

# 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 ?*



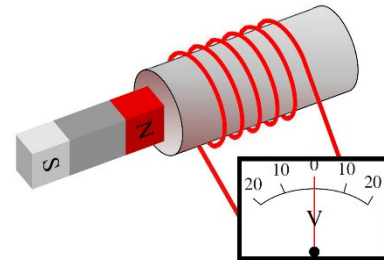
[www.ehow.com/how\\_7976510\\_coil-wire-homemade-generator.html](http://www.ehow.com/how_7976510_coil-wire-homemade-generator.html)

**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.

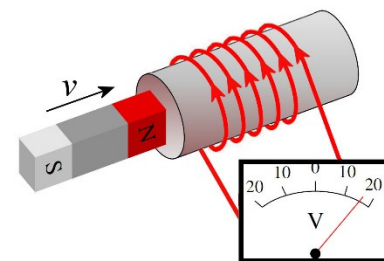
Pendant 10 ans, on ne parvient pas à obtenir un courant dans un fil avec un champ magnétique. On pouvait, par exemple, tenter d'obtenir un courant avec l'expérience montrée sur la figure de droite.



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 de fils et d'aimants, il n'y avait jamais de courant dans les fils.

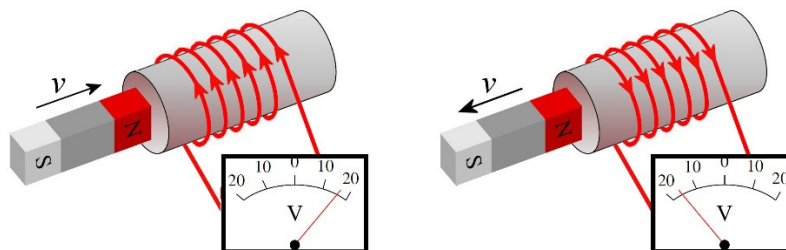
Finalement, Joseph Henry (en 1830) et Michael Faraday (en 1831) découvrent indépendamment comment on peut obtenir un courant dans une boucle de fil. Henry a fait la découverte en premier, mais c'est Faraday qui a publié ses résultats en premier. (Notez que plusieurs savants, dont Ampère dès 1822, avaient 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 fils.



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>

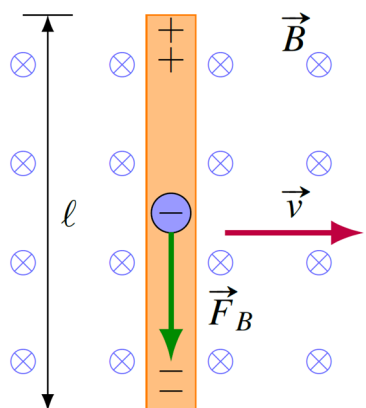
Ce phénomène, dans lequel on génère une différence de potentiel entre les deux extrémités d'un fil, est appelé *l'induction électromagnétique*. La différence de potentiel obtenue s'appelle la *différence de potentiel induite* et elle est notée  $\mathcal{E}_{\text{induite}}$ . Cette différence de potentiel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

Voyons comment on peut obtenir une telle différence de potentiel induite.

## 9.2 LA DIFFÉRENCE DE POTENTIEL INDUITE DANS UN CONDUCTEUR EN MOUVEMENT

Parfois, la différence de potentiel induite est générée par la force magnétique. En effet, on obtient une différence de potentiel en déplaçant un conducteur dans un champ magnétique.

Le déplacement de la tige fait en sorte que les charges dans la tige se déplacent dans le



champ magnétique. Il y a alors une force sur toutes les charges de la tige (électrons et noyaux atomiques), mais seuls les électrons libres peuvent se déplacer sous l'effet de cette force. La figure vous montre la direction de la force sur les électrons libres dans ce cas. Poussés vers le bas, les électrons s'accumulent dans le bas de la tige alors qu'il y aura un manque d'électrons dans le haut de la tige. Il apparaît donc une différence de potentiel entre les extrémités de la tige.

La force magnétique joue alors le rôle d'une source qui donne de l'énergie aux charges. Le travail fait par la force magnétique sur une charge qui passe d'un bout à l'autre de la tige est

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

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

$$q\mathcal{E} = q\vec{v} \times \vec{B} \cdot \vec{\ell}$$

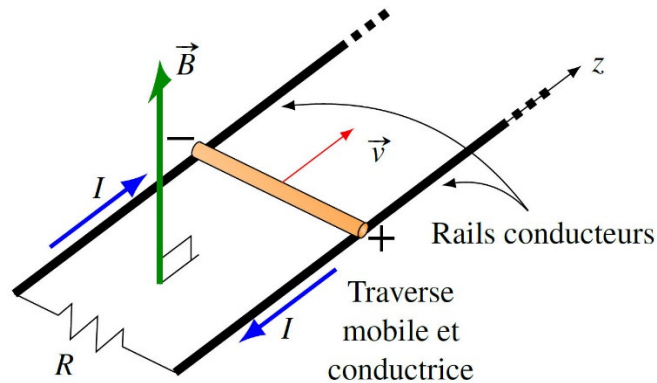
En simplifiant les  $q$ , on arrive alors à la formule suivante.

**Différence de potentiel dans un conducteur en mouvement dans un champ magnétique**

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

**Quand la tige est perpendiculaire à la vitesse et au champ (comme sur la figure de la page précédente), la différence de potentiel est simplement  $vBl$ .**

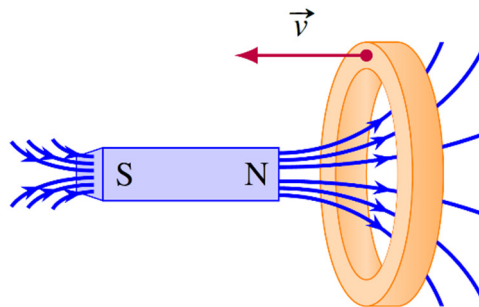
Voici comment on pourrait alors générer un courant dans une résistance. On place une tige sur deux rails conducteurs, tel qu'illustré sur cette figure.



Quand la tige se déplace, les électrons dans la tige subissent une force vers la gauche de la tige (bout de la tige marquée -). Le côté gauche de la tige prend donc une charge négative et le côté droit de la tige (bout de la tige marquée +) devient chargé positivement. 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. C'est cette différence de potentiel qui génère un courant induit dans la résistance dont la grandeur est

$$I = \frac{\Delta V}{R} = \frac{vBl}{R}$$

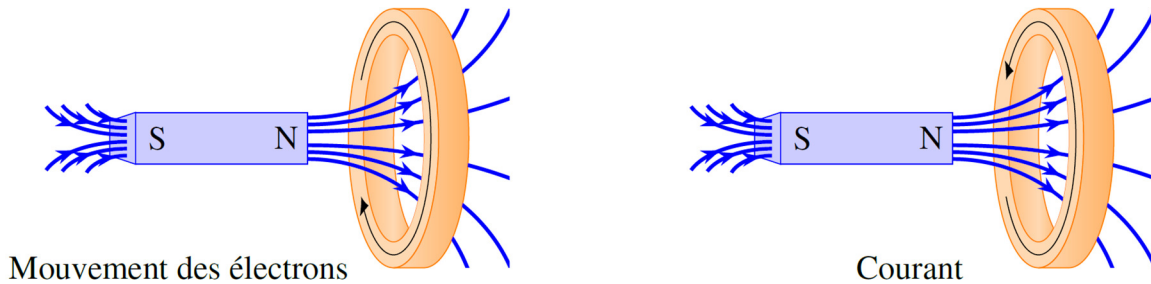
Voici quelques autres façons d'obtenir un courant induit en déplaçant un conducteur dans un champ magnétique. On peut approcher un anneau d'un aimant.



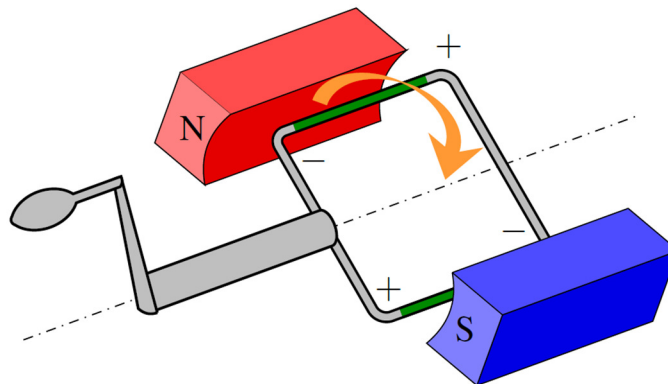
En déplaçant ainsi l'anneau, on déplace des charges dans un champ magnétique et ces charges vont donc subir une force magnétique. Supposons que l'anneau est en métal. Les protons vont subir une force, mais ils ne peuvent pas se déplacer. Les électrons libres vont subir une force et vont se mettre en mouvement pour faire un courant. Trouvons la direction de la force sur un électron qui est à l'endroit indiqué sur la figure (dessus de l'anneau).

On a une vitesse vers la gauche et un champ vers la droite et un peu vers le haut, la force est donc en sortant de la page (contraire de la règle de la main droite, car c'est une charge

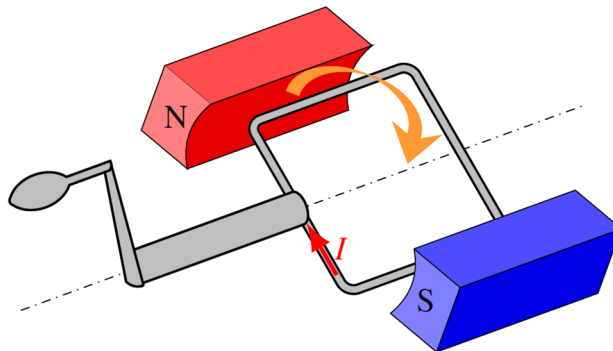
négative.) Cette force cherche donc à déplacer la charge le long de l'anneau. Si on trouve la direction de la force sur n'importe quel électron de l'anneau, on trouve toujours que la force est dans la direction de la circonférence de l'anneau. Les électrons se déplacent donc tous le long de l'anneau pour faire un courant. L'image suivante vous montre la direction du mouvement des électrons et du courant conventionnel (qui est dans le sens contraire du mouvement des électrons).



Pour faire une différence de potentiel, on peut aussi faire tourner une boucle dans un champ magnétique. Dans ce cas, il y a une différence de potentiel qui apparaît dans le côté qui se déplace vers le haut et dans le côté qui se déplace vers le bas (montrés en vert sur cette figure).



Ces deux différences de potentiel génèrent un courant circulant dans le sens montré sur cette figure.

