez être capable de :

- décrire les caractéristiques de l'état de résonance d'un circuit RLC série
- décrire la variation du courant qui parcourt un circuit RLC série en fonction de la pulsation de la tension appliquée
- décrire la variation de l'impédance du circuit en fonction de la pulsation de la tension appliquée
- déterminer graphiquement la bande passante d'un circuit RLC série
- tracer la réactance capacitive en fonction de la pulsation
- tracer la réactance inductive en fonction de la pulsation
- établir l'expression littérale de la bande passante en fonction de R et L
- établir l'expression littérale du facteur de qualité en fonction de R, L et C

#### Résumé de l'activité

Cette activité porte encore sur les circuits à courant alternatif. Il s'agit cette fois - ci d'étudier le phénomène de résonance dans un circuit comportant en série une résistance, une capacité et une inductance et aux bornes duquel on fait agir une tension sinusoïdale dont on fait varier la pulsation tout en gardant son amplitude constante. Vous aurez à analyser les effets de cette variation sur l'amplitude du courant et sur l'impédance du circuit. Vous aurez à dégager les caractéristiques de l'état de résonance. Un complément de cours sur les notions de « bande passante » et de « facteur de qualité » vous est aussi proposé.



### **Lectures appropriées**

RASOLONDRAMANITRA, H. (2007). Circuits à courant alternatif. Madagascar. Université d'Antananarivo. Cours inédit.

### **Ressources pertinentes**

BEISER, A. (1979). Physique appliquée : Cours et problèmes. Série Schaum. Traduction française par LOBENBERG M. McGraw-Hill, Paris

BRAMAND, P., FAYE, P. et THOMASSIER, G. (1983). Physique- Terminales C et E. Collection Eurin-Gié. Hachette, Paris.

BREITHAUP, J. (2000). New Understanding : Physics for Advanced Level. Fourth Edition, Stanley Thornes Publishers Ltd, England ,

HALPERN, A. (1991) Maxi Schaum Physique 2. Traduction française par BABES, V. McGraw-Hill, Paris

KALACHNIKOV, S. (1980). Electricité. Traduction française. Editions Mir, Moscou, Réédition : 1983

NELKON, M. and PARKER, P. (1998). Advanced Level Physics. Seventh Edition, Heinemann, (Oxford ?)

RESNICK, R. et HALLIDAY, D. (1979). Electricité et magnétisme, physique 2. Traduit par André Lebel et Claudine Thériault. Editions du Renouveau Pédagogique. Inc. Montréal (Québec) Canada

SEARS.F.W., ZEMANSKY, M. W. and YOUNG. H. D. (1987). University Physics. Seventh Edition, Addison-Wesley Publishing Company, USA.

SEARS.F.W., ZEMANSKY, M. W. and YOUNG, H. D. (1974). College Physics. Fourth Edition. Addison-Wesley Publishing Company, USA.

TIPLER, P.-A. and Company. (1999). Physics for Scientists and Engineers. Fourth Edition. W.H. FREEMAN and company. Worth Publishers Inc., New York, USA

TIPLER, P. A. (1982). Physics. Second Edition. Worth Publishers Inc, New York, USA

### **Liens utiles**

[http://labo.ntic.org/RLC\\_serie/RLC.html](http://labo.ntic.org/RLC_serie/RLC.html)

[http://hebergement.ac-poitiers.fr/l-cc-angouleme/coulomb-exos-phy/applets/RLC\\_serie/RLC.htm](http://hebergement.ac-poitiers.fr/l-cc-angouleme/coulomb-exos-phy/applets/RLC_serie/RLC.htm)

[http://perso.orange.fr/olivier.granier/electro/simul/cour\\_rlc/circuitRLC4.htm](http://perso.orange.fr/olivier.granier/electro/simul/cour_rlc/circuitRLC4.htm)



<http://www.fundp.ac.be/sciences/physique/didactique/elec/RLC4.php>

<http://www.fundp.ac.be/sciences/physique/didactique/elec/RLC3.php>

[http://perso.orange.fr/olivier.granier/electro/simul/cour\\_rlc/circuitRLC3.htm](http://perso.orange.fr/olivier.granier/electro/simul/cour_rlc/circuitRLC3.htm)

<http://sitelec.free.fr/cours/rlcseries.pdf>

<http://www.physique-eea.unicaen.fr/enseignement/deug-st/sm/dsm153/poly/dsm153-e.pdf>

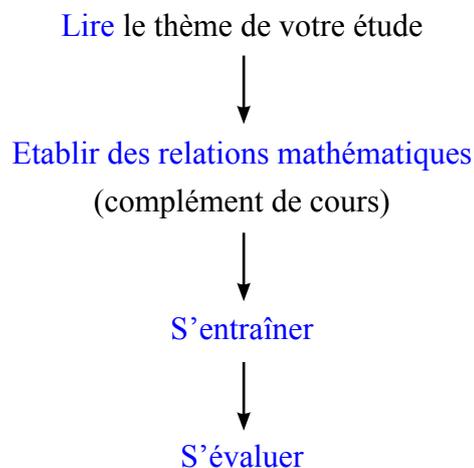
[http://www.unilim.fr/pages\\_perso/frederic.louradour/Oscillo\\_2.PDF](http://www.unilim.fr/pages_perso/frederic.louradour/Oscillo_2.PDF)

## Description de l'activité

Dans cette activité :

1. une lecture sur le thème de « résonance » vous est proposée en vue d'une première imprégnation
2. intervient alors un complément de cours sur la notion de « bande passante » et « facteur de qualité » afin de consolider les apports des étapes précédentes ; vous prendrez une part active au cours de cette étape en établissant les expressions mathématiques correspondant à ces deux notions
3. vous aurez ensuite à résoudre un certain nombre d'exercices dans le but de vérifier ce que vous avez retenu à l'issue de ces deux premières étapes.
4. puis par des liens vous serez guidé vers des sites qui traitent le thème de votre étude et/ou qui proposent des animations
5. Un résumé de ce qu'il faut retenir vous est proposé

Votre parcours peut être visualisé ainsi :





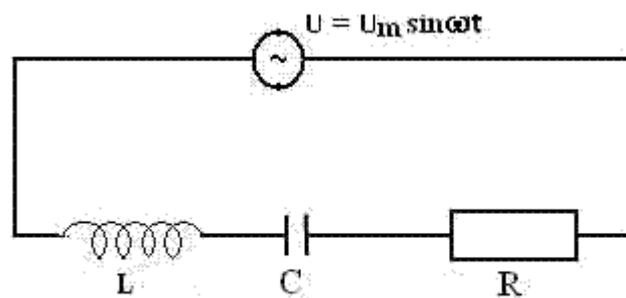
## Évaluation formative

Les apprenant(e)s font obligatoirement tous les exercices en travail collaboratif. La note du groupe est commune aux différents membres du groupe.

**L'exercice 1 compte pour 30% des points et l'exercice 2 pour 70% des points**

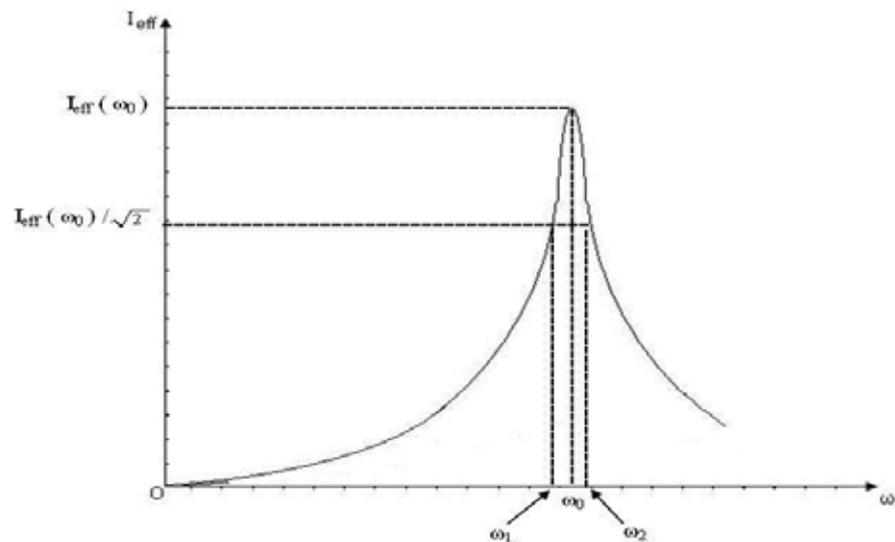
### Complément de cours : Bande passante et facteur de qualité

Soit le circuit suivant. On fait varier la pulsation  $\omega$  tout en gardant l'amplitude de la tension constante



Pour ce qui va suivre, on raisonnera sur les valeurs efficaces. La courbe ci-dessous décrit  $I_{\text{eff}}$  en fonction de  $\omega$ . Cette courbe présente un maximum pour  $\omega = \omega_0$ .

### A- Bande passante





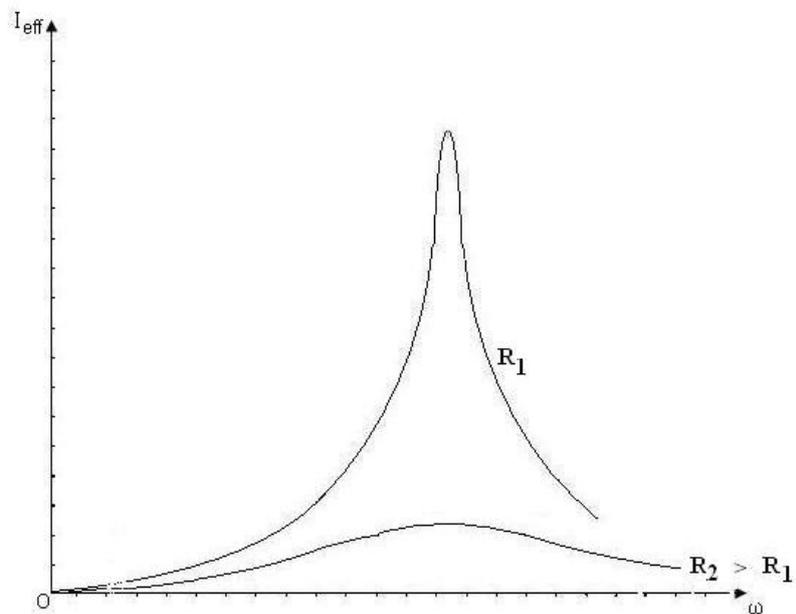
Repérons les pulsations  $\omega_1$  et  $\omega_2$  qui provoquent des courants d'intensité efficace :

$$I_{\text{eff}}(\omega_1) = I_{\text{eff}}(\omega_2) = I_{\text{eff}}(\omega_0) / \sqrt{2}$$

La différence  $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$  est appelée **bande passante** du circuit (RLC). Elle s'exprime en radian par seconde.

Plus la bande passante est étroite, plus la résonance est aigue. Dans ce cas les sources de tensions sinusoïdales qui ont des pulsations  $\omega$  comprises entre  $\omega_1$  et  $\omega_2$  provoquent le passage d'un courant d'intensité élevée dans le circuit. Les fréquences capables d'exciter le circuit se trouvent dans un domaine très étroit. On dit que le circuit est sélectif

Pour une résistance plus grande, la courbe est plus aplatie et la résonance est floue





## B- Facteur de qualité

Le rapport  $Q = \omega_0 / \Delta\omega$  est appelé **facteur de qualité**.

Plus la résonance est aigue, plus le facteur de qualité est élevé

### Expressions de la bande passante et du facteur de qualité

**Consigne :**

Montrez que :

- la bande passante a pour expression  $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = R / L$
- le facteur de qualité s'écrit :  $Q = \omega_0 / \Delta\omega = L \omega_0 / R = 1 / (CR \omega_0) = (1 / R)(L / C)^{1/2}$

## Démonstration

### A : Bande passante

**Rappelez comment la Bande passante a été définie :**

La bande passante est :

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$$

où  $\omega_1$  et  $\omega_2$  sont les pulsations pour lesquelles on a :

$$I_{\text{eff}}(\omega_1) = I_{\text{eff}}(\omega_2) = I_{\text{eff}}(\omega_0) / \sqrt{2} \quad (1)$$

$I_{\text{eff}}(\omega_0)$  et  $\omega_0$  sont respectivement l'intensité efficace et la pulsation à la résonance

Il s'agit donc de déterminer  $\omega_2 - \omega_1$ . Analysez la relation (1): elle contient des intensités efficaces évaluées en  $\omega_0$ ,  $\omega_1$  et  $\omega_2$ . Quelle est la relation entre  $I_{\text{eff}}$  et  $Z(\omega)$  ?

L'impédance du circuit et l'intensité efficace varient avec la pulsation  $\omega$ :

$$Z(\omega) = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$$



$$I_{\text{eff}}(\omega) = \frac{U_{\text{eff}}}{Z(\omega)}$$

⇒ • à la résonance

$$\omega = \omega_0$$

$$Z(\omega_0) = R$$

$$I_{\text{eff}}(\omega_0) = \frac{U_{\text{eff}}}{Z(\omega_0)} = \frac{U_{\text{eff}}}{R} \quad (2)$$

⇒ • pour  $\omega = \omega_1$

$$I_{\text{eff}}(\omega_1) = \frac{U_{\text{eff}}}{Z(\omega_1)}$$

⇒ • pour  $\omega = \omega_2$  (3)

$$I_{\text{eff}}(\omega_2) = \frac{U_{\text{eff}}}{Z(\omega_2)}$$

**Portez les relations (2) et (3) dans (1)**

La relation (1) devient :

$$\frac{U_{\text{eff}}}{Z(\omega_1)} = \frac{U_{\text{eff}}}{Z(\omega_2)} = \frac{U_{\text{eff}}}{R\sqrt{2}} \Rightarrow Z(\omega_1) = Z(\omega_2) = R\sqrt{2} \quad (4)$$

**Il faut maintenant déduire de l'expression (4) une relation qui permet de trouver  $\omega_1$  et  $\omega_2$**

La relation (4) permet d'écrire :

$$Z^2(\omega) = 2R^2$$



$$R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2 = 2R^2$$

$$\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2 = R^2$$

$$\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right) = \pm R \quad (5)$$

Que peut-on obtenir de la relation (5) ?

La relation (5) donne deux équations du second degré :

$$LC\omega^2 + RC\omega - 1 = 0 \quad (6)$$

$$LC\omega^2 - RC\omega - 1 = 0 \quad (7)$$

Résolvez ces deux équations

Ces deux équations ont un discriminant positif :

$$\Delta = R^2C^2 + 4LC > 0 \quad (\text{remarquez aussi que } \sqrt{\Delta} > RC)$$

Les solutions de l'équation (6) sont :

$$\omega_1 = \frac{-RC + \sqrt{\Delta}}{2LC} > 0 \quad \text{et} \quad \omega_1^0 = \frac{-RC - \sqrt{\Delta}}{2LC} < 0$$

Les solutions de l'équation (7) sont :

$$\omega_2 = \frac{RC + \sqrt{\Delta}}{2LC} > 0 \quad \text{et} \quad \omega_2^0 = \frac{RC - \sqrt{\Delta}}{2LC} < 0$$



On ne retient que les valeurs positives car la pulsation est une grandeur positive. La bande passante est donc :

$$\blacktriangleright \Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = \frac{R}{L}$$

### B : Facteur de qualité

Le facteur de qualité est :  $Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega}$

Remplacez  $\Delta\omega$

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{L\omega_0}{R}$$

A la résonance  $X_L = X_C \Rightarrow L\omega_0 = \frac{1}{C\omega_0}$

$$\blacktriangleright Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{L\omega_0}{R} = \frac{1}{CR\omega_0}$$

Remplacez  $\omega_0$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\blacktriangleright Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{L\omega_0}{R} = \frac{1}{CR\omega_0} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$



## Exercice 1

Soit un circuit série R-L-C branché aux bornes d'une source de tension alternative  $U = U_m \sin \omega t$ . On fait varier la pulsation  $\omega$  tout en gardant constante l'amplitude  $U_m$ .

- 1- Rappeler les caractéristiques de l'état de résonance de ce circuit
- 2- Tracer en fonction de  $\omega$  et dans le même repère la résistance R, la réactance capacitive  $X_C$  et la réactance inductive  $X_L$ .
- 3- Utiliser le graphique obtenu pour retrouver les caractéristiques de l'état de résonance.

## Exercice 2

Une résistance  $R = 200 \Omega$ , un condensateur de capacité  $C = 0,7 \mu\text{F}$  et une bobine d'inductance  $L = 1,43 \text{H}$  sont montés en série aux bornes d'une source de tension sinusoïdale de valeur efficace constante  $U_{\text{eff}} = 24 \text{V}$  et de pulsation variable  $\omega$ .

Les valeurs de l'intensité efficace  $I_{\text{eff}}$  pour différentes pulsations sont consignées dans le tableau ci-dessous.

1. Complétez et commentez le tableau
2. Tracez R, Z,  $X_C$  et  $X_L$  en fonction de  $\omega$  et dans le même repère
3. Tracez  $I_{\text{eff}}$  en fonction de  $\omega$  et déterminez graphiquement la pulsation à l'état de résonance, la bande passante et le facteur de qualité Q. Retrouvez les valeurs de R, L, C.

$\omega$ (rad.s <sup>-1</sup> )	$I_{\text{eff}}$ (10 <sup>-3</sup> A)	Z ( $\Omega$ )	R ( $\Omega$ )	$X_L$ ( $\Omega$ )	$X_C$ ( $\Omega$ )
100	1,7				
300	5,6				
500	11,3				
600	15,8				
700	22,8				
800	36				
850	47,7				
900	66,8				
950	97				
1000	120				
1050	98,7				
1100	71,4				
1150	54				
1200	43,1				
1300	30,9				
1400	24,2				
1500	20,1				
1600	17,2				
2000	11,3				
2500	8,1				
3000	6,4				



## Activités d'apprentissage

- Lire attentivement les lectures appropriées et le complément de cours
- Donner les expressions littérales de la bande passante en fonction de R et L et du facteur de qualité en fonction de R, L et C
- Echanger en chat ce qui n'est pas compris en demandant des explications aux autres apprenant(e)s. Un tuteur supervise le chat et rectifie au besoin.

Si tout est au point, les apprenant(e)s commenceront par faire les exercices.

Pour cela, les apprenants seront divisés en groupe pour un travail collaboratif.

- Pour chaque exercice, chaque groupe désigne un rapporteur et cherche la solution pour un temps fixé par le tuteur.
- Les rapporteurs sous la supervision des autres membres des groupes envoient les solutions au professeur titulaire par e-mail en fichier attaché.
- Lire les résumés proposés et les imprimer au besoin

## Réponses clés

### Solution de l'exercice 1

#### 1) Caractéristiques de l'état de résonance

A la résonance :

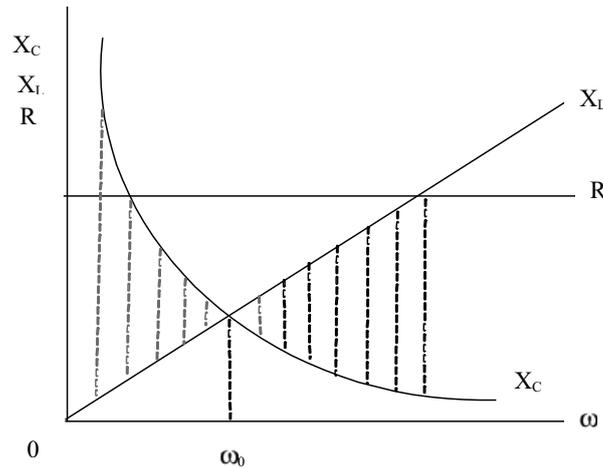
- la pulsation  $\omega$  est égale à la pulsation propre  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ,
- les réactances inductive et capacitive sont égales :  $X_L = X_C$
- l'impédance du circuit est  $Z = R$
- l'amplitude  $I_m$  du courant est maximale :  $Z I_m = U_m$
- le déphasage entre le courant et la tension aux bornes du circuit est nul.  
Le courant est en phase avec la tension

#### 2) R, $X_L$ et $X_C$ en fonction de $\omega$

Traçons  $R$ ,  $X_C = \frac{1}{C\omega}$  et  $X_L = L\omega$  en fonction de  $\omega$ .



R ne dépend pas de  $\omega$ . On obtient une droite parallèle à l'axe  $O\omega$ .



$X_L$  est une droite passant par l'origine et  $X_C$  varie en  $\frac{1}{\omega}$ . Ces deux courbes se coupent en  $\omega = \omega_0$ .

L'impédance de notre circuit est  $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ . Comment varient en fonction de  $\omega$  cette impédance et le courant  $I$  qui parcourt le circuit ? Pour le voir, portons notre attention sur  $(X_L - X_C)$  quand on fait augmenter  $\omega$ .  $(X_L - X_C)$  est représenté sur la figure par les lignes en pointillés.

Quand on fait augmenter  $\omega$  à partir de zéro  $|X_L - X_C|$  diminue et s'annule pour  $\omega = \omega_0$  puis augmente de nouveau pour  $\omega > \omega_0$ .

Consignons les résultats de notre observation dans le tableau ci-dessous.

$\omega$	0	$\omega_0$
$ X_L - X_C $		0
Z		R
$I = \frac{U}{Z}$		Maximum

On a la résonance quand le courant  $I$  atteint sa valeur maximale. Cette valeur apparaît quand la fréquence angulaire est égale à  $\omega_0$ . A cette fréquence :



$$X_L = X_C \Rightarrow L\omega_0 = \frac{1}{C\omega_0} \Rightarrow LC\omega_0^2 = 1 \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\text{Or } \omega_0 = 2\pi f_0 \Rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Remarquons aussi qu'à la résonance  $Z = R$ .

Le déphasage  $\Phi$  est tel que :

$$\tan\Phi = \frac{X_L - X_C}{R} \text{ et } \cos\Phi = \frac{R}{Z} \Rightarrow \tan\Phi = 0 \text{ et } \cos\Phi = 1$$

Il s'ensuit que  $\Phi = 0 \Rightarrow$  le courant et la tension sont en phase

### Corrigé de l'exercice 2

#### 1- Rappel des expressions de l'impédance $Z$ , des réactances $X_L$ et $X_C$ :

$$Z = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} ; X_L = L\omega ; X_C = \frac{1}{C\omega}$$

$$U_{\text{eff}} = 24\text{V} ; L = 1,43 \text{ H} ; C = 0,7\mu\text{F} ; R = 200\Omega$$

Après calcul, on obtient :

$\omega$ (rad.s <sup>-1</sup> )	$I_{\text{eff}}$ (10 <sup>-3</sup> A)	$Z$ ( $\Omega$ )	$R$ ( $\Omega$ )	$X_L$ ( $\Omega$ )	$X_C$ ( $\Omega$ )
100	1,7	14117,6	200	143	14285,7
300	5,6	4285,7	200	429	4761,9
500	11,3	2123,9	200	715	2857,1
600	15,8	1519	200	858	2380,9
700	22,8	1052,6	200	1001	2040,8
800	36	666,7	200	1144	1785,7
850	47,7	503,1	200	1215,5	1680,7
900	66,8	359,3	200	1287	1587,3
950	97	247,4	200	1358,5	1503,8
1000	120	200	200	1430	1428,6
1050	98,7	243,2	200	1501,5	1360,5
1100	71,4	336,1	200	1573	1298,7
1150	54	444,4	200	1644,5	1242,2
1200	43,1	556,8	200	1716	1190,5



1300	30,9	776,7	200	1859	1098,9
1400	24,2	991,7	200	2002	1020,4
1500	20,1	1194	200	2145	952,4
1600	17,2	1395,3	200	2288	892,9
2000	11,3	2123,9	200	2860	714,3
2500	8,1	2963	200	3575	571,4
3000	6,4	3750	200	4290	476,2

### Commentaires

Il ressort du tableau que :

- La résistance  $R$  est indépendante de la pulsation  $\omega$
- **Pour une valeur de  $\omega = \omega_0 = 1000 \text{ rad.s}^{-1}$** 
  - l'intensité efficace est maximale :  $I_{\text{eff}}(\omega_0) = 120 \text{ mA}$
  - l'impédance est minimale et elle est égale à  $R$ 

$$Z(\omega_0) = R = 200 \Omega$$
  - les réactances capacitive et inductive sont égales
 
$$X_L(\omega_0) = X_C(\omega_0) \approx 1430 \Omega$$

### On retrouve ici les propriétés de l'état de résonance

On peut aussi dégager du tableau que :

- **pour des pulsations  $\omega < \omega_0 \Rightarrow X_L < X_C$**

dans ce cas l'angle de déphasage  $\phi$  entre tension et courant est tel que :

$$\tan\phi = (X_L - X_C) / R \text{ est } < 0 \Rightarrow \text{la tension est en retard sur le courant}$$

### le circuit a un comportement capacitif

- **pour des pulsations  $\omega > \omega_0 \Rightarrow X_L > X_C$**

dans ce cas  $\tan\phi = (X_L - X_C) / R \text{ est } > 0 \Rightarrow \text{la tension est en avance sur le courant}$



### le circuit a un comportement inductif

• *pour*  $\omega = \omega_0 \Rightarrow X_L = X_C$  et  $R = Z$ , dans ce cas

$$\left. \begin{array}{l} \tan\phi = 0 \\ \cos\phi = (R / Z) = 1 \end{array} \right\} \Rightarrow \phi = 0$$

### la tension et le courant sont en phase

### 2. représentations graphiques de R, Z, $X_L$ et $X_C$

Les représentations graphiques de R, Z,  $X_L$  et  $X_C$  ci-dessous décrivent bien ces résultats :

A la résonance:

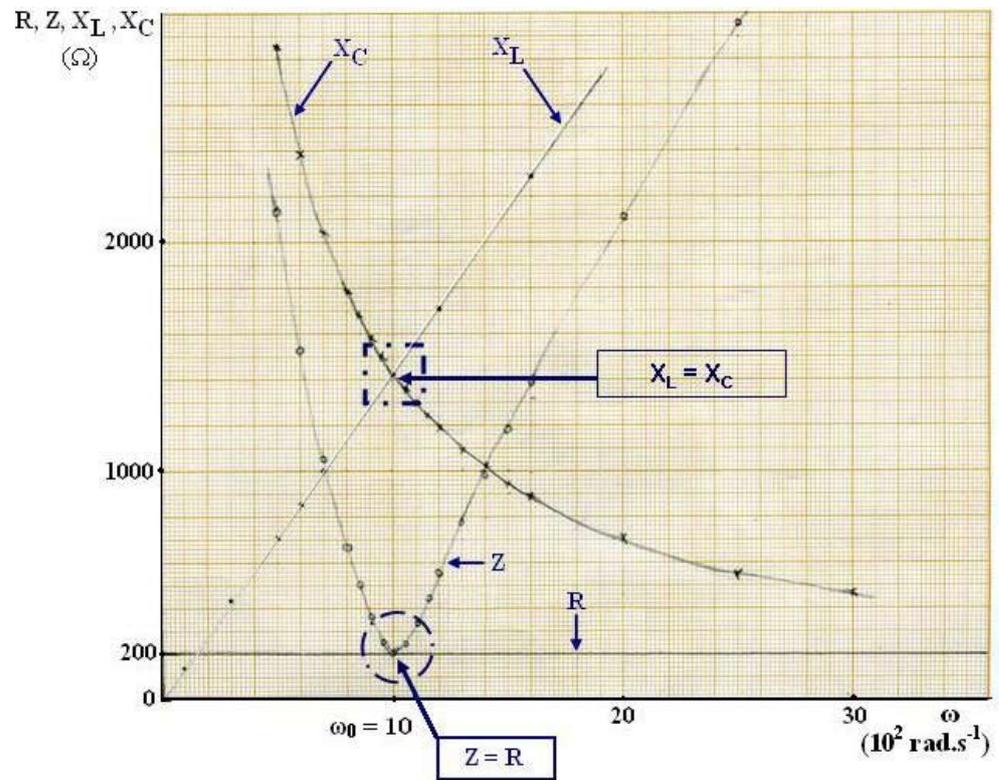
$$\omega = \omega_0 = 1000 \text{ rad.s}^{-1}$$

$$Z = R = 200 \Omega$$

$$X_L = X_C \approx 1430 \Omega$$

$$\text{Pour } \omega < \omega_0 \Rightarrow X_L < X_C$$

$$\text{Pour } \omega > \omega_0 \Rightarrow X_L > X_C$$



### 3-Intensité efficace en fonction de la pulsation

On déduit de la courbe de l'intensité efficace :

- la bande passante  $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = 140 \text{ rad.s}^{-1}$
- la fréquence de résonance  $\omega_0 = 1000 \text{ rad.s}^{-1}$

$$\bullet I_{\text{eff}}(\omega_0) = \frac{U_{\text{eff}}}{R} = 120 \times 10^{-3} \text{ A}$$

$$\Rightarrow R = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} = \frac{24 \text{ V}}{120 \times 10^{-3} \text{ A}} = 200 \Omega$$



- le facteur de qualité

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{1000 \text{ rad.s}^{-1}}{140 \text{ rad.s}^{-1}} = 7,14$$

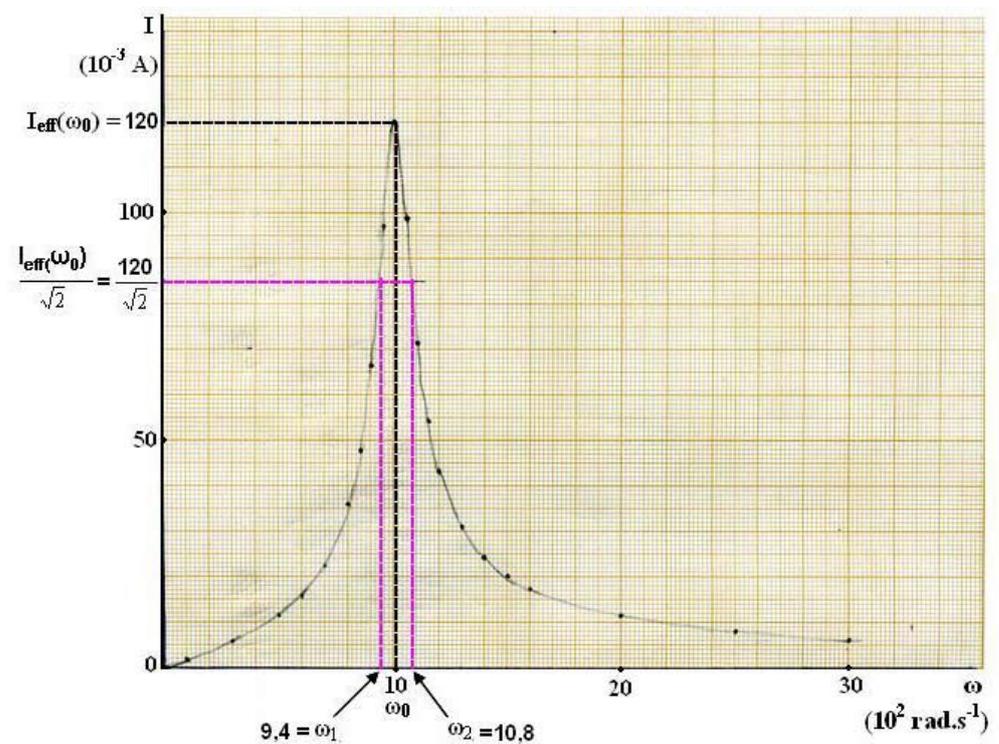
- l'expression de la bande passante permet de calculer l'inductance L

$$\Delta\omega = \frac{R}{L} \Rightarrow L = \frac{R}{\Delta\omega} = \frac{200 \Omega}{140 \text{ rad.s}^{-1}} \Rightarrow L = 1,43 \text{ H}$$

- on utilise l'expression du facteur de qualité pour calculer la capacité C

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{L\omega_0}{R} = \frac{1}{CR\omega_0}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{CR\omega_0} = \frac{1000}{140} \Rightarrow C = \frac{140}{1000R\omega_0} = 0,7 \mu\text{F}$$





## Visite de sites

Consultez les sites suivants et mettez ce que vous visualisez en relation avec ce que vous avez appris au cours de votre activité d'apprentissage.

- [http://labo.ntic.org/RLC\\_serie/RLC.html](http://labo.ntic.org/RLC_serie/RLC.html)
- [http://hebergement.ac-poitiers.fr/l-cc-angouleme/coulomb-exos-phy/applets/RLC\\_serie/RLC.htm](http://hebergement.ac-poitiers.fr/l-cc-angouleme/coulomb-exos-phy/applets/RLC_serie/RLC.htm)

Ces deux applets permettent de consolider vos acquis sur les circuits RLC série. Elles vous proposent de visualiser :

- les oscillations de tension et de courant
- l'impédance  $Z$ , les réactances capacitive  $X_C$  et inductive  $X_L$  en fonction de la fréquence de la source de tension
- l'intensité du courant en fonction de la fréquence de la source
- le déphasage entre la tension appliquée et le courant qui parcourt le circuit en fonction de la fréquence

Vous pouvez déduire de ces graphiques :

- les propriétés de l'état de résonance
- la bande passante

Vous pouvez varier indépendamment les valeurs des paramètres pertinents ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $f$ ) et suivre l'effet de cette variation.

- [http://perso.orange.fr/olivier.granier/electro/simul/cour\\_rlc/circuitRLC4.htm](http://perso.orange.fr/olivier.granier/electro/simul/cour_rlc/circuitRLC4.htm)
- <http://www.fundp.ac.be/sciences/physique/didactique/elec/RLC4.php>

Ces deux liens donnent un exercice interactif basé sur la fréquence de résonance et le facteur de qualité avec illustration graphique.

- <http://www.fundp.ac.be/sciences/physique/didactique/elec/RLC3.php>
- [http://perso.orange.fr/olivier.granier/electro/simul/cour\\_rlc/circuitRLC3.htm](http://perso.orange.fr/olivier.granier/electro/simul/cour_rlc/circuitRLC3.htm)

Il s'agit ici d'une applet qui propose de suivre dans un circuit RLC l'évolution de l'amplitude de la tension aux bornes d'un condensateur en fonction de la fréquence.

- <http://sitelec.free.fr/cours/rlcseries.pdf>

C'est un chapitre sur les circuits RLC série. Il examine en particulier les points suivants :

- calcul des réactances et de l'impédance
- tension aux bornes des éléments du circuit
- représentations temporelles et vectorielles des tensions et du courant
- résonance série



C'est une très bonne lecture pour compléter ce que vous avez appris jusqu'ici.

- <http://www.physique-eea.unicaen.fr/enseignement/deug-st/sm/dsm153/poly/dsm153-e.pdf>

Ce lien vous propose des protocoles de manipulation pour l'étude de la bobine R-L en courant continu et en courant alternatif et pour l'étude de la résonance. Il met en évidence, entre autres, le phénomène de résonance dans un circuit électrique simple : circuit résonant en série, surtension, bande passante et facteur de qualité.

- [http://www.unilim.fr/pages\\_perso/frederic.louradour/Oscillo\\_2.PDF](http://www.unilim.fr/pages_perso/frederic.louradour/Oscillo_2.PDF)

Ce site donne des protocoles de manipulation pour l'étude des circuits RLC série et parallèle



## Résumé

### Ce qu'il faut retenir :

#### Résonance

Quand une tension  $U = U_m \sin 2\pi ft$  de fréquence variable  $f$  est appliquée aux bornes d'un circuit série RLC, l'intensité du courant est maximale à la fréquence  $f_0 =$

$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  ou quand la pulsation est égale à  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ . On donne le nom d'état

de résonance à cet état.

$$\text{A la résonance : } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$X_C = X_L$$

$$Z = R$$

$$I_m = \frac{U_m}{Z} \text{ est maximale}$$

$$I_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{eff}}}{Z} \text{ est maximale}$$

I et U sont en phase

#### Bande passante

La bande passante  $\Delta\omega$  caractérise l'acuité de la résonance. Elle correspond à la différence des pulsations  $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ , pulsations pour lesquelles :

$I(\omega_1) = I(\omega_2) = \frac{I(\omega_0)}{\sqrt{2}}$  où  $I(\omega_1)$ ,  $I(\omega_2)$  et  $I(\omega_0)$  sont respectivement les intensités efficaces évaluées en  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  et  $\omega_0$ ,  $\omega_0$  étant la pulsation à l'état de résonance.

$$\Delta\omega = \frac{R}{L}$$

Plus la bande passante est étroite, plus la résonance est aigue.



### Facteur de qualité

Le facteur de qualité Q caractérise aussi l'acuité de la résonance. Il est défini par

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{L\omega_0}{R} = \frac{1}{CR\omega_0} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Plus le facteur de qualité est élevé, plus la résonance est aigue.

### Autoévaluation

Les apprenant(e)s prennent note des difficultés rencontrées au cours de l'activité d'apprentissage. Ils/Elles pourront revoir les parties du cours concernées afin de mieux cerner l'origine de leurs difficultés et erreurs.

### Guide de l'enseignant

Le Professeur corrigera les productions des groupes. Il/Elle déposera la correction dans un espace de travail accessible aux apprenant(e)s. La correction sera accompagnée d'un feedback adéquat. Les notes obtenues pour chaque groupe sont attribuées aux membres du groupe et vont compter pour 10% de l'évaluation finale du module.



## Activité d'apprentissage 2

### Titre de l'activité

- **Mouvement des particules chargées dans un champ magnétique et ses applications pratiques.**
- **Loi de Lenz, auto-induction et circuit RL**

### Temps d'apprentissage : 30 H

**Consigne :** Pour cette activité, si vous avez au **moins  $\frac{3}{4}$  des points**, vous avez fait du très bon travail, vous pouvez continuer.

Si vous avez **moins de la moitié des points**, vous devez relire les lectures proposées et refaire l'activité.

Si vous avez **plus de la moitié des points et moins de  $\frac{3}{4}$  des points**, vous avez fait du bon travail, mais vous devez faire des efforts pour la suite.

### Objectifs spécifiques

A l'issue de cette activité, vous devez être capable de (d') :

- **Objectifs spécifiques de la 1<sup>ère</sup> partie**
  - rappeler l'action d'un champ électrique sur une particule chargée
  - rappeler l'action d'un champ magnétique sur une particule chargée en mouvement
  - citer diverses méthodes pour mesurer le rapport  $\frac{e}{m}$  pour l'électron
  - expliquer la « mesure de  $\frac{e}{m}$  par déflexion magnétique »
  - déterminer le rapport  $\frac{e}{m}$  en utilisant la méthode de la déflexion magnétique
  - expliquer la « mesure de  $\frac{e}{m}$  par la méthode du tube à gaz raréfié »
  - déterminer  $\frac{e}{m}$  en utilisant la méthode du tube à gaz raréfié.



- décrire le principe du fonctionnement d'un spectromètre de masse.
- décrire le principe du fonctionnement d'un sélecteur de vitesse.
- décrire un cyclotron
- utiliser la tension de Hall pour calculer le nombre de porteurs de charge par unité de volume dans un conducteur
- calculer le rayon de la trajectoire d'une particule chargée qui pénètre dans un champ magnétique uniforme orthogonal à sa vitesse

- **Objectifs spécifiques de la 2ème partie**

- rappeler la loi de Faraday
- utiliser la loi de Faraday pour calculer la f.é.m. induite.
- rappeler la loi de Lenz
- utiliser la loi de Lenz pour déterminer le sens du courant induit
- rappeler la notion de « flux propre »
- rappeler le phénomène d'auto-induction
- calculer l'inductance d'un circuit en utilisant la relation  $\Phi = L i$
- appliquer la loi des mailles de Kirchhoff pour établir l'équation différentielle correspondant à un circuit RL.
- effectuer la résolution des équations différentielles du premier ordre avec second membre
- expliquer l'évolution du courant en fonction du temps dans un circuit RL
- tracer  $i = f(t)$  pour un circuit RL
- rappeler la constante du temps d'un circuit RL
- calculer l'inductance propre d'une bobine
- calculer le taux de croissance du courant qui parcourt un circuit RL
- utiliser la tension de Hall pour calculer le nombre de porteurs de charge par unité de volume dans un conducteur



## Résumé de l'activité

Cette activité comporte deux parties :

- 1) la première partie concerne l'étude du mouvement des particules chargées dans un champ magnétique. Il s'agit essentiellement d'aborder quelques applications pratiques de ce mouvement. Vous aurez à :
  - analyser diverses méthodes utilisées pour déterminer le rapport ( $e / m$ ) pour l'électron
  - examiner :
    - les principes de fonctionnement d'un spectromètre de masse et d'un cyclotron
    - l'effet Hall qui a permis de déterminer le signe des porteurs de charge dans un conducteur
- 2) la deuxième partie approfondit le phénomène d'induction électromagnétique par :
  - une description microscopique appliquée à un cas particulier simple
  - l'examen de la loi de Lenz qui permet de déterminer le sens du courant induit
  - l'analyse du phénomène d'auto-induction

Dans le traitement du cas particulier, vous aurez à faire émerger l'origine du courant induit et le sens du courant induit.

L'étude d'un circuit RL termine cette partie

## Lectures appropriées

RASOLONDRAMANITRA, H. (2007). Champ magnétique et particules chargées en mouvement - Inductance. Madagascar. Université d'Antananarivo. Cours inédit.

## Ressources pertinentes

BARUCH, P., HULIN, M. et PETROFF J.-F. (1972). Electricité- Magnétisme. Cours. Hermann, Paris,

BEISER, A.(1979). Physique appliquée : Cours et problèmes.Serie Schaum . Traduction française par LOBENBERG M. McGraw-Hill, Paris

BRAMAND, P., FAYE, P. et THOMASSIER, G. (1983). Physique- Terminales C et E. Collection Eurin-Gié. Hachette, Paris.



- BREITHAUPT, J. (2000). New Understanding : Physics for Advanced Level. Fourth Edition, Stanley Thornes Publishers Ltd, England ,
- BRUHAT, G. (1967). Cours de Physique Générale : Electricité. Huitième Edition Révisée (2e tirage) par G.GOUDET, Masson et Cie, Editeurs, Paris
- HALPERN, A. (1991) Maxi Schaum Physique 2. Traduction française par BABES, V. McGraw-Hill, Paris
- KALACHNIKOV, S. (1980). Electricité. Traduction française. Editions Mir, Moscou, Réédition : 1983
- NELKON, M. and PARKER, P. (1998). Advanced Level Physics. Seventh Edition, Heinemann, (Oxford ?)
- RESNICK, R. et HALLIDAY, D. (1979). Electricité et magnétisme, physique 2. Traduit par André Lebel et Claudine Thériault. Editions du Renouveau Pédagogique. Inc. Montréal (Québec) Canada
- SEARS. F.W, ZEMANSKY, M. W. and YOUNG. H. D. (1987). University Physics. Seventh Edition, Addison-Wesley Publishing Company, USA.
- SEARS.F.W., ZEMANSKY, M. W. and YOUNG, H. D. (1974). College Physics. Fourth Edition. Addison-Wesley Publishing Company, USA.
- TIPLER, P.-A. and Company. (1999). Physics for Scientists and Engineers. Fourth Edition. W.H. FREEMAN and company. Worth Publishers Inc., New York, USA
- TIPLER, P. A. (1982). Physics. Second Edition. Worth Publishers Inc, New York, USA

### Liens utiles

- [http://wwwens.uqac.ca/chimie/Physique\\_atom/Chap\\_hm/CHAP\\_3.html](http://wwwens.uqac.ca/chimie/Physique_atom/Chap_hm/CHAP_3.html)
- <http://www.unige.ch/sciences/physique/tp/tpe/E9.htm>
- <http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/electri/esurm.html>
- <http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/Meca/Charges/hall.html>
- [http://membres.lycos.fr/physiciss/labos/effet\\_hall.pdf](http://membres.lycos.fr/physiciss/labos/effet_hall.pdf)
- <http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/Meca/Charges/cyclotron.html>
- [http://perso.orange.fr/physique.chimie/Cours\\_de\\_physique/Physique\\_12\\_PARTICULE\\_CHARGEE\\_DANS\\_UN\\_CHAMP\\_MAGNETIQUE.htm](http://perso.orange.fr/physique.chimie/Cours_de_physique/Physique_12_PARTICULE_CHARGEE_DANS_UN_CHAMP_MAGNETIQUE.htm)
- [http://perso.orange.fr/daniel.robert9/Induction\\_electromagnetique.html](http://perso.orange.fr/daniel.robert9/Induction_electromagnetique.html)
- [http://perso.orange.fr/daniel.robert9/Induction\\_electromagnetique0.html](http://perso.orange.fr/daniel.robert9/Induction_electromagnetique0.html)
- <http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/electri/lens.html>
- <http://jf-noblet.chez-alice.fr/bobine/index.htm>



### **Description de l'activité**

Un même itinéraire vous est proposé pour les deux parties de cette activité :

**Étape 1** : des lectures sur les thèmes à étudier qui requièrent de votre part une implication active

**Étape 2** : une série d'exercices obligatoires à faire

**Étape 3** : une visite de sites pour comparer des contenus relatifs aux thèmes étudiés et / ou visualiser des animations

### **Évaluation formative**

Cette évaluation formative comprend des compléments de cours à lire avant de faire les exercices. Chaque exercice représente 1% des points



## Compléments de cours :

### Partie 1 : Diverses applications pratiques

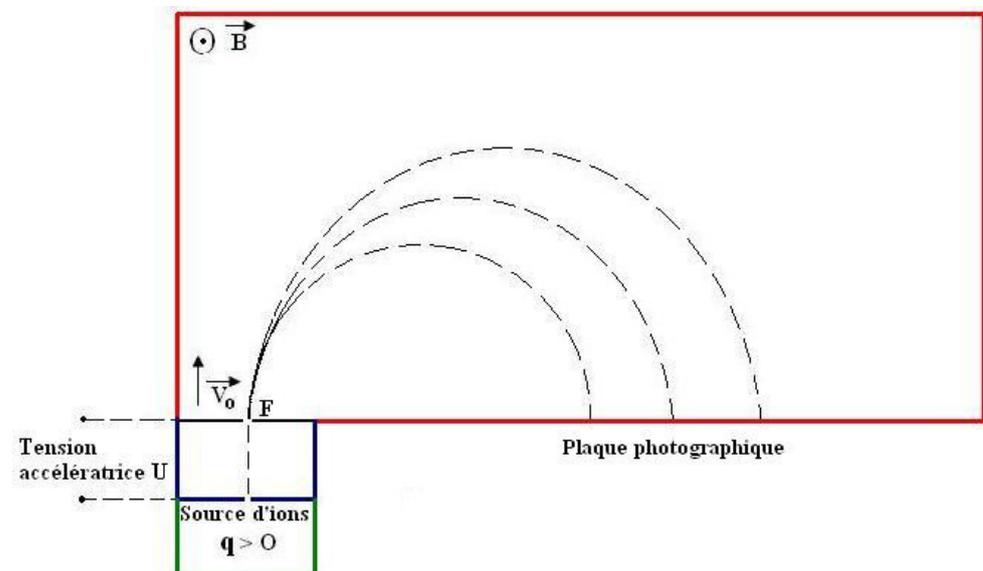
#### A) Principe de fonctionnement d'un spectromètre de masse

La figure ci-dessous décrit ce principe :

On soumet un faisceau d'ions de même charge mais de masses différentes à une tension accélératrice  $U$ . Ces particules ont la même vitesse  $\vec{v}_0$  quand elles pénètrent dans la région où règne le champ  $\vec{B}$ .

$\vec{B}$  est orthogonal à  $\vec{v}_0$ .

Sous l'action de  $\vec{B}$ , leurs trajectoires sont circulaires.



Après avoir décrit un demi-cercle, elles sont reçues sur la plaque photographique. Une particule de charge  $q$  et de masse  $m_i$  parcourt un demi-cercle de rayon  $R_i =$

$\frac{m_i v_0}{qB}$  et arrive en un point de la plaque photographique, point situé à la distance

$2R_i = D_i$  de la fente  $F$  :



$$D_i = \frac{2m_i v_0}{qB} \quad (1)$$

On obtient  $v_0$  en utilisant :

$$\frac{1}{2} m_i v_0^2 = q U$$

$$\Rightarrow v_0 = \left( \frac{2qU}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}}$$

La relation (1) devient :

$$D_i = \frac{2m_i}{qB} \left( \frac{2qU}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Il s'ensuit que :

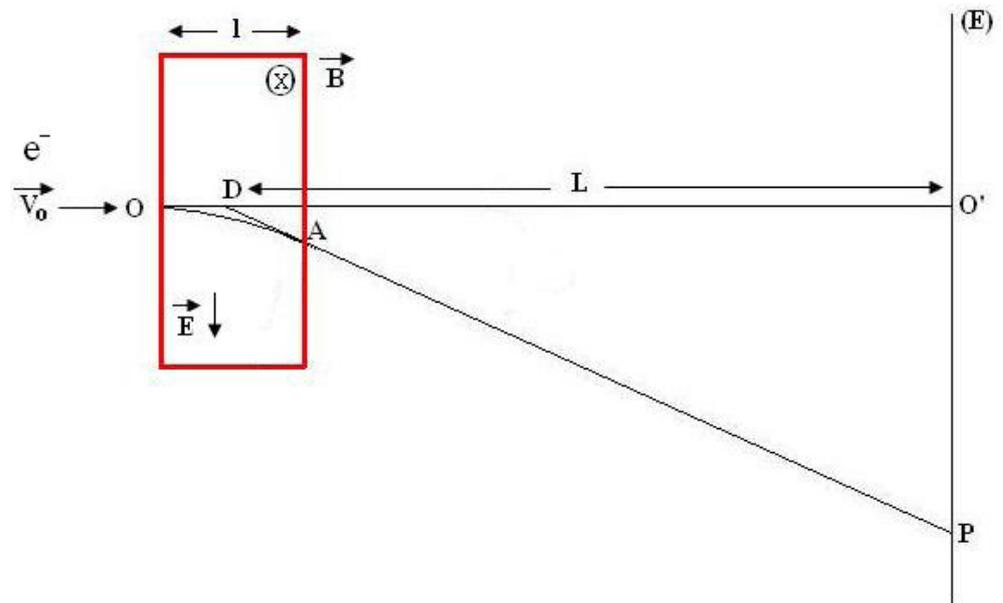
$$D_i^2 = \frac{4m_i^2}{q^2 B^2} \frac{2qU}{m_i} = \frac{8m_i U}{qB^2}$$

$$\Rightarrow \frac{q}{m_i} = \frac{8U}{D_i^2 B^2}$$

On déduit de cette relation qu'on peut séparer des ions de même charge et de masses différentes



## B) Mesure de $\frac{e}{m}$ par déflexion magnétique



### 1) Action simultanée d'un champ $\vec{B}$ et d'un champ $\vec{E}$ .

Des électrons pénètrent avec une vitesse  $\vec{v}_0$  dans une région où règnent un champ magnétique  $\vec{B}$  et un champ électrique  $\vec{E}$ .  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  sont uniformes et perpendiculaires entre eux et orthogonaux à  $\vec{v}_0$ .

Quand  $\vec{E} = \vec{0}$  et  $\vec{B} = \vec{0}$ , le faisceau n'est pas dévié et frappe l'écran (E) en  $O'$ .

On applique le champ  $\vec{B}$  tout en maintenant  $\vec{E} = \vec{0}$  : les électrons subissent une déflexion magnétique vers le bas :

$$D_m = O'P = \frac{L l B}{v_0} \frac{e}{m} \quad (1)$$

On applique ensuite le champ  $\vec{E}$ . Sous l'action de  $\vec{E}$ , les électrons sont déviés vers le haut. On agit sur la valeur de  $E$  pour ramener le faisceau en  $O'$ . Dans ce cas, les forces magnétique et électrique se compensent et on a pour les modules :



$$|\vec{F}_e| = |\vec{F}_m|$$

$$|-e\vec{E}| = |-e v_0 \Lambda \vec{B}|$$

On obtient :  $E = v_0 B \Rightarrow v_0 = \frac{E}{B}$

La relation (1) devient alors

$$D_m = \frac{L l B^2}{E} \frac{e}{m} \Rightarrow \frac{e}{m} = \frac{E}{L l B^2} D_m$$

$L$  et  $l$  sont les paramètres géométriques du dispositif et sont supposés connus.  $E$  et

$B$  sont ajustés de telle manière que  $\frac{E}{B} = v_0$ . On mesure  $D_m$  sur l'écran et on en

déduit  $\frac{e}{m}$ .

### b) Action d'un champ $\vec{B}$ uniquement

Sous l'action de  $\vec{B}$ , on obtient une déflexion magnétique

$$D_m = \frac{L l B}{v_0} \frac{e}{m}$$

La vitesse  $v_0$  peut-être déduite de la tension accélératrice  $U$  (le dispositif comprend une tension accélératrice qui communique la vitesse  $v_0$  aux électrons) :

$$\frac{1}{2} m v_0^2 = e U$$

$$\Rightarrow v_0 = \left( \frac{2eU}{m} \right)^{\frac{1}{2}}$$



$$D'ou : \quad D_m = \frac{L \cdot l \cdot B}{\sqrt{2U}} \sqrt{\frac{e}{m}} \Rightarrow \frac{e}{m} = \frac{2U}{(L \cdot l \cdot B)^2} D_m^2$$

Connaissant  $U$ ,  $B$  et  $D_m$  ( $D_m$  est mesurée sur l'écran), on calcule  $\frac{e}{m}$ .

