

Chapitre 2 : Induction électromagnétique

Prérequis

- chapitre IFL1 - Champs magnétiques
- chapitres d'électrocinétique

Mots-clés

flux magnétique, force électromotrice induite, loi de Faraday, loi de Lenz, auto-induction, induction mutuelle, transformateur

M. Faraday



PLAN DU COURS

A

Lois de l'induction

- A.1** Aspect expérimental
- A.2** Loi de Faraday
- A.3** Loi de modulation de Lenz

B

Phénomène d'auto-induction

- B.1** Champ magnétique propre et flux propre d'un circuit
- B.2** Inductance propre d'un circuit
- B.3** Force électromotrice auto-induite
- B.4** Aspects énergétiques

C

Couplage magnétique entre deux circuits

- C.1** Induction mutuelle
- C.2** Aspects énergétiques
- C.3** Application : le transformateur



LES SAVOIRS ET LES SAVOIR-FAIRE

A Lois de l'induction

CAPACITÉS EXIGIBLES

- ☐ Évaluer le flux d'un champ magnétique uniforme à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté plan.
- ☐ Utiliser la loi de Lenz pour prédire ou interpréter les phénomènes physiques observés.
- ☐ Utiliser la loi de Faraday en précisant les conventions d'algébrisation.

A.1 Aspect expérimental

1. Décrire une expérience d'induction électromagnétique (avec un aimant, une bobine et un ampèremètre).

A.2 Loi de Faraday

2. Définir le vecteur surface élémentaire. Définir le flux magnétique d'un champ magnétique $\vec{B}$ à travers un circuit. Traiter le cas particulier d'un champ magnétique uniforme.
3. Énoncer la loi de Faraday.
4. Interpréter l'expérience précédente grâce à loi de Faraday.

A.3 Loi de modération de Lenz

5. Énoncer la loi de Lenz.
6. Illustrer cette loi à l'aide de l'expérience précédente.

B Phénomène d'auto-induction

CAPACITÉS EXIGIBLES

- ☐ Différencier le flux propre des flux extérieurs.
- ☐ Utiliser la loi de modération de Lenz.
- ☐ Évaluer et citer l'ordre de grandeur de l'inductance propre d'une bobine de grande longueur.
- ☐ Réaliser un bilan de puissance et d'énergie dans un système siège d'un phénomène d'auto-induction en s'appuyant sur un schéma électrique équivalent.

B.1 Champ magnétique propre et flux propre d'un circuit

7. Définir le champ propre et le flux propre d'un circuit.

B.2 Inductance propre d'un circuit

8. Justifier que le flux propre soit proportionnel à l'intensité du circuit.
9. Définir alors l'inductance propre. De quoi sa valeur dépend-elle ?
10. Montrer que l'inductance propre est nécessairement positive.
11. Exemple : déterminer l'inductance propre d'une bobine (considérée comme infinie).

**B.3** Force électromotrice auto-induite

12. Définir et exprimer la force électromotrice induite d'un circuit.

B.4 Aspects énergétiques

13. Comment peut-on interpréter le terme d'énergie $\frac{1}{2}Li^2$?

C Couplage magnétique entre deux circuits

CAPACITÉS EXIGIBLES

- ☐ Déterminer l'inductance mutuelle entre deux bobines de même axe de grande longueur en « influence totale ».
- ☐ Citer des applications dans le domaine de l'industrie ou de la vie courante.
- ☐ Établir le système d'équations en régime sinusoïdal forcé en s'appuyant sur des schémas électriques équivalents.
- ☐ Réaliser un bilan de puissance et d'énergie.
- ☐ Transformateur de tension : établir la loi des tensions.

C.1 Induction mutuelle

14. Pour deux circuits proches l'un de l'autre, définir les flux mutuels. À quelle intensité sont-ils proportionnels chacun ? Justifier.
15. Définir le coefficient d'inductance mutuelle.
16. De quoi ce coefficient dépend-t-il ?

C.2 Aspects énergétiques

17. À l'aide d'un exemple, réaliser un bilan de puissance et préciser à quoi correspond le terme énergétique Mi_1i_2 .

C.3 Application : le transformateur

18. Expliquer de quoi est constitué un transformateur.
19. Établir l'expression du rapport de transformation. En déduire une application courante du transformateur
20. Si on néglige les pertes énergétiques, que dire du rapport des intensités des circuits primaire et secondaire ?



