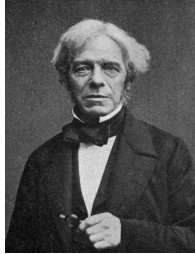




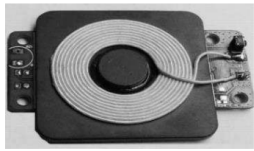
Thème I. Ondes et signaux (Induction)

Chapitre n°23 Lois de l'induction

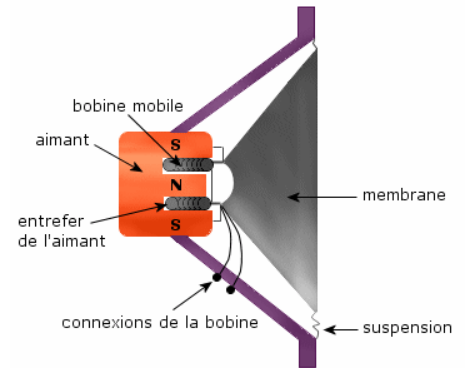


À gauche, Michaël Faraday (1791-1867), physicien anglais, qui a travaillé sur la production d'électricité, l'électromagnétisme et l'induction

À droite, Heinrich Lenz, physicien allemand (1804-1865), il énonça en 1833 la loi qui porte son nom sur l'interaction entre un courant électrique et un champ magnétique.



Principe de fonctionnement d'une plaque à induction. Une bobine située sous la plaque engendre un champ magnétique variable. Des courants de Foucault s'établissent alors dans le fond de la casserole, qui s'échauffe par effet Joule.



Pré-requis

- PCSI
 - Chapitre n°21. Champ magnétique.

Objectifs du chapitre

Un très grand nombre d'applications (hauts-parleurs, plaques à induction, transformateurs, moteurs électriques, freins électriques dans les bus et les poids-lourds ...) reposent sur le phénomène d'induction régit par la loi de Faraday. Les applications seront vues dans les deux chapitres suivants.

On commencera ici par mettre en évidence les phénomènes d'induction au travers plusieurs expériences. Puis, on généralisera les résultats observés avec la loi de Lenz et la loi de Faraday qui nécessite l'introduction de la notion de flux du champ magnétique.

Plan du cours

I Observations expérimentales 2

II Loi de modération de Lenz 3

II.1 Retour sur les expériences 3

II.2 Énoncé de la loi de modération de Lenz . 4

III Loi de Faraday 5

III.1 Vecteur surface 5

III.2 Flux du champ magnétique 5

III.3 Énoncé de la loi de Faraday 8

Ai-je bien appris mon cours ?

- 1 – 😊 – 😞 – Énoncer la loi de Lenz.
- 2 – 😊 – 😞 – Utiliser la loi de Lenz pour prédire le signe du courant dans une boucle dont on approche/éloigne un aimant.
- 3 – 😊 – 😞 – Définir le flux d'un champ magnétique uniforme à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté plan.
- 4 – 😊 – 😞 – Énoncer la loi de Faraday.
- 5 – 😊 – 😞 – Dans quel sens doit on placer le générateur induit dont la fem est donnée par la loi de Faraday ?
- 6 – 😊 – 😞 – Que doit-on faire en priorité sur un circuit siège d'un phénomène d'induction ?



FlashCards :

I Observations expérimentales

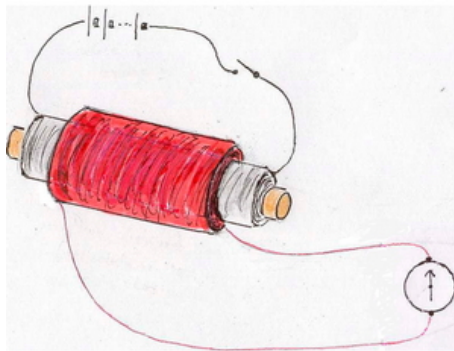
Capacité exigible : Décrire, mettre en œuvre et interpréter des expériences illustrant les lois de Lenz et de Faraday.

