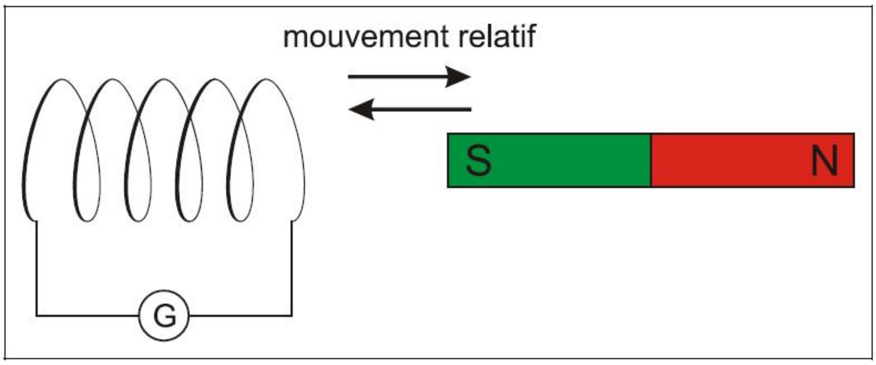
Leçon n°7 : Induction électromagnétique

1. Mise en évidence du phénomène d'induction magnétique

1.1. Expérience °1



1) Introduisons un aimant dans une bobine connectée à un galvanomètre (= ampèremètre sensible à cadre mobile, dont l'aiguille dévie soit vers la droite soit vers la gauche selon le sens du courant).

Observation : Un courant circule dans la bobine pendant la durée du mouvement de l'aimant.

2) Retirons l'aimant.

Observation : Le courant circule dans le sens opposé.

3) Maintenons l'aimant immobile dans la bobine.

Observation : Rien ne se passe.

4) Maintenons l'aimant fixe et approchons la bobine.

Observation : la même que 1).

5) Maintenons l'aimant toujours immobile, et éloignons la bobine.

Observation : la même que 2).

1.2. Terminologie

Le phénomène observé s'appelle induction électromagnétique.

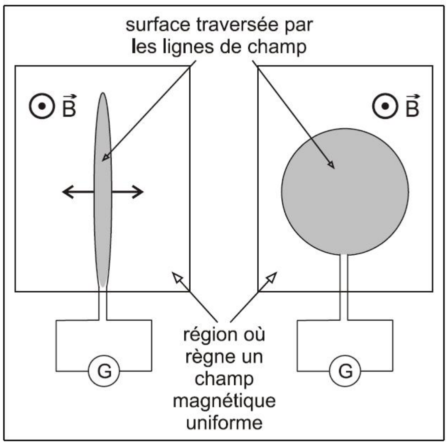
Le courant observé s'appelle courant induit. Son intensité, généralement variable dans le temps, est notée "i".

La bobine dans laquelle le courant induit circule est la bobine induite.

De même que tout courant est dû à une tension, le courant induit est dû à une tension induite appelée force électromotrice induite ou f. é. m. induite.

1.3. Expérience n°2

1) On place une boucle formée par un fil conducteur et reliée à un galvanomètre dans le champ magnétique d'un aimant en U. Initialement la boucle est aplatie de sorte que la surface traversée par les lignes de champ est faible. Etirons cette boucle pour que la surface traversée par les lignes de champ s'agrandisse.

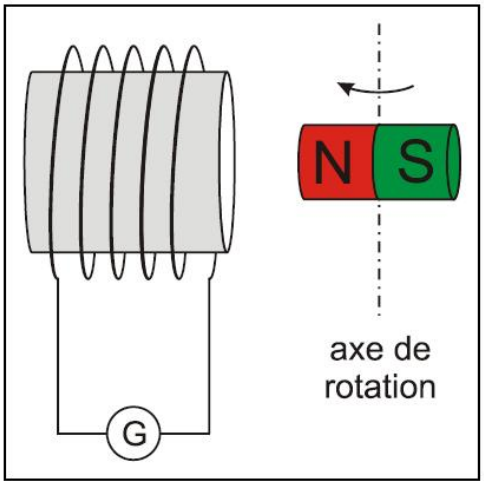


Observation : Un courant induit circule dans la boucle pendant la durée où la boucle s'agrandit.