DOCUMENTS DE COURS

Document 1

Expérience introductive : courant induit dans une spire

Expérience	Observations expérimentales
	Sans aucun déplacement de l'aimant, aucun courant n'est observé dans la spire.
	Le pôle nord de l'aimant est approché de la spire. L'intensité du champ magnétique ressenti au niveau de celle-ci augmente. On observe un courant d'intensité $i < 0$.
	Le pôle nord de l'aimant est éloigné de la spire. L'intensité du champ magnétique ressenti au niveau de celle-ci diminue. On observe un courant d'intensité $i > 0$.
	Le pôle sud de l'aimant est approché de la spire. L'intensité du champ magnétique ressenti au niveau de celle-ci augmente mais son sens est inversé par rapport au cas où on approchait le pôle nord. On observe un courant d'intensité $i > 0$.
	Les lignes de champ sont quasiment contenues dans le plan de la spire. Quasiment aucun courant observé lors du déplacement de l'aimant.

Autres observations expérimentales

Le courant observé est d'autant plus intense que :

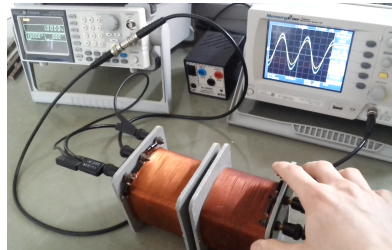
- ☐ les variations du champ magnétique sont rapides ;
- ☐ l'amplitude de variation du champ magnétique est grande ;
- ☐ la surface de la spire est grande ;
- ☐ les lignes de champ magnétiques sont peu inclinées par rapport à la normale au plan de la spire.

Document 2 Expérience : induction mutuelle

Une bobine est alimentée par un générateur de Thévenin de fem sinusoïdale de fréquence 1 kHz et d'amplitude 5 V. La tension $u_1(t)$ aux bornes de la bobine est observée sur la voie 1 de l'oscilloscope.

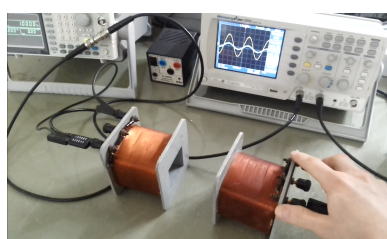
On observe sur la voie 2 la tension $u_2(t)$ aux bornes d'une 2ème bobine à proximité. Cette bobine n'est connectée à rien d'autre que l'oscilloscope. Elle n'est donc traversée par aucun courant.

(Voie 1 : 2V/div Voie 2 : 0,2V/div)

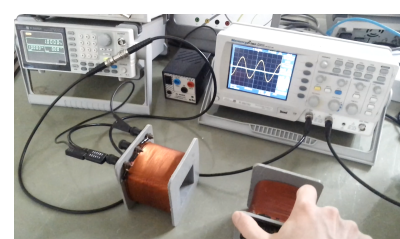


Les bobines se font faces et sont très proches.

On observe une tension induite aux bornes de la 2ème bobine.



L'amplitude de la tension aux bornes de la bobine est d'autant plus faible que les bobines sont éloignées.

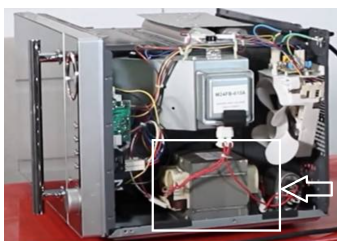


À distance fixée entre les deux bobines, la rotation de la 2ème bobine entraîne une diminution de l'amplitude de $u_2(t)$.

Document 3 Une application importante : le transformateur

► Utilité d'un transformateur

Les transformateurs permettent d'abaisser ou de relever l'amplitude d'une tension alternative. Cela est rendu possible grâce à l'induction mutuelle entre deux bobinages dont le nombre de spires est différents.