### c) Méthode du tube à gaz raréfié.

Cette méthode met à profit le mouvement circulaire dans un champ magnétique uniforme.

Le dispositif utilisé est constitué d'une ampoule sphérique munie d'un canon à électrons et qui contient un gaz sous très faible pression. Le canon envoie un faisceau d'électrons dont la vitesse est contrôlée par une tension accélératrice  $U$ . Le faisceau ionise le gaz sur son passage, ce qui rend visible la trajectoire. L'ampoule est placée entre deux bobines de Helmholtz qui créent un champ magnétique uniforme  $\vec{B}$  au niveau de la trajectoire des électrons.

On oriente la sphère de telle manière que la vitesse  $\vec{v}$  des électrons sortant du canon soit normale à  $\vec{B}$  et on agit convenablement sur  $\vec{B}$  et sur la tension accélératrice

pour avoir une trajectoire circulaire de rayon  $R = \frac{mv}{eB}$



Tube à gaz raréfié pour la mesure de  $e/m$

On a ici :

$$\frac{1}{2} mv^2 = e U \Rightarrow v^2 = 2 U \left( \frac{e}{m} \right) \quad (1)$$



$$e v B = m \frac{v^2}{R} \Rightarrow v = BR \left( \frac{e}{m} \right) \quad (2)$$

Elevons la relation (2) au carré

$$v^2 = B^2 R^2 \left( \frac{e}{m} \right)^2 \quad (3)$$

(1) et (3) donnent :

$$B^2 R^2 \left( \frac{e}{m} \right)^2 = 2 U \left( \frac{e}{m} \right)$$

$$\text{Ainsi : } \frac{e}{m} = \frac{2 U}{B^2 R^2}$$

Connaissant B, U et R, on calcule  $\frac{e}{m}$ .

### C) Détermination du signe et du nombre des porteurs de charges par unité de volume dans un conducteur

Relisez la partie du cours concernant l'Effet Hall

### D) Accélération des particules chargées

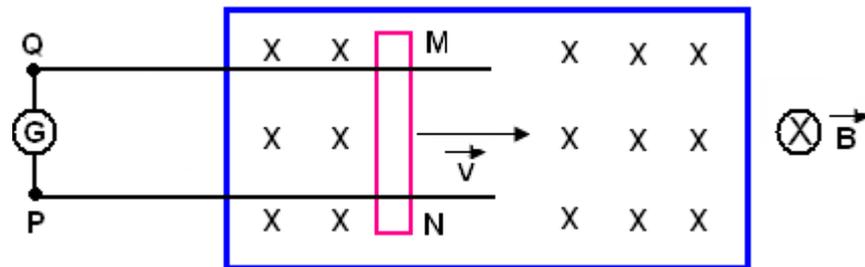
Relisez le paragraphe « Cyclotron » du cours



## Partie 2

### Champ électromoteur d'induction

Considérons une tige métallique MN placée sur deux rails conducteurs et parallèles dont les extrémités P et Q sont liées à un galvanomètre.



Lorsqu'on déplace la tige avec une vitesse  $\vec{v}$ , le galvanomètre décèle le passage d'un courant. L'apparition de ce courant induit est liée à l'existence d'une force magnétique

$\vec{F}_m = -e \vec{v} \wedge \vec{B}$  qui s'exerce sur chaque électron libre de la tige. On associe à cette force un champ électromoteur d'induction  $\vec{E}_m$  tel que  $\vec{F}_m = -e \vec{E}_m$ .

$\vec{E}_m$ , contrairement à un champ électrostatique, peut entretenir le mouvement des porteurs de charges dans un circuit fermé

Il ressort de cette association que :

$$a) -e \vec{v} \wedge \vec{B} = -e \vec{E}_m \Rightarrow \vec{E}_m = \vec{v} \wedge \vec{B}$$

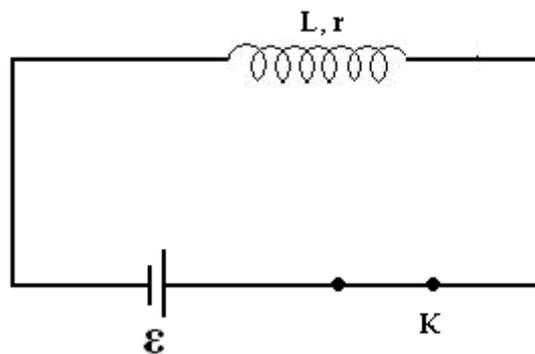
$\vec{v}$ ,  $\vec{B}$  et  $\vec{E}_m$  forment un trièdre direct.

Le sens de  $\vec{E}_m$  donne le sens du courant induit. En effet, comme  $\vec{F}_m = -e \vec{E}_m$  les électrons se déplacent dans le sens opposé à  $\vec{E}_m$ .



### Circuit RL – Taux de croissance du courant

Considérons le circuit ci-dessous.



L'évolution de l'intensité du courant traversant le circuit est décrite par l'équation différentielle :

$$\varepsilon - L \frac{di}{dt} - ri = 0 \quad \Rightarrow \quad L \frac{di}{dt} = \varepsilon - ri$$

$\frac{di}{dt}$  donne la vitesse de croissance du courant.

- A l'instant  $t = 0$ ,  $i = 0$ . on a alors :

$$L \frac{di}{dt} = \varepsilon \Rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{\varepsilon}{L}$$

C'est le taux de croissance initial du courant :

$$\left( \frac{di}{dt} \right)_{t=0} = \frac{\varepsilon}{L}$$

- Au fur et à mesure que l'intensité du courant augmente,  $ri$  augmente et

$$L \frac{di}{dt} = \varepsilon - ri \text{ diminue.}$$

Le taux d'augmentation du courant diminue : la courbe  $i = f(t)$  s'aplatit progressivement.



- Au bout d'un temps suffisamment long ( $t \rightarrow \infty$ ) le taux de croissance s'annule :

$$L \frac{di}{dt} = 0 \Rightarrow r i = \varepsilon$$

L'intensité du courant atteint sa valeur maximale :  $i_m = \frac{\varepsilon}{r}$

- A l'instant  $t = 0$ , i.e. à l'origine, la courbe  $i = f(t)$  est tangente à la droite de

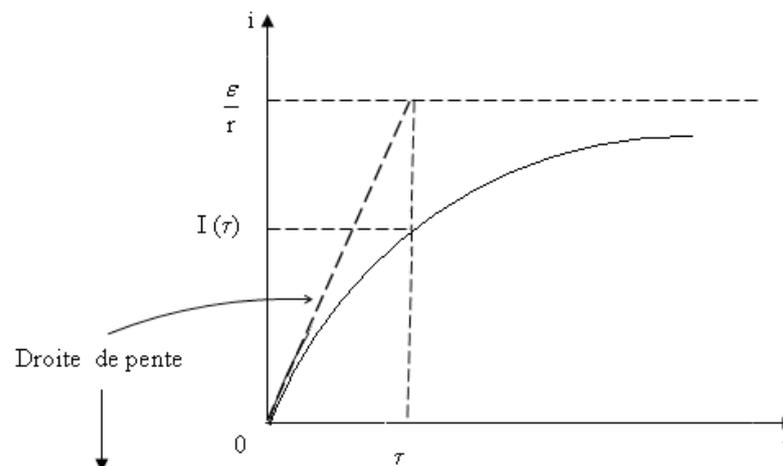
$$\text{pente} \left( \frac{di}{dt} \right)_{t=0} = \frac{\varepsilon}{L}$$

En introduisant la constante de temps du circuit défini par  $\tau = \frac{L}{r}$  on remarque que :

$$\frac{i_m}{\tau} = \frac{i_m}{\left(\frac{L}{r}\right)} = \frac{r}{L} i_m = \frac{r}{L} \left(\frac{\varepsilon}{r}\right) = \frac{\varepsilon}{L} = \left(\frac{di}{dt}\right)_{t=0}$$

A l'origine, la courbe  $i = f(t)$  est donc tangente à la droite de pente  $\frac{i_m}{\tau}$ .

On aura donc la représentation graphique suivante :



$$\frac{i_m}{\tau} = \left(\frac{di}{dt}\right)_{t=0} = \frac{\varepsilon}{L}$$



- Calculons  $i(\tau)$ .

L'intensité du courant est donnée par :

$$i(t) = \frac{\varepsilon}{r} (1 - e^{-\frac{r}{L}t}) = i_m (1 - e^{-\frac{r}{L}t})$$

A l'instant  $\tau$ , on a :

$$i(\tau) = i_m (1 - e^{-\frac{r}{L}\tau}) = i_m [1 - e^{-\frac{r}{L}(\frac{L}{r})}]$$

$$i(\tau) = i_m (1 - \frac{1}{e}) = i_m (\frac{e-1}{e}) = 0,63i_m$$

$$i(\tau) = \underline{(63\%)} (i_m)$$

Après un temps  $\tau = \frac{L}{r}$  secondes, l'intensité du courant atteint 63% de sa valeur finale  $i_m$ .

## Exercice 1

### Action d'un champ magnétique uniforme sur une particule chargée

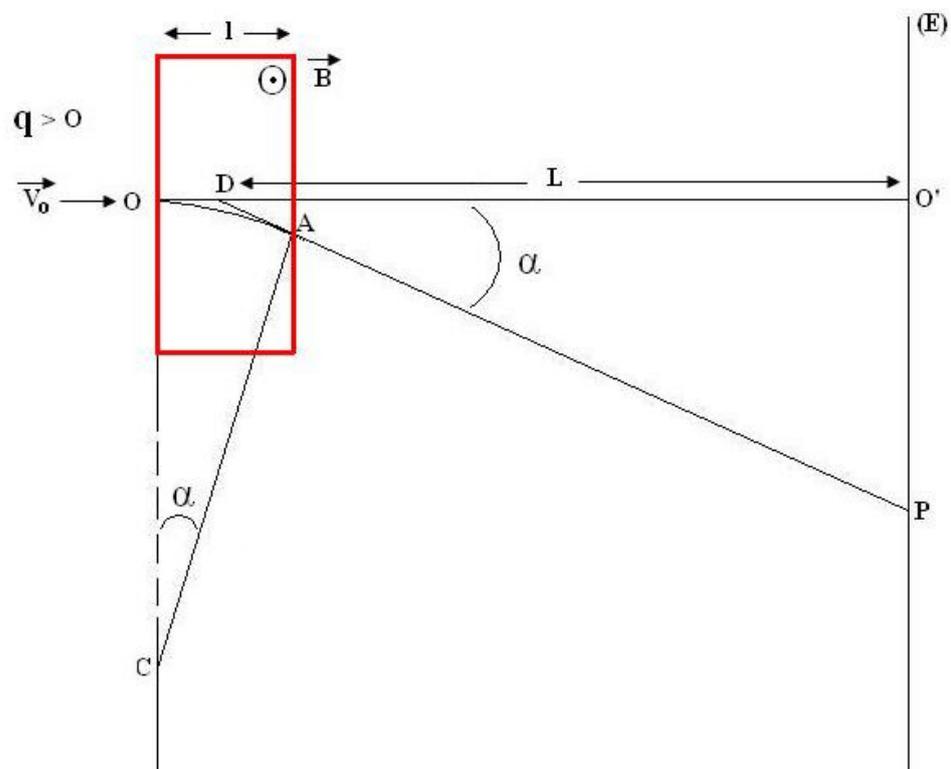
Considérer le montage ci-dessous. Une particule de charge  $q$  positive, de vitesse initiale  $\vec{v}_0$  et de masse  $m$  pénètre en  $O$  dans une région de largeur  $l$  où règne un champ magnétique  $\vec{B}$  uniforme et constant. Le champ  $\vec{B}$  est perpendiculaire au plan de la figure et orienté vers l'avant de ce plan. La vitesse  $\vec{v}_0$  est dirigée suivant  $00'$  et est normale à  $\vec{B}$ .

- 1) Analyser le mouvement de la particule dans la région où règne le champ  $\vec{B}$ .
- 2) Un écran (E) perpendiculaire à  $00'$  est placé à une distance  $L \gg l$  comme l'indique la figure. En l'absence du champ  $\vec{B}$ , la particule décrit une trajectoire rectiligne et frappe l'écran en  $O'$ . Lorsque  $\vec{B}$  est appliqué, ce point d'impact est dévié et se trouve en P. la déviation  $O'P$  est appelée déflexion magnétique



$D_m$ . Dans le cas d'une faible déviation, exprimer  $D_m$  en fonction de  $L$ ,  $l$ ,  $B$ ,  $m$ ,  $v_0$  et  $q$ .

- 3) L'analyse de  $D_m$  suggère quelques applications pratiques. Donner des applications de ce dispositif tout en justifiant vos propositions.



### Exercice 2

Dans une expérience sur l'effet Hall, un ruban métallique d'épaisseur  $a = 0,1\text{mm}$  et de largeur  $b = 5\text{mm}$  est parcouru par un courant d'intensité  $I = 5\text{A}$ . La tension de Hall mesurée est  $V_H = 6,25\ \mu\text{V}$  lorsque le champ magnétique utilisé a une grandeur  $B = 0,2\ \text{T}$ .

- 1- Calculer le nombre  $n$  d'électrons de conduction par unité de volume.
- 2- Calculer la vitesse d'entraînement de ces électrons.

### Exercice 3

Un proton initialement au repos est soumis à une tension accélératrice de  $20\ \text{kV}$ . Il pénètre ensuite dans une région où règne un champ magnétique  $\vec{B}$  uniforme



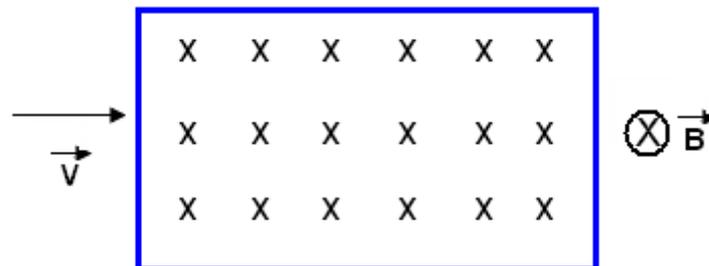
et de grandeur égale à 0,5 T. Le champ  $\vec{B}$  est orthogonal à la vitesse du proton. Déterminer le rayon de la trajectoire de ce proton.

### Exercice 4

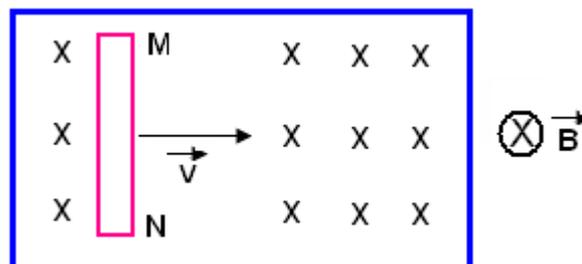
#### Loi de Lenz

- 1) Un faisceau d'électrons pénètre dans une région où règne un champ magnétique uniforme et constant avec une vitesse  $\vec{v}$  comme l'indique la figure. Le champ  $\vec{B}$  est perpendiculaire au plan de la figure et est dirigé vers l'arrière de ce plan.

Décrivez ce qui va se passer



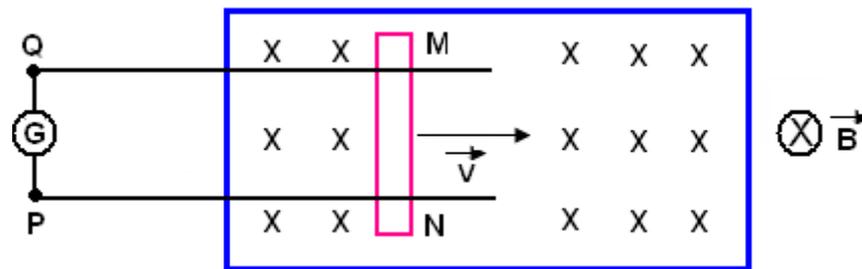
- 2) On remplace le faisceau d'électrons par une tige métallique MN. La tige se déplace vers la droite avec une vitesse  $\vec{v}$  sous l'action d'une force appliquée.



Analysez ce qui va se passer au sein de la tige.



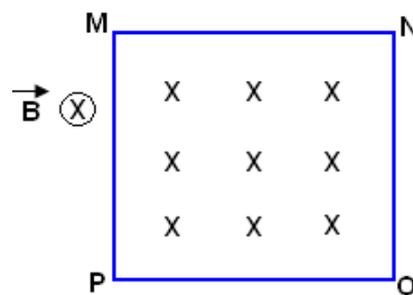
- 3) La tige métallique MN de longueur  $l$  est maintenant placée sur deux rails parallèles et horizontaux dont les extrémités P et Q sont reliés à un galvanomètre G. on fait déplacer MN vers la droite avec une vitesse  $\vec{v}$ . Le galvanomètre détecte le passage d'un courant alors que le circuit constitué par la tige, les rails et le galvanomètre ne comporte aucun générateur.



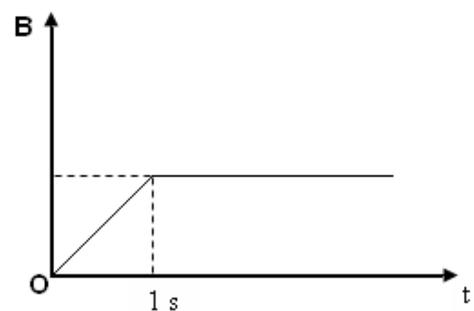
Expliquez l'origine du courant qui circule dans le circuit.  
Précisez le sens de ce courant et reliez-le à la loi de Lenz.

### Exercice 5

Une spire rectangulaire est placée dans un champ magnétique uniforme  $\vec{B}$  comme l'indique la figure (2-a) et dont la norme varie selon la figure (2-b). Cocher les bonnes réponses



(2 - a)



(2 - b)



5-1

- Un courant induit parcourt la spire quel que soit  $t$ .
- Un courant induit parcourt la spire au bout d'un temps  $t > 1s$ .
- Un courant induit parcourt la spire pour  $t \in [0, 1s]$

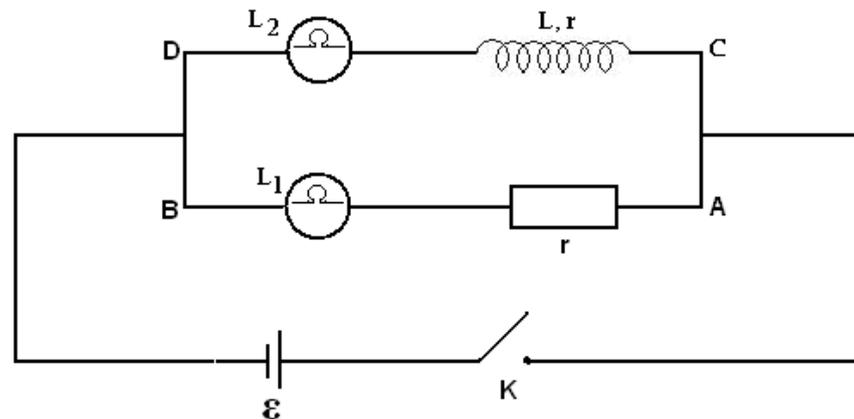
5-2

- Le courant induit parcourt la spire dans le sens MNOP
- Le courant induit parcourt la spire dans le sens MPON

**Exercice 6**

**Auto-induction et circuit RL**

Considérer le circuit ci-dessous.



$L_1$  et  $L_2$  sont deux lampes identiques. La branche AB comporte un conducteur ohmique de résistance  $r$  en série la lampe  $L_1$ . La branche CD contient une bobine en série avec la lampe  $L_2$ . Le conducteur ohmique et la bobine ont la même résistance  $r$ .

Quand on ferme l'interrupteur K,  $L_1$  brille instantanément tandis que  $L_2$  brille progressivement.

- 1- Expliquez pourquoi il en est ainsi.
- 2- Étudiez les courants qui circulent dans la bobine d'inductance et dans le conducteur ohmique et représentez les graphiquement. Commentez vos résultats.
- 3- Décrivez ce qui se passe lorsqu'on ouvre l'interrupteur.

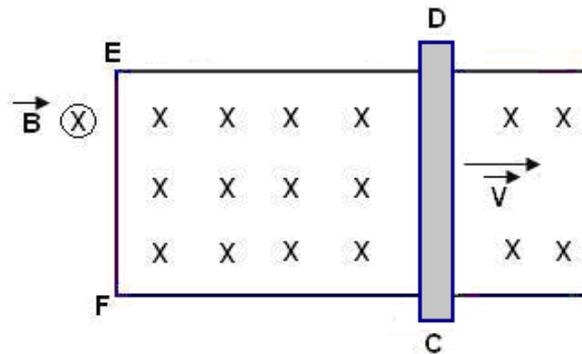


### Exercice 7

- 1- Soit une bobine maintenue fixe face à un solénoïde parcouru par un courant d'intensité  $I$ . Expliquer pourquoi une f.é.m. induite est engendrée dans la bobine quand on fait varier  $I$ .

### Exercice 8

On considère la figure ci-dessous



Le champ d'induction magnétique  $\vec{B}$  est uniforme et perpendiculaire au plan de la figure. La tige métallique  $CD$  se déplace vers la droite avec une vitesse  $\vec{v}$ . La f.é.m. induite dans  $CD$  est  $2,40\text{V}$ . On donne :  $EF = CD = l = 0,40\text{m}$  et  $B = 1,2\text{ T}$ . La résistance totale du circuit est  $1,2\Omega$ .

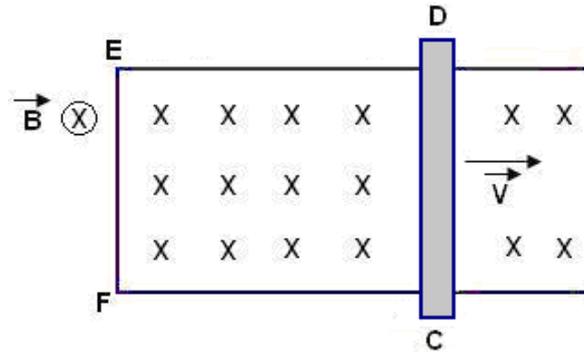
Déterminer :

- 1- la vitesse  $v$  de la tige  $CD$ .
- 2- le sens et l'intensité du courant induit
- 3- la direction et le module de la force qui s'exerce sur  $CD$ .



### Exercice 9

On considère la figure ci-dessous



Le champ d'induction magnétique  $\vec{B}$  est uniforme et perpendiculaire au plan de la figure. La tige métallique CD se déplace vers la droite avec une vitesse  $\vec{v}$  perpendiculaire à  $\vec{B}$ . Un courant induit traverse le circuit dans le sens  $C \rightarrow D$ .

- 1) Analysez l'apparition de ce courant selon le point de vue d'un observateur S au repos par rapport à la tige.
- 2) Même question mais avec l'observateur S lié à la tige.

### Exercice 10

Soit un solénoïde de section  $S$ , comportant  $N$  spires et dont la longueur  $l$  est supposée grande par rapport à son diamètre. On fait varier le courant qui traverse ce solénoïde de 0 à  $I$ . Trouver son inductance propre.

### Exercice 11

Une f.é.m. induite de 10V s'établit dans une bobine lorsque le taux de croissance du courant qui la traverse est  $50 \text{ As}^{-1}$ . Calculer l'inductance de la bobine.

Supposons que cette bobine comporte 500 spires et que l'intensité du courant qui la traverse est 2,5A. Déterminer le flux moyen enlacé par une spire.



### Exercice 12

Une bobine d'inductance  $L = 5 \text{ H}$  et de résistance  $10 \Omega$  est reliée à une pile de  $10\text{V}$ . Calculer :

- le taux initial de croissance du courant
- l'intensité du courant à l'instant où son taux de croissance est  $1 \text{ A s}^{-1}$
- l'intensité finale du courant.

### Exercice 13

On considère un circuit série composé d'une bobine d'inductance  $L = 0,2 \text{ H}$  dont la résistance est négligeable, d'un résistor de  $9 \Omega$ , d'une batterie de  $1,5 \text{ V}$  et de résistance interne  $1\Omega$ . Calculer :

- le taux initial de croissance du courant
- le taux de croissance du courant quand l'intensité du courant est  $0,1\text{A}$
- le taux de croissance du courant quand l'intensité du courant est  $0,15\text{A}$

### Exercice 14

On considère un circuit série composé d'une bobine d'inductance  $L$ , d'une résistance  $R$ , d'une pile de f.é.m.  $V_0$  et d'un interrupteur  $K$ . On ferme l'interrupteur. Déterminer :

1- l'intensité du courant et la f.é.m. induite à l'instant  $t = 0$

2- l'intensité du courant et la f.é.m. induite à l'instant  $t = \frac{1}{2} \tau$ ,  $\tau$  étant la constante du temps de ce circuit.



## Activités d'apprentissage

- Lire les lectures appropriées et les compléments de cours
- ensuite faire les exercices
- s'organiser pour un travail collaboratif : les apprenant(e)s sont réparti(e)s en groupe sous la supervision d'un tuteur.
- Chaque groupe choisit un rapporteur.
- le tuteur organise le travail en indiquant l'ordre de résolution des exercices et la durée de recherche de solution pour chacun
- les rapporteurs déposent les solutions des exercices dans un espace de travail réservé aux apprenant(e)s.

## Réponses clés

### Solution de l'exercice 1

#### 1) Mouvement de la particule

$\vec{v}_0$  est orthogonale à  $\vec{B}$ .

Dans la région où règne  $\vec{B}$ , la force  $\vec{F} = q \vec{v} \wedge \vec{B}$  qui s'exerce sur la particule est toujours perpendiculaire à  $\vec{v}$ . Donc le travail produit par cette force est toujours nul et en conséquence la vitesse  $\vec{v}$  reste constante en grandeur ( $v = v_0$ ). Voir ci-dessous la démonstration

$$E_c = \frac{1}{2} m \vec{v}^2 \Rightarrow dE_c = m \vec{v} \cdot d\vec{v}$$

$$dE_c = \vec{F} \cdot \vec{v} dt = 0 \text{ car } \vec{F} \text{ est perpendiculaire à } \vec{v}$$

$$\Rightarrow E_c \text{ est constant} \Rightarrow v \text{ est constant}$$

La force  $\vec{F}$  reste aussi constante en module ( $F = q v B = q v_0 B$ ) car  $v$  et  $B$  sont constants. La particule se déplace donc sous l'action de la force  $\vec{F}$  dont le module est constant et dont la direction est toujours perpendiculaire au vecteur vitesse  $\vec{v}$  : elle prend alors un mouvement circulaire uniforme.

La force  $\vec{F}$  est une force centripète :

$$q v_0 B = \frac{m v_0^2}{R}$$



Le rayon de la trajectoire est :

$$R = \frac{mv_0}{qB}$$

Dans la région où règne  $\vec{B}$ , la particule décrit l'arc de cercle  $\overset{\cap}{CA}$  de centre C et de rayon  $CO = CA = \frac{mv_0}{qB}$ .

## 2) Déviation O'P

Lorsque la particule sort de la région où règne  $\vec{B}$ , sa trajectoire est rectiligne suivant la tangente au point A à l'arc de cercle  $\overset{\cap}{OA}$ . Cette tangente coupe  $OO'$  en D.

L'angle  $\alpha$  est tel que :

$$\alpha = \frac{\overset{\cap}{OA}}{R}$$

$$\tan \alpha = \frac{O'P}{L}$$

Pour une faible déviation :

$$\overset{\cap}{OA} \approx l \text{ et } \tan \alpha \approx \alpha = \frac{O'P}{L}$$

On a donc :

$$\alpha = \frac{l}{R} = \frac{O'P}{L} \Rightarrow O'P = \frac{Ll}{R} = \frac{L l q B}{mv_0}$$

$O'P$  est la déviation du point d'impact sur l'écran. Cette déviation est appelée : « Déflexion magnétique »  $D_m$ .

$$D_m = \frac{L l}{mv_0} q B$$



### 3) Applications d'un tel montage

La déflexion magnétique dépend des paramètres  $L$ ,  $l$ ,  $B$ ,  $\frac{q}{m}$  et  $v_0$ . Les paramètres  $L$  et  $l$  sont des paramètres géométriques (ce sont des caractéristiques géométriques de l'appareil). Ils sont en principe donnés.

#### 1<sup>ère</sup> application

Considérons un faisceau de particules qui pénètrent en O. Supposons que toutes ces

particules ont la même vitesse  $v_0$  et qu'elles ont le même rapport  $\frac{q}{m}$ .

On a dans ce cas :

$$D_m = \left( \frac{L l}{v_0} \frac{q}{m} \right) B = K_1 B$$

Constante  $K_1$

La déviation  $D_m$  est proportionnelle au champ  $B$ . Connaissant  $D_m$ , on peut déterminer  $B$  : le dispositif permet de mesurer des champs magnétiques.

#### 2<sup>ème</sup> application

Supposons que :

- le rapport  $\frac{q}{m}$  est le même pour toutes les particules constituant le faisceau incident
- les particules pénètrent en O avec des vitesses initiales  $v_0$  différentes
- le champ  $\vec{B}$  est donné.

Dans ce cas, on a :

$$D_m = \left( L l B \frac{q}{m} \right) \frac{1}{v_0} = K_2 \frac{1}{v_0}$$

La déviation  $D_m$  est proportionnelle à  $\frac{1}{v_0}$  car  $\left( L l B \frac{q}{m} \right) \frac{1}{v_0} = K_2$  est une constante.



On peut avec ce dispositif, trier des faisceaux monocinétiques. On peut séparer des faisceaux qui pénètrent en O avec des vitesses initiales différentes.

### 3<sup>ème</sup> application

Supposons qu'un faisceau de particules positives homocinétiques de même charge mais de masses différentes pénètre en O et que le champ  $\vec{B}$  est donné.

On a alors :

$$D_m = \left( \frac{L | B |}{v_0} \right) \frac{q}{m} = K_3 \frac{q}{m}$$

$\left( \frac{L | B |}{v_0} \right) = K_3$  est une constante pour toutes ces particules. La déviation  $D_m$  est

proportionnelle au rapport  $\frac{q}{m}$ . Le dispositif permet dans ce cas de séparer des ions de même charge mais de masses différentes. On a ici un spectromètre de masse.

## Solution de l'exercice 2

### 1) nombre n d'électrons de conduction par unité de volume

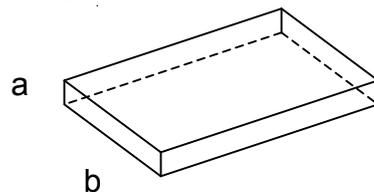
Nous savons qu'à la tension de Hall  $V_H$  est associé un champ électrique transversal  $E_H$  tel que :

$$E_H = v B \quad (1) \quad v \text{ étant la vitesse d'entraînement (relisez le cours si nécessaire).}$$

Utilisons cette équation (1) pour faire apparaître  $V_H$  et n.

$E_H$  et  $V_H$  sont liés par la relation :

$$E_H = \frac{V_H}{b}, \quad b \text{ étant la largeur du ruban}$$



$$\text{Ainsi, on a : } \frac{V_H}{b} = v B \Rightarrow V_H = v B b \quad (2)$$



Pour faire apparaître  $n$ , remplaçons la vitesse d'entraînement  $v$ .

Pour cela, prenons l'intensité  $I$  :

$I = j A$ ,  $j$  étant la densité de courant et  $A$  la section du ruban.

On a :  $j = n e v$  et  $A = ab$

$$\text{D'où} \quad I = n e v ab \Rightarrow v = \frac{I}{n e (ab)} \quad (3)$$

Les équations (2) et (3) donnent :

$$V_H = \frac{I B b}{n e (ab)} \Rightarrow n = \frac{I B}{e a V_H}$$

A.N.:  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  ;  $B = 0,2 \text{ T}$  ;  $I = 5 \text{ A}$  ;  $V_H = 6,25 \times 10^{-6} \text{ V}$  ;  $a = 10^{-4} \text{ m}$

$$n = \frac{(5)(0,2)}{(1,6 \cdot 10^{-19})(10^{-4})(6,25 \cdot 10^{-6})}$$

$$n = \underline{\underline{1 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}}}$$

## 2) Vitesse d'entraînement

Reprenons la densité de courant

$$j = n e v$$

$$\frac{I}{A} = n e v \Rightarrow v = \frac{I}{n e A}$$

A.N. :

$$I = 5 \text{ A}; \quad n = 1 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}; \quad e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C};$$

$$A = ab = (10^{-4} \text{ m})(5 \cdot 10^{-3} \text{ m})$$

$$v = \frac{5}{(1 \times 10^{28})(1,6 \cdot 10^{-19})(10^{-4})(5 \cdot 10^{-3})}$$

$$v = \underline{\underline{0,625 \times 10^{-2} \text{ ms}^{-1}}}$$



### Solution de l'exercice 3

Dans la région où règne le champ  $\vec{B}$ , le proton est soumis à une force :

$$\vec{F} = q \vec{v} \wedge \vec{B}$$

$\vec{F}$  est ici une force centripète

$$q v B = m \frac{v^2}{R} \Rightarrow R = \frac{mv}{qB} \quad (1)$$

Soit  $V_a$  la tension accélératrice. On a :

$$qV_a = \frac{1}{2} mv^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2qV_a}{m}}$$

La relation (1) devient :

$$R = \frac{mv}{qB} = \frac{m}{qB} \sqrt{\frac{2qV_a}{m}} = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2V_a m}{q}}$$

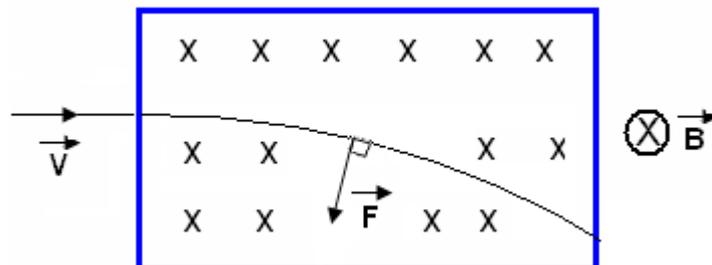
A.N. :  $B = 0,5T$  ;  $m = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$  ;  $q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$  ;  $V_a = 20 \times 10^3 \text{ V}$

On trouve :

$$\underline{\underline{R = 4,1 \text{ cm}}}$$

### Solution de l'exercice 4

#### 1) faisceau d'électrons

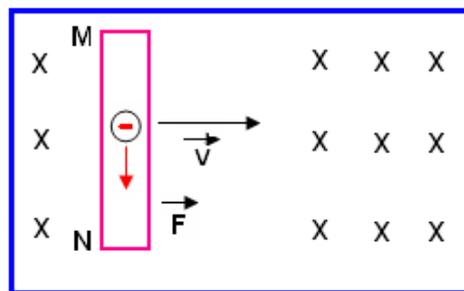


Chaque électron du faisceau est soumis à une force magnétique  $\vec{F} = -e \vec{v} \wedge \vec{B}$ .



$\vec{F}$  est toujours perpendiculaire à  $\vec{v}$  et  $\vec{B}$  et a une grandeur constante  $F = e v B$ . La direction de la force  $\vec{F}$  est toujours normale à la trajectoire du faisceau, au vecteur  $\vec{v}$ . Le faisceau subit alors une déflexion magnétique : sa trajectoire s'incurve. Si la force  $\vec{F}$  est faible, cette trajectoire est un arc de cercle. On obtient une trajectoire circulaire si la force  $\vec{F}$  est assez forte.

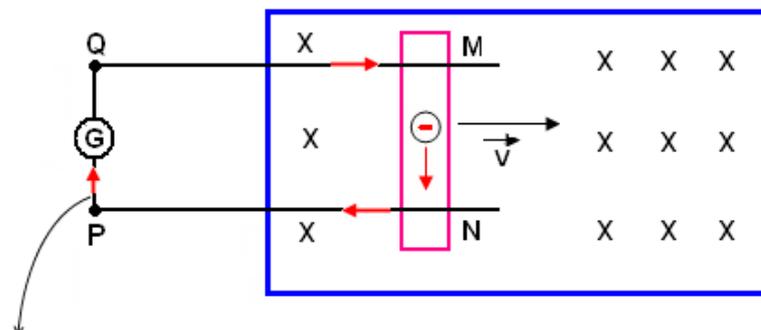
### 2) Tige métallique



Un métal contient des électrons libres appelés électrons de conduction. Lorsque la tige MN se déplace à la vitesse  $\vec{v}$ , ses électrons libres sont entraînés avec elle et à la même vitesse. Chaque électron de MN se déplace donc dans un champ magnétique avec la vitesse  $\vec{v}$  et subit une force  $\vec{F}_m = -e \vec{v} \wedge \vec{B}$

Sous l'action de cette force, il se déplace vers N. Des charges négatives vont s'accumuler en N et des charges positives en M (il y a un défaut de charges négatives en M). Il en résulte une f.é.m. induite entre les extrémités de la tige.

### 3) origine du courant induit



Sens de déplacement des électrons

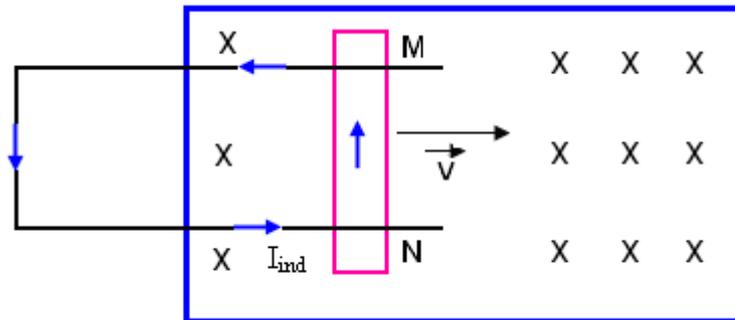


Comme il a été établi précédemment (question 2), quand la tige se déplace vers la droite, chaque électron subit une force  $\vec{F}_m = -e \vec{v} \wedge \vec{B}$  et est poussé vers l'extrémité N. Le circuit MNPQ étant un circuit fermé, un mouvement d'ensemble des électrons libres prend naissance dans cette boucle d'où l'apparition du courant décelé par le galvanomètre.

C'est la force  $\vec{F}_m$  qui est à l'origine de ce courant.

### Sens du courant induit

Le sens de ce courant induit est opposé au sens de déplacement des électrons :



### Relation avec la loi de Lenz

La tige MN est maintenant parcourue par un courant  $I_{ind}$  dans le sens  $N \rightarrow M$  et se déplace dans le champ  $\vec{B}$ . Une force  $\vec{F} = I_{ind} \vec{NM} \wedge \vec{B}$  s'exerce sur cette tige. Cette force est dirigée vers la gauche, dans le sens opposé au sens de déplacement de MN : elle s'oppose au déplacement de MN vers la droite.

Ce n'est autre que la loi de Lenz qui dit que : « le sens de courant induit est tel qu'il s'oppose à la cause qui le produit ».

La cause qui a produit le courant induit ici est le déplacement de la tige vers la droite. La tige, une fois parcourue par ce courant, subit une force dirigée vers la gauche.

### Solution de l'exercice 5

#### 2-1

- Un courant induit parcourt la spire quel que soit t. **Réponse incorrecte**

Un courant induit n'apparaît que lorsque le flux magnétique à travers la spire varie. i.e. qu'il n'apparaît que lorsque  $\vec{B}$  varie. Or ici la norme de  $\vec{B}$  reste constante pour  $t > 1s$ .



- Un courant induit parcourt la spire au bout d'un temps  $t > 1s$ . **Faux**

Le champ  $\vec{B}$  ne varie plus quand  $t > 1s$

- Un courant induit parcourt la spire pour  $t \in [0, 1s]$  **Bonne réponse**

En effet durant cet intervalle de temps  $\vec{B}$  varie donc son flux à travers la spire varie.

## 2-2

- Le courant induit parcourt la spire dans le sens MNOP **Faux**

Voir l'explication ci-dessous

- Le courant induit parcourt la spire dans le sens MPON **Bonne réponse**

Le sens du courant induit est tel qu'il crée un champ magnétique induit  $\vec{B}_i$  qui s'oppose à la croissance de  $\vec{B}$ .  $\vec{B}_i$  est de sens opposé à  $\vec{B}$  i.e. dirigé vers l'avant :  $I_{ind}$  parcourt la spire dans le sens MPON.

## Solution de l'exercice 6

### 1- La lampe $L_1$ brille instantanément, la lampe $L_2$ brille progressivement

#### Constat

Les deux lampes sont identiques, la bobine et le conducteur ohmique ont la même résistance et pourtant  $L_2$  brille progressivement.

L'explication réside donc au niveau de la bobine.

Initialement, quand l'interrupteur est ouvert, aucun courant ne traverse la bobine : le champ à l'intérieur de la bobine est nul ainsi que le flux qui la traverse.

Quand on ferme le circuit, le courant traversant le conducteur ohmique atteint rapidement sa valeur d'équilibre alors que le courant parcourant la bobine commence à augmenter. Ce courant crée un champ magnétique à l'intérieur de la bobine. Le flux à travers cette dernière a donc varié et une f.é.m. induite apparaît qui, conformément à la loi de Lenz, s'oppose à la croissance du courant qui mettra alors un certain temps pour atteindre sa valeur d'équilibre.

*La bobine retarde l'augmentation du courant qui circule dans la lampe  $L_2$  et en conséquence  $L_2$  brille progressivement.*

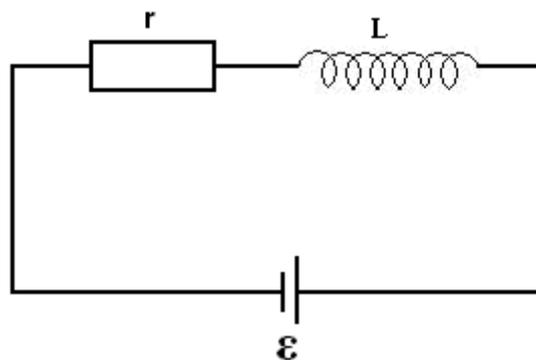
**Remarque** : le flux qui traverse la bobine varie. Cette variation est due à la variation du courant qui circule dans la bobine elle-même : la f.é.m. induite ici est une f.é.m. d'auto-induction. Le flux qui traverse la bobine est un « flux propre ».



L'étude des courants qui circule dans la bobine et dans le conducteur Ohmique met en évidence ces résultats.

**2- Analyse des courants qui traversent la bobine et le conducteur ohmique**

Négligeons les résistances des lampes  $L_1$  et  $L_2$  (ou supposons qu'elles sont déjà incluses dans les résistances  $r$ ). Quand on ferme l'interrupteur  $K$ , on a pour la maille ( $\epsilon CD\epsilon$ ) :



$$\epsilon - L \frac{di}{dt} - r i = 0$$

La solution de cette équation différentielle du premier ordre et à coefficients constants est :

$$i = \frac{\epsilon}{r} \left( 1 - e^{-\frac{r}{L}t} \right)$$

Le tableau suivant montre la variation de  $i$  en fonction du temps  $t$ .

$t$	0	$\infty$
$e^{-\frac{r}{L}t}$	1	0
$\left( 1 - e^{-\frac{r}{L}t} \right)$	0	1
$i$	0	$\frac{\epsilon}{r}$



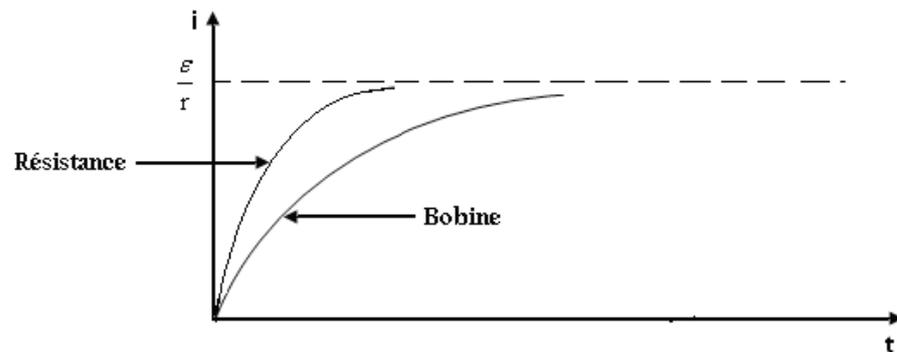
Il ressort de ce tableau que le courant augmente progressivement et au bout d'un certain temps atteint sa valeur maximale correspondant au régime permanent : ceci explique pourquoi la lampe  $L_2$  brille progressivement.

Dans la branche comportant la lampe  $L_1$  on n'a que le conducteur ohmique de résistance  $r$ .

$$L = 0 \Rightarrow e^{-\frac{r}{L}t} = 0 \Rightarrow i = \frac{\varepsilon}{r}$$

Le courant atteint quasi instantanément sa valeur maximale.

La représentation graphique de  $i$  en fonction de  $t$  donne :



### 3) L'interrupteur est de nouveau ouvert

Lorsqu'on ouvre de nouveau l'interrupteur  $K$ , l'intensité du courant dans la branche  $CD$  diminue immédiatement mais ne s'annule pas instantanément. Une forte f.é.m. est induite dans le circuit de la bobine. Cette f.é.m. s'oppose à diminution de  $i$ . Ce courant diminue alors progressivement : *il y a retard à la décroissance du courant et la lampe  $L_2$  s'éteint progressivement contrairement à  $L_1$ .*

La représentation graphique du courant qui traverse la bobine décrit clairement ce comportement.

Lorsque l'interrupteur est ouvert, le générateur est mis « hors circuit » et on a :

$$L \frac{di}{dt} + ri = 0 \Rightarrow \frac{di}{i} = -\frac{r}{L} dt$$

D'où :

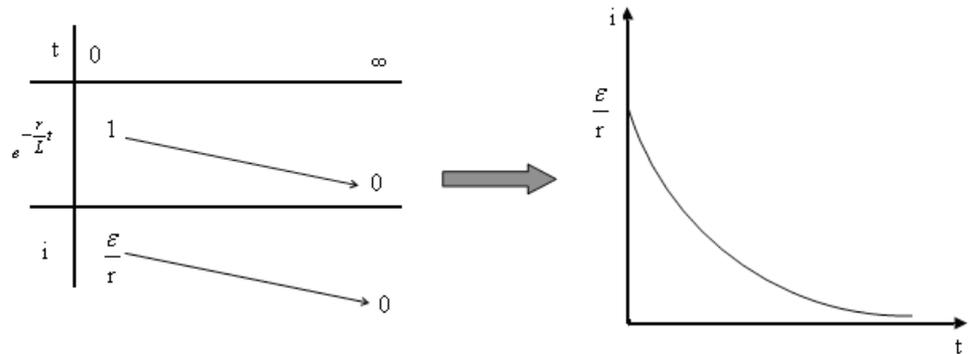
$$i = C e^{-\frac{r}{L}t}$$

$C$  est une constante déterminée par la condition initiale : à l'instant  $t = 0$   $i = \frac{\varepsilon}{r}$



= C. On obtient alors :  $i = \frac{\varepsilon}{r} e^{-\frac{r}{L}t}$

Après un certain temps,  $i \rightarrow 0$

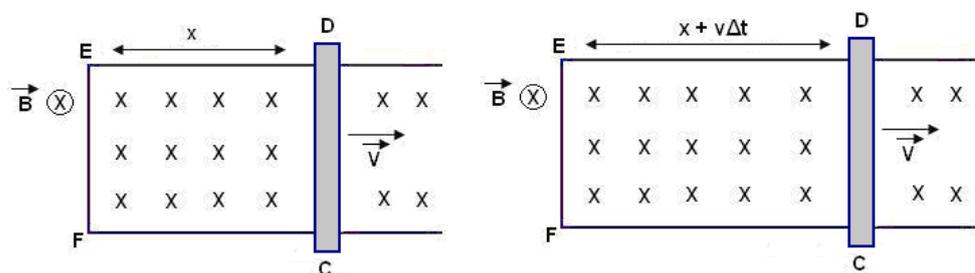


### Exercice 7

Le champ magnétique créé par le solénoïde dépend de I. Une variation de I provoque une variation de champ magnétique qui traverse la bobine, donc une variation du flux magnétique à travers la bobine d'où la naissance d'une f.é.m. induite.

### Exercice 8

1)



Le flux initial est :

$$\Phi_i = B l x$$

Pendant l'intervalle de temps  $\Delta t$ , la tige CD s'est déplacée d'une distance  $v\Delta t$  et le flux enlacé est :

$$\Phi_f = B l (x + v \Delta t)$$

La f.é.m. induite lors de ce déplacement est :



$$\varepsilon_{\text{ind}} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Phi_f - \Phi_i}{\Delta t}$$

On trouve :

$$\varepsilon_{\text{ind}} = B l v \quad (1)$$

On déduit de la relation que :

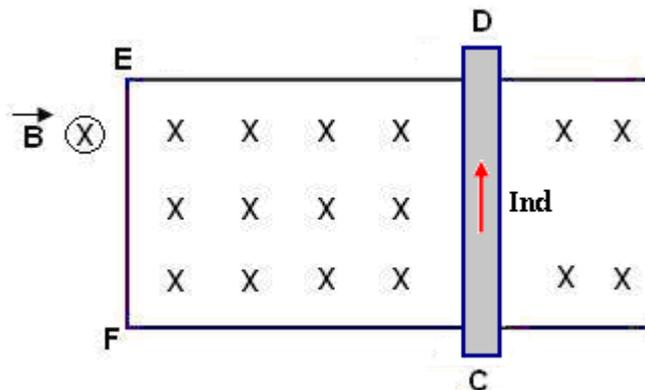
$$v = \frac{\varepsilon_{\text{ind}}}{Bl}$$

$$\text{A.N. : } \varepsilon_{\text{ind}} = 2,40 \text{ V ; } CD = EF = l = 0,40 \text{ m ; } B = 1,2 \text{ T}$$

$$v = \frac{2,40}{(1,2)(0,40)} = 5 \text{ ms}^{-1}$$

## 2) sens du courant induit

Le sens du courant induit est tel qu'il s'oppose au déplacement de la tige vers la droite. Il est dirigé de C vers D.



Son intensité est :

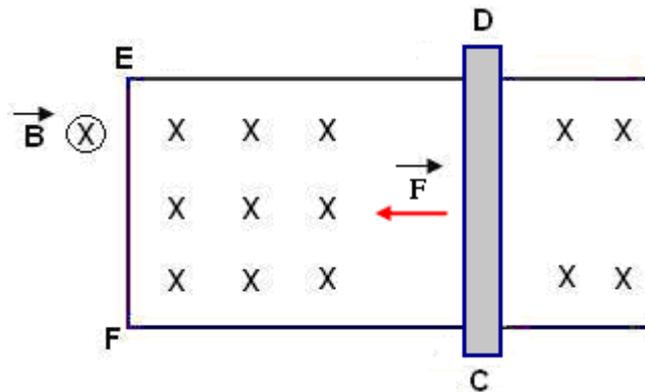
$$I_{\text{ind}} = \frac{\varepsilon_{\text{ind}}}{R}$$

$$\text{A.N. : } \varepsilon_{\text{ind}} = 2,40 \text{ V ; } R = 1,2 \Omega$$

$$I_{\text{ind}} = \frac{2,4}{1,2} = 2 \text{ A}$$



### 3) force qui s'exerce sur la tige



La tige est parcourue par un courant dirigé de C vers D. Elle subit donc une force :

$$\vec{F} = I_{\text{ind}} \vec{l} \wedge \vec{B}$$

Cette force s'oppose au déplacement de la tige vers la droite. Elle est dirigée vers la gauche.

Les vecteurs  $\vec{l}$  et  $\vec{B}$  étant perpendiculaires entre eux, on a :

$$F = I_{\text{ind}} B l$$

A.N.:  $I_{\text{ind}} = 2 \text{ A}$  ;  $l = 0,40 \text{ m}$  ;  $B = 1,2 \text{ T}$

$$F = (2)(0,4)(1,2) = \mathbf{0,96 \text{ N}}$$

## Exercice 9

### 1) l'observateur S au repos par rapport à la tige

Pour S, un électron de conduction de la tige métallique se déplace avec cette dernière vers la droite à la vitesse  $\vec{v}$ . Cet électron subit une force :

$$\vec{F}_m = -e\vec{v} \wedge \vec{B}$$

Cette force provoque le déplacement de l'électron vers le bas ( $D \rightarrow C$ ). Le sens conventionnel du courant est le sens opposé au sens de déplacement de l'électron : le courant induit va de C vers D.