2) Comprimons la boucle afin de réduire la surface traversée par les lignes de champ.
Observation : Le courant induit circule dans le sens opposé.

1.4. Expérience n°3

Plaçons un aimant horizontal, mobile autour d'un axe vertical, près d'une bobine d'axe horizontal, connectée à un galvanomètre. Faisons tourner cet aimant à vitesse angulaire constante.



Observation : Un courant induit circule dans la bobine dans un sens, puis dans l'autre, puis de nouveau dans le premier sens, et ainsi de suite : la bobine est parcourue par un courant alternatif de fréquence égale à celle du mouvement de rotation.
On fait la même observation si l'aimant est fixe et que la bobine tourne à vitesse angulaire constante.

1.5. Conclusion

On observe l'apparition d'un courant induit dans un circuit fermé si :

1) l'intensité ou la direction d'un champ magnétique à travers ce circuit varie;
2) la surface délimitée par le circuit traversé par le champ varie.

Si le circuit est ouvert une f. é. m. (tension) apparaît aux bornes du circuit.

2. Flux magnétique

La conclusion précédente nous suggère que le phénomène de l'induction électromagnétique se manifeste dans un circuit dès que le nombre de lignes de champ à travers ce circuit varie.
Les physiciens ont défini une grandeur physique appelée flux magnétique Φ_m qui est justement une mesure du nombre de lignes de champ passant à travers un circuit.
Comme B est une mesure de la densité des lignes de champ, Φ_m est proportionnel à B et à S.

Le flux d'un champ magnétique $\vec{B}$ à travers une surface S est défini par :

$$\boxed{\Phi m = \int_{(S)} \vec{B}.\,d\vec{S} = \int_{(S)} \vec{B}.\vec{n}\ dS}$$

où :

- Φ_m est le flux magnétique à travers le circuit (l'unité du flux est le Weber : Wb)
- (S) est la surface délimitée par le circuit électrique.
- $\vec{S} = \int_{(S)} d\vec{S} = \int_{(S)} \vec{n}\ dS$ est le vecteur surface dont les caractéristiques sont les suivantes :
  - point d'application : le centre de la surface
  - direction : perpendiculaire à la surface
  - sens : déterminé par la règle de la main droite : les doigts courbés indiquent le sens + et le pouce indique le sens de S
  - norme : la valeur S de la surface (en m^2)

<u>Remarques</u>

1) Si la surface est délimitée par un circuit bobiné comportant N spires, la surface totale vaut N fois la surface d'une spire, et on a : $\Phi_t = N\,\Phi_m$.
2) Le flux magnétique peut aussi s'écrire sous la forme : $\Phi_m = \vec{B}.\,\vec{S}$
3) **Cas particuliers** :

1) Si $\vec{B}$ est parallèle à $\vec{B}$ alors $\Phi_m = \int_{(S)} \vec{B}.\vec{n}\ dS = \vec{B}.\vec{S} = B.S$

2) S'il existe un angle α quelconque entre $\vec{B}$ et $\vec{S}$, alors $\Phi_m = \vec{B}.\vec{S} = B.S.\cos\alpha$

3) Si $\vec{B}$ et $\vec{S}$ sont perpendiculaires (aucune ligne de champ ne traverse S !) alors $\Phi_m = 0$.

3. Loi d'induction de Faraday

La f.e.m induite dans un circuit ζ est proportionnelle à la dérivée par rapport au temps du flux magnétique à travers le circuit.

