

9 L'INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Une bobine circulaire ayant un diamètre de 20 cm tourne sur elle-même avec une fréquence constante de 60 Hz dans un champ magnétique de 500 gauss. Combien doit-il y avoir de tours de fil sur la bobine pour que l'amplitude de la différence de potentiel soit de 170 V ?



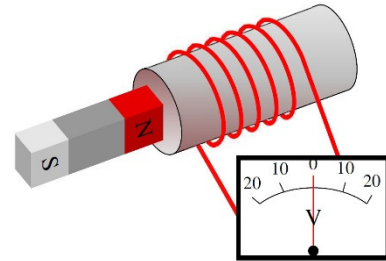
www.ehow.com/how_7976510_coil-wire-homemade-generator.html

Découvrez comment résoudre ce problème dans ce chapitre.

9.1 LA DÉCOUVERTE DE L'INDUCTION

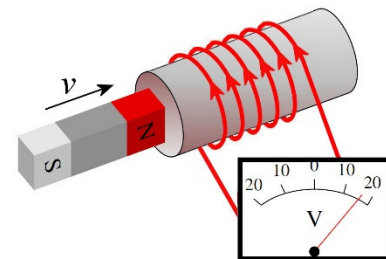
On savait depuis la découverte d'Ørsted en 1820 qu'un courant crée un champ magnétique. On a donc pensé qu'on pouvait aussi faire l'inverse : obtenir un courant à partir d'un champ magnétique.

Pendant 10 ans, on a beau tout tenter, on ne parvient pas à obtenir un courant dans un fil avec un champ magnétique. On pouvait, par exemple, tenter d'obtenir un courant avec l'expérience montrée sur la figure de droite. Il y a bien un champ magnétique fait par l'aimant, mais il n'apparaît aucun courant dans le fil de la bobine (ou de différence de potentiel aux bornes de ce fil, ce qui revient au même). On avait beau essayer toutes les configurations possibles de fils et d'aimants, il n'y avait jamais de courant dans les fils.



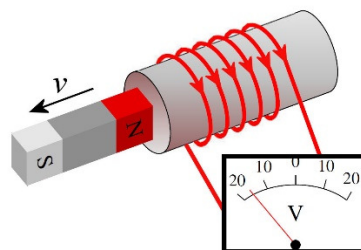
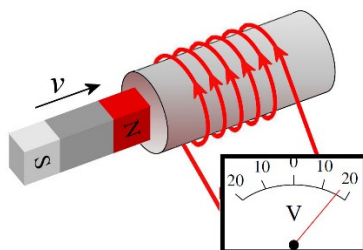
Finalement, Joseph Henry (en 1830) et Michael Faraday (en 1831) découvrent indépendamment comment on peut obtenir un courant avec un champ magnétique. Henry a fait la découverte en premier, mais c'est Faraday qui a publié ses résultats en premier. (Notez que plusieurs savants, dont Ampère dès 1822, avaient observé ce phénomène, mais ils ne sont pas parvenus pas à se débarrasser de certaines idées préconçues fausses, ce qui les a empêchés de formuler des théories cohérentes ou complètes à partir de leurs observations.)

Faraday et Henry ont découvert qu'on obtient un courant uniquement s'il y a un mouvement relatif entre la bobine et l'aimant. Par exemple, si on approche l'aimant de la bobine (comme sur la figure), alors il y a une différence de potentiel qui apparaît entre les deux extrémités du fil.



La différence de potentiel dépend de la vitesse de déplacement. Plus on déplace l'aimant rapidement, plus la différence de potentiel induite est importante.

Le signe de la différence de potentiel n'est pas toujours la même. Quand on approche l'aimant avec le pôle nord en premier, il y a une différence de potentiel dans un sens (figure de gauche). Si on éloigne l'aimant, la différence de potentiel dans la bobine est inversée (figure de droite).



Le vidéo suivant illustre cette expérience.

<https://www.youtube.com/watch?v=hajIIGHPeuU>

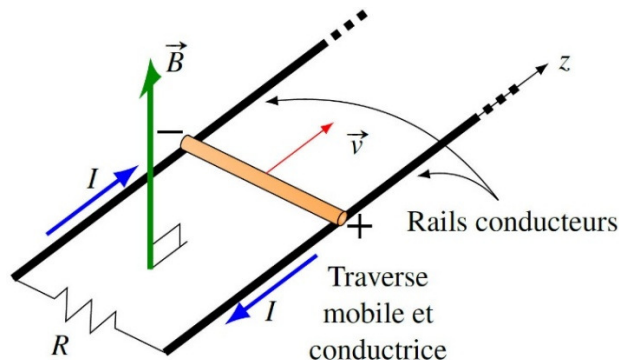
Ce phénomène, dans lequel on génère une différence de potentiel entre les deux extrémités d'un fil, est appelé *l'induction électromagnétique*. La différence de potentiel obtenue s'appelle la *différence de potentiel induite* et elle est notée $\mathcal{E}_{\text{induite}}$. Cette différence de potentiel fera un courant si le fil se referme sur lui-même pour former une boucle ou un circuit. On aura alors un *courant induit* dans le circuit.

9.2 LES FORCES À L'ORIGINE DU COURANT

S'il y a un courant qui apparaît, c'est parce qu'il y a une force qui met les charges en mouvement. Voyons comment les charges peuvent être mises en mouvement pour obtenir un courant induit.

Le courant induit fait par un champ magnétique

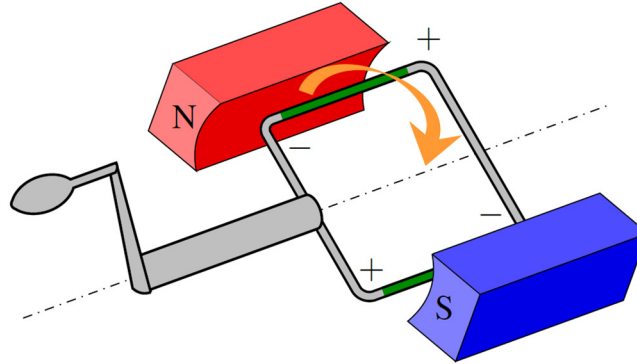
On pourrait faire apparaître un courant en déplaçant une tige placée sur 2 rails (comme dans la figure suivante) dans un champ magnétique.



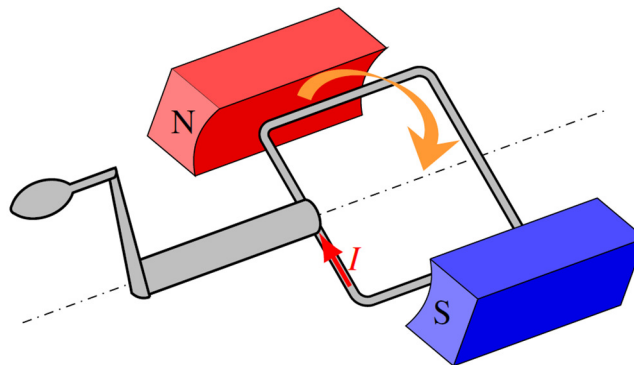
Quand la tige se déplace, les charges positives dans la tige subissent une force magnétique vers la droite de la tige (on va faire comme si c'étaient les charges positives qui se déplacent pour simplifier l'explication). La force magnétique met donc les charges positives en mouvement dans la tige vers la droite selon la règle de la main droite. En passant d'un bout à l'autre de la tige, la force magnétique fait un travail sur les charges qui fait en sorte qu'elles gagnent de l'énergie. Quand elles arrivent à droite de la tige, elles ont plus d'énergie, ce qui signifie que le potentiel est plus élevé à cet endroit (puisque le potentiel mesure l'énergie par unité de charge). Le potentiel est donc plus élevé à droite de la tige (bout de la tige marquée +) et plus bas à gauche de la tige (bout de la tige marquée -). Il y a donc une différence de potentiel d'un côté à l'autre de la tige et elle devient la source dans ce circuit.

On peut aussi faire apparaître un courant en faisant tourner une boucle conductrice dans un champ magnétique. Dans ce cas, la rotation de la boucle fait en sorte que les charges

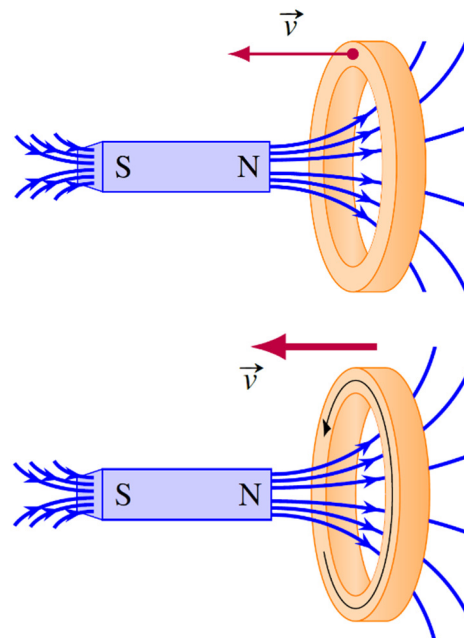
positives dans la boucle se déplacent dans le champ magnétique. La force magnétique exerce alors une force sur les charges positives et cette force est dans la direction du fil dans les deux parties en vert sur la figure. La force magnétique fait alors un travail sur ces charges et il y a une différence de potentiel qui apparaît dans les 2 parties en vert.



Ces deux différences de potentiel, qui agissent comme des sources, génèrent un courant circulant dans le sens montré sur cette figure.



On pourrait aussi faire apparaître un courant en approchant un anneau d'un aimant. En déplaçant ainsi l'anneau, on déplace les charges dans un champ magnétique et ces charges vont donc subir une force magnétique. Examinons ce qui se passe en haut de l'anneau (point rouge d'où part la flèche). Comme on a une vitesse vers la gauche et un champ vers la droite et un peu vers le haut, la force sur une charge positive est en entrant de la page. Cette force cherche donc à déplacer la charge le long de l'anneau. Si on trouve la direction de la force sur n'importe quelle charge de l'anneau, on trouve que la force est toujours dans la direction de la circonférence de l'anneau.

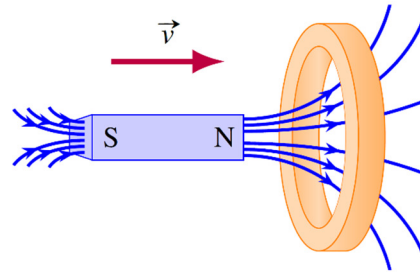


La force fait donc déplacer toutes les charges le long de l'anneau pour faire un courant. L'image de droite vous montre la direction de ce courant.

Le courant induit fait par un champ électrique

Dans les 3 cas précédents, la force magnétique est à l'origine du courant. Toutefois, le champ électrique peut aussi être à l'origine du courant.

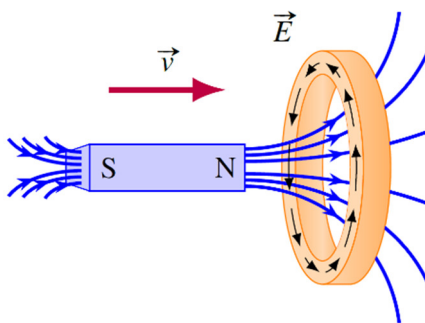
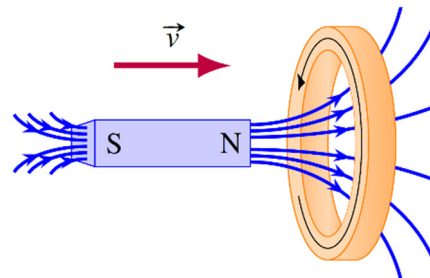
Pour s'en convaincre, reprenons l'exemple de l'anneau qui s'approche de l'aimant, mais en examinant la situation du point de vue d'un observateur au repos par rapport à l'anneau. Pour cet observateur, c'est l'aimant qui s'approche de l'anneau (figure de droite).



Évidemment, il doit encore y avoir un courant induit puisque cette expérience est exactement la même expérience que celle dans laquelle on approche l'anneau de l'aimant, mais vue par un observateur immobile par rapport à l'anneau. S'il y a un courant pour un observateur, il doit y en avoir un pour tous les observateurs, sinon les résultats d'une expérience ne seraient pas les mêmes pour différents observateurs, ce qui contreviendrait au principe de relativité.

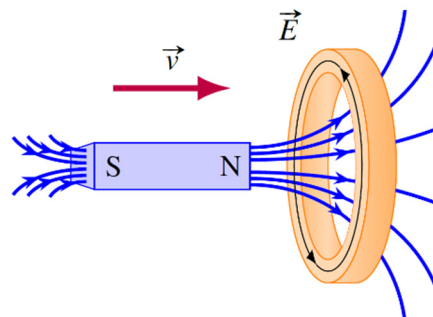
Dans ce cas, la force magnétique ne peut pas mettre les charges en mouvement puisque leur vitesse est nulle (l'anneau est immobile). Il y a donc un courant induit, mais ce courant ne peut pas être généré par la force magnétique. Il ne reste alors qu'une seule autre possibilité : la force doit être faite par un champ électrique. Il doit donc y avoir un champ électrique dans cette situation.

Selon ce qu'on avait trouvé en prenant le point de vue d'un observateur qui voit l'anneau s'approcher de l'aimant immobile, le courant est dans la direction montrée sur la figure de droite.

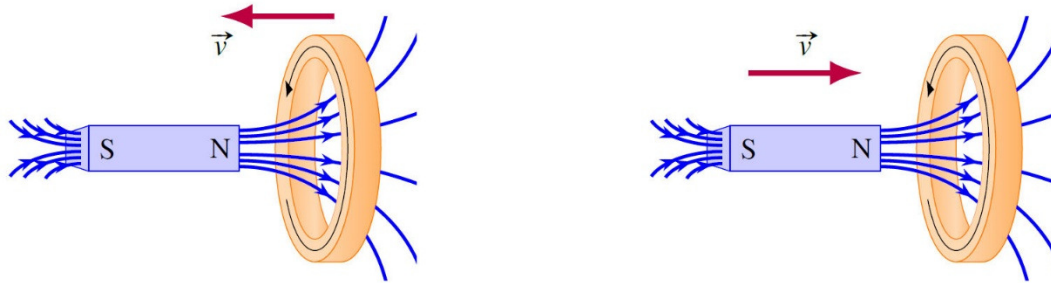


Comme le courant conventionnel est dans le sens du champ électrique dans un conducteur, le champ doit être dans la direction montrée sur la figure de gauche.

Ce qui nous amène directement à la conclusion que les lignes de champ électrique dans l'anneau sont des cercles.



Les deux situations montrées sur la figure suivante représentent donc exactement la même expérience, mais vue selon deux observateurs différents.

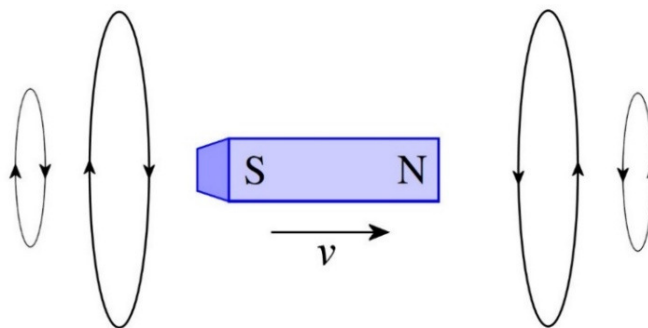
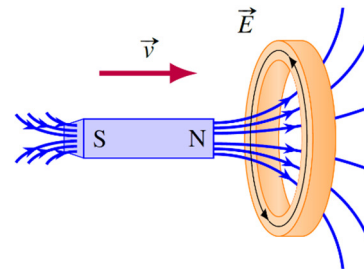


Dans un cas (figure de gauche), on voit l'expérience selon un observateur au repos par rapport à l'aimant. Pour cet observateur, le courant induit est fait par la force magnétique. Dans l'autre cas (figure de droite), on voit l'expérience selon un observateur au repos par rapport à l'anneau. Pour cet observateur, le courant induit est fait par la force électrique.

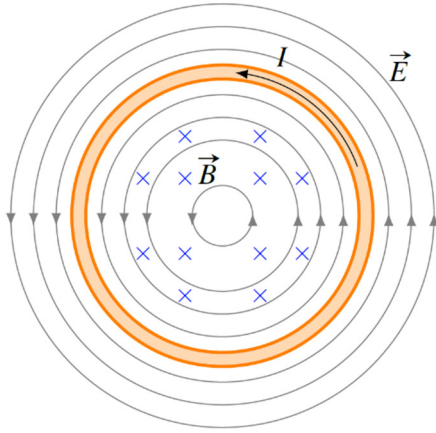
Il est donc possible que les différents observateurs attribuent la cause du courant à des champs de différente nature. Notez que si on prenait le point de vue de n'importe quel autre observateur qui voit l'anneau et l'aimant se déplacer, le courant serait causé par le champ magnétique et aussi par le champ électrique.

D'où vient ce champ électrique ?

On peut se demander d'où vient le champ électrique dans cette expérience dans laquelle l'aimant s'approche de l'anneau. L'aimant (qui n'a pas de charge nette) ne devrait pas faire de champ électrique selon ce qu'on sait jusqu'ici. C'est vrai qu'un aimant ne fait pas de champ électrique, mais uniquement quand il est au repos. C'est différent quand l'aimant se déplace. Quand l'aimant est en mouvement, il y a aussi un champ électrique selon la relativité. Un simple champ magnétique pour un observateur qui observe l'aimant au repos devient une combinaison de champ magnétique et de champ électrique pour un autre observateur qui voit l'aimant se déplacer. Voici quelques lignes de ce champ électrique qu'il y a quand l'aimant est en mouvement.



Les lignes de champ électrique forment des boucles en avant et en arrière de l'aimant. Remarquez que la direction du champ sur les boucles n'est pas la même en avant et en arrière de l'aimant. Il n'y a pas de champ électrique sur les côtés de l'aimant. Ce sont ces champs électriques qui sont à l'origine du courant induit dans notre exemple de l'anneau.



Ainsi, dans le cas de l'aimant qui s'approche de l'anneau, il n'y a pas qu'un champ électrique dans l'anneau, il y en a un presque partout autour de l'aimant. Si on regardait l'anneau tel qu'on pourrait le voir si on était minuscule et qu'on était assis sur l'aimant, voici à quoi ressemblerait le champ électrique (figure de gauche). Il y a du champ partout, mais c'est uniquement la partie de ce champ qui est dans l'anneau (en jaune) qui génère un courant.

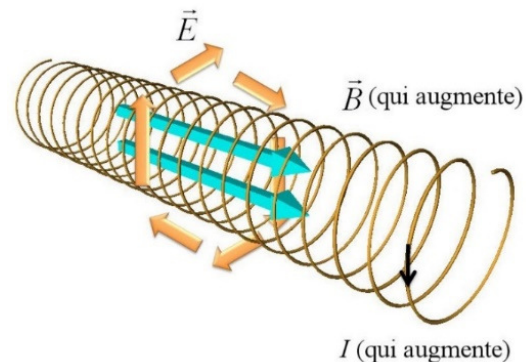
En fait, on vient de tomber sur un nouveau phénomène.

Quand des charges génèrent un champ magnétique variable, elles génèrent aussi un champ électrique.

C'est exactement ce qui se passe dans notre exemple. Le mouvement de l'aimant fait en sorte que le champ magnétique à un endroit précis change avec le temps (il augmente quand l'aimant s'approche puis il diminue quand l'aimant s'éloigne). Les charges dans l'aimant qui génèrent le champ magnétique génèrent donc aussi un champ électrique.

Comme ces 2 champs sont faits par les mêmes charges, il y a un lien mathématique entre ces 2 champs. Cette équation, qui fait le lien entre dB/dt et le champ électrique, est donnée par une des 4 équations de l'électromagnétisme découvertes par James Clerk Maxwell au milieu du 19^e siècle. Malheureusement pour vous, on ne verra pas ce lien ici.