## 2) l'observateur S est lié à la tige

Quand S est lié à la tige, il voit que c'est le champ  $\vec{B}$  qui se déplace. Pour lui, aucune force magnétique ne s'exerce sur l'électron pourtant il observe aussi que le même courant apparaît dans la tige métallique. Pour expliquer ce phénomène, il fait appel

à un champ électromoteur  $\vec{E}_m$  qui provoque le déplacement de l'électron vers le bas. L'électron est soumis à la force :

$$\vec{F}_e = -e\vec{E}_m$$

$\vec{E}_m$  est dirigé de C vers D, dans le sens du courant induit. Les deux forces  $\vec{F}_m$

et  $\vec{F}_e$  produisent les mêmes effets sur l'électron :

$$\vec{F}_e = \vec{F}_m$$

$$-e\vec{E}_m = -e\vec{v} \wedge \vec{B}$$

Il s'ensuit que :  $\vec{E}_m = \vec{v} \wedge \vec{B}$

## Exercice 10

Lorsque le courant qui traverse le solénoïde varie, il est le siège d'une f.é.m. induite qui peut s'écrire :

$$\varepsilon = N \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{et} \quad \varepsilon = L \frac{dI}{dt}$$

$\Phi$  étant le flux enlacé par une spire. Ces deux expressions donnent :

$$N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

On obtient alors :

$$L = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta I}$$



Quand  $I = 0$ , le flux à travers une spire est :  $\Phi_1 = 0$ . Soit  $\Phi_2$  le flux enlacé par une spire quand le courant est  $I$ . Lorsque le courant varie de 0 à  $I$ , on a :

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = \Phi_2 \quad \text{et} \quad \Delta I = I$$

Il s'ensuit que :

$$L = N \frac{\Phi_2}{I} \quad (1)$$

Mais  $\Phi_2 = BS$ ,  $B$  étant le champ créé par  $I$  et qui règne dans le solénoïde. La longueur du solénoïde étant grande par rapport à son diamètre, on a :

$$B = \mu_0 n I$$

$n$  est le nombre de spires par unité de longueur. La relation (1) donne alors :

$$L = N \frac{BS}{I} = N \frac{\mu_0 n I S}{I} = N \mu_0 n S$$

En remplaçant  $n$  par  $(N / l)$ , on obtient :

$$L = N^2 \frac{\mu_0 S}{l}$$

### Exercice 11

1) La f.é.m. induite dans la bobine est donnée par :

$$\varepsilon = L \frac{di}{dt} \Rightarrow L = \frac{\varepsilon}{\left(\frac{di}{dt}\right)}$$

$$\text{A.N. } \varepsilon = 10 \text{ V}; \quad \frac{di}{dt} = 50 \text{ As}^{-1}$$

$$L = \frac{10}{50} = 0,2 \text{ H}$$

2) La bobine comporte  $N = 500$  spires. Le flux à travers la bobine est  $N\Phi$  où  $\Phi$  est le flux moyen enlacé par une spire. On a :

$$N\Phi = Li \Rightarrow \Phi = \frac{Li}{N}$$

$$\text{A.N. } L = 0,2\text{H}; i = 2,5\text{A}; N = 500$$

$$\Phi = \frac{Li}{N} = 10^{-3}\text{H}$$



## Exercice 12

### 1) Taux initial de croissance du courant

La loi des mailles de Kirchhoff appliquée à ce circuit donne :

$$\varepsilon - L \frac{di}{dt} - Ri = 0 \quad (1)$$

À l'instant initial  $t = 0$ ,  $i = 0$ . On a alors :

$$\begin{aligned} \varepsilon - L \left( \frac{di}{dt} \right)_{t=0} = 0 &\Rightarrow \left( \frac{di}{dt} \right)_{t=0} = \frac{\varepsilon}{L} = \frac{10V}{5H} \\ \left( \frac{di}{dt} \right)_{t=0} &= 2 \text{ A s}^{-1} \end{aligned}$$

### 2) Intensité du courant à l'instant où son taux de croissance est $1 \text{ A s}^{-1}$ .

La relation (1) donne :

$$\begin{aligned} \varepsilon - L \frac{di}{dt} - Ri = 0 &\Rightarrow Ri = \varepsilon - L \frac{di}{dt} \\ \Rightarrow i &= \frac{\varepsilon}{R} - \frac{L}{R} \frac{di}{dt} \end{aligned}$$

A.N.  $\frac{di}{dt} = 1 \text{ A s}^{-1}$ ;  $\varepsilon = 10 \text{ V}$ ;  $R = 10 \Omega$  et  $L = 5 \text{ H}$

$$\begin{aligned} i &= \frac{10}{10} - \frac{5}{10} \frac{di}{dt} \\ \mathbf{i} &= \mathbf{0,5 \text{ A}} \end{aligned} \quad (1)$$

### 3) intensité finale du courant

Quand le courant atteint sa valeur finale,  $\frac{di}{dt} = 0$ . La relation (1) donne alors :

$$\varepsilon = R i_m \Rightarrow i_m = \frac{\varepsilon}{R}$$

L'application numérique donne :

$$\mathbf{i_m = 1A}$$



### Exercice 13

#### Taux initial de croissance

La loi des mailles de Kirchhoff appliquée à ce circuit donne :

$$\varepsilon - L \frac{di}{dt} - Ri = 0 \quad (1)$$

À l'instant initial :  $t = 0$  et  $i = 0$  d'où :

$$\varepsilon - L \left( \frac{di}{dt} \right)_{t=0} = 0 \Rightarrow \left( \frac{di}{dt} \right)_{t=0} = \frac{\varepsilon}{L}$$

A.N.  $\varepsilon = 1,5 \text{ V}$  ;  $L = 0,2 \text{ H}$

$$\left( \frac{di}{dt} \right)_{t=0} = 7,5 \text{ A s}^{-1}$$

#### Taux de croissance quand le courant $i = 0,1 \text{ A}$

$$\frac{di}{dt} = \frac{\varepsilon}{L} - \frac{Ri}{L} \text{ avec } R = 9 \Omega + 1 \Omega = 10 \Omega$$

A.N.  $\varepsilon = 1,5 \text{ V}$  ;  $L = 0,2 \text{ H}$  ;  $R = 10 \Omega$  ;  $i = 0,1 \text{ A}$

On trouve :  $\frac{di}{dt} = 2,5 \text{ A s}^{-1}$

#### Taux de croissance quand l'intensité du courant est $i = 0,15 \text{ A}$

On a :  $\frac{di}{dt} = \frac{\varepsilon}{L} - \frac{Ri}{L}$  avec  $i = 0,15 \text{ A}$

A.N.  $\varepsilon = 1,5 \text{ V}$  ;  $L = 0,2 \text{ H}$  ;  $R = 10 \Omega$  ;  $i = 0,15 \text{ A}$

On obtient :  $\frac{di}{dt} = 0$

On constate que lorsque l'intensité du courant augmente, son taux de croissance diminue et s'annule quand l'intensité maximale est obtenue : en effet  $i = 0,15 \text{ A}$  est

l'intensité maximale égale à  $\frac{\varepsilon}{R}$



### Exercice 14

La loi des mailles appliquée à ce circuit donne :

$$V_0 - L \frac{di}{dt} - Ri = 0$$

La solution de cette équation est :

$$i = \frac{V_0}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \quad (1)$$

La f.é.m. induite est :

$$|\varepsilon_{\text{ind}}| = L \frac{di}{dt} \Rightarrow |\varepsilon_{\text{ind}}| = L \frac{V_0}{L} e^{-\frac{R}{L}t} = V_0 e^{-\frac{R}{L}t} \quad (2)$$

#### 1- A l'instant $t = 0$

Les équations (1) et (2) donnent :

$$i = 0 \quad \text{et} \quad |\varepsilon_{\text{ind}}| = V_0$$

On comprend facilement ce résultat : en effet à  $t = 0$ ,  $i = 0$ , la tension aux bornes de la résistance est nulle et toute la tension appliquée se trouve donc aux bornes de l'inductance.

#### 2- A l'instant $t = \frac{1}{2} \tau$

$\tau$  est la constante du temps :  $\tau = \frac{L}{R}$

Les équations (1) et (2) donnent :

$$i = \frac{V_0}{R} (1 - e^{-\frac{1}{2}}) \quad \text{avec} \quad e = 2,718$$

$$i = \frac{V_0}{R} (1 - \frac{1}{\sqrt{e}}) = 0,391 \frac{V_0}{R}$$

$$|\varepsilon| = V_0 e^{-\frac{R}{L} \frac{L}{2R}} = V_0 e^{-\frac{1}{2}} = \frac{V_0}{\sqrt{e}}$$

$$|\varepsilon| = 0,606 V_0$$



## Visite de sites

### Partie 1

Consultez les sites suivants et mettez ce que vous visualisez en relation avec ce que vous avez appris au cours de votre activité d'apprentissage.

#### 1) Charge spécifique de l'électron ( $e/m$ )

[http://wwwens.uqac.ca/chimie/Physique\\_atom/Chap\\_htm/CHAP\\_3.html](http://wwwens.uqac.ca/chimie/Physique_atom/Chap_htm/CHAP_3.html)

Ce site traite entre autres la détermination de la charge spécifique de l'électron. Il analyse la déflexion électrique des rayons cathodiques, la déflexion magnétique d'un faisceau d'électrons, le principe d'un sélecteur de vitesse.

<http://www.unige.ch/sciences/physique/tp/tpe/E9.htm>

Ce site propose un TP sur la mesure de la charge spécifique de l'électron.

<http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/electri/esurm.html>

C'est une applet sur la mesure de  $e/m$  par la méthode de J.J. Thomson et par la méthode du tube à gaz d'hydrogène. En suivant les consignes données par l'auteur, vous pouvez participer à sa détermination.

#### 2) Effet Hall

<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/Meca/Charges/hall.html>

Vous visualisez ici une animation de l'effet Hall. Vous pouvez choisir le signe des charges, régler l'intensité du courant, le champ magnétique ainsi que l'épaisseur de l'échantillon

[http://membres.lycos.fr/physiciss/labos/effet\\_hall.pdf](http://membres.lycos.fr/physiciss/labos/effet_hall.pdf)

Vous verrez ici une proposition d'expérience qui met en évidence l'effet Hall dans un semi-conducteur et qui aborde la détermination du nombre des porteurs de charges par unité de volume dans le cas du germanium.

#### 3) Cyclotron

<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/Meca/Charges/cyclotron.html>

C'est une applet où vous pouvez visualiser le mouvement des porteurs de charge dans un cyclotron



#### 4) Spectrographe de masse – Déflexion magnétique

[http://perso.orange.fr/physique.chimie/Cours\\_de\\_physique/Physique\\_12\\_PARTICULE\\_CHARGEE\\_DANS\\_UN\\_CHAMP\\_MAGNETIQUE.htm](http://perso.orange.fr/physique.chimie/Cours_de_physique/Physique_12_PARTICULE_CHARGEE_DANS_UN_CHAMP_MAGNETIQUE.htm)

Ce site donne un problème sur le spectrographe de masse et un problème sur la déflexion magnétique ainsi que leurs solutions.

#### Partie 2

Vous trouverez dans les adresses qui suivent des informations qui renforcent et complètent ce que vous avez appris au cours de cette activité d'apprentissage.

[http://perso.orange.fr/daniel.robert9/Induction\\_electromagnetique.html](http://perso.orange.fr/daniel.robert9/Induction_electromagnetique.html)

Ce site traite une leçon sur l'induction électromagnétique. Il examine essentiellement les points suivants : la f.é.m. induite, le courant induit et la loi de Lenz, les phénomènes d'auto-induction et d'induction mutuelle.

[http://perso.orange.fr/daniel.robert9/Induction\\_electromagnetique0.html](http://perso.orange.fr/daniel.robert9/Induction_electromagnetique0.html)

Il s'agit ici de l'énergie emmagasinée par une bobine d'inductance  $L$ .

<http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/electri/lenz.html>

C'est une applet qui montre une simulation de la loi de Lenz

<http://jf-noblet.chez-alice.fr/bobine/index.htm>

Ce site présente des simulations de circuits R en rapport avec ce que vous avez étudié jusqu'ici :

- simulation de l'établissement du courant dans un circuit RL
- rupture de courant dans un circuit RL
- mesure de l'inductance d'une bobine



## Résumé

### Ce qu'il faut retenir

#### Sur les particules chargées dans un champ électromagnétique

- Une particule de charge  $q$  qui se déplace avec une vitesse  $\vec{v}$  dans un champ magnétique  $\vec{B}$  subit une force  $\vec{F} = q \vec{v} \wedge \vec{B}$ .
- Une particule chargée qui pénètre dans un champ magnétique uniforme avec une vitesse orthogonale au champ prend un mouvement circulaire uniforme.
- De nombreux dispositifs expérimentaux mettent à profit la déflexion magnétique et le mouvement circulaire des particules chargées dans un champ magnétique.
  - Les spectromètres de masse
  - Les dispositifs pour la mesure de  $\frac{e}{m}$  par déflexion magnétique, mesure de  $\frac{e}{m}$  par la méthode de J.J. Thomson, par la méthode du tube à gaz raréfié
  - Les cyclotrons.

#### Sur les phénomènes d'induction électromagnétique et loi de Lenz

- Une variation dans le temps du flux du champ magnétique à travers un circuit produit dans ce circuit une f.é.m. d'induction, quelle que soit la cause de cette variation.
- La f.é.m. induite disparaît dès que la variation du flux magnétique cesse.
- A une f.é.m. induite dans un circuit fermé correspond un courant induit.
- Loi de Lenz : « le sens du courant induit est tel qu'il s'oppose à la cause qui le produit ».
- Une f.é.m. induite apparaît dans une tige métallique en mouvement de translation uniforme de vitesse  $\vec{v}$  dans un champ  $\vec{B}$  normal  $\vec{v}$ . Chaque électron libre de ce conducteur subit une force  $\vec{F}_m = -e\vec{v} \wedge \vec{B}$ . Cette force provoque un mouvement d'ensemble des électrons libres et est à l'origine du courant induit dans le circuit fermé contenant la tige. A la force  $\vec{F}_m$  est associé un champ électromoteur  $\vec{E}_m$  tel que  $\vec{F}_m = -e\vec{v} \wedge \vec{B} = -e\vec{E}_m$ .
- Un champ électromoteur peut entretenir le mouvement des porteurs de charges dans un circuit fermé.



### Sur les phénomènes d'auto-induction et circuit RL

- Flux propre

Soit un circuit (C) parcouru par un courant  $i$ . Ce courant crée un champ magnétique donc un flux de champ magnétique à travers (C) lui-même : ce flux est appelé « flux propre ».

Le flux propre à travers un circuit est proportionnel à l'intensité du courant  $I$  qui traverse ce circuit : la constante de proportionnalité est appelée « Inductance du circuit ».

$$\Phi = L I, \quad L = \text{inductance du circuit.}$$

#### Phénomène d'auto-induction

Toute variation de l'intensité du courant dans un circuit quelconque (donc toute variation du flux propre) engendre une f.é.m. d'induction qui fait circuler dans ce circuit un courant complémentaire dont le sens est tel qu'il s'oppose à la cause qui le produit.

#### Circuit RL

L'équation différentielle qui décrit l'évolution du courant dans un circuit RL série branché aux bornes d'une source de tension continue  $\varepsilon$  est :

$$\varepsilon - \frac{dI}{dt} - RI = 0$$

et le courant traversant le circuit est :

$$I = \frac{\varepsilon}{R} \left( 1 - e^{-\frac{Rt}{L}} \right)$$

Ce courant n'atteint pas immédiatement sa valeur maximale mais augmente progressivement.

- $\left( \frac{dI}{dt} \right)$  est le taux de croissance du courant
- A l'instant initial  $t = 0$ ,  $\left( \frac{dI}{dt} \right)_{t=0} = \frac{\varepsilon}{L}$
- Quand le régime permanent s'établit,  $\left( \frac{dI}{dt} \right) = 0$  et le courant atteint sa valeur

$$\text{maximale } I_m = \frac{\varepsilon}{R}$$



- A l'instant  $t = 0$ , la courbe  $I = f(t)$  est tangente à la droite de pente

$$\left(\frac{dI}{dt}\right)_{t=0} = \frac{\varepsilon}{L}$$

- La constante du temps d'un circuit (RL) est définie par  $\tau = \frac{L}{R}$ . Cette constante est homogène à un temps ; elle caractérise la rapidité avec laquelle le régime permanent est atteint. Les circuits fortement inductifs ont une constante de temps élevée.

### Autoévaluation

Les apprenant(e)s prennent note des difficultés rencontrées au cours de l'activité d'apprentissage. Ils/Elles pourront revoir les parties du cours concernées afin de mieux cerner l'origine de leurs difficultés et erreurs.

### Guide de l'enseignant

Le Professeur corrigera les productions des groupes. Il/Elle déposera la correction dans un espace de travail accessible aux apprenant(e)s. La correction sera accompagnée d'un feedback adéquat. Les notes obtenues pour chaque groupe sont attribuées aux membres du groupe et vont compter pour 20% de l'évaluation finale du module.



## Activité d'apprentissage 3

### Titre de l'activité

Aimantation et courant moléculaire ; les vecteurs magnétiques  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$  et  $\vec{M}$  ; les substances paramagnétiques, diamagnétiques et ferromagnétiques.

### Temps d'apprentissage : 30H

**Consigne :** Pour cette activité, si vous avez au **moins  $\frac{3}{4}$  des points**, vous avez fait du très bon travail, vous pouvez continuer.

Si vous avez **moins de la moitié des points**, vous devez relire les lectures proposées et refaire l'activité.

Si vous avez **plus de la moitié des points et moins de  $\frac{3}{4}$  des points**, vous avez fait du bon travail, mais vous devez faire des efforts pour la suite.

### Objectifs spécifiques

A l'issue de cette activité, l'apprenant(e) doit être capable de :

- rappeler l'origine des courants moléculaires
- déterminer par le calcul le moment magnétique d'une boucle de courant
- rappeler la relation qui lie le champ  $\vec{B}$ , l'excitation magnétique  $\vec{H}$  et l'aimantation  $\vec{M}$
- calculer l'aimantation  $M$  d'une substance magnétique
- rappeler la loi de Curie pour les paramagnétiques
- Calculer la perméabilité d'un matériau
- Utiliser le champ coercitif pour déterminer le courant nécessaire pour démagnétiser un matériau magnétisé
- Calculer le magnéton de Bohr



## Résumé de l'activité

Cette activité est consacrée à l'étude des propriétés magnétiques de la matière : le paramagnétisme, le diamagnétisme et le ferromagnétisme. L'accent sera mis sur leur interprétation microscopique. Vous découvrirez que :

- l'aimantation des substances magnétiques est liée à l'existence de courants moléculaires dans ces substances. Vous analyserez l'origine de ces courants et leur comportement en présence d'un champ magnétique exciteur
- lorsqu'on place des substances magnétiques dans un champ  $\vec{B}$ , leurs dipôles magnétiques élémentaires créent leur propre champ qui modifie le champ initial. Deux autres vecteurs, en plus de  $\vec{B}$ , sont introduits pour décrire le phénomène : l'excitation magnétique  $\vec{H}$  et l'aimantation  $\vec{M}$ . Vous apprendrez la relation qui existe entre ces vecteurs et comment on les détermine.

## Lectures appropriées

RASOLONDRAMANITRA, H. (2007). Les propriétés magnétiques de la matière. Madagascar. Université d'Antananarivo. Cours inédit.

## Ressources pertinentes

BEISER, A. (1979). Physique appliquée : Cours et problèmes. Serie Schaum . Traduction française par LOBENBERG M. McGraw-Hill, Paris

BREITHAUPT, J. (2000). New Understanding : Physics for Advanced Level. Fourth Edition, Stanley Thornes Publishers Ltd, England ,

BRUHAT, G. (1967). Cours de Physique Générale : Electricité. Huitième Edition Révisée (2e tirage) par G.GOUDET, Masson et C<sup>ie</sup>, Editeurs, Paris

FRANCIS W. S., ZEMANSKY, M. W. and YOUNG. H. D. (1987). University Physics. Seventh Edition, Addison-Wesley Publishing Company, USA.

FRANCIS W. S., ZEMANSKY, M. W. and YOUNG. H. D. (1974). College Physics. Fourth Edition. Addison-Wesley Publishing Company, USA.

GERL, M. et JANOT, C. (1970). Physique MP<sub>2</sub> – PC<sub>2</sub>, 1. Relativité – Electromagnétisme. Collection Hachette Université.

HALPERN, A. (1991) Maxi Schaum Physique 2. Traduction française par BABES, V. McGraw-Hill, Paris

KALACHNIKOV, S. (1980). Electricité. Traduction française. Editions Mir, Moscou, Réédition : 1983



- NELKON, M. and PARKER, P. (1998). Advanced Level Physics. Seventh Edition, Heinemann, (Oxford ?)
- RESNICK, R. et HALLIDAY, D. (1979). Electricité et magnétisme, physique 2. Traduit par André Lebel et Claudine Thériault. Editions du Renouveau Pédagogique. Inc. Montréal (Québec) Canada
- SEARS. F.W, ZEMANSKY, M. W. and YOUNG. H. D. (1987). University Physics. Seventh Edition, Addison-Wesley Publishing Company, USA.
- SEARS.F.W., ZEMANSKY, M. W. and YOUNG, H. D. (1974). College Physics. Fourth Edition. Addison-Wesley Publishing Company, USA.
- TIPLER, P.-A. and Company. (1999). Physics for Scientists and Engineers. Fourth Edition. W.H. FREEMAN and company. Worth Publishers Inc., New York, USA
- TIPLER, P. A. (1982). Physics. Second Edition. Worth Publishers Inc, New York, USA

### Liens utiles

- [http://www.thyssenfrance.com/documents/mut%20devt%20text%20doc%20tech%20aim\\_MAGNETISME%20-%20QUELQUES%20RAPPELS.pdf](http://www.thyssenfrance.com/documents/mut%20devt%20text%20doc%20tech%20aim_MAGNETISME%20-%20QUELQUES%20RAPPELS.pdf)
- [http://perso.univ-lr.fr/vmathe/16\\_annexeA.pdf](http://perso.univ-lr.fr/vmathe/16_annexeA.pdf)
- <http://semainescience.u-strasbg.fr/magnetisme/fondement.html>
- <http://www.grasp.ulg.ac.be/cours/2cm/elec5.pdf>
- [http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/weisli\\_j.html](http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/weisli_j.html)
- <http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/praimh.html>

### Description de l'activité

Dans ce parcours d'apprentissage, vous êtes invité à passer par quatre étapes progressives.

**Etape 1** : au départ, vous aurez à effectuer des lectures sur le thème à étudier

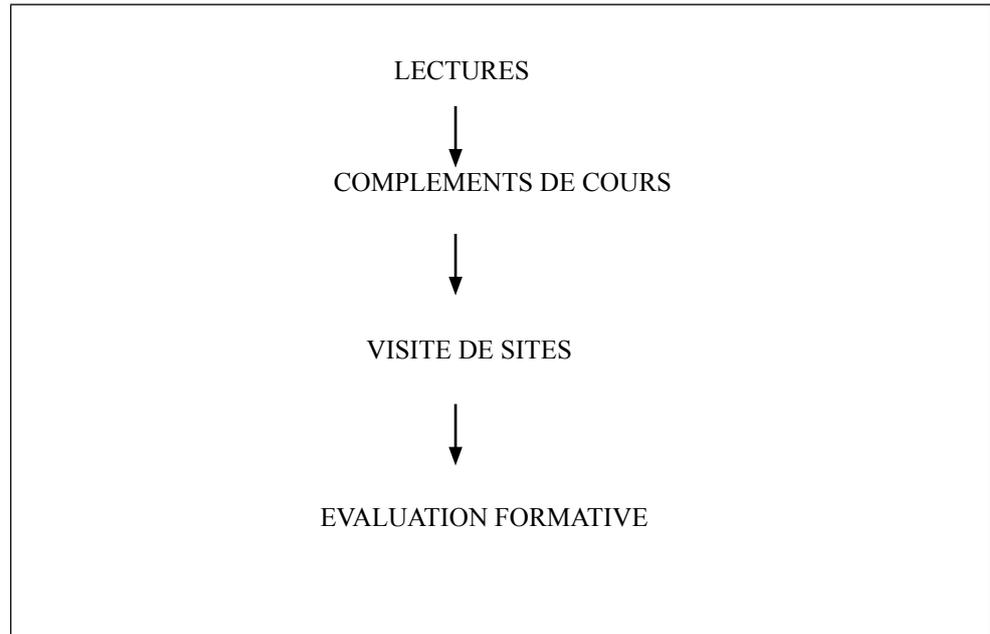
**Etape 2** : suite à cette phase de familiarisation globale, des compléments de cours développeront à votre attention certains points importants. Des exercices adéquats incorporés dans ces compléments vous aideront à maîtriser ces concepts.

**Etape 3** : afin de mettre en perspective tout ce qui précède, vous serez guidé vers des visites de sites avec pour objectifs de vous faire accéder à des animations relatives au thème et d'aiguiser votre sens de l'observation.

**Etape 4** : un enchaînement d'exercices vous sera proposé pour vous permettre de tester, réinvestir et renforcer vos acquis.



Le schéma suivant résume cette progression.



### Évaluation formative

Cette évaluation formative comprend des compléments de cours à lire avant de faire les exercices. Chaque exercice représente 1% des points

### Compléments de cours 1

**Aimantation et courant moléculaire – Champ magnétique créé par un dipôle magnétique**

**Dipôle magnétique dans un champ magnétique**

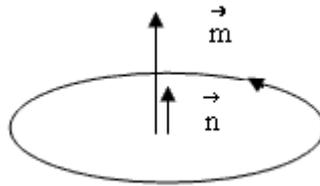
#### *1-1 : Courant moléculaire*

Diverses substances placées dans un champ magnétique deviennent elle mêmes sources de champ magnétique. On dit qu'elles s'aimantent. Cette aimantation est liée à l'existence de courants électriques microscopiques qui circulent à l'intérieur des atomes.

En effet, chaque atome possède des électrons qui, dans le modèle classique, gravitent autour de son noyau. Ces électrons, dans leur mouvement, représentent des petites boucles de courants électriques que l'on appelle courants moléculaires et produisent leur propre champ magnétique.



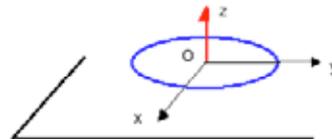
Un courant moléculaire, qui est un courant fermé, possède un moment magnétique  $\vec{m}$  tel que  $\vec{m} = i S \vec{n}$  où  $i$  est l'intensité du courant,  $S$  la surface balayée par le courant et  $\vec{n}$  un vecteur unitaire normal à cette surface. Le sens de  $\vec{n}$  est donné par la règle du tire-bouchon.



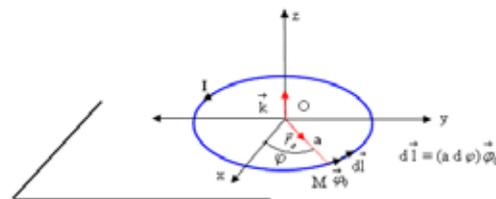
Un courant moléculaire constitue un dipôle magnétique

**1-2 : Champ magnétique créé par un dipôle magnétique.**

Supposons que, dans son mouvement autour du noyau, un électron suit une orbite circulaire (modèle classique). Désignons par  $O$  le centre de cette orbite et par  $a$  son rayon. Déterminons le champ magnétique créé au point  $O$  par le courant moléculaire ainsi constitué. Pour ce faire, on placera l'orbite circulaire dans le plan  $x$   $o$   $y$  d'un repère  $O$   $x$   $y$   $z$  comme l'illustre la figure ci-dessous.



Champ magnétique au point  $O$



$\vec{\varphi}_0$  est un vecteur unitaire tangent à l'orbite circulaire. Un élément de longueur  $d\vec{l}$  de la trajectoire peut s'écrire :

$$d\vec{l} = (a d\varphi) \vec{\varphi}_0, \text{ a étant le rayon.}$$

L'élément de courant  $I d\vec{l}$  crée au point  $O$  un champ  $d\vec{B}$  tel que :

$$d\vec{B} = -\frac{\mu_0 I d\vec{l} \wedge \vec{r}_0}{4\pi a^2} \quad (1)$$

(Remarquons que dans cette expression  $\vec{r}_0$  est dirigé de  $O$  vers  $M$  et non de  $M$  vers  $O$ , d'où le signe (-)).



Nous avons :  $\vec{I} \wedge \vec{r}_0 = (I a d\varphi)(\vec{\varphi}_0 \wedge \vec{r}_0)$

Or  $\vec{\varphi}_0 \wedge \vec{r}_0 = -\vec{k}$ ,  $\vec{k}$  étant le vecteur unitaire porté par oz. En effet les vecteurs unitaires  $\vec{r}_0$  et  $\vec{\varphi}_0$  s'écrivent :

$$\vec{r}_0 = (\cos \varphi) \vec{i} + (\sin \varphi) \vec{j}$$

$$\vec{\varphi}_0 = (-\sin \varphi) \vec{i} + (\cos \varphi) \vec{j}$$

$\vec{i}$  et  $\vec{j}$  sont les vecteurs unitaires sur Ox et Oy

$$\Rightarrow \vec{\varphi}_0 \wedge \vec{r}_0 = -(\vec{i} \wedge \vec{j}) = -\vec{k}$$

La relation (1) s'écrit maintenant :

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I a d\varphi}{4\pi a^2} \vec{k}$$

En intégrant cette dernière expression, on obtient le champ total au point O :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \int_0^{2\pi} d\varphi \vec{k} = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} 2\pi \vec{k} = \frac{\mu_0 I}{2 a} \vec{k} \quad (2)$$

Si on fait intervenir le moment dipolaire  $\vec{m}$ , on aura :

$$\vec{m} = I \vec{S} = (I \pi a^2) \vec{k} \text{ car } \vec{m} \text{ est ici dans la direction de } \vec{k}.$$

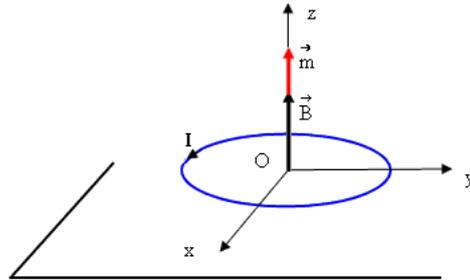
$$\Rightarrow I \vec{k} = \frac{\vec{m}}{\pi a^2} \quad (3)$$

Les expressions (2) et (3) donnent :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{2 a} \left( \frac{\vec{m}}{\pi a^2} \right)$$

$$\Rightarrow \vec{B} = \frac{\mu_0}{2 \pi a^3} \vec{m}$$

Il s'ensuit que  $\vec{B}$  et  $\vec{m}$  ont la même direction et le même sens.



### 1-3 : Dipôle dans un champ magnétique $\vec{B}_{ex}$

\* Lorsqu'un dipôle magnétique de moment  $\vec{m}$  est placé dans un champ magnétique uniforme  $\vec{B}_{ex}$ , il subit un couple de moment  $\vec{\Gamma}$  donné par :

$$\vec{\Gamma} = \vec{m} \wedge \vec{B}_{ex}$$

Remarque : Cette expression est tout à fait analogue à celle qui donne le moment du couple appliqué à un dipôle électrique placé dans un champ électrique ( $\vec{\Gamma} = \vec{P} \wedge \vec{E}$ )

Ce couple tend à faire tourner le dipôle.

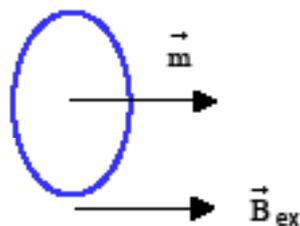
\* Cette interaction « Champ - dipôle » est décrite par l'énergie potentielle :

$$U = - \vec{m} \cdot \vec{B}_{ex}$$

U est minimale  $\vec{B}_{ex} // \vec{m}$

U est maximale si  $\vec{B}_{ex}$  et  $\vec{m}$  sont antiparallèles.

La position la plus stable correspond à  $\vec{m} // \vec{B}_{ex}$



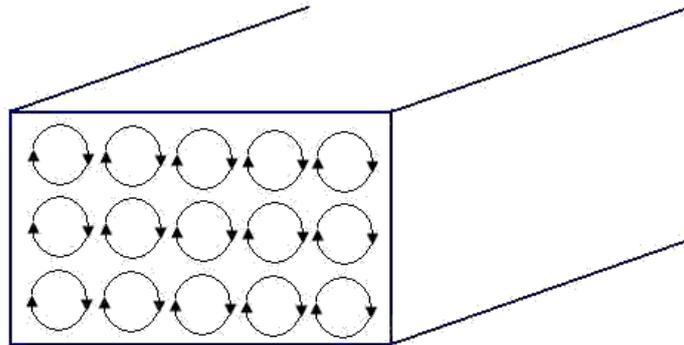


#### 1-4 : Aimantation et courant moléculaire

Dans une substance non aimantée, i.e en l'absence d'un champ extérieur  $\vec{B}_{ex}$ , les courants moléculaires ou dipôles magnétiques sont orientés de façon désordonnée et le champ résultant qu'ils produisent est nul.

Lorsqu'une substance prend une certaine aimantation, ses courants moléculaires deviennent partiellement ou totalement ordonnés et le champ résultant n'est plus nul.

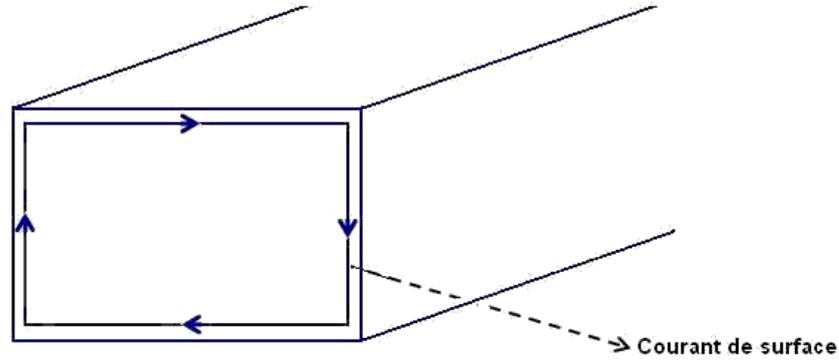
La figure ci-dessous décrit ce modèle de courants moléculaires dans un matériau uniformément aimaté.



Remarquons que les courants des portions de circuits adjacents sont opposés et s'annulent.



Le courant en tout point à l'intérieur de la substance est alors nul et il reste un courant de surface équivalent. Ce courant de surface est appelé « courant ampérien ».



Un courant de surface équivalent apparaît donc dans une substance aimantée. Ce courant de surface crée un champ induit  $\vec{B}_{\text{ind}}$  qui s'ajoute vectoriellement au champ magnétisant  $\vec{B}_{\text{ex}}$ .

On peut remarquer ici l'analogie aux charges de surface liées dans les diélectriques polarisés. La différence réside dans le fait que le champ électrique dû aux charges de polarisation s'oppose (en sens) au champ créé par les charges excitatrices libres.



## Compléments de cours 2

Relation entre le vecteur  $\vec{B}$ , le vecteur intensité magnétique  $\vec{H}$  et le vecteur aimantation  $\vec{M}$  - Loi d'Ampère pour un milieu aimanté - Susceptibilité magnétique.

Rappelons que lorsqu'un matériau est aimanté, un courant de surface apparaît. Ce courant induit un champ  $\vec{B}_{\text{ind}}$  qui s'ajoute au champ magnétisant, appelé aussi champ exciteur. Le champ total dans le matériau est alors :

$$\vec{B} = \vec{B}_{\text{ex}} + \vec{B}_{\text{ind}}$$

Considérons un solénoïde long comportant  $n$  spires par unité de longueur et parcouru par un courant  $I_C$ . Enroulons les spires de ce solénoïde sur un matériau magnétique en forme de tige cylindrique de section  $S$  et Déterminons l'aimantation d'une longueur  $l$  de la tige et le champ total dans ce système.

En l'absence du matériau, le champ à l'intérieur du solénoïde et éloigné de ses extrémités est uniforme et parallèle à l'axe du solénoïde. Ce champ est :

$$B_0 = \mu_0 n I_C$$

où  $n I_C$  est le courant par unité de longueur avec  $I_C$  le courant qui parcourt chaque spire.

Lorsque le matériau est inséré, il est aimanté et un courant de surface  $I$  apparaît et crée un champ  $\vec{B}_{\text{ind}}$ .

Prenons une portion de longueur  $l$  de la tige cylindrique.

Son volume et son moment magnétique sont respectivement  $V = S l$  et  $m = I S$ ,  $S$  étant sa section.

L'aimantation  $M$  (le moment magnétique par unité de volume) de la tige est alors :

$$M = \frac{m}{V} = \frac{I S}{S l} = \frac{I}{l}$$

**Remarque :** L'aimantation s'exprime donc en  $\text{Am}^{-1}$ .

On constate que l'aimantation  $M$  est égale au courant de surface par unité de longueur.

$M$  et  $n I_C$  jouent le même rôle : courant par unité de longueur. Il s'ensuit que le champ  $\vec{B}_{\text{ind}}$  qui résulte de cette aimantation prend une expression analogue à  $B_0 = \mu_0 n I_C$ .



On a :

$$B_{\text{ind}} = \mu_0 M$$

Le champ total dans le système est alors :

$$B = B_0 + B_{\text{ind}} \text{ si le matériau est paramagnétique}$$

$$B = B_0 - B_{\text{ind}} \text{ si le matériau est diamagnétique}$$

Si la tige est paramagnétique, le courant de surface  $I$  et le courant exciteur  $I_C$  ont le même sens. Dans ce cas  $\vec{B}_0$  et  $\vec{B}_{\text{ind}}$  sont orientés dans le même sens et on a  $B = B_0 + B_{\text{ind}}$

Si la tige est diamagnétique,  $I$  et  $I_C$  sont le sens opposés de même que  $\vec{B}_0$  et  $\vec{B}_{\text{ind}}$  et on obtient  $B = B_0 - B_{\text{ind}}$

En notation vectorielle, on aura :

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_{\text{ind}}$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{M}$$

$\vec{B}_0$  est ici le champ exciteur

### 2-1 : Relation entre le vecteur $\vec{B}$ l'intensité magnétique $\vec{H}$ et l'aimantation $\vec{M}$

On définit l'intensité magnétique

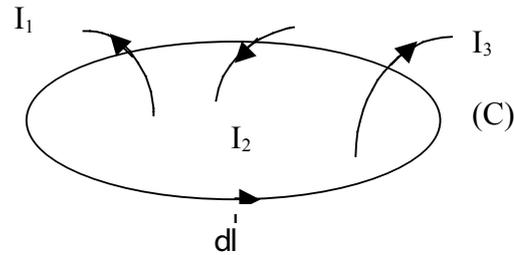
$$* \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

Les trois vecteurs,  $\vec{H}$ ,  $\vec{B}$  et  $\vec{M}$  sont liés par cette relation. L'intensité magnétique s'exprime en  $\text{Am}^{-1}$ . On peut retrouver cette relation à partir de la loi d'Ampère pour un milieu aimanté.

#### Rappel de la loi d'Ampère

La loi d'Ampère exprime que la circulation de  $\vec{B}$  le long d'une courbe fermée (C) est égale à la somme algébrique des courants enlacés par (C) multipliée par  $\mu_0$ .

$$C = \oint_{(C)} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \Sigma I$$



$$\Sigma I = I_1 - I_2 + I_3$$

Cette loi permet de calculer le champ  $\vec{B}$  produit par les courants  $I$ . En appliquant le théorème de Stokes, on obtient :

$$C = \oint_{(C)} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \int_{(S)} (\vec{\nabla} \wedge \vec{B}) \cdot d\vec{S}$$

(S) est une surface ouverte limitée par (C).

En posant  $\Sigma I = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S}$ ,  $\vec{J}$  étant la densité de courant, on aura :

$$\int_{(S)} (\vec{\nabla} \wedge \vec{B}) \cdot d\vec{S} = \mu_0 \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S}$$

De là, on tire :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \quad (1)$$

C'est la loi d'Ampère sous forme différentielle.

### 2-2 : Loi d'Ampère et milieu aimanté

Le champ induit  $\vec{B}_{ind}$  qui apparaît dans un milieu aimanté est produit par un courant équivalent (courant ampérien) d densité  $\vec{J}_a$  défini par :

$$\vec{J}_a = \vec{\nabla} \wedge \vec{M} \quad (2)$$



On peut comprendre l'expression (2) en

appliquant la relation (1) à  $\vec{B}_{ind}$  :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B}_{ind} = \mu_0 \vec{J}_a$$

Mais  $\vec{B}_{ind} = \mu_0 \vec{M} \Rightarrow \vec{\nabla} \wedge (\mu_0 \vec{M}) = \mu_0 \vec{J}_a$

$$\Rightarrow \vec{\nabla} \wedge \vec{M} = \vec{J}_a$$

Dans un milieu aimanté, le champ  $\vec{B}$  est dû essentiellement :

- au courant excitateur de densité  $\vec{j}_{ex}$
- au courant équivalent de densité  $\vec{J}_a$

La loi d'ampère s'écrit donc :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \vec{j} = \mu_0 (\vec{j}_{ex} + \vec{J}_a)$$

En développant cette relation, on obtient :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \vec{j}_{ex} + \mu_0 \vec{J}_a = \mu_0 \vec{j}_{ex} + \mu_0 (\vec{\nabla} \wedge \vec{M})$$

$$\Rightarrow \vec{\nabla} \wedge (\vec{B} - \mu_0 \vec{M}) = \mu_0 \vec{j}_{ex}$$

$$\Rightarrow \vec{\nabla} \wedge \left( \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \right) = \vec{j}_{ex}$$

On définit :  $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$

La loi d'Ampère devient

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{j}_{ex}$$



### 2-3 : Susceptibilité magnétique

Dans les matériaux magnétiques isotropes et linéaires, l'aimantation  $\vec{M}$  et l'intensité magnétique  $\vec{H}$  sont proportionnelles.

$$\vec{M} = X_m \vec{H}$$

$X_m$  est appelé susceptibilité magnétique.

La susceptibilité magnétique est positive pour les substances paramagnétiques et négative pour les substances diamagnétiques.

Pour les diamagnétiques donc, le vecteur aimantation est opposé au vecteur intensité magnétique.

#### Remarque :

$X_m$  est un nombre

Le tableau ci-dessous donne les valeurs des susceptibilités de quelques matériaux à 20°C.

Matériau	$X_m$
Aluminium	$2,3 \times 10^{-5}$
Bismuth	$-1,66 \times 10^{-5}$
Cuivre	$-0,98 \times 10^{-5}$
Magnésium	$1,2 \times 10^{-5}$
Sodium	$-0,24 \times 10^{-5}$

#### Perméabilité

Reprenons  $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$  et  $\vec{M} = X_m \vec{H}$   
On en déduit que :

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 (\vec{H} + X_m \vec{H}) = \mu_0 (1 + X_m) \vec{H}$$

Posons  $\mu = \mu_0 (1 + X_m)$  d'où  $\vec{B} = \mu \vec{H}$

$\mu$  est la perméabilité du matériau. On peut aussi écrire :



$\mu = \mu_0 \mu_r$  avec  $\mu_r = (1 + X_m)$   
 $\mu_r$  est appelé perméabilité relative

Dans le vide ou dans un matériau non magnétique, on a :

$$X_m = 0 \Rightarrow \mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1$$

- Pour les matériaux paramagnétiques

$$X_m > 0 \Rightarrow \mu_r > 1$$

- Pour les matériaux diamagnétiques

$$X_m < 0 \Rightarrow \mu_r < 1$$

- Pour les matériaux ferromagnétiques :

$\vec{M}$  n'est plus proportionnel à  $\vec{H}$

$\vec{B}$  n'est plus proportionnel à  $\vec{H}$

On a un phénomène d'hystérésis

[Voir phénomène d'hystérésis dans « lectures appropriées »]



## Exercices

### Exercice 1

Un solénoïde long, sans noyau de fer, comporte 12 spires par cm. Il est parcouru par un courant d'intensité  $I = 0,50\text{A}$ .

- 1- Déterminer l'intensité magnétique  $H$  et le champ  $B$  au centre du solénoïde.
- 2- Lorsqu'on introduit dans le solénoïde un noyau de fer, le champ  $B$  prend la valeur  $1,36\text{ T}$ .
  - calculer de nouveau l'intensité magnétique  $H$
  - trouver l'aimantation  $M$ , la perméabilité et la perméabilité relative du noyau.

### Exercice 2

Un tore de fer, de circonférence moyenne égale à  $0,5\text{m}$ , de perméabilité relative  $\mu_r = 5000$  a un enroulement de 500 spires parcouru par le courant  $I = 0,15\text{A}$ . Déterminer l'aimantation  $M$  et le moment magnétique moyen par atome de fer.

On donne :

- la densité du fer  $\rho = 7850\text{ kg/m}^3$
- la masse molaire  $M_{\text{mol}} = 55,8 \times 10^{-3}\text{kg/mol}$
- le nombre d'Avogadro  $N_A = 6,02 \times 10^{23}\text{ atomes/mol}$

### Exercice 3

Soit une bobine toroïdale de circonférence moyenne  $l = 0,8\text{m}$ , comportant  $N = 1200$  spires et parcouru par un courant d'intensité  $I = 1,5\text{A}$

- 1- Calculer  $B$  et  $H$  en admettant que le noyau est vide.
- 2- On suppose maintenant que la bobine est enroulée sur un noyau de bismuth de susceptibilité magnétique  $X_m = -1,66 \times 10^{-5}$ 
  - Calculer la perméabilité de ce matériau et comparer avec la perméabilité pour l'espace vide.
  - Calculer de nouveau  $B$  et  $H$ . Conclure
- 3- On remplace le bismuth par le magnésium de susceptibilité  $X_m = 1,2 \times 10^{-5}$ . Répondre de nouveau à la question 2.

On prendra  $\pi = 3,1415926$



#### Exercice 4

Un barreau aimanté a un champ coercitif de  $4 \times 10^3 \text{ Am}^{-1}$ . On l'insère dans un solénoïde de longueur 12cm et qui comporte 60 spires. Quel doit être le courant qui parcourt le solénoïde pour démagnétiser ce barreau.

#### Exercice 5

Le tableau ci-dessous donne la susceptibilité magnétique de l'alun d'ammonium de fer en fonction de la température.

T, ° C	$X_m$
- 258,15	$129 \times 10^{-4}$
- 173	$19,4 \times 10^{-4}$
- 73	$9,7 \times 10^{-4}$
27	$6,5 \times 10^{-4}$

Tracer  $\frac{1}{X_m}$  en fonction de la température exprimée en degré Kelvin. La loi de Curie

est-elle vérifiée ? Si oui, déterminer la constante de Curie.

#### Exercice 6

En admettant que le moment de dipôle magnétique de chaque atome de fer est de un magnéton de Bohr, déterminer l'aimantation maximale et le champ magnétique qui en résulte.

On donne :

- la densité du fer  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$
- la masse molaire  $M_{\text{mol}} = 55,8 \text{ kg/mol}$
- le nombre d'Avogadro  $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ atomes/mol}$
- un magnéton de Bohr  $\mu_B = 9,27 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$



### Exercice 7

Selon le modèle classique, un électron dans un atome suit une orbite circulaire autour du noyau.

- 1- Calculer le moment magnétique associé à ce mouvement si son moment cinétique orbital est égal à  $1,05 \times 10^{-34}$  Js.
- 2- Un électron a un moment magnétique intrinsèque de  $0,928 \times 10^{-23} \text{A.m}^2$ . On le place dans un champ magnétique  $\vec{B}$  de grandeur 1,2T. Calculer la différence d'énergie magnétique potentielle  $\Delta U$  entre les deux orientations suivantes du spin : parallèle à  $\vec{B}$  et antiparallèle à  $\vec{B}$ .
- 3- Quelle soit être la température absolue pour que  $\Delta U = \frac{1}{2} \text{ kT}$ .

On donne la constante de Boltzmann  $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ .

### Exercice 8

Considérer un électron dans un atome qui suit une orbite circulaire autour du noyau en présence d'un champ  $\vec{B}$  uniforme et perpendiculaire au plan de l'orbite. Supposer que la force électrique qui s'exerce sur cet électron est N fois plus grande que la force magnétique. Déterminer les deux vitesses angulaires possibles de l'électron. Application numérique :  $N = 100$  et  $B = 0,427 \text{ T}$ .

### Exercice 9

Le magnéton de Bohr est  $\mu_B = \frac{e}{2m_e} \left( \frac{h}{2\pi} \right)$

$h$  étant la constante de Planck :  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$  ;  $m_e$  est la masse de l'électron

- 1- Calculer  $\mu_B$
- 2- Montrer que  $\mu_B$  peut aussi être exprimé en  $\frac{\text{J}}{\text{T}}$



## Activités d'apprentissage

- Lire les compléments de cours
- échanger par chat sous la supervision d'un tuteur pour s'appropriier le contenu des compléments de cours
- ensuite faire les exercices
- s'organiser pour un travail collaboratif : les apprenant(e)s sont réparti(e)s en groupe sous la supervision d'un tuteur.
- Chaque groupe choisit un rapporteur.
- le tuteur organise le travail en indiquant l'ordre de résolution des exercices et la durée de recherche de solution pour chaque exercice
- les rapporteurs déposent les solutions des exercices dans un espace de travail réservé aux apprenant(e)s.

## Réponses clés

### Solution de l'exercice 1:

#### 1- Calcul de H et B

Rappelons que  $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \Rightarrow \vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M}$

En l'absence du noyau de fer (i.e. dans le vide):  $\vec{M} = \vec{0} \Rightarrow \vec{B} = \mu_0 \vec{H}$

$\vec{B}$  et  $\vec{H}$  sont parallèles à l'axe du solénoïde. Désignons par  $B_0$  le champ B en l'absence du noyau de fer. On a en un point éloigné des extrémités du solénoïde :

$$B_0 = \mu_0 n I \text{ et } H = n I$$

A.N.:  $\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \frac{Tm}{A}$  ;  $I = 0,50A$  ;  $n = 1200 \text{ m}^{-1}$

- $B_0 = (4 \pi \times 10^{-7}) (1200) (0,50)$   
 $B_0 = 7,54 \cdot 10^{-4} \text{ T}$
- $H = (1200) (0,50)$   
 $H = 600 \text{ Am}^{-1}$



### Intensité magnétique H

L'intensité magnétique ne change pas :

$$H = n I = 600 \text{ Am}^{-1}$$

### Perméabilité du noyau

En présence du noyau de fer on a :

$$B = \mu H \Rightarrow \mu = \frac{B}{H}$$

A.N. :  $B = 1,36 \text{ T}$  ;  $H = 600 \text{ Am}^{-1}$

$$\mu = \frac{1,36}{600}$$

$$\mu = 0,00226 \frac{\text{Tm}}{\text{A}}$$

### Perméabilité relative du noyau

En l'absence du noyau de fer :  $B_0 = \mu_0 H$

En présence du noyau de fer :  $B = \mu H$

On en déduit :

$$\frac{B}{B_0} = \frac{\mu}{\mu_0} = \mu_r$$

A.N. :  $B = 1,36 \text{ T}$  ;  $B_0 = 7,54 \cdot 10^{-4} \text{ T}$

$$\mu_r = \frac{1,36}{7,54 \times 10^{-4}}$$

$$\mu_r = 1800$$

ou

A.N. :  $\mu = 0,00226 \frac{\text{Tm}}{\text{A}}$  ;  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}}$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{0,00226}{4 \pi \times 10^{-7}}$$

$$\mu_r = 1800$$



### Aimantation

$$\text{Prenons } B = \mu_0 H + \mu_0 M$$

$$\text{Mais } \mu_0 H = B_0 \Rightarrow B = B_0 + \mu_0 M$$

Il s'ensuit que :

$$M = \frac{B - B_0}{\mu_0}$$

$$\text{A.N. : } B = 1,36 \text{ T ; } B_0 = 7,54 \cdot 10^{-4} \text{ T ; } \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}}$$

$$M = \frac{1,36 - 7,54 \times 10^{-4}}{4\pi \times 10^{-7}}$$

$$M = 1,08 \times 10^6 \text{ A m}^{-1}$$

### Solution de l'exercice 2:

#### Aimantation

Partons de la relation :

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \Rightarrow B = B_0 + \mu_0 M \quad (1) \quad \text{avec } B_0 = \mu_0 H$$

$B_0$  est le champ en l'absence du noyau de fer.