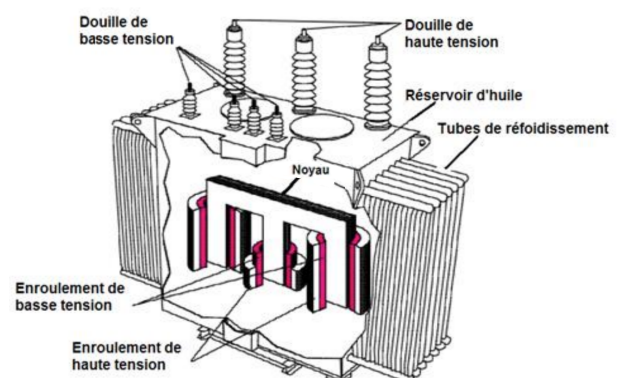


Ils sont présents dans une grande partie de l'appareillage électrique : four micro-onde (comme ci-contre), ordinateur de bureau, chaîne hifi, ... En effet, la tension délivrée aux prises électriques d'une habitation est de valeur efficace 220V, souvent pas adaptée à l'alimentation de l'appareil électrique considéré. Par exemple, le four micro-onde nécessite une tension efficace d'environ 2000V alors qu'une chaîne hifi nécessite une tension efficace de 30 ou 40V.



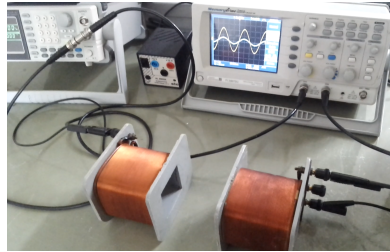
Autre exemple d'utilisation dans l'abaissement de tension des lignes très haute et haute tension (respectivement plusieurs dizaines et plusieurs centaines de milliers de volts!)

Ces lignes permettent de transférer l'énergie électrique avec des pertes énergétiques rendues suffisamment faibles justement grâce à l'utilisation de tensions très importantes. L'usage de transformateurs permet d'abaisser progressivement cette haute tension à la tension domestique de valeur efficace 220V. Ainsi, le risque d'accident électrique à la maison est considérablement amoindri!

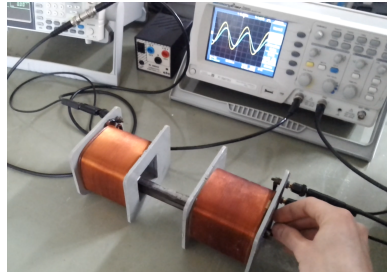


► Rôle du circuit magnétique

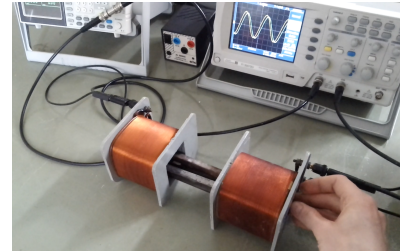
L'induction mutuelle est rendue plus efficace en utilisant un **circuit magnétique** : il s'agit d'un **matériau ferromagnétique** permettant de canaliser en son sein les lignes du champ magnétique résultant produit par les bobinages. Ainsi, plus de lignes de champ peuvent être captées par les spires et les tensions induites peuvent être plus importantes (coefficient d'inductance propre et d'inductance mutuelle de valeur plus importante). Pour illustrer expérimentalement cela, reprenons l'expérience du **Document 2** :



Les bobines se font faces. Aucun circuit magnétique n'est employé.



Deux barres d'acier sont rajoutées à l'intérieur des bobines. L'amplitude de la tension $u_2(t)$ augmente.



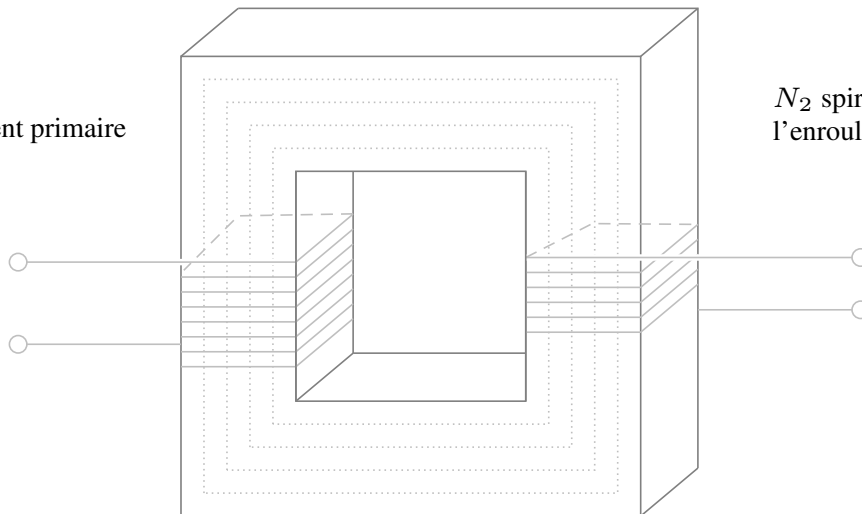
Trois autres barres sont rajoutées. L'amplitude de la tension $u_2(t)$ augmente encore.