Prenons un solénoïde pour illustrer ce phénomène. S'il y a un courant dans le solénoïde, il y a un champ magnétique dans le solénoïde. Si le courant varie, le champ magnétique est variable et cela signifie qu'il doit aussi y avoir un champ électrique. Notez que ce champ n'est pas uniquement à l'intérieur du solénoïde comme le champ magnétique, il y a aussi du champ électrique à l'extérieur du solénoïde. Ici, les charges électriques du courant qui font le champ magnétique variable sont donc aussi à l'origine du champ électrique qu'il y a à l'intérieur et à l'extérieur du solénoïde.



slideplayer.com/slide/11005662/

Tous les champs, qu'ils soient électriques ou magnétiques, peuvent uniquement être générés par des charges électriques. Malheureusement, la relation entre les champs donnée par Maxwell est presque toujours mal interprétée dans les manuels d'électromagnétisme.



Erreur vraiment fréquente : Penser qu'un champ magnétique variable peut générer un champ électrique

Cette erreur est très commune et est répétée dans de nombreux manuels de physique (incluant mes notes pendant plusieurs années). Dans ces livres, on dit que c'est le champ magnétique variable qui fait apparaître un champ électrique. On utilise souvent l'équation de Maxwell faisant le lien entre le champ électrique et le champ magnétique pour affirmer qu'un champ est la source de l'autre. C'est faux. Le champ magnétique ne peut pas être la source du champ électrique. Seules les charges électriques peuvent être la source des champs électriques et des champs magnétiques. Le champ électrique vient des mêmes charges qui font le champ magnétique variable. Le lien entre les champs donné par l'équation de Maxwell existe parce que ces champs ont la même source, pas parce qu'un champ est la source de l'autre.

Si on pense que le champ électrique est fait par une variation de champ magnétique, on peut arriver à des conclusions étranges. Reprenons, par exemple, la situation dans laquelle il y a un solénoïde très long parcouru par un courant. Quand le courant augmente, alors il y a un champ électrique. Ce champ électrique n'est pas seulement présent à l'intérieur du solénoïde (où il y a un champ magnétique), mais aussi à l'extérieur du solénoïde (où il n'y a même pas de champ magnétique). Quand on pense que le champ électrique est fait par les variations du champ magnétique, on a du mal à imaginer comment il peut y avoir un champ électrique à l'extérieur du solénoïde alors que le champ magnétique ne varie pas à cet endroit (il est toujours nul). La variation du champ magnétique à un endroit ferait apparaître un champ électrique à un endroit très éloigné. C'est difficile à concevoir. Quand on sait que les charges électriques du solénoïde sont à l'origine des 2 champs, on conçoit aisément que ces charges peuvent faire un champ électrique partout autour du solénoïde. Pour plus de détails, consultez ce document :

<https://physique.merici.ca/electricite/plaquetige.pdf>

(C'est toutefois d'un niveau plus élevé que ce qu'on voit au cégep)

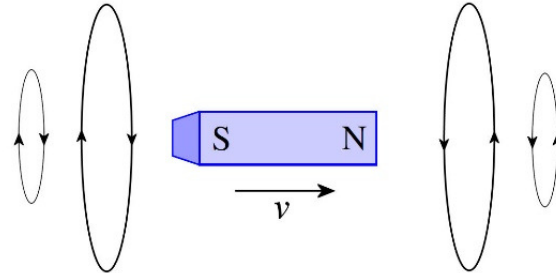
Notez qu'il y a aussi la règle suivante.

Quand des charges génèrent un champ électrique variable, elles génèrent aussi un champ magnétique.

Il y a également une équation de Maxwell qui fait le lien entre ces 2 champs, ce qui n'est pas étonnant puisque ce sont les mêmes charges qui font les 2 champs. Encore une fois, ce lien en a amené plusieurs à penser que le champ électrique variable est à l'origine du champ magnétique, ce qui est faux. Seules les charges électriques peuvent générer un champ magnétique. Un champ électrique variable ne peut pas faire apparaître un champ magnétique et un champ magnétique variable ne peut pas faire apparaître un champ électrique.

Des lignes de champs électriques qui se referment sur elles-mêmes

Dans les chapitres précédents, les lignes de champ électrique partaient toujours des charges positives et se terminaient toujours aux charges négatives. Or, ce n'est pas ce qu'on a pour le champ électrique autour d'un aimant en mouvement. On voit que, dans ce cas, les lignes de champ électrique se referment sur elles-mêmes. C'est une autre configuration possible pour les lignes de champ électrique. Tous les champs électriques qui apparaissent en même temps qu'un champ magnétique variable forment de telles lignes de champ qui se referment sur elles-mêmes.



Remarquez comme notre 3^e propriété du champ (les lignes de champ ne peuvent pas apparaître ou disparaître dans le vide) avait été formulée pour pouvoir s'accommoder de cette situation.

Une force électrique non conservative

Le fait que les lignes de champ électrique peuvent se refermer sur elle-même fait en sorte que la force électrique n'est pas toujours une force conservative comme on l'avait cru jusqu'ici.

Avant ce chapitre, on avait la relation suivante pour la force électrique

$$\sum_{\text{un tour}} F_E \Delta s \cos \theta = 0$$

Cette équation signifie que le travail total fait par la force électrique sur un tour est nul. (Elle signifie aussi que la somme des différences de potentiel sur un tour est nulle, ce qui était notre loi des mailles dans les circuits.) Elle veut aussi dire que le champ électrique ne pourrait pas générer de courant sur un circuit fermé puisque le travail total serait toujours nul. Ainsi, les champs électriques faits par les charges au repos ne peuvent pas faire de courant induit dans un circuit fermé.

La situation est différente quand les lignes de champ se referment sur elles-mêmes. Imaginons qu'une ligne de champ se referme sur elle-même et qu'on déplace une charge positive sur un tour complet en suivant cette ligne, dans le sens de la ligne. Comme on déplace toujours la charge dans le sens du champ, la force est toujours dans le sens du déplacement, l'angle est nul et le cosinus est égal à 1. Le travail est donc toujours positif et le travail total ne peut pas être nul puisqu'on ne somme que des travaux positifs.

$$\sum_{\text{un tour}} F_E \Delta s \cos \theta \neq 0$$

Puisque la somme n'est pas nulle, le champ électrique fait un travail sur les charges et il peut maintenant y avoir un courant induit dans un circuit fermé. Le champ électrique qui apparaît en même temps que le champ magnétique variable peut donc faire apparaître un courant dans un circuit fermé. Seul ce type de champ électrique peut faire un courant induit.

Toutefois, si le travail fait par la force électrique sur une trajectoire fermée n'est pas nul, la force électrique n'est pas conservative. La force électrique est conservative uniquement quand il n'y a pas de variation de champ magnétique.

Si la force n'est pas conservative, alors il ne peut pas y avoir d'énergie potentielle. S'il ne peut pas y avoir d'énergie potentielle, il ne peut pas y avoir de potentiel électrique. Si on continue d'utiliser le concept de potentiel dans des situations où il y a des variations de champ magnétique, on peut obtenir des résultats surprenants (comme on le verra un peu plus loin).

9.3 LA LOI D'INDUCTION DE FARADAY

La formule

Pour trouver la différence de potentiel qui apparaît dans un circuit fermé, il faut trouver le travail fait sur les charges sur un tour par les forces électrique et magnétique. On va commencer par trouver le travail fait sur les charges dans un petit bout de fil.

La force électrique qui s'exerce sur une charge peut faire un travail. Si la charge se déplace d'un bout à l'autre du petit bout de fil de longueur $d\ell$, le travail fait est

$$\begin{aligned} dW &= \vec{F}_{elec} \cdot \vec{d\ell} \\ &= q\vec{E} \cdot \vec{d\ell} \end{aligned}$$

La force magnétique peut aussi faire un travail sur la charge. Si la charge se déplace à vitesse $\vec{v}$, alors la charge dans le fil subit une force magnétique. Le travail fait par la force magnétique sur une charge qui passe d'un bout à l'autre du petit bout de fil est alors

$$\begin{aligned} dW &= \vec{F}_{mag} \cdot \vec{d\ell} \\ &= q\vec{v} \times \vec{B} \cdot \vec{d\ell} \end{aligned}$$

Le travail total fait sur une charge est donc

$$dW = q\vec{E} \cdot \vec{d\ell} + q\vec{v} \times \vec{B} \cdot \vec{d\ell}$$

Comme le $\mathcal{E}$ d'une source est lié au travail par $W_{source} = q\mathcal{E}$, on a

$$qd\mathcal{E}_{induit} = q\vec{E} \cdot \vec{d\ell} + q\vec{v} \times \vec{B} \cdot \vec{d\ell}$$

En simplifiant les q , on arrive alors à la formule suivante.

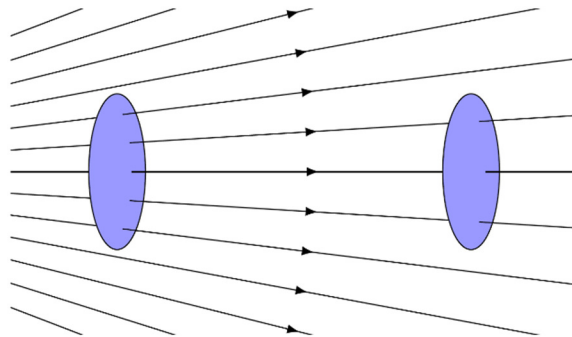
$$d\mathcal{E}_{\text{induit}} = \vec{E} \cdot d\vec{\ell} + \vec{v} \times \vec{B} \cdot d\vec{\ell}$$

Pour trouver la différence de potentiel qui apparaît dans tout le fil, il faut sommer toutes ces petites différences de potentiel. Ce serait un peu difficile à calculer parce qu'on ne sait même pas comment calculer le champ électrique qui est généré en même temps qu'un champ magnétique variable.

En fait, on n'a même pas besoin de savoir comment calculer le champ électrique parce que, curieusement, cette somme prend une forme passablement différente de la formule de départ quand les charges sont contraintes de se déplacer uniquement dans un fil relativement petit. Cette nouvelle forme de l'équation demande de calculer le flux magnétique qui traverse la surface délimitée par le circuit. Voyons ce qu'est le flux magnétique avant de donner le résultat de la somme.

Le flux magnétique

Avec le flux magnétique, on va compter le nombre de lignes de champ qui traversent une surface. Par exemple, dans la situation de droite, on peut calculer le flux traversant chacune de ces surfaces circulaires (ce sont des cercles vus en perspective). Le flux à travers la surface de gauche est plus grand que le flux à travers la surface de droite puisqu'il y a plus de lignes de champ qui traversent la surface de gauche.

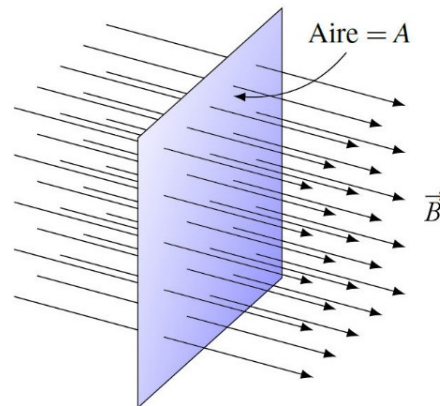


Une surface perpendiculaire au champ

Pour que le flux soit proportionnel au nombre de lignes de champ, on peut définir le flux magnétique par la formule suivante quand le champ est perpendiculaire à la surface.

$$\phi_B = BA$$

Ce flux est en Tm^2 . On a donné un nom à cette unité. C'est le weber (Wb).



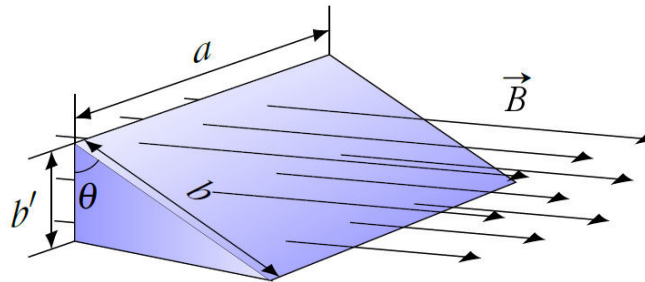
Unité de flux magnétique : le weber (Wb)

$$1\text{Wb} = 1\text{Tm}^2$$

Sachez qu'autrefois, on appelait souvent le champ magnétique *la densité de flux magnétique* et on le mesurait en Wb/m^2 .

Une surface non perpendiculaire au champ

Pour trouver le flux magnétique si la surface n'est pas perpendiculaire aux lignes de champ, considérons 2 surfaces de cet objet (la surface de derrière où entrent les lignes et le dessus où sortent les lignes) et imaginons que le champ est uniforme.



Puisque le flux compte le nombre de lignes de champ, le flux à travers la surface inclinée (le dessus) est le même que le flux à travers la surface verticale (le derrière). En effet, puisque chaque ligne de champ qui traverse la surface de derrière va par la suite traverser la surface inclinée (le dessus), il y a le même nombre de lignes qui traversent les deux surfaces.

Puisque les lignes sont perpendiculaires à la surface arrière, le flux traversant cette surface (dont l'aire est aire A') est

$$\phi_B = BA'$$

$$\phi_B = B(ab')$$

Or, puisque

$$\frac{b'}{b} = \cos \theta$$

on a

$$\phi_B = B(ab')$$

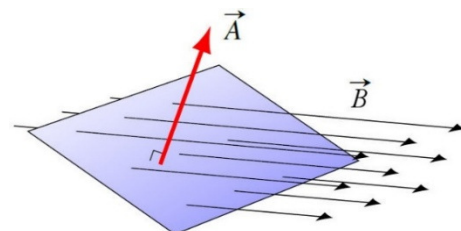
$$\phi_B = B(ab \cos \theta)$$

Comme l'aire de la surface inclinée (A) est $a \cdot b$, on a

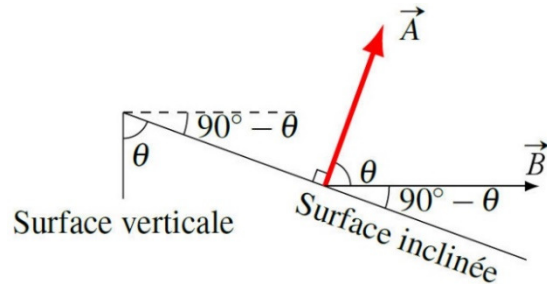
$$\phi_B = B(ab \cos \theta)$$

$$\phi_B = B(A \cos \theta)$$

C'est le flux à travers la surface inclinée. En fait, on peut arranger ceci pour plaire davantage aux mathématiciens qui ont défini le vecteur aire d'une surface comme étant un vecteur perpendiculaire à la surface.



L'angle entre ce vecteur A et le vecteur champ magnétique qui traverse la surface est aussi θ , l'angle qu'il y a entre les deux surfaces, comme on peut le voir sur cette figure (où on voit les surfaces de côté).



Le flux à travers une surface inclinée est donc égal au produit de la grandeur du vecteur B , de la grandeur du vecteur A et du cosinus de l'angle entre les deux. Vous devriez reconnaître qu'il s'agit du produit scalaire des vecteurs B et A .

Le flux magnétique

$$\phi_B = BA \cos \theta$$

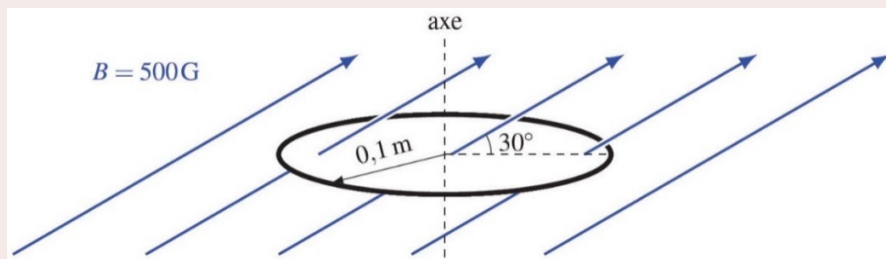
ou

$$\phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A}$$

où θ est l'angle entre le champ magnétique et le vecteur représentant la surface.

Exemple 9.3.1

Quel est le flux magnétique traversant cette boucle de fil ?



Le flux est

$$\begin{aligned}\phi_B &= BA \cos \theta \\ &= 500 \times 10^{-4} \text{ T} \cdot (\pi \cdot (0,1 \text{ m})^2) \cdot \cos 60^\circ \\ &= 7,854 \times 10^{-4} \text{ Wb}\end{aligned}$$

L'angle dans cette formule est l'angle entre le champ et le vecteur A , qui est un vecteur perpendiculaire au plan de la boucle, donc dans la direction de l'axe de la boucle.

Le choix de la direction de A

A est un vecteur perpendiculaire à la surface. Toutefois, il y a deux vecteurs possibles pour A , car il y a deux côtés à une surface. Dans l'exemple précédent, on aurait donc pu prendre un des deux vecteurs suivants.



Avec le vecteur de la figure de gauche, l'angle avec le champ dans l'exemple est de 60° , alors qu'il aurait été de 120° avec le vecteur de la figure de droite. En utilisant le vecteur de la figure de droite, on aurait obtenu un flux de même grandeur, mais négatif.

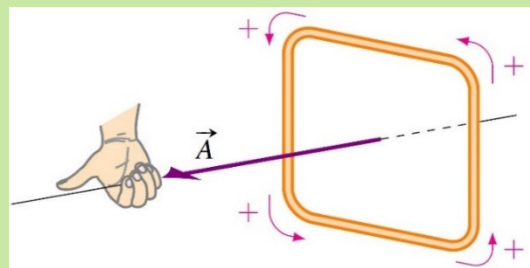
Lequel doit-on choisir? En fait, vous pouvez prendre celui que vous voulez. La suggestion : choisir le vecteur A qui fait le plus petit angle avec le champ. Avec cette suggestion, on prend 60° dans l'exemple. Une fois votre choix de la direction de A fait, ne le changez plus pendant le problème, même si le champ change de direction.

La définition du sens positif pour la différence de potentiel

Le choix de A détermine une direction positive qui sera utile pour trouver la direction du courant qui sera généré dans la boucle. Pour trouver cette direction positive, on met notre pouce dans la direction du vecteur A choisi. Nos doigts nous indiquent alors la direction positive dans la boucle.

Sens positif du courant pour l'induction

On place le pouce dans le sens de A (vecteur aire perpendiculaire au plan de la boucle) choisi pour calculer le flux. Le sens de rotation indiqué par les doigts est le sens positif.



La formule de l'induction

Revenons maintenant à notre différence de potentiel induite. On se rappelle qu'on voulait sommer toutes les petites différences de potentiel dans un petit bout de fil

$$d\mathcal{E}_{\text{induite}} = \vec{E} \cdot d\vec{\ell} + \vec{v} \times \vec{B} \cdot d\vec{\ell}$$

pour trouver la différence de potentiel totale induite sur un circuit fermé. C'est assez surprenant, mais les calculs montrent que cette intégrale peut être écrite sous une forme très différente de l'intégrale de départ quand le courant doit suivre un fil mince.

La loi d'induction de Faraday

$$\mathcal{E}_{\text{induit}} = -N \frac{d\phi_B}{dt}$$

Dans cette formule, ϕ_B est le flux magnétique à travers la surface délimitée par le circuit et N est le nombre de tours de fil dans le circuit. Cette loi porte le nom de loi d'induction de Faraday, même si Faraday n'a jamais écrit la loi sous cette forme.

Vous pouvez voir la preuve ici.