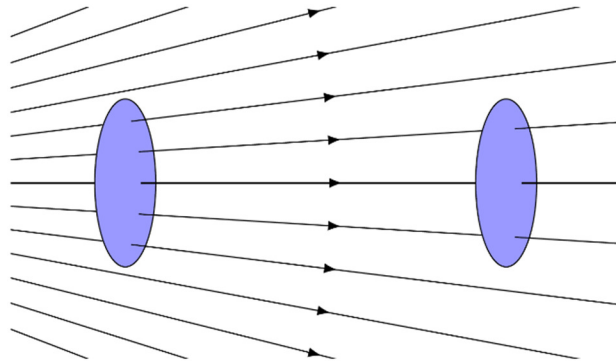


## 9.3 LA LOI D'INDUCTION DE FARADAY

Pour calculer la différence de potentiel induite et le courant induit dans un circuit fermé, on va écrire la formule donnant la différence de potentiel sous une forme très différente. Cette nouvelle forme de l'équation fait appel au flux magnétique qui traverse la surface délimitée par le circuit.

### 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

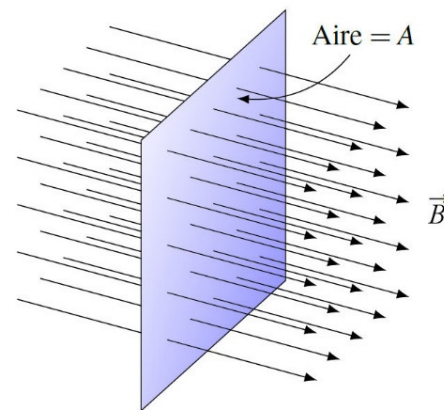
Pour que le flux compte le nombre de ligne de champ, on doit définir le flux magnétique par la formule suivante quand le champ est perpendiculaire à la surface.

$$\phi_B = BA$$

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

#### Unité de flux magnétique : le weber (Wb)

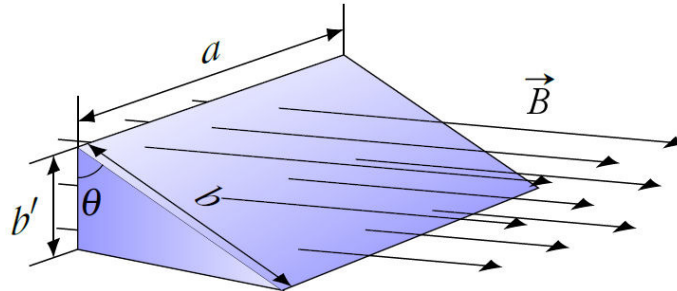
$$1\text{Wb} = 1\text{Tm}^2$$



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

#### Une surface non perpendiculaire au champ

Trouvons maintenant la formule du flux magnétique si la surface n'est pas perpendiculaire à la surface. Pour y arriver considérons les 2 surfaces de cet objet (la surface de derrière et le dessus).



Imaginons aussi qu'il y a un champ uniforme et que les lignes de champ entrent toutes par l'arrière et ressortent toutes par la surface inclinée (le dessus).

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, chaque ligne de champ qui traverse la surface de derrière va par la suite traverser la surface inclinée (le dessus), ce qui fait qu'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

$$\begin{aligned}\phi_B &= BA' \\ \phi_B &= B(ab')\end{aligned}$$

Or, puisque

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

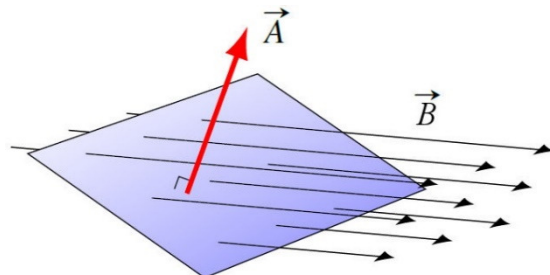
on a

$$\begin{aligned}\phi_B &= B(ab') \\ \phi_B &= B(ab \cos \theta)\end{aligned}$$

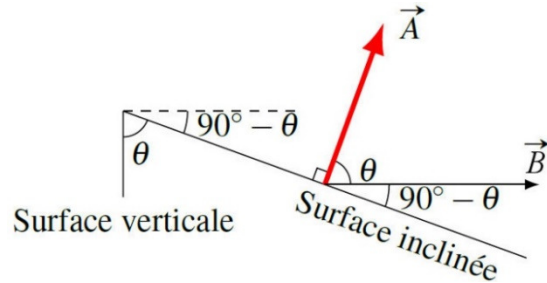
Comme l'aire de la surface inclinée ( $A$ ) est  $a \cdot b$ , on a

$$\begin{aligned}\phi_B &= B(ab \cos \theta) \\ \phi_B &= B(A \cos \theta)\end{aligned}$$

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  $\theta$ , 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

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

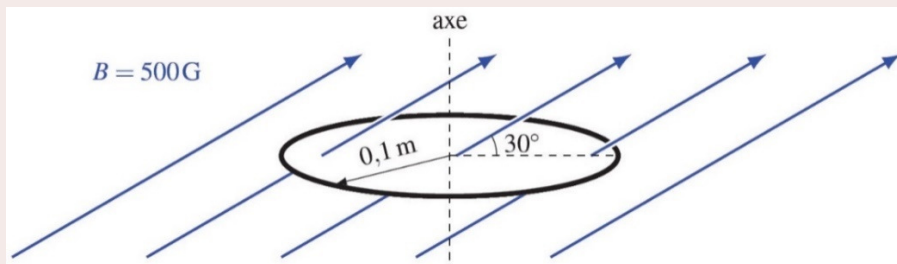
ou

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

où  $\theta$  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

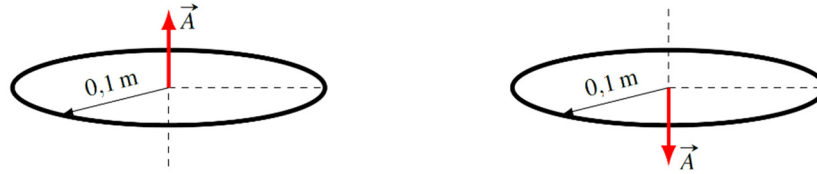
$$\begin{aligned} \phi_B &= BA \cos \theta \\ &= 500 \times 10^{-4} \text{ T} \cdot (\pi \cdot (0,1 \text{ m})^2) \cdot \cos 60^\circ \\ &= 7,854 \times 10^{-4} \text{ Wb} \end{aligned}$$

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  $60^\circ$ , alors qu'il aurait été de  $120^\circ$  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.

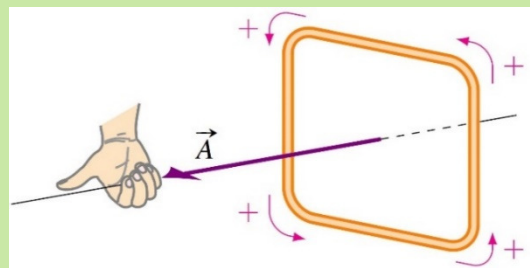
Lequel doit-on choisir? En fait, vous pouvez prendre celui que vous voulez. La suggestion : choisir le vecteur  $A$  qui fait le plus petit angle avec le champ. Avec cette suggestion, on prend  $60^\circ$  dans l'exemple. Une fois votre choix de la direction de  $A$  fait, ne le changez plus pendant 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. C'est notre 5<sup>e</sup> règle de la main droite.

### 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

À partir de la différence de potentiel induite dans un petit bout de fil en mouvement dans un champ magnétique

$$d\mathcal{E} = \vec{v} \times \vec{B} \cdot d\vec{\ell}$$

on peut montrer que la différence de potentiel induite dans un circuit fermé est donnée par la formule suivante (qui porte le nom de loi de Faraday, même si Faraday n'a jamais écrit la loi sous cette forme).

### La loi d'induction de Faraday

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

Dans cette formule,  $\phi_B$  est le flux à travers la surface délimitée par le circuit.

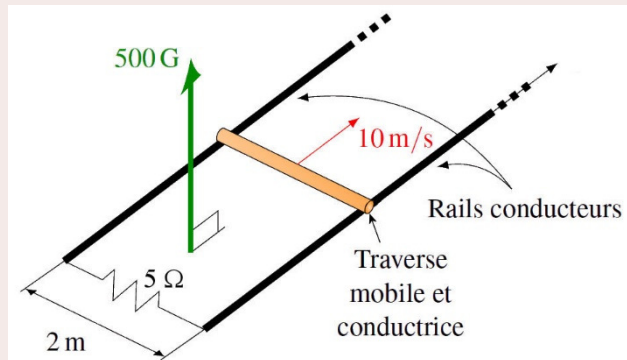
Vous pouvez voir la preuve ici.

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

Cette équation signifie que **le flux doit varier dans la surface délimitée par le circuit pour qu'il y ait une différence de potentiel**. 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

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

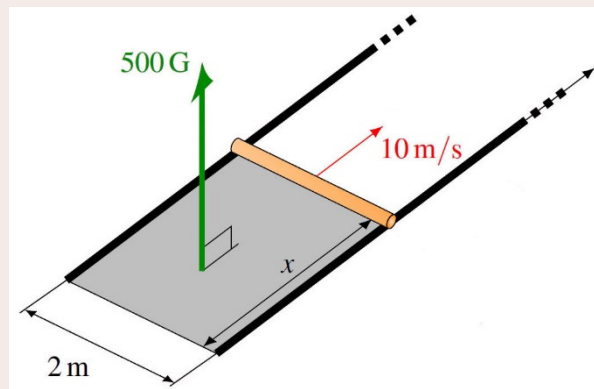
Comme ici il n'y a qu'un seul tour de fil, on a  $N = 1$ .