On déduit de la relation (1) :

$$M = \frac{B - B_0}{\mu_0}$$

a) Calculons d'abord  $B_0$  et B

\*  $B_0 = \mu_0 H = \mu_0 n I$  avec  $n = \frac{N}{l}$  le nombre de spires par unité de longueur, N et l étant respectivement le nombre total de spires et l la circonférence moyenne du tore.

$$* B = \mu H = \mu n I = \mu_0 \mu_r n I = \mu_r B_0$$

$\mu_r$  est la perméabilité relative

$$\text{A.N. : } N = 500 ; l = 0,5 \text{ m ; } \mu_r = 5000 ; I = 0,15 \text{ A ; } \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}}$$



$$\begin{aligned} \Rightarrow B_0 &= (4\pi \times 10^{-7}) \left( \frac{500}{0,5} \right) (0,15) \\ B_0 &= 1,88 \times 10^{-4} \text{ T} \\ \Rightarrow B &= (5000) (1,88 \times 10^{-4}) \\ B &= 9,42 \times 10^{-1} \text{ T} \end{aligned}$$

b) Calculons maintenant M

$$M = \frac{B - B_0}{\mu_0} = \frac{9,42 \times 10^{-1} - (1,88)(10^{-4})}{4 \pi \times 10^{-7}}$$

$$M = 7,5 \times 10^5 \text{ Am}^{-1}$$

### Moment magnétique moyen par atome

M est le moment magnétique par unité de volume. Le moment magnétique moyen par atome est alors :

$$m = \frac{M}{n_a}, \quad n_a \text{ étant le nombre d'atomes de fer par unité de volume.}$$

c) Calculons  $n_a$

$$\text{On a } n_a = (N_A) (\rho / M_{\text{mol}})$$

$\rho$  est la densité du fer,  $M_{\text{mol}}$  sa masse molaire et  $N_A$  le nombre d'Avogadro.

$$\underline{\text{A.N.}}: N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ atomes / mol}; M_{\text{mol}} = 55,8 \times 10^{-3} \text{ Kg/mol}; \rho = 7850 \text{ kg/m}^3$$

$$n_a = (6,02 \times 10^{23}) \frac{7850}{55,8}$$

$$n_a = 8,47 \times 10^{28} \text{ atomes /m}^3$$

d) calculons maintenant le moment magnétique moyen par atome m

$$m = \frac{M}{n_a} \text{ avec } M = 7,5 \times 10^5 \text{ Am}^{-1} \text{ et } n_a = 8,47 \times 10^{28} \text{ atomes / m}^3$$

$$m = 8,85 \times 10^{-24} \text{ A.m}^2$$



### Solution de l'exercice 3:

#### 1) B et H correspondant à l'espace vide

$$B_0 = \mu_0 n I \text{ avec } n = \frac{N}{l}$$

$$H = n I$$

A.N.:  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{Tm}{A}$  ;  $N = 1200$  ;  $l = 0,8m$  ;  $I = 1,5A$

$$* B_0 = 4(3,1415926)10^{-7} \left( \frac{1200}{0,8} \right) (1,5)$$

$$B_0 = 2,827433 \times 10^{-3} T$$

$$* H = \left( \frac{1200}{0,8} \right) (1,5) \Rightarrow H = 2250 \text{ Am}^{-1}$$

#### 2) Perméabilité du bismuth

$\mu = \mu_0 \mu_r$ ,  $\mu_r$  étant la perméabilité relative.

$$\text{Mais } \mu_r = (1 + X_m) \Rightarrow \mu = \mu_0(1 + X_m)$$

A.N.:  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{Tm}{A}$  ;  $X_m = -1,66 \times 10^{-5}$

$$\mu = 4(3,1415926) 10^{-7} (1 - 1,66 \times 10^{-5})$$

$$\mu = 1,256616 \times 10^{-6} \frac{Tm}{A}$$

Pour l'espace vide on a :

$$\mu_0 = 4(3,1415926) 10^{-7} \frac{Tm}{A}$$

$$\mu_0 = 1,256637 \times 10^{-6} \frac{Tm}{A}$$

Le bismuth est un matériau diamagnétique ( $X_m < 0$ ) :  $\mu$  est légèrement inférieur à  $\mu_0$ .



### B et H

H est toujours égal à n I

$$H = 2250 \text{ Am}^{-1} \text{ (sa valeur n'a pas changé)}$$

$$B = \mu H$$

$$B = (1,256616 \times 10^{-6} \frac{\text{Tm}}{\text{A}}) (2250 \frac{\text{A}}{\text{m}})$$

$$B = 2,827386 \times 10^{-3} \text{ T}$$

B est légèrement inférieur à  $B_0$

### 3) Perméabilité du magnésium

$$\mu = \mu_0 (1 + X_m) \text{ avec } X_m = 1,2 \times 10^{-5}$$

$$\mu = (4 (3,1415926) 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}}) (1 + 1,2 \times 10^{-5})$$

$$\mu = 1,256652 \times 10^{-6} \frac{\text{Tm}}{\text{A}}$$

Le magnésium est paramagnétique ( $X_m > 0$ ) :  $\mu$  est légèrement supérieur à  $\mu_0$

### B et H

\* H est toujours égal à  $2250 \text{ Am}^{-1}$

$$* B = \mu H$$

$$B = (1,256652 \times 10^{-6} \frac{\text{Tm}}{\text{A}}) (2250 \frac{\text{A}}{\text{m}})$$

$$B = 2,827467 \text{ T}$$

B est légèrement supérieur à  $B_0$ .



#### Solution de l'exercice 4:

Le champ coercitif est le champ qu'il faut pour démagnétiser le barreau. Le courant qui parcourt le solénoïde doit être tel qu'il produise une intensité magnétique égale à cette valeur.

$H_{\text{coercitif}} = n I$ ,  $n$  étant le nombre de spires du solénoïde par unité de longueur.

On a alors :

$$I = \frac{H_{\text{coercitif}}}{n} = \frac{H_{\text{coercitif}}}{\left(\frac{N}{l}\right)}$$

$N$  est le nombre de spires et  $l$  la longueur du solénoïde.

A.N.:  $H_{\text{coercitif}} = 4 \times 10^3 \text{ Am}^{-1}$ ;  $N = 60$ ;  $l = 0,12\text{m}$

$$I = \frac{4 \times 10^3 \times 0,12}{60}$$

$$I = 8 \text{ A}$$

#### Solution de l'exercice 5:

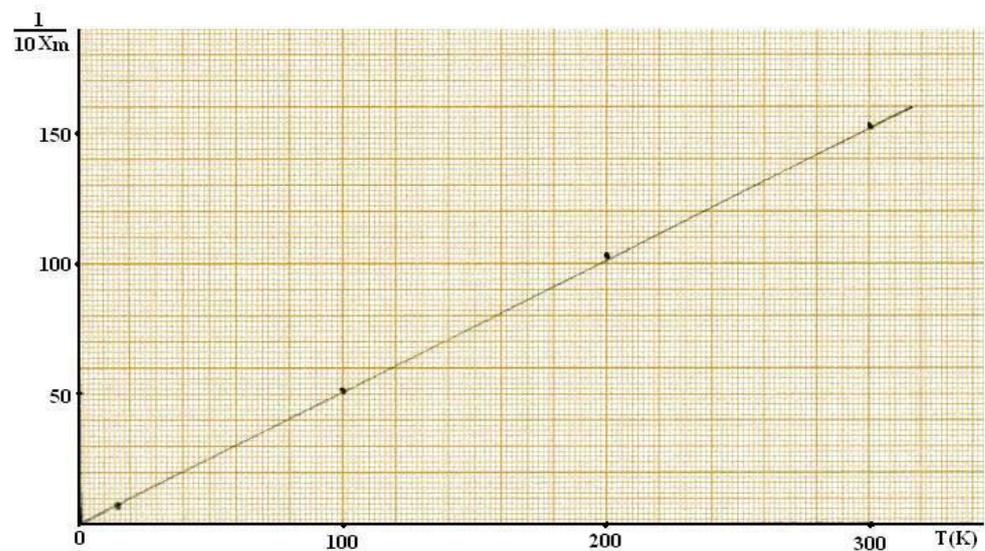
On a le tableau de valeurs ci-dessous :

T ; K	$\frac{1}{X_m}$
15	77,52
100,15	515,46
200,15	1030,93
300,15	1538,46

( $0^\circ\text{C} = 273,15 \text{ K}$ )



$\frac{1}{X_m} = f(T)$  (voir graphique ci-dessous) est une droite passant par l'origine.



Prenons la loi de Curie pour les paramagnétiques. Cette loi dit que :

$M = A \frac{B}{T}$  où  $A$  est une constante. Une augmentation de  $B$  tend à accroître l'alignement des dipôles magnétiques du matériau paramagnétique. Une augmentation de la température  $T$  provoque une plus grande opposition à cet alignement.

Cette loi peut aussi s'écrire :

$$X_m = \frac{C}{T} \text{ où } C \text{ est appelée constante de Curie.}$$

$$X_m = \frac{C}{T} \Rightarrow \frac{1}{X_m} = \frac{T}{C}$$

Cette dernière relation montre que  $\frac{1}{X_m}$  est proportionnel à  $T$ . Si l'on trace  $\frac{1}{X_m}$  en fonction de la température  $T$  on doit obtenir une droite passant par l'origine et

dont la pente est  $\frac{1}{C}$

La pente obtenue avec la droite expérimentale est :



$$\frac{1}{C} = \frac{1538,46 - 515,46}{(300,15 - 100,15)K} = 5,115 \text{ K}^{-1}$$

$$\Rightarrow C = \frac{1}{5,115} \text{ K}$$

$$C = 0,195 \text{ K}$$

### Solution de l'exercice 6:

Aimantation maximale

La valeur maximale  $M_s$  de l'aimantation est obtenue lorsque tous les dipôles magnétiques s'alignent. Dans ce cas on a :

$$M_s = n m$$

où  $n$  est le nombre d'atomes par unité de volume et  $m$  le moment magnétique de chaque atome.

- Calculons  $n$  :

On a :

$$n = N_A \rho / M_{\text{mol}}$$

$\rho$  est la densité du fer,  $M_{\text{mol}}$  sa masse molaire et  $N_A$  le nombre d'Avogadro.

A.N.:  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ ;  $M_{\text{mol}} = 55,8 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$ ;  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ atomes / mol}$

$$n = (6,02 \cdot 10^{23}) \frac{7850}{55,8 \cdot 10^{-3}}$$

$$n = 8,47 \cdot 10^{28} \text{ atomes /m}^3$$

- Connaissant  $n$ , on peut maintenant calculer  $M_s$

$$M_s = n m$$

A.N. :  $n = 8,47 \cdot 10^{28} \text{ atomes/m}^3$  ;  $m = \mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2$

$$M_s = (8,47 \cdot 10^{28}) (9,27 \cdot 10^{-24})$$

$$M_s = 7,85 \cdot 10^5 \text{ Am}^{-1}$$



### Champ magnétique

Le champ magnétique qui en résulte est :

$$B = \mu_0 M_s$$

$$\text{A.N.: } \mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}}$$

$$B = (4\pi \times 10^{-7}) (7,85 \times 10^5)$$

$$B = 0,986 \text{ T}$$

### Solution de l'exercice 7:

#### 1- Moment magnétique

Supposons que l'électron suit une orbite circulaire de rayon  $r$  avec la vitesse  $v$ . le moment magnétique associé à ce mouvement est :

$$m_l = I S \quad (1) \quad \text{avec } S = \pi r^2 \text{ et } I = \frac{e}{T} \text{ où } T \text{ est la période de révolution.}$$

$$\text{On a : } vT = 2\pi r \Rightarrow \frac{1}{T} = \frac{v}{2\pi r} \Rightarrow I = \frac{e}{T} = \frac{ev}{2\pi r}$$

La relation (1) devient :

$$m_l = I S = \left( \frac{ev}{2\pi r} \right) (\pi r^2) \Rightarrow m_l = \frac{e}{2} vr$$

$$\Rightarrow m_l = \frac{e}{2m} (mvr)$$

$$\text{A.N.: } e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C ; } m = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg ; } mvr = 1,05 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

$$m_l = \frac{1,6 \times 10^{-19}}{2(9,11 \times 10^{-31})} (1,05 \times 10^{-34})$$

$$m_l = 9,22 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$$



## 2- Différence d'énergie potentielle

Soit  $\vec{m}_s$  le moment magnétique intrinsèque. Lorsque  $\vec{m}_s$  et  $\vec{B}$  sont parallèles, l'énergie potentielle est :

$$U_1 = -\vec{m}_s \cdot \vec{B} = -m_s B$$

Lorsque  $\vec{m}_s$  et  $\vec{B}$  sont antiparallèles, cette énergie est :

$$U_2 = -\vec{m}_s \cdot \vec{B} = m_s B$$

Il s'ensuit que :

$$\Delta U = U_2 - U_1 = 2m_s B$$

$$\underline{\text{A.N.}} : m_s = 0,928 \times 10^{-23} \text{ A.m}^2 ; B = 1,2 \text{ T}$$

$$\Delta U = 2 (0,928 \times 10^{-23}) (1,2)$$

$$\Delta U = 2,23 \times 10^{-23} \text{ J.}$$

## 3- Température à laquelle $\Delta U = \frac{1}{2} kT$

$$\Delta U = \frac{1}{2} kT \Rightarrow T = \frac{2\Delta U}{k}$$

$$\underline{\text{A.N.}} : k = 1,38 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

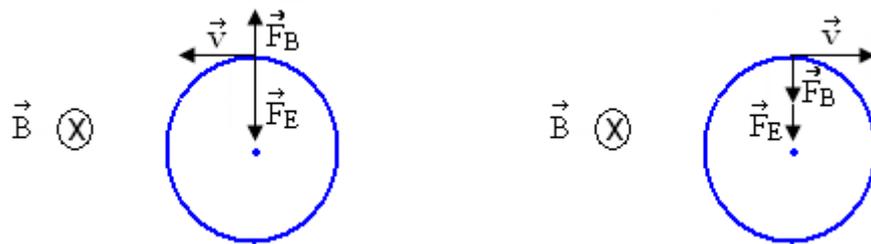
$$T = \frac{2(2,23 \times 10^{-23})}{1,38 \times 10^{-23}}$$

$$T = 3,23 \text{ K}$$


**Solution de l'exercice 8:**

Considérons les deux possibilités, c'est-à-dire, l'électron qui tourne dans le sens horaire et dans le sens antihoraire.

Supposons que  $\vec{B}$  est dirigé comme l'indique la figure



On a ici :

$$F_E \pm F_B = m \omega^2 r \text{ avec } r \text{ le rayon de la trajectoire et } \omega \text{ la vitesse angulaire.}$$

$$\text{D'après l'hypothèse : } F_E = N F_B \Rightarrow (N \pm 1) F_B = m \omega^2 r = m \frac{v^2}{r}$$

Mais  $F_B = e v B$ , d'où:

$$(N \pm 1) e v B = m \frac{v^2}{r}$$

$$\Rightarrow v = (N \pm 1) \frac{e B r}{m}$$

$$\omega = (N \pm 1) \frac{e B}{m}$$

$$\underline{\text{A.N.}} : B = 0,427 \text{ T ; } N = 100 ; e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C ; } m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$* \omega_1 = (100-1) \left( \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})(0,427)}{9,11 \cdot 10^{-31}} \right)$$

$$\omega_1 = 7,42 \cdot 10^{12} \text{ rads}^{-1}$$

$$* \omega_2 = (100+1) \left( \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})(0,427)}{9,11 \cdot 10^{-31}} \right)$$

$$\omega_2 = 7,57 \cdot 10^{12} \text{ rads}^{-1}$$


**Solution de l'exercice 9:**

$$1) \mu_B = \frac{e}{2m_e} \left( \frac{h}{2\pi} \right)$$

$$\bullet \frac{h}{2\pi} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}}{2\pi} = 1,056 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

$$\bullet e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C} ; m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$\bullet \mu_B = \frac{(1,6 \times 10^{-19} \text{ C})}{2 (9,11 \times 10^{-31} \text{ kg})} \times (1,056 \times 10^{-34} \text{ J.s})$$

$$\mu_B = 9,27 \times 10^{-24} \frac{\text{C J s}}{\text{kg}}$$

Transformons  $\frac{\text{C J s}}{\text{kg}}$ . On a :

$$\text{C} = \text{As}$$

$$\text{J} = \text{Nm} = (\text{kg m s}^{-2}) (\text{m}) = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$$

$$\text{D'où } \frac{\text{C J s}}{\text{kg}} = \frac{(\text{A s})(\text{kg m}^2 \text{s}^{-2})(\text{s})}{\text{kg}} = \text{Am}^2$$

On voit que le moment magnétique s'exprime bien en  $\text{Am}^2$  (voir  $m = I S$ )

$$\mu_B = 9,27 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$$

2) Le magnéton de Bohr peut aussi s'exprimer en  $\frac{\text{J}}{\text{T}}$ . On a vu que :

$$\text{J} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \quad (1)$$

Transformons le Tesla. Pour ce faire, partons de  $F = q v B$  (force qui s'exerce sur une particule qui se déplace avec une vitesse  $v$  dans un champ  $B$ ).

$$\Rightarrow B = \frac{F}{qv}$$

Dans le système international  $B$  est en Tesla,  $F$  en Newton,  $q$  en Coulomb et  $v$  en mètre par seconde. On a alors :



$$\left. \begin{array}{l} T = \frac{N}{C \text{ m s}^{-1}} \\ N = (\text{kg m s}^{-2}) \\ C = (\text{A s}) \end{array} \right\} \Rightarrow T = \frac{(\text{kg m s}^{-2})}{(\text{A s}) \text{ m s}^{-1}} = \frac{\text{kg}}{\text{A s}^2} \quad (2)$$

(1) et (2) donnent  $\frac{J}{T} = \frac{\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}}{\text{kg/A s}^2} : = \text{Am}^2$

On a donc aussi  $\mu_B = 9,27 \times 10^{-24} \frac{J}{T}$

### Visite de sites

Vous trouverez dans les adresses qui suivent des informations qui renforcent et complètent ce que vous avez appris au cours de cette activité.

[http://www.thyssenfrance.com/documents/mut%20devt%20text%20doc%20tech%200aim\\_MAGNETISME%20-%20QUELQUES%20RAPPELS.pdf](http://www.thyssenfrance.com/documents/mut%20devt%20text%20doc%20tech%200aim_MAGNETISME%20-%20QUELQUES%20RAPPELS.pdf)

Ce site donne quelques rappels sur le magnétisme

[http://perso.univ-lr.fr/vmathe/16\\_annexeA.pdf](http://perso.univ-lr.fr/vmathe/16_annexeA.pdf)

Le présent lien développe quelques rappels des notions de base des propriétés magnétiques de la matière. Il rappelle en particulier :

- les grandeurs magnétiques fondamentales B, H et M
- le paramagnétisme, le diamagnétisme et le ferromagnétisme
- le phénomène d'hystérésis

<http://semainscience.u-strasbg.fr/magnetisme/fondement.html>

Ce site traite les fondements théoriques du magnétisme

<http://www.grasp.ulg.ac.be/cours/2cm/elec5.pdf>

C'est un document sur les milieux magnétiques. Il décrit la magnétisation (ou aimantation), la susceptibilité magnétique et la relation qui lie les vecteurs  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$  et  $\vec{M}$ .

[http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/weisli\\_j.html](http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/weisli_j.html)

Une animation des domaines de Weiss est proposée ici. On peut visualiser le déplacement des parois de ces domaines. Les cas de déplacement réversible et irréversible sont considérés.

<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/praimh.html>

La courbe de première aimantation, l'aimantation rémanente et le champ coercitif sont abordés ici.



## Résumé

### Ce qu'il faut retenir

#### Les trois vecteurs $\vec{B}$ , $\vec{H}$ et $\vec{M}$

- Les phénomènes magnétiques dans l'espace vide peuvent être décrits à l'aide d'un seul vecteur : le vecteur  $\vec{B}$
- Pour décrire les phénomènes magnétiques dans un milieu matériel, on introduit deux autres vecteurs : l'intensité magnétique (ou l'excitation magnétique)  $\vec{H}$  et l'aimantation  $\vec{M}$ . Les vecteurs  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$  et  $\vec{M}$  sont liés par la relation :

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \Rightarrow \vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M}$$

$\vec{B}$  comporte deux contributions :

- une contribution  $\vec{H}$  indépendante des propriétés microscopiques du milieu
- une contribution  $\vec{M}$  qui dépend des propriétés microscopiques du milieu

Dans le système international,  $\vec{H}$  et  $\vec{M}$  sont exprimés en A/m ou J/Tm<sup>3</sup>.

#### La susceptibilité magnétique et les perméabilités

- Pour un milieu isotrope et linéaire
- $\vec{M} = X_m \vec{H}$  ;  $X_m$  est appelé « susceptibilité magnétique »

$X_m$  est une grandeur sans dimension.

- $\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} = \mu_0 \vec{H} (1 + X_m) = \mu \vec{H}$  avec  $\mu = \mu_0 (1 + X_m) = \mu_r \mu_0$  est appelé « perméabilité relative ».  $\mu_r$  est aussi une grandeur sans dimension.



### Courants moléculaires

Les courants moléculaires sont des courants électriques microscopiques qui existent dans toutes les substances. Ils ont une double origine liée au mouvement des électrons dans les atomes constitutifs de ces atomes : le mouvement orbital des électrons et la rotation des électrons sur eux-mêmes. Ces boucles de courant constituent de petits dipôles magnétiques et possèdent des moments magnétiques.

### Paramagnétisme, diamagnétisme et ferromagnétisme

Il existe trois classes de substances magnétiques : les paramagnétiques, les diamagnétiques et les ferromagnétiques.

Les paramagnétiques sont constitués d'atomes qui possèdent des moments magnétiques permanents. En l'absence de champ magnétique, ces moments magnétiques élémentaires sont orientés au hasard et leur résultante est nulle. Par contre, placés dans un champ magnétique excitateur, ils tendent à s'aligner avec le champ. L'agitation thermique tend à détruire cet alignement et d'autant plus fortement que la température est élevée. Les paramagnétiques sont aussi caractérisés par une susceptibilité magnétique positive.

Les atomes constitutifs d'un diamagnétique n'ont pas de moment magnétique propre. Quand on leur applique un champ magnétique, des moments magnétiques opposés à ce champ sont induits sur ces atomes. La susceptibilité magnétique des diamagnétiques est négative.

Le champ  $\vec{B}$  produit par un courant est modifié par la présence d'un matériau magnétique. Habituellement cette variation est faible. Une légère augmentation de  $\vec{B}$  apparaît dans un paramagnétique et une légère diminution dans le cas d'un diamagnétique. Par contre, dans les substances ferromagnétiques, i.e. dans les substances susceptibles de prendre de fortes aimantations, il se produit une forte augmentation de  $\vec{B}$ . Un ferromagnétique est aussi constitué d'atomes ayant de moments magnétiques permanents. Il contient un grand nombre de domaines aimantés appelés domaines magnétiques ou domaines de Weiss. La forme de ces domaines est modifiée en présence d'un magnétique extérieur.

### Autoévaluation

Les apprenant(e)s prennent note des difficultés rencontrées au cours de l'activité d'apprentissage. Ils/Elles pourront revoir les parties du cours concernées afin de mieux cerner l'origine de leurs difficultés et erreurs.

### Guide de l'enseignant

Le Professeur corrigera les productions des groupes. Il/Elle déposera la correction dans un espace de travail accessible aux apprenant(e)s. La correction sera accompagnée d'un feedback adéquat. Les notes obtenues pour chaque groupe sont attribuées aux membres du groupe et vont compter pour 20% de l'évaluation finale du module.



## Activité d'apprentissage 4

### Titre de l'activité

**Polarisation- Vecteur de poynting d'énergie**

**Pression de radiation**

### Temps d'apprentissage

**Consigne :** Pour cette activité, si vous avez au **moins  $\frac{3}{4}$  des points**, vous avez fait du très bon travail, vous pouvez continuer.

Si vous avez **moins de la moitié des points**, vous devez relire les lectures proposées et refaire l'activité.

Si vous avez **plus de la moitié des points et moins de  $\frac{3}{4}$  des points**, vous avez fait du bon travail, mais vous devez faire des efforts pour la suite.

### Objectifs spécifiques

L'apprenant(e) doit être capable de(d') :

- Étudier l'évolution d'une onde électromagnétique
- Déterminer l'état de polarisation d'une onde électromagnétique
- Déterminer le vecteur de Poynting associé à une onde électromagnétique plane
- Déterminer la densité d'énergie associée à une onde électromagnétique
- Déterminer l'intensité d'une onde électromagnétique
- Déterminer la pression de radiation d'une onde électromagnétique

### Résumé de l'activité

Cette activité se consacre sur l'étude des quatre équations fondamentales qui sous-tendent l'électromagnétisme. Elle met aussi l'accent sur la polarisation d'une onde électromagnétique et l'énergie qu'elle transporte lors de cette propagation. Vous apprendrez à :

- dégager les caractéristiques d'une onde plane en particulier la relation qui lie le champ électrique, le champ magnétique et le vecteur de propagation associés à cette onde
- analyser l'état de polarisation d'une onde électromagnétique
- examiner le vecteur de Poynting et sa relation avec l'énergie transportée par une onde



### **Lectures appropriées**

RASOLONDRAMANITRA, H. (2007). Les équations de Maxwell ; Les ondes électromagnétiques. Madagascar. Université d'Antananarivo. Cours inédit.

### **Ressources pertinentes**

BEISER, A. (1979). Physique appliquée : Cours et problèmes. Serie Schaum . Traduction française par LOBENBERG M. McGraw-Hill, Paris

FRANCIS, W. S., ZEMANSKY, M. W. and YOUNG. H. D. (1987). University Physics. Seventh Edition, Addison-Wesley Publishing Company, USA.

FRANCIS, W. S., ZEMANSKY, M. W. and YOUNG, H. D. (1974). College Physics. Fourth Edition. Addison-Wesley Publishing Company, USA.

HALPERN, A. (1991) Maxi Schaum Physique 2. Traduction française par BABES, V. McGraw-Hill, Paris

NELKON, M. and PARKER, P. (1998). Advanced Level Physics. Seventh Edition, Heinemann, (Oxford ?)

RESNICK, R. et HALLIDAY, D. (1979). Electricité et magnétisme, physique 2. Traduit par André Lebel et Claudine Thériault. Editions du Renouveau Pédagogique. Inc. Montréal (Québec) Canada

SEARS. F.W, ZEMANSKY, M. W. and YOUNG. H. D. (1987). University Physics. Seventh Edition, Addison-Wesley Publishing Company, USA.

SEARS.F.W., ZEMANSKY, M. W. and YOUNG, H. D. (1974). College Physics. Fourth Edition. Addison-Wesley Publishing Company, USA.

TIPLER, P.-A. and Company. (1999). Physics for Scientists and Engineers. Fourth Edition. W.H. FREEMAN and company. Worth Publishers Inc., New York, USA

TIPLER, P. A. (1982). Physics. Second Edition. Worth Publishers Inc, New York, USA

### **Liens utiles**

<http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/electri/oem1.html>

[http://www.walter-fendt.de/ph11f/emwave\\_f.htm](http://www.walter-fendt.de/ph11f/emwave_f.htm)

[http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/2pcirc\\_j.html](http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/2pcirc_j.html)

[http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/polond\\_j.html](http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/polond_j.html)



## Descriptions de l'activité

Votre itinéraire dans cette activité d'apprentissage comprend trois étapes :

**Étape 1 :** des lectures sur les thèmes à étudier vous sont proposées

**Étape 2 :** dans cette phase, vous aurez à résoudre une série d'exercices pour vous aider à évaluer vos acquis

**Étape 3 :** vous êtes ensuite guidé vers des sites qui traitent les thèmes de votre étude et qui vous permettent de visualiser quelques animations

## Évaluation formative

Les apprenant(e)s font obligatoirement tous les exercices en travail collaboratif. La note du groupe est commune aux différents membres du groupe.

**Chaque exercice compte pour 10% des points**

## Exercices

### Exercice 1

On considère les ondes suivantes :

$$\vec{E}_1 = \vec{i} E \sin(kz - \omega t) + \vec{j} E \cos(kz - \omega t)$$

$$\vec{E}_2 = \vec{i} E \cos(kz - \omega t) + \vec{j} E \cos(kz - \omega t + \frac{\pi}{4})$$

$$\vec{E}_3 = \vec{i} E \sin(kz - \omega t) - \vec{j} E \sin(kz - \omega t)$$

a) Étudier les évolutions de  $\vec{E}_1(0,t)$ ,  $\vec{E}_2(0,t)$  et  $\vec{E}_3(0,t)$  au cours du temps

b) Déterminer les états de polarisation de  $\vec{E}_1$ , de  $\vec{E}_2$  et de  $\vec{E}_3$

### Exercice 2

Soit une onde électromagnétique dont le champ électrique est défini par :

$$\vec{E}(z,t) = E_0 \left[ \vec{i} \cos(kz - \omega t) - \vec{j} \sin(kz - \omega t) \right]$$



Déterminer le vecteur de Poynting  $\vec{P}$  et la densité d'énergie  $U$  associés à cette onde.

On donne  $\vec{a} \wedge (\vec{b} \wedge \vec{c}) = (\vec{a} \cdot \vec{c}) \vec{b} - (\vec{a} \cdot \vec{b}) \vec{c}$ .

**Exercice 3**

Soit, en notation complexe, un champ électrique  $\vec{E} = \vec{e}_x j \omega A_0 e^{j(kz - \omega t)}$  et un champ magnétique  $\vec{B} = \vec{e}_y j k A_0 e^{j(kz - \omega t)}$ ,  $\vec{e}_x$  et  $\vec{e}_y$  étant respectivement les vecteurs unitaires suivant l'axe des x et l'axe des y. Vérifier que  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  représentent respectivement le champ électrique et le champ magnétique d'une onde électromagnétique plane dont l'axe de propagation et la polarisation sont à préciser

**Exercice 4**

Rappeler la signification de chacune des équations de Maxwell.

**Exercice 5**

Cocher la bonne réponse.

Soit  $\vec{E} = E_x(z, t) \vec{i}$  le champ électrique d'une onde électromagnétique plane. Il est :

- polarisé suivant l'axe x
- polarisé suivant l'axe y
- polarisé suivant l'axe z

**Exercice 6**

Cocher la bonne réponse

Soit  $\vec{E} = E_x(z, t) \vec{i}$  le champ électrique d'une onde électromagnétique plane. Le champ magnétique associé à cette onde est :

- $\vec{B} = B_x(z, t) \vec{i}$



$\vec{B} = B_y (z, t) \vec{j}$

$\vec{B} = B_z (z, t) \vec{k}$

### Exercice 7

Cocher les bonnes réponses

1 - Les équations de Maxwell ne s'appliquent qu'aux champs électriques et magnétiques qui ne varient pas au cours du temps.

- vrai  
 Faux

2 - Les ondes électromagnétiques sont des ondes longitudinales.

- vrai  
 Faux

3 - Les densités d'énergie emmagasinée dans le champ électrique et dans le champ magnétique d'une onde électromagnétique sont égales.

- vrai  
 Faux

### Exercice 8

Soit une onde électromagnétique décrite par  $\vec{E} = E_0 \cos(kx - \omega t)$  et qui se propage dans le vide. Etablir l'expression de l'intensité de cette onde. Calculer cette intensité

sachant que l'amplitude du champ  $\vec{E}$  est  $100 \frac{V}{m}$ . On donne la permittivité du vide  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$ .

### Exercice 9

Une station radio R a une puissance moyenne rayonnante de 50kW.

1- Déterminer l'intensité de l'onde à 50km de la station et sa pression. Pour ce faire, on suppose que le rayonnement est uniforme sur une sphère de centre R.



2 – Déterminer, à cette distance, les amplitudes des champs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  associés à cette onde.

### Exercice 10

Soit une onde polarisée circulairement dont l'axe de propagation est suivant l'axe

Oz. Cette onde est telle que  $\vec{E}(0,0) = \frac{E_0}{2} (\vec{e}_x + \sqrt{3} \vec{e}_y)$ ,  $\vec{e}_x$  et  $\vec{e}_y$  étant respectivement les vecteurs unitaires suivant l'axe x et l'axe y. Trouver son expression  $\vec{E}(z,t)$



## Activités d'apprentissage

- Les apprenant(e)s doivent lire les lectures appropriées avant de faire les exercices.
- Le tuteur les organisera en groupe pour un travail collaboratif.
- Ils discutent en chat les différents points qu'ils ou elles n'auraient pas compris sous la supervision du tuteur.
- Quand le tuteur jugera que les apprenants(es) ont un niveau de compréhension satisfaisant des lectures, alors ils pourront commencer à résoudre les exercices.
- Tous les groupes cherchent le même exercice en même temps sous la supervision du tuteur qui fixera la durée.
- Chaque groupe cherche en son sein un rapporteur qui mettra les noms de tous les membres du groupe sur le compte rendu de l'exercice avant de l'envoyer par e-mail en fichier attaché au professeur titulaire du cours.

## Réponses clés

### Exercice 1

a) Les évolutions de  $\vec{E}_1(0,t)$ ,  $\vec{E}_2(0,t)$  et  $\vec{E}_3(0,t)$  au cours du temps

Evolution de  $\vec{E}_1(0,t)$  et polarisation de  $\vec{E}_1$

On peut écrire :

$$\vec{E}_1 = \vec{i} E \sin(kz - \omega t) + \vec{j} E \cos(kz - \omega t) = \vec{i} E_{1x} + \vec{j} E_{1y}$$

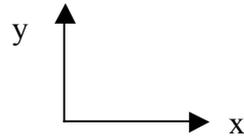
avec  $E_{1x} = E \sin(kz - \omega t)$  et  $E_{1y} = E \cos(kz - \omega t)$

Pour  $z = 0$ , et en remplaçant  $\omega$  par  $2\pi f$ ,  $f$  étant la fréquence de l'onde on a :

$$E_{1x}(0,t) = -E \sin \omega t = -E \sin 2\pi ft$$

$$E_{1y}(0,t) = E \cos \omega t = E \cos 2\pi ft$$

Étudions maintenant les évolutions de  $E_{1x}(0,t)$ , de  $E_{1y}(0,t)$  et de  $\vec{E}_1(0,t)$  en fonction du temps et consignons les valeurs dans le tableau ci-dessous. Les axes  $x$  et  $y$  sont illustrés ci-dessous :



T	0	$\frac{1}{8f}$	$\frac{2}{8f}$	$\frac{3}{8f}$	$\frac{4}{8f}$	$\frac{5}{8f}$
$E_{1x}(0,t)$	0	$-E \sin \frac{\pi}{4}$	$-E$	$-E \sin \frac{3\pi}{4}$	0	$-E \sin \frac{5\pi}{4}$
$E_{1y}(0,t)$	E	$E \cos \frac{\pi}{4}$	0	$E \cos \frac{3\pi}{4}$	$-E$	$E \cos \frac{5\pi}{4}$
$\vec{E}_1(0,t)$						

$\vec{E}_1$  tourne dans le sens opposé à celui des aiguilles d'une montre et son amplitude est constante. Son extrémité décrit un cercle. Cette onde est donc polarisée circulairement à gauche. On peut le vérifier en prenant :

$$E_{1x}^2 + E_{1y}^2 = E^2. \text{ C'est l'équation d'un cercle de rayon } E.$$

**Évolution de  $\vec{E}_2(0,t)$  et polarisation de  $\vec{E}_2$**

$$\vec{E}_2 = \vec{i} E \cos(kz - \omega t) + \vec{j} E \cos(kz - \omega t + \frac{\pi}{4}) = \vec{i} E_{2x} + \vec{j} E_{2y}$$

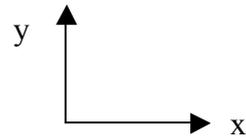
$$\text{avec } E_{2x} = E \cos(kz - \omega t) \text{ et } E_{2y} = E \cos(kz - \omega t + \frac{\pi}{4})$$

Pour  $z = 0$ , et en remplaçant  $\omega$  par  $2\pi f$ , on a :

$$E_{2x}(0,t) = E \cos \omega t = E \cos 2\pi f t$$

$$E_{2y}(0,t) = E \cos(\frac{\pi}{4} - \omega t) = E \cos(\frac{\pi}{4} - 2\pi f t)$$

Les évolutions de  $E_{2x}(0,t)$ , de  $E_{2y}(0,t)$  et de  $\vec{E}_2(0,t)$  en fonction du temps sont décrites dans le tableau ci-dessous :



T	0	$\frac{1}{8f}$	$\frac{2}{8f}$	$\frac{3}{8f}$	$\frac{4}{8f}$
$E_{2x}(0,t)$	E	$E \cos \frac{\pi}{4}$	0	$E \cos \frac{3\pi}{4}$	-E
$E_{2y}(0,t)$	$E \cos \frac{\pi}{4}$	E	$E \cos \frac{\pi}{4}$	0	$E \cos \frac{3\pi}{4}$
$\vec{E}_2(0,t)$					

On voit que le vecteur  $\vec{E}_2$  tourne mais son module n'est pas constant. L'extrémité de  $\vec{E}_2$  décrit une ellipse : on a ici une polarisation elliptique.

**Évolution de  $\vec{E}_3(0,t)$  et polarisation de  $\vec{E}_3$**

$$\vec{E}_3 = \vec{i} E \sin(kz - \omega t) - \vec{j} E \sin(kz - \omega t) = \vec{i} E_{3x} + \vec{j} E_{3y}$$

avec  $E_{3x} = E \sin(kz - \omega t)$  et  $E_{3y} = -E \sin(kz - \omega t)$

Pour  $z = 0$ , on a :

$$E_{3x}(0,t) = -E \sin \omega t = -E \sin 2\pi ft$$

$$E_{3y}(0,t) = E \sin \omega t = E \sin 2\pi ft$$



T	0	$\frac{1}{8f}$	$\frac{2}{8f}$	$\frac{3}{8f}$
$E_{3x}(0,t)$	0	$-E \sin \frac{\pi}{4}$	$-E$	$-E \sin \frac{3\pi}{4}$
$E_{3y}(0,t)$	0	$E \sin \frac{\pi}{4}$	$E$	$E \sin \frac{3\pi}{4}$
$\vec{E}_3(0,t)$				

Nous avons ici une polarisation rectiligne. On peut le vérifier en écrivant :

$$\vec{E}_3 = \vec{i} E \sin(kz - \omega t) - \vec{j} E \sin(kz - \omega t) = (\vec{i} - \vec{j}) E \sin(kz - \omega t)$$

### Exercice 2

#### *Vecteur de Poynting*

$$\vec{E}(z,t) = E_0 \left[ \vec{e}_x \cos(kz - \omega t) - \vec{e}_y \sin(kz - \omega t) \right]$$

Rappelons l'expression le vecteur de Poynting :

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} (\vec{E} \wedge \vec{B})$$



Nous avons ici une onde plane qui se propage dans la direction des z. Son vecteur de propagation  $\vec{k}$  s'écrit donc :

$$\vec{k} = k \vec{e}_z$$

On a alors :

$$\vec{B} = \frac{\vec{k}}{\omega} \wedge \vec{E} = \frac{k}{\omega} (\vec{e}_z \wedge \vec{E})$$

$$\text{Mais } k = \frac{\omega}{c} \Rightarrow \vec{B} = \frac{1}{c} (\vec{e}_z \wedge \vec{E})$$

Le vecteur de Poynting s'écrit donc :

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0 c} (\vec{E} \wedge (\vec{e}_z \wedge \vec{E}))$$

En appliquant la relation  $\vec{a} \wedge (\vec{b} \wedge \vec{c}) = (\vec{a} \cdot \vec{c}) \vec{b} - (\vec{a} \cdot \vec{b}) \vec{c}$ , on obtient

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0 c} E^2 \vec{e}_z$$

$$\text{Mais } E^2 = E_0^2 \Rightarrow \vec{S} = \frac{E_0^2}{\mu_0 c} \vec{e}_z$$

On voit que le vecteur de Poynting a la direction de propagation de l'onde.

### **Densité d'énergie**

La densité d'énergie transportée par une onde électromagnétique est donnée par :

$$U = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2 \mu_0} B^2$$



$$\text{Ici } E^2 = E_0^2$$

$$\text{Reprenons } \vec{B} = \frac{1}{c} (\vec{e}_z \wedge \vec{E}) \Rightarrow \left| \vec{B} \right| = \frac{1}{c} \left| \vec{e}_z \right| \left| \vec{E} \right| \sin(\vec{e}_z, \vec{E})$$

$$\text{Mais } \sin(\vec{e}_z, \vec{E}) = \sin \frac{\pi}{2} \text{ d'où on a } \Rightarrow \left| \vec{B} \right| = \frac{1}{c} \left| \vec{E} \right| \Rightarrow B = \frac{E}{c} \text{ et}$$

$$B^2 = \frac{1}{c^2} E^2$$

La densité d'énergie devient donc :

$$U = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2 \mu_0} B^2 = \left( \frac{1}{2} \epsilon_0 + \frac{1}{2 \mu_0 c^2} \right) E_0^2$$

$$\text{Mais } c^2 = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \Rightarrow \frac{1}{c^2} = \mu_0 \epsilon_0. \text{ En remplaçant } c^2 \text{ on obtient :}$$

$$U = \left( \frac{1}{2} \epsilon_0 + \frac{\mu_0 \epsilon_0}{2 \mu_0} \right) E_0^2 = \epsilon_0 E_0^2$$

### Exercice 3

Si  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  sont respectivement le champ électrique et le champ magnétique d'une onde électromagnétique plane, alors ils vérifient la relation :

$$\vec{B} = \frac{1}{\omega} (\vec{k} \wedge \vec{E})$$

Calculons  $(\vec{k} \wedge \vec{E})$ . Ici  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  se propagent dans la direction des  $z \Rightarrow \vec{k} = e_z k$   
On obtient :

$$(\vec{k} \wedge \vec{E}) = e_z k \wedge e_x j \omega A_0 e^{j(kz - \omega t)} = e_z \wedge e_x j k \omega A_0 e^{j(kz - \omega t)}$$



Mais  $\vec{e}_z \wedge \vec{e}_x = \vec{e}_y$ , d'où on a :

$$(\vec{k} \wedge \vec{E}) = \vec{e}_y j k \omega A_0 e^{j(kz - \omega t)}$$

$$\frac{\vec{k} \wedge \vec{E}}{\omega} = \vec{e}_y j k A_0 e^{j(kz - \omega t)}$$

Ce n'est autre que le champ  $\vec{B}$ .

#### Exercice 4

Les équations de Maxwell sous forme intégrale sont :

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_{(V)} \rho dV \quad (1)$$

(V) est un volume enveloppé par (S) et  $\rho$  la densité des charges. C'est la loi de Gauss : le flux du champ électrique à travers une surface fermée S est relié à la charge nette (i.e à la somme algébrique de toutes les charges) située à l'intérieur de S.

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (2)$$

C'est l'équivalent de la loi de Gauss en magnétisme. Il reflète le fait qu'il n'existe pas de pôle magnétique isolé.

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (3)$$

S est une surface délimitée par la courbe C. C'est la loi de Faraday.

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (4)$$

C'est la loi d'Ampère généralisée.



### Exercice 5

- polarisé suivant l'axe x : **Bonne réponse**. En effet  $\vec{E}$  n'a pas de composantes suivant y et z
- polarisé suivant l'axe y : Faux. Analysez de nouveau l'expression de  $\vec{E}$
- polarisé suivant l'axe z : Incorrect. L'axe z est plutôt la direction de propagation de l'onde électromagnétique

### Exercice 6

- $\vec{B} = B_x(z, t) \vec{i}$  : Faux.  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  ne sont pas polarisés suivant la même direction.
- $\vec{B} = B_y(z, t) \vec{j}$  : **Bonne réponse**. En effet  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  sont perpendiculaires entre eux et perpendiculaires à la direction de propagation. Ici la direction de propagation est l'axe z.  $\vec{E}$  est polarisé suivant l'axe x, donc  $\vec{B}$  est nécessairement polarisé suivant l'axe y.
- $\vec{B} = B_z(z, t) \vec{k}$  : Faux. Pour une onde électromagnétique plane,  $\vec{B}$  est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde qui est ici l'axe z.

### Exercice 7

1- **Faux**. En effet les équations de Maxwell sous forme intégrale sont :

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_{(V)} \rho \, dV \quad (1)$$

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (2)$$

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (3)$$

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (4)$$

Les équations (3) et (4) montrent que ces équations s'appliquent à des champs variables : un champ magnétique variable au cours du temps crée un champ électrique et vice-versa.



- 2- **Faux.** Dans une onde électromagnétique, les vecteurs champ électrique  $\vec{E}$ , champ magnétique  $\vec{B}$  et le vecteur d'onde  $\vec{k}$  qui définit la direction de propagation de l'onde sont liés par la relation  $\vec{B} = \frac{1}{\omega} (\vec{k} \wedge \vec{E})$  et  $\vec{E}$  est orthogonal à  $\vec{B}$ . Les vecteurs  $\vec{k}$ ,  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  forment un trièdre direct.

$\vec{E}$  et  $\vec{B}$  sont perpendiculaires à  $\vec{k} \Rightarrow$  une onde électromagnétique est une onde transversale.

- 3- **Vrai.** En effet la densité d'énergie électrique et la densité d'énergie magnétique sont respectivement:

$$u_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \text{ et } u_B = \frac{1}{2 \mu_0} B^2.$$

En vertu de la relation  $E = B c$ , on a  $u_B = \frac{1}{2 \mu_0} \frac{E^2}{c^2}$ . Mais  $c^2 = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}$ . Il s'ensuit que :

$$u_B = \frac{1}{2 \mu_0} E^2 \epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = u_E$$

### Exercice 8

Soit  $I$  cette intensité:  $I = \langle S \rangle$  où  $\langle S \rangle$  est la valeur moyenne de la norme du vecteur de Poynting. Cherchons d'abord le vecteur de Poynting  $\vec{S}$  :

$$\vec{S} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} \text{ avec } \vec{B} = \frac{\vec{k} \wedge \vec{E}}{\omega}.$$

Nous avons ici une onde qui se propage dans la direction de l'axe  $x$ . Il s'ensuit que

$\vec{k} = k \vec{e}_x$ ,  $\vec{e}_x$  étant le vecteur unitaire suivant l'axe  $x$ . On a alors:



$$\vec{B} = \frac{k \vec{e}_x \wedge \vec{E}}{\omega} = \frac{\vec{e}_x \wedge \vec{E}}{c}$$

$$\vec{B} = \frac{1}{c} \vec{e}_x \wedge \vec{E}_0 \cos(kx - \omega t) = \vec{B}_0 \cos(kx - \omega t) \text{ avec } \vec{B}_0 = \frac{\vec{e}_x \wedge \vec{E}_0}{c}$$

$$\vec{e}_x, \vec{E}_0 \text{ et } \vec{B}_0 \text{ forment un trièdre direct } \Rightarrow B_0 = \frac{E_0}{c}$$

Le vecteur de Poynting s'écrit donc:

$$\vec{S} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} = \frac{\vec{E}_0 \wedge \vec{B}_0}{\mu_0} \cos^2(kx - \omega t)$$

$$\left| \vec{S} \right| = S = \frac{1}{\mu_0} \left| \vec{E}_0 \wedge \vec{B}_0 \right| \cos^2(kx - \omega t) = \frac{1}{\mu_0} E_0 B_0 \cos^2(kx - \omega t)$$

$$S = \frac{1}{\mu_0 c} E_0^2 \cos^2(kx - \omega t)$$

L'intensité de l'onde est:

$$I = \langle S \rangle = \frac{1}{\mu_0 c} E_0^2 \langle \cos^2(kx - \omega t) \rangle = \frac{E_0^2}{2 \mu_0 c} = \frac{c}{2} \epsilon_0 E_0^2 \text{ car la}$$

$$\text{valmoyenne } \langle \cos^2(kx - \omega t) \rangle = \frac{1}{2}$$

Application numérique:

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}, E_0 = 100 \frac{\text{V}}{\text{m}} \text{ et } c = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

$$I = \frac{c}{2} \epsilon_0 E_0^2 = \frac{1}{2} (3 \times 10^8) (8,85 \times 10^{-12}) (100^2)$$

$$I = 13,3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$



### Exercice 9

#### Intensité de l'onde

L'intensité de l'onde est  $I = \langle S \rangle$  où  $\langle S \rangle$  est la valeur moyenne de la norme du vecteur de Poynting.  $S$  est une énergie par unité de temps et par unité de surface. La puissance est une énergie par unité de temps. On a donc:

$I = \frac{P}{A}$ ,  $P$  étant la puissance rayonnante et  $A$  l'aire de la sphère de rayon  $R = 50\text{km}$ . l'aire de cette sphère est  $A = 4 \pi R^2$ . On obtient alors:

$$I = \frac{50 \times 10^3}{4 \pi (50 \times 10^3)^2}$$

$$I = 1,59 \times 10^{-6} \text{ Wm}^{-2}$$

#### Pression de radiation

Soit  $P_r$  cette pression

$$P_r = \frac{I}{c} \Rightarrow P_r = \frac{1,59 \times 10^{-6}}{3 \times 10^8}$$

$$P_r = 0,53 \times 10^{-14} \text{ Pa}$$

#### Amplitudes de $\vec{E}$ et $\vec{B}$

En reprenant le résultat de l'exercice précédent, on a :

$I = \frac{c}{2} \epsilon_0 E_0^2$ ,  $E_0$  étant l'amplitude du champ  $\vec{E}$ . On obtient donc:

$$E_0 = \sqrt{\frac{2I}{c \epsilon_0}}$$

Application numérique :

$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ;  $I = 1,59 \times 10^{-6} \text{ Wm}^{-2}$ ;  $c = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$

$$E_0 = \sqrt{\frac{2 \times 1,59 \times 10^{-6}}{3 \times 10^8 \times 8,85 \times 10^{-12}}} = 3,5 \times 10^{-2} \frac{\text{V}}{\text{m}}$$



En vertu de la relation  $B_0 = \frac{E_0}{c}$  l'amplitude du champ  $\vec{B}$  est:

$$B_0 = \frac{E_0}{c} = \frac{3,5 \times 10^{-2}}{3 \times 10^8} = 1,17 \times 10^{-10} \text{ T}$$

### Exercice 10

On a ici une polarisation circulaire, alors d'une façon générale  $\vec{E}(z,t)$  a pour expression :

$$\vec{E}(z,t) = E_0 \left[ \vec{e}_x \cos(kz - \omega t + \varphi) \pm \vec{e}_y \sin(kz - \omega t + \varphi) \right]$$

Il faut déterminer la valeur de la phase  $\varphi$ . On a à  $z = 0$  et  $t = 0$  :

$$\vec{E}(0,0) = E_0 \left[ \vec{e}_x \cos(\varphi) \pm \vec{e}_y \sin(\varphi) \right] \quad (1)$$

Mais par hypothèse:

$$\vec{E}(0,0) = \frac{E_0}{2} (\vec{e}_x + \sqrt{3} \vec{e}_y) \quad (2)$$

Par identification, on déduit des relations (1) et (2) que:

$$E_0 \cos\varphi = \frac{E_0}{2} \text{ et } E_0 \sin\varphi = \frac{E_0 \sqrt{3}}{2} \Rightarrow \cos\varphi = \frac{1}{2} \text{ et } \sin\varphi = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Ceci est vérifié pour  $\varphi = \frac{\pi}{3}$  et par conséquent l'expression de  $\vec{E}(z,t)$  est :

$$\vec{E}(z,t) = E_0 \left[ \vec{e}_x \cos(kz - \omega t + \frac{\pi}{3}) \pm \vec{e}_y \sin(kz - \omega t + \frac{\pi}{3}) \right]$$



### Visite de sites

Vous trouverez dans les adresses qui suivent des informations qui renforcent et complètent ce que vous avez appris au cours de cette activité.

[http://www.walter-fendt.de/ph11f/emwave\\_f.htm](http://www.walter-fendt.de/ph11f/emwave_f.htm)

<http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/electri/oem1.html>

Ces deux sites proposent une animation de la propagation d'une onde électromagnétique plane.

[http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/2pcirc\\_j.html](http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/2pcirc_j.html)

Ce lien montre la superposition de deux polarisations circulaires gauche et droite.

[http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/polond\\_j.html](http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/polond_j.html)

Il s'agit ici d'une animation d'une polarisation elliptique.

### Auto évaluation

Les apprenant(e)s consigneront les difficultés rencontrées et les erreurs commises pendant la recherche de solution des exercices afin de pouvoir les éviter plus tard. Ils/Elles pourront revoir les parties du cours qu'ils n'ont pas bien comprises et préparer l'évaluation sommative.

### Guide de l'enseignant

Le Professeur corrigera les productions des groupes et déposera la correction dans un espace de travail accessible aux apprenant(e)s. La correction sera accompagnée d'un feedback adéquat expliquant toutes les erreurs commises. Les notes obtenues pour chaque groupe sont attribuées aux membres du groupe et vont compter pour 20% de l'évaluation finale du module.



## XI. Liste compilée de tous les concepts-clé (glossaire)

### Effet Hall

Lorsqu'un métal parcouru par un courant est introduit dans un champ magnétique perpendiculaire à la direction de ce courant, il apparaît dans le métal un champ électrique. Ce champ électrique est perpendiculaire à la fois à la direction du courant et du champ magnétique. On appelle Effet Hall l'apparition d'un tel champ.

### Induction électromagnétique

Une variation dans le temps du flux de champ magnétique  $\Phi$  à travers un circuit a pour effet de produire une f.é.m. qui fait circuler dans celui-ci un courant induit. Ce phénomène est appelé induction électromagnétique. Ce phénomène s'observe toutes les fois que le flux magnétique à travers un circuit varie quelle que soit la cause de cette variation.

### Auto induction

Un circuit quelconque parcouru par un courant d'intensité  $I$  est traversé par un flux magnétique  $\Phi$  produit par ce courant lui-même.  $\Phi$  est proportionnel à  $I$ . Toute variation de  $I$ , donc de  $\Phi$ , a pour effet de produire une f.é.m. d'induction qui fait circuler dans ce circuit un courant complémentaire. C'est à ce phénomène qu'on donne le nom de « auto induction » ou « self-induction ».

### Induction mutuelle de deux circuits

Soient deux circuits  $C_1$  et  $C_2$  parcourus par des courants d'intensité  $I_1$  et  $I_2$ . Si l'intensité  $I_1$  varie dans le circuit ( $C_1$ ), le flux magnétique à travers  $C_2$  varie et il apparaît dans ( $C_2$ ) une f.é.m. d'induction appelée f.é.m. d'induction mutuelle.