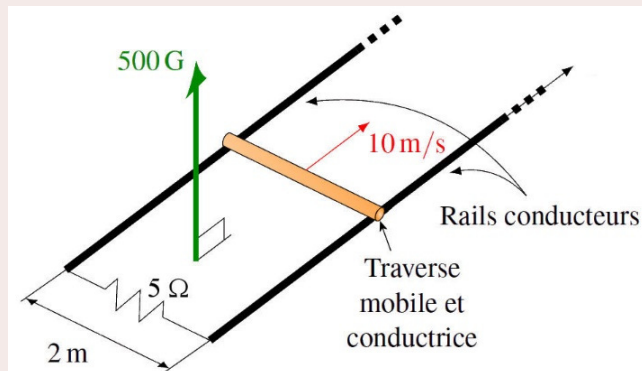
<https://physique.merici.ca/electricite/Faraday.pdf>

C'est quand même assez surprenant de constater qu'on peut calculer la différence de potentiel uniquement avec le champ magnétique (en calculant le flux), alors que l'intégrale de départ montrait que la différence de potentiel peut aussi dépendre de champ électrique. En fait, on a réussi à se débarrasser de ce champ électrique, car il y a un lien entre ce champ électrique et le champ magnétique variable produit par des charges. En utilisant ce lien, on a pu éliminer toute référence au champ électrique.

Cette équation signifie que **le flux doit varier dans la surface délimitée par le circuit pour qu'il y ait une différence de potentiel induite**. Plus le flux change rapidement, plus la différence de potentiel est importante.

Exemple 9.3.2

Une tige mobile de 2 m de long peut se déplacer sur des rails conducteurs. Ces rails sont reliés ensemble par un fil à leurs extrémités. La résistance de la tige et la résistance des rails sont négligeables. La résistance du fil qui relie les rails est de $5\ \Omega$. Quel est le courant qui circule dans la résistance ?



Le courant se trouve à partir de la différence de potentiel et de la résistance.

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R}$$

On a la résistance, mais on doit trouver la différence de potentiel. Celle-ci est une différence de potentiel induite qui peut se trouver avec

$$\mathcal{E}_{\text{induite}} = -N \frac{d\phi_B}{dt}$$

Comme ici il n'y a qu'un seul tour de fil, on a $N = 1$.

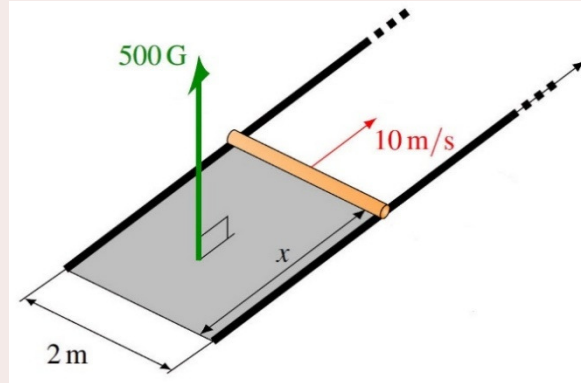
$$\mathcal{E}_{\text{induite}} = - \frac{d\phi_B}{dt}$$

Il faut donc trouver le taux de variation de flux dans la boucle.

Il y a un flux dans la surface délimitée par la tige, les rails et le fil reliant les rails. (Surface en gris dans la figure.)

Comme la tige avance, le flux qui traverse cette surface augmente puisque l'aire augmente. La variation de flux est donc

$$\begin{aligned}\frac{d\phi_B}{dt} &= \frac{d(BA \cos 0^\circ)}{dt} \\ &= \frac{d(BA)}{dt}\end{aligned}$$



(Comme on a mis un angle de 0° pour l'angle dans le cosinus, on a choisi un vecteur A dans la même direction que le champ magnétique.)

Puisque le champ magnétique est constant, on peut le sortir de la dérivée.

$$\frac{d\phi_B}{dt} = B \frac{dA}{dt}$$

Comme l'aire est $A = \ell x$ et que ℓ est une constante, on a

$$\begin{aligned}\frac{d\phi_B}{dt} &= B \frac{d(\ell x)}{dt} \\ &= B\ell \frac{dx}{dt}\end{aligned}$$

Puisque le taux de variation de x est égal à la vitesse de la tige v , on a

$$\frac{d\phi_B}{dt} = B\ell v$$

La différence de potentiel induite est donc

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{\text{induite}} &= -\frac{d\phi_B}{dt} \\ &= -B\ell v\end{aligned}$$

(Notez que c'est exactement ce qu'on aurait obtenu avec la formule de la différence de potentiel induite dans une tige en mouvement dans un champ magnétique selon la formule du chapitre 7. C'est normal puisque c'est le mouvement de la tige qui fait apparaître la différence de potentiel. On a simplement retrouvé ce résultat avec notre autre version de la formule de la différence de potentiel induite. Ça semble plus long comme ça, mais ce sera avantageux dans d'autres cas.)

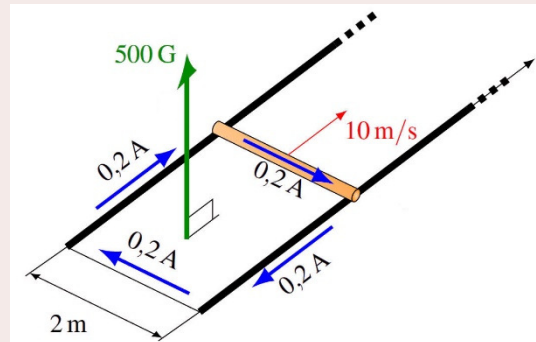
Si on calcule la valeur de la différence de potentiel induite, on obtient

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{\text{induite}} &= -B\ell v \\ &= -0,05T \cdot 2m \cdot 10 \frac{m}{s} \\ &= -1V\end{aligned}$$

Le courant est donc

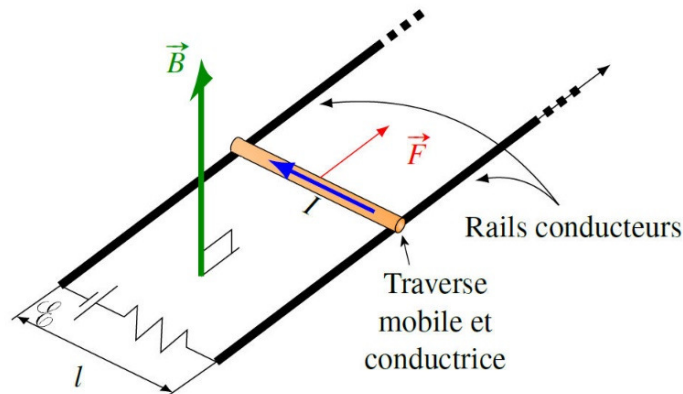
$$\begin{aligned}I &= \frac{\mathcal{E}}{R} \\ &= \frac{-1V}{5\Omega} \\ &= -0,2A\end{aligned}$$

On trouve le sens du courant positif en mettant notre pouce de la main droite dans le sens du vecteur A (qu'on a choisi dans le même sens que B). Nos doigts nous indiquent alors la direction du courant positif (ici dans le sens contraire des aiguilles d'une montre). Notre courant étant négatif, il est dans le sens des aiguilles d'une montre.



Un retour sur le moteur linéaire

Vous remarquerez sûrement que l'image de la tige glissant sur des rails est pratiquement identique à celle qu'on avait pour le moteur linéaire. C'est vrai, et l'induction va maintenant nous aider à comprendre ce qui va se passer quand le moteur linéaire propulse un objet.



Au départ, la tige est immobile, mais elle subit une force magnétique qui va l'accélérer pour la mettre en mouvement. Toutefois, en se déplaçant, le flux dans la zone rectangulaire

délimitée par la tige, les rails et le fils reliant les rails augmente et il y aura un courant induit, exactement comme ce qui se passait dans l'exemple précédent. On remarque alors que le courant induit sera dans le sens contraire du courant fait par la source, ce qui fait que le courant total dans la tige diminue (il est la somme du courant fait par la source et du courant induit en sens contraire). Comme le courant net diminue, la force sur la tige diminue, de même que l'accélération. Comme il y a toujours une accélération, la vitesse augmente toujours, ce qui fait que le flux change de plus en plus vite et que le courant induit (qui est $B\ell v/R$) est de plus en plus grand. Cette augmentation de vitesse va se poursuivre jusqu'à ce que le courant induit vienne annuler le courant fait par la source. Alors, il n'y a plus de courant dans la tige et la force devient nulle. L'accélération sera donc nulle et la tige ira à vitesse constante. À ce moment, le courant induit est égal au courant fait par la source, ce qui signifie que

$$I_{\text{source}} = I_{\text{induit}}$$

$$\frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{vB\ell}{R}$$

Cette équation nous permet alors de trouver la vitesse limite de la tige.

$$v = \frac{\mathcal{E}}{B\ell}$$

9.4 LA LOI DE LENZ

On a vu qu'on peut trouver la direction du courant induit en utilisant la convention de signe de la loi de l'induction. Cependant, il existe une autre façon de déterminer le sens du courant induit. C'est la loi de Lenz.

La loi de Lenz (donne la direction du courant induit)

Le courant induit dans une boucle est dans une direction telle que le champ magnétique généré par le courant induit (qu'on va appeler le champ magnétique induit) à l'intérieur de la boucle s'oppose à la variation de flux.

Cela signifie que :

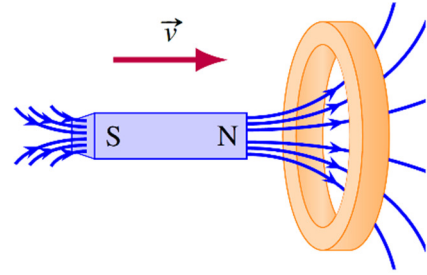
Si le flux augmente, le courant fait un champ magnétique induit dans la boucle dans le sens opposé au champ qui fait le flux.

Si le flux diminue, le courant fait un champ magnétique induit dans la boucle dans le même sens que le champ qui fait le flux.

Prenons quelques exemples qui vont illustrer comment trouver la direction du courant induit. Dans tous les cas, on va trouver la direction avec la convention de signe de la loi de l'induction et ensuite avec la loi de Lenz.

1^{er} cas

Dans cette première expérience, on approche un aimant d'un anneau métallique tel qu'illustré sur l'image.

Selon la loi de l'induction

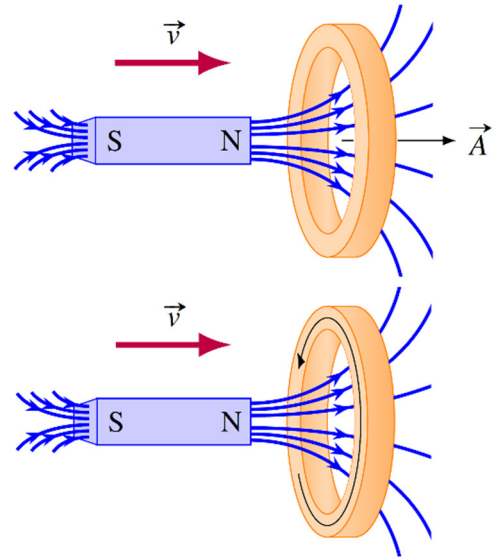
On doit choisir une direction pour le vecteur $\vec{A}$. On va prendre un vecteur vers la droite. Dans ce cas, le flux dans la boucle est positif et il augmente. Ainsi,

$$\frac{d\phi_B}{dt} \text{ est positif}$$

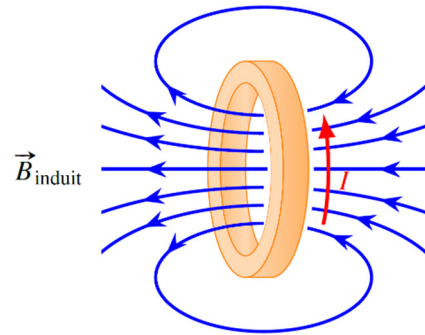
Si cette dérivée est positive, alors la différence de potentiel

$$\mathcal{E}_{\text{induite}} = -N \frac{d\phi_B}{dt} \text{ est négative.}$$

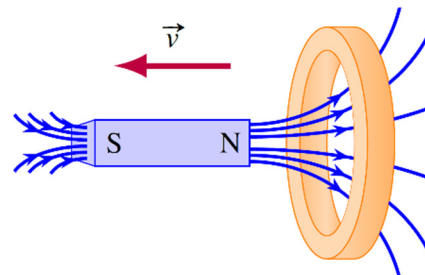
Ainsi, la direction du courant est celle montrée à droite.

Selon la loi de Lenz

La loi de Lenz nous dit que si le flux augmente, le courant induit va faire un champ magnétique induit dans le sens contraire du champ qui fait le flux. Comme le champ qui fait le flux dans l'anneau est vers la droite, le champ induit est vers la gauche. Ainsi, pour que le champ soit vers la gauche, il faut que le courant soit dans la direction indiquée sur la figure.

**2^{me} cas**

Dans cette deuxième expérience, on éloigne un aimant d'un anneau métallique tel qu'illustré sur l'image.



Selon la loi de l'induction

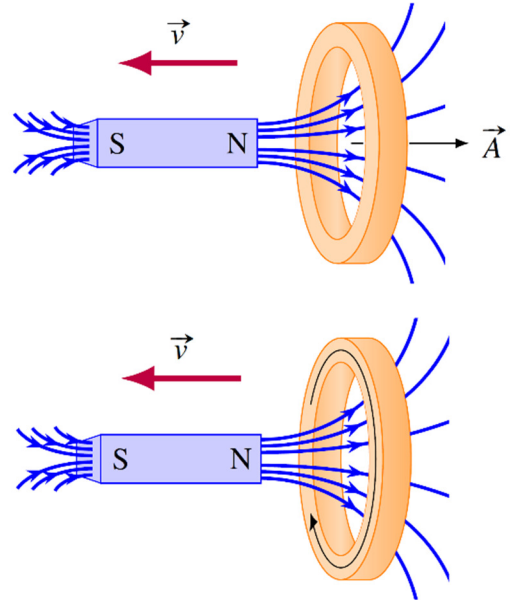
On doit choisir une direction pour le vecteur $\vec{A}$. On va prendre un vecteur vers la droite. Dans ce cas, le flux dans la boucle est positif et il diminue. Ainsi,

$$\frac{d\phi_B}{dt} \text{ est négatif}$$

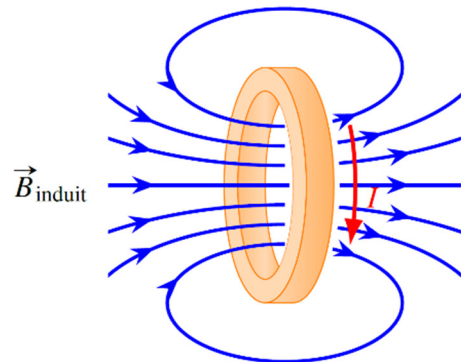
Si cette dérivée est négative, alors la différence de potentiel

$$\mathcal{E}_{\text{induite}} = -N \frac{d\phi_B}{dt} \text{ est positive.}$$

Ainsi, la direction du courant est celle montrée à droite.

Selon la loi de Lenz

La loi de Lenz nous dit que si le flux diminue, le courant induit va faire un champ magnétique induit dans le même sens que le champ qui fait le flux. Comme le champ qui fait le flux dans l'anneau est vers la droite, le champ induit est vers la droite. Ainsi, pour que le champ soit vers la droite, il faut que le courant soit dans la direction indiquée sur la figure.

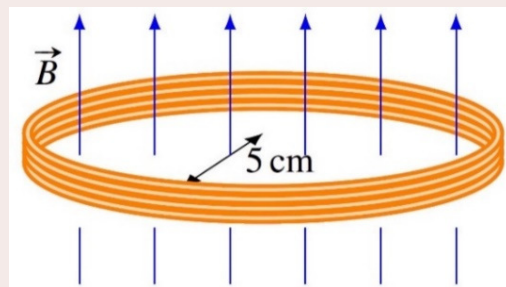


9.5 L'UTILISATION DE LA LOI DE L'INDUCTION DE FARADAY

On peut maintenant appliquer la loi de l'induction dans différentes situations.

Exemple 9.5.1

Un fil ayant une résistance de $5 \, \Omega$ forme un anneau avec 100 tours de fil. Le rayon de l'anneau est de 5 cm. Initialement, il n'y a pas de champ magnétique. Puis, le champ magnétique monte à un rythme constant pour atteindre 0,1 T (dans la direction indiquée sur la figure) en 0,05 s. Quel est le courant induit dans le fil pendant la montée du champ magnétique ?



Le courant se trouve à partir de la différence de potentiel et de la résistance. On a la résistance, mais on doit trouver la différence de potentiel. Celle-ci est une différence de potentiel induite qui se trouve avec

$$\mathcal{E}_{\text{induite}} = -N \frac{d\phi_B}{dt}$$

Quand le taux de variation du flux est constant, on peut le calculer avec

$$\frac{d\phi_B}{dt} = \frac{\Delta\phi_B}{\Delta t}$$

La différence de potentiel est donc donnée par

$$\mathcal{E}_{\text{induite}} = -N \frac{\Delta\phi_B}{\Delta t}$$

La variation de flux est

$$\begin{aligned}\Delta\phi_B &= \Delta(BA \cos \theta) \\ &= (BA \cos \theta)_f - (BA \cos \theta)_i \\ &= (B_f - B_i) A \cos \theta\end{aligned}$$

puisque'il n'y a que la grandeur du champ qui varie. Cette variation est donc

$$\begin{aligned}\Delta\phi_B &= (B_f - B_i) A \cos \theta \\ &= (0,1T - 0T) \cdot \pi \cdot (0,05m)^2 \cdot \cos 0^\circ \\ &= 7,85 \times 10^{-4} Wb\end{aligned}$$

Si on a mis l'angle de 0° , c'est qu'on a choisi un vecteur A vers le haut, donc dans le même sens que le champ magnétique. La différence de potentiel est donc

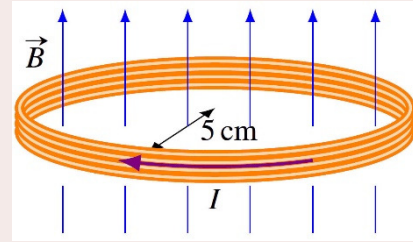
$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{\text{induite}} &= -N \frac{\Delta\phi_B}{\Delta t} \\ &= -100 \cdot \frac{7,85 \times 10^{-4} Wb}{0,05s} \\ &= -1,57V\end{aligned}$$

Le courant dans l'anneau est donc

$$\begin{aligned}I_{\text{induit}} &= \frac{\mathcal{E}_{\text{induite}}}{R} \\ &= -314mA\end{aligned}$$

Le signe est là pour nous indiquer que le courant est dans le sens négatif. On trouve le sens positif en plaçant notre pouce de la main droite dans la direction de A (donc vers

le haut). La direction positive correspond donc à un courant vers la droite sur le devant de l'anneau. Puisque le courant est négatif, le courant est dans le sens contraire. On a donc le courant indiqué sur la figure.

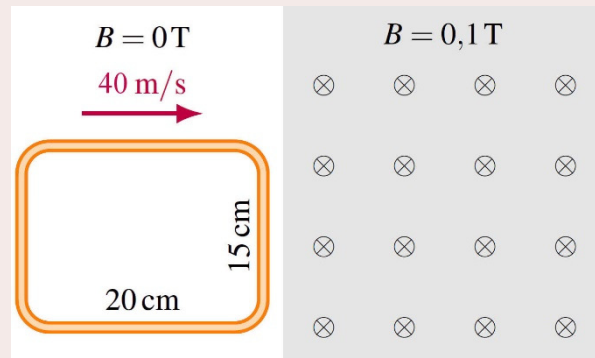


On peut aussi trouver le sens du courant avec la loi de Lenz. Comme le flux augmente, le champ magnétique induit fait par le courant induit est dans le sens contraire de champ qui fait le flux, donc vers le bas. On trouve ensuite la direction avec la règle de la main droite qui donne la direction du champ dans l'anneau à partir du courant (pouce dans la direction du champ, donc vers le bas, et doigts dans la direction du courant). On obtient la même direction pour le courant.

Dans cet exemple, c'est la force électrique qui génère le courant. (Ce doit être la force électrique puisque l'anneau est au repos. Il ne peut donc pas y avoir de force magnétique sur les charges dans l'anneau si elles sont au repos.) Ce sont des charges en mouvement à l'origine le champ magnétique variable vers le haut qui crée ce champ électrique.