Expérience de Faraday

Article : <http://www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique/zoom/faraday/induction/index.php>

Vidéo : <http://www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique/zoom/video/faradaymagnetisme/video/faradaymagn.php>

En 1831, Faraday^a se demanda si un champ magnétique pouvait être à l'origine d'un courant électrique, puisque la réciproque avait été mise en évidence quelques années plus tôt (par physicien danois Oersted en 1820). Il réalisa l'expérience schématisée ci-dessous :



La première bobine, dite circuit primaire, était branchée aux bornes d'une pile avec un interrupteur ; la deuxième bobine, dite circuit secondaire, était branchée aux bornes d'un galvanomètre. Les résultats étaient d'abord complètement négatifs. Il utilisa ensuite une batterie plus puissante, formée par une centaine de piles. Même alors, l'effet était faible et fugitif ; mais il considéra que son existence même était suffisante. Faraday trouva que le galvanomètre déviait dans un sens, juste pendant un instant, quand l'interrupteur était fermé et revenait à zéro presque immédiatement, malgré le courant constant dans le primaire. Lorsqu'il ouvrait l'interrupteur pour couper le courant primaire, le galvanomètre du secondaire déviait de nouveau, mais dans le sens opposé, et revenait rapidement à zéro.

Remplaçant le noyau de bois par un noyau ferromagnétique « pour concentrer la force magnétique », Faraday enroula deux bobines autour d'un noyau de fer doux. L'effet devint alors incontestable : un champ magnétique variable engendre bel et bien un courant électrique. Faraday fut convaincu, en continuant à étudier ce phénomène, que la variation était l'aspect essentiel de l'induction électromagnétique.

Joseph Henry avait réalisé une expérience similaire mais plus poussée une année auparavant mais n'avait pas publié d'articles dessus.

^a. Micheal Faraday, 1791-1867, physicien anglais, célèbre pour ses travaux fondateurs en électromagnétisme. Il fût membre de la Royal Society, où il fonda les leçons du vendredi, toujours en vigueur. Il contribua aussi à l'étude de l'électrochimie, et fût professeur de chimie à l'académie militaire de Wollwich.

Les expériences réalisées ci-dessus mettent en évidence le **phénomène d'induction électromagnétique** qui se manifeste par l'apparition d'un courant dans un circuit fermé (ou d'une tension aux bornes d'un circuit ouvert) sans qu'il n'y ait de générateur à l'intérieur du circuit. Le phénomène d'induction se produit lorsque :

- le circuit est fixe dans un champ magnétique dépendant du temps → chapitre n°24
- le circuit est mobile (ou déformable) dans un champ magnétique permanent (stationnaire) → chapitre n°25

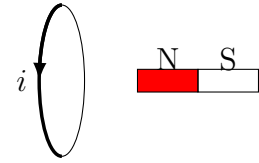
(ou une combinaison des 2 : hors programme)

II Loi de modération de Lenz

II.1 Retour sur les expériences

Expérience avec un aimant

On considère un aimant et un circuit conducteur. On mesure l'intensité i circulant dans le circuit à l'aide d'un ampèremètre branché de sorte à mesurer l'intensité définie sur le schéma, c'est-à-dire de sorte que i entre par la borne mA et sorte par la borne COM. Voici les observations effectuées :



- Si l'aimant et le circuit sont immobiles, on n'observe aucun courant.
- Si le circuit est immobile et que l'on approche le pôle nord de l'aimant : $i > 0$.
- Si le circuit est immobile et que l'on éloigne le pôle nord de l'aimant : $i < 0$.
- Si l'aimant est immobile et que l'on approche le circuit du pôle nord : $i > 0$.
- Si l'aimant est immobile et que l'on éloigne le circuit du pôle nord : $i < 0$.