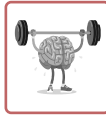
► Constitution

Noyau ferromagnétique permettant de canaliser les lignes de champ magnétique

N_1 spires à l'enroulement primaire

N_2 spires à l'enroulement secondaire





EXERCICES

DIFFICULTÉ DE L'EXERCICE (ANALYSE, «TECHNICITÉ», ...)

DURÉE DE L'EXERCICE

COMPÉTENCES TRAVAILLÉES

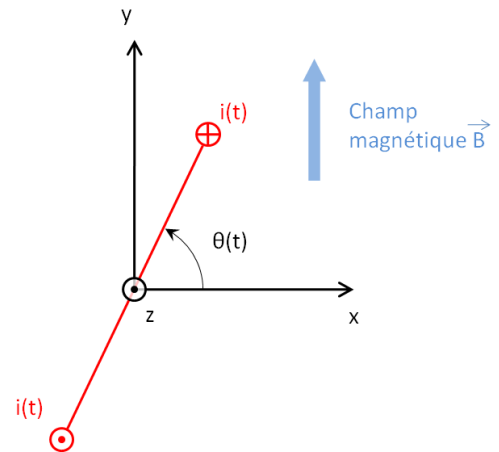
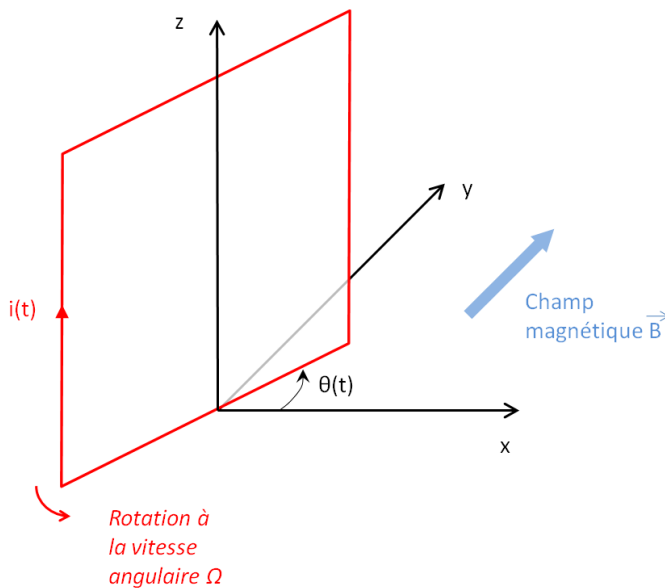
	Exercices				
	1	2	3	4	5
Exprimer le flux d'un champ magnétique à travers un circuit	•	•	•	•	•
Déterminer le schéma équivalent d'un circuit grâce à la loi de Faraday	•	•	•	•	•
Calcul d'un coefficient d'inductance propre ou mutuelle				•	•

Exercice 1

Cadre tournant



On considère un cadre rectangulaire de hauteur a et de largeur b qui pivote autour d'un axe Oz à une vitesse angulaire Ω constante grâce à un dispositif extérieur. La position angulaire du cadre est repérée par l'angle $\theta(t)$. Le cadre est soumis à un champ magnétique extérieur constant et uniforme $\vec{B} = B\vec{u}_y$. On néglige tout phénomène d'auto-induction. On note R la résistance électrique du cadre.



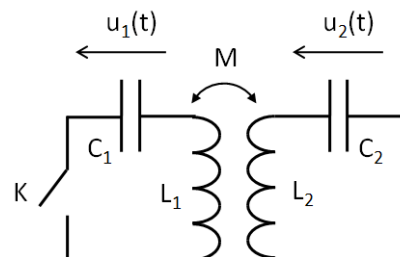
1. Sur le schéma de droite ci-dessus, représenter le vecteur surface $\vec{S}$ associé au circuit.
2. Exprimer le flux magnétique ϕ à travers le cadre en fonction de a , b , B , et θ .
3. Établir l'expression de l'intensité $i(t)$ du courant circulant dans le cadre.

Exercice 2

Circuits LC couplés par induction mutuelle



Dans le circuit ci-contre, le condensateur de capacité C_1 est chargé sous la tension u_0 à la date $t = 0$ où l'on ferme l'interrupteur K . On prendra dans toute la suite $C_1 = C_2 = C$ et $L_1 = L_2 = L$.