Exemple 9.5.2

Un cadre métallique ayant une résistance de $0,5 \Omega$ se déplace avec une vitesse constante de 40 m/s dans une région où il n'y a pas de champ magnétique. Le cadre entre alors dans une région où il y a un champ magnétique de $0,1 \text{ T}$ dans la direction montrée sur la figure.



Quel est le courant induit dans le cadre métallique quand il entre dans la région où il y a un champ (en supposant que la vitesse reste toujours la même) ?

Quand le cadre est à la position montrée sur la figure, il n'y a pas de courant puisque le flux dans la boucle est toujours nul. Par contre, quand la cadre va commencer à entrer dans le champ, le flux dans le cadre va augmenter graduellement jusqu'à ce que le cadre soit complètement dans la région où il y a un champ. Le courant va donc apparaître quand la boucle va commencer à entrer dans la région où il y a un champ magnétique et cesser quand la boucle sera entièrement dans le champ.

Le courant se trouve à partir de la différence de potentiel et de la résistance. On a la résistance, mais on doit trouver la différence de potentiel. Celle-ci est une différence de potentiel induite qui se trouve avec

$$\mathcal{E}_{\text{induite}} = -N \frac{d\phi_B}{dt}$$

Il faut donc commencer par trouver le taux de variation de flux dans la boucle. On va le faire de 2 façons.

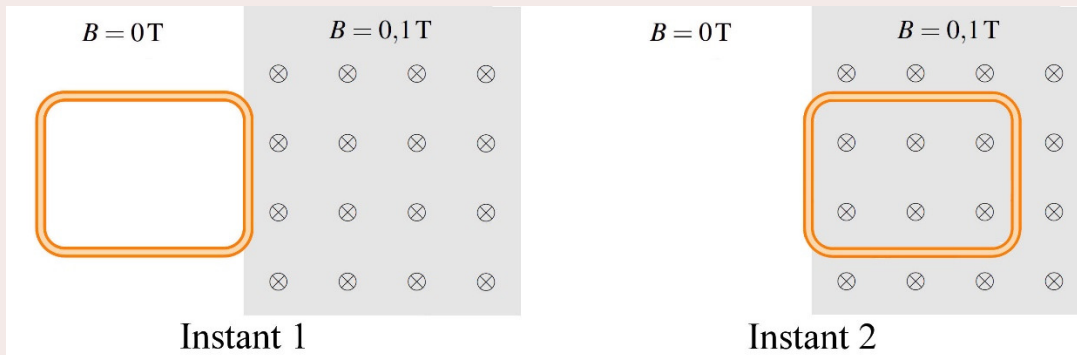
Version 1

Puisque la vitesse est constante, la variation de flux se fera à un rythme constant pendant l'entrée. Le taux de variation peut donc se calculer avec

$$\frac{d\phi_B}{dt} = \frac{\Delta\phi_B}{\Delta t}$$

On va maintenant considérer les deux instants suivants :

- 1) Le fil de devant vient juste d'arriver à l'endroit où le champ commence.
- 2) Le fil de derrière vient juste d'arriver à l'endroit où le champ commence.



À l'instant 1, le flux est nul puisqu'il n'y a pas de champ magnétique dans la boucle.

$$\phi_{B1} = 0$$

À l'instant 2, le flux est (en prenant un vecteur A qui sort de la page)

$$\begin{aligned}\phi_{B2} &= BA \cos \theta \\ &= 0,1T \cdot (0,2m \cdot 0,15m) \cdot \cos 180^\circ \\ &= -0,003Wb\end{aligned}$$

(L'angle est de 180° parce qu'on a choisi un vecteur A qui sort de la page, uniquement pour montrer qu'on peut choisir n'importe quel A . On aurait très bien pu choisir un vecteur A qui entre dans la page. L'angle aurait alors été de 0° .)

La variation de flux est donc

$$\begin{aligned}\Delta\phi_B &= \phi_{B2} - \phi_{B1} \\ &= -0,003Wb - 0Wb \\ &= -0,003Wb\end{aligned}$$

Pour trouver le taux de variation du flux, il nous faut aussi Δt . Le temps entre l'instant 1 et l'instant 2 est le temps qu'il faut pour que le cadre avance de 20 cm. Puisque la vitesse du cadre est de 40 m/s, le temps est

$$\begin{aligned}\Delta t &= \frac{0,2m}{40 \frac{m}{s}} \\ &= 0,005s\end{aligned}$$

Ainsi, le taux de variation du flux est

$$\begin{aligned}\frac{d\phi_B}{dt} &= \frac{\Delta\phi_B}{\Delta t} \\ &= \frac{-0,003Wb}{0,005s} \\ &= -0,6 \frac{Wb}{s}\end{aligned}$$

Version 2

Pendant l'entrée du cadre, on a la situation illustrée sur la figure. Le flux dans le cadre est

$$\begin{aligned}\phi_B &= BA \cos \theta \\ &= B(lx) \cos 180^\circ\end{aligned}$$

(On prend encore un A qui sort de la page.)

Le flux est donc

$$\phi_B = -B(lx)$$

On remarque alors que le flux change parce que x , qui est la largeur de la région où il y a un champ magnétique qui est à l'intérieur du cadre augmente quand le cadre avance. Le taux de variation du flux est donc

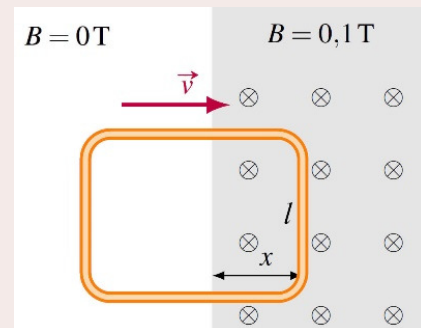
$$\frac{d\phi_B}{dt} = \frac{d(-Blx)}{dt}$$

Puisque B et l sont des constantes, on peut les sortir de la dérivée.

$$\frac{d\phi_B}{dt} = -Bl \frac{dx}{dt}$$

Le rythme d'augmentation de la longueur x étant la vitesse de la boucle, on a

$$\frac{d\phi_B}{dt} = -Blv$$



(Cette formule est valide pour tous les cadres rectangulaires entrant dans un champ magnétique.) Le taux de variation est donc

$$\begin{aligned}\frac{d\phi_B}{dt} &= -Blv \\ &= -0,1\text{T} \cdot 0,15\text{m} \cdot 40 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ &= -0,6 \frac{\text{Wb}}{\text{s}}\end{aligned}$$

C'est le même taux que celui obtenu dans la version 1.

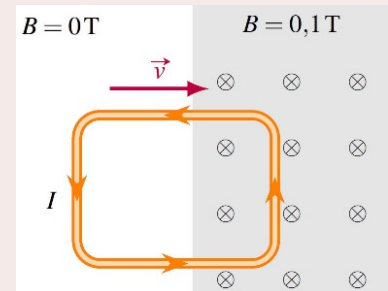
Maintenant qu'on a le taux de variation du flux, on peut trouver la différence de potentiel induite. Cette différence de potentiel est

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{\text{induite}} &= -N \frac{d\phi_B}{dt} \\ &= -1 \cdot -0,6 \frac{\text{Wb}}{\text{s}} \\ &= 0,6\text{V}\end{aligned}$$

Le courant est donc

$$\begin{aligned}I &= \frac{\mathcal{E}}{R} \\ &= \frac{0,6\text{V}}{0,5\Omega} \\ &= 1,2\text{A}\end{aligned}$$

Ce courant est positif. Avec notre vecteur $\vec{A}$ sortant de la page, le sens positif est celui montré sur la figure. C'est aussi le sens du courant.



Dans cet exemple, c'est la force magnétique qui est à l'origine du courant. Quand le devant du cadre est dans le champ magnétique, on a une tige métallique en mouvement dans un champ magnétique. On a vu au chapitre 7 que, dans ce cas, cela génère une différence de potentiel de

$$\mathcal{E}_{\text{induite}} = Blv$$

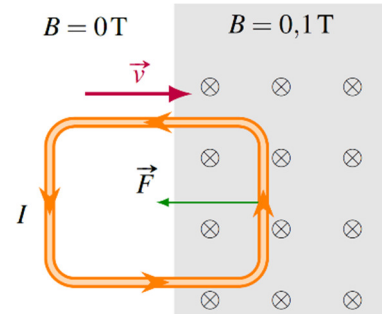
C'est exactement le $\mathcal{E}$ trouvé avec la formule de l'induction dans l'exemple.

9.6 LA FORCE ET LE CHAMP MAGNÉTIQUE INDUIT

La force faite sur les courants induits

Quand il y a un courant induit, on se retrouve presque toujours avec un courant dans un champ magnétique. Comme les courants dans un champ magnétique subissent une force, il y aura une force sur le circuit.

Si on prend l'exemple de cadre qui entre dans le champ magnétique, une partie du cadre est dans le champ magnétique. On a déterminé que dans ce cas, il y a un courant dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. Avec la règle de la main droite, on détermine que la force sur ce courant dans le champ magnétique est dans la direction montrée sur cette figure.

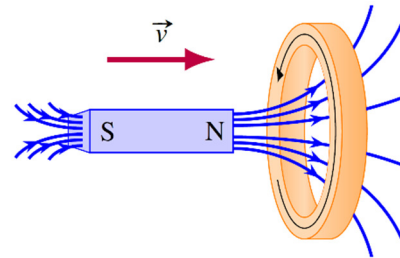


(Les forces sur le fil du haut (vers le bas) et la force sur le fil du bas (vers le haut) du cadre s'annulent mutuellement, mais il reste une force sur le fil de droite.)

Cette force fait donc ralentir le cadre.

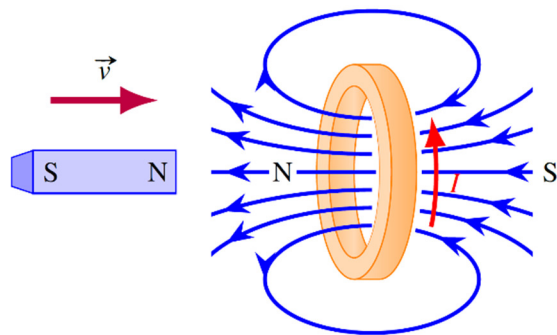
La force sur un anneau quand on approche ou éloigne un aimant

Reprenons le cas de l'aimant qui s'approche de l'anneau. On a vu que dans ce cas, il y a un courant dans l'anneau qui apparaît dans la direction montrée sur la figure.



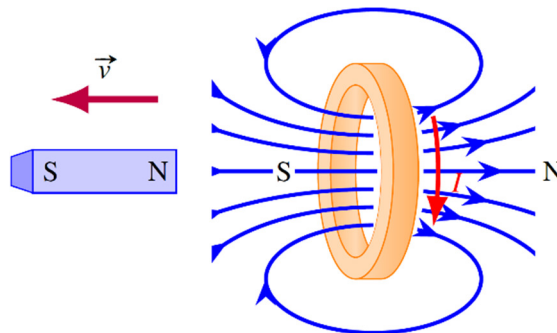
On a alors un courant dans un champ magnétique et il y a donc une force sur ce courant. On pourrait trouver la direction de la force avec la règle de la main droite, mais on peut aussi trouver la direction de la force en examinant le champ magnétique fait par le courant induit (appelé le champ magnétique induit).

On sait qu'un anneau parcouru par un courant va générer un champ magnétique et que l'anneau va donc agir comme un aimant. La figure de droite montre les pôles de l'aimant associé au champ magnétique induit.



On remarque alors qu'il y a une force de répulsion entre l'anneau et l'aimant puisque les deux pôles nord se repoussent.

Si l'aimant s'éloigne de l'anneau, le courant est dans l'autre sens et les pôles de l'anneau sont inversés. On a alors la situation montrée à droite.



Dans ce cas, il y a une force d'attraction entre l'anneau et l'aimant.

Quelques démonstrations expérimentales de la force sur un anneau

On peut voir ces effets dans le vidéo suivant.

https://www.youtube.com/watch?v=4PdXTMEb_8s

Notez qu'il n'y a pas de force quand l'anneau est coupé de sorte qu'il ne se referme pas sur lui-même. Dans ce cas, le courant ne peut pas circuler et l'anneau ne peut pas agir comme un aimant. Il n'y a donc pas de force entre l'anneau et l'aimant dans ce cas.

Avec une variation rapide de flux, le courant induit et le champ induit peuvent être très grands et les forces peuvent être très grandes. C'est ce qui arrive avec cet instrument qui projette un anneau métallique.

<https://www.youtube.com/watch?v=FXvLG4YXmiM>

Quand on démarre l'appareil, le champ magnétique fait par l'appareil monte très rapidement, ce qui induit un courant dans l'anneau. L'anneau agit alors comme un aimant qui fait un champ magnétique opposé très important. C'est ce qui fait cette répulsion entre l'anneau et l'appareil.

En inversant constamment la direction du champ magnétique, on peut faire léviter l'objet.

<https://www.youtube.com/watch?v=r0bGQVB2y3M>

(Avancez à 2:09)

Le freinage par courants induits

Les forces sur les courants induits sont aussi à l'œuvre dans cette expérience où un aimant arrête le mouvement d'une plaque de métal au bout d'un pendule.

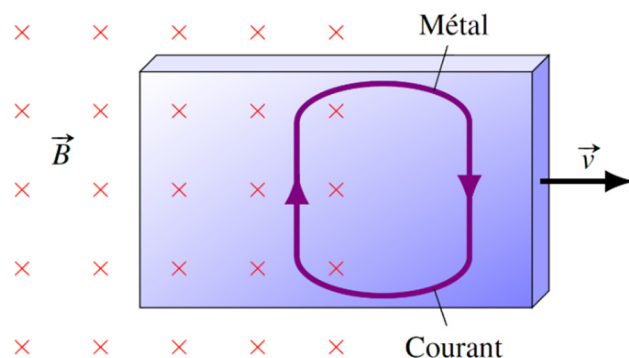
<https://www.youtube.com/watch?v=qTkOpprVITM>

La plaque est en aluminium et elle n'est donc pas attirée par l'aimant. Vous voyez qu'il n'y a aucun effet si la plaque est au repos entre les pôles de l'aimant. Par contre, elle ralentit très rapidement quand elle arrive avec une certaine vitesse.

Regardons les forces sur les courants pour comprendre ce qui se passe. Prenons simplement le cas d'une plaque de métal qui sort d'un champ magnétique.

En se déplaçant la plaque vers la droite dans un champ entrant dans la page, les électrons libres dans la plaque subissent une force vers le bas. Si

toute la plaque était dans un champ uniforme, les électrons viendraient simplement s'accumuler partout au bas de la plaque. La situation est différente si le champ magnétique n'est pas partout le même. Sur la figure, il n'y a pas de champ dans la partie droite de la plaque. Les électrons ne subissent donc pas de force à cet endroit et ils peuvent donc



retourner vers le haut de la plaque. Il en résulte une circulation des charges qui donne le courant illustré sur la figure (rappelez-vous que le courant est dans le sens contraire du mouvement des électrons). Il y a donc un courant vers le haut dans la plaque à l'endroit où elle est dans un champ magnétique. La force sur ce courant est, selon la règle de la main droite, vers la gauche. C'est cette force qui ralentit la plaque.

On peut aussi expliquer l'apparition du courant avec la loi de Lenz. Quand la plaque sort du champ magnétique, il y a une baisse du flux magnétique qui traverse la plaque. Il va donc apparaître un courant dans la plaque qui va faire un champ magnétique dans le même sens que le champ magnétique externe, ce qui donne un courant dans le sens indiqué sur la figure. En fait, la situation est identique au cadre qui sort d'un champ magnétique, sauf que le courant est réparti un peu partout dans la plaque de métal au lieu de suivre un cadre métallique. Ces courants induits qui apparaissent ainsi un peu partout dans un morceau de métal sont appelés des *courants de Foucault*.

Il se passe sensiblement la même chose quand la plaque entre dans le champ magnétique. Il apparaît des courants et la force sur ces courants s'oppose au mouvement de la plaque. Ce sont ces forces qu'on voyait à l'œuvre pour ralentir le pendule dans le film.

On remarque aussi que ces forces disparaissent si la plaque a la forme d'un peigne (pendule de droite sur la figure). Dans ce cas, les courants ne peuvent pas circuler dans la plaque parce que la plaque est séparée en plusieurs points d'un côté. S'il n'y a pas de courant, il n'y a pas de force de freinage. On prend ensuite une plaque un peu identique, mais avec les pointes du peigne qui sont reliées l'une à l'autre (pendule du milieu sur la figure). On observe alors que la force de freinage revient parce que les courants peuvent à nouveau circuler dans la plaque.



www.haverford.edu/physics/demonstrations/e%26m/eddy_current_pendulum.htm

La force n'est pas toujours dans la direction opposée au mouvement. Remarquez comment la canette est entraînée par le mouvement de l'aimant quand on passe l'aimant au-dessus de la canette. Je vous rappelle que cette canette est en aluminium et qu'elle n'est pas attirée par les aimants quand rien ne bouge.

<https://www.youtube.com/watch?v=yk4ACjzDFRY> (allez à 1:18)

Remarquez aussi comment un gros disque de cuivre est mis en mouvement avec un aimant.

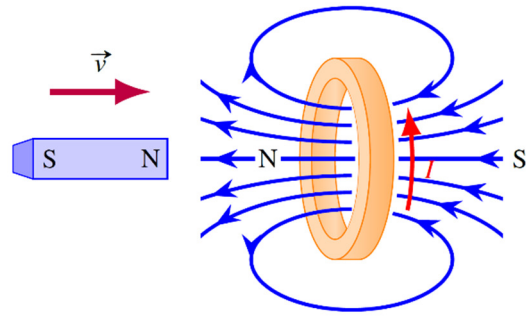
<https://www.youtube.com/watch?v=Yu1uRvErM80>

On peut même faire tourner une canette.

https://www.youtube.com/watch?v=3IVI5_q-lFg

La force faite par les courants induits

On sait que les courants induits subissent des forces quand il y a de l'induction. Mais ce n'est pas tout puisque ces courants génèrent aussi des champs magnétiques induits qui, eux aussi, peuvent exercer des forces. Dans notre exemple de l'anneau, on a dit que l'anneau est repoussé par l'aimant. On remarque cependant que l'aimant subit également une force de répulsion (qu'on doit bien sûr avoir pour être conforme à la 3^e loi de Newton).



On va maintenant s'intéresser à cette force faite par les courants induits.

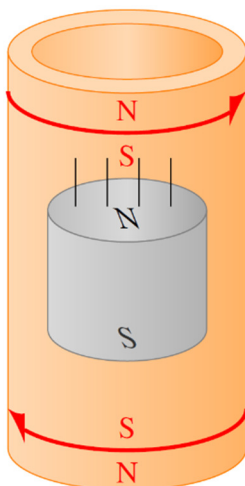
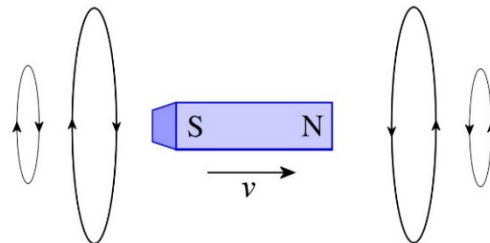
Un aimant qui tombe dans un tube

Pour observer cette force en action, examinons ce qui se produit si on laisse tomber un aimant dans un tuyau en métal.

<https://www.youtube.com/watch?v=H31K9qcmeMU>

L'aimant tombe lentement dans le tube, ce qui signifie qu'il y a quelque chose qui s'oppose à la gravitation. Cet effet ne vient pas du fait que le métal agit comme un aimant, car on a vu que le cuivre et l'aluminium (les deux métaux montrés dans le film) ne sont pas ferromagnétiques.

On sait que quand l'aimant se déplace, il génère aussi un champ électrique (figure de droite). Donc, l'aimant qui tombe dans le tube fait un champ électrique et ce champ électrique fait apparaître des courants dans le tuyau. Trouvons la direction de ces courants induits.