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

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  $0^\circ$  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 a

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

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

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

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

$$\mathcal{E}_{\text{induite}} = -B\ell v$$

(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. 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

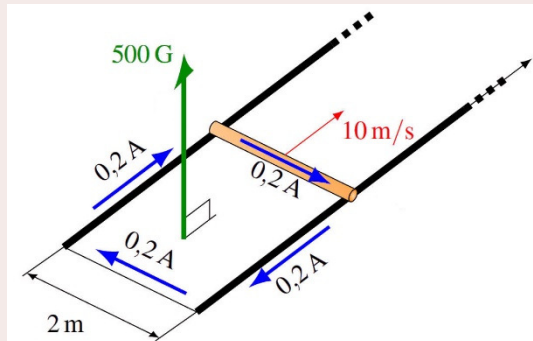
$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{\text{induite}} &= -B\ell v \\ &= -0,05T \cdot 2m \cdot 10 \frac{m}{s} \\ &= -1V\end{aligned}$$

Le courant est donc

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

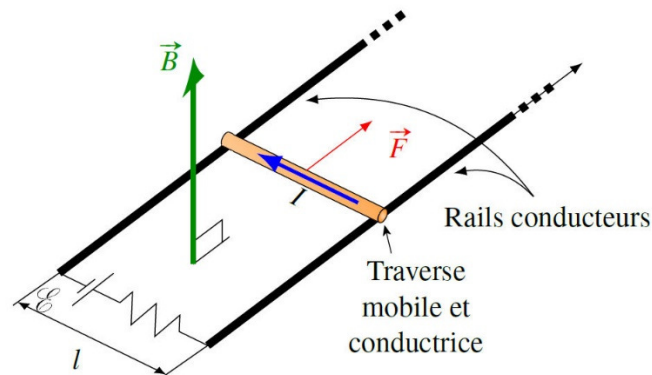
$$\begin{aligned}
 &= \frac{-1V}{5\Omega} \\
 &= -0,2A
 \end{aligned}$$

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 remarquez sûrement que l'exemple 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 fil 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 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

$$I_{source} = I_{induit}$$

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

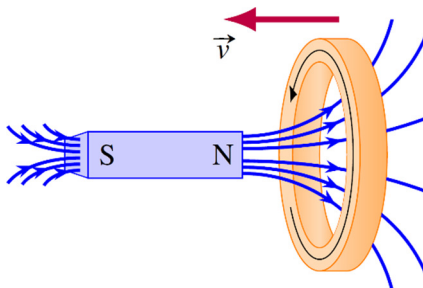
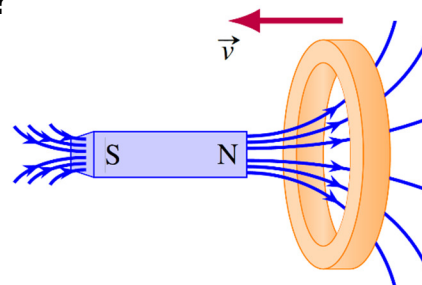
Cette équation nous permet alors de trouver la vitesse limite de la tige.

$$v = \frac{\mathcal{E}}{Bl}$$

## 9.4 LE COURANT INDUIT FAIT PAR UN CHAMP ÉLECTRIQUE

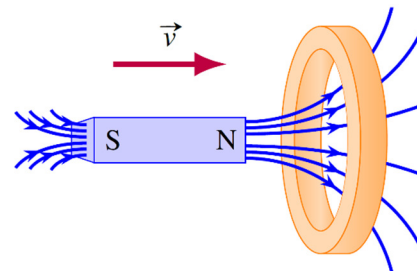
### Pourquoi faut-il un champ électrique ?

On a vu qu'il y a un courant induit si on approche un anneau d'un aimant.



On se rappelle que c'est la force magnétique sur les électrons qui met ces derniers en mouvement pour générer un courant dans le sens montré sur cette figure.

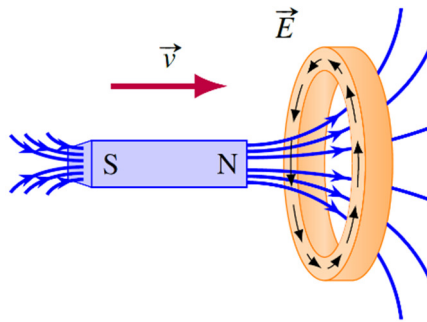
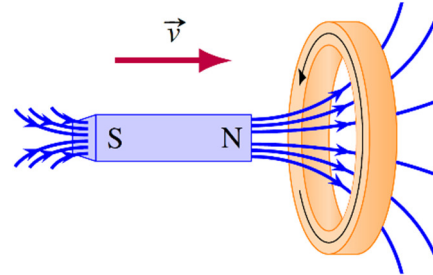
Regardons maintenant ce qui se passerait si on laissait l'anneau en place, mais qu'on rapprochait plutôt l'aimant.



Dans ce cas, il doit encore y avoir un courant induit puisque cette expérience est la même expérience que celle dans laquelle on approche l'anneau de l'aimant, mais vue par un observateur qui suit 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. De plus, la loi de l'induction de Faraday prévoit aussi qu'il doit y avoir un courant induit. En effet, en approchant l'aimant de l'anneau, la grandeur du champ magnétique à l'intérieur de l'anneau augmente. Comme le champ augmente, le flux augmente, ce qui implique qu'il devrait y avoir un courant induit dans l'anneau. On s'entend donc pour dire qu'il doit aussi y avoir un courant induit dans ce cas.

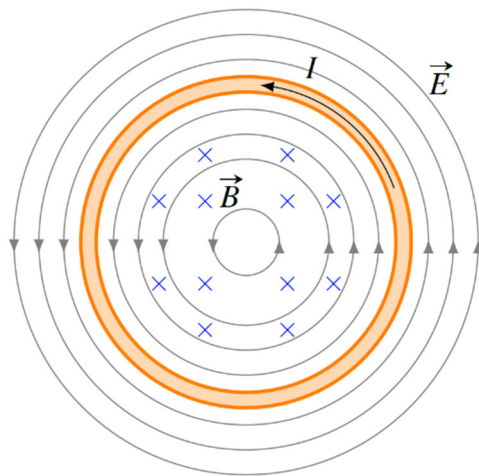
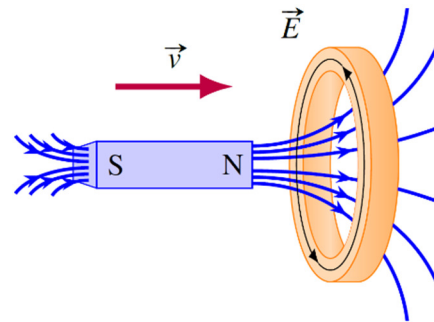
Toutefois, il y a un problème : la force magnétique ne peut pas mettre les charges en mouvement puisque leur vitesse est nulle (l'anneau est immobile). On aurait donc un courant induit, mais ce courant ne peut pas être généré par la force magnétique. Que se passe-t-il alors dans ce cas ? En fait, il ne reste 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.

Dans la situation présentée ici, le courant est dans la direction montrée sur la figure de droite.



Comme le courant 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 amène directement à la conclusion que les lignes de champ électrique dans l'anneau sont des cercles.

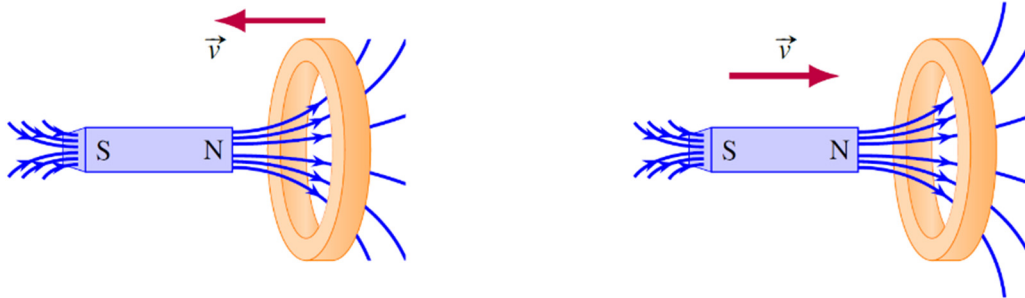


Il n'y a pas qu'un champ électrique dans l'anneau, il y en a un presque partout autour de l'aimant. Si on regarde cet anneau tel qu'on pourrait le voir si on était minuscule et qu'on était assis sur l'aimant, voici à quoi ressemblerait le champ électrique (figure de gauche).

C'est la partie de ce champ qui est dans l'anneau (en jaune) qui fait le courant.

## Le courant induit peut être fait par des champs électrique et magnétique

Les deux situations montrées sur la figure suivante représentent 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 différentes natures. 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.

Il y a quand même une bonne nouvelle : peu importe le champ qui fait le courant induit, la différence de potentiel induite se calcule toujours avec cette formule.

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

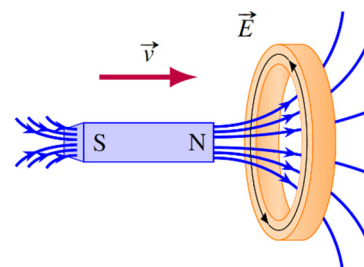
Cette formule prend déjà en compte les différences de potentiel induites par les champs électriques. On pourra donc calculer la différence de potentiel sans avoir à calculer le champ électrique à l'origine de cette différence de potentiel.

Cela signifie aussi qu'il vaut mieux utiliser la formule de l'induction de Faraday que la formule de la différence de potentiel faite dans un conducteur en mouvement dans un champ magnétique ( $\mathcal{E}_{\text{induit}} = \vec{v} \times \vec{B} \cdot \vec{\ell}$ ) pour calculer les différences de potentiel induite parce que cette dernière ne tient uniquement compte que des courants fait par les champs magnétiques.

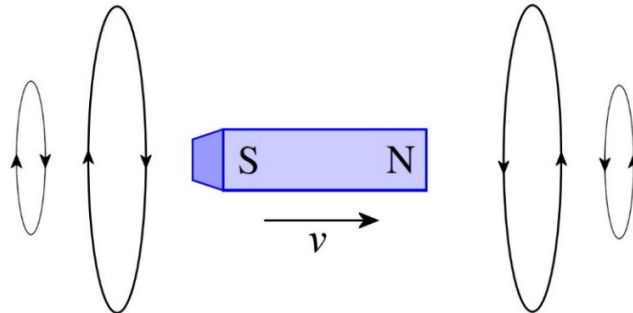
## D'où vient ce champ ?

On peut se demander d'où vient le champ électrique dans les situations où le courant induit est fait par un champ électrique.

Reprenons le cas de l'aimant qui s'approche de l'anneau. L'aimant (qui n'a pas de charge nette) ne fait pas 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



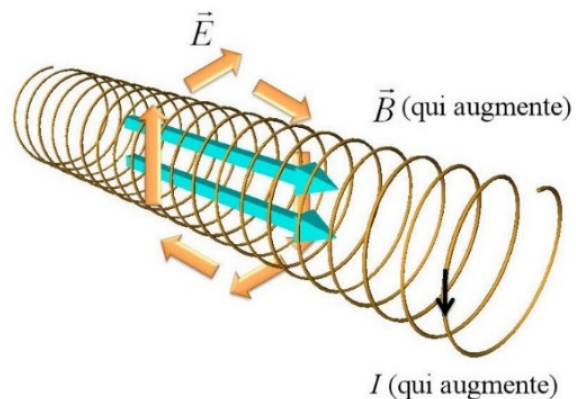
champ électrique selon la relativité. Un simple champ magnétique pour un observateur qui observe l'aimant au repos devient une combinaison de champ magnétique et de champ électrique pour un autre observateur qui voit l'aimant se déplacer. Voici seulement quelques lignes de champ du champ électrique qu'il 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 courants induits.