1. Établir les deux équations différentielles couplées vérifiées par u_1 et u_2 aux bornes des condensateurs.
2. Découpler ces équations en effectuant un changement d'inconnues (notées $x(t)$ et $y(t)$). Préciser notamment les équations différentielles vérifiées par x et y , les résoudre et en déduire les tensions u_1 et u_2 . On pourra poser $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{C(L+M)}}$ et $\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{C(L-M)}}$.
3. Dans le cas où $M \ll L$, effectuer une approximation de ω_1 et ω_2 à l'ordre 1 en M/L .
4. Quelle sera alors l'allure de $u_1(t)$ et $u_2(t)$? Comment s'appelle le phénomène observé?



Exercice 3

Chauffage par induction



Grâce aux courants induits et à l'effet Joule, il est possible de concevoir des systèmes de chauffage performants et bien plus respectueux de l'environnement que des systèmes plus «traditionnels». Les plaques à induction utilisées en cuisine en sont un exemple phare, les forges par induction employées dans l'industrie également. Celles-ci permettent notamment de rendre les métaux suffisamment malléables afin de leur imprimer plus facilement une forme désirée par la suite.

On souhaite par exemple chauffer un anneau métallique en acier modélisable par une spire de rayon $r = 2,5$ cm, de résistance $R = 0,10 \Omega$ et dont on négligera l'inductance propre. On place l'anneau au sein d'un solénoïde de longueur $\ell = 20$ cm comportant $N = 40$ spires et parcouru par un courant électrique d'intensité $i(t) = I_0 \cos(\omega t)$ oscillant à une fréquence de 200 kHz. La bobine et l'anneau sont de même axe de révolution Oz . On considère que le champ magnétique à l'intérieur du solénoïde est $\vec{B} = \frac{\mu_0 N i}{\ell} \vec{u}_z$ où $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$.



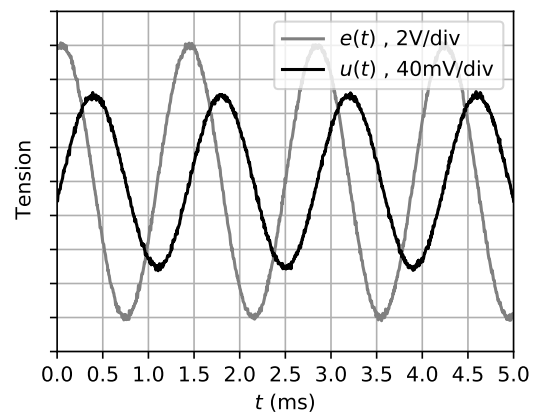
- Déterminer l'intensité électrique $i_a(t)$ du courant induit apparaissant dans l'anneau.
- Quelle est la puissance moyenne $\mathcal{P}_J$ dissipée par effet Joule dans l'anneau ?
- La puissance désirée est de 500 W. Quelle doit être la valeur de l'amplitude I_0 ?
- La *capacité thermique* de l'acier est $c_a = 0,46 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$: pour un kilogramme d'acier, elle représente l'énergie à fournir à l'acier pour élever sa température d'un degré.
On souhaite porter l'anneau à une température de 700°C . L'anneau pèse $m = 30$ g.
Quelle sera la durée nécessaire ?

Exercice 4

Mesure d'une inductance mutuelle



On souhaite mesurer le coefficient d'inductance mutuelle M entre deux bobines 1 et 2 de même longueur $\ell = 13,0$ cm et d'intensités respectives i_1 et i_2 . La bobine 2 de rayon $r_2 = 2,5$ cm est insérée totalement dans la bobine 1 de rayon $r_1 = 3,0$ cm. Les deux bobines sont de même axe de révolution Oz . La bobine 1 est alimentée par un générateur idéal de f.é.m $e(t)$ associé en série à une résistance $R = 500 \Omega$, formant ainsi le *circuit primaire*. Les bornes de la bobine 2 sont directement reliées aux bornes de la voie 2 de l'oscilloscope. Sur la voie 1 est observée la tension $e(t)$. Les inductances propres et résistances internes de chaque bobine valent respectivement $L_1 = 0,53 \text{ mH}$, $R_1 = 1,1 \Omega$, $L_2 = 6,8 \text{ mH}$ et $R_2 = 9,2 \Omega$.