Enoncé qui s'écrit ainsi :

$$\boxed{\zeta = -\frac{d\Phi_m}{dt}}$$

Application

Une bobine comporte 200 spires de fil enroulées sur le périmètre d'un cadre carré de 18 cm de côté. Toutes les spires ont la même surface et la résistance totale de la bobine est de 2 Ω. On applique un champ magnétique uniforme perpendiculairement au plan de la bobine. Sachant que le champ varie de façon linéaire de 0 à 0,5 Wb/m² en 0,8 s

a) déterminer la grandeur de la f.e.m induite dans la bobine au cours de la variation du champ.

b) quelle est la grandeur du courant induit dans la bobine au cours de la variation du champ.

Solution

a) La surface d'une spire est S = (0,18 m)² = 0,0324 m²

$$\text{à} \begin{cases} t = 0 & \rightarrow B = 0 \\ t = 0{,}8\,s & \rightarrow B = 0{,}5\ \text{Wb/m}^2 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \Phi_m(t=0\,s) = 0\ \text{Wb} \\ \Phi_m(t=0{,}8\,s) = BS = (0{,}5\ \text{Wb/m}^2)(0{,}0324\,\text{m}^2) = 0{,}0162\ \text{Wb} \end{cases}$$

La valeur absolue de la fem induite est égale à $|\zeta| = \dfrac{N\,\Delta\Phi_m}{\Delta t}$

Application numérique :

$$|\zeta| = \frac{200 \times (0{,}0162 - 0)}{0{,}8 - 0} = 4{,}05\ \text{V}$$

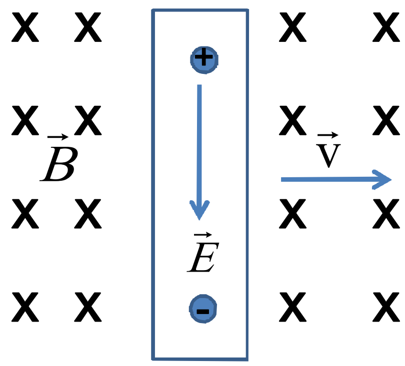
b) Détermination du courant

$$I = \frac{|\zeta|}{R} = \frac{4{,}05\ \text{V}}{2\ \Omega} = 2{,}025\ \text{A}$$

4. Force électromotrice induite dans un conducteur en mouvement

Un conducteur en mouvement dans un champ magnétique permet aussi d'obtenir une f.e.m induite

Soit un conducteur rectiligne de longueur ℓ se déplaçant à vitesse constante $\vec{v}$ dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ et tel que son mouvement soit toujours perpendiculaire à $\vec{B}$.



$\vec{B}$ est ici dirigé vers le dos de la feuille.

Les charges libres du conducteur, c'est-à-dire essentiellement les électrons dans un conducteur métallique, subissent alors une force dirigée le long du conducteur donnée par la relation :

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

pour chaque charge q.

Sous l'action de cette force, les électrons se déplacent vers l'extrémité inférieure du conducteur et s'y accumulent, ce qui entraîne la création d'une charge nette positive à l'extrémité supérieure.

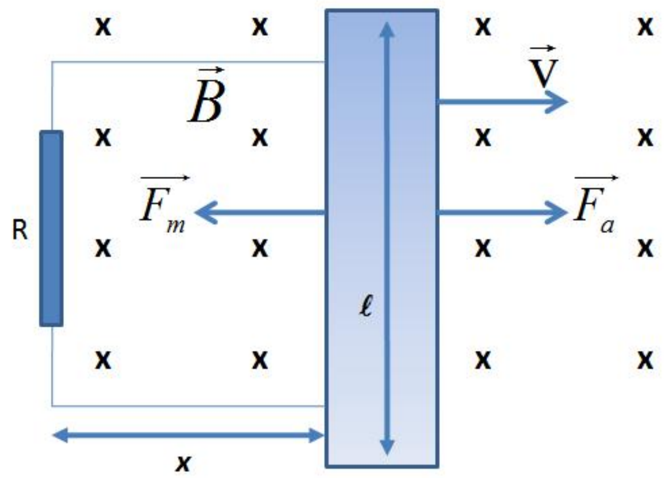
La séparation des charges produit un champ électrique à l'intérieur du conducteur. Cette accumulation cesse lorsque la force magnétique (q v B) est contrebalancée par la force électrique (q E). On a alors

$$q\,v\,B = q\,E$$

et une différence de potentiel ΔV entre les extrémités :

$$\Delta V = E\ell = B\,v\,\ell$$

Supposons maintenant que ce conducteur en mouvement fasse partie d'une boucle d'un circuit électrique. Les charges libres contenues dans la tige subissent l'action d'une force magnétique (q v B) s'exerçant le long de la tige.