Ultimement, ce sont les charges électriques qui forment l'aimant qui font le champ magnétique et le champ électrique de l'aimant. Tous les champs, qu'ils soient électriques ou magnétiques, peuvent uniquement être générés par des charges électriques.

Prenons un solénoïde par exemple. S'il y a un courant, il y a un champ magnétique dans le solénoïde. Si le courant varie, il doit aussi y avoir un champ électrique selon la loi de l'induction. Il y a alors du champ électrique dans le solénoïde et 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 partout autour du solénoïde. Je spécifie cela parce que on entend souvent dire que c'est le champ magnétique variable qui génère le champ électrique, ce qui est faux.



[slideplayer.com/slide/11005662/](https://slideplayer.com/slide/11005662/)



**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 le champ magnétique variable fait apparaître un champ électrique. On utilise souvent une équation liant le champ électrique au champ magnétique (la 2<sup>e</sup> équation de Maxwell) pour montrer qu'un champ est la source de l'autre. C'est faux. Le champ magnétique ne peut pas être la

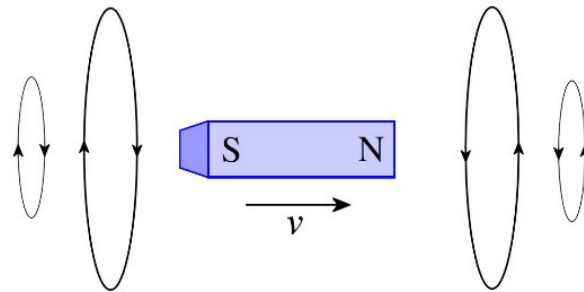


source du champ électrique. Seules les charges électriques peuvent être la source des champs électriques et des champs magnétiques. Le champ électrique qui génère le courant induit vient des mêmes charges qui font le champ magnétique variable. Le lien entre les champs donné par la 2<sup>e</sup> équation 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.

## 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. Les lignes de champ électrique qui accompagnent les champs magnétiques variables sont souvent comme cela.



Remarquez comme notre 3<sup>e</sup> 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. 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. On commence par calculer le travail fait sur une petite distance avec cette formule.

$$F_E ds \cos \theta$$

Puisque la charge se déplace dans le sens de la force (qui est le dans le sens du champ), l'angle est nul et le cosinus est égal 1. Le travail est donc positif. Si on additionne ensuite les travaux faits sur le tour au complet, on additionne un paquet de travaux positifs et on arrive à un travail total positif.

Ce résultat veut dire que le travail fait par la force électrique sur une trajectoire fermée n'est pas nul, et donc que 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 flux, on peut obtenir des résultats surprenants (comme on le verra un peu plus loin).

## 9.5 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<sup>er</sup> 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

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

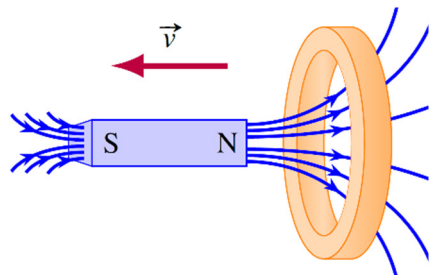
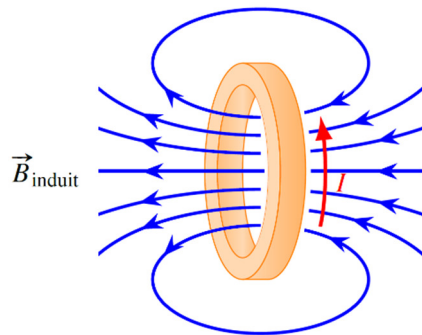
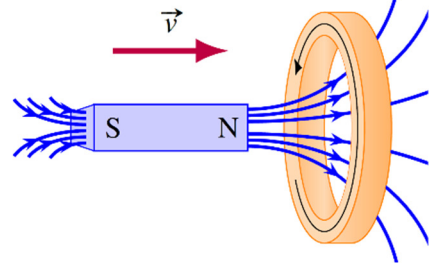
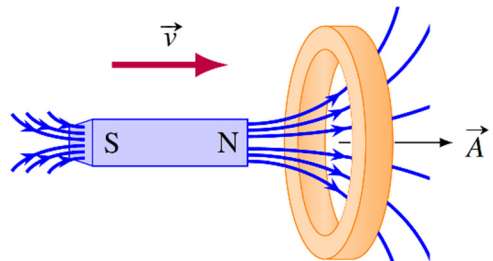
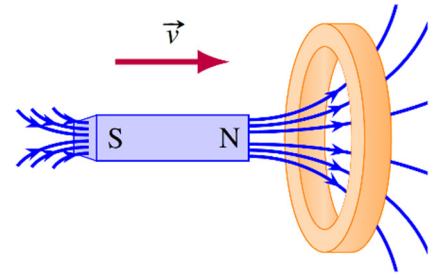
Ainsi, la direction du courant est celle montrée à droite.

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<sup>me</sup> 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

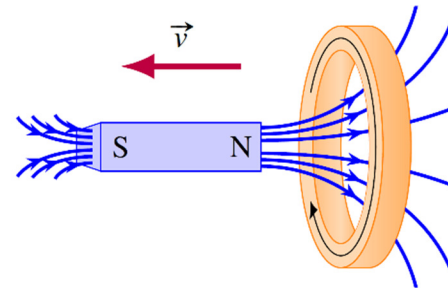
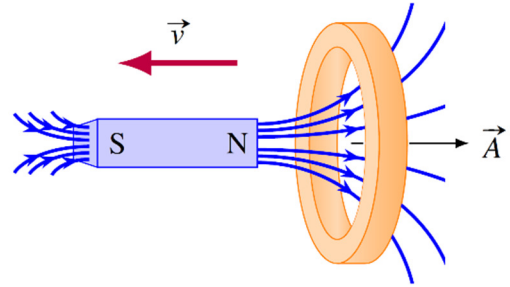
On doit choisir une direction pour le vecteur  $A$ . On va prendre un vecteur vers la droite. Dans ce cas, le flux dans la boucle est positif et il diminue. Ainsi,

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

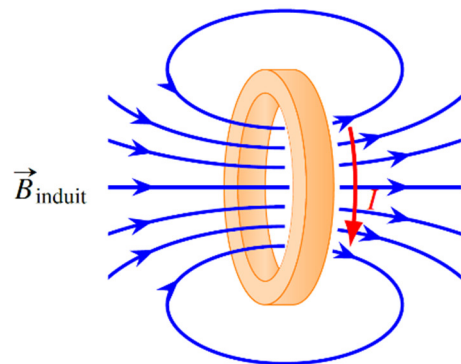
Si cette dérivée est négative, alors la différence de potentiel

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

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.

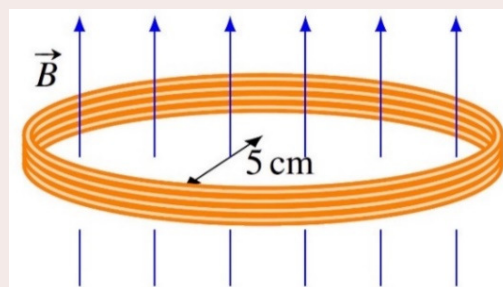


## 9.6 L'UTILISATION DE LA LOI DE L'INDUCTION DE FARADAY

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

### Exemple 9.6.1

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

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

Si on a mis l'angle de  $0^\circ$ , 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

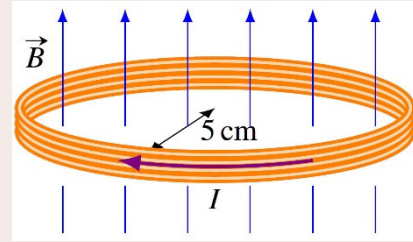
$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{\text{induite}} &= -N \frac{\Delta\phi_B}{\Delta t} \\ &= -100 \cdot \frac{7,85 \times 10^{-4} \text{Wb}}{0,05s} \\ &= -1,57V\end{aligned}$$

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.

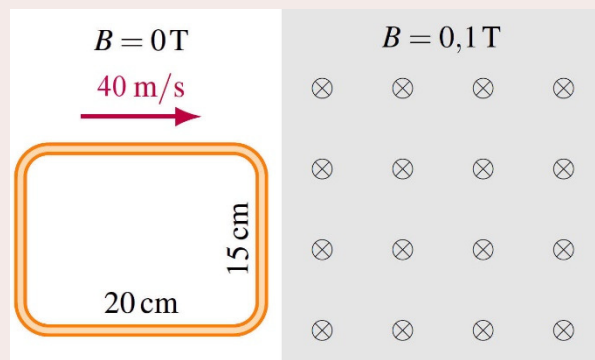


On peut aussi trouver le sens du courant avec la loi de Lenz. Comme le flux augmente, le champ magnétique induit fait par le courant induit est dans le sens contraire de champ qui fait le flux, donc vers le bas. On trouve ensuite la direction avec la règle de la main droite qui donne la direction du 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 les charges en mouvement qui forment le courant variable dans l'anneau qui crée un champ magnétique et un champ électrique.

### Exemple 9.6.2

Un cadre métallique ayant une résistance de  $0,5 \Omega$  se déplace avec une vitesse constante de  $40 \text{ m/s}$  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.

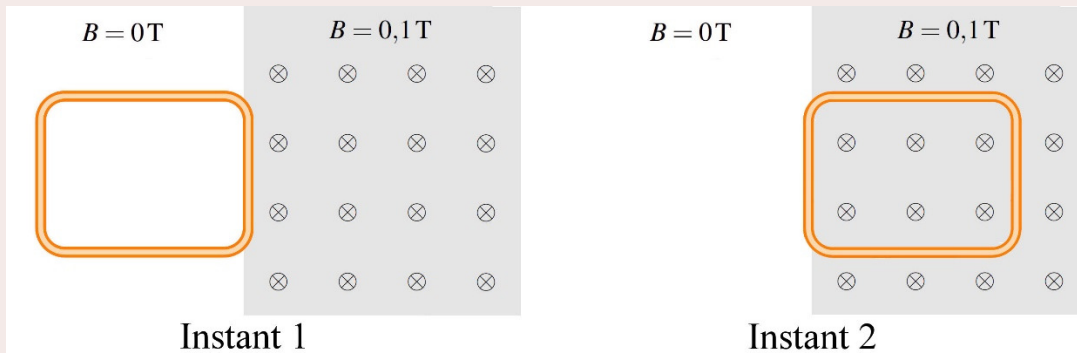
### Version 1

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)

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

(L'angle est de  $180^\circ$  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  $0^\circ$ .)