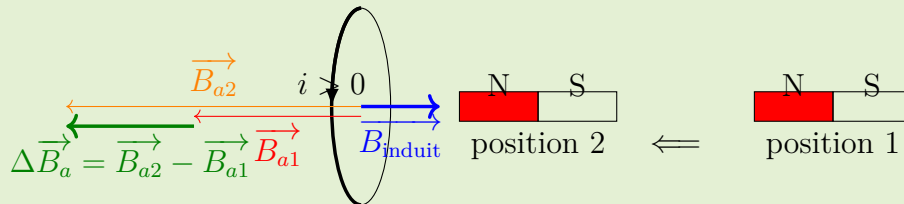
Activité n°1 – Interprétation des expériences

On rappelle que le champ magnétique est orienté le long des lignes de champs qui vont du pôle Nord vers le pôle Sud. Par ailleurs, le champ est plus intense proche de l'aimant. Ainsi, lorsque l'on approche un aimant d'une spire avec le pôle Nord en avant, le champ ressenti à travers celle-ci augmente.

On cherche à interpréter les observations faites lors des expériences et aboutir ainsi à la loi de Lenz. On s'intéresse à la première situation : on approche le pôle nord de la spire.

R1. Comment évolue le champ magnétique ressenti par la spire lorsqu'on approche l'aimant ? Indiquer sur le schéma la variation du champ magnétique ressenti lors de l'approche de l'aimant ?

Solution: Lorsque l'on approche l'aimant, le champ magnétique ressenti par la spire augmente.



R2. D'après le signe de i observé, comment est le champ magnétique induit \vec{B}_{induit} (créé par i) ? Le représenter.

Solution: le sens du champ magnétique induit créé par le courant i se détermine avec la règle de la main droite.

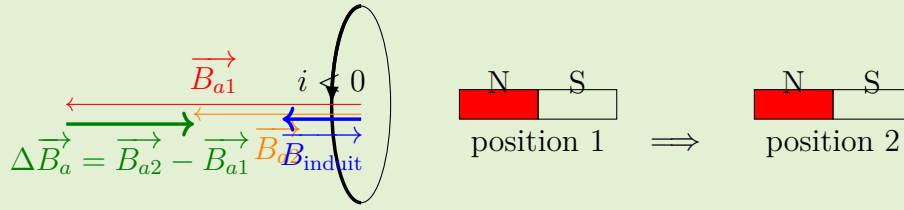
Avec $i > 0$ dans le sens indiqué, il faut placer les 4 doigts autres que le pouce autour de la spire avec le courant entrant par la base des doigts et sortant par les ongles, le pouce donne alors le sens de \vec{B}_{induit} .

R3. Comparer le sens du champ magnétique induit et le sens de la variation du champ magnétique ressenti lors de l'approche de l'aimant.

Solution: On constate que le champ magnétique induit est dans le sens au vecteur variation du champ magnétique ressenti par la spire.

R4. Reprendre les trois questions précédentes dans le cas où on éloigne l'aimant.

Solution: Lorsque l'on éloigne l'aimant, le champ magnétique ressenti par la spire diminue.



II.2 Énoncé de la loi de modération de Lenz

Capacité exigible : Utiliser la loi de Lenz pour prédire ou interpréter les phénomènes physiques observés.

♥ À retenir : Loi de modération de Lenz (1833)

Les effets produits par un phénomène d'induction s'opposent toujours aux causes qui leur ont donné naissance.

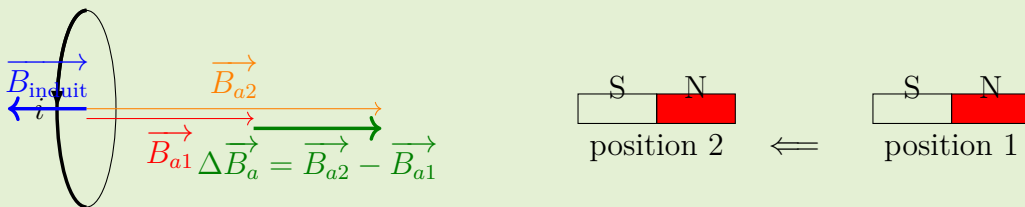
La loi de modération de Lenz permet de prédire le sens du courant induit ou de l'expliquer dans un circuit siège du phénomène d'induction.