En dessous de l'aimant, le champ magnétique fait par l'aimant est vers le haut (puisque'il va vers le pôle sud de l'aimant) et il est de plus en plus grand, car l'aimant s'approche. Le courant doit donc faire un champ magnétique vers le bas pour s'opposer à la variation (loi de Lenz). Avec la règle de la main droite, on trouve la direction du courant indiqué sur la figure. Cette boucle de courant agit alors comme un aimant avec le pôle sud au-dessus et le pôle nord en dessous. Le pôle sud de cet aimant repousse alors le pôle sud de l'aimant qui descend, ce qui ralentit la descente.

Au-dessus de l'aimant, le champ magnétique de l'aimant est aussi vers le haut (puisque'il part du pôle nord de l'aimant) et il est de plus en plus petit, car l'aimant s'éloigne. Le courant doit donc faire un

champ magnétique vers le haut pour s'opposer à la variation (loi de Lenz). Avec la règle de la main droite, on trouve le courant indiqué sur la figure. Cette boucle de courant agit alors comme un aimant avec le pôle nord au-dessus et le pôle sud en dessous. Le pôle sud de cet aimant attire alors le pôle nord de l'aimant qui descend, ce qui ralentit la descente.

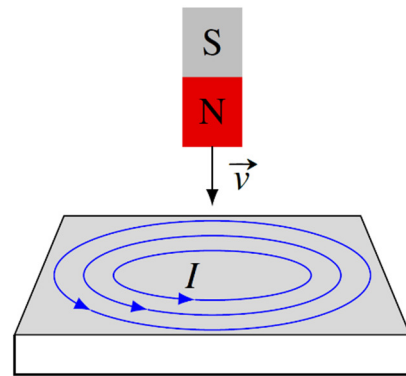
La vitesse de l'aimant va se stabiliser à une certaine vitesse bien précise. À cette vitesse, la force de gravité est exactement annulée par les forces magnétiques et l'aimant descend à vitesse constante. Si l'aimant va moins rapidement que cette vitesse d'équilibre, les champs magnétiques varient moins vite et les courants induits sont plus petits. La force magnétique est alors plus petite et la force de gravité domine. L'aimant va donc accélérer pour attendre la vitesse d'équilibre. Si l'aimant va plus vite que cette vitesse d'équilibre, les champs magnétiques varient plus rapidement et les courants induits sont plus grands. La force magnétique est alors plus grande et elle domine sur la force de gravité. L'aimant va donc ralentir pour attendre la vitesse d'équilibre.

Un aimant qui tombe au-dessus d'un conducteur

Il va se produire à peu près la même chose si un aimant tombe au-dessus d'une surface conductrice. L'aimant en mouvement génère un champ électrique qui va entraîner la formation de boucles de courants dans la plaque conductrice. Exactement comme dans le cas du courant dans le tube au-dessus de l'aimant, ce courant agit comme un aimant qui repousse l'aimant qui tombe. L'aimant va donc tomber moins rapidement que s'il n'y avait pas de plaque conductrice.

<https://www.youtube.com/watch?v=sENGdSF8ppA>

(Avancez à 1:00)



Si l'aimant tombe au-dessus d'une substance supraconductrice, l'effet sera encore plus spectaculaire. Les courants induits ne se dissipent pas à cause de la résistance, ils deviennent assez grands pour faire une force magnétique qui annule le poids de l'aimant. On se retrouve donc avec l'aimant qui flotte au-dessus du supraconducteur. Dans la vidéo suivante, c'est le matériau supraconducteur qui flotte au-dessus de l'aimant, mais ça revient au même.

<https://www.youtube.com/watch?v=umEGUfhVah4>

Le matériau qui flotte finit par tomber parce qu'il se réchauffe et finit par dépasser sa température critique de supraconductivité. À partir de là, il n'est plus supraconducteur et les courants se dissipent à cause de la résistance.

Le freinage par induction

Dans cette démonstration, la force de freinage est faite par les courants induits.

<https://www.youtube.com/watch?v=Z8FhedeIa7o>

Quand l'aimant passe au-dessus des plaques de métal, il y a des courants induits qui apparaissent dans la plaque. Ces courants subissent alors une force qui cherche à entraîner la plaque (comme la canette qui était entraînée par l'aimant) dans la direction du mouvement du cheval. Si l'aimant exerce une force sur la plaque, cela veut dire, en vertu de la troisième loi de Newton, que les courants exercent aussi une force sur l'aimant. La force sur l'aimant est dans la direction opposée à celle que subit la plaque, c'est-à-dire dans la direction opposée au mouvement du cheval. Ainsi, le cheval freine.

D'ailleurs, certains poids lourds, certains charriots de montagnes russes et certains trains à grande vitesse utilisent des systèmes de freinage par induction. Il a l'avantage de ne générer aucune usure puisqu'il n'y a pas de contact. Toutefois, on pourrait montrer qu'un tel système fait diminuer la vitesse de façon exponentielle. Cela signifie que la vitesse de l'objet ne peut jamais devenir nulle s'il n'y a que le freinage par induction. On doit donc utiliser un autre système de freinage pour compléter le freinage par induction (il y a 4 systèmes différents sur le TGV.).

Voici d'ailleurs une image montrant le système de freinage magnétique du TGV. Juste au-dessus du rail, on voit l'aimant. Ce sont ces aimants qui vont générer des courants dans le rail et créer une force de freinage.



coastersworld.fr/freins-magnetiques-montagnes-russes/

9.7 LA CONSERVATION DE L'ÉNERGIE

La chaleur générée par les courants induits

Les courants qui apparaissent avec l'induction génèrent de la chaleur par effet Joule, comme on peut le voir dans ces vidéos.

<https://www.youtube.com/watch?v=7ipZ4vdivbU>

<https://www.youtube.com/watch?v=VydPQuLyEns>

Pour qu'il y ait des courants, il doit y avoir une variation de flux. Ici, on l'obtient en utilisant un courant variant très rapidement (de façon sinusoïdale) dans le solénoïde.

Ce sont aussi les courants induits qui sont à la base du fonctionnement du four à induction. En produisant un champ magnétique variable (ce qui produit aussi un champ électrique), sous le chaudron, on entraîne la formation de courants dans le chaudron. Ce sont ces courants qui génèrent de la chaleur dans la paroi du chaudron.

Mais si les courants induits génèrent de la chaleur, d'où peut bien provenir cette énergie ? Revenons sur quelques-uns de nos exemples pour comprendre d'où vient l'énergie.

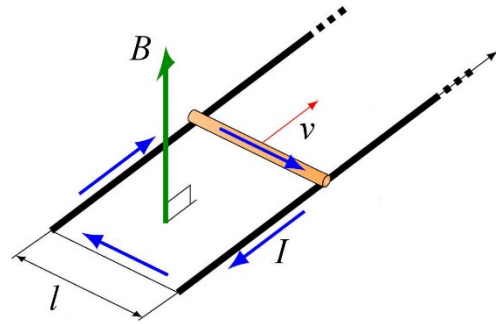
La tige sur des rails

Quand la tige se déplace, il y a un courant qui circule dans le circuit. On sait d'un exemple précédent que le courant est

$$I = \frac{vB\ell}{R}$$

Cela signifie que la puissance dissipée en chaleur dans la résistance est

$$\begin{aligned} P_R &= RI^2 \\ &= R \left(\frac{vB\ell}{R} \right)^2 \\ &= \frac{v^2 B^2 \ell^2}{R} \end{aligned}$$



Pour comprendre d'où vient cette énergie, on doit remarquer qu'il y a une force qui s'exerce sur les courants. Il y a donc une force sur les fils du circuit, incluant la tige. La grandeur de la force sur la tige est

$$F = I\ell B \sin 90^\circ$$

Notez que cette force s'oppose au mouvement de la tige. En utilisant la valeur du courant, cette force est

$$\begin{aligned} F &= \left(\frac{vB\ell}{R} \right) \ell B \\ &= \frac{vB^2 \ell^2}{R} \end{aligned}$$

La puissance de cette force est donc

$$\begin{aligned} P &= Fv \cos \theta \\ &= \frac{vB^2 \ell^2}{R} v \cos 180^\circ \\ &= -\frac{v^2 B^2 \ell^2}{R} \end{aligned}$$

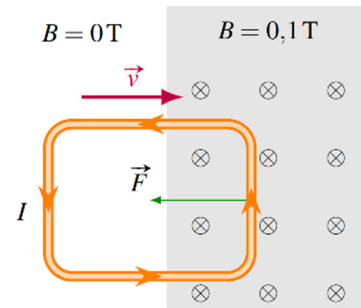
(L'angle est de 180° puisque la force est dans la direction opposée à la vitesse.)

Une puissance négative signifie que l'énergie cinétique de la tige diminue. On remarque alors que l'énergie cinétique perdue par la tige est égale à l'énergie dissipée en chaleur par la résistance. Ainsi, l'énergie perdue en chaleur provient tout simplement de l'énergie cinétique de la tige.

Le cadre entrant dans le champ magnétique

On a vu que quand un cadre entre dans un champ magnétique, il y a une force qui fait diminuer la vitesse du cadre.

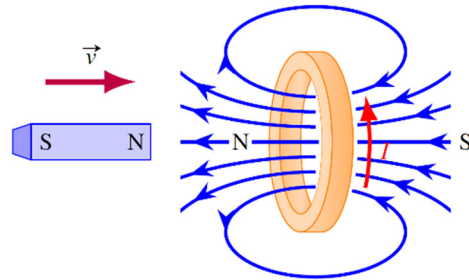
Cela veut dire que le cadre va ralentir. Encore une fois, c'est l'énergie cinétique du cadre qui se transforme en chaleur dans la résistance du cadre.



Un aimant s'approchant d'un anneau

Quand un aimant s'approche d'un anneau, on a vu que le courant induit permet à l'anneau d'agir comme un aimant. Cela fait en sorte que l'aimant et l'anneau se repoussent mutuellement.

Dans ce cas, l'aimant qui s'approche va donc ralentir et perdre de l'énergie cinétique. Pendant ce temps, il y a de l'énergie perdue en chaleur dans l'anneau et l'énergie cinétique de l'anneau augmente (puisqu'il est repoussé par l'aimant).



Ainsi, c'est l'énergie cinétique de l'aimant qui se transforme en énergie cinétique de l'anneau et en chaleur dissipée dans l'anneau.

9.8 LA DIFFÉRENCE DE POTENTIEL INDUITE DANS UN CIRCUIT QUI NE SE REFERME PAS SUR LUI-MÊME

La formule de la différence de potentiel induite

$$\mathcal{E}_{\text{induite}} = -N \frac{d\phi_B}{dt}$$

est valide uniquement si la boucle de fil se referme sur elle-même. De plus, on a aussi vu qu'il y a un courant induit dans la boucle uniquement si la boucle de fil se referme sur elle-même.

Si la boucle ne se referme pas, il n'y aura pas de courant, mais il y aura quand même une différence de potentiel. Pour trouver quelle extrémité du fil aura le potentiel le plus grand, on trouve le sens du courant qu'il y aurait si le fil était refermé sur lui-même (avec la convention de signe ou la loi de Lenz). Ce courant nous indique alors vers quelle extrémité

du fil les charges positives iront s'accumuler et c'est cette extrémité qui aura le potentiel le plus grand.

Puisque la boucle ne se referme pas, on ne peut pas trouver la différence de potentiel avec le rythme de variation du flux magnétique. Il faudrait retourner à la base et calculer la différence de potentiel en séparant le fil en petit morceau en calculant le travail fait par la force magnétique ou par la force électrique sur les charges. On calculerait alors la différence de potentiel dans chaque petit bout de fil avec

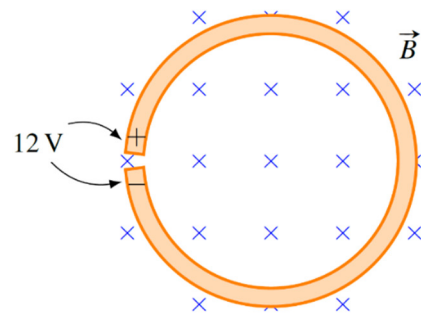
$$d\mathcal{E}_{\text{induite}} = \vec{E} \cdot d\vec{\ell} + \vec{v} \times \vec{B} \cdot d\vec{\ell}$$

Pour finir, on sommerait toutes ces différences de potentiel pour obtenir la différence de potentiel total.

Toutefois, on peut quand même utiliser la formule

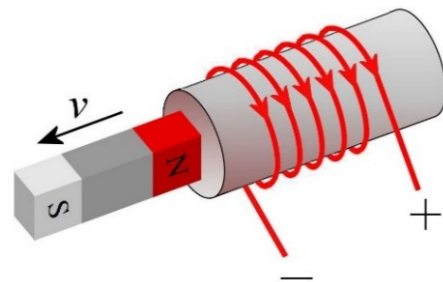
$$\mathcal{E}_{\text{induite}} = -N \frac{d\phi_B}{dt}$$

comme approximation si la boucle de fil est tout près de se refermer. Par exemple, on pourrait l'utiliser dans le cas illustré sur la figure. En calculant la variation de flux dans la boucle circulaire (en faisant comme s'il ne manquait pas le petit bout), on obtient une excellente approximation de la différence de potentiel induite. En réalité, la véritable différence de potentiel est un peu plus petite que celle calculée puisqu'il manque un petit bout dans l'anneau, mais la différence ne sera pas très grande si la partie qui manque est très petite.



On peut aussi utiliser la formule de la variation du flux si la partie du circuit qui manque pour refermer le circuit est dans une région où il n'y a pas de champ magnétique ou de champ électrique.

C'est le cas dans la situation montrée sur la figure. Les deux bouts de fil étant plus loin de l'aimant, le champ magnétique est plus petit à cet endroit. On peut donc faire comme si ces deux fils se rejoignaient pour former une boucle pour calculer la différence de potentiel. En réalité, la véritable différence de potentiel est un peu plus petite que celle calculée puisqu'il manque un bout de fil, mais la différence ne sera pas très grande si la différence de potentiel induite dans cette partie manquante est petite.

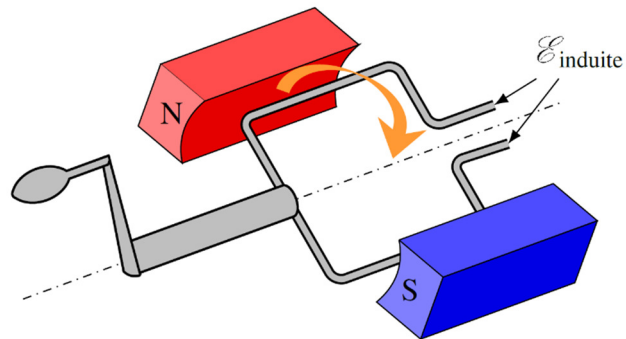


9.9 LES GÉNÉRATEURS

La différence de potentiel aux bornes d'un générateur

Aujourd'hui, la très grande majorité de l'énergie électrique produite est obtenue à partir de l'induction électromagnétique (le reste provient de batteries ou des panneaux solaires).

Immédiatement après la découverte de l'induction, on tenta de fabriquer un générateur, c'est-à-dire un appareil qui va fournir une différence de potentiel. Après quelques essais, la solution retenue fut de faire tourner une boucle de fil dans un champ magnétique. (Même s'il semble n'y avoir qu'un seul tour de fil sur la figure, il y a toujours plusieurs tours dans la boucle.)



Si on relie les deux extrémités du fil de la boucle à un circuit, on aura du courant. On pourrait, par exemple, faire fonctionner une ampoule. C'est ce qu'on peut voir dans ce vidéo.

<https://www.youtube.com/watch?v=jd4-twQobs>

Calculons la différence de potentiel qui apparaît aux bornes de la boucle qui tourne. Le circuit ne se referme pas sur lui-même, mais comme la partie qui manque pour fermer la boucle est très petite, on peut trouver la différence de potentiel avec

$$\mathcal{E}_{induite} = -N \frac{d\phi_B}{dt}$$

En tournant la boucle à vitesse constante, l'angle entre le champ et le vecteur $\mathbf{A}$ change continuellement. Cela signifie que l'angle est

$$\theta = \omega t + \theta_0$$

où ω est la vitesse angulaire de rotation et θ_0 est l'angle initial entre le champ $\mathbf{B}$ et $\mathbf{A}$. La différence de potentiel induite aux bornes de la boucle est donc

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{induite} &= -N \frac{d\phi_B}{dt} \\ &= -N \frac{d(BA \cos \theta)}{dt} \\ &= -N \frac{d(BA \cos(\omega t + \theta_0))}{dt} \end{aligned}$$

Comme le champ magnétique B et l'aire de la boucle A sont des constantes, on peut les sortir de la dérivée pour obtenir

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{\text{induite}} &= -NBA \frac{d \cos(\omega t + \theta_0)}{dt} \\ &= NBA\omega \sin(\omega t + \theta_0)\end{aligned}$$

On va appeler Δv cette différence de potentiel aux bornes du générateur. Comme le sinus peut valoir 1 au maximum, la valeur devant le sinus est la valeur maximale de la différence de potentiel induite. On va appeler cette valeur maximale Δv_0 . On a donc

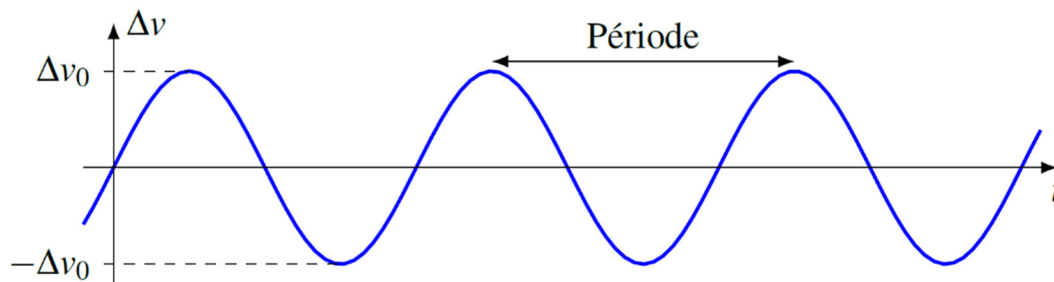
Différence de potentiel induite par un générateur

$$\Delta v = \Delta v_0 \sin(\omega t + \theta_0)$$

$$\Delta v_0 = NBA\omega$$

(On comprendra au chapitre 11 pourquoi on utilise des lettres minuscules pour la différence de potentiel dans ce cas.)

La différence de potentiel varie donc de façon sinusoïdale. Voici un graphique montrant la différence de potentiel en fonction du temps (sur cette figure $\theta_0 = 0$).



On obtient ce qu'on appelle une **différence de potentiel alternative**. Si on branche cette source à un circuit, il y aura un courant qui variera aussi de façon sinusoïdale qu'on appelle un **courant alternatif**, noté AC (pour *alternative current*). Quand le courant est toujours dans le même sens, comme quand on branche une batterie à un circuit, on obtient un **courant continu**, noté DC (pour *direct current*). C'est une différence de potentiel alternative qu'on retrouve dans les prises de courant à la maison. La différence de potentiel entre les deux trous de la prise a une amplitude de 170 V et la fréquence d'oscillation est de 60 Hz.

L'animation suivante vous montre le flux passant dans la boucle et le courant fourni par le générateur en fonction de la position de la boucle.

<https://www.youtube.com/watch?v=wchiNm1CgC4>

Exemple 9.9.1

Une bobine circulaire ayant un diamètre de 20 cm tourne sur elle-même avec une fréquence constante de 60 Hz dans un champ magnétique de 500 gauss.

- a) Combien doit-il y avoir de tours de fil sur la bobine pour que l'amplitude de la différence de potentiel soit de 170 V ?