### 5- Paramagnétisme

C'est une propriété des substances dont les atomes constitutifs possèdent chacun un moment magnétique élémentaire permanent  $\vec{\mu}$ . En l'absence de champ magnétique excitateur  $\vec{B}_{ex}$ , ces moments magnétiques sont orientés au hasard et leur moment résultant est nul. En présence d'un champ excitateur  $\vec{B}_{ex}$ , les dipôles magnétiques



$\vec{\mu}$  tendent à s'aligner avec  $\vec{B}_{ex}$ . L'agitation thermique empêche un alignement parfait mais le moment magnétique résultant est différent de zéro. Les substances qui représentent une telle propriété sont appelées corps paramagnétiques.

### Ferromagnétisme

C'est une propriété des substances susceptibles de prendre de fortes aimantations. Comme les paramagnétiques, les ferromagnétiques sont constitués d'atomes ayant des moments magnétiques permanents mais ces moments magnétiques peuvent être alignés même en l'absence de champ exciteur.

### Diamagnétisme

C'est une propriété des substances dont les atomes constitutifs n'ont pas de moment magnétique propre. Quand on applique un champ exciteur  $\vec{B}_{ex}$ , des moments magnétiques orbitaux sont induits dont le sens s'oppose à celui de  $\vec{B}_{ex}$ .

### 8- Aimantation

L'aimantation caractérise l'état magnétique d'un corps aimanté. C'est le moment magnétique résultant par unité de volume. Elle exprime en  $Am^{-1}$  dans le système d'unités international. On utilise un vecteur  $\vec{M}$  appelé vecteur aimantation pour décrire cet état.

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{\mu}}{V}$$
 ,  $\sum \vec{\mu}$  étant le moment magnétique résultant et  $V$  le volume du corps aimanté.

### Hystérésis

Lorsqu'on aimante un corps ferromagnétique primitivement non aimanté, son aimantation croît avec le champ appliqué  $B_{app}$  ou champ d'aimantation et finit par atteindre une valeur limite appelée intensité d'aimantation à saturation. On parle ici de première aimantation de ce corps. Si on fait ensuite décroître  $B_{app}$ , l'aimantation diminue mais pour chaque valeur de  $B_{app}$  elle conserve une valeur supérieure à celle qu'elle avait au cours de la première aimantation. C'est le phénomène de l'hystérésis magnétique. La variation de l'aimantation présente un retard sur la variation du champ d'aimantation. « Hystérésis » est un substantif grec qui signifie retard.



### **Aimantation rémanente**

Si après qu'un corps ferromagnétique a été aimanté, on fait décroître progressivement le champ d'aimantation, ce corps garde une certaine aimantation même quand le champ appliqué  $B_{app}$  redevient nul : c'est l'aimantation rémanente.

### **Champ coercitif**

Pour rendre nulle l'aimantation rémanente, il faut appliquer un champ magnétique  $B_c$  de sens contraire à celui du champ d'aimantation initiale.  $B_c$  est appelé « champ coercitif ».

### **Point de Curie**

L'aimantation d'un ferromagnétique décroît quand la température augmente et s'annule à une certaine température  $T_c$  appelée « point de curie ».

### **Equations de Maxwell**

Equations, au nombre de quatre, qui sous tendent l'électromagnétisme et régissent le comportement des ondes électromagnétiques

### **Vecteur de Poynting**

Le transport de l'énergie dans un champ électromagnétique peut-être décrit / défini à l'aide d'un vecteur flux d'énergie électromagnétique appelé vecteur de Poynting  $\vec{S}$ .

Le flux du vecteur  $\vec{S}$  à travers une surface représente la quantité d'énergie électromagnétique traversant cette surface par unité de temps; Sa direction indique le sens de propagation de l'énergie.



## XII. Liste compilée des lectures obligatoires

### Lecture #1

**Référence complète :** RASOLONDRAMANITRA, H. (2007). Circuits à courant alternatif. Madagascar. Université d'Antananarivo. Cours inédit.

**Résumé :** Ce chapitre analyse les oscillations de tension et de courant dans les circuits comportant diverses combinaisons de résistance, d'inductance et de capacité. Il étudie les impédances de ces circuits, le phénomène de résonance dans un circuit RLC série, la puissance en courant alternatif.

**Justification :** Cette lecture prépare l'apprenant(e) à l'activité d'apprentissage 1. Il(elle) mobilisera ses acquis lors de cette lecture :

- pour calculer le déphasage entre tension et courant, l'impédance d'un circuit
- pour établir l'impédance complexe d'un circuit
- pour établir et calculer le courant instantané qui parcourt un circuit et la tension instantanée à ses bornes

### Lecture #2

**Référence complète :** RASOLONDRAMANITRA, H. (2007). Champ magnétique et particules chargées en mouvement. Madagascar. Université d'Antananarivo. Cours inédit.

**Résumé :** Ce chapitre décrit et interprète l'expérience de Thomson qui a contribué à la découverte de l'électron, l'effet Hall qui a permis de déterminer le signe des porteurs de charge dans un conducteur. Il étudie aussi les accélérateurs de particules tels que le cyclotron et le synchrotron.

**Justification:** Les points développés ici aideront l'apprenant(e) à déterminer le rapport  $\frac{e}{m}$

par la méthode de la déflexion magnétique, à mieux appréhender le fonctionnement d'un spectromètre de masse, à déterminer le nombre de porteurs de charge par unité de volume dans un conducteur, à calculer le rayon de la trajectoire d'une particule chargée qui pénètre dans un champ magnétique et la vitesse d'une particule chargée à la sortie d'un cyclotron.



### Lecture #3

**Référence complète :** RASOLONDRAMANITRA, H.(2007).Inductance.Madagascar.Université d’Antananarivo. Cours inédit.

**Résumé :** Ce chapitre :

- énonce et explique la loi de Lenz
- explique le phénomène d’auto-induction , d’induction mutuelle
- définit l’inductance d’un dispositif et montre comment on peut la calculer
- étudie quelques applications pratiques du phénomène d’induction électromagnétique
- montre que de l’énergie est emmagasinée dans un champ magnétique

**Justification:** Cette lecture aide l’apprenant(e) à appliquer la loi de Lenz pour déterminer le sens du courant induit dans un circuit, à calculer l’inductance d’un circuit et le coefficient d’induction mutuelle de deux circuits, à consolider ses acquis sur le phénomène d’induction électromagnétique.

### Lecture #4

**Référence complète :** RASOLONDRAMANITRA, H. (2007). Les propriétés magnétiques de la matière. Madagascar. Université d’Antananarivo. Cours inédit.

**Résumé :** Ce chapitre commence par un rappel des lignes de champ magnétique et électrique et par une discussion de la loi de Gauss appliquée au magnétisme. L’aimantation des substances magnétiques est ensuite abordée. Cette étude est suivie de la description et de l’interprétation des propriétés des paramagnétiques, diamagnétiques et ferromagnétiques.

**Justification:** Cette lecture amène l’apprenant(e) à s’approprier les points essentiels pour la compréhension du processus d’aimantation et la compréhension des phénomènes de paramagnétisme, de diamagnétisme et de ferromagnétisme.

### Lecture #5

**Référence complète :** RASOLONDRAMANITRA, H. (2007).Les équations de Maxwell.Madagascar. Université d’Antananarivo. Cours inédit.

**Résumé :** Ce chapitre rappelle au début qu’un champ magnétique variable crée un champ électrique. Il considère après l’effet inverse ,i.e. qu’ un champ électrique variable induit un champ magnétique. Il introduit le courant de déplacement et la loi d’Ampère généralisée. Les équations de Maxwell sont ensuite présentées et analysées.

**Justification:** L’apprenant découvre et apprend par le biais de cette lecture que les équations de Maxwell résument les lois de l’électricité et magnétisme et qu’elles constituent les équations fondamentales de l’électromagnétisme.



## Lecture #6

**Référence complète :** RASOLONDRAMANITRA, H. (2007). Les ondes électromagnétiques. Madagascar. Université d'Antananarivo. Cours inédit.

**Résumé :** Ce chapitre établit les équations de propagation (ou équations d'onde) des champs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  associés à une onde électromagnétique. Il traite aussi l'énergie transportée par une onde électromagnétique et introduit le vecteur de Poynting. La polarisation d'une onde électromagnétique est aussi discutée.

**Justification:** Cette lecture donne à l'apprenant(e) les éléments qu'il faut mobiliser pour déterminer :

- l'état de polarisation d'une onde électromagnétique
- le vecteur de Poynting associé à une onde électromagnétique
- la densité d'énergie associée à une onde électromagnétique
- l'intensité d'une onde
- la pression de radiation



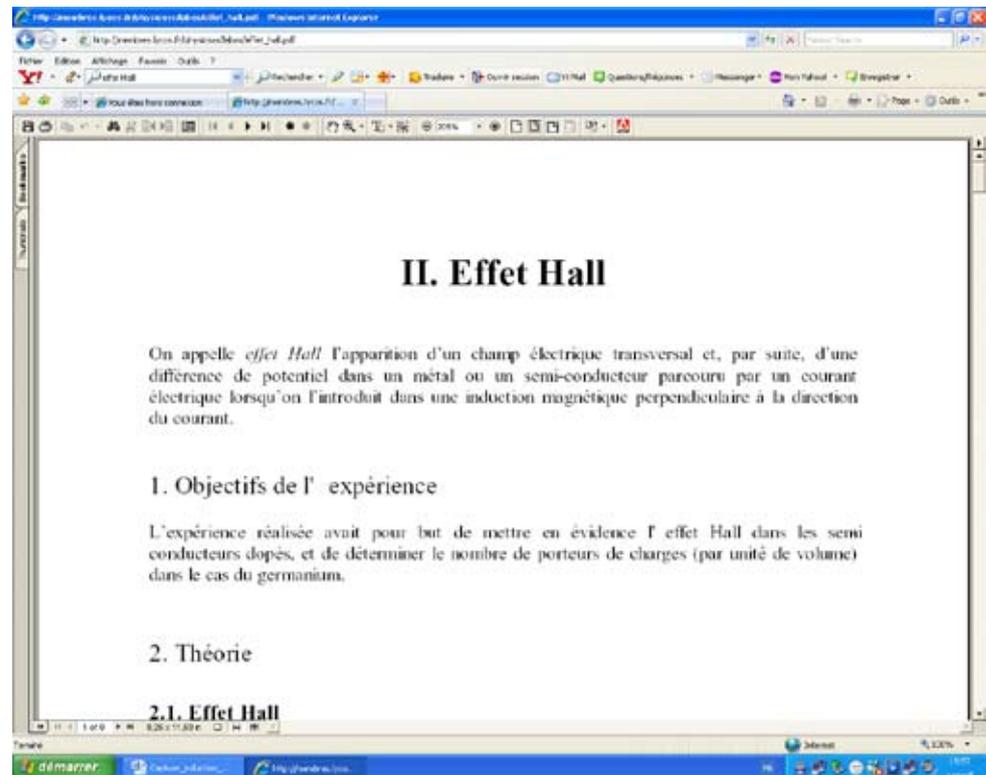
## XIII. Liste compilée des liens utiles

### Lien utile # 1

**Titre :** [http://membres.lycos.fr/physiciss/labos/effet\\_hall.pdf](http://membres.lycos.fr/physiciss/labos/effet_hall.pdf)

**URL :** <http://www>

**Impression d'écran:**



**Description:** Il s'agit ici d'une proposition d'expérience sur l'effet Hall dans les semiconducteurs. Il aborde, entre autres, la détermination du nombre de porteurs de charges par unité de volume.

**Justification:** Une lecture de ce lien permettra à l'apprenant(e) de vérifier, renforcer et consolider ses acquis relatifs à l'Unité 2 du module.

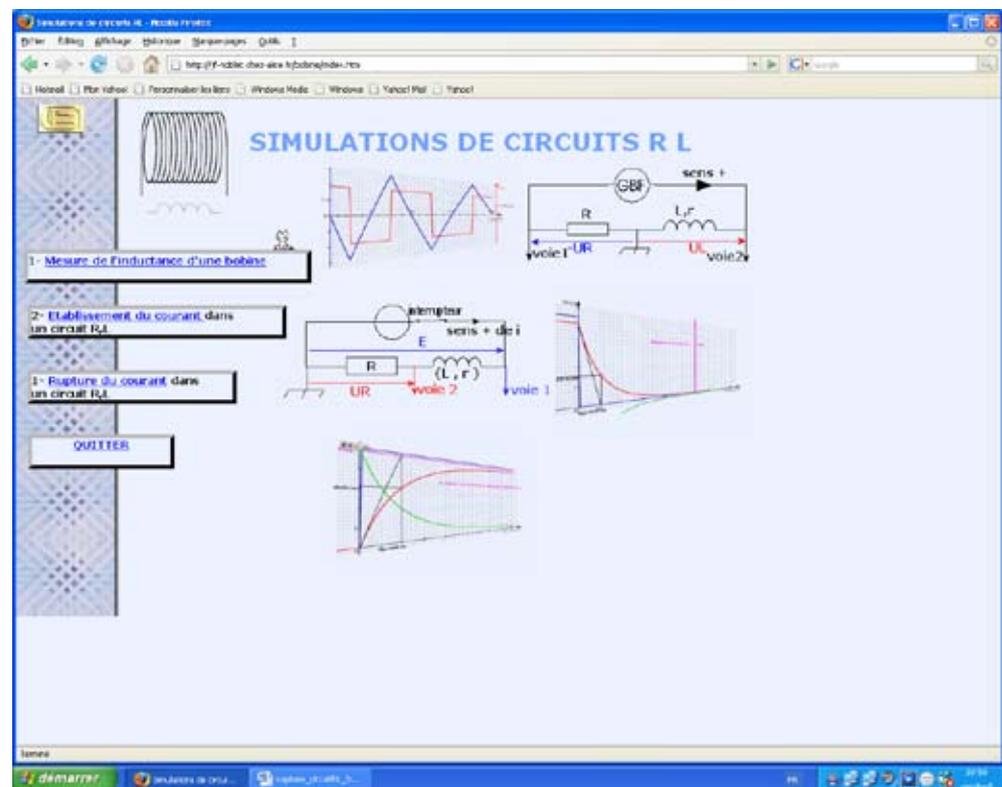


## Lien utile # 2

Titre : <http://jf-noblet.chez-alice.fr/bobine/index.htm>

URL : <http://www.chez-alice.fr>

Impression d'écran:



**Description:** Ce site présente des simulations de l'établissement et de rupture de courant dans un circuit RL ainsi qu'une simulation de mesure de l'inductance d'une bobine.

**Justification:** Ces simulations sont en rapport avec ce que l'apprenant(e) apprend dans l'Unité 2 du module

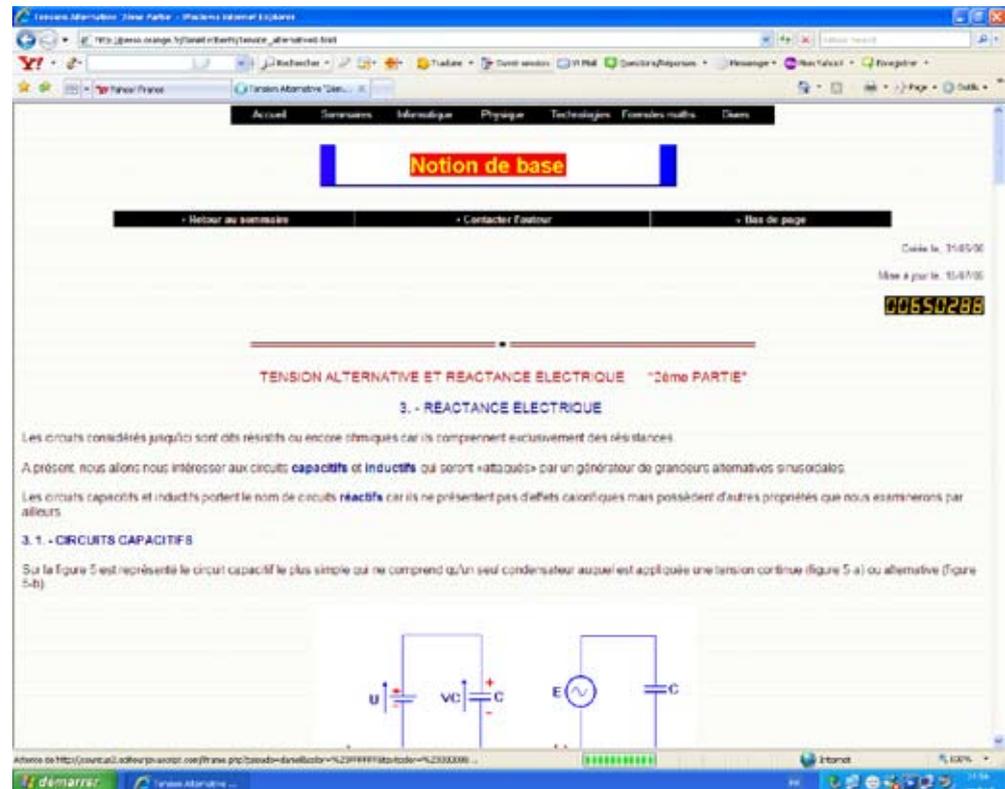


### Lien utile # 3

Titre : [http://perso.orange.fr/daniel.robert9/Tension\\_alternative0.html](http://perso.orange.fr/daniel.robert9/Tension_alternative0.html)

URL : <http://www>

Impression d'écran:



**Description:** Ce site étudie le déphasage entre la tension et le courant dans un circuit capacitif et la réactance capacitive.

**Justification:** La lecture de ce lien est suggérée mais non obligatoire. Elle peut aider l'apprenant(e) à comprendre l'Unité 1 du module.



## Lien utile # 4

**Titre :** [http://perso.orange.fr/daniel.robert9/Tension\\_alternative1.html](http://perso.orange.fr/daniel.robert9/Tension_alternative1.html)

**URL :** <http://www>.

**Impression d'écran:**

The screenshot shows a web browser window with the following content:

- Page Title:** Notion de base
- Navigation Menu:** Accueil, Sciences, Mécanique, Physique, Technologies, Formules math, Dates
- Buttons:** Retour au sommaire, Contacter l'auteur, Bas de page
- Metadata:** Créé le: 31/05/06, Mis à jour le: 10/07/06, 00650293
- Section Header:** TENSION ALTERNATIVE ET CIRCUIT INDUCTIF "3ème PARTIE"
- Sub-section:** 3. 2 - CIRCUIT INDUCTIF
- Text:** Sur la figure 10 est représenté le type le plus simple de circuit inductif, il ne comprend qu'une seule bobine ; dans ce cas également, s'il y avait un certain nombre de bobines, nous pourrions les remplacer par une bobine unique d'une inductance égale à celle présentée au total par toutes les bobines insérées dans le circuit.
- Diagrams:**
  - a)** A circuit diagram showing a DC voltage source (battery) connected in series with an inductor (L).
  - b)** A circuit diagram showing an AC voltage source (E) connected in series with an inductor (L).
- Caption:** Fig. 10. - Circuits inductifs alimentés en CC et en CA.
- Footnote:** Nous nous souvenons de plus qu'une bobine ne présente pas seulement sa résistance caractéristique, mais qu'elle offre aussi une résistance due au conducteur qui constitue ses spires. Pour les bobines qui ont peu de spires et qui sont formées par un conducteur d'une section assez grande, cette résistance est très faible, et l'on peut donc la négliger. Nous allons maintenant voir justement les circuits inductifs qui comprennent des bobines de résistance négligeable et qui ne présentent donc qu'une inductance.

**Description:** Ce site étudie le déphasage entre la tension et le courant dans un circuit inductif et la réactance inductive.

**Justification:** La lecture de ce lien est suggérée mais non obligatoire. Elle peut aider l'apprenant(e) à comprendre l'Unité 1 du module.

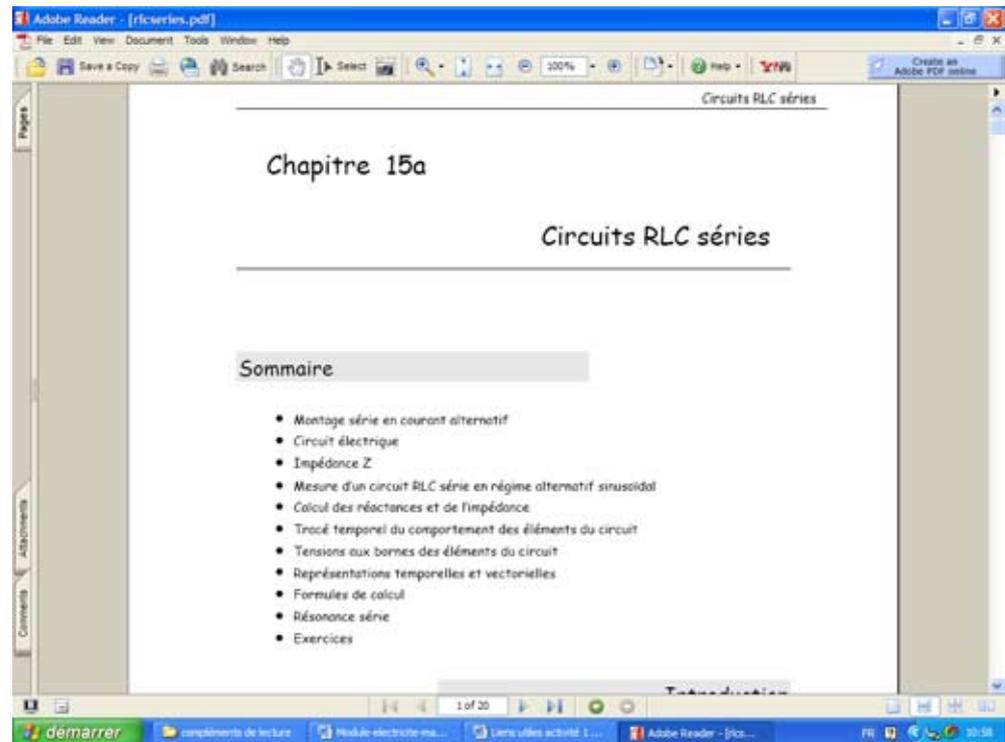


## Lien utile # 5

Titre : <http://sitelec.free.fr/cours/rlcseries.pdf>

URL : <http://www>.

Impression d'écran:



**Description:** Ce site analyse un circuit RLC série raccordé à une source alternative et étudie son comportement lorsque la fréquence de la source varie. Il examine en détails le phénomène de résonance, les impédances, les réactances capacitive et inductive, le déphasage entre oscillations de courant et de tension aux bornes des différents éléments

**Justification:** Une visite de ce lien est suggérée et permettra à l'apprenant(e) de vérifier, renforcer et consolider ses acquis relatifs à l'activité d'apprentissage 1-2 de l'Unité 1 du module.

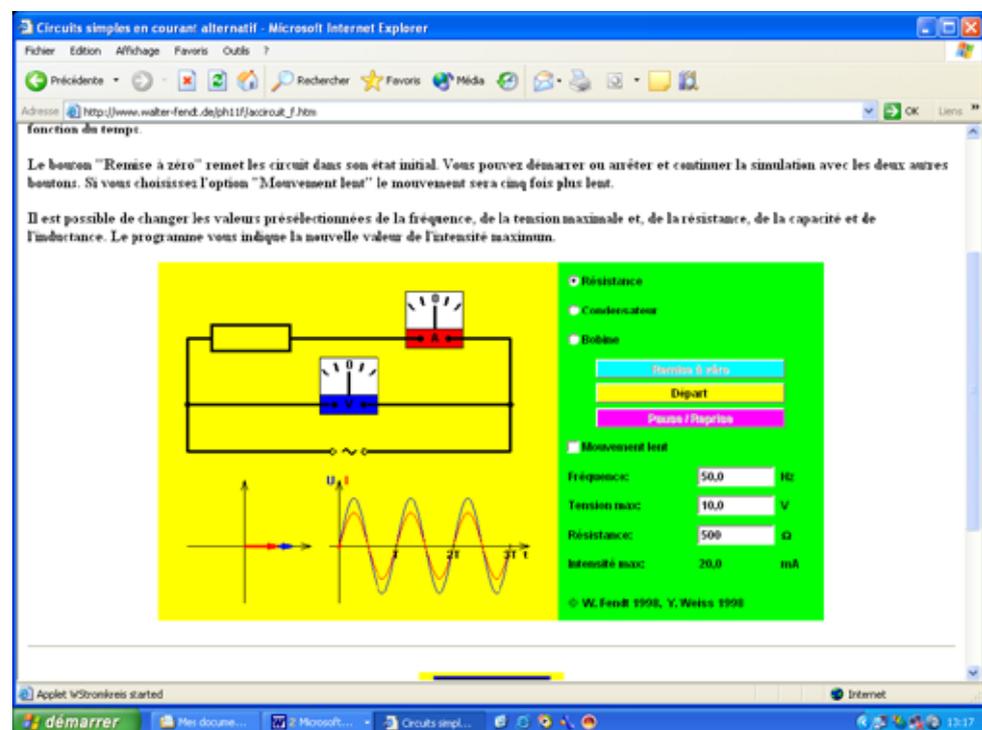


## Lien utile # 6

**Titre :** [http://www.walter-fendt.de/ph11f/accircuit\\_f.htm](http://www.walter-fendt.de/ph11f/accircuit_f.htm)

**URL :** [http://www.walter-fendt.de/ph11f/accircuit\\_f.htm](http://www.walter-fendt.de/ph11f/accircuit_f.htm)

### Impression d'écran:



**Description:** Il s'agit ici d'une animation des diagrammes de Fresnel et des oscillations de tension et de courant qui correspondent à un circuit comportant uniquement une résistance, une inductance et uniquement une capacité. L'apprenant(e) peut agir sur les paramètres R, L, C et tension.

**Justification:** Ce lien illustre par le biais d'une animation les points développés dans l'activité d'apprentissage 1-1 de l'Unité 1 de ce module



## Lien utile # 7

**Titre :** <http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/electri/rlcsinus.html>

**URL :** <http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/electri/rlcsinus.html>

**Impression d'écran:**

**Circuit RLC en régime sinusoïdal**

$F_0 = 795.7$   $\omega_0 = 5000.0$   $Q = 40$

**Objet :**  
On étudie un circuit R, L, C série en régime permanent sinusoïdal. L'étude du régime transitoire de ce circuit est faite dans l'applet [circuit RLC série](#).  
On peut consulter la page [analyse du circuit](#) pour avoir l'expression des tensions et du courant dans le montage.

**L'applet**  
Il est possible de geler l'animation en maintenant enfoncé le bouton droit de la souris. Sur l'animation les traits épais représentent les valeurs instantanées des tensions aux bornes des éléments du circuit ( $U_G$  rouge = générateur,  $U_R$  jaune = résistance,  $U_L$  bleu = inductance,  $U_C$  vert = condensateur). À droite du schéma, on trouve la représentation de Fresnel de ces tensions. Afin de maintenir les dessins dans la fenêtre, le programme renormalise automatiquement les vecteurs mais la valeur crête de la tension d'alimentation reste constante et égale à 1 volt (trait rouge).

$I = 1.9072$  mA,  $\Phi = 61.52^\circ$ ,  $U_R = 0.4768$ ,  $U_L = 2.3967$ ,  $U_C = 1.5177$  V

Amplitude: R (Ω) 200.0 L (H) 0.2 C (μF) 0.2 Fréquences = 1000 Hz

Les valeurs instantanées des tensions sont les projections sur un axe horizontal des vecteurs de Fresnel.  
Le programme affiche les valeurs de la fréquence propre et du facteur de qualité ainsi que les valeurs crêtes des tensions et du courant.  
Le courant (origine des phases) est en phase avec  $U_R$  (jaune).

**Commandes :**  
T : la liste de choix permet d'afficher l'animation ou les courbes I = f(t),  $\Phi$  = g(t),  $U_G$  = h(t),  $U_R$  = i(t) et  $U_L$  = j(t) = k(t)

J. J. Rousseau 10-1999

**Description:** C'est une étude des circuits RLC série. Le site montre des courbes d'intensité de courant et de déphasage, une animation des oscillations de tension et d'intensité de courant.

**Justification:** L'apprenant(e) peut vérifier ici ses acquis sur les points développés dans l'activité d'apprentissage 1-1 de l'Unité 1 de ce module.



## Lien utile # 8

**Titre :** [http://perso.orange.fr/olivier.granier/electro/simul/cour\\_rlc/circuitRLC3.htm](http://perso.orange.fr/olivier.granier/electro/simul/cour_rlc/circuitRLC3.htm)

<http://www.fundp.ac.be/sciences/physique/didactique/elec/RLC3.php>

**URL :** <http://www>

**Impression d'écran:**

**4. Le circuit RLC en régime permanent**  
**4.3. La tension aux bornes de la capacité**

Le diagramme des phasores permet d'exprimer  $V_c$ , l'amplitude de la tension aux bornes de C :

$$V_c = \frac{I}{C\omega} = \frac{V}{C\omega \sqrt{R^2 + \left( L\omega - \frac{1}{\omega C} \right)^2}}$$

On peut montrer que  $V_c$  est maximum lorsque

$$V = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{2L^2}}$$

On déduit de cette expression de  $v$  que :

- Ce maximum n'existe que si  $R^2$  est plus petit ou égal à  $2LC$ .  
Le courbe de  $V_c$  en fonction de la fréquence ne présente donc pas toujours un maximum, contrairement à la courbe du courant.
- Si le terme  $R^2(2L^2)$  est petit par rapport à  $1/(LC)$ , cette fréquence est très proche de la fréquence de résonance,  

$$\omega_0 = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$
 A cette fréquence  $\omega_0$ , la tension aux bornes de C est en général plus importante que la tension aux bornes du circuit.  
 On dit qu'il apparaît une surtension aux bornes de C :  $V_c = Q V$   

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$
 est le facteur de qualité de la résonance.

L'applet ci-dessous montre l'évolution de l'amplitude de la tension aux bornes de C,  $V_c$ , en fonction de la fréquence.  
 La résonance, la  $\omega_0$  et la capacité peuvent être modifiés par l'utilisateur.  
 L'amplitude de la tension délivrée par le générateur est fixée à 1V.  
 La fréquence de maximum de  $V_c$  est indiquée, ainsi que la **fréquence de résonance,  $\omega_0$** .

Résistance R: 20    Inductance L: 10    Capacité C: 10

$V_c(\omega)$

**Description:** Ces liens proposent la même activité. Il s'agit de suivre dans un circuit RLC l'évolution de l'amplitude de la tension aux bornes d'un condensateur en fonction de la fréquence.

**Justification:** Une visite de ces sites est suggérée pour l'activité d'apprentissage 1-2 de l'Unité 1 de ce module et peut aider l'apprenant(e) dans son apprentissage.



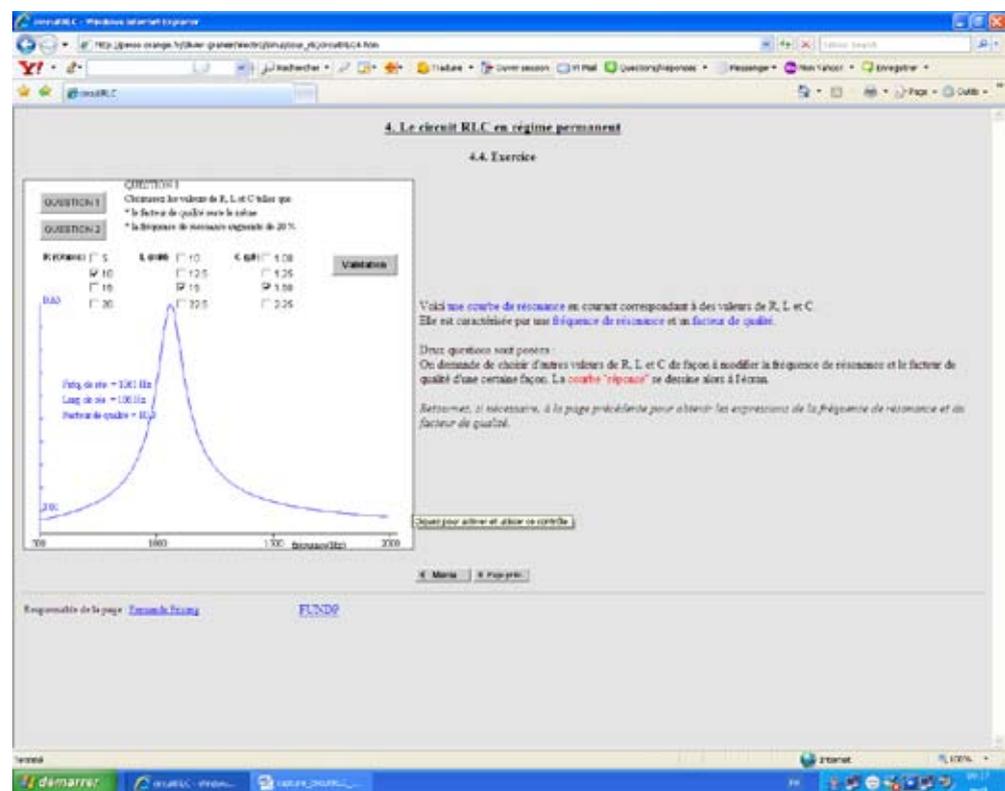
## Lien utile # 9

**Titre :** [http://perso.orange.fr/olivier.granier/electro/simul/cour\\_rlc/circuitRLC4.htm](http://perso.orange.fr/olivier.granier/electro/simul/cour_rlc/circuitRLC4.htm)

<http://www.fundp.ac.be/sciences/physique/didactique/elec/RLC4.php>

**URL :** <http://www>.

### Impression d'écran:



**Description:** Ces deux liens donnent le même exercice interactif concernant un circuit RLC et basé sur la fréquence de résonance et le facteur de qualité avec une illustration graphique.

**Justification:** L'apprenant(e) peut tester ici ses acquis sur la fréquence de résonance et le facteur de qualité développé dans l'activité d'apprentissage 1-2 de l'Unité 1 du module.



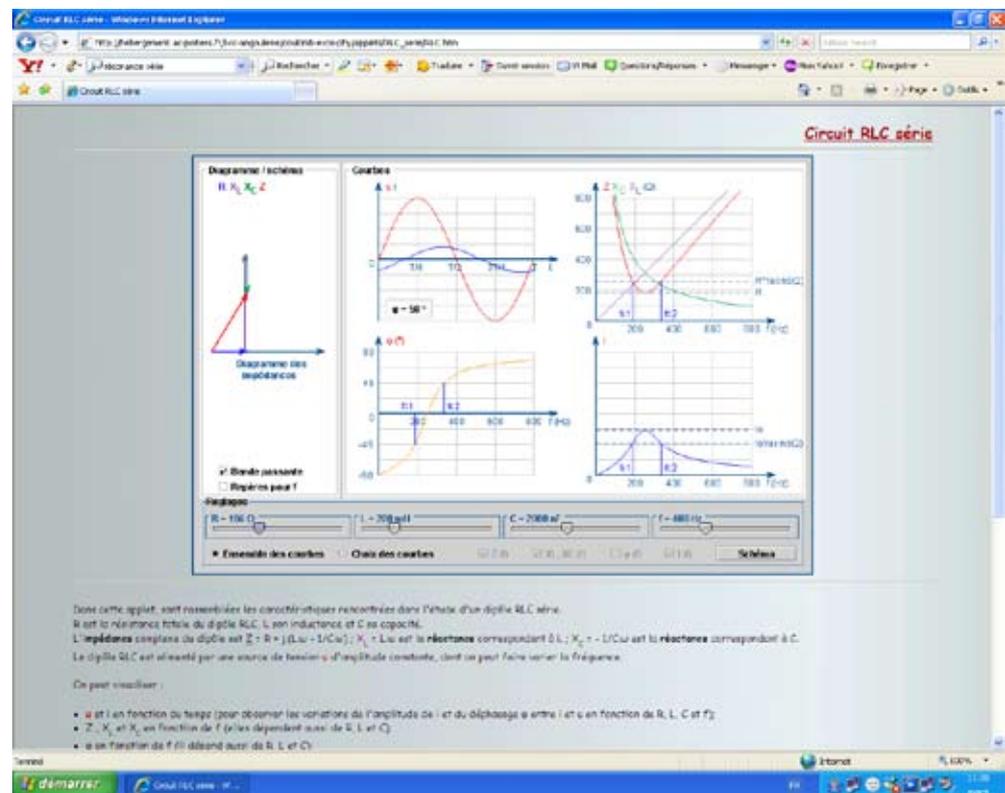
## Lien utile # 10

**Titre :** [http://labo.ntic.org/RLC\\_serie/RLC.html](http://labo.ntic.org/RLC_serie/RLC.html)

[http://hebergement.ac-poitiers.fr/l-cc-angouleme/coulomb-exos-phy/applets/RLC\\_serie/RLC.htm](http://hebergement.ac-poitiers.fr/l-cc-angouleme/coulomb-exos-phy/applets/RLC_serie/RLC.htm)

**URL :** <http://www>

### Impression d'écran:



**Description :** Ces deux applets proposent une étude des caractéristiques des circuits RLC série ( $Z$ ,  $X_L$ ,  $X_C$ ,  $I$ , oscillations de tension et d'intensité de courant, déphasage entre tension et courant, bande passante) en fonction de la fréquence de la source.

**Justification:** L'apprenant(e) peut tester ici ses acquis sur le phénomène de résonance, sur la notion de bande passante développés dans l'activité d'apprentissage 1-2 de l'Unité 1 de ce module.

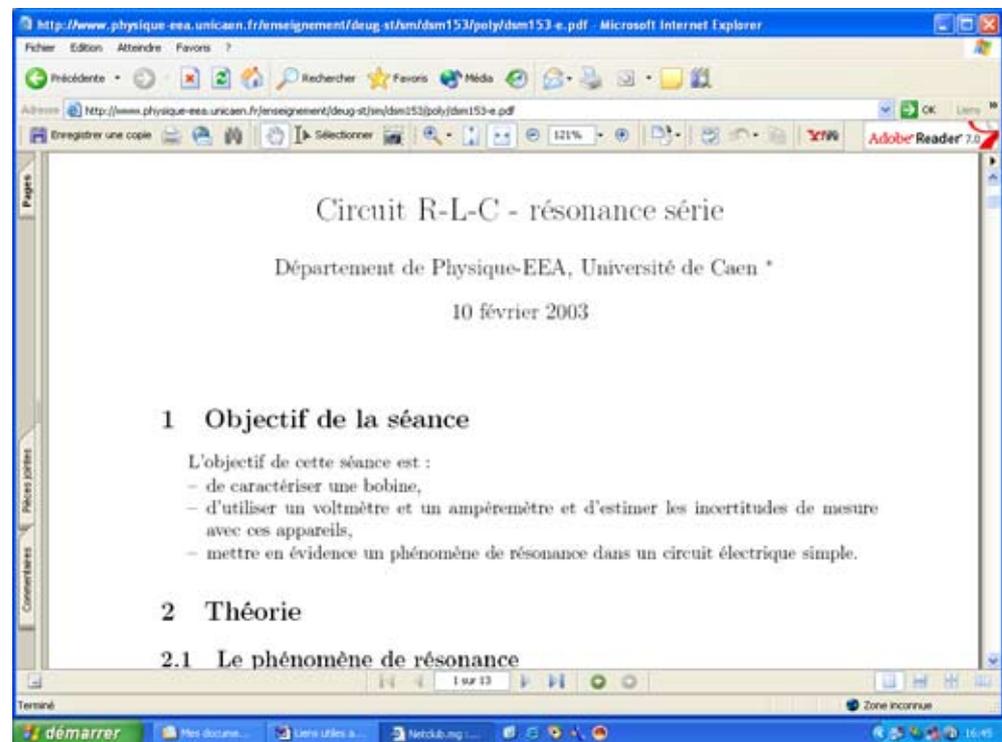


## Lien utile # 11

**Titre :** <http://www.physique-eea.unicaen.fr/enseignement/deug-st/sm/dsm153/poly/dsm153-e.pdf>

**URL :** *http://www.*

**Impression d'écran:**



**Description:** Ce site propose des protocoles de manipulation pour l'étude d'une bobine en courant continu et en courant alternatif. Il étudie le phénomène de résonance, la bande passante et le facteur de qualité.

**Justification:** Une visite de ce site initie l'apprenant(e) aux démarches expérimentales et peut l'aider à renforcer et consolider ses acquis sur les points développés dans l'activité d'apprentissage 1-2 de l'Unité 1 de ce module.



## Lien utile # 12

**Titre :** [http://www.unilim.fr/pages\\_perso/frederic.louradour/Oscillo\\_2.PDF](http://www.unilim.fr/pages_perso/frederic.louradour/Oscillo_2.PDF)

**URL :** *http:www.*

**Impression d'écran:**

**OSCILLOSCOPE CATHODIQUE**  
**ETUDE DES CIRCUITS RLC SERIE ET PARALLELE**

—

Le but de ce TP est d'étudier un circuit RLC série et un circuit RLC parallèle à l'aide d'un oscilloscope cathodique.

**I - ETUDE DU CIRCUIT RLC SERIE**

L'impédance du circuit RLC série est en module :

$$|Z| = \sqrt{R_t^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2} \quad \text{avec } R_t = R + r$$

**Description:** Ce site donne des protocoles de TP pour l'étude des circuits RLC série et parallèle.

**Justification:** Une visite de ce site initie l'apprenant(e) aux démarches expérimentales et peut l'aider à renforcer et consolider ses acquis sur les points développés dans l'activité d'apprentissage 1-2 de l'Unité 1 de ce module.

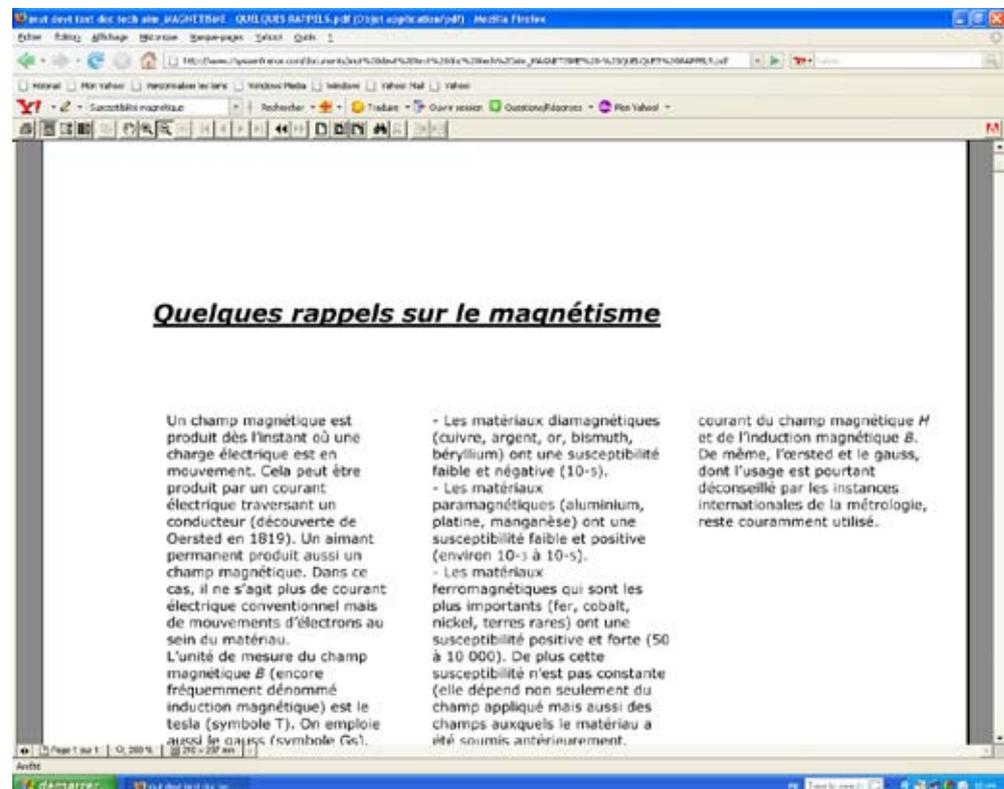


## Lien utile # 13

**Titre :** [http://www.thyssenfrance.com/documents/mut%20devt%20text%20doc%20tech%20aim\\_MAGNETISME%20-%20QUELQUES%20RAPPELS.pdf](http://www.thyssenfrance.com/documents/mut%20devt%20text%20doc%20tech%20aim_MAGNETISME%20-%20QUELQUES%20RAPPELS.pdf)

**URL :** *http://www.*

**Impression d'écran:**



**Description:** Ce site développe quelques rappels sur le magnétisme

**Justification:** La lecture de ce site est suggérée pour l'Unité 3 de ce module.

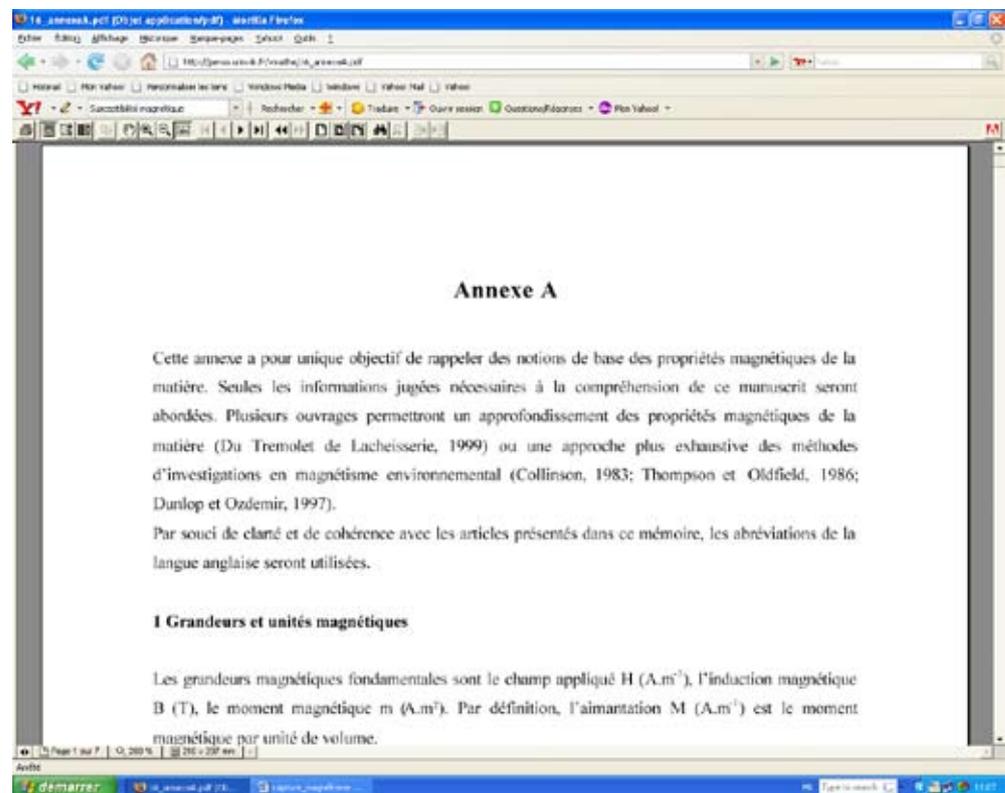


## Lien utile # 14

Titre : [http://perso.univ-lr.fr/vmathe/16\\_annexeA.pdf](http://perso.univ-lr.fr/vmathe/16_annexeA.pdf)

URL : <http://www>.

### Impression d'écran:



**Description:** Ce lien donne quelques rappels sur les propriétés magnétiques de la matière, en particulier sur les grandeurs magnétiques fondamentales  $B$ ,  $H$  et  $M$ , sur le paramagnétisme, le diamagnétisme et le ferromagnétisme, sur le phénomène d'hystérésis.

**Justification:** La visite de ce site est suggérée. L'apprenant(e) peut mettre en relation ce qu'il lit ici avec ce qu'il a appris au cours de l'activité d'apprentissage 3 – Unité 3 de ce module.



## Lien utile # 15

**Titre :** <http://semainescience.u-strasbg.fr/magnetisme/fondement.html>

**URL :** *http://www.*

**Impression d'écran:**

**Fondements théoriques du magnétisme**

**Origine**

Les propriétés magnétiques des matériaux proviennent des **courants électriques existant à l'échelle microscopique** au sein de ces matériaux. Ces courants tirent principalement leur origine de deux phénomènes :

- le mouvement des électrons autour de leur noyau, appelé mouvement orbital
- leur mouvement de rotation autour d'eux-mêmes, appelé spin

Puisque les électrons sont des particules chargées, tout mouvement, qu'il soit de rotation ou de spin, peut être associé à une boucle de courant élémentaire. Et une boucle de courant donne naissance à son champ magnétique.

**Manifestations et classification des matériaux**

Un échantillon de matière, mis en présence d'un aimant, se divise en deux comportements, qui reflètent les différents types de magnétisme :

- le plus souvent il est faiblement repoussé par cet aimant : c'est le **diamagnétisme**

ce phénomène a toujours lieu mais il est de très faible amplitude et est parfois masqué par un phénomène de plus grande intensité, tel que l'un de ceux décrits ci-dessous :

- parfois l'échantillon est faiblement attiré par l'aimant : c'est le **paramagnétisme**

Il peut se caractériser par des propriétés magnétiques : les petits moments créés par les boucles de courant atomiques sont orientés par le champ extérieur et il devient un vecteur de grand moment. Mais ce phénomène cesse dès que le champ magnétique extérieur n'est plus appliqué : les moments atomiques se désorientent et il perd toute propriété d'aimant.

**Description:** Ce site traite les fondements théoriques du magnétisme. Il met l'accent sur l'interprétation au niveau microscopique des propriétés magnétiques de la matière.

**Justification:** La visite de ce site est suggérée. L'apprenant(e) peut mettre en relation ce qu'il lit ici avec ce qu'il a appris au cours de l'activité d'apprentissage 3 – Unité 3 de ce module.

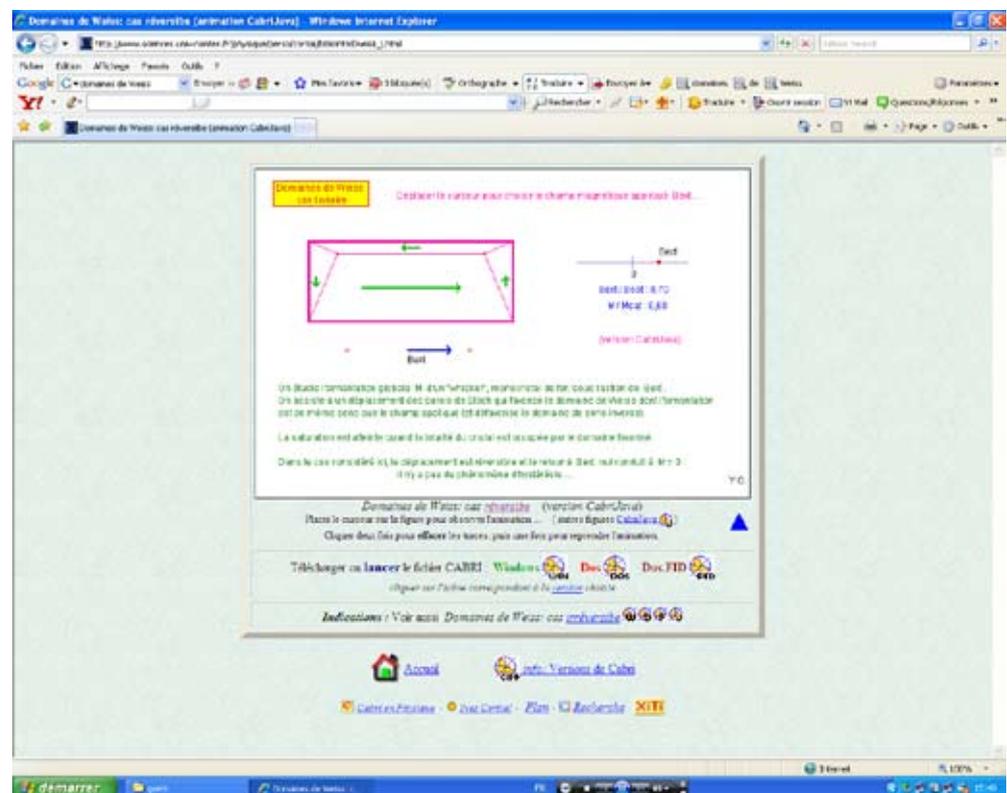


## Lien utile # 16

**Titre :** [http://www.sciences.univnantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/weiss-li\\_j.html](http://www.sciences.univnantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/weiss-li_j.html)

**URL :** [http://www.sciences.univnantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/weiss-li\\_j.html](http://www.sciences.univnantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/weiss-li_j.html)

**Impression d'écran:**



**Description:** Ce site présente une animation des domaines de Weiss. On peut visualiser le déplacement des parois de ces domaines. Les cas de déplacement réversible et irréversible sont considérés.

**Justification:** Ce lien illustre par le biais d'une animation les points développés dans la section « ferromagnétisme » de l'Unité 3 de ce module.