Cette force met en mouvement les charges libres produisant un courant induit I. On a donc une variation de la surface de la boucle et donc une variation du flux magnétique.
Le flux magnétique est par définition égal à :

$$\Phi_m = \vec{B}.\vec{S} = B\,\ell\,x$$

La fem induite est telle que :

$$\zeta = -\frac{d\Phi_m}{dt} = -\frac{d(B\ell x)}{dt} = -B\ell\frac{dx}{dt} = -B\ell v$$

Le courant induit est par conséquent égal à :

$$I = \frac{|\zeta|}{R} = \frac{B v \ell}{R}$$

L'énergie électrique qui apparait dans ce système provient de l'énergie apportée par le travail de la force appliquée $\vec{F_a}$. A mesure que le conducteur se déplace à travers le champ magnétique uniforme $\vec{B}$, celui-ci subit une force magnétique $\vec{F_m}$ de grandeur ($I\,\ell\,B$).

Pour que la tige se déplace à vitesse constante, la force appliquée doit être égale à la force magnétique. (Force appliquée vers la droite de la figure).

$$\boxed{F_a = F_m = I\,\ell\,B}$$

La puissance développée par la force appliquée est égale à :

$$P = \frac{dW}{dt}$$

Or :

$$dW = F_a\,dx \Rightarrow P = F_a\,\frac{dx}{dt} = F_a\,v$$

On peut donc écrire que :

$$P = F_a\,v = (I\,\ell\,B)\,v = \left(\frac{B\,\ell\,v}{R}\right)\ell\,B\,v = R\left(\frac{B\,\ell\,v}{R}\right)^2 = R\,I^2$$

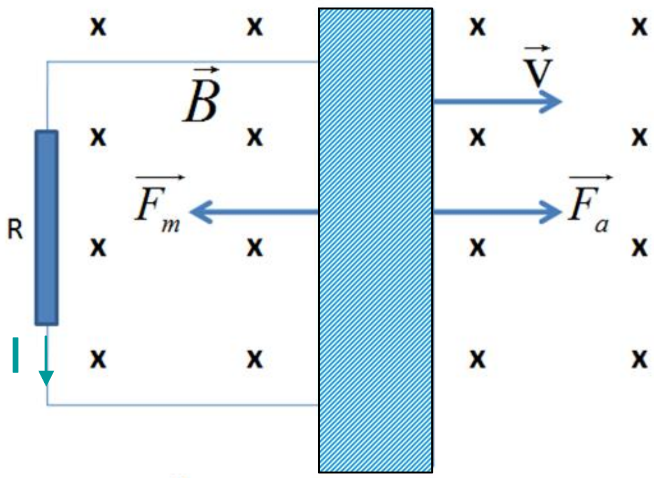
On voit que la puissance développée par $\overrightarrow{F_a}$ est égale au taux de dissipation de l'énergie dans la résistance R, c'est-à-dire RI^2.

Elle également équivalente à la puissance ζI fournie par la f.e.m induite.

5. Loi de Lenz

Le sens de la f.e.m induite et celui du courant induit dans un circuit peuvent être déterminés au moyen de la loi de Lenz, dont l'énoncé est :

« Le sens de la f.e.m induite est tel qu'elle tente de faire circuler dans le circuit un courant induit dont le flux s'oppose à la variation du flux à travers le circuit ».



Lorsque la tige conductrice glisse vers la droite sur les deux rails conducteurs fixes, le flux magnétique à travers la boucle augmente avec la surface intérieure. D'après la loi de Lenz le courant induit doit être dans le sens anti horaire de manière à produire un flux compensatoire sortant du plan de la page.