La variation de flux est donc

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

Pour trouver le taux de variation du flux, il nous faut aussi  $\Delta t$ . Le temps entre l'instant 1 et l'instant 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 du

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

### 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

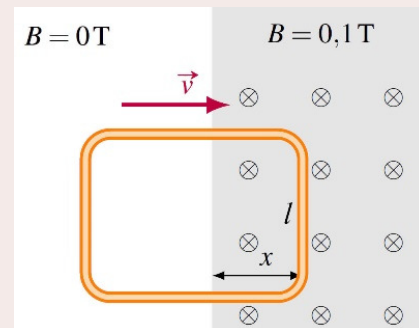
$$\frac{d\phi_B}{dt} = \frac{d(-Blx)}{dt}$$

Puisque  $B$  et  $l$  sont des constantes, on a

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

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

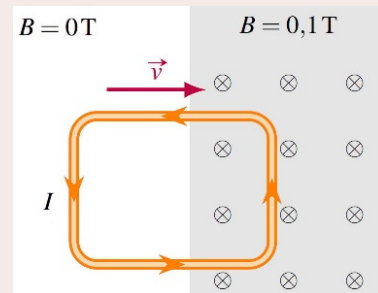
$$\begin{aligned}\frac{d\phi_B}{dt} &= -Blv \\ &= -0,1T \cdot 0,15m \cdot 40 \frac{m}{s} \\ &= -0,6 \frac{Wb}{s}\end{aligned}$$

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

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

Le courant est donc

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



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

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 que dans ce cas, cela génère une différence de potentiel de

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

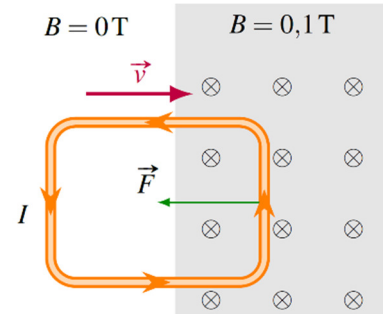
C'est exactement la différence de potentiel trouvée avec la formule de l'induction dans l'exemple (avec la version 2 du calcul de la variation de flux).

## 9.7 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.

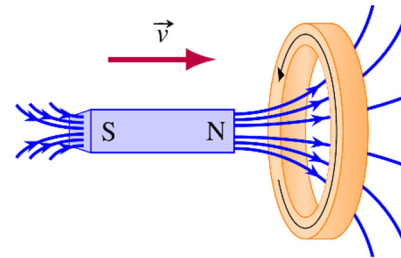


(Les forces sur le fil du haut (vers le bas) et la force sur le fil du bas (vers le haut) du cadre s'annulent mutuellement, mais il reste une force sur le fil de droite.)

Cette force fait donc ralentir le cadre.

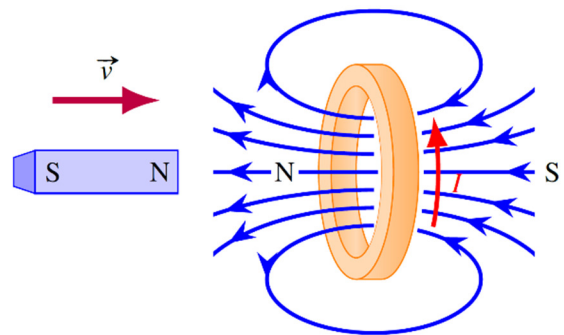
### La force sur un anneau quand on approche ou éloigne un aimant

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.



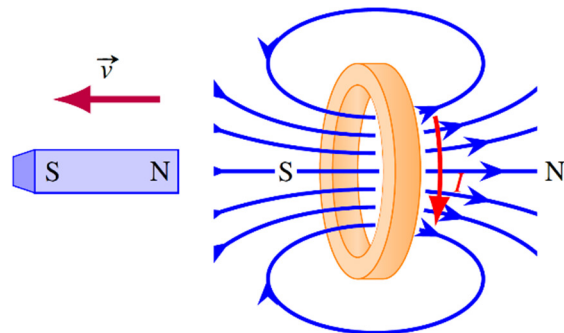
On a alors un courant dans un champ magnétique et il y a donc une force sur ce courant. On pourrait trouver la direction de la force avec la règle de la main droite, mais on peut aussi trouver la direction de la force en examinant le champ magnétique fait par le courant induit (appelé le champ magnétique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

[https://www.youtube.com/watch?v=4PdXTMEb\\_8s](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.

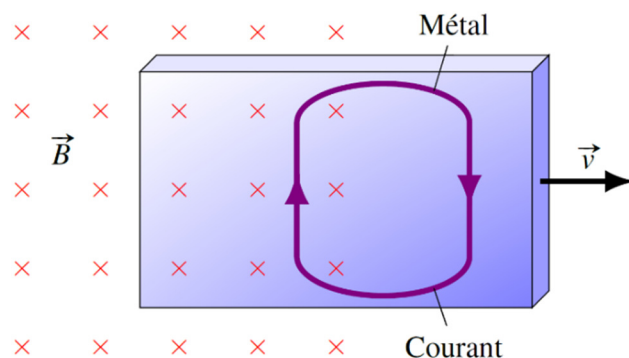
<https://www.youtube.com/watch?v=qTkOpprVITM>

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](http://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.

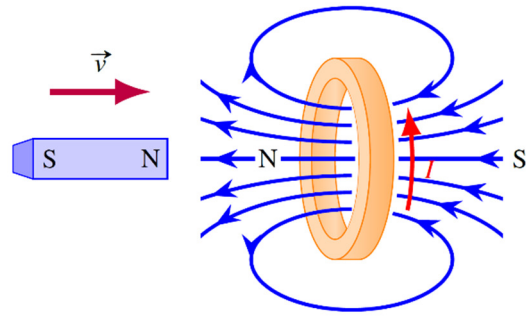
<https://www.youtube.com/watch?v=Yu1uRvErM80>

On peut même faire tourner une canette.

[https://www.youtube.com/watch?v=3IVI5\\_q-lFg](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<sup>e</sup> loi de Newton).



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

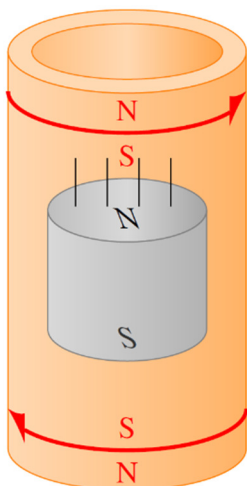
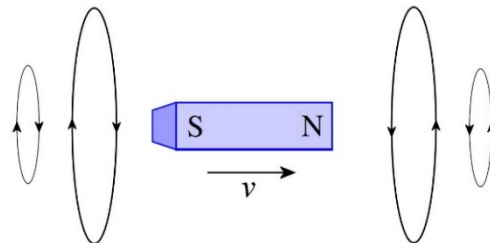
### Un aimant qui tombe dans un tube

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.

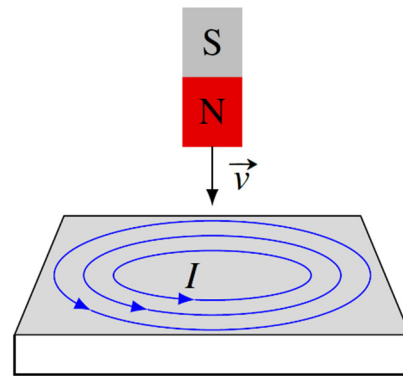
La vitesse de l'aimant va se stabiliser à une certaine vitesse bien précise. À cette vitesse, la force de gravité est exactement annulée par les forces magnétiques et l'aimant descend à vitesse constante. Si l'aimant va moins rapidement que cette vitesse d'équilibre, les champs magnétiques varient moins 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 atteindre 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 atteindre 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 le vidéo suivant, 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 entrainer 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/](http://coastersworld.fr/freins-magnetiques-montagnes-russes/)

## 9.8 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. Un champ magnétique variable produit sous le chaudron 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.

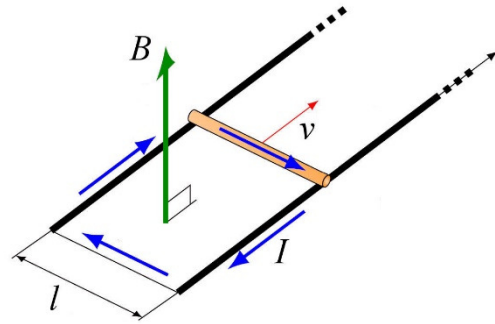
## La tige sur des rails

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 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  $180^\circ$  puisque la force est dans la direction opposée à la vitesse.)

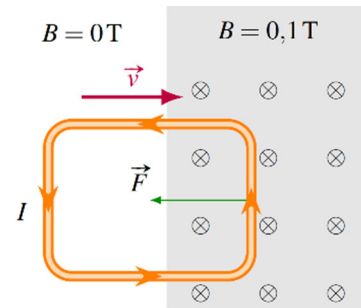
Une puissance négative signifie que l'énergie cinétique de la tige diminue. On remarque alors que l'énergie cinétique perdue par la tige est égale à l'énergie dissipée en chaleur par la résistance. Ainsi, l'énergie perdue en chaleur provient tout simplement de l'énergie cinétique de la tige.



## 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.

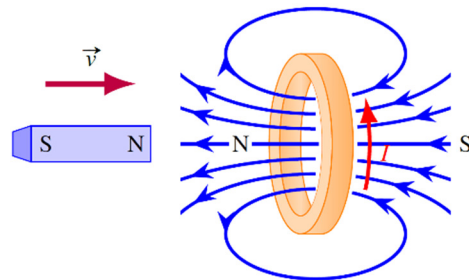
Cela veut dire que le cadre va ralentir. Encore une fois, c'est l'énergie cinétique du cadre qui se transforme en chaleur dans la résistance du cadre.