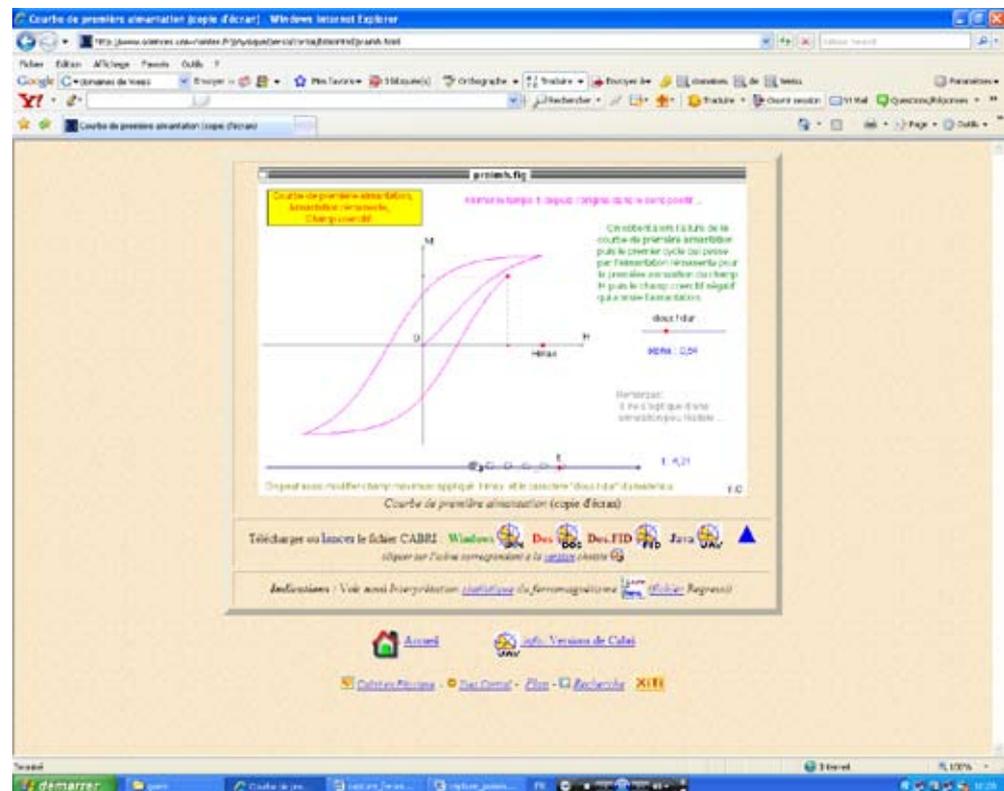


## Lien utile # 17

**Titre :** <http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/praimh.html>

**URL :** <http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/praimh.html>

**Impression d'écran:**



**Description:** La courbe de première aimantation, l'aimantation rémanente et le champ coercitif sont abordés ici.

**Justification:** Une visite de ce site est suggérée. L'apprenant(e) peut mettre en relation ce qu'il visualise ici avec les points développés dans les sections « courbe de première aimantation » et « hystérésis » de l'Unité 3 de ce module.

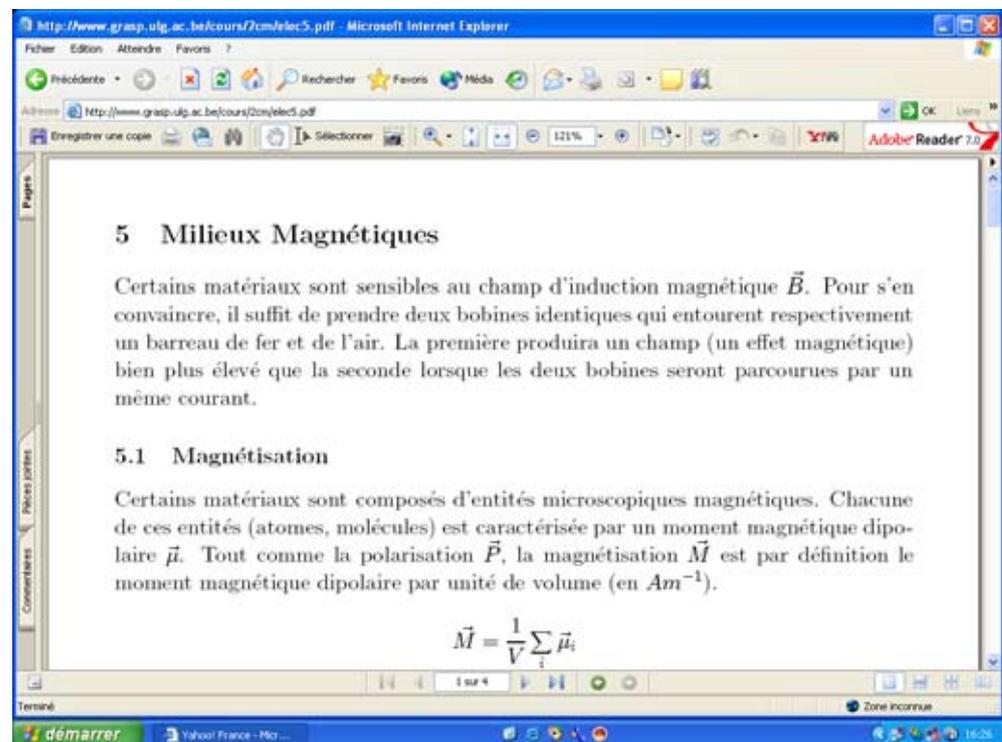


## Lien utile # 18

Titre : <http://www.grasp.ulg.ac.be/cours/2cm/elec5.pdf>

URL : *http:www.*

Impression d'écran:



**Description:** C'est un document sur les milieux magnétiques. Il décrit la magnétisation (ou aimantation), la susceptibilité magnétique et la relation qui lie les vecteurs  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$  et  $\vec{M}$ .

**Justification:** L'apprenant(e) peut confronter ce qu'il a appris dans l'activité d'apprentissage 3 de l'Unité 3 de ce module avec ce qu'il lit ici.

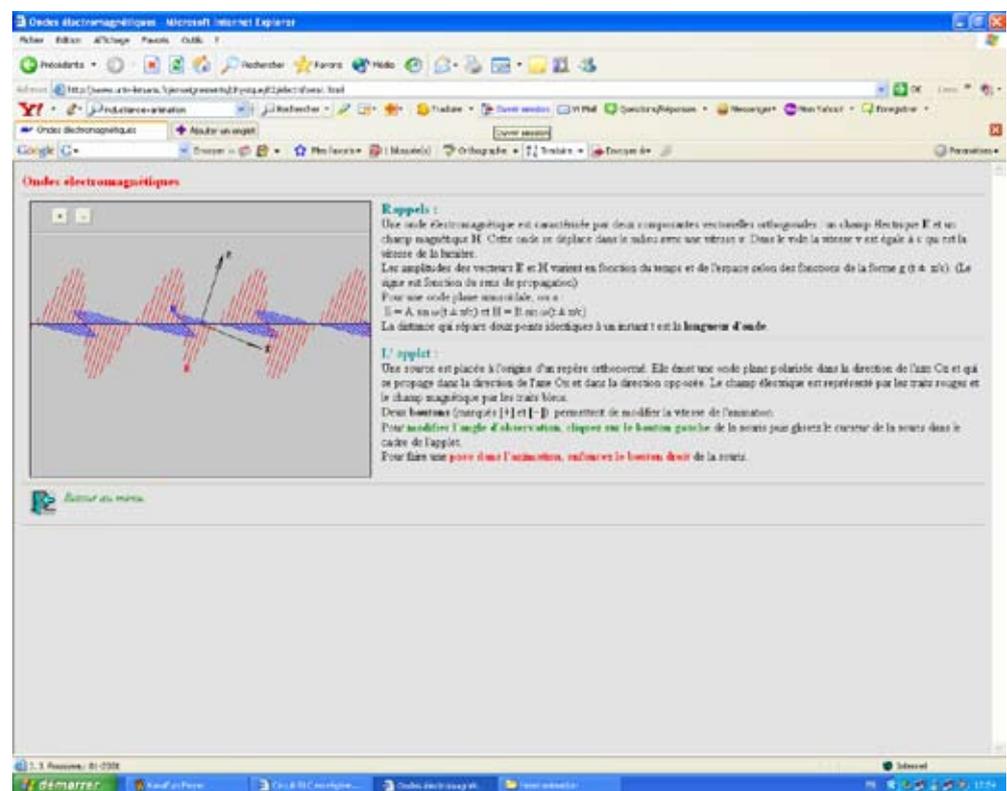


## Lien utile # 19

**Titre :** <http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/electri/oem1.html>

**URL :** <http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/electri/oem1.html>

**Impression d'écran:**



**Description:** Ce site propose une animation de la propagation d'une onde électromagnétique plane.

**Justification:** L'apprenant(e) peut visualiser ici que les champs qui constituent cette onde vibrent simultanément et tel qu'à tout instant ils restent perpendiculaires entre eux et perpendiculaires à la direction de propagation.

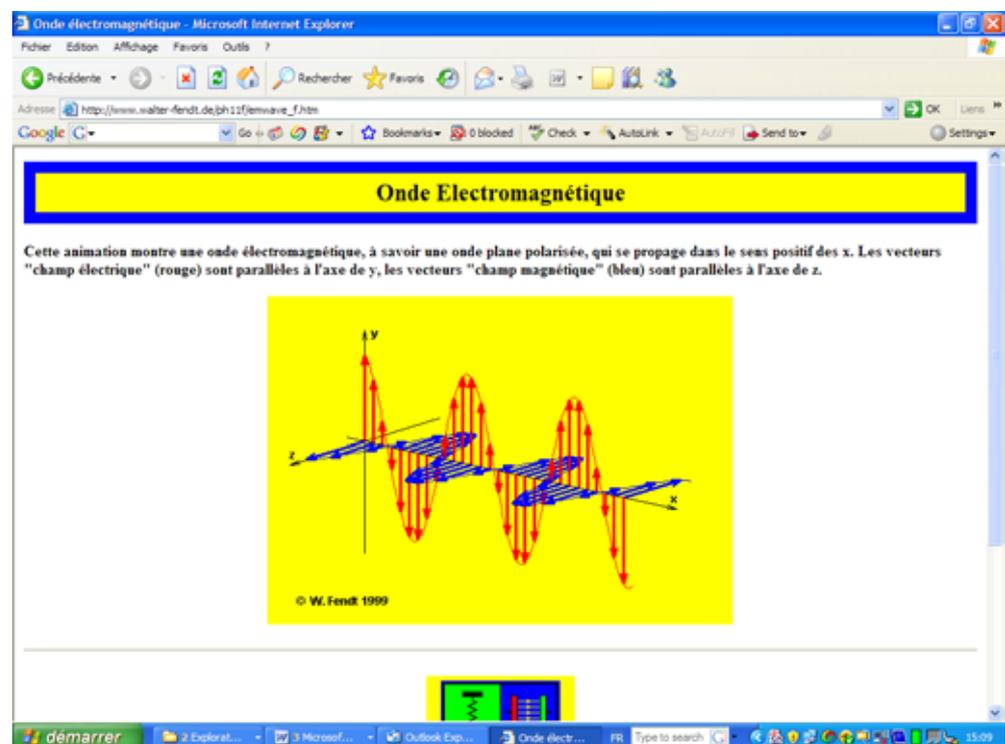


## Lien utile # 20

Titre : [http://www.walter-fendt.de/ph11f/emwave\\_f.htm](http://www.walter-fendt.de/ph11f/emwave_f.htm)

URL : *http:www.*

### Impression d'écran:



**Description:** Ce site propose une animation de la propagation d'une onde électromagnétique plane.

**Justification:** L'apprenant(e) peut visualiser ici que les champs qui constituent cette onde vibrent simultanément et tel qu'à tout instant ils restent perpendiculaires entre eux et perpendiculaires à la direction de propagation.

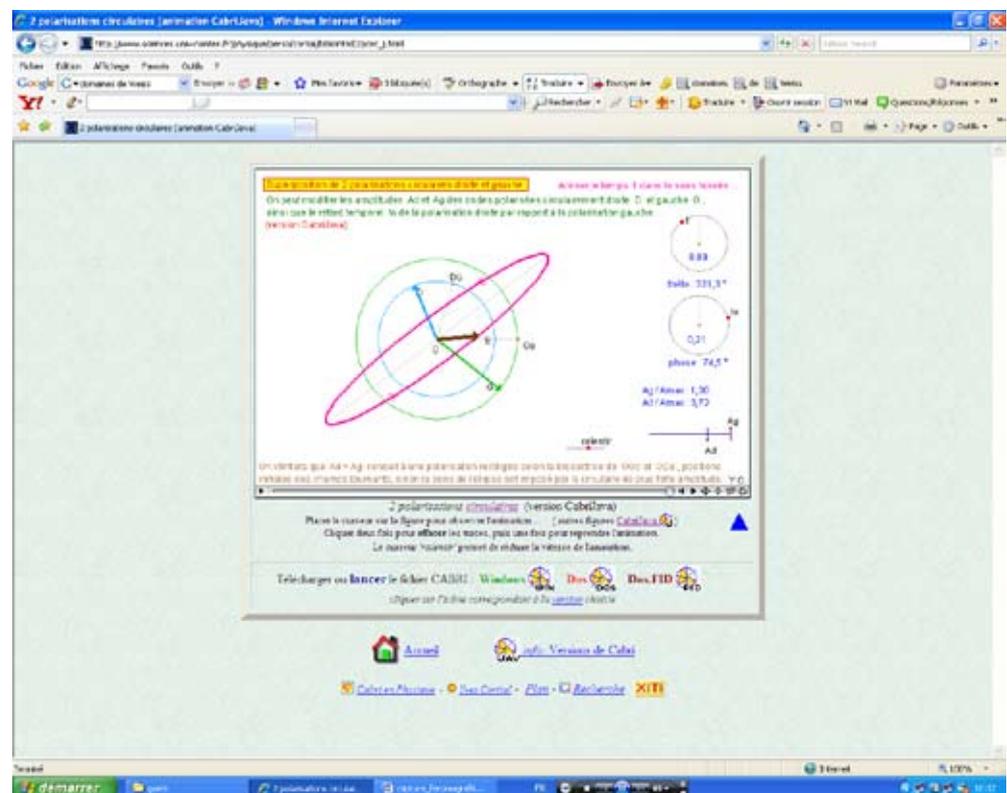


## Lien utile # 21

**Titre :** [http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/2pcirc\\_j.html](http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/2pcirc_j.html)

**URL :** [http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/2pcirc\\_j.html](http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/2pcirc_j.html)

**Impression d'écran:**



**Description:** Il s'agit ici d'une animation de la superposition de deux ondes polarisées circulairement.

**Justification:** La visite de ce site peut renforcer les acquis de l'apprenant(e) sur la polarisation des ondes électromagnétiques.

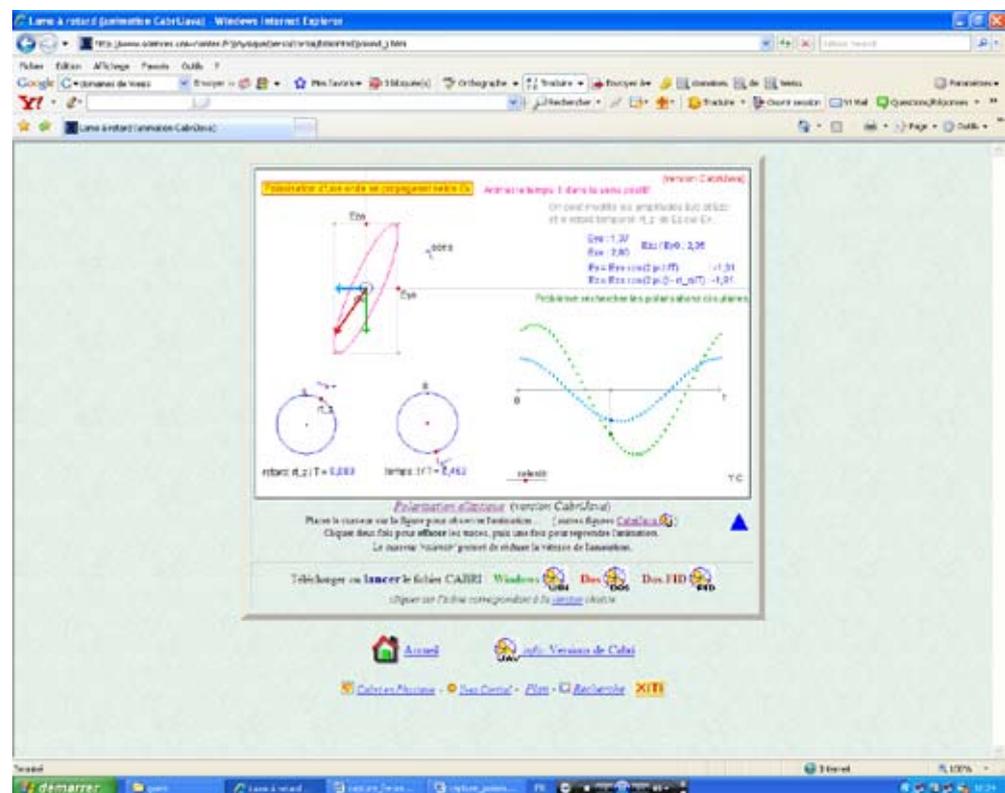


## Lien utile # 22

**Titre :** [http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/polond\\_j.html](http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/polond_j.html)

**URL :** [http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/polond\\_j.html](http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/polond_j.html)

**Impression d'écran:**



**Description:** Ce lien montre une animation d'une onde polarisée elliptiquement.

**Justification:** La visite de ce site peut renforcer les acquis de l'apprenant(e) sur la polarisation des ondes électromagnétiques.



## XIV. Synthèse du Module

Le module a été divisé en quatre parties.

- 1- Dans la première partie, l'apprenant(e) aborde l'étude des circuits à courant alternatif et comportant diverses combinaisons de résistance, d'inductance et de capacité. Il(elle) apprend notamment à :
  - analyser les oscillations de tension et de courant et calculer le déphasage entre eux ;
  - déterminer l'impédance d'un circuit
  - décrire, interpréter et dégager les caractéristiques de l'état de résonance d'un circuit RLC série
  - déterminer par le calcul et graphiquement la bande passante d'un circuit RLC série.
  
- 2- Dans la deuxième partie, l'apprenant(e) se concentre sur le mouvement des particules chargées dans un champ électrique et un champ magnétique et étudie l'expérience de Thomson, l'effet Hall, le principe de fonctionnement des accélérateurs de particules. Il approfondit ensuite le phénomène d'induction électromagnétique par l'étude de la loi de Lenz et des phénomènes d'auto induction et d'induction mutuelle. Il(elle) apprend entre autres à :
  - déterminer le rapport  $\frac{e}{m}$
  - décrire et interpréter l'effet Hall
  - calculer la vitesse d'un porteur de charge à la sortie d'un cyclotron
  - appliquer la loi de Lenz
  - faire des calculs d'inductance et de coefficient d'induction mutuelle.
  
- 3- Dans la troisième partie, l'apprenant(e) se consacre à l'étude des substances magnétiques : le paramagnétique, le diamagnétique et le ferromagnétique. Il apprend :
  - l'origine de l'aimantation
  - la relation qui lie  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$  et  $\vec{M}$
  - le phénomène d'hystérésis



- à calculer le moment magnétique d'une boucle de courant, l'aimantation d'une substance
  - à déterminer le champ coercitif
- 4- Les équations de Maxwell et les ondes électromagnétiques font l'objet de la dernière partie. L'apprenant(e) étudie la polarisation d'une onde électromagnétique plane, l'énergie qu'elle transporte. Il(elle) apprend entre autres à :
- décrire, interpréter et appliquer les équations de Maxwell
  - déterminer la polarisation d'une onde, son vecteur de Poynting, son intensité et sa pression de radiation



## XV. Évaluation sommative

### Exercice 1

Un circuit comportant une résistance pure  $R = 40 \Omega$  est connecté aux bornes d'une source de tension alternative sinusoïdale  $U = U_m \sin \omega t$  de fréquence variable. On maintient l'amplitude de tension constante et égale à 21,21V.

- 1- Déterminer l'intensité efficace du courant qui traverse le circuit quand la fréquence de la source est 100Hz et quand elle est 100kHz.
- 2- Quelle est cette intensité si l'on remplace la résistance par
  - un condensateur de capacité  $C = 0,3 \mu\text{F}$
  - une bobine d'inductance  $L = 2\text{mH}$

### Exercice 2

Une bobine d'inductance  $L = 0,1\text{H}$  et de résistance  $R = 10\Omega$  est branchée aux bornes d'une source de tension alternative sinusoïdale  $U = 10\sqrt{2} \cos 100\pi t$ .

- 1- Déterminer le déphasage du courant qui parcourt ce circuit par rapport à la tension appliquée.
- 2- Donner l'expression du courant instantané

### Exercice 3

Une bobine de résistance égale à  $5\Omega$  est alimentée en courant sinusoïdal de fréquence 50Hz. Le retard  $\Phi$  du courant sur la tension appliquée est tel que  $\cos \Phi = 0,8$ .

Calculer l'inductance de la bobine.

### Exercice 4

Une bobine alimentée sous une tension continue de 120V, est parcourue par un courant d'intensité 2A ; alimentée sous une tension sinusoïdale de fréquence 50Hz, de valeur efficace 100V, elle est parcourue par un courant d'intensité efficace 0,5A.

- 1- Calculer l'inductance de la bobine
- 2- Donner la valeur en degrés du déphasage de la tension sur le courant pour une telle tension alternative sinusoïdale appliquée aux bornes de cette bobine. Donner les expressions des valeurs instantanées du courant traversant cette bobine et de la tension.



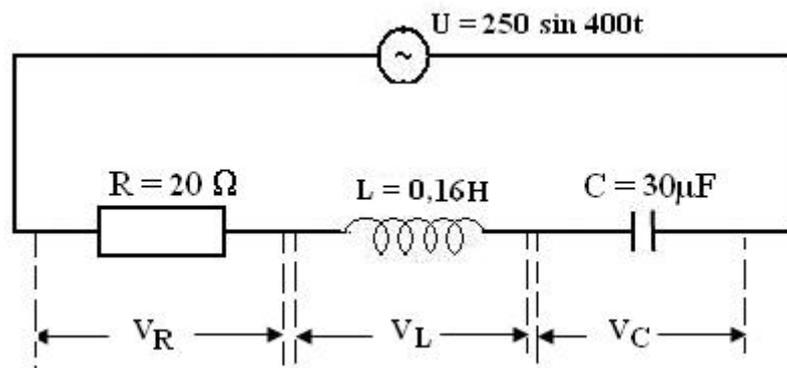
### Exercice 5

Une résistance  $R = 20 \Omega$  et une bobine d'inductance  $L = 40 \text{ mH}$  sont branchées en série aux bornes d'une tension sinusoïdale d'amplitude  $150\text{V}$  et de fréquence  $f = 60\text{Hz}$ .

- 1- A l'instant  $t = \frac{T}{6}$ , calculer les valeurs instantanées :
  - du courant  $I$  qui parcourt le circuit
  - de la source de tension sinusoïdale  $U$
  - de la tension  $V_R$  aux bornes de la résistance
  - de la tension  $V_L$  aux bornes de la bobine
- 2- Comparer  $U$  et  $(V_R + V_L)$  à l'instant  $t = \frac{T}{6}$  et conclure.
- 3- Exprimer l'amplitude de  $U$  en fonction des amplitudes de tension  $V_{Rm}$  et  $V_{Lm}$  aux bornes de la résistance et de la bobine.

### Exercice 6

On considère le circuit ci-dessous :



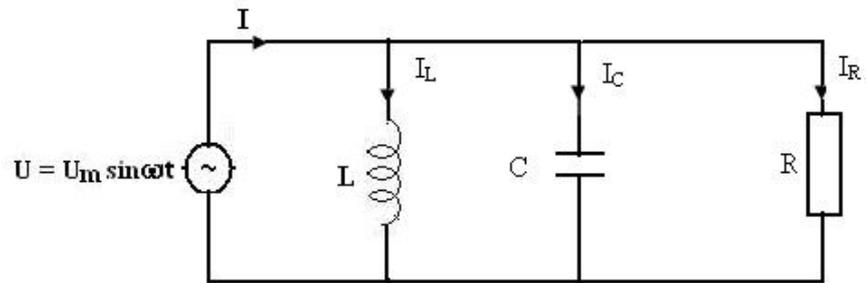
- 1- Donner l'expression du courant instantané  $I$  qui parcourt le circuit et les expressions des tensions instantanées  $V_R$ ,  $V_L$  et  $V_C$ .
  - 2- Calculer  $V_R + V_L + V_C$  et comparer avec  $U$ .
- On donne la relation trigonométrique :

$$A \sin \alpha + B \cos \alpha = (A^2 + B^2)^{1/2} \sin(\alpha + \beta) \text{ où } \text{tg } \beta = \frac{B}{A}$$



### Exercice 7

On considère le circuit ci-dessous :



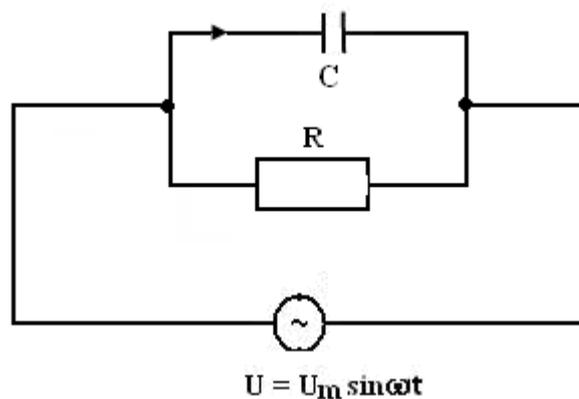
- 1- Trouver les courants instantanés  $I_L$ ,  $I_C$ ,  $I_R$  et  $I$
- 2- Quelle est l'impédance de ce circuit
- 3- Trouver l'angle de déphasage entre la tension appliquée et le courant principal  $I$

On donne la relation trigonométrique :

$$A \sin \alpha + B \cos \alpha = (A^2 + B^2)^{1/2} \sin(\alpha + \beta) \text{ avec } \operatorname{tg} \beta = \frac{B}{A}$$

### Exercice 8

Soit le montage ci-dessous



- 1- Trouver l'impédance complexe de ce circuit et en déduire son impédance.
- 2- La tension appliquée est-elle en avance ou en retard par rapport au courant ?



### Exercice 9

Une résistance  $R = 10\Omega$ , une bobine d'inductance  $L = 0,4H$ , un condensateur de capacité  $C = 0,4\mu F$  et une lampe sont branchés en série aux bornes d'une source de tension alternative de valeur efficace  $U_{\text{eff}} = 10^{-2} V$ . On néglige la résistance de la lampe. On fait augmenter la fréquence  $f$  de la source tout en maintenant constante son amplitude.

- 1- Décrire et expliquer comment varie la luminosité de la lampe.
- 2- Calculer :
  - la fréquence de résonance
  - l'intensité maximale du courant
  - la tension aux bornes du condensateur à la résonance
- 3- On remplace la résistance  $R$  par une résistance  $R_1 = R / 2$  puis par  $R_2 = R / 4$ . Calculer de nouveau l'intensité maximale.

### Exercice 10

Une bobine de résistance  $R$  et d'inductance  $L$  et un condensateur de capacité  $C$  sont montés en série avec une source alternative sinusoïdale  $U = U_m \sin(1000\pi t)$ . La fréquence de résonance de ce circuit est  $f_0 = 718\text{Hz}$ . Le courant est-il en avance ou en retard par rapport à la tension ?

### Exercice 11

Un condensateur de capacité  $C$  et une bobine de résistance  $R$ , d'inductance  $L$  sont branchés en série aux bornes d'une source de tension sinusoïdale de valeur efficace  $10V$  et de pulsation  $\omega$ . On donne  $R = 10\Omega$ ,  $C = 5\mu F$  et  $L = 1H$ . Calculer :

- la fréquence de résonance de ce circuit
- l'intensité efficace à la résonance
- le facteur de qualité et la bande passante de ce circuit
- la tension efficace aux bornes du condensateur à la résonance

### Exercice 12

Soit un circuit (RLC) série alimenté par une source de tension sinusoïdale de fréquence variable et de valeur efficace constante  $U_{\text{eff}} = 24V$ . L'intensité efficace est maximale et égale à  $150\text{mA}$  pour une fréquence de  $800\text{Hz}$ . La bande passante de ce circuit est  $167,5 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Calculer la résistance  $R$ , l'inductance  $L$  et la capacité  $C$ .



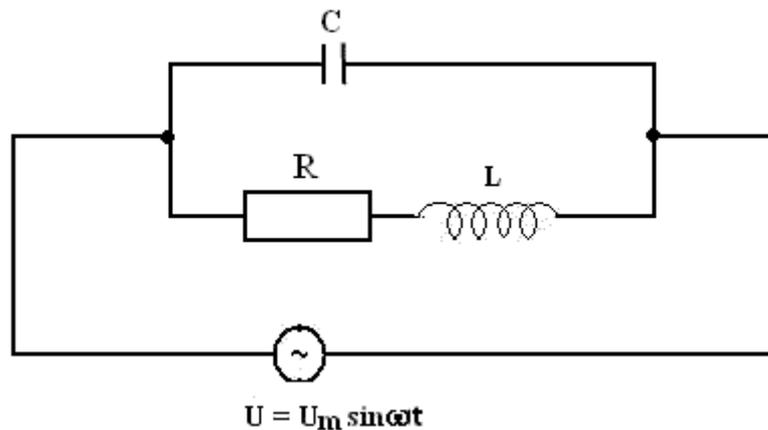
### Exercice 13

Une bobine d'inductance  $L = 4\text{mH}$ , un condensateur de capacité  $C = 16\mu\text{F}$  et une résistance  $R = 20\Omega$  sont montés en série avec une source de tension sinusoïdale dont la fréquence est égale à  $400\text{Hz}$ .

- Donner la représentation de Fresnel qui correspond à ce circuit.
- Trouver l'angle de déphasage entre tension et courant.
- Sans la calculer explicitement, la fréquence de résonance du circuit est-elle supérieure ou inférieure à  $400\text{Hz}$  ?
- Calculer la fréquence de résonance.

### Exercice 14

Considérer le circuit suivant :



- Trouver l'impédance complexe du circuit.
- Une résonance parallèle est obtenue quand la partie imaginaire de l'impédance complexe s'annule. Trouver l'impédance de ce circuit à la résonance parallèle dans le cas où  $\omega^2 L^2 \gg R^2$ .



### Exercice 15

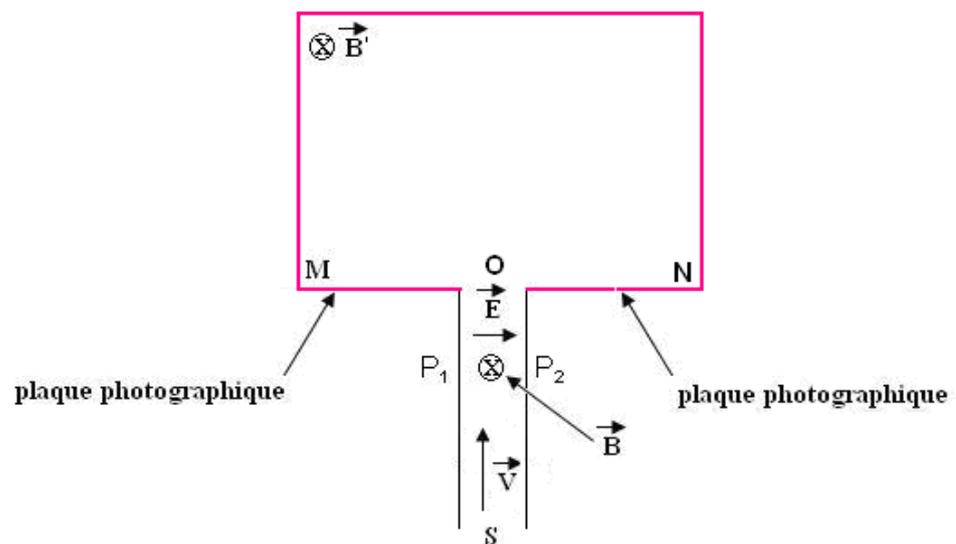
Un électron est lancé dans une région où agissent simultanément un champ électrique et un champ magnétique uniformes et perpendiculaires entre eux. Ces deux champs sont aussi perpendiculaires à sa vitesse initiale. On constate que :

- sous l'action simultanée des deux champs, l'électron n'est pas dévié de sa trajectoire initiale
- quand on fait cesser l'action du champ électrique tout en gardant le champ magnétique, il décrit une trajectoire circulaire de rayon  $R = 1,14 \text{ cm}$ .

Calculer le rapport  $\frac{e}{m}$  sachant que  $B = 2 \times 10^{-3} \text{ T}$  et  $E = 8 \text{ kV/m}$

### Exercice 16

On considère le dispositif ci-dessous. S est une source de particules chargées. Entre les deux plaques  $P_1$  et  $P_2$  règnent un champ électrique uniforme  $\vec{E}$  et un champ magnétique uniforme  $\vec{B}$ . Le champ  $\vec{E}$  est parallèle au plan de la figure et dirigé de  $P_1$  vers  $P_2$ .  $\vec{B}$  est normal au plan de la figure et dirigé vers l'arrière. Les particules qui sortent en O pénètrent dans une région où règne un champ magnétique uniforme  $\vec{B}'$  normal aussi au plan de la figure et dirigé vers l'arrière.





S envoie un faisceau d'ions positifs de charge  $q$ , de masse  $m$  et de vitesse  $\vec{v}$  comme l'illustre la figure.

- 1- Quelle doit être la vitesse de ces ions pour qu'ils traversent l'espace compris entre S et O sans être déviés ?
- 2- Quelle partie de la plaque photographique vont-ils recouper lorsqu'ils pénètrent dans le champ  $\vec{B}'$  ? Calculer la distance  $d$  à laquelle ils recoupent la plaque photographique.
- 3- Supposons que le faisceau envoyé par S est constitué d'isotopes de l'élément étain (Sn) dont les isotopes de masses 116 u et 120 u. déterminer La différence des distances  $d$  correspondant à ces deux isotopes .

A.N. :  $E = 15 \text{ kV/m}$ ,  $B = B' = 0,15 \text{ T}$

$1 \text{ u} = \text{une unité de masse atomique} = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$

$q = e$

### Exercice 17

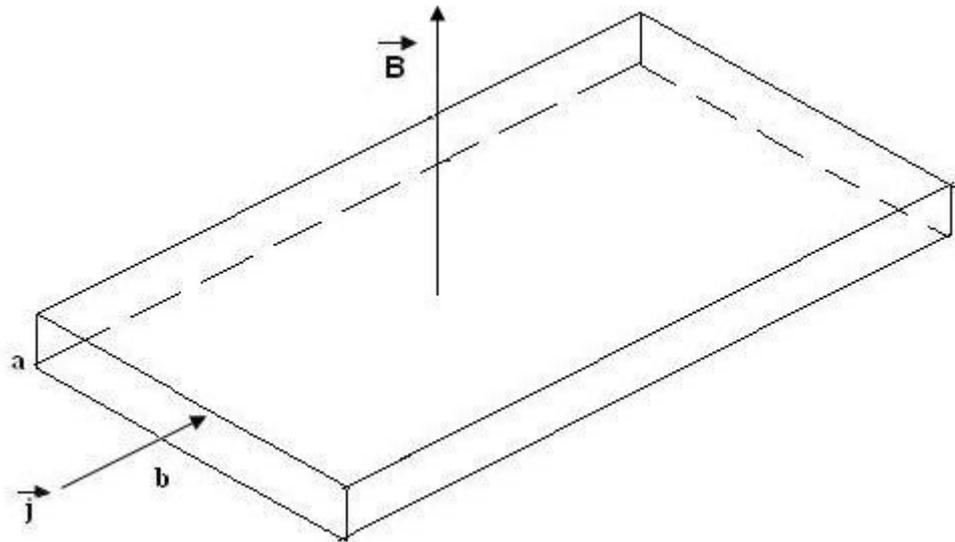
Dans un cyclotron on accélère des protons de charge  $q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$  et de masse  $m = 1,6610^{-27} \text{ kg}$ . Les dés de ce cyclotron sont placés dans un champ magnétique uniforme, normal à leur plan et de grandeur  $B = 1,5 \text{ T}$

1. Quelle doit être la fréquence du champ électrique oscillant qui règne dans l'espace entre les dees et qui accélère ces protons ?
2. Calculer l'énergie cinétique des protons à la sortie du cyclotron sachant que juste avant cette sortie leur trajectoire a un rayon  $R = 50 \text{ cm}$ .
3. Quel est le nombre d'accéléérations effectuées par un proton si la différence de potentiel entre les dees est  $40 \text{ kV}$  ?



### Exercice 18

La figure ci-dessous montre un ruban métallique de section rectangulaire de côtés  $a$  et  $b$ . Il possède  $n$  électrons de conduction par unité de volume et est parcouru par un courant d'intensité dont la densité  $\vec{j}$  est uniforme et dirigée comme l'indique la figure.

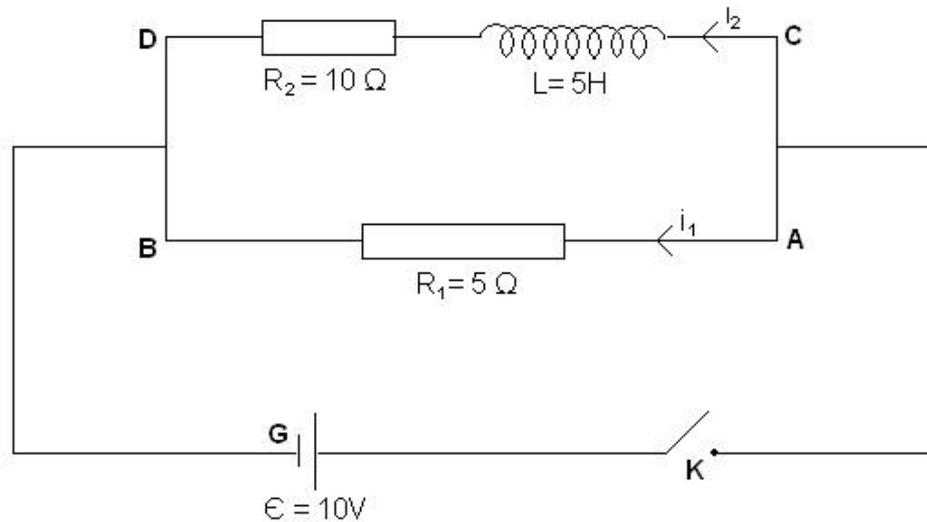


- 1- Donner le sens de la vitesse d'entraînement des électrons de conduction. Déterminer cette vitesse.
- 2- Quand le ruban est placé dans un champ magnétique  $\vec{B}$  perpendiculaire à la densité de courant  $\vec{j}$ , des électrons s'accumulent sur l'une de ses faces. Expliquer pourquoi et indiquer cette face sur la figure.
- 3- Il s'établit rapidement un régime permanent où les électrons ne dérivent plus latéralement. Expliquer pourquoi.
- 4- Quelle est la relation qui lie  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  quand le régime permanent est atteint.
- 5- Calculer la différence de potentiel entre les bords arrière et avant du ruban

On donne :  $B = 2 \text{ T}$  ;  $I = 2 \text{ A}$  ;  $a = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$   
 $ne = 2 \cdot 10^{10} \text{ C m}^{-3}$



### Exercice 19



1- Juste après la fermeture de l'interrupteur K, calculez :

- les intensités des courants  $i_1$  et  $i_2$
- l'intensité du courant  $i$  qui traverse l'interrupteur K
- la différence de potentiel aux bornes de  $R_2$
- la différence de potentiel aux bornes de la bobine
- le taux de croissance du courant  $i_2$

2- Calculer de nouveau ces quantités quand le régime permanent est atteint.

### Exercice 20

Une bobine d'inductance  $L = 0,1$  mH et de résistance  $r$  est connectée en série avec une résistance  $R_1 = 0,5$  Ω, un générateur de f.é.m.  $\varepsilon = 20$  V et un interrupteur K.

- 1) Écrire l'équation différentielle donnant l'évolution de l'intensité  $i$  du courant en fonction du temps après la fermeture de K.
- 2) Vérifier que la solution de cette équation différentielle est :

$$i = \frac{\varepsilon}{R} \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \text{ avec } R = R_1 + r$$

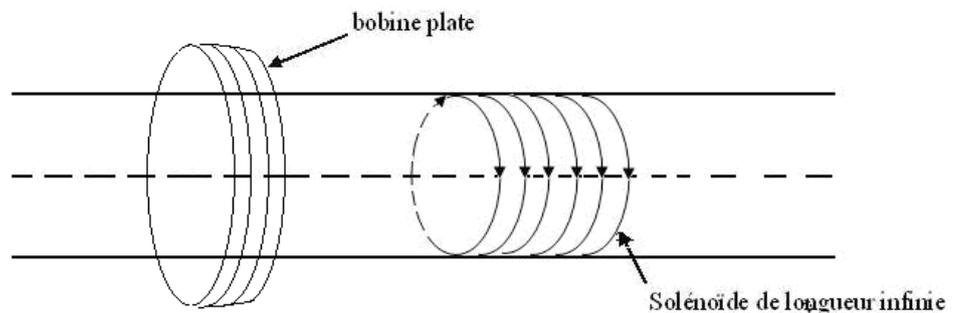


- 1) Calculer la résistance  $r$  de la bobine sachant que l'intensité du courant atteint les  $\frac{999}{1000}$  de sa valeur finale au bout de  $6,9 \cdot 10^{-4}$  s.

### Exercice 21

Un solénoïde de longueur infinie et de rayon  $R$  comporte  $n$  spires par unité de longueur. Les spires sont parcourues par un courant d'intensité  $I$ .

- 1- Donner l'induction magnétique  $\vec{B}$  à l'intérieur et à l'extérieur du solénoïde
- 2- Trouver le coefficient d'auto induction du solénoïde
- 3- On place maintenant autour du solénoïde une bobine plate composée de  $N$  spires de rayon supérieur à  $R$ . Cette bobine admet pour axe l'axe  $\Delta$  du solénoïde.



- a) Trouver le coefficient d'induction mutuelle des deux circuits
- b) Le courant est maintenant variable dans le temps. Trouver la force électromotrice induite  $\epsilon$  dans la bobine en utilisant la loi de Faraday.
- c) En un temps très court, le courant dans le solénoïde est ramené à zéro. Trouver la charge qui traverse la bobine plate de résistance  $r$ . donner le sens du courant induit.



### Exercice 22

Une bobine toroïdale de circonférence moyenne  $l = 40\text{cm}$ , comportant  $N = 400$  spires est parcourue par un courant d'intensité  $I = 2\text{A}$ . La mesure du champ  $\vec{B}$  qui règne à l'intérieur de la bobine donne  $1\text{T}$ . Déterminer :

- l'intensité magnétique
- l'aimantation
- la susceptibilité magnétique
- le courant de surface équivalent
- la perméabilité relative.

### Exercice 23

Soit un toroïde de rayon moyen  $R = 20\text{cm}$ , comportant 2000 spires et parcouru par un courant  $I = 15\text{A}$ . Il contient de l'oxygène liquide dont la susceptibilité magnétique est  $4 \times 10^{-3}$ .

Déterminer l'aimantation de cette substance et le champ magnétique.

### Exercice 24

Un courant rectiligne  $I$  circule suivant l'axe d'un cylindre de rayon  $a$ . A l'extérieur du cylindre, on a le vide. Déterminer :

- 1- l'intensité magnétique excitatrice  $\vec{H}$  dans tout l'espace
- 2- Le champ  $\vec{B}$  dans tout l'espace
- 3- Le vecteur d'aimantation  $\vec{M}$  dans tout l'espace
- 4- Le courant ampérien  $I_a$  dont la densité est définie par  $\vec{j}_a = \nabla \wedge \vec{M}$



### Exercice 25

1- Montrer que la loi de Curie  $M = \frac{1}{3} m \frac{B_{app}}{kT} M_s$  implique que la susceptibilité

d'une substance paramagnétique peut s'écrire :  $X_m = m \frac{\mu_0 M_s}{3kT}$

$m$  est le moment magnétique d'un atome de la substance paramagnétique,  $B_{app}$  le champ appliqué,  $\mu_0$  la perméabilité du vide,  $M_s$  la valeur maximale de l'aimantation.

2- Supposons que la substance magnétique ici est l'aluminium et admettons que le moment magnétique d'un atome d'aluminium est de un magnéton de Bohr :  $\mu_B = 9,27 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$ . Déterminer la susceptibilité  $X_m$  à la température absolue  $T = 300\text{K}$

On donne : la densité de l'aluminium :

$$\rho = 2,7\text{g/cm}^3$$

sa masse molaire :

$$M = 27\text{g/mol}$$

la constante de Boltzmann :  $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

### Exercice 26

- 1- Définir le champ coercitif.
- 2- On place un certain barreau aimanté à l'intérieur d'un solénoïde de 15cm de longueur et comportant 600 spires. L'intensité du courant qui doit parcourir le solénoïde pour démagnétiser ce barreau est 11A. Calculer le champ coercitif correspondant.

### Exercice 27

On place une certaine substance magnétique à l'intérieur d'un long solénoïde. Le solénoïde comporte 50 spires par cm et est parcouru par un courant d'intensité  $I = 0,2\text{A}$ . Le champ magnétique qui règne dans ce système est 1,58T. Calculer :

- 1- le champ magnétique appliqué
- 2- l'aimantation  $M$
- 3- la perméabilité relative



### Exercice 28

Le tableau ci-dessous donne les valeurs de H et de B pour une certaine substance ferromagnétique. Tracer en fonction de H le champ B, la perméabilité  $\mu$ ,  $\mu_0 H$ ,  $\mu_0 M$  et la perméabilité relative  $K_m$ .

H (Am <sup>-1</sup> )	B (T)
0	0
10	0,050
20	0,15
40	0,43
50	0,54
60	0,62
80	0,74
100	0,83
150	0,98
200	1,07
500	1,27
1000	1,34
10 000	1,65
100 000	2,02
800 000	2,92

### Exercice 29

Soit une onde électromagnétique dont le champ électrique est décrit par:

$$\vec{E}(x,t) = E_0 \sin(kx - \omega t) \vec{e}_y + E_0 \cos(kx - \omega t) \vec{e}_z$$

$\vec{e}_y$  et  $\vec{e}_z$  étant les vecteurs unitaires suivant l'axe y et l'axe z.

- Déterminer le champ  $\vec{B}$  associé à cette onde.
- Étudier les évolutions de  $\vec{E}(0,t)$  et  $\vec{B}(0,t)$  au cours du temps et donner l'état de polarisation de l'onde.
- Déterminer le vecteur de Poynting  $\vec{S}$  associé à cette onde.

$$\text{On donne } \vec{a} \wedge (\vec{b} \wedge \vec{c}) = (\vec{a} \cdot \vec{c}) \vec{b} - (\vec{a} \cdot \vec{b}) \vec{c}$$



### Exercice 30

Une onde électromagnétique traversant l'espace vide est décrite par :

$$\vec{E} = E_0 \cos(k \cdot \vec{r} - \omega t)$$

$$\vec{B} = B_0 \cos(k \cdot \vec{r} - \omega t)$$

Trouver l'intensité de cette onde.

### Exercice 31

Une source de lumière monochromatique, de puissance 30W, rayonne uniformément dans toutes les directions.

- 1- Calculer l'intensité et la pression de radiation de l'onde lumineuse en un point M situé à 2m de la source.
- 2- Déterminer les amplitudes du champ électrique et du champ magnétique associés à cette onde au point M.

### Réponses clés

#### Solution de l'exercice 1

1) Pour une résistance pure, quelle que soit la fréquence, on a :

$$\left. \begin{array}{l} U_{\text{eff}} = RI_{\text{eff}} \\ \\ U_{\text{eff}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \end{array} \right\} I_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{eff}}}{R} = \frac{U_m}{R\sqrt{2}}$$

A.N.  $U_m = 21,21\text{V}; R = 40\Omega$

$$U_{\text{eff}} = \frac{21,21}{\sqrt{2}} = 15\text{V} \Rightarrow I_{\text{eff}} = \frac{15}{40} = \underline{\underline{0,375\text{A}}}$$



2) On remplace la résistance pure par un condensateur de capacité  $C = 0,3\mu\text{F}$

On a :

$$U_{\text{eff}} = X_C I_{\text{eff}}, \text{ d'où } I_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{eff}}}{X_C}$$

avec :  $X_C = \frac{1}{C\omega}$  et  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  étant la fréquence de la source

a) pour  $f = 100\text{Hz}$

$$X_C = \frac{1}{(0,3 \cdot 10^{-6} \text{ F})(200\pi \text{ rad.s}^{-1})} = 5308\Omega$$

$$\text{D'où } I_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{eff}}}{X_C} = \frac{15\text{V}}{5308\Omega} = 2,83 \times 10^{-3} \text{ A} \Rightarrow \underline{I_{\text{eff}} = 2,83 \text{ mA}}$$

b) pour  $f = 100\text{kHz}$

$$I_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{eff}}}{X_C} = U_{\text{eff}} (C\omega) = U_{\text{eff}} (2\pi f C)$$

Lorsque la fréquence est 1000 fois plus grande, l'intensité efficace est multipliée par 1000. on aura donc :

$$\underline{I_{\text{eff}} = 2,83 \text{ A}}$$

On remplace la résistance pure par une bobine d'inductance  $L = 2\text{mH}$

Dans ce cas  $I_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{eff}}}{X_L}$  avec  $X_L = L\omega$

a) pour  $f = 100\text{Hz}$

$$L\omega = (2 \times 10^{-3} \text{ H})(200\pi \text{ rad.s}^{-1}) = 1,256\Omega$$

$$I_{\text{eff}} = \frac{15\text{V}}{1,256\Omega} = 11,9 \text{ A} \Rightarrow \underline{I_{\text{eff}} = 11,9 \text{ A}}$$



b) pour  $f = 100\text{kHz}$

$$I_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{eff}}}{L\omega} = \frac{U_{\text{eff}}}{L(2\pi f)}$$

Lorsque la fréquence est 1000 fois plus grande, l'intensité efficace est divisée par 1000, d'où :

$$\underline{I_{\text{eff}} = 11,9\text{mA}}$$

## Solution de l'exercice 2

1- L'angle de déphasage  $\Phi$  entre la tension appliquée et le courant est tel que :

$$\tan\Phi = \frac{X_L}{R}$$

$$X_L = L\omega \text{ avec } \omega = 100\pi \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1} \text{ et } L = 0,1 \text{ H} \Rightarrow L\omega = 31,4\Omega$$

On obtient :

$$\tan\Phi = \frac{31,4\Omega}{10\Omega} = 3,14 \Rightarrow \Phi = 72,3^\circ \text{ ou } \Phi = 1,26 \text{ rad}$$

Le courant est en retard de  $72,3^\circ$  par rapport à la tension

3- Expression du courant instantané

$I = I_m \cos(100\pi t - \Phi)$  avec  $\Phi$  ici exprimé en radian et  $I_m$  l'amplitude de courant.