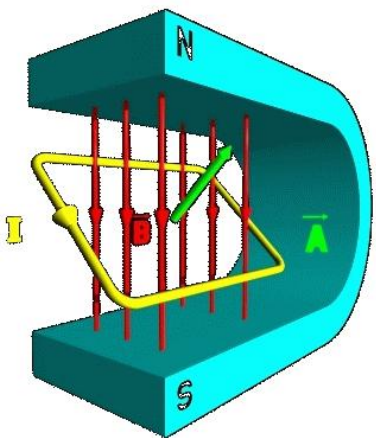
On peut aussi dire que le courant induit est dans le sens qui produit une force magnétique $\overrightarrow{F_m}$ opposée à la force extérieure. Si l'inverse était vrai, l'énergie ne serait pas conservée.

6. Générateurs et moteurs

Tous fonctionnent suivant le principe de l'induction électromagnétique.

6.1. Générateur à courant alternatif

Soit une boucle constituée tournant à la vitesse angulaire constante ω dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$. L'aimant servant à produire un champ $\vec{B}$ dans l'entrefer.



Ce dispositif permet de convertir de l'énergie mécanique en énergie électrique. Dans son principe, le générateur est constitué d'une boucle conductrice tournant autour d'un axe dans un champ magnétique. Lorsque la boucle tourne, le flux magnétique qui la traverse varie en fonction du temps, induisant une f.e.m et un courant dans le circuit extérieur qui prolonge le circuit de la boucle grâce à des bagues collectrices qui tournent en même temps que la boucle.

Le flux magnétique pour une spire est égal à :

$$\Phi_m = B\ S \cos\theta = B\ S \cos\omega t$$

Ou ω est la vitesse angulaire constante et donc $\theta = \omega t$

Pour N spires, la f.e.m induite est :

$$\boxed{\xi = -\ N \frac{d\ \Phi_m}{dt} = N\ S\ B\ \omega \sin\omega t} \quad (3)$$

On note que la f.e.m varie de façon sinusoïdale en fonction du temps t.

Application

Un générateur de courant alternatif comprend 8 spires de 0,09 m^2 de surface et une résistance totale de 12 Ω. La boucle tourne dans un champ magnétique B = 0,5 T à 50 Hz de fréquence.

a) Déterminer la f.e.m induite.

b) Quelle est la valeur maximale du courant ?

Solution

a) Calculons tout d'abord la vitesse angulaire ω

$\omega = 2\ \pi\ f = 2 \times 3.14 \times (50\text{Hz}) = 314$ Hz

La f.e.m induite par N spires ξ est telle que :

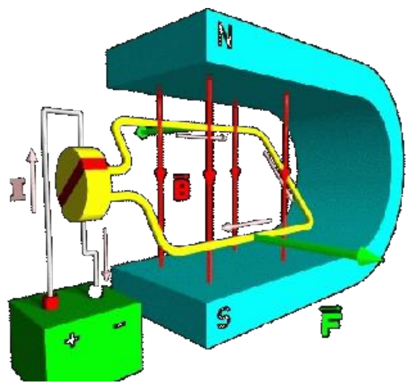
$$\xi = -\ N \frac{d\ \Phi_m}{dt} = N\ S\ B\ \omega \sin\omega t$$

Application numérique : $\zeta = 8.(0{,}09\ m^2)\ (0{,}5T)\ (314\ Hz) \sin\omega t = 113 \sin\omega t$ (Volt)