On doit donc avoir

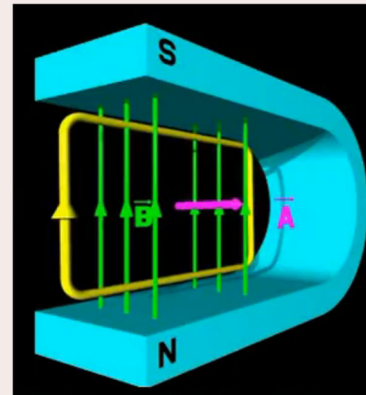
$$\begin{aligned}\Delta v_0 &= NBA\omega \\ 170V &= N \cdot 0,05T \cdot \pi \cdot (0,1m)^2 \cdot (2\pi \cdot 60Hz) \\ N &= 287\end{aligned}$$

Il doit donc y avoir 287 tours de fils sur notre bobine.

- b) Si, au départ, le plan de la boucle est parallèle au champ magnétique (comme sur la figure), quelle est la différence de potentiel aux bornes de la bobine à $t = 0,02$ s ?

Comme le vecteur A est perpendiculaire au plan de la boucle et que ce plan est parallèle au champ, cela signifie que le vecteur A est initialement perpendiculaire à la direction du champ.

www.youtube.com/watch?v=wchiNm1CgC4



L'angle initial entre le vecteur A et le champ B est donc de $\theta_0 = 90^\circ$. (On aurait pu également choisir -90°)

La différence de potentiel est donc

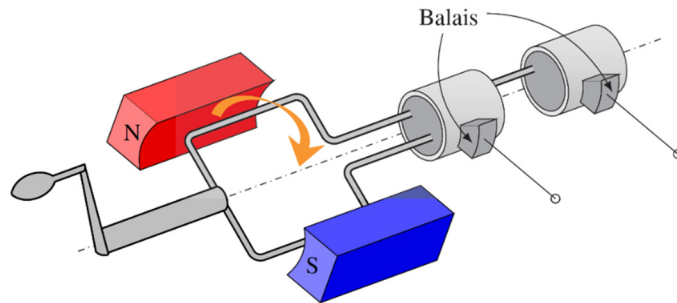
$$\begin{aligned}\Delta v &= \Delta v_0 \sin(\omega t + \theta_0) \\ &= 170V \cdot \sin((2\pi \cdot 60Hz) \cdot 0,02s + \frac{\pi}{2}) \\ &= 52,5V\end{aligned}$$

(Si on avait choisi -90° , on aurait obtenu $-52,5$ V, on aurait alors dit que la différence de potentiel entre les deux extrémités est de $52,5$ V puisqu'on ne voulait que la grandeur de la différence de potentiel.)

Comment faire pour que les fils ne s'emmêlent pas ?

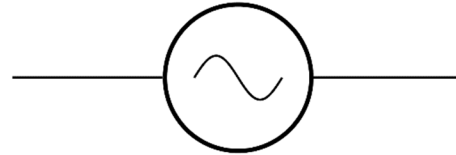
Si les fils de la bobine sont simplement branchés à un circuit, ils vont s'entortiller l'un autour de l'autre avec la rotation de la bobine. Comme pour les moteurs, on utilise des

petits balais métalliques qui frottent sur des anneaux sur lesquels sont fixés les fils de la bobine.



Le symbole du générateur

Voici le symbole du générateur servant à le représenter dans un circuit. En fait, c'est le symbole pour n'importe quelle source de courant alternatif.



Un générateur, c'est aussi un moteur

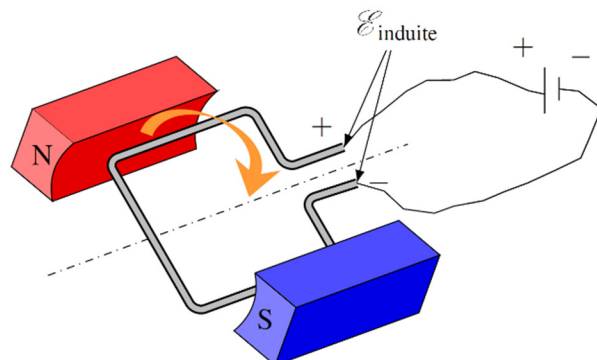
Le moteur et le générateur sont identiques

Vous avez sans doute remarqué que les moteurs et les générateurs sont identiques. Dans les deux cas, il y a une boucle de fil qui tourne dans un champ magnétique. En fait, les deux sont exactement identiques et il est possible de se servir d'un générateur comme moteur ou d'un moteur comme générateur. Dans le cas du moteur, on fait passer un courant dans les fils et la force magnétique fait tourner la boucle. Dans le cas d'un générateur, on fait tourner la boucle avec une force externe, ce qui engendre la formation d'un courant.

La vitesse de rotation maximale d'un moteur

En fait, c'est tellement identique que c'est l'induction qui limite la vitesse de rotation d'un moteur. La première fois qu'on a parlé du moteur électrique, on aurait dû arriver à la conclusion que le moteur allait continuellement accélérer puisque le moment de force fait sur la boucle par le champ magnétique semblait être toujours le même.

En réalité, ce moment de force diminue avec la rotation parce que le moteur est aussi un générateur. Quand la boucle se met à tourner, il y a une variation de flux dans la boucle, ce qui crée une différence de potentiel induite. Cette différence de potentiel est toujours opposée à la différence de potentiel de la source qui envoie le courant dans la boucle (figure), ce qui fait diminuer le courant. Plus le moteur tourne vite, plus la différence de potentiel induite est grande.



Ainsi, au départ, il n'y a que la différence de potentiel de la source et le courant est très grand. Le moment de force est donc important et la boucle accélère beaucoup. Puis, avec le moteur qui tourne de plus en plus vite, la différence de potentiel induite augmente. Comme elle s'oppose à la source, cela fait diminuer le courant, ce qui diminue la force sur les fils et donc le moment de force. L'accélération du moteur diminue jusqu'à ce que la différence de potentiel induite soit égale à la différence de potentiel de la source.

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{source} &= \Delta v_0 \\ &= NBA\omega_{\max}\end{aligned}$$

À ce moment, il n'y a plus de courant dans le circuit et le moment de force est nul. Il n'y a donc plus d'accélération et la boucle tourne à vitesse constante.

Si le moteur fait tourner quelque chose, le moteur fera un moment de force et la différence de potentiel fait par la source sera un peu plus grande que la différence de potentiel induite, de sorte qu'il y aura un courant dans la boucle. On atteindra l'équilibre quand le moment de force sur la boucle sera égal au moment de force qu'il faut pour faire tourner l'objet branché au moteur.

La force contreélectromotrice

Une fois qu'on a un générateur qui tourne, est-ce qu'on peut brancher autant d'appareils qu'on veut à ses bornes ? On se doute bien que non.

Quand la boucle tourne et que rien n'est branché à ses bornes, il n'y a aucun courant dans la boucle. Le champ magnétique n'exerce donc aucune force sur les fils. Dans ce cas, on ne doit que combattre la friction pour faire tourner la boucle.

Si on branche un appareil, comme une ampoule, il y aura alors un courant dans les fils. Il y aura maintenant une force magnétique sur les fils de la boucle. Si on examinait la situation en détail avec la loi de Lenz, on se rendrait compte que le moment de force fait par ces forces est toujours opposé à la rotation de la boucle. On appelle cette force la *force contreélectromotrice*. Cela veut donc dire que la boucle est plus difficile à faire tourner quand le générateur fait fonctionner un appareil. Plus il y aura d'appareils branchés sur le générateur (dans un réseau électrique, les appareils sont tous branchés en parallèle avec le générateur), plus le courant fourni par le générateur sera grand et plus les forces sur les fils formant la boucle seront grandes. Cela veut dire que le générateur est plus difficile à faire tourner. Si on branche trop d'appareils, la boucle va perdre de la vitesse de rotation si la force qui fait tourner la boucle de fil est plus petite que la force contreélectromotrice, ce qui fera baisser l'amplitude de la tension.

Tout cela signifie aussi qu'il doit y avoir quelque chose qui fait tourner le générateur et que ce quelque chose devra fournir un moment de force plus important si le générateur fournit plus de courant.

L'utilisation d'électroaimants

Nos images de générateurs semblent indiquer que le champ est fait par des aimants permanents. En réalité, le champ magnétique est souvent fait par des électroaimants. Cela permet de facilement modifier la grandeur du champ magnétique dans le générateur.

L'alternateur

Jusqu'ici, on a montré un générateur dans lequel le champ magnétique est fixe et la boucle de fils tourne. Il y a une autre variante de générateur dans lequel la boucle de fil est fixe et le champ magnétique est en rotation. Ces générateurs sont appelés des *alternateurs*. Le courant produit par l'alternateur circule donc dans des bobines de fil fixes et n'a donc pas besoin de passer par des balais.

Le vidéo suivant explique le fonctionnement de l'alternateur (mais ne vous occupez pas de la partie, entre 2:17 et 2:54, qui parle du courant triphasé) :

<https://www.youtube.com/watch?v=8d5g-6-LG8>

On fait donc tourner les bobines des électroaimants près des bobines fixes pour générer la différence de potentiel. Quand l'alternateur fournit un courant, il y a une force sur les électroaimants qui s'opposent à leur rotation. Il faut donc, encore une fois, qu'on fournisse un moment de force pour les faire tourner.

9.10 QUELQUES SUBTILITÉS CONCERNANT L'INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

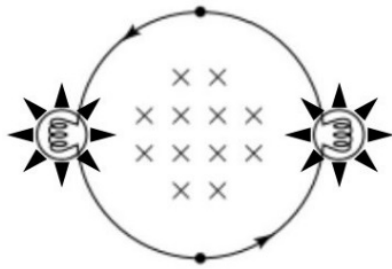
La loi des mailles

Quand on fait la loi des mailles dans un circuit et qu'il y a une variation de flux dans la surface délimitée par la maille, il ne faut pas oublier que l'induction va faire en sorte qu'il y a comme une source invisible dans la maille. Pour tenir compte de cela, il faut simplement ajouter

$$-\frac{d\phi_B}{dt}$$

à la somme des différences de potentiel sur un tour.

Quand on calcule le flux, la direction positive utilisée pour trouver A doit être dans la direction choisie pour se déplacer dans la maille. On place nos doigts dans la direction choisie pour faire la maille et notre pouce indique alors la direction du A qu'on doit prendre pour calculer le flux. À la fin, un signe positif ou négatif indique simplement si le courant est dans la direction supposée ou non (il n'indique pas si le courant est dans la direction positive ou négative).



studylib.net/doc/8799876/1.-in-figure--a---a-
solenoid-produces-a-magnetic-field-wh...

Voyons un exemple qui illustre les subtilités de ce terme additionnel dans la loi des mailles. Supposons qu'un circuit composé de 2 fils et de 2 ampoules identiques soit placé dans un champ magnétique variable qui augmente à un rythme constant. Notez qu'il y a uniquement du champ magnétique dans l'anneau.

Si on oublie l'induction, la loi des mailles (en allant dans le sens contraire du courant supposé) donnerait

$$RI + RI = 0$$

On en conclurait que le courant est nul et que les ampoules ne s'allument pas. Par contre, si on fait correctement la loi des mailles en tenant compte de l'induction, on a plutôt

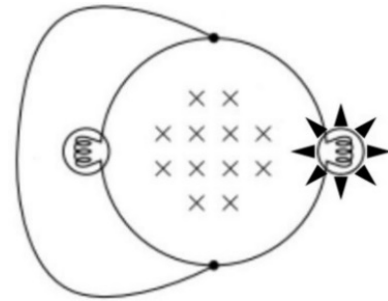
$$RI + RI - \frac{d\phi_B}{dt} = 0$$

$$I = \frac{1}{2R} \frac{d\phi_B}{dt}$$

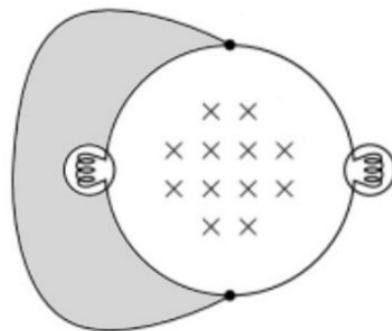
Avec un flux positif qui augmente, la dérivée est positive et le courant est positif. Comme le courant est positif, il est bel et bien dans la direction supposée, ce qui est aussi conforme à la loi de Lenz.

Ainsi, quand le champ augmente, il y a un courant qui apparaît dans le fil et les 2 ampoules s'allument avec la même puissance constante.

Compliquons un peu la situation. Que se passe-t-il alors si on ajoute un fil comme sur la figure de droite ? On serait tenté de dire que les 2 ampoules sont court-circuitées et qu'elles vont s'éteindre toutes les deux. C'est vrai, mais uniquement pour l'ampoule de gauche. L'ampoule de droite reste allumée. Elle devient même 4 fois plus brillante !

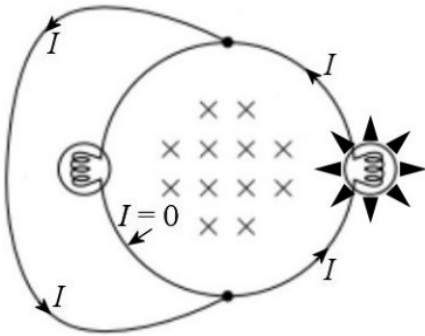
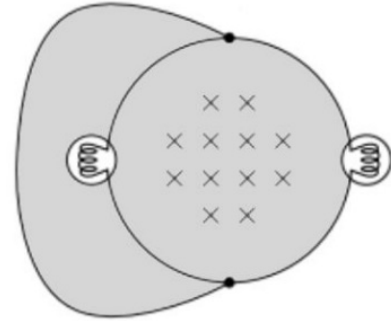


Il est vrai que les 2 résistances sont court-circuitées, mais ce n'est plus nécessairement vrai qu'il n'y aura pas de courant dans une résistance court-circuitée. Avec le terme additionnel



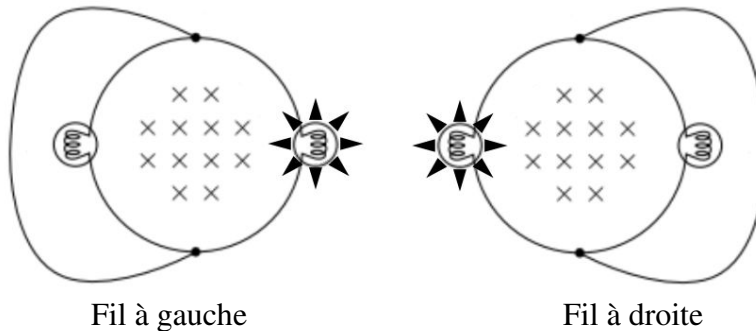
pour l'induction, il n'y a pas de courant dans une résistance court-circuitée uniquement s'il n'y a pas de variation de flux dans la boucle du court-circuit. C'est le cas avec notre boucle de gauche : il n'y a pas de variation de flux dans la surface délimitée par la boucle du court-circuit (en gris sur la figure de gauche) puisqu'il n'y a même pas de champ magnétique qui passe à l'intérieur de cette boucle. Sans variation de flux, il n'y a pas de courant dans la résistance court-circuitée.

C'est bien différent pour l'ampoule de droite. La figure de droite montre (en gris) la surface délimitée par la boucle du court-circuit. On constate que pour cette boucle, il y a un champ magnétique variable qui traverse une partie de cette surface, ce qui signifie qu'il y a une variation de flux et donc un courant dans le circuit. Comme il y a un courant, la lumière est allumée.



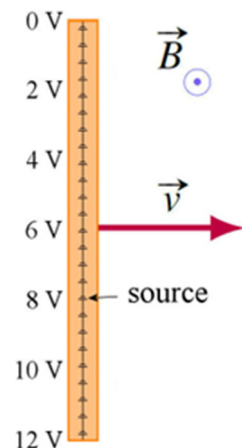
En fait, on a exactement la même différence de potentiel qu'avant (puisque le taux de variation du flux est exactement le même que celui qu'on avait avant qu'on ajoute le fil), mais la résistance du circuit est maintenant 2 fois plus petite (puisque le courant passe maintenant par le fil ajouté et non pas dans l'ampoule de gauche). Avec la moitié de la résistance, le courant est 2 fois plus grand et la puissance de l'ampoule de droite est 4 fois plus grande (car $P = RI^2$).

La beauté de cet exemple, c'est qu'on peut changer la lumière qui s'allume en déplaçant simplement le fil ajouté !

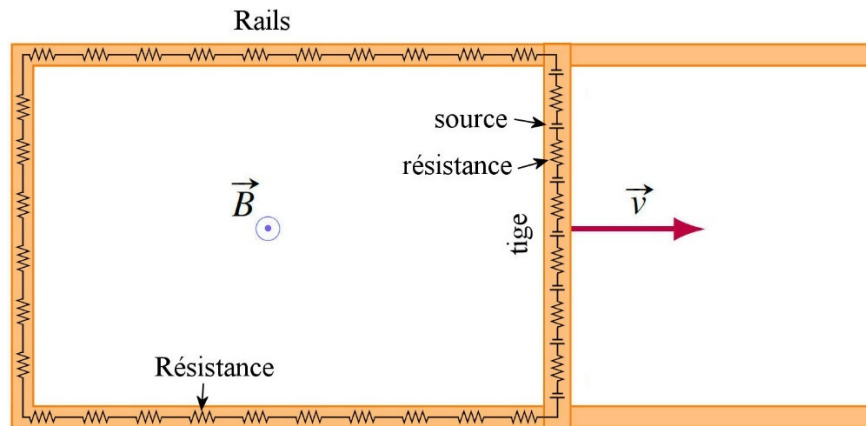


La valeur du potentiel

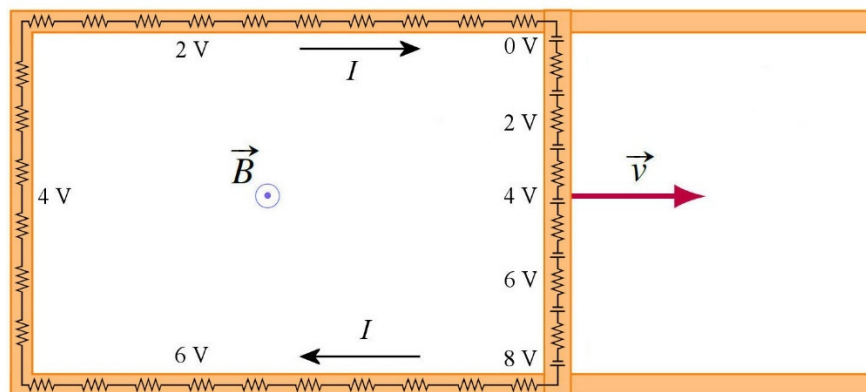
Revenons à l'exemple de la tige qui se déplace sur les rails. Supposons que le mouvement de la tige fait apparaître une différence de potentiel induite de 12 V. Cette différence de potentiel est générée uniquement par la force magnétique dans la tige. Puisque la tige se déplace, les charges dans la tige subissent une force magnétique et c'est cette force magnétique qui fait le travail sur les charges et qui fait augmenter leur énergie potentielle (ce qui fait donc augmenter le potentiel). S'il n'y avait que la tige, il y aurait donc une différence de potentiel de 12 V entre les extrémités de la tige. Le potentiel augmenterait graduellement de 0 à 12 V sur la tige, comme s'il y avait une multitude de petites sources l'une après l'autre dans la tige (figure de droite).



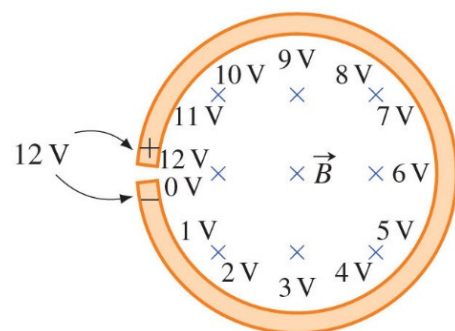
Si la tige est sur les rails, alors un courant va circuler. Ce courant est limité par la résistance du circuit composé des rails et de la tige. On va supposer que cette résistance est uniformément distribuée, comme s'il y avait une multitude de petites résistances le long du circuit (figure suivante).