On a :

$$I_m = I_{\text{eff}}\sqrt{2} \text{ et } I_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{eff}}}{Z}$$

$$U_{\text{eff}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \text{ avec } U_m = 10\sqrt{2} \text{ d'où } U_{\text{eff}} = 10\text{V}$$



$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + L^2\omega^2} = \sqrt{100 + (31,4)^2} = 32,95\Omega$$

L'intensité efficace est donc:

$$I_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{eff}}}{Z} = \frac{10V}{32,95\Omega} = 0,303A$$

On obtient finalement

$$I = I_m \cos(100\pi t - \Phi) = I_{\text{eff}}\sqrt{2} \cos(100\pi t - \Phi) = 0,303\sqrt{2} \cos(100\pi t - 1,26)$$

### Solution de l'exercice 3

L'impédance de ce circuit est :

$$Z = \sqrt{R^2 + L^2\omega^2} \Rightarrow L^2 = \frac{Z^2 - R^2}{\omega^2} \Rightarrow L = \sqrt{\frac{Z^2 - R^2}{\omega^2}} \quad (1)$$

$$R = 5\Omega ; \omega = 2\pi f = 2\pi \times 50\text{Hz} = 100\pi \text{ rad.s}^{-1}$$

On a aussi :

$$\cos \Phi = \frac{R}{Z} = 0,8 \Rightarrow Z = \frac{R}{\cos \Phi} \Rightarrow \frac{5\Omega}{0,8} = 6,25 \Omega$$

Portons les valeurs de  $Z$ ,  $R$  et  $\omega$  dans (1). On obtient :

$$L = \sqrt{\frac{(6,25)^2 - (5)^2}{(100\pi)^2}} \Rightarrow L = \underline{\underline{1,19 \cdot 10^{-2} \text{H}}}$$



## Solution de l'exercice 4

### 1) Inductance de la bobine

En courant alternatif l'impédance est :

$$Z = \sqrt{R^2 + L^2\omega^2} \Rightarrow L^2 = \frac{Z^2 - R^2}{\omega^2} \Rightarrow L = \sqrt{\frac{Z^2 - R^2}{\omega^2}}$$

Ici  $\omega = 2\pi f = 2\pi \times 50\text{Hz} = 100\pi \text{ rad.s}^{-1}$

$$Z = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} = \frac{100\text{V}}{0,5\text{A}} = 200 \Omega$$

Déterminons la résistance de la bobine. Quand elle est alimentée sous la tension continue de 120V, elle est parcourue par un courant  $I = 2\text{A}$ . Sa résistance est donc :

$$R = \frac{120\text{V}}{2\text{A}} = 60 \Omega$$

L'inductance est alors :

$$L = \sqrt{\frac{(200)^2 - (60)^2}{(100\pi)^2}} \Rightarrow L = \underline{\underline{0,61\text{H}}}$$

### 2) Déphasage $\Phi$ de la tension sur le courant

$$\tan\Phi = \frac{X_L}{R} = \frac{L\omega}{R} = \frac{(0,61)(100\pi)}{60} = 3,192 \Rightarrow \Phi = \underline{\underline{72,6^\circ = 1,26 \text{ rad}}}$$

La tension est en avance de  $72,6^\circ$  sur le courant

### Tension instantanée

Soit  $U = U_m \sin\omega t$  la tension instantanée aux bornes de la bobine :

$$U_m = 100\sqrt{2} \text{ et } \omega = 2\pi f = 2\pi \times 50\text{Hz} = 100\pi \text{ rad.s}^{-1}, \text{ d'où:}$$

$$U = 100\sqrt{2} \sin(100\pi t)$$

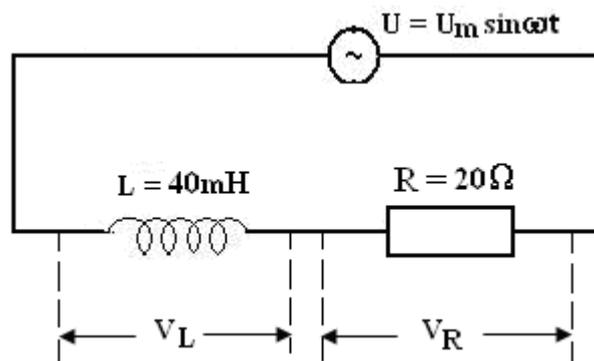


### Courant instantané

$I = I_m \sin(100\pi t - \Phi)$  avec  $\Phi$  exprimé en radian

$$\left. \begin{array}{l} I_m = I_{\text{eff}} \sqrt{2} \\ I_{\text{eff}} = 0,5\text{A} \\ \Phi = 1,26 \text{ rad} \end{array} \right\} \Rightarrow I = 0,5\sqrt{2} \sin(100\pi t - 1,26)$$

### Solution de l'exercice 5



- 1) Cherchons d'abord le déphasage  $\Phi$  entre tension et courant. Pour ce faire, calculons la réactance inductive  $X_L$  et traçons la représentation de Fresnel qui correspond au circuit. Nous avons :

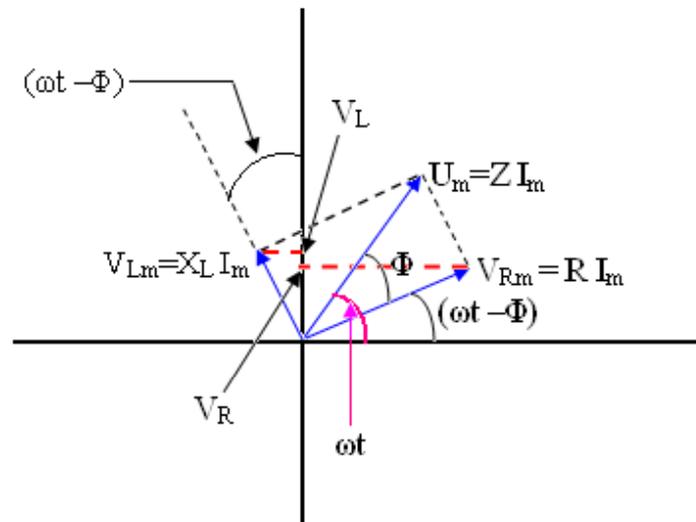
$$\omega = 2\pi f = 120\pi \text{ rad/s}$$

$$X_L = L\omega = L \times (2\pi f) = (40 \times 10^{-3}) 2\pi \times 60 = 15,07\Omega$$

$$\tan \Phi = \frac{V_{Lm}}{V_{Rm}} = \frac{X_L}{R} = \frac{15,07}{20} = 0,754$$

$$\Rightarrow \Phi = 37^{\circ}$$

L'angle de déphasage est positif  $\Rightarrow$  la source de tension est en avance de  $37^{\circ}$  sur le courant.



• **Courant instantané** à  $t = \frac{T}{6}$

Le courant instantané s'écrit alors :

$$I = I_m \sin(\omega t - \Phi) = I_m \sin(2\pi f t - \Phi) \quad (1) \quad \text{avec } \Phi \text{ en radian .}$$

Ici

$$\left. \begin{aligned} Z I_m &= U_m \Rightarrow I_m = \frac{U_m}{Z} \\ Z &= \sqrt{R^2 + X_L^2} \, \Omega \end{aligned} \right\} \Rightarrow I_m = \frac{150 \text{ V}}{\sqrt{(20)^2 + (15,07)^2}} = 6 \text{ A}$$

$$U_m = 150 \text{ V}$$

L'équation (1) devient :

$$I = 6 \sin(2\pi f t - \Phi)$$

$$\text{A l' instant } t = \frac{T}{6}$$

$$I = 6 \sin\left(\frac{2\pi T}{T} \frac{T}{6} - \Phi\right)$$



$$I = 6 \sin\left(\frac{\partial}{3} - \ddot{\text{O}}\right) \Rightarrow 6 \sin(60^\circ - 37^\circ) = 6 \sin 23^\circ$$

$$I = \underline{2,34 \text{ A}}$$

- **Valeur de la source de tension sinusoïdale à l'instant  $t = \frac{T}{6}$**

$$U = U_m \sin \omega t \Rightarrow U = 150 \sin \frac{2\pi T}{T 6} = 150 \sin \frac{\pi}{3} = 150 \sin 60^\circ$$

$$U = \underline{130 \text{ V}}$$

- **Tension instantanée aux bornes de la résistance**

La projection de  $V_{Rm}$  sur l'axe vertical donne la tension instantanée  $V_R$  aux bornes de la résistance

$$V_R = V_{Rm} \sin(\omega t - \Phi)$$

$$\text{et } V_{Rm} = RI_m = 20 \times 6 = 120 \text{ V.}$$

Remarque : On peut aussi utiliser tout simplement le fait que  $V_R$  et  $I$  sont en phase

$$\text{On a } V_R = 120 \sin(2\pi ft - \Phi)$$

$$\text{et à l'instant } t = \frac{T}{6} \Rightarrow V_R = 120 \sin 23^\circ = \underline{46,88 \text{ V}}$$

- **Tension instantanée aux bornes de la bobine**

$V_L$  est la projection de  $V_{Lm}$  sur l'axe vertical

$$V_L = V_{Lm} \cos(\omega t - \Phi)$$

Remarque : On peut aussi utiliser directement le fait que  $V_L$  est en avance de  $90^\circ$  sur le courant.

$$\Rightarrow V_L = X_L I_m \cos(2\pi ft - \Phi)$$

$$\text{à } t = \frac{T}{6} \text{ on a :}$$



$$V_L = 15,07 \times 6 \cos 23^\circ = (15,07) (6) (0,920)$$

$$\underline{V_L = 83,23 \text{ V}}$$

2) Comparons  $V_R + V_L$  et  $U$  à l'instant  $t = \frac{T}{6}$

$$V_R + V_L = 46,88 \text{ V} + 83,23 \text{ V} = 130,11 \text{ V}$$

$$U = 130 \text{ V}$$

$$\left. \begin{array}{l} V_R + V_L = 46,88 \text{ V} + 83,23 \text{ V} = 130,11 \text{ V} \\ U = 130 \text{ V} \end{array} \right\} \Rightarrow \underline{U = V_R + V_L}$$

Les tensions instantanées s'ajoutent algébriquement.

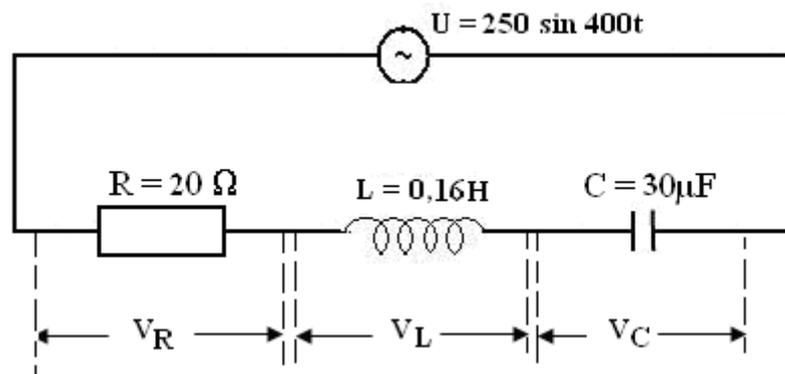
3) Calculons l'amplitude de  $U$

Le diagramme de Fresnel montre qu'en appliquant le théorème de Pythagore, on a :

$$U_m^2 = V_{Rm}^2 + V_{Lm}^2 \Rightarrow U_m = \sqrt{(RI_m)^2 + (X_L I_m)^2}$$

$$U_m = I_m Z = 6 \sqrt{(20)^2 + (15,07)^2} \approx \underline{150 \text{ V}}$$

**Solution de l'exercice 6**





- 1) Déterminons d'abord le déphasage entre la tension appliquée et le courant qui parcourt le circuit. On a :

$$\left. \begin{array}{l} \tan\Phi = \frac{X_L - X_C}{R} \\ X_L = L\omega \\ X_C = \frac{1}{C\omega} \\ \omega = 400 \text{ rads}^{-1} \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} X_L = 0,16 \times 400 = 64 \, \Omega ; \\ X_C = \frac{1}{(30 \times 10^{-6}) \times 400} = 83,33 \, \Omega ; \\ \tan\Phi = \frac{64 - 83,333}{20} = -0,96665 \end{array}$$

L'angle de déphasage est négatif donc la tension est en retard de  $\Phi$  sur le courant.

- **Courant instantané** : Le courant s'écrit donc :

$$I = I_m \sin(400t + \theta) \text{ avec } \theta = -\Phi. \theta \text{ est ici exprimé en radian :}$$

$$\tan \Phi = -0,96665 \Rightarrow \Phi = -0,7685 \text{ rad d'où } I = I_m \sin(400t + 0,7685)$$

Calculons maintenant  $I_m$  :

$$\begin{array}{l} U_m = ZI_m \Rightarrow I_m = \frac{U_m}{Z} \\ U_m = 250 \text{ V} \end{array}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(20)^2 + (64 - 83,333)^2} = 27,82 \, \Omega$$

$$I_m = 8,99 \text{ A}$$

On obtient finalement

$$\Rightarrow I = 8,99 \sin(400t + 0,7685)$$

- **Tension instantanée  $V_R$**

$V_R$  et  $I$  sont en phase d'où l'on a :

$$V_R = V_{Rm} \sin(400t + 0,7685) \text{ avec } V_{Rm} = RI_m = 20 \times 8,987 = 179,8 \, \Omega$$

$$\Rightarrow V_R = 179,8 \sin(400t + 0,7685)$$

- **Tension instantanée  $V_L$**

$V_L$  est en avance de  $90^\circ$  sur  $I$



$$\text{D'où } V_L = V_{Lm} \sin(400t + 0,7685 + \frac{\pi}{2}) = V_{Lm} \cos(400t + 0,7685)$$

$$\text{Avec } V_{Lm} = X_L I_m = 64 \times 8,978 = 575,17\Omega$$

$$\Rightarrow V_L = 575,17 \cos(400t + 0,7685)$$

• **Tension instantanée  $V_C$**

$V_C$  est en retard de  $90^\circ$  sur I

$$\text{D'où } V_C = V_{Cm} \sin(400t + 0,7685 - \frac{\pi}{2}) = -V_{Cm} \cos(400t + 0,7685)$$

$$\text{Avec } V_{Cm} = X_C I_m = 83,333 \times 8,987 = 748,91\Omega$$

$$\Rightarrow V_C = -748,91 \cos(400t + 0,7685)$$

2) Calcul de  $V_R + V_L + V_C$

Posons  $V = V_R + V_L + V_C$

$$V = 179,8 \sin(400t + 0,7685) + (575,17 - 748,91) \cos(400t + 0,7685)$$

Appliquons la relation trigonométrique

$$A \sin \alpha + B \cos \alpha = (A^2 + B^2)^{1/2} \sin(\alpha + \beta) \text{ avec } \tan \beta = \frac{B}{A}$$

On obtient :

$$V = [(179,8)^2 + (-173,74)^2]^{1/2} \sin(400t + 0,7685 + \beta)$$

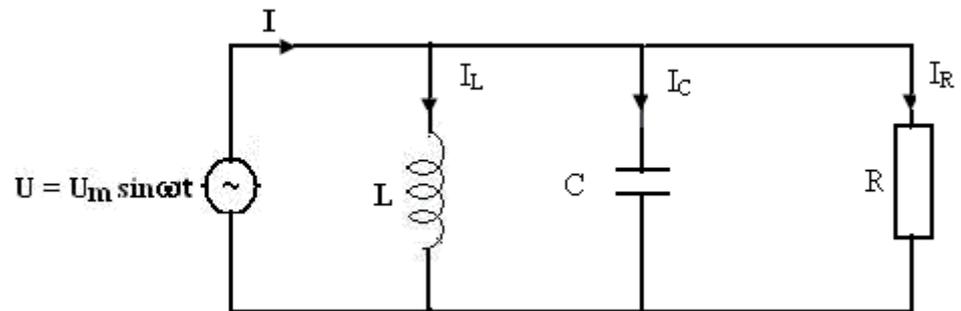
$$\tan \beta = \frac{(-173,74)}{179,8} = -0,9665 \Rightarrow \beta = -0,7685$$

$$V = 250 \sin(400t + 0,7685 + \beta) = 250 \sin(400t)$$

On constate que  $V = V_R + V_L + V_C = U$



### Solution de l'exercice 7



#### 1) Courants instantanés $I_L$ , $I_C$ , $I_R$ et $I$

Les tensions instantanées  $V_L$ ,  $V_C$  et  $V_R$  aux bornes de la bobine, du condensateur et de la résistance sont égales.

$$V_L = \frac{L dI_L}{dt} = U; \quad V_C = \frac{q}{C} = U; \quad V_R = RI_R = U$$

#### Expression de $I_L$

$$\frac{L dI_L}{dt} = U \Rightarrow dI_L = \frac{1}{L} U dt \Rightarrow I_L = \frac{1}{L} \int U_m \sin \omega t dt$$

$$D'où \quad I_L = -\frac{U_m}{L\omega} \cos \omega t = -\frac{U_m}{X_L} \cos \omega t = \frac{U_m}{X_L} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = I_{Lm} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

#### Expression $I_C$

$$\frac{q}{C} = U \Rightarrow \frac{1}{C} \frac{dq}{dt} = \frac{dU}{dt} \Rightarrow \frac{I_C}{C} = \frac{dU}{dt} \Rightarrow C\omega U_m \cos \omega t$$

$$\text{On a alors : } I_C = \frac{U_m}{X_C} \cos \omega t = \frac{U_m}{X_C} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = I_{Cm} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

#### Expression de $I_R$

$$RI_R = U \Rightarrow I_R = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_{Rm} \sin \omega t$$



### Expression de I

Le courant principal I est :

$$I = I_R + I_L + I_C$$

$$\Rightarrow I = \frac{U_m}{R} \sin \omega t - \frac{U_m}{X_L} \cos \omega t + \frac{U_m}{X_C} \cos \omega t$$

$$\Rightarrow I = U_m \left[ \frac{1}{R} \sin \omega t + \left( \frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L} \right) \cos \omega t \right]$$

En utilisant la relation trigonométrique :

$$A \sin \alpha + B \cos \alpha = (A^2 + B^2)^{1/2} \sin(\alpha + \beta) \text{ avec } \tan \beta = \frac{B}{A}$$

On peut mettre I sous forme  $I = I_m \sin(\omega t + \Phi)$

$$\text{Ici } \alpha = \omega t$$

$$\beta = \Phi$$

$$A = \frac{1}{R}$$

$$B = \left( \frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L} \right)$$

$$\tan \beta = \tan \Phi = \left( \frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L} \right) / \frac{1}{R}$$

$\Phi$  est l'angle de déphasage entre la tension appliquée et le courant principal

$$I_m = U_m \left[ \left( \frac{1}{R} \right)^2 + \left( \frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L} \right)^2 \right]^{1/2}$$

### 2) Impédance du circuit

$$Z = \frac{U_m}{I_m}$$



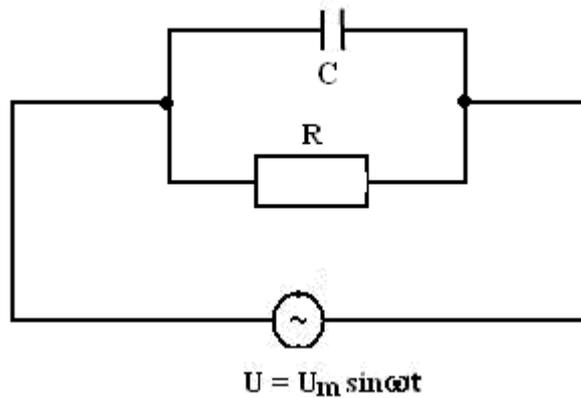
$$\Rightarrow Z = \left[ \left( \frac{1}{R} \right)^2 + \left( \frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L} \right)^2 \right]^{-1/2}$$

### 3) Angle de déphasage

On obtient cet angle à partir de :

$$\tan \Phi = \left( \frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L} \right) / \frac{1}{R} = R \left( \frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L} \right)$$

### Solution de l'exercice 8



L'impédance complexe de ce circuit est  $\bar{Z}$  tel que :

$$\frac{1}{\bar{Z}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{\left( \frac{1}{j\omega C} \right)} = \frac{1}{R} + j\omega C$$

$$\text{D'où } \bar{Z} = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C} = \frac{\frac{1}{R} - j\omega C}{\left( \frac{1}{R} + j\omega C \right) \left( \frac{1}{R} - j\omega C \right)}$$



$$\bar{Z} = \frac{\frac{1}{R} - j\omega C}{\frac{1}{R^2} + \omega^2 C^2}$$

$$\bar{Z} = \frac{R - j\omega C R^2}{1 + \omega^2 C^2 R^2} = X + jY$$

l'impédance de ce circuit est  $Z = \sqrt{X^2 + Y^2}$

$$Z = \frac{R}{\sqrt{1 + \omega^2 C^2 R^2}}$$

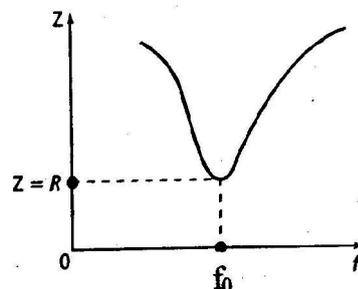
l'argument  $\varphi$  de  $\bar{Z}$  est tel que  $\tan \varphi = \frac{Y}{X} = -\omega C R$

l'angle  $\varphi$  est négatif et on en déduit que la tension est en retard de  $\varphi$  sur le courant.

### Solution de l'exercice 9

#### 1- Luminosité de la lampe

Quand on fait augmenter la fréquence de la source, l'impédance  $Z$  du circuit diminue, passe par un minimum puis croît de nouveau. Le minimum de  $Z$  correspond à l'état de résonance



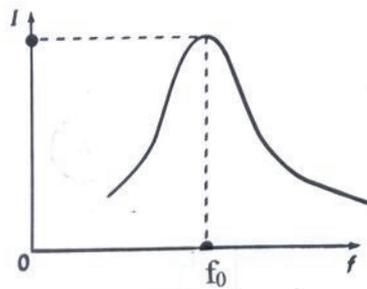
$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

A la résonance  $X_L = X_C$  et  $f = f_0 \Rightarrow Z = R$



L'intensité efficace ( $I_{\text{eff}}$ ) qui parcourt le circuit est  $I_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{eff}}}{Z}$

$I_{\text{eff}}$  est inversement proportionnelle à  $Z$  pour  $U_{\text{eff}}$  constante. Quand  $Z$  diminue  $I_{\text{eff}}$  augmente et vice-versa. Donc quand  $f$  augmente,  $I_{\text{eff}}$  augmente, passe par un maximum lorsque  $Z = R$  i.e lorsque  $f = f_0$  puis diminue



La luminosité de la lampe varie suivant la variation de  $I_{\text{eff}}$  : la lampe brille d'un éclat de plus en plus vif lorsqu'on augmente la fréquence  $f$ . L'éclat le plus vif est obtenu pour

$f = f_0$ , ensuite la lampe brille de moins en moins quand  $f$  continue de croître.

## 2- Fréquence de résonance

A la résonance  $X_L = X_C \Rightarrow L\omega_0 = \frac{1}{C\omega_0} \Rightarrow L(2\pi f_0) = \frac{1}{C(2\pi f_0)}$

$$\text{D'où } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0,4(0,4 \cdot 10^{-6})}}$$

$$f_0 = \frac{10^3}{2\pi(0,4)} \approx 400 \text{ Hz}$$

## Intensité maximale du courant

$$I_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{eff}}}{Z(f)} \cdot I_{\text{eff}} \text{ est maximale quand } Z(f) = Z(f_0) = R$$



$$(I_{\text{eff}})_m = \frac{U_{\text{eff}}}{R} = \frac{10^{-2}\text{V}}{10\Omega}$$

$$(I_{\text{eff}})_m = 10^{-3}\text{A} = 1\text{mA}$$

### Tension aux bornes du condensateur à la résonance

Soit  $U_C$  cette tension :  $U_C = X_C I_{\text{eff}}$

$$\text{A la résonance } X_C = \frac{1}{C\omega_0} = \frac{1}{C(2\pi f_0)} = \frac{1}{(0,4)10^{-6}2\pi(400)} = 1000\Omega$$

$$\left. \begin{array}{l} \Rightarrow X_C = 1000\Omega \\ (I_{\text{eff}})_m = 10^{-3}\text{A} \end{array} \right\} \Rightarrow U_C = X_C (I_{\text{eff}})_m = 1000\Omega \times 10^{-3}\text{A} = 1\text{V}$$

### 3- Intensité efficace pour différentes valeurs de la résistance

Pour  $R_1 = \frac{R}{2}$ , le courant maximum devient:

$$(I_{\text{eff}})_m = \frac{U_{\text{eff}}}{R_1} = \frac{U_{\text{eff}}}{\frac{R}{2}} = \frac{2U_{\text{eff}}}{R} = 2\text{mA}$$

Pour  $R_2 = \frac{R}{4}$ , le courant maximum devient:

$$(I_{\text{eff}})_m = \frac{U_{\text{eff}}}{R_2} = \frac{U_{\text{eff}}}{\frac{R}{4}} = \frac{4U_{\text{eff}}}{R} = 4\text{mA}$$

Quand la résistance diminue, la résonance est plus aigue.



### Solution de l'exercice 10

Le déphasage  $\Phi$  entre tension et courant est tel que :

$$\tan \Phi = \frac{X_L - X_C}{R}$$

$$\cos \Phi = \frac{R}{Z}$$

Si  $\tan \Phi > 0$  i.e  $X_L > X_C$  alors la tension est en avance de phase  $\Phi$  par rapport au courant.

Si  $\tan \Phi < 0$  i.e  $X_L < X_C$  alors la tension est en retard de phase  $\Phi$  par rapport au courant.

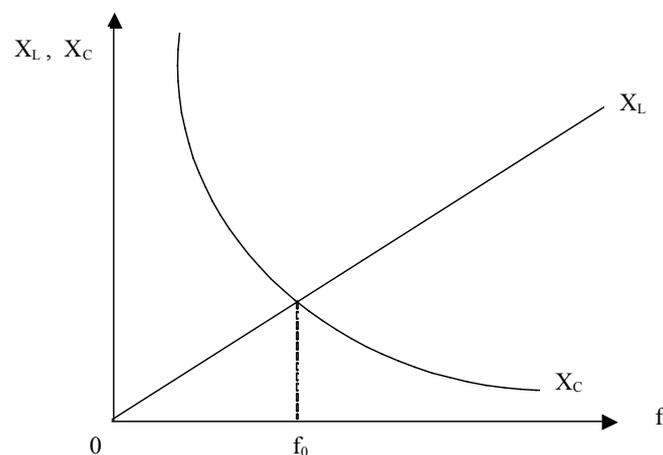
La tension et le courant sont en phase si  $\tan \Phi = 0$  et  $\cos \Phi = 1$ . Cette situation apparaît quand :

$$\left. \begin{array}{l} X_L = X_C \\ Z = R \end{array} \right\} \text{ Ceci correspond à la condition de résonance}$$

Cherchons le signe de  $(X_L - X_C)$ . Pour cela, traçons les allures de  $X_L$  et  $X_C$  en fonction de  $f$ .

$$X_L = L\omega = L2\pi f$$

$$X_C = \frac{1}{C\omega} = \frac{1}{C(2\pi)f}$$





$X_L$  est supérieur à  $X_C$  si la fréquence  $f$  de la source de tension alternative est supérieure à la fréquence de résonance  $f_0$ .  $X_L$  est inférieur à  $X_C$  dans le cas contraire. Comparons donc  $f$  avec  $f_0 = 718\text{Hz}$  :

$$U = U_m \sin(1000\pi t) = U_m \sin \omega t = U_m \sin 2\pi f t \Rightarrow 2\pi f = 1000\pi \Rightarrow f = 500\text{Hz}$$

On voit que  $f < f_0 \Rightarrow X_L < X_C$  :

$\tan \Phi = \frac{X_L - X_C}{R} < 0 \Rightarrow$  la tension est retard de  $\Phi$  par rapport au courant  
le circuit a un comportement capacitif

### Solution de l'exercice 11

- Fréquence de résonance

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(1)(5 \cdot 10^{-6})}}$$

$$f_0 = 71,2\text{Hz}$$

- Intensité efficace à la résonance

A la résonance, l'impédance  $Z$  du circuit est égale à la résistance  $R$  :  $Z(f_0) = R$

Soit  $I_{\text{eff}}(f_0)$  l'intensité efficace à la résonance :

$$I_{\text{eff}}(f_0) = \frac{U_{\text{eff}}}{Z(f_0)} \Rightarrow I_{\text{eff}}(f_0) = \frac{U_{\text{eff}}}{R} = \frac{10\text{V}}{10\Omega}$$

$$I_{\text{eff}}(f_0) = 1\text{A}$$

- Facteur de qualité

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{L\omega_0}{R} \text{ avec } \omega_0 = (2\pi) f_0 = 2\pi (71,2) = 447,14 \text{ rad.s}^{-1}$$



On obtient donc :

$$Q = \frac{L\omega_0}{R} = \frac{(1\text{H})(447,14\text{rad.s}^{-1})}{10\Omega} = 44,7$$

• Bande passante

$$\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q} = \frac{447,14\text{rad.s}^{-1}}{44,7} = 10\text{rad.s}^{-1}$$

• Tension efficace aux bornes du condensateur à la résonance

Soit  $(U_C)_{\text{eff}}$  cette tension :

$(U_C)_{\text{eff}} = X_C(\omega_0)I_{\text{eff}}(f_0)$ ,  $X_C(\omega_0)$  étant la réactance capacitive à la résonance.

$$X_C(\omega_0) = \frac{1}{C\omega_0}$$

$$\text{D'où } (U_C)_{\text{eff}} = \frac{1}{C\omega_0} I_{\text{eff}}(f_0) = \frac{1\text{A}}{(5 \cdot 10^{-6})(2\pi)(71,2)}$$

$$(U_C)_{\text{eff}} = 447,3\text{V}$$

Cette tension est très supérieure à la tension efficace de la source qui est de 10V

### Solution de l'exercice 12

• Résistance R

L'intensité efficace est maximale à la résonance et est égale à  $(I_{\text{eff}})_m = 150\text{mA}$ .

La fréquence de résonance est donc  $f_0 = 800\text{Hz}$ .

On a :  $(I_{\text{eff}})_m = \frac{U_{\text{eff}}}{Z(f_0)}$  avec  $Z(f_0) = R$  l'impédance du circuit à la résonance.



$$\text{On obtient donc : } (I_{\text{eff}})_m = \frac{U_{\text{eff}}}{Z(f_0)} = \frac{U_{\text{eff}}}{R} \Rightarrow R = \frac{U_{\text{eff}}}{(I_{\text{eff}})_m} = \frac{24V}{150 \cdot 10^{-3} \text{ A}}$$

$$R = 160 \Omega$$

- Inductance L

$$\text{La bande passante est : } \Delta\omega = \frac{R}{L} \Rightarrow L = \frac{R}{\Delta\omega} = \frac{160 \Omega}{167,5 \text{ rad.s}^{-1}}$$

$$L = 0,995 \text{ H}$$

- Capacité C

Le facteur de qualité de ce circuit est :

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{1}{CR\omega_0} \Rightarrow C = \frac{1}{QR\omega_0}$$

$$\text{mais } \omega_0 = (2\pi) f_0 = 2\pi(800 \text{ Hz}) = 1600\pi \text{ rad.s}^{-1}$$

$$\Delta\omega = 167,5 \text{ rad.s}^{-1}$$

$$\text{On a donc } Q = \frac{1600\pi \cdot \text{rad.s}^{-1}}{167,5 \cdot \text{rad.s}^{-1}} = 30$$

On obtient alors :

$$C = \frac{1}{QR\omega_0} = \frac{1}{(30)(160 \Omega)(1600\pi \cdot \text{rad.s}^{-1})}$$

$$C = (4,14) \cdot 10^{-8} \text{ F}$$



### Solution de l'exercice 13

1- Représentation de Fresnel.

Calculons et comparons les réactances inductive et capacitive  $X_L$  et  $X_C$  :

$$X_L = L\omega = L(2\pi f)$$

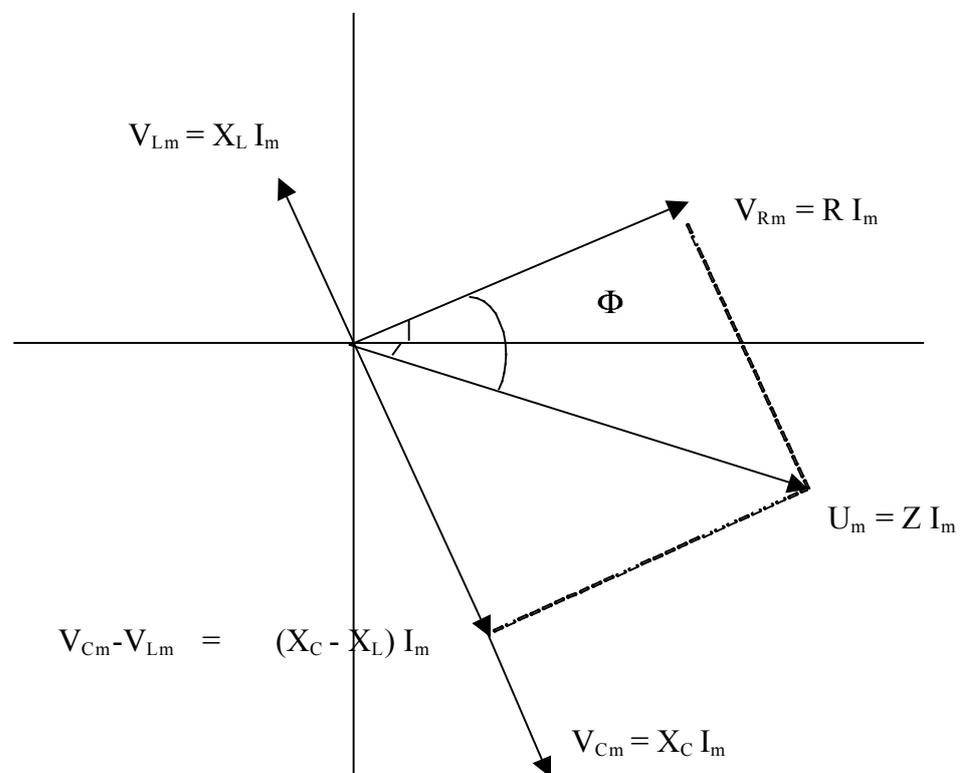
$$X_C = \frac{1}{C\omega} = \frac{1}{C(2\pi)f}$$

avec  $\omega = 2\pi f$ ,  $f = 400\text{Hz}$ ,  $L = 4 \cdot 10^{-3}\text{H}$  et  $C = 1,6 \cdot 10^{-5}\text{F}$

Après application numérique, on obtient :

$$\left. \begin{array}{l} X_L = 10 \Omega \\ X_C = 25 \Omega \end{array} \right\} \Rightarrow X_C > X_L$$

La représentation de Fresnel qui correspond au circuit a donc pour allure :





La tension est en retard de  $\Phi$  sur le courant :

2- Angle de déphasage  $\Phi$

$$\tan \Phi = \frac{V_{Lm} - V_{Cm}}{R} = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{10 - 25}{20} = -0,75 \Rightarrow \Phi = -37^\circ$$

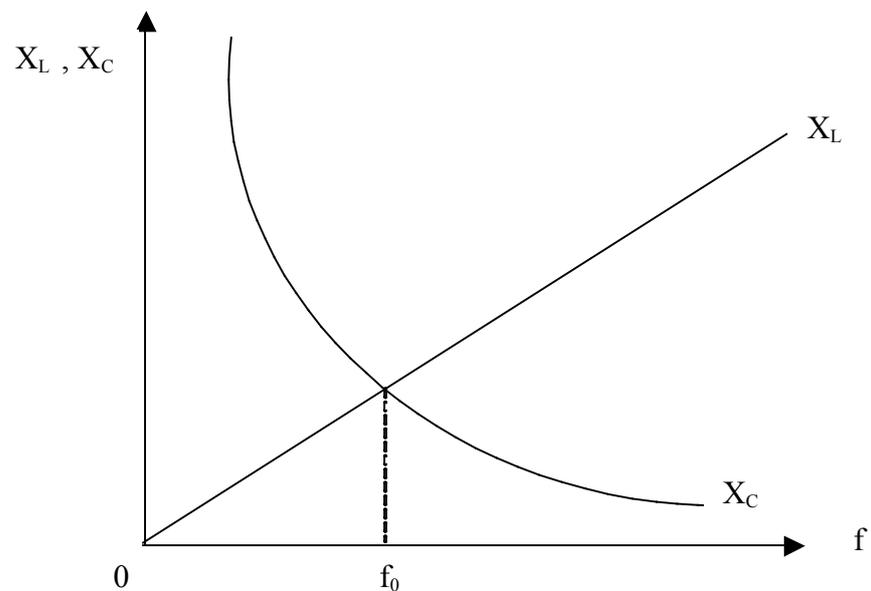
L'angle de déphasage est négatif  $\Rightarrow$  la tension est en retard sur le courant.

3- Fréquence de résonance

Traçons  $X_L$  et  $X_C$  en fonction de la fréquence  $f$

$$X_L = L(2\pi f)$$

$$X_C = \frac{1}{C(2\pi)f}$$





A la résonance  $f_0$  on doit avoir  $X_L = X_C$ ; à la fréquence  $f = 400\text{Hz}$  nous avons vu que  $X_L < X_C$  : ( $X_L = 10\Omega$  et  $X_C = 25\Omega$ )

On déduit du graphique ci-dessus que  $f < f_0$  : la fréquence de résonance  $f_0$  est supérieure à  $400\text{Hz}$ .

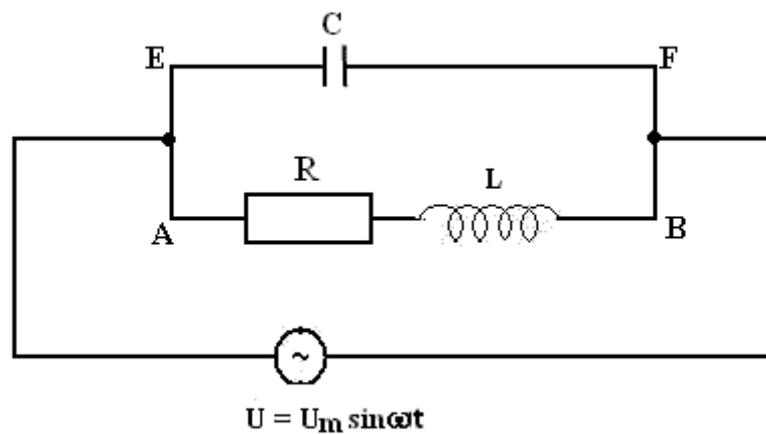
4. Valeur de la fréquence de résonance.

$$X_L = X_C \Rightarrow L(2\pi f_0) = \frac{1}{C(2\pi) f_0}$$

$$\text{D'où } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$f_0 = \frac{1}{6,28\sqrt{4 \cdot 10^{-3}(16 \cdot 10^{-6})}} = 629\text{Hz.}$$

#### Solution de l'exercice 14



1) Impédance complexe du circuit.

Soit  $\overline{Z}_1$  et  $\overline{Z}_2$  respectivement les impédances complexes des branches AB et EF.



$$\text{On a : } \overline{Z}_1 = R + jL\omega \text{ et } \overline{Z}_2 = \frac{1}{jC\omega}$$

Nous avons ici un montage en parallèle, d'où :

$$\frac{1}{\overline{Z}} = \frac{1}{\overline{Z}_1} + \frac{1}{\overline{Z}_2}, \overline{Z} \text{ étant l'impédance complexe du circuit.}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\overline{Z}} = \frac{1}{R + jL\omega} + jC\omega = \frac{1 + (jC\omega)(R + jL\omega)}{R + jL\omega}$$

$$\Rightarrow \overline{Z} = \frac{R + jL\omega}{1 + (jC\omega)(R + jL\omega)} = \frac{R + jL\omega}{(1 - LC\omega^2) + jRC\omega}$$

$$\Rightarrow \overline{Z} = \frac{(R + jL\omega) \left\{ (1 - LC\omega^2) - jRC\omega \right\}}{(1 - LC\omega^2)^2 + R^2C^2\omega^2}$$

$$\Rightarrow \overline{Z} = \frac{R + j\omega \left\{ L(1 - LC\omega^2) - R^2C \right\}}{(1 - LC\omega^2)^2 + R^2C^2\omega^2}$$

- 2) La résonance parallèle est obtenue quand la partie imaginaire de  $\overline{Z}$  s'annule, c'est-à-dire quand  $L(1 - LC\omega^2) - R^2C = 0$

Dans le cas où  $\omega^2L^2 \gg R^2$ , cette condition est réalisée pour une valeur  $\omega_0$  de  $\omega$  telle

que  $L(1 - LC\omega_0^2) = 0 \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  (valeur de  $\omega$  à la résonance). L'impédance devient :

$$\overline{Z} = \frac{R}{\omega_0^2 R^2 C^2} = \frac{1}{\omega_0^2 RC^2} = \frac{LC}{RC^2} = \frac{L}{RC}$$

A la résonance l'impédance du circuit est le module  $\overline{Z}$  qui n'est autre que  $\frac{L}{RC}$

$$Z_{\text{résonance}} = \frac{L}{RC}$$



### Solution de l'exercice 15

En présence de  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$ , l'électron subit une force :

$$\vec{F}_e + \vec{F}_m = -e\vec{E} - e\vec{v} \wedge \vec{B} = 0 \Rightarrow \vec{E} = \vec{v} \wedge \vec{B} \Rightarrow E = vB$$

La force qui s'exerce sur l'électron quand le champ  $\vec{E}$  est enlevé est :

$$m \frac{v^2}{R} = e v B$$

$v$  étant La vitesse de l'électron  $R$  le rayon de sa trajectoire. Ainsi, on obtient :

$$R = \frac{mv}{eB}$$

En remplaçant  $v$  par  $\frac{E}{B}$ , le rayon devient :

$$R = \frac{m E}{eB B} = \frac{mE}{eB^2}$$

Il s'ensuit que :

$$\frac{e}{m} = \frac{E}{RB^2}$$

A.N. :  $E = 8 \text{ kV/m}$  ;  $R = 1,14 \text{ cm}$  ;  $B = 2 \times 10^{-3} \text{ T}$

$$\frac{e}{m} = \frac{8 \cdot 10^3}{(1,14 \times 10^{-2})(2 \times 10^{-3})^2}$$

$$\frac{e}{m} = \underline{\underline{1,75 \times 10^{11} \text{ C/kg}}}$$



## Solution de l'exercice 16

### 1- Vitesse des ions

Dans l'espace compris entre S et O, un ion est soumis à la force :

$$\vec{F} = \vec{F}_E + \vec{F}_B = q\vec{E} + q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

Pour qu'il traverse cet espace sans être dévié de sa trajectoire initiale, il faut que

$$\vec{F} = \vec{0} \text{ i. e. } \vec{F}_E = -\vec{F}_B \Rightarrow qE = qvB \text{ (remarque } \vec{v} \perp \vec{B}\text{)}$$

On obtient alors :

$$v = \frac{E}{B}$$

Seuls les ions qui ont cette vitesse sortent en O.

### 2- Distance d sur la plaque photographique.

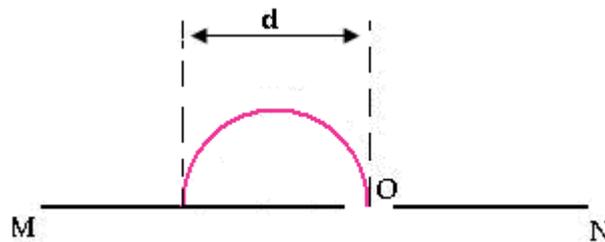
- Lorsqu'un ion pénètre dans la région où règne  $\vec{B}'$ , il est soumis à la force :

$$\vec{F}' = q\vec{v} \wedge \vec{B}' \text{ avec } \vec{v} \perp \vec{B}'$$

La charge  $q$  étant positive, l'ion subit une déflexion magnétique vers la gauche.

Les ions qui pénètrent dans le champ  $\vec{B}'$  recourent donc la partie OM de la plaque photographique.

- Les ions se meuvent suivant un demi-cercle de diamètre  $d$ .



$\vec{F}'$  est une force centripète.



$$m \frac{v^2}{R} = q V B'$$

Le rayon de la trajectoire d'un ion est donc :

$$R = \frac{mv}{qB'}$$

Il s'ensuit que

$$d = 2R = \frac{2mv}{qB'}$$

### 3- Isotopes de l'étain

Ces isotopes ont la même charge  $q$  mais n'ont pas la même masse. Soit  $d_1$  la distance à laquelle l'isotope de masse  $m_1 = 116$  u coupe la plaque photographique et  $d_2$  la distance correspondant à l'isotope de masse  $m_2 = 120$  u.

On a alors :

$$d_2 - d_1 = \frac{2v}{qB'}(m_2 - m_1)$$

$$\text{ou } \Delta d = \frac{2v}{qB'} \Delta m \quad \text{avec } \Delta d = d_2 - d_1 \text{ et } \Delta m = m_2 - m_1$$

En remplaçant  $v = \frac{E}{B}$ , on obtient :

$$\Delta d = \frac{2E}{qBB'} \Delta m$$

A.N. :  $E = 15$  kV/m;  $B = B' = 0,15$  T

$$1 \text{ u} = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$q = e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}; \Delta m = 4 \text{ u}$$

$$\Delta d = \frac{2(15 \times 10^3)(4)(1,66 \times 10^{-27})}{(1,6 \times 10^{-19})(0,15)^2}$$

$$\Delta d = 55,3 \text{ mm}$$



## Solution de l'exercice 17

### 1- Fréquence du champ oscillant

A l'intérieur d'un dee, un proton décrit un demi-cercle de rayon  $R = \frac{mv}{qB}$ ,  $v$  étant sa vitesse d'entrée dans ce dee. Il est accéléré chaque fois qu'il passe d'un dee à l'autre si la demi période du champ électrique oscillant est égale au temps  $t$  qu'il met pour parcourir un demi-cercle.

Calculons ce temps  $t$ .

Pour effectuer une révolution complète, il faut un temps  $T$  tel que :

$$vT = 2\pi R \Rightarrow T = \frac{(2\pi)R}{v} = \frac{2\pi}{v} \left( \frac{mv}{qB} \right) = \frac{(2\pi)m}{qB}$$

$$\text{Ainsi : } t = \frac{T}{2} = \frac{(\pi)m}{qB}$$

La période du champ électrique est donc :

$$2t = \frac{(2\pi)m}{qB} = T$$

Ce n'est autre que la période de révolution du proton.

La fréquence du champ électrique oscillant est alors :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{qB}{(2\pi)m}$$

A.N.  $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  ;  $B = 1,5 \text{ T}$  ;  $m = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

$$f = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})(1,5)}{2\pi(1,6610^{-27} \text{ k})}$$

$$\mathbf{f = 23 \text{ MHz}}$$



## 2- Energie cinétique

Calculons la vitesse du proton à la sortie du cyclotron :

$$R_s = \frac{m}{qB} v_s \Rightarrow v_s = \frac{qBR_s}{m}$$

A.N.  $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  ;  $B = 1,5 \text{ T}$  ;  $m = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  ;  $R = 0,5 \text{ m}$

$$v_s = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})(1,5)(0,5)}{(1,66 \cdot 10^{-27})}$$

$$v_s = 72,3 \cdot 10^6 \text{ ms}^{-1}$$

L'énergie cinétique est donc :

$$E_c = \frac{1}{2} m v_s^2$$

A.N.  $m = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  ;  $v_s = 72,3 \cdot 10^6 \text{ ms}^{-1}$

$$E_c = 43,38 \cdot 10^{-13} \text{ J} \Rightarrow E_c = 27,11 \text{ MeV}$$

$\omega_0$

## 3- Nombre d'accéléérations effectuées

La différence de potentiel entre les dés est 40 kV. Chaque fois que le proton passe d'un dé à l'autre, il gagne une énergie de  $40 \text{ keV} = 4 \cdot 10^4 \text{ eV}$ .

L'énergie finale étant  $E_c$ , le nombre d'accéléérations est :

$$N = \frac{E_c}{40 \text{ keV}} = \frac{27,11 \cdot 10^3 \text{ keV}}{40 \text{ keV}}$$

$$N = \frac{27110}{40} \approx 678$$

Le proton traverse 678 fois l'espace entre les dees.



## Solution de l'exercice 18

### 1) Vitesse d'entraînement

La densité de courant est :

$$\vec{j} = -n e \vec{v}_d, \quad \vec{v}_d \text{ étant la vitesse d'entraînement.}$$

La vitesse et le vecteur densité de courant sont de sens contraire. Nous avons en module :

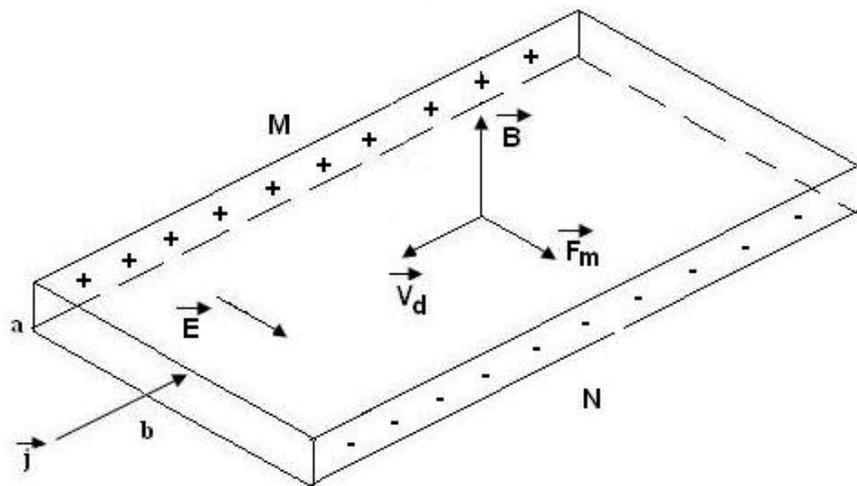
$$j = n e v_d \Rightarrow v_d = \frac{j}{ne} \quad (1)$$

L'intensité du courant est :  $I = j ab$ . Il s'ensuit que :

$$v_d = \frac{I}{neab} \quad (2)$$

### 2) Accumulation d'électrons sur une des faces

Chaque électron subit une force  $\vec{F}_m = -e \vec{v}_d \wedge \vec{B}$  et dérive vers le bord avant N comme l'indique la figure ci-dessous. Il y a donc accumulation d'électrons sur le bord N et un manque d'électrons sur le bord arrière M.



### 3) Régime permanent

L'accumulation de charges entraîne l'apparition d'une différence de potentiel



entre les bords M et N donc d'un champ électrique orienté vers les potentiels décroissants, de M vers N.

Une force électrique  $\vec{F}_e = -e\vec{E}$  s'exerce alors sur les électrons en plus de la force magnétique. Cette force s'oppose à l'accumulation des électrons sur le bord avant N.

Un régime permanent s'établit lorsque  $\vec{F}_e$  et  $\vec{F}_m$  se compensent :

$$\vec{F}_e + \vec{F}_m = \vec{0}$$

#### 4) Relation entre $\vec{E}$ et $\vec{B}$

Quand le régime permanent s'établit :

$$-e\vec{E} + (-e \vec{v}_d \wedge \vec{B}) = \vec{0} \quad \Rightarrow \quad \vec{E} = -\vec{v}_d \wedge \vec{B}$$

$\vec{B}$  et  $\vec{v}_d$  étant perpendiculaire entre eux, on obtient

$$E = v_d B \quad (3)$$

#### 5- Différence de potentiel $V_M - V_N$

La différence de potentiel entre les bords arrière et avant du ruban est reliée à la circulation de  $\vec{E}$  le long du trajet M @ N

$$V_M - V_N = \int_M^N \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

$\vec{E}$  est uniforme entre ces deux bords. Il s'ensuit que :

$$\begin{aligned} V_M - V_N &= E \int_M^N dl = Eb \\ \Rightarrow E b &= V_M - V_N \end{aligned}$$

Remplaçons E en utilisant la relation (3). On obtient :

$$v_d B b = V_M - V_N \quad (4)$$

$$\text{Mais } v_d = \frac{I}{neab}$$



La relation (4) donne alors :

$$\frac{I B b}{neab} = V_M - V_N$$

$$\frac{I B}{(ne)a} = V_M - V_N$$

A.N.  $I = 2 \text{ A}$ ;  $B = 2 \text{ T}$ ;  $ne = 2 \cdot 10^{10} \text{ Cm}^{-3}$ ;  $a = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

$$V_M - V_N = 10^{-7} \text{ Volt}$$

### Solution de l'exercice 19

La loi des mailles de Kirchhoff donne :

$$\text{Maille GABG} : \varepsilon - R_1 i_1 = 0 \quad (1)$$

$$\text{Maille GCDG} : \varepsilon - L \frac{di_2}{dt} - R_2 i_2 = 0 \quad (2)$$

1) Juste après la fermeture de l'interrupteur K.

• Intensité  $i_1$

La branche traversée par  $i_1$  est une résistance pure :

$$\varepsilon - R_1 i_1 = 0 \Rightarrow i_1 = \frac{\varepsilon}{R_1} = \frac{10\text{V}}{5\Omega} = 2\text{A}$$

• Intensité  $i_2$

A cet instant initial  $i_2 = 0$

• Intensité  $i$  traversant l'interrupteur K

La loi des nœuds donne :

$$i = i_1 + i_2 \Rightarrow i = 2\text{A} + 0\text{A}$$

$$i = 2\text{A}$$



- Différence de potentiel aux bornes de  $R_2$

$$V_{R_2} = R_2 i_2 \Rightarrow V_{R_2} = 0$$

- Différence de potentiel aux bornes de la bobine

$$V_L = L \frac{di_2}{dt}$$

Reprenons la relations (2) :  $\varepsilon - L \frac{di_2}{dt} - R_2 i_2 = 0$

Comme  $i_2 = 0 \Rightarrow \varepsilon = L \frac{di_2}{dt} = V_L$

$$V_L = 10V$$

- Taux de croissance de courant  $i_2$

La relation (2) donne :

$$\varepsilon = L \frac{di_2}{dt} \Rightarrow \frac{di_2}{dt} = \frac{\varepsilon}{L} = \frac{10V}{5H}$$

$$\frac{di_2}{dt} = 2 \text{ A} \cdot \text{s}^{-1}$$

2) Quand le régime permanent est atteint

- Intensité  $i_1$

$$i_1 \text{ n'a pas changé } \Rightarrow i_1 = 2 \text{ A}$$

- Intensité  $i_2$

Le courant  $i_2$  atteint sa valeur maximale

$$\varepsilon = R_2 i_2 \Rightarrow i_2 = \frac{\varepsilon}{R_2} = \frac{10V}{10\Omega}$$

$$i_2 = 1A$$

- Intensité  $i$

La loi des nœuds donne :  $i = i_1 + i_2 = 2A + 1A$

$$i = 3 \text{ A}$$



- Différence de potentiel aux bornes de  $R_2$

$$V_{R_2} = R_2 i_2 = 10 \Omega \times 1 \text{ A}$$

$$V_{R_2} = 10 \text{ V}$$

- Différence de potentiel aux bornes de la bobine.