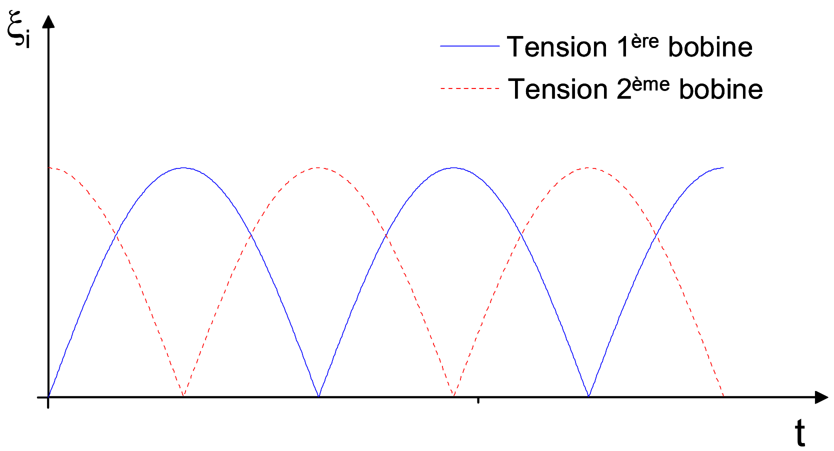
b) $I_{max} = \frac{\zeta_{max}}{R} = \frac{113}{12} = 9{,}42$ A

6.2. Générateur à courant continu

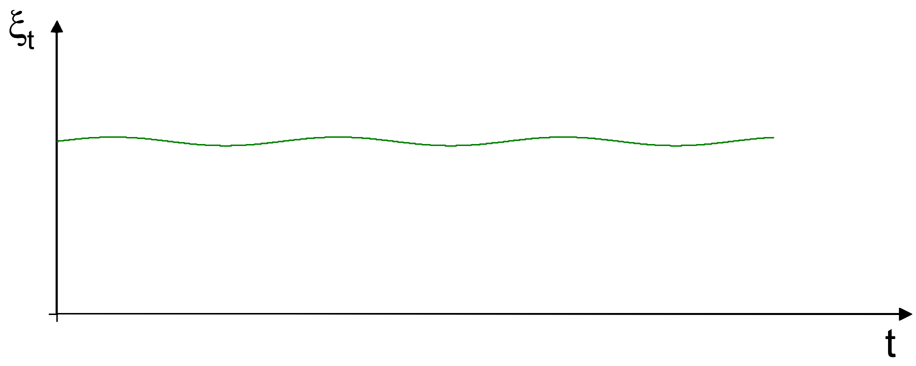
Il est composé des mêmes éléments que le générateur à courant alternatif sauf que les contacts avec la boucle en rotation s'effectuent au moyen d'une bague collectrice sectionnée, désignée bague commutatrice. Ainsi la tension de sortie que l'on appliquera au circuit extérieur aura toujours la même polarité.



On note que la tension fluctue de manière périodique.



Pour obtenir un courant continu plus constant, on dispose plusieurs bobines autour de l'axe avec des commutateurs de manière à ce qu'un certain déphasage des tensions produites par chacune d'entre elles autorise une superposition des tensions réalisant une fem ζ_t pratiquement exempte de fluctuations.



6.3. Moteurs

Habituellement, les moteurs sont d'une construction similaire à celle des générateurs. On pourrait presque les présenter comme des générateurs «à fonctionnement inverse». Comme sur les générateurs, les moteurs sont dotés du même type de commutateur. Lorsqu'on fait passer un courant dans l'induit d'un moteur, un couple se crée par réaction magnétique et l'induit tourne. La rotation de l'induit produit une tension dans ses enroulements. Cette tension induite, de signe contraire à celle appliquée à l'induit, s'appelle tension à l'état bloqué ou force contre-électromotrice (fcem). Lorsque le moteur tourne plus rapidement, la force contre-électromotrice augmente, jusqu'à être pratiquement égale à la tension appliquée.

Le courant reste alors faible, et la vitesse du moteur demeurera constante tant que celui-ci n'exécutera aucun travail mécanique, à l'exception de celui fourni pour faire tourner l'induit.

Si le moteur est soumis à une contrainte mécanique, l'induit tournera alors plus lentement, ce qui réduira la fcem. On pourra par conséquent appliquer à l'induit un courant plus élevé. Le moteur pourra donc recevoir une plus grande puissance électrique de sa source d'alimentation, et effectuer un travail mécanique plus important.