## 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.

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

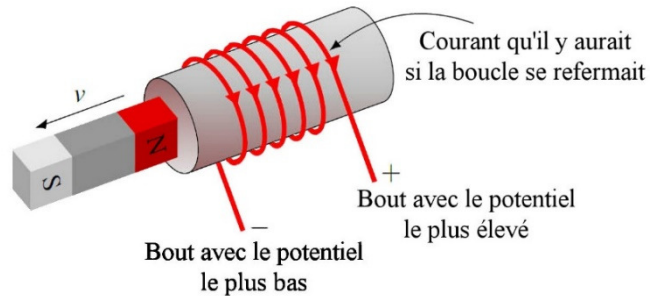
La formule de la différence de potentiel induite

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

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

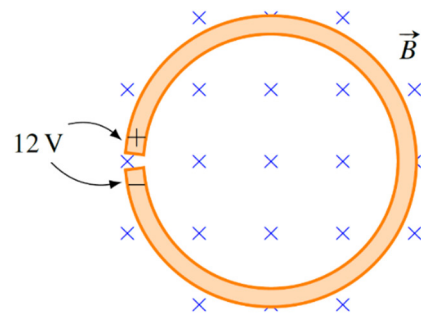
$$d\mathcal{E} = \vec{E} \cdot d\vec{\ell} + \vec{v} \times \vec{B} \cdot d\vec{\ell}$$

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

Toutefois, on peut quand même utiliser la formule

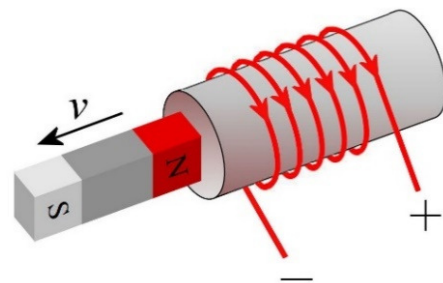
$$\mathcal{E}_{\text{induite}} = -N \frac{d\phi_B}{dt}$$

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 ajoutée est petite.

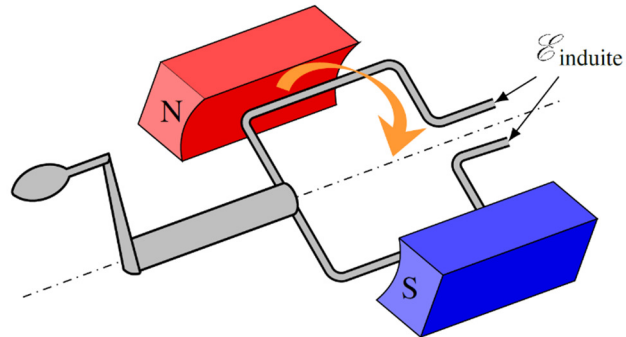


## 9.10 LES GÉNÉRATEURS

### 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 tente 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  $A$  change continuellement. Cela signifie que l'angle est

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

où  $\omega$  est la vitesse angulaire de rotation et  $\theta_0$  est l'angle initial entre le champ  $B$  et  $A$ . 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  $\Delta v$  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  $\Delta v_0$ . On a donc

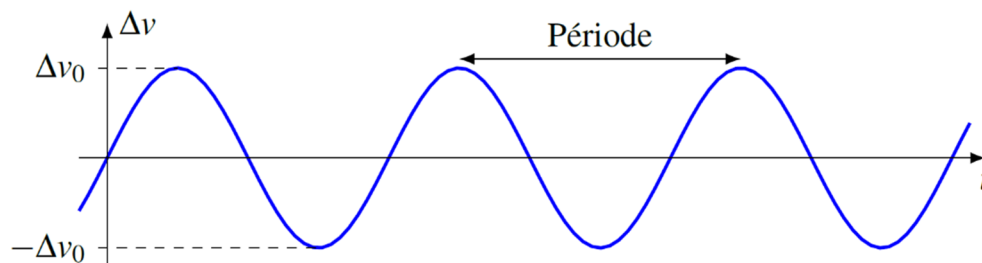
### Différence de potentiel induite par un générateur

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

$$\Delta v_0 = NBA\omega$$

(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 9.10.1

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

$$\Delta v_0 = NBA\omega$$

$$170V = N \cdot 0,05T \cdot \pi \cdot (0,1m)^2 \cdot (2\pi \cdot 60Hz)$$

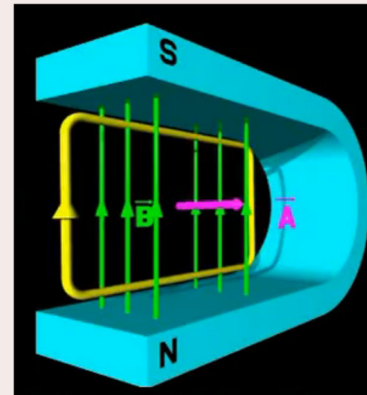
$$N = 287$$

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](http://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  $-90^\circ$ )

La différence de potentiel est donc

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

$$= 170V \cdot \sin((2\pi \cdot 60Hz) \cdot 0,02s + \frac{\pi}{2})$$

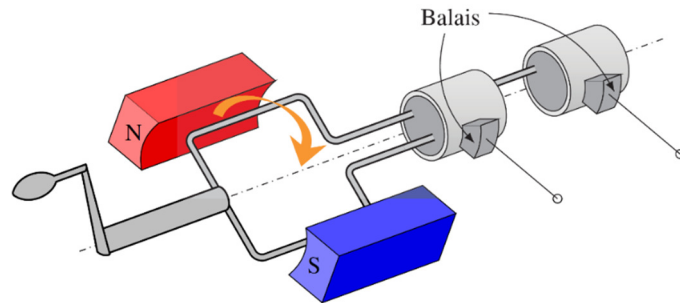
$$= 52,5V$$

(Si on avait choisi  $-90^\circ$ , 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 ?

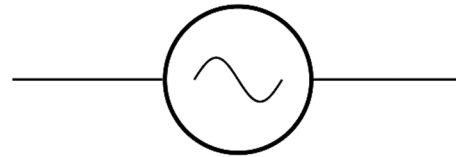
Si les fils de la bobine sont simplement branchés à un circuit, ils vont s'entortiller l'un autour de l'autre avec la rotation de la bobine. Comme pour les moteurs, on utilise des

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

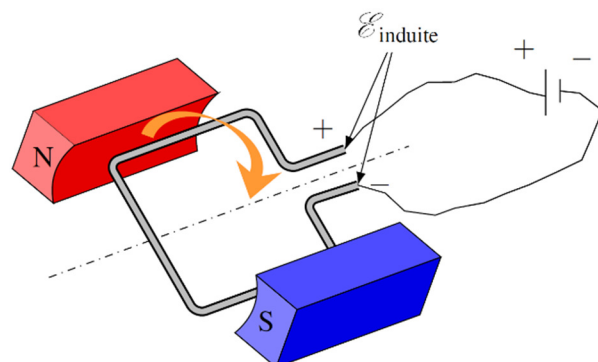
### Le moteur et le générateur sont identiques

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.

## 9.11 QUELQUES SUBTILITÉS CONCERNANT L'INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

### La loi des mailles

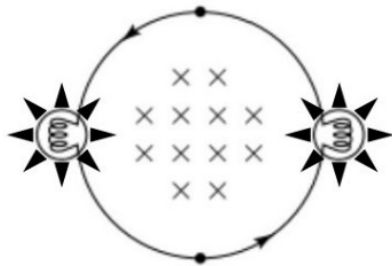
Quand on fait la loi des mailles dans un circuit et qu'il y a une variation de flux dans la surface délimitée par la maille, il ne faut pas oublier que l'induction va faire en sorte qu'il y a comme une source invisible dans la maille. Pour tenir compte de cela, il faut simplement dire que

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

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 au centre de 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, on a plutôt

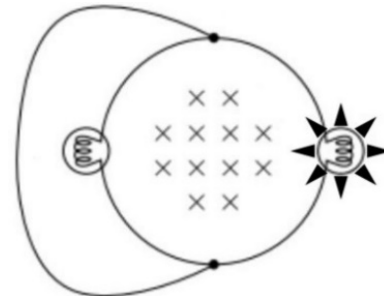
$$RI + RI - \frac{d\phi_B}{dt} = 0$$

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

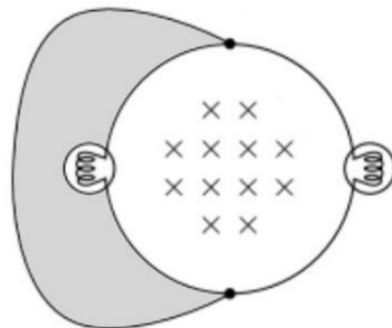
Avec un flux qui augmente, la dérivée est positive et le courant est positif. Le courant est bel et bien dans la direction supposée, ce qui aussi conforme à la loi de Lenz.

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 !

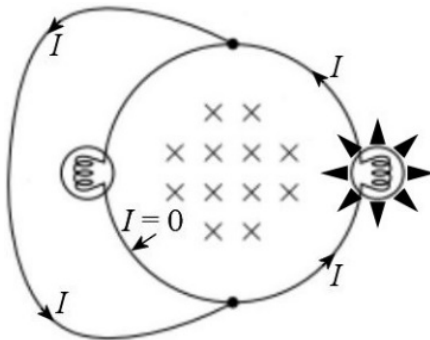
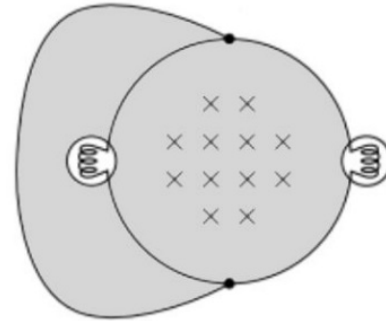


Il est vrai que les 2 résistances sont court-circuitées, mais ce n'est plus nécessairement vrai qu'il n'y aura pas de courant dans une résistance court-circuitée. Avec le terme additionnel



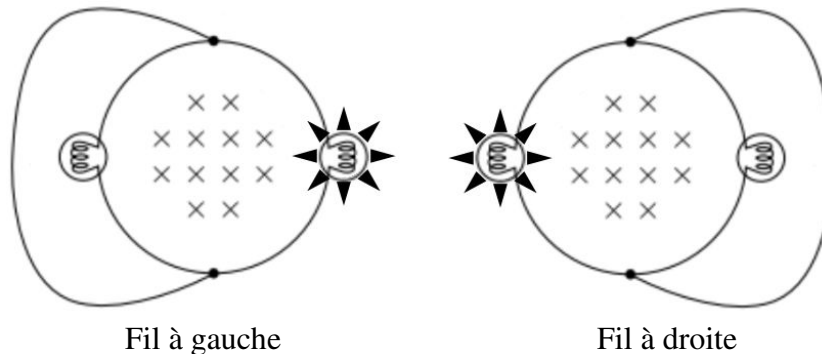
pour l'induction, il n'y a pas de courant dans une résistance court-circuitée uniquement s'il n'y a pas de variation de flux dans la boucle du court-circuit. C'est le cas avec notre boucle de gauche : il n'y a pas de variation de flux dans la surface délimitée par la boucle du court-circuit (en gris 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  $P = RI^2$ ).