🍃 Activité n°2 – Utilisation de la loi Lenz

On reprend la même expérience que précédemment. L'aimant est toujours approché par la droite de la spire, et l'intensité du courant est toujours définie dans le même sens.

R1. Prédire le signe du courant induit dans la spire si on approche le pôle Sud de l'aimant.

Solution: Lorsque l'on approche l'aimant, le champ magnétique ressenti par la spire augmente.



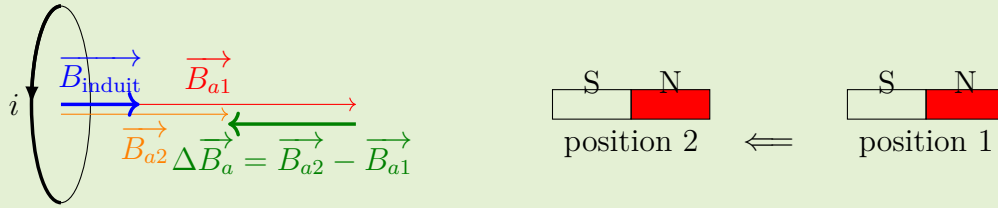
Compte tenu de l'approche de l'aimant et du sens du champ magnétique du côté du pôle sud de l'aimant, on en déduit le sens de $\Delta \vec{B}_a$.

La variation $\Delta \vec{B}_a$ du champ magnétique ressenti par l'aimant est la cause du phénomène d'induction qui donne naissance au courant induit qui donne naissance au champ magnétique induit. La loi de Lenz nous dit que le champ magnétique induit s'oppose à la cause qui lui a donné naissance, donc à $\Delta \vec{B}_a$.

La règle de la main droite nous donne donc que le courant induit, dans le sens indiqué, est négatif.

R2. Prédire le signe de i si on éloigne l'aimant, le pôle Sud étant du côté de la spire.

Solution: Lorsque l'on éloigne l'aimant, le champ magnétique ressenti par la spire diminue.



Compte tenu de l'éloignement de l'aimant et du sens du champ magnétique du côté du pôle sud de l'aimant, on en déduit le sens de $\Delta \vec{B}_a$.

La variation $\Delta \vec{B}_a$ du champ magnétique ressenti par l'aimant est la cause du phénomène d'induction qui donne naissance au courant induit qui donne naissance au champ magnétique induit. La loi de Lenz nous dit que le champ magnétique induit s'oppose à la cause qui lui a donné naissance, donc à $\Delta \vec{B}_a$.

La règle de la main droite nous donne donc que le courant induit, dans le sens indiqué, est positif.

III Loi de Faraday

Dans les expériences précédentes, c'est la variation du « flux du champ magnétique » qui provoque l'apparition du phénomène d'induction. La partie suivante définit ce qu'est le flux du champ magnétique et énonce ensuite la loi de Faraday. La notion du flux d'un champ vectoriel sera étendu à de nombreux autres champs l'année prochaine.

III.1 Vecteur surface



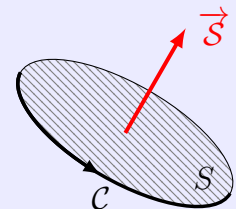
Définition : Vecteur surface

On considère une **surface S** s'appuyant sur un **contour fermé orienté plan C** .

On commence par **orienter le contour C** (on lui donne un sens) sur lequel s'appuie la surface S .