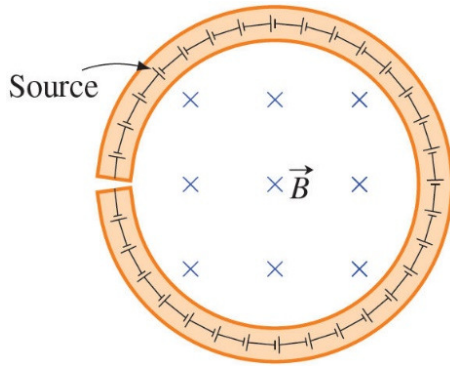


Dans la tige, on gagne 12 V par la force magnétique, mais on perd maintenant du potentiel parce qu'il y a des résistances et du courant. Disons que RI vaut 4 V sur la tige. Le travail fait par la force magnétique permet donc de gagner 12 V dans la tige et on perd 4 V avec les résistances, ce qui fait que la différence de potentiel aux bornes de la tige est maintenant de 8 V. Ce potentiel monte graduellement le long de la tige. Dans le reste du circuit, il n'y a que des résistances. Ces résistances font perdre 8 V et la baisse du potentiel est graduelle.



Supposons maintenant qu'on place un anneau dans un champ magnétique variable (présent uniquement à l'intérieur de l'anneau). Initialement, l'anneau n'est pas refermé sur lui-même et il n'y a pas de courant. Supposons que le champ magnétique augmente à un rythme tel que la différence de potentiel induite serait de 12 V. La variation de potentiel est graduelle le long de l'anneau puisque le champ électrique qui fait le travail sur les charges est uniforme (figure de droite).

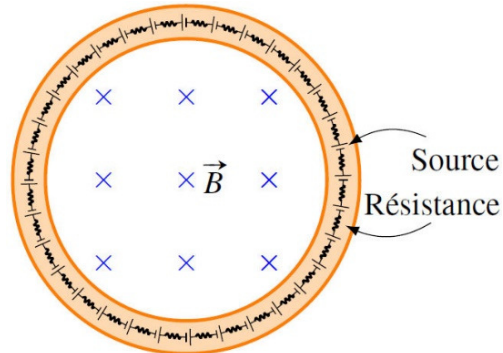




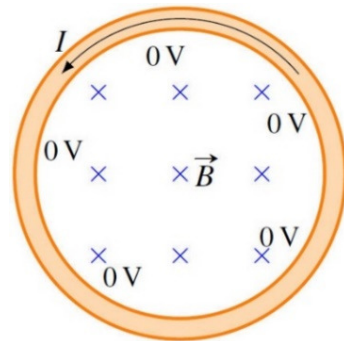
Ici aussi, c'est comme s'il y avait une suite de sources dans l'anneau qui font augmenter le potentiel.

Notez que quand le circuit ne se referme pas, la force électrique pousse les charges positives vers un bout du conducteur et il apparaît alors une charge positive à une extrémité et une charge négative à l'autre extrémité. Cette séparation de charge fait alors apparaître un champ électrique qui fait une force sur les charges qui s'oppose à la force électrique qui fait l'induction. À l'équilibre, toutes ces forces s'annulent et le travail fait sur les charges devient nul.

Si on referme l'anneau, il y aura un courant. Ce courant sera limité par la résistance de l'anneau. Cette résistance est répartie également dans l'anneau. C'est un peu comme si on avait une suite de petites sources et de petites résistances dans l'anneau.

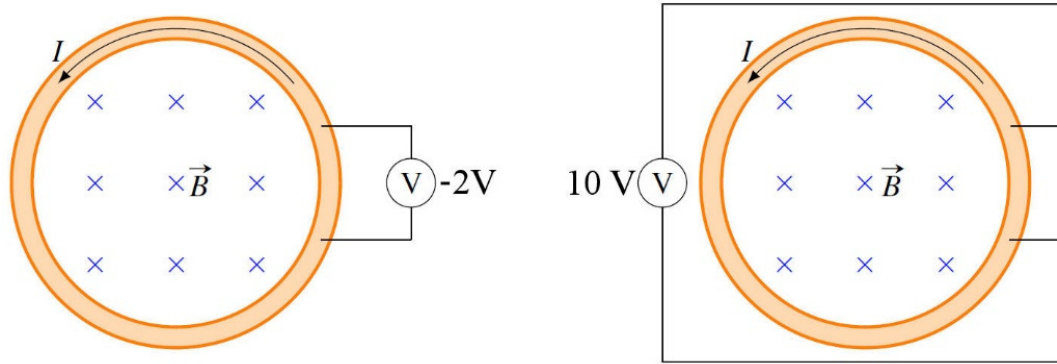


Quand il y a un courant, on gagne du potentiel avec les sources et on en perd avec les résistances. En fait, le courant est juste de la bonne grandeur pour que l'énergie qu'une charge gagne grâce au champ électrique (qui est la force qui fait le travail sur les charges ici) soit immédiatement perdue en chaleur dans la résistance. L'énergie des charges reste donc toujours la même et le potentiel ne monte pas. Le potentiel devient donc constant tout au long de l'anneau quand il y a un courant.



Que va-t-on mesurer avec un voltmètre ?

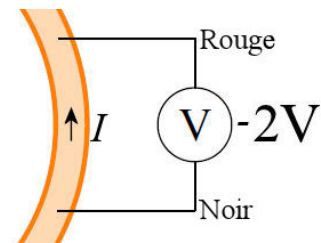
Dans le cas de l'anneau, on a dit que le potentiel est partout le même dans l'anneau quand il y a un courant. Pourtant, et c'est là que la situation se complique, on n'obtiendra pas 0 V si on mesure la différence de potentiel entre deux points de l'anneau avec un voltmètre. Ce qui est encore plus fou, c'est que la valeur donnée par le voltmètre ne sera pas toujours la même selon la configuration des fils du voltmètre ! Voici, par exemple, ce qui pourrait arriver si on branche notre voltmètre entre deux points sur l'anneau distance de 60° .



Commençons par une première question. Pourquoi les voltmètres affichent-ils une valeur alors qu'il n'y a même pas de différence de potentiel entre les deux endroits sur l'anneau ?

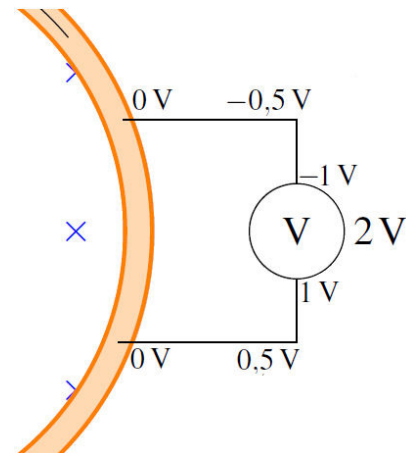
Examinons plus attentivement le branchement du voltmètre qui indique 2 V. Si on fait la loi de Kirchhoff de la boucle formée par les fils du voltmètre et une petite partie de la boucle (en allant dans le sens du courant dans l'arc), on a

$$\begin{aligned}\sum \Delta V &= 0 \\ -R_{\text{arc}} I + \Delta V_{\text{voltmètre}} &= 0 \\ \Delta V_{\text{voltmètre}} &= R_{\text{arc}} I\end{aligned}$$



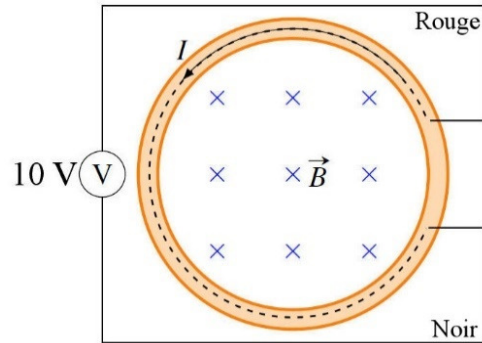
(Avec cette équation, on suppose que le fil rouge a un potentiel plus bas.) On sait que pour la boucle au complet, le RI est égal à 12 V (pour annuler la différence de potentiel induite). Sur 1/6 de la longueur de l'anneau, on a une résistance 6 fois plus petite, ce qui veut dire que RI vaut 2 V sur l'arc. Comme on a une réponse positive, le fil rouge a donc un potentiel 2 V plus bas que le fil noir. Le voltmètre indique donc -2 V.

Mais comment ce voltmètre peut-il indiquer -2 V alors que les sondes sont en contact avec l'anneau qui est à 0 V partout ? Les deux sondes du voltmètre qui touchent à l'anneau sont effectivement à 0 V, mais les deux fils allant jusqu'au voltmètre sont aussi dans le champ électrique présent en même temps que le champ magnétique variable. Ce champ électrique fait une force sur les charges dans le fil du voltmètre, ce qui modifie l'énergie potentielle de ces charges, ce qui change le potentiel. Le potentiel du fil va donc changer graduellement en s'en allant vers le voltmètre. Au départ (contact avec l'anneau), les potentiels des fils sont identiques (0 V sur la figure ici), mais ils changent de façons différentes en allant vers le voltmètre. Arrivé au voltmètre, les potentiels des fils sont différents et le voltmètre indique une valeur. Le fil rouge est à -1 V et le fil noir est à 1 V. Le voltmètre indique donc -2 V.



Il faut maintenant expliquer pourquoi l'autre voltmètre, qui est pourtant branché aux mêmes endroits sur l'anneau, indique une valeur différente. On va faire les lois de Kirchhoff pour ce voltmètre en prenant la maille formée des fils du voltmètre et du grand arc qui forme 5/6 de l'anneau (ligne pointillée sur la figure) en allant dans le sens du courant dans l'arc. On a alors

$$\begin{aligned}\sum \Delta V &= 0 \\ -R_{arc} I + \Delta V_{voltmètre} &= 0 \\ \Delta V_{voltmètre} &= R_{arc} I\end{aligned}$$

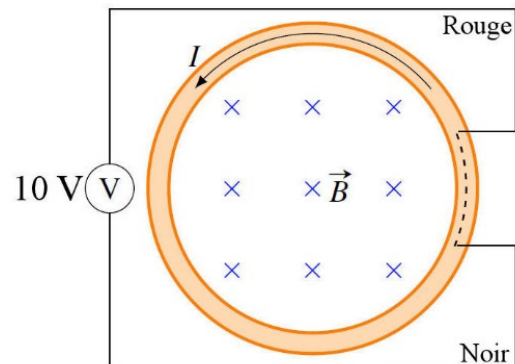


(Avec cette équation, on suppose que le fil noir a un potentiel plus bas.) On sait que pour la boucle au complet, le RI est égal à 12 V (pour annuler la différence de potentiel induite). Sur 5/6 de la longueur de l'anneau, on a une résistance égale à 5/6 de l'anneau, ce qui veut dire que RI vaut 10 V sur l'arc. Cette réponse positive indique que le fil noir a un potentiel 10 V plus bas que le fil rouge. Le voltmètre indique donc 10 V.

Encore une fois, le voltmètre n'indique pas 0 V parce que le champ électrique fait graduellement augmenter le potentiel dans les fils du voltmètre de sorte que le fil rouge arrive au voltmètre à 5 V et le fil noir arrive avec - 5 V. Le voltmètre mesure donc une différence de potentiel de 10 V entre les fils.

C'est bien beau tout ça, mais que se passerait-il si on appliquait la loi de Kirchhoff en passant dans le petit arc en allant dans le sens du courant ?

Dans ce cas, on voit qu'il y a un champ magnétique variable à l'intérieur la maille (ce qu'on n'avait pas avec les mailles précédentes). Il ne faut donc pas oublier le terme de variation de flux dans la loi des mailles. On a alors



$$\begin{aligned}\sum \Delta V &= 0 \\ -R_{arc} I + \Delta V_{voltmètre} + -\frac{d\phi_B}{dt} &= 0 \\ \Delta V_{voltmètre} &= R_{arc} I + \frac{d\phi_B}{dt}\end{aligned}$$

(Avec cette équation, on suppose que le fil rouge a un potentiel plus bas.) Or, on sait que RI sur le petit arc est de 2 V et que la variation de flux fait apparaître une différence de potentiel de -12 V. (Avec une trajectoire dans le sens horaire, A est en sortant de la page. Comme B est en entrant, le flux est négatif. Comme la grandeur du champ augmente, le flux est de plus en plus négatif, ce qui signifie que $d\phi/dt$ est négatif. Comme c'est le même flux que pour l'anneau qui avait un ΔV induit de 12 V, on obtient -12 V.) On a donc

$$\begin{aligned}\Delta V_{\text{voltmètre}} &= 2V + (-12V) \\ &= -10V\end{aligned}$$

Comme on a une réponse négative, le fil rouge a un potentiel 10 V plus haut que le fil noir. Le voltmètre indique donc 10 V.

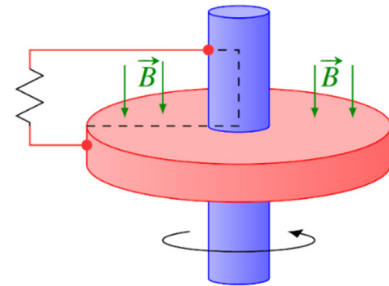
Encore une fois, on verrait alors la valeur affichée par le voltmètre passer graduellement de -2 V à 10 V si on le déplace de la position à droite du circuit pour aller à la position à gauche du circuit. Tout ceci semble bien bizarre, mais on vous avait averti : on risque d'arriver à des résultats bizarres si on continue d'utiliser le concept de potentiel quand la force électrique n'est plus conservative (ce qui se produit quand il y a un champ magnétique variable). Quand la force n'est pas conservative, la différence de potentiel entre 2 points dépend de la trajectoire empruntée pour passer d'un point à l'autre. C'est pour cela que le voltmètre n'indique pas toujours les mêmes valeurs selon la position des fils du voltmètre puisque la position des fils correspond au trajet emprunté pour passer d'un point à l'autre.

Quand la règle du flux ne fonctionne pas

Parfois, la formule

$$\mathcal{E}_{\text{induite}} = -N \frac{d\phi_B}{dt}$$

ne semble pas fonctionner. C'est ce qui se produit, par exemple, quand on examine le générateur de Faraday (illustré sur la figure). Dans un générateur de Faraday, on fait tourner un disque dans un champ magnétique. On observe alors qu'il apparaît alors une différence de potentiel entre le bord du disque et le centre du disque. Il y a une telle différence de potentiel parce que les charges dans le disque se déplacent dans un champ magnétique (puisque la rotation du disque entraîne la charge dans le mouvement de rotation). Avec un champ magnétique vers le bas comme sur la figure, la force magnétique pousse les charges positives vers le centre du disque. Cette force magnétique fait un travail sur les charges et c'est ce qui génère la différence de potentiel. Si on installe un fil ayant une certaine résistance entre le bord et le centre du disque, il y a un courant qui circule dans la résistance.



Or, si on prend la trajectoire montrée sur la figure (fils et ligne pointillée), il n'y a pas de variation de flux à l'intérieur de cette trajectoire. En fait, le flux qui passe à l'intérieur de la trajectoire est toujours nul puisque les lignes de champ longent la surface délimitée par la trajectoire sans la traverser.

On a donc une contradiction. La formule qui permet de calculer la différence de potentiel induite à partir de la variation du flux indique que la différence de potentiel est nulle, alors que la force magnétique fait bel et bien un travail sur les charges, ce qui génère une différence de potentiel induite.

On a cette contradiction parce que le travail fait sur les charges sur une trajectoire fermée, qui est donné par

$$\mathcal{E}_{\text{induit}} = \int \vec{E} \cdot d\vec{\ell} + \vec{v} \times \vec{B} \cdot d\vec{\ell}$$

est égale à

$$\mathcal{E}_{\text{induit}} = -\frac{d\phi_B}{dt}$$

seulement si certaines conditions sont respectées. Pour que cette dernière équation soit valide, il faut que les charges puissent uniquement se déplacer le long d'un fil mince. Si les charges sont dans un morceau de métal qui permet aux charges de se déplacer dans toutes les directions, il se peut que l'équation qui donne la variation de potentiel à partir de la variation du flux ne fonctionne pas. C'est exactement ce qui se passe ici : les charges peuvent se déplacer dans n'importe quelle direction dans le disque de métal. La loi ne s'applique donc pas ici et il faut alors retourner à la formule

$$\mathcal{E}_{\text{induit}} = \int \vec{E} \cdot d\vec{\ell} + \vec{v} \times \vec{B} \cdot d\vec{\ell}$$

pour calculer la différence de potentiel induite.

RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

Flux magnétique

$$\phi_B = BA \cos \theta$$

ou

$$\phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A}$$

où θ est l'angle entre le champ magnétique et le vecteur représentant la surface.

La loi d'induction de Faraday

$$\mathcal{E}_{\text{induit}} = -N \frac{d\phi_B}{dt}$$

Différence de potentiel induite par un générateur

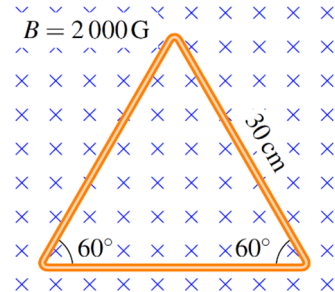
$$\Delta v = \Delta v_0 \sin(\omega t + \theta_0)$$

$$\Delta v_0 = NBA\omega$$

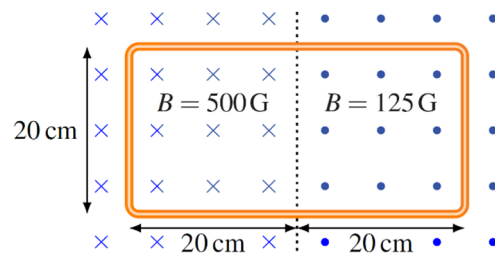
EXERCICES

9.3 La loi d'induction de Faraday

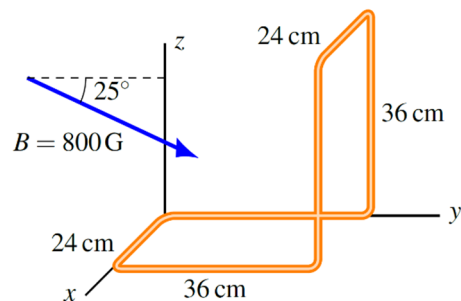
1. Quel est le flux magnétique qui traverse la surface délimitée par le triangle ?



2. Quel est le flux magnétique qui traverse la surface délimitée par le fil ?

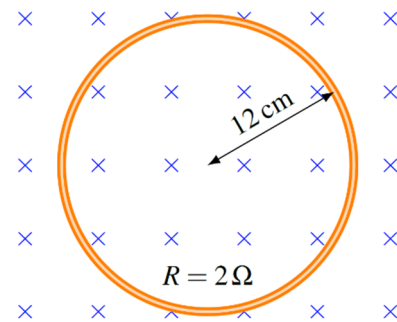


3. Quel est le flux magnétique qui traverse la surface délimitée par le fil ? (Le champ magnétique n'a pas de composante en x .)

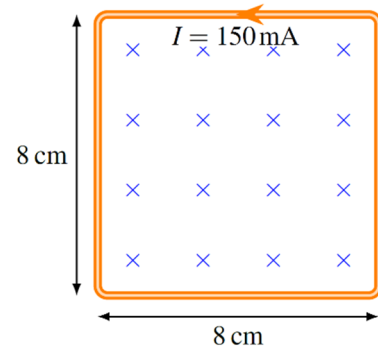


9.5 L'utilisation de la loi d'induction de Faraday

4. Dans la situation montrée sur la figure, la grandeur du champ magnétique augmente à un rythme constant de sorte que la grandeur du champ est passée de 0,02 T à 0,024 T en 0,04 seconde. Quel est le courant induit dans la boucle circulaire pendant ce 0,04 seconde ? (Spécifiez également la direction du courant.)