De la relation (2) on obtient :

$$\varepsilon - L \frac{di_2}{dt} - R_2 i_2 = 0 \Rightarrow L \frac{di_2}{dt} = 0$$

(Car  $\varepsilon = R_2 i_2$ )

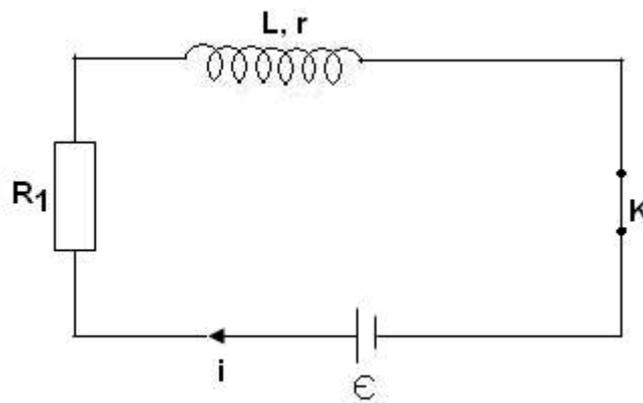
$$V_L = 0 \text{ V}$$

- Taux de croissance du courant  $i_2$ ,

L'intensité n'augmente plus

$$\frac{di_2}{dt} = 0 \text{ As}^{-1}$$

### Solution de l'exercice 20



- 1) La loi des mailles de Kirchoff appliquée à ce circuit donne

$$\varepsilon - L \frac{di}{dt} - (R_1 + r) i = 0 \quad (1)$$



2) Vérifions que  $i = \frac{\varepsilon}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}t})$  est la solution de l'équation différentielle.

$$i = \frac{\varepsilon}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \Rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{\varepsilon}{L}e^{-\frac{R}{L}t}$$

Portons maintenant  $i$  et  $\frac{di}{dt}$  dans l'équation (1) :

$$\begin{aligned} \varepsilon - L\left(\frac{\varepsilon}{L}e^{-\frac{R}{L}t}\right) - (R_1 + r)\left[\frac{\varepsilon}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}t})\right] \\ = \varepsilon - \varepsilon e^{-\frac{R}{L}t} - R\frac{\varepsilon}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \quad \text{car } R_1 + r = R \\ = \varepsilon - \varepsilon e^{-\frac{R}{L}t} - \varepsilon + (\varepsilon)e^{-\frac{R}{L}t} = 0 \end{aligned}$$

$i = \frac{\varepsilon}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}t})$  est bien la solution de l'équation différentielle

3) Calcul de la résistance  $r$  de la bobine

La valeur finale de  $i$  est observée au bout d'un temps suffisamment long, ce qui équivaut ici à  $t \rightarrow \infty$ . Ainsi :

$$i_f = \frac{\varepsilon}{R}$$

On a :

$$\frac{999}{1000} i_f = \frac{\varepsilon}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}t_1}) \quad \text{avec } t_1 = 6,9 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

$$\frac{999}{1000} \frac{\varepsilon}{R} = \frac{\varepsilon}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}t_1})$$

$$0,999 = 1 - e^{-\frac{R}{L}t_1} \Rightarrow \frac{R}{L}t_1 = \ln 1000$$

$$\frac{R}{L}t_1 = 3 \ln 10 \Rightarrow R = \frac{3 L \ln 10}{t_1} \Rightarrow R_1 + r = \frac{3 L \ln 10}{t_1} \Rightarrow r = \frac{3 L \ln 10}{t_1} - R_1$$



A.N.  $L = 0,1 \text{ mH}$  ;  $\ln 10 = 2,3$ ,  $t_1 = 6,9 \cdot 10^{-4} \text{ s}$  ;  $R_1 = 0,5 \Omega$

$$r = \frac{3 \times 10^{-4} \times 2,3}{6,9 \cdot 10^{-4}} - 0,5$$

$$r = (1 - 0,5 \Omega)$$

$$r = 0,5 \Omega$$

### Solution de l'exercice 21

#### 1) Champ magnétique à l'intérieur et à l'extérieur du solénoïde

Le solénoïde est de longueur infinie :

$$\Rightarrow \vec{B} \text{ est uniforme à l'intérieur : } \vec{B} = \mu_0 n I$$

$$\Rightarrow \vec{B} \text{ est zéro à l'extérieur}$$

#### 2) Coefficient d'auto-induction

Soit  $S$  l'aire de la section du solénoïde. Le flux magnétique à travers une spire est :

$$\Phi_1 = B S = \mu_0 n I S$$

Le flux total à travers toutes les spires est :

$$\Phi = \mu_0 n N^2 I S \quad N^2 \text{ nombre total des spires}$$

$$\Phi = L I \Rightarrow L = \mu_0 n N^2 S \quad \text{avec } S = \pi R^2$$

#### 3) Coefficient d'induction mutuelle

a) la bobine est traversée par le flux  $\Phi$  de champ  $\vec{B}$  créé par le solénoïde

$\vec{B}$  est uniforme à l'intérieur du solénoïde :  $\vec{B} = \mu_0 n I$  et nul à l'extérieur

$$\Phi = \mu_0 n I \pi R^2 N$$

$\underbrace{\hspace{10em}}$ flux à travers une spire de la bobine plate	$\searrow$ nombre total de spires de la bobine
--	--



$$\Phi = MI$$

$$\Rightarrow M = \mu_0 n N \pi R^2$$

b) f.é.m. induite

Quand I varie, le flux varie et une f.é.m. induite apparaît dans la bobine :

$$\varepsilon_{\text{ind}} = - \frac{d\Phi}{dt} = -\mu_0 n N \pi R^2 \frac{dI}{dt}$$

c) courant induit

Le courant induit dans la bobine est :

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{\varepsilon_{\text{in}}}{r} = - \frac{\mu_0 n N \pi R^2}{r} \frac{dI}{dt}$$

r est la résistance de la bobine plate. En intégrant cette dernière relation, on obtient :

$$q = \int_1^0 - \frac{\mu_0 n N \pi R^2}{r} dI$$

$$q = \frac{\mu_0 n N \pi R^2 I}{r}$$

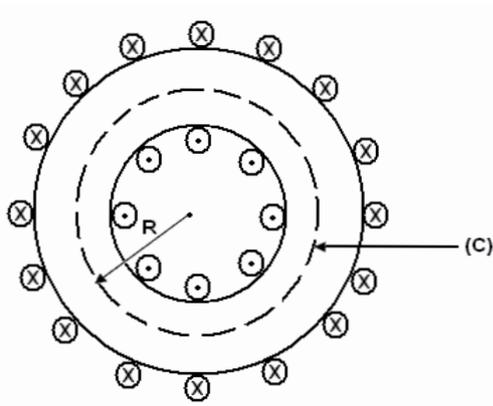
D'après la loi de Lenz le sens du courant induit est tel qu'il s'oppose à la diminution de  $\Phi$  c'est-à-dire à la diminution de  $\vec{B}$ .

$\Rightarrow$  le sens du courant induit est alors le même que le sens du courant qui parcourt les spires du solénoïde.



## Solution de l'exercice 22

### Intensité magnétique



La loi d'Ampère donne  $\oint_{(C)} \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI$  (1)

Soit R le rayon moyen de la bobine.

La relation (1) donne  $H(2\pi R) = NI$

ou  $Hl = NI$ ,  $l = 2\pi R$  étant la circonférence moyenne de la bobine.

Ainsi :  $H = \frac{NI}{l}$

A.N :  $N = 400$  ;  $I = 2A$  ;  $l = 0,40m$

$$H = \frac{400 \times 2}{0,4}$$

$$H = 2000 \text{ Am}^{-1}$$



### Aimantation

Utilisons la relation  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} \Rightarrow M = \frac{B - \mu_0 H}{\mu_0}$

$$\text{A.N. : } B = 1 \text{ T ; } H = 2000 \text{ Am}^{-1} ; \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}}$$

$$M = \frac{1 - (4\pi)10^{-7} \times 2000}{4\pi 10^{-7}}$$

$$M = 7,94 \times 10^5 \text{ Am}^{-1}$$

### Susceptibilité magnétique

$\vec{M}$  et  $\vec{H}$  sont liés par la relation  $\vec{M} = X_m \vec{H}$  d'où

$$M = X_m H \Rightarrow X_m = \frac{M}{H}$$

$$\text{A.N. : } M = 7,94 \times 10^5 \text{ Am}^{-1} ; H = 2000 \text{ Am}^{-1}$$

$$X_m = \frac{7,94 \times 10^5}{2000}$$

$$X_m = 397$$

### Courant de surface équivalent

L'aimantation  $M$  ici n'est autre que le courant de surface par unité de longueur. Soit  $I_s$  ce courant de surface.

$$M = \frac{I_s}{l} \Rightarrow I_s = M l$$

$$\text{A.N. : } M = 7,94 \times 10^5 \text{ Am}^{-1} ; l = 0,40 \text{ m}$$

$$I_s = 7,94 \times 10^5 \times 0,4$$

$$I_s = 317 \times 10^3 \text{ A.}$$



### Perméabilité relative

La perméabilité relative  $\mu_r$  est donné par  $\mu_r = 1 + X_m$

Ici  $X_m = 397$  d'où :  $\mu_r = 398$

### Solution de l'exercice 23

#### Aimantation

L'aimantation  $\vec{M}$  et l'intensité magnétique  $\vec{H}$  sont liées par la relation :

$$\vec{M} = X_m \vec{H} \Rightarrow M = X_m H \quad (X_m \text{ est positif})$$

Mais  $H = n I \Rightarrow M = X_m n I$

$n$  est le nombre de spires par unité de longueur .

Ici  $n = \frac{N}{l}$  avec  $N$  le nombre de spires et  $l$  la circonférence moyenne du tore

On a alors:

$$M = X_m \frac{N}{l} I$$

A.N.:  $X_m = 4 \times 10^{-3}$ ;  $N = 2000$  ;  $l = 2\pi R = 2\pi(0,2)$  m;  $I = 15$ A

$$M = (4 \times 10^{-3}) \times \frac{2000}{2\pi(0,2)} 15$$

$$M = 95,54 \text{ Am}^{-1}$$

#### Champ B

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} \Rightarrow B = \mu_0 (H + M)$$

$$H = n I = \frac{N}{l} I$$

$$\text{D'où } B = \mu_0 \left( \frac{N}{l} I + X_m \frac{N}{l} I \right)$$



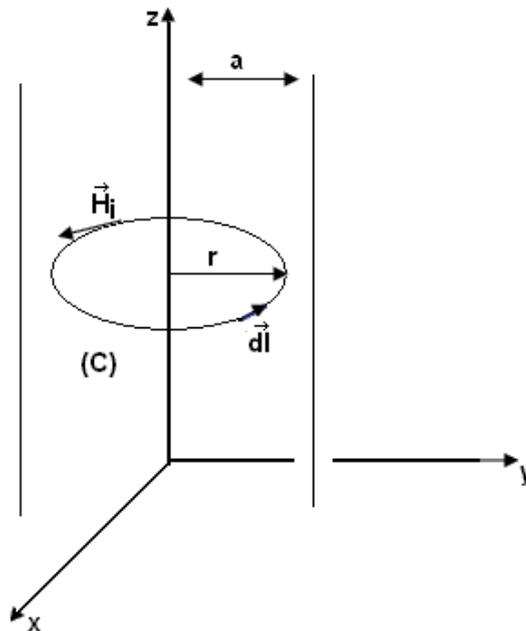
$$B = \mu_0 (1 + X_m) \frac{NI}{l}$$

A.N.:  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{Tm}{A}$  ;  $X_M = 4 \times 10^{-3}$ ;  $N = 2000$ ;  $l = 2\pi (0, 2) m$ ;  $I = 15A$

$$B = 4\pi \times 10^{-7} (1 + 0,004) \frac{2000}{2\pi(0,2)} \times 15$$

$$B = 0,0301 T$$

### Solution de l'exercice 24



#### 1- Intensité magnétique $\vec{H}$ dans tout l'espace

$r < a$  :

Désignons  $\vec{H}_i$  l'intensité magnétique dans cette région

On sait que  $\vec{\nabla} \wedge \vec{H}_i = \vec{j}_{cx}$

Intégrons cette relation sur une surface entourée par (C) :



$$\int_{(S)} (\vec{\nabla} \wedge \vec{H}_i) \cdot d\vec{S} = \int_{(S)} \vec{j}_{\text{ex}} \cdot d\vec{S} = I$$

D'après le théorème de Stokes, on a :

$$\int_{(S)} (\vec{\nabla} \wedge \vec{H}_i) \cdot d\vec{S} = \int_{(C)} \vec{H}_i \cdot d\vec{l}$$

$$\text{D'où } \int_{(C)} \vec{H}_i \cdot d\vec{l} = I$$

$d\vec{l}$  est tangent au cercle (C)

$\vec{H}_i$  est tangent au cercle (C)

$$\Rightarrow H_i (2\pi r) = I$$

$$H_i = \frac{I}{2\pi r} \quad \text{ou } \vec{H}_i = \frac{I}{2\pi r} \vec{\varphi}_0$$

$\vec{\varphi}_0$  est un vecteur unitaire sur le cercle (C)

$$\underline{r > a}$$

Soit  $\vec{H}_e$  le champ dans cette région. On refait la même démonstration et on obtient :

$$H_e (2\pi r) = I \quad \Rightarrow \vec{H}_e = \frac{I \vec{\varphi}_0}{2\pi r}$$

## 2- Champ $\vec{B}$ en tout point de l'espace

$$\underline{r < a}$$

$$\vec{B}_i = \mu \vec{H}_i \quad \Rightarrow \vec{B}_i = \mu \frac{I}{2\pi r} \vec{\varphi}_0$$

$\mu$  étant la perméabilité du milieu matériel constituant le cylindre.

$$\underline{r > a} : \vec{B}_e = \mu_0 \vec{H}_e = \frac{I}{2\pi r} \vec{\varphi}_0 \quad (\text{car on a le vide à l'extérieur du cylindre}).$$



### 3- Vecteur d'aimantation $\vec{M}$

On a la relation :  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} \Rightarrow \vec{M} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{H}$   
 $r < a$

$$\vec{M}_i = \frac{\vec{B}_i}{\mu_0} - \vec{H}_i$$

Remplaçons  $\vec{B}_i$  et  $\vec{H}_i$ ; on obtient :

$$\vec{M}_i = \frac{\mu}{\mu_0} \frac{I}{2\pi r} \vec{\varphi}_0 - \frac{I}{2\pi r} \vec{\varphi}_0$$

$$\vec{M}_i = \frac{I}{2\pi r} \left( \frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) \vec{\varphi}_0$$

$r > a$

$$\vec{M}_e = \vec{0} \text{ car on est dans le vide}$$

### 4- Courant ampérien $I_a$

C'est le courant équivalent dû à l'aimantation à l'intérieur.

On a  $\vec{j}_a = \nabla \wedge \vec{M}_i$

$$I_a = \int_{(S)} \vec{j}_a \cdot d\vec{S} = \int_{(S)} (\nabla \wedge \vec{M}_i) \cdot d\vec{S} = \oint_{(C)} \vec{M}_i \cdot d\vec{l} \text{ (en appliquant le théorème de Stokes)}$$

$\vec{M}_i$  et  $d\vec{l}$  sont parallèles entre eux. Après intégration, on obtient :

$$M_i (2\pi r) = I_a \Rightarrow I_a = \frac{I}{2\pi r} \left( \frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) (2\pi r)$$

$$I_a = I \left( \frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right)$$



## Solution de l'exercice 25

### 1- Expression de la susceptibilité

Partons de la loi de Curie :  $M = \frac{1}{3} m \frac{B_{app}}{kT} M_s$

Mais  $B_{app} = \mu_0 H$  et  $M = X_m H$ , d'où :

$$X_m H = \frac{1}{3} m \frac{\mu_0 H}{kT} M_s$$

$$\Rightarrow X_m = \frac{1}{3} m \frac{\mu_0 H}{kT} M_s$$

### 2- Calcul de la susceptibilité $X_m$ à $T = 300K$

• Calculons d'abord  $M_s$  :

$M_s = n m$  où  $n$  est le nombre d'atomes d'aluminium par unité de volume. On a :

$n = N_A \rho / M$ ,  $\rho$  étant la densité de l'aluminium,  $M$  la masse molaire et  $N_A$  le

d'Avogadro.

Il s'ensuit que :

$$M_s = N_A \rho / M m$$

A.N.:  $N_A = 6,02 \times 10^{23}$  atomes / mol;  $\rho = 2700 \text{ kg / m}^3$ ,

$$M = 27 \times 10^{-3} \text{ kg / mol} ; m = \mu_B = 9,27 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$$

$$M_s = \frac{(6,02 \times 10^{23})(2700)(9,27 \times 10^{-24})}{27 \times 10^{-3}}$$

$$M_s = 5,58 \times 10^5 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$



- Calculons maintenant  $X_m$

$$X_m = \frac{1}{3} m \frac{\mu_0 M_s}{kT}$$

$$\text{A.N. : } m = \mu_B = 9,27 \times 10^{-24} \text{ Am}^2 ; \mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}}$$

$$M_s = 5,58 \times 10^5 \frac{\text{A}}{\text{m}} ; k = 1,38 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} ; T = 300\text{K}$$

$$X_m = \frac{1}{3} \frac{(9,27 \times 10^{-24})(4\pi \times 10^{-7})(5,58 \times 10^5)}{(1,38 \times 10^{-23})(300)}$$

$$X_m = 5,23 \times 10^{-4}$$

## Solution de l'exercice 26

### 1- Champ coercitif

Le champ coercitif ou force coercitive est le champ magnétique appliqué nécessaire pour ramener le champ B à zéro le long de la courbe d'hystérésis.

### 2- Calcul du champ coercitif

$$B_{\text{coercitif}} = \mu_0 n I$$

$$\text{A.N. : } \mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}} ; n = \frac{600}{0,15 \text{ m}} ; I = 11\text{A}$$

$$B_{\text{coercitif}} = (4 \pi \times 10^{-7}) \left( \frac{600}{0,15} \right) (11)$$

$$B_{\text{coercitif}} = 5,53 \times 10^{-2} \text{ T}$$



### Solution de l'exercice 27

Le champ total qui règne dans la substance est :

$$B = B_{\text{app}} + \mu_0 M \quad (1), B_{\text{app}} \text{ étant le champ appliqué}$$

#### 1- Champ appliqué

$$B_{\text{app}} = \mu_0 n I$$

A.N.:  $\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}}$  ;  $n = 5000$  spires par m;  $I = 0,2\text{A}$

$$B_{\text{app}} = (4 \pi \times 10^{-7}) (5000) (0,2)$$

$$B_{\text{app}} = 1,26 \times 10^{-3} \text{T}$$

#### 2- Aimantation M

La relation (1) donne :

$$M = \frac{B - B_{\text{app}}}{\mu_0}$$

A.N.:  $B = 1,58 \text{ T}$ ;  $B_{\text{app}} = 1,26 \times 10^{-3} \text{ T}$ ;  $\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}}$

$$M = \frac{1,58 - (1,26 \times 10^{-3})}{4 \pi \times 10^{-7}}$$

$$M = 1,26 \times 10^6 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$



### 3- Perméabilité relative

$$\mu_r = \frac{B}{B_{app}}$$

$$\mu_r = \frac{1,58 \text{ T}}{1,26 \times 10^{-3} \text{ T}} \text{ dans le tableau c}$$

$$\mu_r = 1254$$

### Solution de l'exercice 28

Calculons  $\mu = \frac{B}{H}$ ,  $\mu_0 H$ ,  $\mu_0 M = B - \mu_0 H$  et  $K_m = \frac{\mu}{\mu_0}$  et consignons leurs valeurs dans

le tableau ci-dessous.

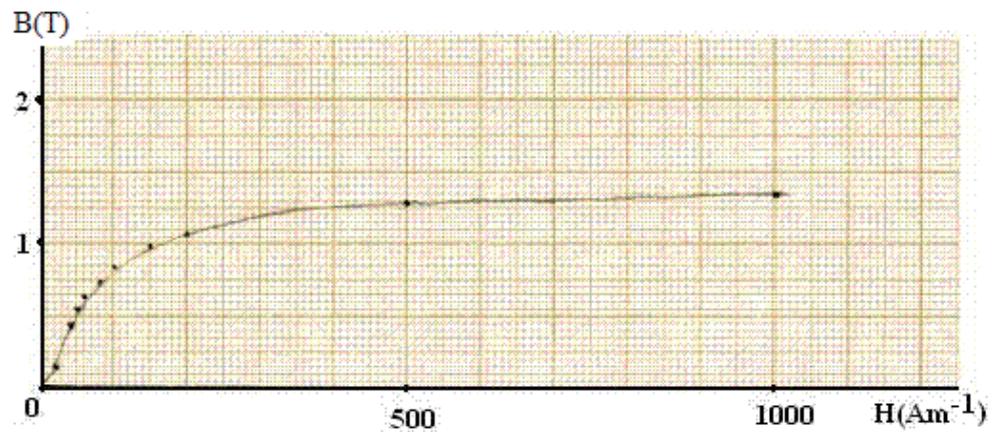
H (Am <sup>-1</sup> )	B (T)	$\mu = \frac{B}{H}$ (TA <sup>-1</sup> m)	$\mu_0 H$ (T)	$\mu_0 M = B - \mu_0 H$ (T)	$K_m = \frac{\mu}{\mu_0}$
0	0				
10	0,050	0,005	1,256 x 10 <sup>-5</sup>	0,04998	3,98 x 10 <sup>3</sup>
20	0,15	0,0075	2,512 x 10 <sup>-5</sup>	0,14997	5,971 x 10 <sup>3</sup>
40	0,43	0,01075	5,024 x 10 <sup>-5</sup>	0,42995	8,558 x 10 <sup>3</sup>
50	0,54	0,0108	6,28 x 10 <sup>-5</sup>	0,53993	8,598 x 10 <sup>3</sup>
60	0,62	0,01033	7,536 x 10 <sup>-5</sup>	0,61992	8,224 x 10 <sup>3</sup>
80	0,74	0,00925	10,048 x 10 <sup>-5</sup>	0,73989	7,364 x 10 <sup>3</sup>
100	0,83	0,0083	12,56 x 10 <sup>-5</sup>	0,82987	6,608 x 10 <sup>3</sup>
150	0,98	0,00653	18,84 x 10 <sup>-5</sup>	0,97981	5,199 x 10 <sup>3</sup>
200	1,07	0,00535	25,12 x 10 <sup>-5</sup>	1,06975	4,259 x 10 <sup>3</sup>
500	1,27	0,00254	62,80 x 10 <sup>-5</sup>	1,26937	2,022 x 10 <sup>3</sup>
1000	1,34	0,00134	125,60 x 10 <sup>-5</sup>	1,3387	1,066 x 10 <sup>3</sup>
10 000	1,65	0,000165	1256 x 10 <sup>-5</sup>	1,63744	1,31 x 10 <sup>2</sup>
100 000	2,02	2,02x10 <sup>-5</sup>	12560 x 10 <sup>-5</sup>	1,8944	1,6 x 10 <sup>1</sup>
800 000	2,92	3,6x10 <sup>-6</sup>	100480 x 10 <sup>-5</sup>	1,9152	2,87 x 10 <sup>1</sup>



**Commentaires :**

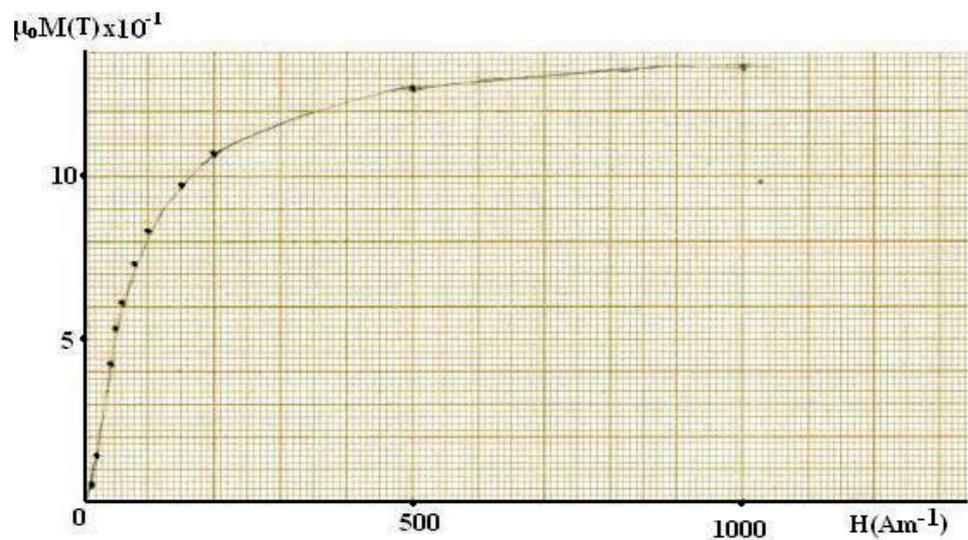
- $B = f(H)$

La courbe  $B = f(H)$  montre une variation non linéaire de  $B$  en fonction de l'intensité magnétique (ou excitation magnétique)  $H$ . On constate une croissance rapide de  $B$  au début et cette croissance devient de plus en plus lente au fur et à mesure que la substance ferromagnétique s'aimante.



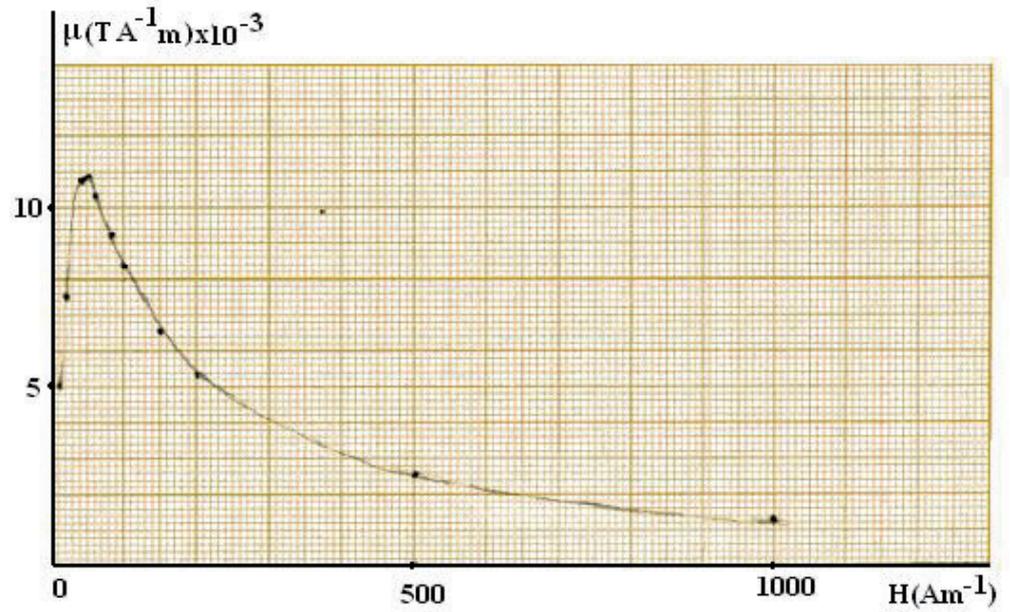
- $\mu_0 M = f(H)$

$\mu_0 M$  croît aussi rapidement au début, puis de plus en plus lentement et tend vers une valeur maximale qui correspond à la saturation magnétique.



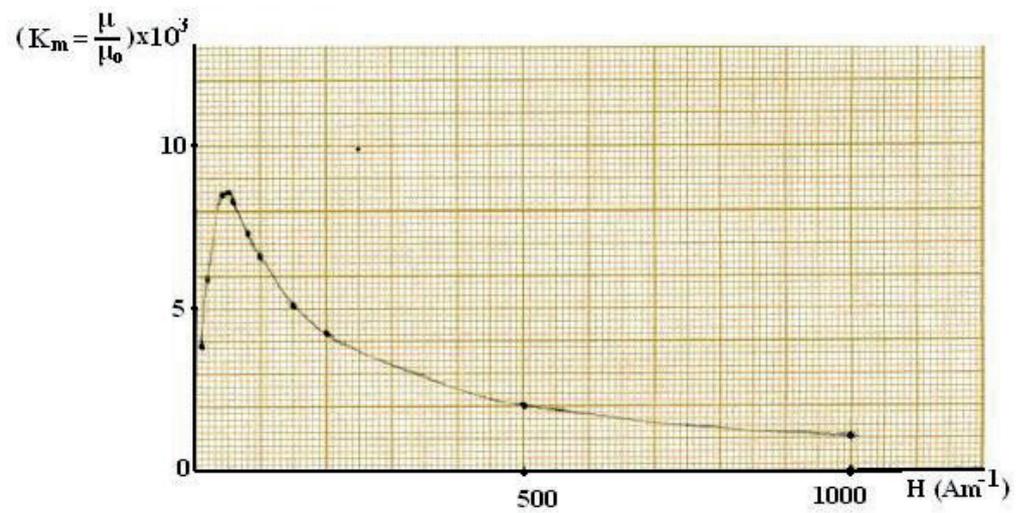
- $\mu = f(H)$

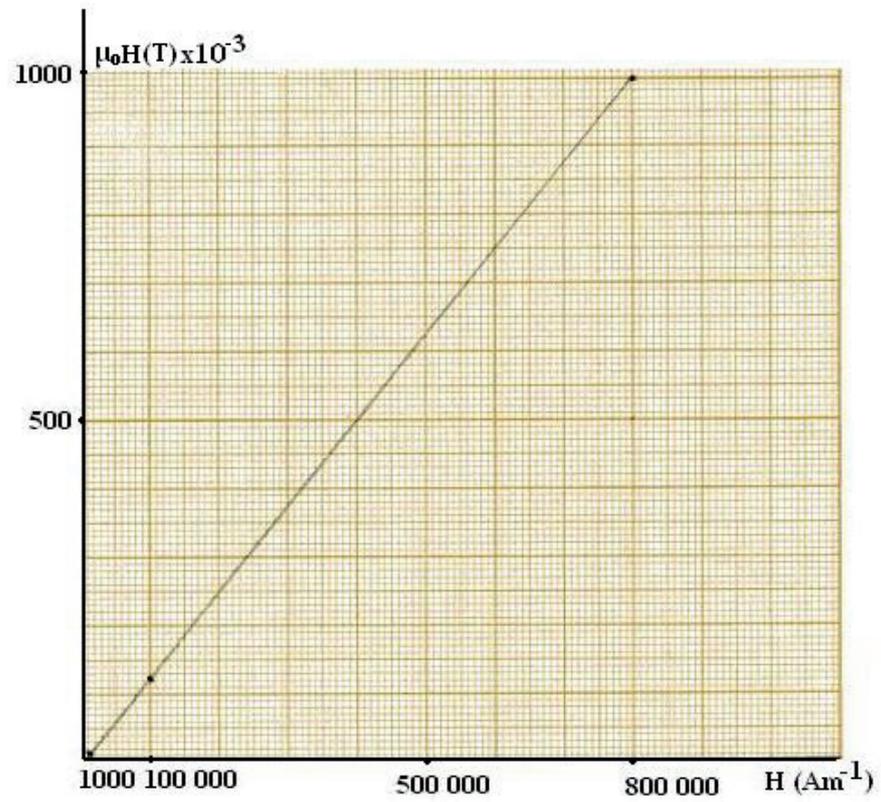
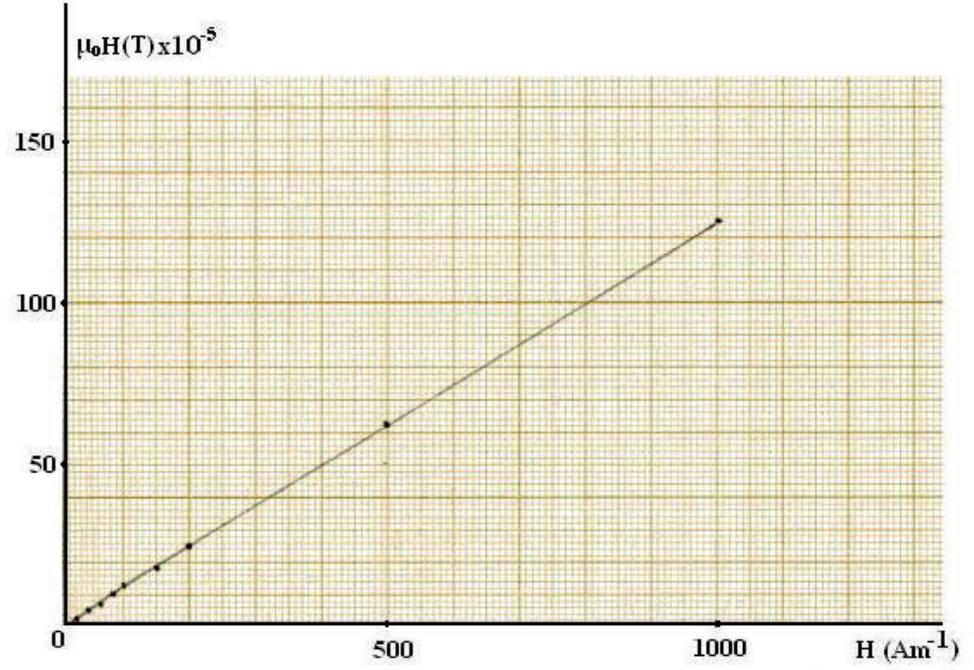
La perméabilité  $\mu$  n'est pas constante. Lorsque  $H$  augmente,  $\mu$  augmente depuis une valeur initiale voisine de  $3 \times 10^{-3} \text{ TA}^{-1} \text{ m}$ , atteint ensuite un maximum égal à  $10,8 \times 10^{-3} \text{ TA}^{-1} \text{ m}$  puis décroît et tend vers une valeur voisine de  $10^{-3} \text{ TA}^{-1} \text{ m}$ .



•  $K_m = f(H)$

$K_m = \frac{\mu}{\mu_0}$  et  $\mu_0$  reste égale à  $4 \pi \times 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}}$  alors  $K_m = f(H)$  et  $\mu = f(H)$  ont la même allure.







## Solution de l'exercice 29

Champ  $\vec{B}$

Le champ  $\vec{B}$  associé à cette onde électromagnétique est défini par :

$$\vec{B} = \frac{\vec{k} \wedge \vec{E}}{\omega}$$

$\vec{k}$  est le vecteur d'onde et définit la direction de propagation de l'onde. Nous avons

ici une onde qui se propage suivant l'axe x, alors on a  $\vec{k} = k \vec{e}_x$ ,  $\vec{e}_x$  étant le vecteur unitaire suivant l'axe x. On a donc :

$$\vec{B} = \frac{\vec{k} \wedge \vec{E}}{\omega} = \frac{k}{\omega} \vec{e}_x \wedge \vec{E}$$

Mais  $\frac{k}{\omega} = \frac{1}{c}$  d'où  $\vec{B} = \frac{\vec{e}_x \wedge \vec{E}}{c}$ . Déterminons  $\vec{e}_x \wedge \vec{E}$  :

$$\vec{e}_x \wedge \vec{E} = \vec{e}_x \wedge \left[ E_0 \sin(kx - \omega t) \vec{e}_y + E_0 \cos(kx - \omega t) \vec{e}_z \right]$$

$$= \vec{e}_z E_0 \sin(kx - \omega t) - \vec{e}_y E_0 \cos(kx - \omega t)$$

$$= (\vec{e}_x \wedge \vec{e}_y) E_0 \sin(kx - \omega t) + (\vec{e}_x \wedge \vec{e}_z) E_0 \cos(kx - \omega t)$$

On obtient :

$$\vec{B}(x,t) = -\frac{E_0}{c} \cos(kx - \omega t) \vec{e}_y + \frac{E_0}{c} \sin(kx - \omega t) \vec{e}_z$$

Evolution de  $\vec{E}(0,t)$  au cours du temps

On a :

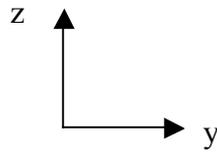
$$\vec{E}(0,t) = -E_0 \sin(\omega t) \vec{e}_y + E_0 \cos(\omega t) \vec{e}_z$$



$$E_y(0,t) = -E_0 \sin(\omega t) = -E_0 \sin 2\pi ft$$

$$E_z(0,t) = E_0 \cos(\omega t) = E_0 \cos 2\pi ft$$

$f$  est la fréquence de l'onde. Les évolutions de  $E_y(0,t)$ , de  $E_z(0,t)$  et de  $\vec{E}(0,t)$  sont décrites dans le tableau qui suit. Les directions des axes  $y$  et  $z$  sont aussi illustrées ci-dessous.



t	0	$\frac{1}{8f}$	$\frac{2}{8f}$	$\frac{3}{8f}$	$\frac{4}{8f}$	$\frac{5}{8f}$
$E_y(0,t)$	0	$-E_0 \sin \frac{\pi}{4}$	$-E_0$	$-E_0 \sin \frac{3\pi}{4}$	0	$-E_0 \sin \frac{5\pi}{4}$
$E_z(0,t)$	$E_0$	$E_0 \cos \frac{\pi}{4}$	0	$E_0 \cos \frac{3\pi}{4}$	$-E_0$	$E_0 \cos \frac{5\pi}{4}$
$\vec{E}(0,t)$						

On voit que  $\vec{E}(0,t)$  tourne dans le sens opposé à celui des aiguilles d'une montre et son amplitude est constante. On peut vérifier que  $E_y^2 + E_z^2 = E_0^2$ . C'est l'équation d'un cercle de rayon  $E_0$ .

Évolution de  $\vec{B}(0,t)$  au cours du temps

Reprenons  $\vec{B}(x,t) = -\frac{E_0}{c} \cos(kx - \omega t) \vec{e}_y + \frac{E_0}{c} \sin(kx - \omega t) \vec{e}_z$ . Posons



$B_0 = \frac{E_0}{c}$ . On a alors:

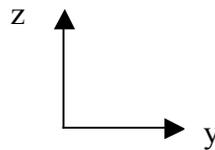
$$\vec{B}(x,t) = -B_0 \cos(kx - \omega t) \vec{e}_y + B_0 \sin(kx - \omega t) \vec{e}_z$$

$$\vec{B}(0,t) = -B_0 \cos \omega t \vec{e}_y + B_0 \sin \omega t \vec{e}_z$$

$$B_y(0,t) = -B_0 \cos \omega t = -B_0 \cos 2\pi ft$$

$$B_z(0,t) = B_0 \sin \omega t = B_0 \sin 2\pi ft$$

Les évolutions de  $B_y(0,t)$ , de  $B_z(0,t)$  et de  $\vec{B}(0,t)$  sont décrites ci-dessous.



t	0	$\frac{1}{8f}$	$\frac{2}{8f}$	$\frac{3}{8f}$	$\frac{4}{8f}$	$\frac{5}{8f}$
$B_y(0,t)$	$-B_0$	$-B_0 \cos \frac{\pi}{4}$	0	$-B_0 \cos \frac{3\pi}{4}$	$B_0$	$-B_0 \cos \frac{5\pi}{4}$
$B_z(0,t)$	0	$B_0 \sin \frac{\pi}{4}$	$B_0$	$B_0 \sin \frac{3\pi}{4}$	0	$B_0 \sin \frac{5\pi}{4}$
$\vec{B}(0,t)$	$\leftarrow$	$\swarrow$	$\uparrow$	$\nearrow$	$\rightarrow$	$\searrow$

$\vec{B}(0,t)$  tourne dans le sens des aiguilles d'une montre et son amplitude est constante.

On peut vérifier que  $B_y^2 + B_z^2 = B_0^2$ . C'est l'équation d'un cercle de rayon  $B_0$ .

Cette onde électromagnétique a une polarisation circulaire. Pour une valeur déterminée

de  $x$  les vecteurs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  tournent suivant un cercle dans un plan perpendiculaire à

la direction de propagation qui est ici l'axe  $x$ .  $\vec{E}$  est polarisé circulairement à gauche



et  $\vec{B}$  circulairement à droite.

Vecteur de Poynting associé à cette onde

Le vecteur de Poynting  $\vec{S}$  est :

$$\vec{S} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0}$$

Déterminons  $\vec{E} \wedge \vec{B}$  :

$$\vec{E} \wedge \vec{B} = \left[ \vec{e}_y E_0 \sin(kx - \omega t) + \vec{e}_z E_0 \cos(kx - \omega t) \right] \wedge \left[ -\vec{e}_y B_0 \cos(kx - \omega t) + \vec{e}_z B_0 \sin(kx - \omega t) \right]$$

Rappelons que :

$$\vec{e}_y \wedge \vec{e}_y = \vec{e}_z \wedge \vec{e}_z = \vec{0}$$

$$\vec{e}_y \wedge \vec{e}_z = \vec{e}_x$$

$$\vec{e}_z \wedge \vec{e}_y = -\vec{e}_x$$

En appliquant ces relations, on obtient :

$$\vec{E} \wedge \vec{B} = \vec{e}_x E_0 B_0 \sin^2(kx - \omega t) + \vec{e}_x E_0 B_0 \cos^2(kx - \omega t) = \vec{e}_x E_0 B_0$$

Le vecteur de Poynting s'écrit donc :

$$\vec{S} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} = \frac{E_0 B_0}{\mu_0} \vec{e}_x = \frac{E_0^2}{\mu_0 c} \vec{e}_x$$

Le vecteur de Poynting a la direction de propagation de l'onde.



### Autre méthode

On peut aussi partir des relations suivantes :

$$\vec{S} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} \quad \text{avec} \quad \vec{B} = \frac{k \wedge \vec{E}}{\omega} = \frac{k}{\omega} \vec{e}_x \wedge \vec{E} = \frac{1}{c} \vec{e}_x \wedge \vec{E}$$

On a donc :

$$\vec{S} = \frac{1}{c \mu_0} \vec{E} \wedge (\vec{e}_x \wedge \vec{E})$$

En utilisant  $\vec{a} \wedge (\vec{b} \wedge \vec{c}) = (\vec{a} \cdot \vec{c}) \vec{b} - (\vec{a} \cdot \vec{b}) \vec{c}$ , on obtient:

$$\vec{S} = \frac{E_0^2}{\mu_0 c} \vec{e}_x$$

### **Solution de l'exercice 30**

Le vecteur de Poynting associé à cette onde est :

$$\vec{S} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E}_0 \wedge \vec{B}_0 \cos^2(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$$

Mais  $\vec{E}_0 \perp \vec{B}_0$  et  $E_0 = B_0 c$ . On a donc :

$$\left| \vec{S} \right| = S = \frac{1}{\mu_0} \left| \vec{E}_0 \wedge \vec{B}_0 \right| \cos^2(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$$

$$S = \frac{1}{\mu_0} E_0 B_0 \cos^2(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t) = \frac{1}{\mu_0 c} E_0^2 \cos^2(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$$



L'intensité  $I$  de l'onde est la valeur moyenne de  $\left| \vec{S} \right|$ . Soit  $\langle S \rangle$  cette valeur moyenne.  
On a :

$$I = \langle S \rangle = \frac{1}{\mu_0 c} E_0^2 \langle \cos^2(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t) \rangle$$

La valeur moyenne  $\langle \cos^2(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t) \rangle$  est  $\langle \cos^2(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t) \rangle = \frac{1}{2}$ . On obtient alors :

$$I = \langle S \rangle = \frac{1}{2 \mu_0 c} E_0^2$$

Comme  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ , cette intensité peut aussi s'écrire :

$$I = \langle S \rangle = \frac{1}{2 \mu_0 c} E_0^2 = \frac{c}{2 \mu_0 c^2} E_0^2 = \frac{c E_0^2}{2 \mu_0} (\mu_0 \epsilon_0) = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2$$

### Solution de l'exercice 31

#### Intensité de l'onde

Soit  $\vec{S}$  le vecteur de Poynting associé à cette onde. Posons  $\left| \vec{S} \right| = S$ . L'intensité  $I$  est la valeur moyenne  $\langle S \rangle$  de  $S$ . Mais  $S$  est la puissance  $P$  de l'onde par unité de sur-

face. On a donc  $I = \frac{P}{A}$ ;  $A$  est ici l'aire d'une sphère ayant pour centre la source de

lumière et pour rayon  $r$  la distance qui sépare le point  $M$  de cette source. On obtient alors :

$$I = \frac{P}{A} = \frac{P}{4 \pi r^2}$$

Application numérique :  $P = 30W$ ;  $r = 2m$

$$I = \frac{P}{A} = \frac{30W}{4 \pi (2m)^2} \quad I = 0,6 \frac{W}{m^2}$$



### Pression de radiation

Soit  $P_r$  cette pression :

$$P_r = \frac{I}{c}$$

Application numérique :  $I = 0,6 \frac{W}{m^2}$  ;  $c = 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$

$$P_r = \frac{0,6}{3 \times 10^8}$$

$$P_r = 0,2 \times 10^{-8} \text{ Pa}$$

### Amplitude du champ électrique

Désignons par  $E_0$  cette amplitude. On a :

$$I = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2 \Rightarrow P_r = \frac{I}{c} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_0^2$$

Il s'ensuit que :

$$E_0 = \sqrt{\frac{2 P_r}{\epsilon_0}}$$

Application numérique :  $P_r = 0,2 \times 10^{-8} \text{ Pa}$  ;  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$

$$E_0 = \sqrt{\frac{2 (0,2 \times 10^{-8})}{8,85 \times 10^{-12}}}$$

$$E_0 = 21,26 \frac{V}{m}$$



Amplitude du champ magnétique

Soit  $B_0$  cette amplitude. On déduit  $B_0$  de la relation  $E_0 = B_0 c$  :

$$B_0 = \frac{E_0}{c}$$

Application numérique :  $E_0 = 21,26 \frac{\text{V}}{\text{m}}$  ;  $c = 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$$B_0 = \frac{21,26}{3 \times 10^8}$$

$$B_0 = 7,09 \times 10^{-8} \text{ T}$$



## XVI. Références

- BARUCH, P., HULIN, M. et PETROFF J.-F. (1972). *Electricité- Magnétisme. Cours.* Hermann, Paris,
- BEISER, A.(1979). *Physique appliquée : Cours et problèmes. Serie Schaum . Traduction française par LOBENBERG M.* McGraw-Hill, Paris
- BRAMAND, P., FAYE, P. et THOMASSIER, G. (1983). *Physique- Terminales C et E. Collection Eurin-Gié.* Hachette, Paris.
- BREITHAUPT, J. (2000). *New Understanding : Physics for Advanced Level. Fourth Edition,* Stanley Thornes Publishers Ltd,England ,
- BRUHAT, G. (1967).*Cours de Physique Générale : Electricité. Huitième Edition Révisée (2e tirage) par G.GOUDET,* Masson et Cie., Editeurs, Paris
- FRANCIS, W. S., ZEMANSKY, M. W. and YOUNG. H. D. (1987). *University Physics. Seventh Edition,* Addison-Wesley Publishing Company, USA.
- FRANCIS, W. S., ZEMANSKY, M. W. and YOUNG, H. D. (1974). *College Physics. Fourth Edition.* Addison-Wesley Publishing Company, USA.
- GERL, M. et JANOT, C. (1970). *Physique MP2 – PC2, 1. Relativité – Electromagnétisme. Collection Hachette Université.*
- HALPERN, A. (1991) *Maxi Schaum Physique 2. Traduction française par BABES, V.* McGraw-Hill, Paris
- KALACHNIKOV, S. (1980). *Electricité. Traduction française. Editions Mir, Moscou, Réédition :1983*
- NELKON, M. and PARKER, P. (1998). *Advanced Level Physics. Seventh Edition,* Heinemann, (Oxford ?)
- RESNICK, R. et HALLIDAY, D. (1979). *Electricité et magnétisme, physique 2. Traduit par André Lebel et Claudine Thériault. Editions du Renouveau Pédagogique. Inc. Montréal (Québec) Canada*
- SEARS. F.W, ZEMANSKY, M. W. and YOUNG. H. D. (1987). *University Physics. Seventh Edition,* Addison-Wesley Publishing Company, USA.
- SEARS.F.W., ZEMANSKY, M. W. and YOUNG, H. D. (1974). *College Physics. Fourth Edition.* Addison-Wesley Publishing Company, USA.
- TIPLER, P. A. (1982). *Physics. Second Edition. Worth Publishers Inc, New York, USA*
- TIPLER, P.-A (1999). *Physics for Scientists and Engineers. Fourth Edition. FREEMAN, W.H, and . and Company. Worth Publishers Inc., New York, USA.*



<http://sitelec.free.fr/cours/rlcseries.pdf>  
[http://perso.orange.fr/daniel.robert9/tension\\_alternative0.html](http://perso.orange.fr/daniel.robert9/tension_alternative0.html)  
[http://perso.orange.fr/daniel.robert9/tension\\_alternative1.html](http://perso.orange.fr/daniel.robert9/tension_alternative1.html)  
[http://www.walter-fendt.de/ph11f/accircuit\\_f.htm](http://www.walter-fendt.de/ph11f/accircuit_f.htm)  
<http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/electri/rlcsinus.html>  
[http://labo.ntic.org/RLC\\_serie/RLC.html](http://labo.ntic.org/RLC_serie/RLC.html)  
[http://hebergement.ac-poitiers.fr/l-cc-angouleme/coulomb-exos-phy/applets/RLC\\_serie/RLC.htm](http://hebergement.ac-poitiers.fr/l-cc-angouleme/coulomb-exos-phy/applets/RLC_serie/RLC.htm)  
[http://perso.orange.fr/olivier.granier/electro/simul/cour\\_rlc/circuitRLC4.htm](http://perso.orange.fr/olivier.granier/electro/simul/cour_rlc/circuitRLC4.htm)  
<http://www.fundp.ac.be/sciences/physique/didactique/elec/RLC4.php>  
<http://www.fundp.ac.be/sciences/physique/didactique/elec/RLC3.php>  
[http://perso.orange.fr/olivier.granier/electro/simul/cour\\_rlc/circuitRLC3.htm](http://perso.orange.fr/olivier.granier/electro/simul/cour_rlc/circuitRLC3.htm)  
<http://sitelec.free.fr/cours/rlcseries.pdf>  
<http://www.physique-eea.unicaen.fr/enseignement/deug-st/sm/dsm153/poly/dsm153-e.pdf>  
[http://www.unilim.fr/pages\\_perso/frederic.louradour/Oscillo\\_2.PDF](http://www.unilim.fr/pages_perso/frederic.louradour/Oscillo_2.PDF)  
[http://wwwens.uqac.ca/chimie/Physique\\_atom/Chap\\_hm/CHAP\\_3.html](http://wwwens.uqac.ca/chimie/Physique_atom/Chap_hm/CHAP_3.html)  
<http://www.unige.ch/sciences/physique/tp/tpe/E9.htm>  
<http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/electri/esurm.html>  
<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/Meca/Charges/hall.html>  
[http://membres.lycos.fr/physiciss/labs/effet\\_hall.pdf](http://membres.lycos.fr/physiciss/labs/effet_hall.pdf)  
<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/Meca/Charges/cyclotron.html>  
[http://perso.orange.fr/physique.chimie/Cours\\_de\\_physique/Physique\\_12\\_particule\\_chargee\\_dans\\_un\\_champ\\_magnetique.htm](http://perso.orange.fr/physique.chimie/Cours_de_physique/Physique_12_particule_chargee_dans_un_champ_magnetique.htm)  
[http://perso.orange.fr/daniel.robert9/Induction\\_electromagnetique.html](http://perso.orange.fr/daniel.robert9/Induction_electromagnetique.html)  
[http://perso.orange.fr/daniel.robert9/Induction\\_electromagnetique0.html](http://perso.orange.fr/daniel.robert9/Induction_electromagnetique0.html)  
<http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/electri/lenz.html>  
<http://jf-noblet.chez-alice.fr/bobine/index.htm>  
[http://www.thyssenfrance.com/documents/mut%20devt%20text%20doc%20tech%20aim\\_MAGNETISME%20-%20QUELQUES%20RAPPELS.pdf](http://www.thyssenfrance.com/documents/mut%20devt%20text%20doc%20tech%20aim_MAGNETISME%20-%20QUELQUES%20RAPPELS.pdf)  
[http://perso.univ-lr.fr/vmathe/16\\_annexeA.pdf](http://perso.univ-lr.fr/vmathe/16_annexeA.pdf)



<http://semainescience.u-strasbg.fr/magnetisme/fondement.html>

<http://www.grasp.ulg.ac.be/cours/2cm/elec5.pdf>

[http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/weisli\\_j.html](http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/weisli_j.html)

<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/praimh.html>

<http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/electri/oem1.html>

[http://www.walter-fendt.de/ph11f/emwave\\_f.htm](http://www.walter-fendt.de/ph11f/emwave_f.htm)

[http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/2pcirc\\_j.html](http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/2pcirc_j.html)

[http://www.sciences.univnantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/polond\\_j.html](http://www.sciences.univnantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/polond_j.html)



## XVII. Auteur principal du module

Dr. Henri RASOLONDRAMANITRA



Maître de Conférences  
Filière Physique – Chimie  
Ecole Normale Supérieure (ENS)  
Université d'Antananarivo  
Madagascar  
Courriel : [h.rasolondramanitra@simicro.mg](mailto:h.rasolondramanitra@simicro.mg)

Ph.D en Physique, Oregon State University (USA), 1985

Enseignant Chercheur à l'ENS ; Responsable pédagogique de la filière Physique-Chimie ; Membre du conseil scientifique de l'ENS depuis 1998 ; Membre du Conseil d'Etablissement de l'ENS, 1998-2006 ; Membre de la Cellule d'Evaluation et Coordination des Projets de l'ENS.

Il encadre les élèves professeurs dans la préparation de leurs mémoires de fin d'études et les étudiants de DEA en Didactique des Sciences expérimentales.