On définit le **vecteur surface \vec{S}** qui est :

- perpendiculaire à la surface ;
- de sens donné par la règle de la main droite à partir de l'orientation du contour C : les doigts de la main droite suivent le parcours, orienté de la base des doigts à l'extrémité, le pouce donne alors le sens du vecteur \vec{S} ;
- et de norme égale à la surface S .



III.2 Flux du champ magnétique

Capacité exigible : Évaluer le flux d'un champ magnétique uniforme à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté plan.

Définition : Flux d'un champ magnétique uniforme

Le **flux du champ magnétique** \vec{B} à travers une surface S orientée est défini par

$$\varphi = \iint_{M \in S} \vec{B}(M) \cdot d\vec{S}_M$$

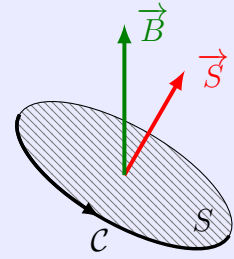
Si le **champ magnétique** est **UNIFORME**, le flux s'exprime selon :

$$\varphi = \vec{B} \cdot \vec{S}$$

avec \vec{S} le vecteur surface de la surface plane orientée.

Unité : weber^a, Wb (1 Wb = 1 T · m²)

a. En l'honneur de Wilhelm Eduard WEBER, 1804-1891, physicien allemand, professeur et directeur de l'observatoire de l'université de Göttingen, connu pour ses travaux sur l'électrodynamique.



REMARQUES

■ Le flux magnétique est une **grandeur ALGÈBRIQUE**, et peut donc être positif ou négatif. Le signe dépend du choix d'orientation de la surface (et donc de l'orientation du contour sur lequel la surface repose), par rapport au sens du champ magnétique.

■ Si le flux du champ magnétique traverse N spires identiques (chacune de vecteur surface \vec{S}), alors le flux vaut :

$$\varphi_N = N\varphi_{1 \text{ spire}} = N\vec{B} \cdot \vec{S}$$

Méthode : Calculer le flux d'un champ magnétique uniforme

Soit un circuit filiforme plan plongé dans un champ magnétique uniforme. Pour calculer le flux du champ magnétique uniforme à travers ce circuit :

1. AVANT TOUTE CHOSE, il faut orienter le circuit : indiquer le sens choisi par une flèche sur le circuit ;

2. Écrire la définition du flux $\varphi = \iint_{M \in S} \vec{B}(M) \cdot d\vec{S}_M$

3. Si le champ magnétique est uniforme :

a) Définir le vecteur surface \vec{S} , perpendiculaire au plan du circuit orienté à partir du sens du circuit par « la règle de la main droite » et de norme égale à l'aire du circuit ;

b) Calculer le produit scalaire $\vec{B} \cdot \vec{S}$;

4. Sinon :

a) Exprimer $d\vec{S}_M$ dans la base adéquate.

b) Calculer l'intégrale.

5. Si le circuit est constitué de N spires identiques, le flux au travers le circuit est égal à N fois le flux calculé précédemment au travers une spire.

Activité n°3 – Flux de champs magnétiques uniformes

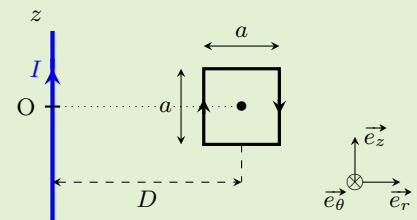
Déterminer l'expression du flux du champ magnétique en fonction de la norme du champ magnétique, notée B , et la surface S . \vec{B} est uniforme.

$\varphi = BS > 0$	$\varphi = -BS < 0$	$\varphi = -BS < 0$	$\varphi = BS > 0$
$\varphi = BS \cos(\alpha) > 0$	$\varphi = -BS \cos(\alpha) < 0$	0	$\varphi = BS \cos(\alpha) > 0$

Activité n°4 – Flux d'un champ non uniforme

R1. Considérons un fil rectiligne infiniment long suivant l'axe (Oz), parcouru par un courant d'intensité I circulant dans le sens des z croissants.
Le champ magnétique créé par ce fil, en un point M à la distance r de l'axe (Oz), est :

$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \vec{u}_\theta$$



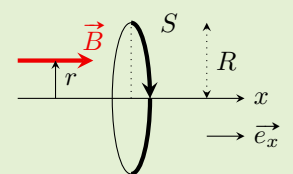
On donne le vecteur surface élémentaire au niveau de la spire $d\vec{S} = dr dz \vec{u}_\theta$.