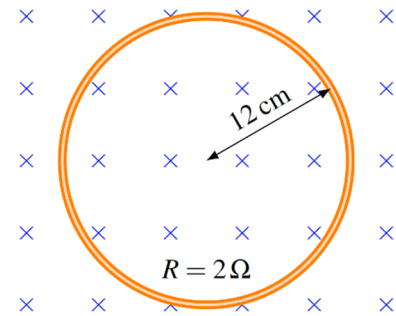
5. Le cadre métallique de la figure a une résistance de $12\ \Omega$. Il y a un courant induit de $150\ \text{mA}$ dans le cadre. À quel rythme varie le champ magnétique ? (Spécifiez si la grandeur du champ magnétique augmente ou diminue)



6. Dans la situation montrée sur la figure, la grandeur du champ magnétique est donnée par la formule

$$B = 1,2\text{G} + 0,5\frac{\text{G}}{\text{s}} \cdot t + 0,02\frac{\text{G}}{\text{s}^2} \cdot t^2$$

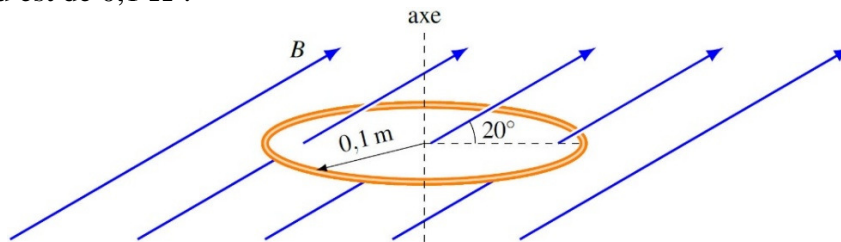
Quel est le courant induit dans la boucle circulaire à $t = 5\ \text{s}$?



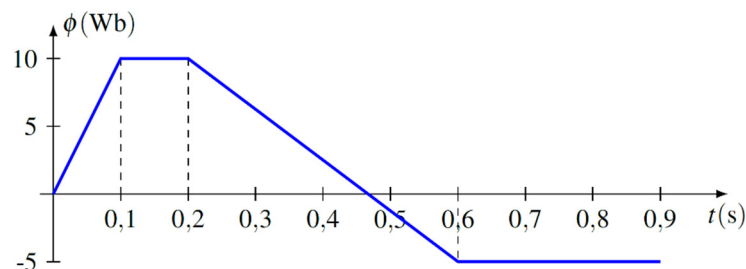
7. Dans la situation montrée sur la figure, la grandeur du champ magnétique est donnée par la formule

$$B = 500\text{G} - 50\frac{\text{G}}{\text{s}} \cdot t$$

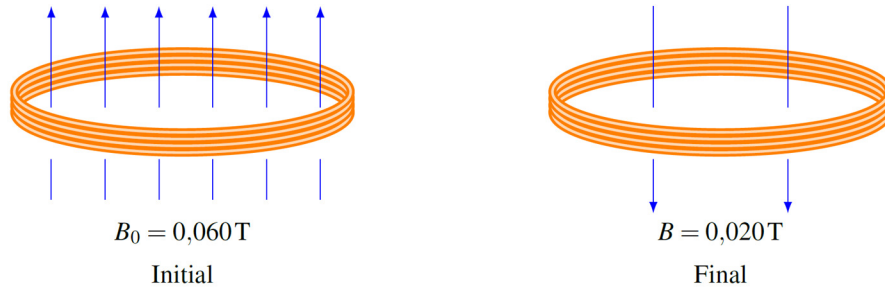
Quel est le courant induit dans la boucle circulaire à $t = 2\ \text{s}$ si la résistance de l'anneau est de $0,1\ \Omega$?



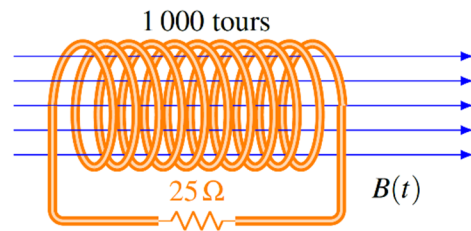
8. Voici un graphique qui montre le flux magnétique à travers une boucle en fonction du temps. Quel est le courant dans la boucle à $t = 0,4\ \text{s}$ s'il y a 30 tours de fils et que la résistance du fil formant la boucle est de $50\ \Omega$?



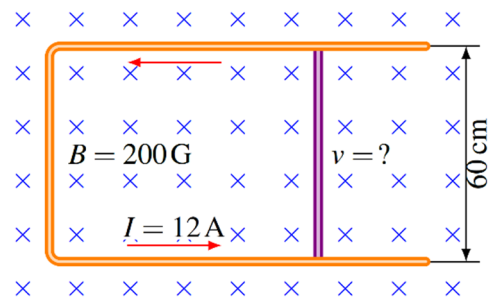
9. La figure montre la variation de champ magnétique dans un anneau. Le champ varie à un rythme constant de sorte qu'il s'est écoulé 0,12 s entre les configurations initiale et finale montrées sur la figure. Il y a 500 tours de fil dans l'anneau et le courant qui circule dans le fil pendant les 0,12 s est de 250 mA. Quelle est la résistance du fil si l'anneau a une circonférence de 40 cm ?



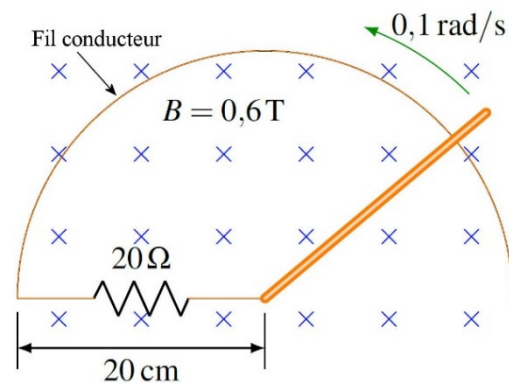
10. Dans la situation suivante, la grandeur du champ magnétique diminue au rythme de 1000 G/s. Le rayon du solénoïde est de 12 cm. Quelle est la puissance dissipée en chaleur dans la résistance ? (Spécifiez aussi la direction du courant.)



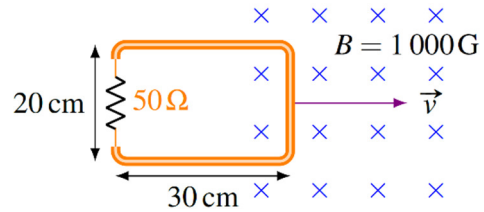
11. Dans la situation montrée sur la figure, il y a un courant de 12 A qui circule dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. Les rails n'ont pas de résistance, mais la tige (en rose) a une résistance de 0,2 Ω . Quelle est la vitesse de déplacement de la tige (grandeur et direction) ?



12. Dans la situation suivante, quel est le courant dans la résistance ? (Spécifiez aussi la direction du courant dans la résistance.) Il n'y a pas de résistance dans ce circuit, à part la résistance de 20 Ω .



13. Quand ce cadre entre dans le champ magnétique, il y a un courant dans la résistance. Quelle sera la charge totale qui passera dans la résistance si la vitesse reste constante ?

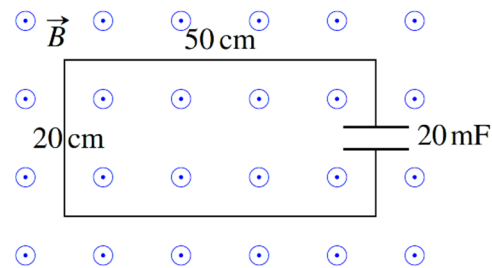


14. Il y a 3000 tours de fil dans une bobine rectangulaire de 20 cm x 10 cm dont la résistance est 10 Ω. On fait tourner la bobine de fil dans un champ magnétique qui augmente continuellement. L'angle entre le vecteur aire ($\vec{A}$) et le champ magnétique est donné par $\theta = 6\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}} \cdot t + \frac{\pi}{4}$ et la grandeur du champ magnétique est donnée par $B = 20 \frac{\text{G}}{\text{s}} \cdot t + 1\text{G}$. Quel est le courant dans la boucle à $t = 2\text{ s}$?

15. Dans la situation montrée sur la figure, la grandeur du champ magnétique est donnée par la formule

$$B = 200\text{G} \sin\left(50 \frac{\text{rad}}{\text{s}} t\right)$$

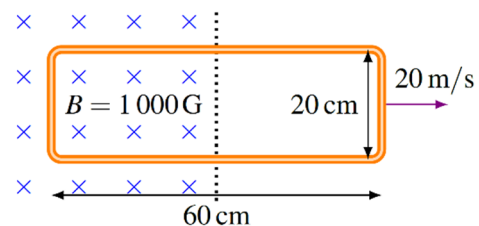
(La figure montre la direction du champ quand il est positif. Si le champ est négatif, il entre plutôt dans la page). Le fil qui relie les deux côtés du condensateur n'a pas de résistance. Quelle est la charge du condensateur à $t = 0,54\text{ s}$?



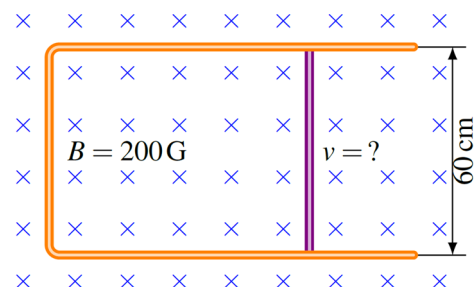
9.6 La force et le champ magnétique induit

16. Ce cadre est fait d'un fil de cuivre de 2 mm de diamètre.

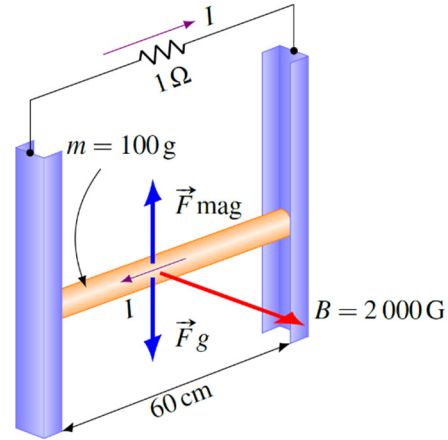
- Quel est le courant dans le fil ? (Spécifiez aussi la direction du courant.)
- Quelle est la force (grandeur et direction) sur le cadre ?



17. Dans la situation montrée sur la figure, il y a une force de 0,288 N sur la tige qui s'oppose à son mouvement. Les rails n'ont pas de résistance, mais la tige (en rose) a une résistance de 0,2 Ω. Quelle est la vitesse de déplacement de la tige ?

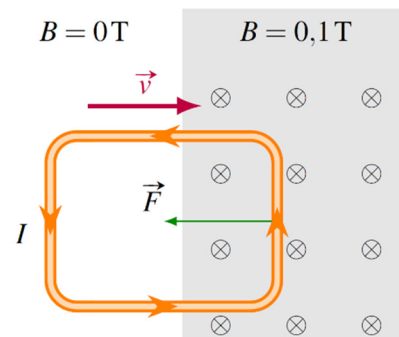


18. Cette tige sur des rails est initialement immobile. Quand on la lâche, elle tombe sous l'effet de la gravitation, tout en restant en contact avec les rails. Il n'y a pas de friction entre les rails et la tige. Les rails et la tige n'ont pas de résistance. Quelle sera la vitesse limite atteinte par la tige ?



9.7 La conservation de l'énergie

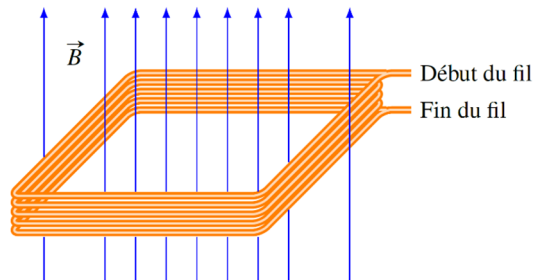
19. Un cadre carré entre dans un champ magnétique de $0,1 \text{ T}$. Chaque côté du cadre a une longueur de 40 cm et une résistance de $0,2 \Omega$. Au moment montré sur la figure, la vitesse du cadre est de 10 m/s .



- Calculez à quel rythme l'énergie cinétique du cadre diminue. (On cherche donc la puissance de la force magnétique puisque c'est elle qui fait diminuer l'énergie cinétique.)
- Avec $P = RI^2$, calculez la puissance dissipée en chaleur dans la résistance du cadre.
- Ces deux puissances sont-elles égales comme elles devraient l'être ?

9.8 La différence de potentiel induite dans un circuit qui ne se referme pas sur lui-même

20. Voici une boucle rectangulaire de 80 cm sur 60 cm qui a 5 tours de fil. Le plan de la boucle est perpendiculaire à un champ magnétique dont la grandeur diminue à un rythme constant de sorte que la grandeur du champ est passée de $0,4 \text{ T}$ à $0,2 \text{ T}$ en 1 minute. Quelle est alors la différence de potentiel entre les deux extrémités du fil ?

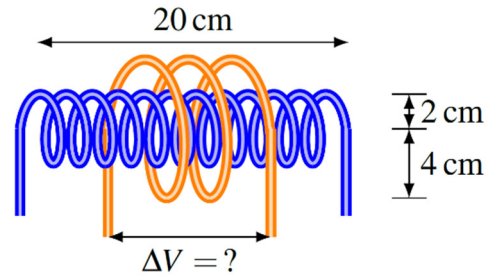


21. Dans la situation montrée sur la figure, le courant dans le solénoïde (celui ayant un rayon de 2 cm) est donné par la formule

$$I = 15A \sin\left(377 \frac{\text{rad}}{\text{s}} t\right)$$

Quelle est la différence de potentiel aux bornes de l'autre solénoïde (celui qui a un rayon de 4 cm) à $t = 0,71 \text{ s}$?

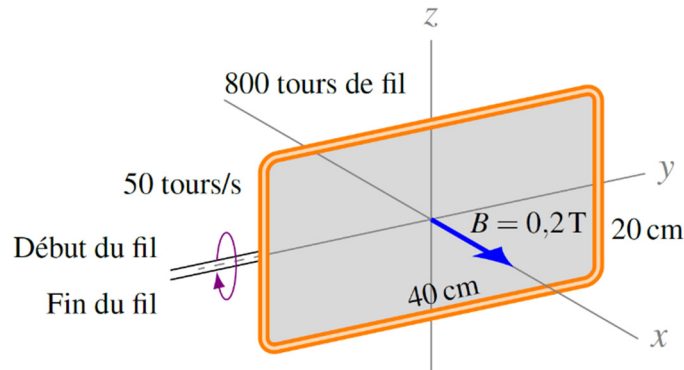
(Négligez le champ à l'extérieur du solénoïde)



Le solénoïde interne a 40 tours de fil
Le solénoïde externe a 2,5 tours de fil

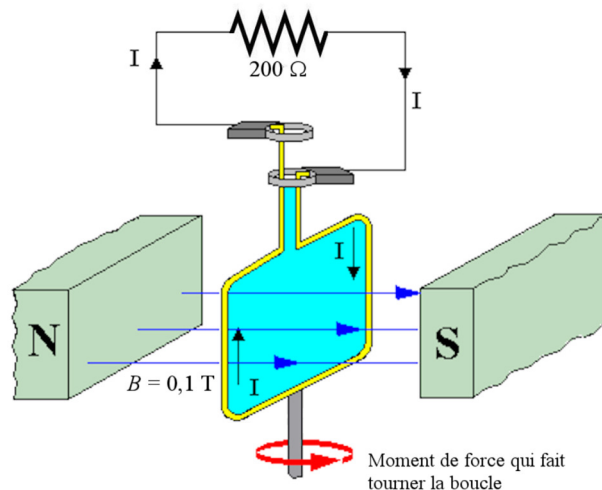
9.9 Les générateurs

22. Dans la situation montrée sur la figure, quelle est la différence de potentiel induite maximale entre le début et la fin du fil ?



23. La figure vous montre un générateur branché à une résistance de 200Ω .

L'aire de la boucle qui tourne dans le champ magnétique est de $0,8 \text{ m}^2$. À quelle vitesse angulaire doit-on faire tourner la boucle dans le champ magnétique pour que la puissance maximale dissipée par la résistance soit de $12,5 \text{ W}$?



members.shaw.ca/barry-barclay/Notes/magfield/bgenny.htm

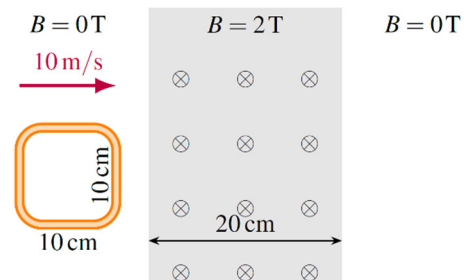
24. La figure du numéro précédent vous montre un générateur branché à une résistance de $200\ \Omega$. L'aire de la boucle qui tourne dans le champ magnétique est de $0,2\ \text{m}^2$ et la vitesse de rotation angulaire est de $500\ \text{rad/s}$. Au départ ($t = 0\ \text{s}$), le plan de la boucle est perpendiculaire au champ magnétique.

- Quelle est la différence de potentiel maximale aux bornes de la résistance ?
- Quel est le courant dans la résistance à $t = 0,01\ \text{s}$?
- Quelle est la grandeur du moment de force s'opposant à la rotation à $t = 0,01\ \text{s}$?
- Quelle est la puissance dissipée par la résistance à ce moment ?
- Quelle est la puissance du moment de force externe qui fait tourner la boucle à ce moment ?

Défis

(Questions plus difficiles que les questions qu'il y aura à l'examen.)

25. Un cadre métallique a une résistance de $0,02\ \Omega$ et une masse de $100\ \text{g}$. Il se déplace initialement à $10\ \text{m/s}$ et traverse une région où il y a un champ magnétique de $2\ \text{T}$. Si la région où il y a le champ magnétique a $20\ \text{cm}$ de large, quelle sera la vitesse du cadre quand il aura fini de traverser la région ?



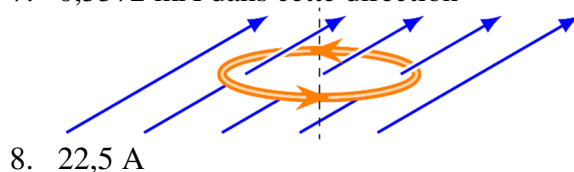
RÉPONSES

9.3 La loi d'induction de Faraday

- 7,794 mWb
- 1,5 mWb
- 9,186 mWb

9.5 L'utilisation de la loi d'induction de Faraday

- 2,262 mA dans le sens contraire des aiguilles d'une montre
- Le champ augmente au rythme de $281,25\ \text{T/s}$
- $1,583\ \mu\text{A}$ dans le sens contraire des aiguilles d'une montre
- $0,5372\ \text{mA}$ dans cette direction



- 22,5 A

- 9. $16,98 \Omega$
- 10. $0,8186 \text{ W}$, le courant est vers la droite dans la résistance
- 11. 200 m/s vers la droite
- 12. $60 \mu\text{A}$ vers la gauche
- 13. $120 \mu\text{C}$
- 14. $0,3194 \text{ A}$
- 15. $584,3 \mu\text{C}$

9.6 La force et le champ magnétique induit

- 16. a) $46,81 \text{ A}$ dans le sens des aiguilles d'une montre b) $0,9361 \text{ N}$ vers la gauche
- 17. 400 m/s
- 18. $68,05 \text{ m/s}$

9.7 La conservation de l'énergie

- 19. a) $0,2 \text{ W}$ b) $0,2 \text{ W}$ c) oui

9.8 La différence de potentiel induite dans un circuit qui ne se referme pas sur lui-même

- 20. $0,008 \text{ V}$
- 21. $3,596 \text{ mV}$

9.9 Les générateurs

- 22. 4021 V
- 23. 625 rad/s
- 24. a) 10 V b) $47,95 \text{ mA}$ c) $9,195 \times 10^{-4} \text{ Nm}$ d) $0,4598 \text{ W}$ e) $0,4598 \text{ W}$

Défis

- 25. 6 m/s