Puisque la vitesse de rotation détermine le débit de courant dans l'induit, il faut utiliser un dispositif spécifique pour amorcer les moteurs. Lorsque l'induit est immobile, il ne possède aucune résistance. Si on lui applique la tension normale de travail, un fort courant passe, ce qui pourrait endommager le commutateur ou les enroulements de l'induit. Pour éviter une telle détérioration, on installe en général une résistance de démarrage, montée en série avec l'induit, et qui abaisse le courant jusqu'à ce que le moteur produise une fcem adéquate. Une fois que le moteur est mis en route, on réduit alors progressivement la résistance, manuellement ou automatiquement.

Application

Les bobines d'un moteur alimenté en 120 V $(\zeta = 120\,\text{V})$ ont une résistance de 10 Ω.

A plein régime, la force contre électro-motrice ζ_{fcem} est de 70 V.

Déterminer le courant dans les bobines à l'instant où on démarre le moteur et quand il atteint sa vitesse maximale.

Solution

Quand on démarre me moteur, à l'instant t = 0 les bobines sont immobiles et la f.c.e.m est nulle. Le courant est donc maximal :

$$I_{max} = \frac{\zeta}{R} = \frac{120V}{10\Omega} = 12A$$

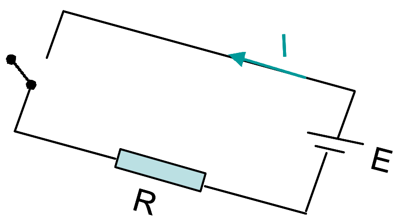
La f.c.e.m est maximale quand le moteur est à plein régime

$$I = \frac{\zeta - \zeta_{fcem}}{R} = \frac{120-70}{10} = 5A$$

7. Inductance

7.1. Auto Induction

Soit un circuit isolé constitué d'un interrupteur K d'une résistance R et d'une pile de f.e.m ζ.



Lorsque l'interrupteur est fermé, le courant ne passe pas immédiatement de zéro à la valeur maximale donnée par la loi d'Ohm $\zeta = R\,I_{max}$. Ceci est la conséquence de la loi de l'induction électromagnétique.

L'augmentation du courant I dans le circuit produit, à travers la boucle de circuit, un flux magnétique croissant qui donc induit dans ce même circuit une f.e.m opposée à celle de la pile. Cet effet est appelé auto induction, car le flux variable à travers le circuit est produit par le circuit lui-même. La f.e.m ainsi produite est appelée f.e.m d'auto-induction.

Le flux magnétique Φ_m est proportionnel au champ magnétique $\vec{B}$ qui est lui-même proportionnel au courant dans le circuit. On écrit donc :

$$\Phi_m = L\, I$$

L est une constante de proportionnalité, appelée inductance.

La f.e.m induite est donnée par la relation : :

$$\boxed{\zeta_m = -\, L\, \frac{dI}{dt}}$$

La constante L dépend des caractéristiques géométriques du circuit. Si le circuit contient N spires, L est donné par :

$$L = \frac{N\, \Phi_m}{I}$$

On peut aussi écrire que L est égale à :

$$L = -\, \frac{\zeta}{\left(\frac{dI}{dt}\right)}$$

L s'exprime en henry (H).

Application

Déterminer l'inductance d'un solénoïde de longueur ℓ comportant N spires régulièrement enroulées. On suppose que la longueur ℓ est très grande par rapport au rayon du solénoïde.

Solution

Le champ intérieur est quasiment uniforme. Sa valeur est :

$$B = \mu_0 \; n\, I = \mu_0 \; \frac{N}{\ell} \; I$$

n est le nombre de spires par unité de longueur.

Le flux à travers chaque spire est :

$$\Phi_m = B\, S = \mu_0 \frac{NS}{\ell} \; I$$

où S est l'aire de la section du solénoïde.

D'où

$$\boxed{L = \frac{N\,\Phi_m}{I} = \frac{\mu_o \; N^2\, S}{\ell}}$$

L ne dépend donc que des facteurs géométriques.