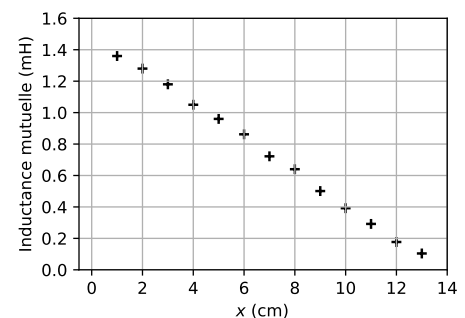


- Quelle sont les équations différentielles vérifiées par $i_1(t)$ et $u(t)$?
- Quelle est la fréquence employée dans le montage ? Justifier alors que $\underline{e} \simeq R \underline{i}_1$.
- À l'aide de l'écran d'oscilloscope, déterminer la valeur de M .

Les bobines comportent respectivement $N_1 = 140$ spires et $N_2 = 600$ spires. On considère que les bobines sont «infiniment» longues : le champ magnétique propre d'une bobine donnée est donc nul à l'extérieur de cette bobine et uniforme à l'intérieur, valant : $\vec{B}_k = \mu_0 \frac{N_k}{\ell} i_k(t) \vec{u}_z$ où $k = 1$ ou 2 et $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$.

Et désormais, la bobine 2 n'est pas complètement insérée dans la bobine 1. On note x la longueur de la partie de la bobine 2 en dehors de la bobine 1.

- Déterminer l'expression de l'inductance mutuelle M_{th} en fonction de x notamment.
- Voici ci-contre les valeurs de M_{exp} obtenues expérimentalement pour différentes valeurs de x .
Rajouter sur ce graphique le point de mesure trouvé pour $x = 0$ et tracer la courbe correspondante à $M_{th}(x)$.
Commenter ce tracé.
- Lorsque la bobine 2 est complètement sortie (càd $x = \ell$), expliquer qualitativement comment sera modifié M si on la pivote de 180° ?





Exercice 5

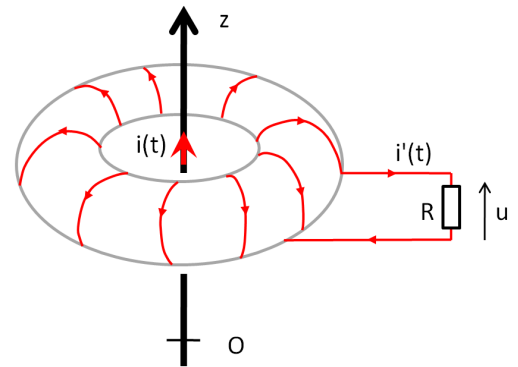
Pince ampèremétrique



On s'intéresse au principe de fonctionnement d'une pince ampèremétrique que l'on modélise par une bobine de forme torique, de rayon moyen ρ , comprenant N spires circulaires de rayon a . Un dipôle purement résistif est placé entre les bornes du bobinage, sa résistance R est très supérieure à celle correspondant au bobinage lui-même. Un fil rectiligne considéré infini, situé sur l'axe Oz , est parcouru par un courant d'intensité $i(t)$.

On rappelle l'expression du champ magnétique produit par un fil rectiligne infini parcouru par un courant d'intensité i en un point situé à une distance r du fil : $\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \vec{u}_\theta$ en utilisant le repérage cylindrique (l'axe Oz étant orienté dans le même sens que i).

On admet également que le champ magnétique produit par la bobine torique à l'intérieur de celle-ci s'écrit pour un point situé à une distance r de l'axe Oz : $\vec{B}' = \mu_0 \frac{N i'}{2\pi r} \vec{u}_\theta$ (démontrable en 2ème année).



- On note L l'inductance propre du bobinage et M l'inductance mutuelle entre les deux circuits : fil et bobine. Établir équation différentielle liant la tension $u(t)$, relevée aux bornes du résistor, à l'intensité $i(t)$.
- On considère que l'intensité i est sinusoïdale de pulsation ω et d'intensité efficace I_{eff} .
 - Justifier que la tension $u(t)$ soit également sinusoïdale de même pulsation.
 - Établir la relation entre la tension efficace de $u(t)$, notée U_{eff} , et I_{eff} .
 - En déduire l'intérêt de ce dispositif.
- On raisonne dans l'approximation $a \ll \rho$ (tore de faible section), permettant de considérer les champs magnétiques uniformes au sein du tore. Déterminer alors l'expression :
 - du coefficient d'inductance mutuelle M ;
 - du coefficient d'inductance propre L .