Exprimer le flux de ce champ à travers le cadre carré de côté a orienté comme indiqué sur la figure.

Solution: Flux à travers la spire carrée :

$$\begin{aligned} \varphi &= \iint_{\text{spire}} \vec{B}(M) \cdot d\vec{S}_M \\ &= \iint_{\text{spire}} \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \vec{u}_\theta \cdot dr dz \vec{u}_\theta \\ &= \int_{r=D-a/2}^{D+a/2} \int_{z=0}^a \frac{\mu_0 I}{2\pi r} dr dz \\ &= \int_{r=D-a/2}^{D+a/2} \frac{\mu_0 I}{2\pi r} dr \int_{z=0}^a dz \\ &= \frac{\mu_0 I a}{2\pi} \ln\left(\frac{D+a/2}{D-a/2}\right) \end{aligned}$$

R2. On considère un champ magnétique \vec{B} défini par $\vec{B}(M) = B_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \vec{u}_x$,
où M est repéré à l'aide des coordonnées cylindriques r, θ et x . Ainsi, r est la distance du point à l'axe (Ox).



On donne le vecteur surface élémentaire au niveau de la spire $d\vec{S} = r d\theta dr \vec{u}_x$.

Exprimer le flux du champ magnétique à travers le disque de rayon R et d'axe (Ox) orienté comme sur la figure.

Solution: Flux à travers la spire :

$$\begin{aligned}
 \varphi &= \iint_{\text{spire}} \vec{B}(M) \cdot d\vec{S}_M \\
 &= \iint_{\text{spire}} B_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \vec{u}_x \cdot r \, d\theta \, dr \vec{u}_x \\
 &= \int_{r=0}^R \int_{\theta=0}^{2\pi} B_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) r \, d\theta \, dr \\
 &= \int_0^R B_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) r \, dr \int_0^{2\pi} d\theta \\
 &= B_0 \left(\frac{R^2}{2} - \frac{R^4}{4R^2}\right) \times 2\pi \\
 &= B_0 \pi \frac{R^2}{4}
 \end{aligned}$$

III.3 Énoncé de la loi de Faraday

Capacité exigible : Utiliser la loi de Faraday en précisant les conventions d'algébrisation.

En 1831, Michael Faraday (physicien anglais) déduisit de ses expériences la loi suivante, qui porte maintenant son nom.

♥ À retenir : Loi de Faraday (1831)

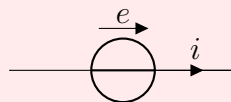
Le courant induit dans un circuit fermé siège d'un phénomène d'induction est égal à celui que produirait un générateur fictif, dit générateur induit, dont la force électromotrice (fem), notée e , appelée fem induite, est égale à

$$e = - \frac{d\varphi}{dt}$$

avec

- φ le flux du champ magnétique à travers la surface s'appuyant sur le circuit,
- e la fem induite en Volt (V)

Le **générateur fictif** est placé **en convention** générateur : la flèche de la tension de la fem induite est dans le même sens que la flèche du courant qui oriente le circuit.



REMARQUES

- Ce sont les **variations de flux de champ magnétique** qui sont à l'origine des courants induits et non les flux de champ magnétique.
Un fil relié sur lui même posé sur une table (dans le champ magnétique terrestre) est traversé par un flux de champ magnétique mais aucun courant n'y circule.
- Pour faire varier le flux, on peut faire varier la surface du circuit et/ou le champ magnétique au cours du temps.
On distinguera les phénomènes mettant en jeu des **circuits mobiles/ déformables dans des champs magnétiques uniformes** : on parle d'induction de Lorentz, des phénomènes mettant en jeu de **circuit indéformables et fixes dans des champs magnétiques variables** : on parle d'induction de Neumann (expérience aimant+spire).
- Lorsqu'un courant induit apparaît dans un circuit, il devient source d'un champ magnétique \vec{B}_{ind} appelé champ magnétique induit. La loi de Faraday s'entend avec le flux du champ magnétique total, c'est-à-dire comprenant les champ magnétique induit. Le phénomène est donc complexe car les conséquences rétroagissent sur les causes. Cependant, dans la plupart des problèmes, nous considérerons que le champ magnétique induit est négligeable devant les autres sources de champ magnétique.
- Il est capital de ne pas oublier le \ominus devant la dérivée du flux (cf loi de Lenz).

⚠ Attention

Il faut être très vigilant aux ORIENTATIONS.

Pour cela, il faut, **orienter le circuit dès le début** (lui donner un sens), qui donne le sens du courant (dont l'intensité peut être négative ou positive).

Cette orientation impose :

- le sens du vecteur surface, et donc le signe du flux ;
- le sens de la fem induite (en convention générateur par rapport au sens du courant).

💡 Méthode : Comment utiliser la loi de Faraday ?

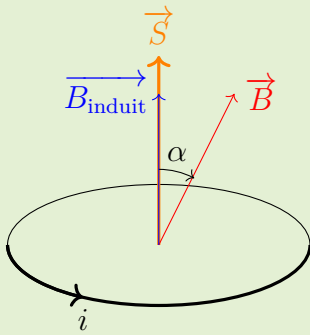
1. AVANT TOUTE CHOSE, il faut orienter le circuit : indiquer le sens choisi par une flèche sur le circuit ;
2. Exprimer le flux φ du champ magnétique à travers le circuit ;
3. Écrire la loi de Faraday pour exprimer la fem induite e ;
4. Représenter le circuit étudié siège de l'induction en ajoutant dans le circuit la fem induite dans le sens d'orientation choisi à l'étape 1.

🌀 Activité n°5 – Spire dans $\vec{B}(t)$

On considère une spire circulaire de rayon a plongée dans un champ magnétique uniforme $\vec{B} = \vec{B}_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$ incliné d'un angle α par rapport à l'axe de la spire (perpendiculaire au plan de la spire et passant par son centre). \vec{B}_0 est un vecteur constant.

R1. Exprimer le flux du champ magnétique à travers la spire.

Solution:



Flux de \vec{B} à travers la spire circulaire :

$$\varphi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B_0 \pi a^2 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

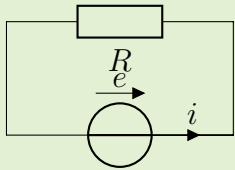
R2. Exprimer la fem induite.

Solution: D'après la loi de Faraday, le courant induit dans la spire est celui qui serait créé par un générateur fictif de fem

$$e = -\frac{d\varphi}{dt} = \frac{B_0 \pi a^2}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

R3. Faire le schéma électrique équivalent si la spire est de résistance R et exprimer l'intensité $i(t)$ dans la spire.

Solution:



Loi des mailles : $e - Ri = 0$, donc

$$i = \frac{e}{R} = \frac{B_0 \pi a^2}{\tau R} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

R4. Vérifier la cohérence sur $i(t)$ avec la loi de Lenz.

Solution: D'après la relation précédente, $i(t) > 0$ et on détermine le champ magnétique induit par la règle de la main droite.

Ce signe est cohérent avec la loi de Lenz, en effet, le flux du champ magnétique diminue au cours du temps : c'est la cause du phénomène d'induction, donc l'effet : l'apparition du champ magnétique induit, s'oppose à la cause, et tend donc à « atténuer la diminution. »