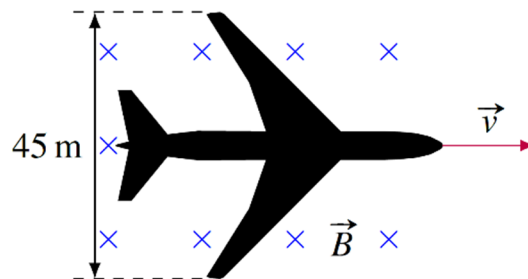
La beauté de cet exemple, c'est qu'on peut changer la lumière qui s'allume en déplaçant simplement le fil ajouté !



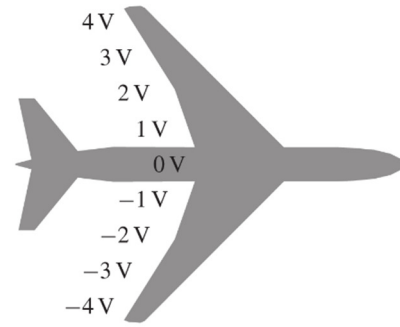
## Que va-t-on mesurer avec un voltmètre ?

### La différence de potentiel entre les bouts des ailes d'un avion

Imaginons qu'on soit dans un avion qui se déplace dans un champ magnétique dirigé vers le sol (ce qui pourrait arriver dans l'Arctique). Selon ce qu'on a vu dans ce chapitre, il apparaît alors une différence de potentiel entre les deux bouts des ailes de l'avion. Disons que la différence de potentiel qui apparaît est de 8 V.

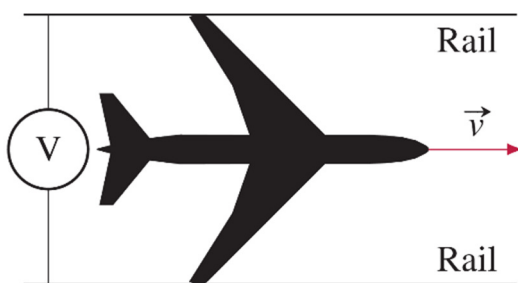


Notez que le potentiel dans un conducteur augmente graduellement quand il y a de l'induction. On pourrait dire ici qu'il passe graduellement de  $-4\text{ V}$  à  $4\text{ V}$  en allant d'une aile à l'autre.



Maintenant, une personne dans l'avion décide qu'il va mesurer la différence de potentiel entre les deux bouts des ailes. En plaçant chacune des sondes de son voltmètre au bout des ailes, il observe que la différence de potentiel affichée par le voltmètre est... nulle.

On obtient une valeur nulle parce que les fils du voltmètre sont aussi des conducteurs se déplaçant dans un champ magnétique et il y aura aussi de l'induction dans ces fils. Il y aura en fait exactement la même différence de potentiel induite que dans les ailes ! En plaçant la sonde sur le bout de l'aile à  $4\text{ V}$ , la sonde atteint un potentiel de  $4\text{ V}$ . Toutefois, dans le fil qui part de la sonde pour se rendre à l'habitacle, le potentiel du fil va passer de  $4\text{ V}$  à  $0\text{ V}$  puisque le changement qui se fait dans le fil est identique à celui qui se fait dans l'aile. Même chose pour le fil sur l'autre aile. La sonde est bel et bien à  $-4\text{ V}$ , mais le potentiel du fil passe de  $-4\text{ V}$  à  $0\text{ V}$  en se rendant à l'habitacle. Ainsi, les deux fils ont un potentiel identique de  $0\text{ V}$  quand ils arrivent au voltmètre. L'appareil indique donc que la différence de potentiel est nulle entre les deux fils.

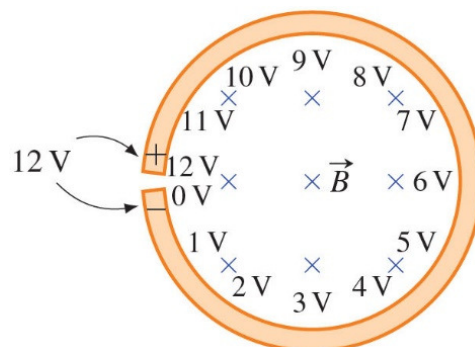


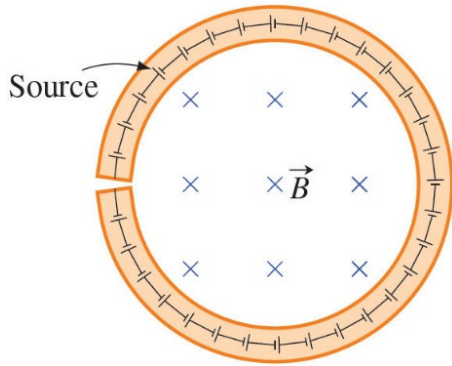
Si on voulait mesurer la différence de potentiel entre les bouts des ailes, il faudrait construire deux longs rails en altitude à  $45\text{ m}$  l'un de l'autre. On demanderait alors au pilote de voler l'avion de telle sorte que chaque bout d'aile touche à un des rails. On pourrait alors mesurer la différence de potentiel en mesurant la différence de potentiel entre les rails. Dans ce cas, les fils du voltmètre ne se déplaceraient pas

avec l'avion et il n'y aurait pas de différence de potentiel induite dans les fils qui viendrait affecter la valeur mesurée par le voltmètre.

Un anneau dans un champ magnétique variable

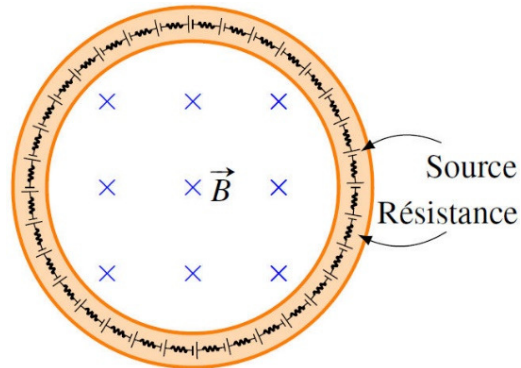
Supposons maintenant qu'on place un anneau dans un champ magnétique variable (présent uniquement à l'intérieur de l'anneau). Initialement, l'anneau n'est pas refermé sur lui-même. Supposons que le champ magnétique augmente à un rythme tel que la différence de potentiel induite serait de  $12\text{ V}$ . On aura alors la situation montrée à droite. Encore une fois, la variation de potentiel est graduelle le long de l'anneau.



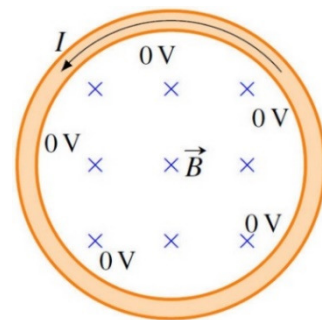


C'est comme s'il y avait une suite de sources dans l'anneau qui font augmenter le potentiel puisque la différence de potentiel est faite par le champ électrique et ce champ est uniforme partout dans l'anneau.

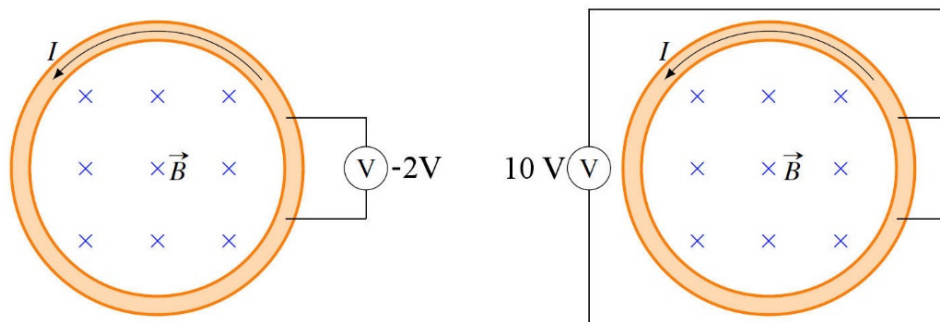
Que va-t-il se passer maintenant si on referme l'anneau ? Va-t-il toujours y avoir une différence de 12 V ? En refermant l'anneau, il y aura maintenant un courant. La résistance est aussi répartie également dans l'anneau, tout comme la force électromotrice. C'est un peu comme si on avait une suite microscopique de sources et de résistances.



Quand l'anneau est ouvert, il n'y a pas de courant et la différence de potentiel est la somme des potentiels des sources et il y a une différence de potentiel entre les deux extrémités de l'anneau. Quand l'anneau est refermé, il y a un courant. Maintenant, 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 que la charge gagne grâce au champ électrique (qui est notre source ici) soit immédiatement perdue en chaleur dans la résistance. L'énergie de l'électron 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.



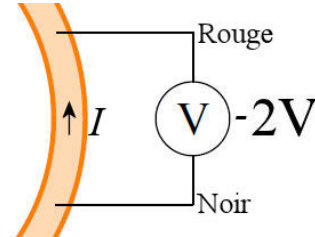
Pourtant, et c'est là que la situation se complique, on n'obtiendra pas 0 V si on mesure la différence de potentiel entre deux points de l'anneau avec un voltmètre. Ce qui est encore plus fou, c'est que la valeur donnée par le voltmètre ne sera pas toujours la même selon la configuration des fils du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



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 ?

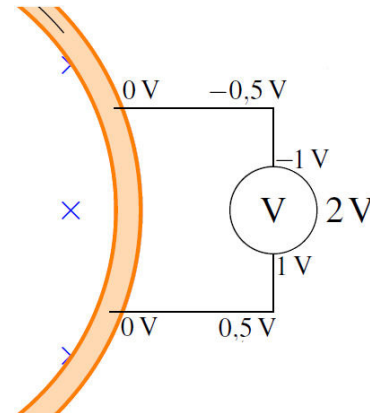
Examinons plus attentivement le branchement du voltmètre qui indique 2 V. Si on fait la loi de Kirchhoff de la boucle formée par les fils du voltmètre et une petite partie de la boucle (en allant dans le sens du courant dans l'arc), on a

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



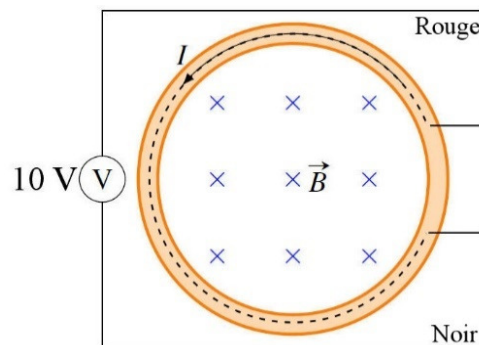
(Avec cette équation on suppose que le fil rouge a un potentiel plus bas.) On sait que pour la boucle au complet, le  $RI$  est égal à 12 V (pour annuler la différence de potentiel induite). Sur 1/6 de la longueur de l'anneau, on a une résistance 6 fois plus petite, ce qui veut dire que  $RI$  vaut 2 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 modifie l'énergie potentielle des charges dans le fil du voltmètre, ce qui change le potentiel du fil du voltmètre. 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

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

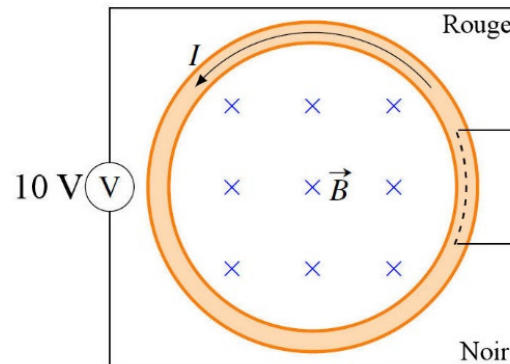


(Avec cette équation on suppose que le fil noir a un potentiel plus bas.) On sait que pour la boucle au complet, le  $RI$  est égal à 12 V (pour annuler la différence de potentiel induite). Sur 5/6 de la longueur de l'anneau, on a une résistance égale à 5/6 de l'anneau, ce qui veut dire que  $RI$  vaut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



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

(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 donne 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  $\Delta V$  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.

## RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

### Différence de potentiel entre les extrémités d'une tige en mouvement dans un champ magnétique

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

$$\mathcal{E}_{\text{induit}} = vBl \text{ (quand la tige est perpendiculaire à } v \text{ et à } B\text{)}$$

### Flux magnétique

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

ou

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

où  $\theta$  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

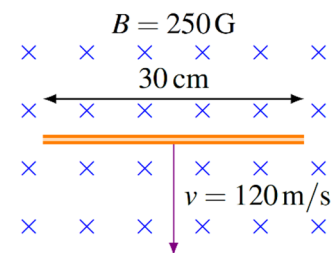
$$\Delta v = \Delta v_0 \sin(\omega t + \theta_0)$$

$$\Delta v_0 = NBA\omega$$

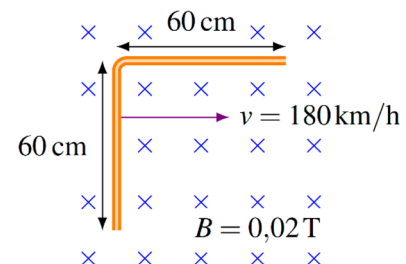
## EXERCICES

### 9.2 La différence de potentiel induite dans un conducteur en mouvement

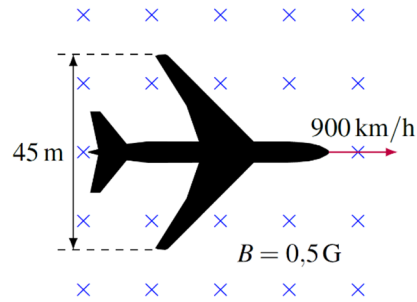
1. Quelle est la différence de potentiel entre les deux extrémités de cette tige ? (Spécifiez également laquelle des extrémités a le potentiel le plus élevé.)



2. Quelle est la différence de potentiel entre les deux extrémités de cette tige ?

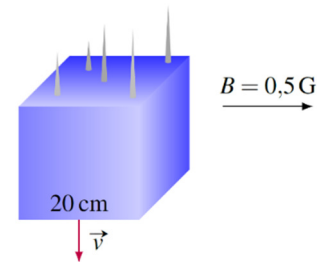


3. Un avion passe à 900 km/h directement au-dessus du pôle nord magnétique. À cet endroit, le champ est dirigé directement vers le sol et a une grandeur de 0,5 G. Quelle est la différence de potentiel entre les bouts des ailes si la distance entre les bouts des ailes est de 45 m ?



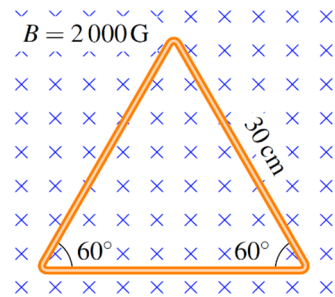
4. On laisse tomber un cube métallique initialement au repos dans un champ magnétique de 0,5 G dont la direction est montrée sur cette figure.

- a) Laquelle des faces du cube aura le potentiel le plus élevé et laquelle des faces du cube aura le potentiel le plus bas 5 secondes après le début de la chute libre ? (On néglige la friction de l'air.)  
 b) Quelle sera la différence de potentiel entre ces deux faces ?

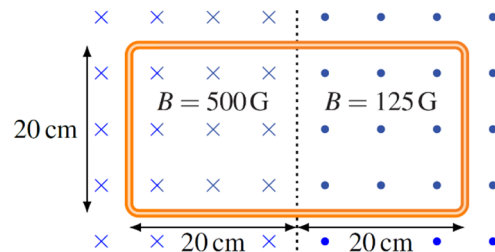


### 9.3 La loi d'induction de Faraday

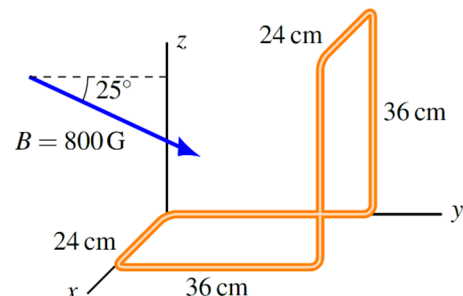
5. Quel est le flux magnétique qui traverse la surface délimitée par le triangle ?



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



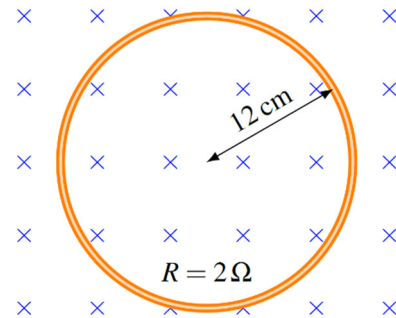
7. Quel est le flux magnétique qui traverse la surface délimitée par le fil ? (Le champ magnétique n'a pas de composante en x.)



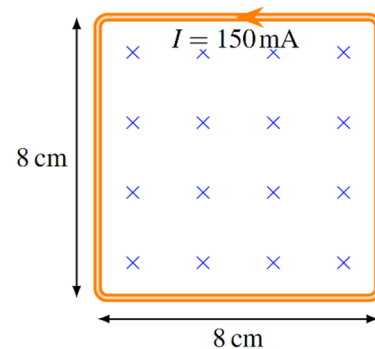


### 9.6 L'utilisation de la loi d'induction de Faraday

8. 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.)



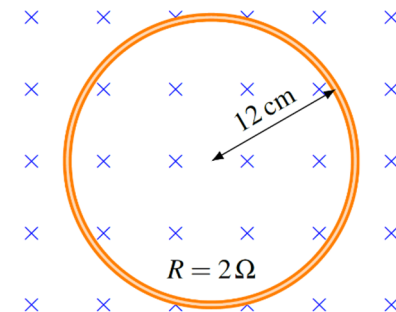
9. Le cadre métallique de la figure a une résistance de 12 Ω. Il y a un courant induit de 150 mA dans le cadre. À quel rythme varie le champ magnétique ? (Spécifiez si la grandeur du champ magnétique augmente ou diminue)



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

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

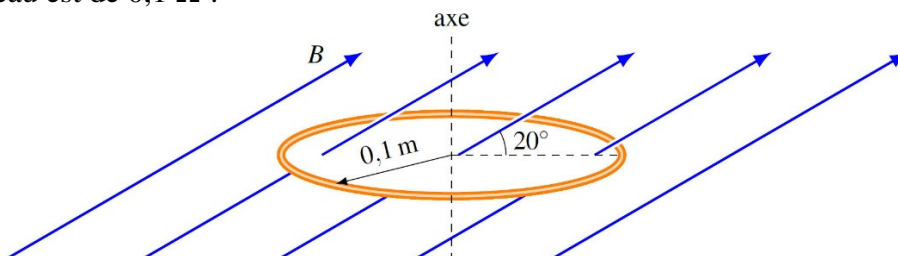
Quel est le courant induit dans la boucle circulaire à  $t = 5 \text{ s}$  ?



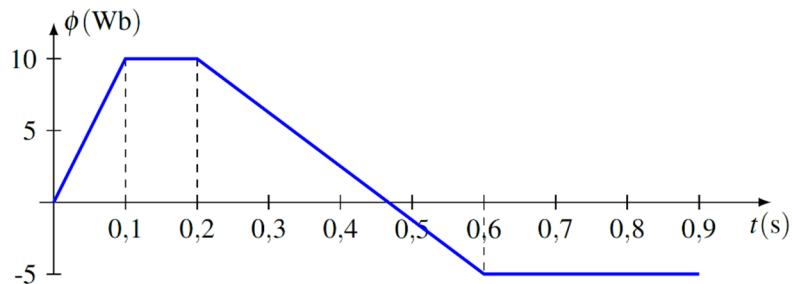
11. Dans la situation montrée sur la figure, la grandeur du champ magnétique est donnée par la formule

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

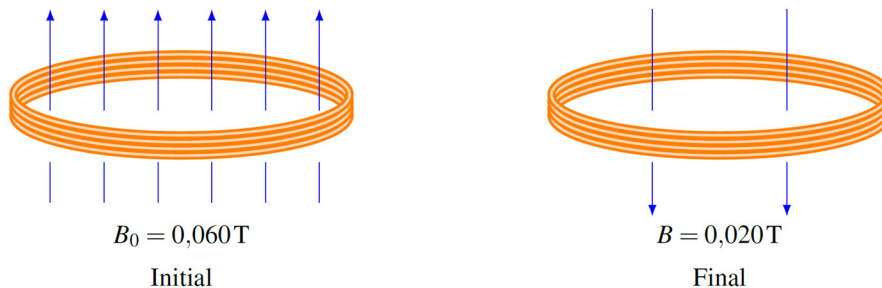
Quel est le courant induit dans la boucle circulaire à  $t = 2 \text{ s}$  si la résistance de l'anneau est de 0,1 Ω ?



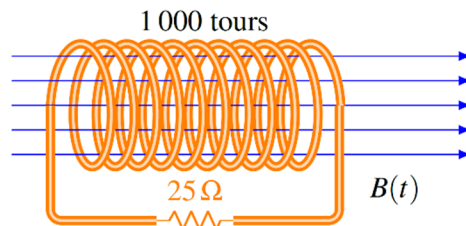
12. Voici un graphique qui montre le flux magnétique à travers une boucle en fonction du temps. Quel est le courant dans la boucle à  $t = 0,4$  s s'il y a 30 tours de fils et que la résistance du fil formant la boucle est de  $50 \Omega$  ?



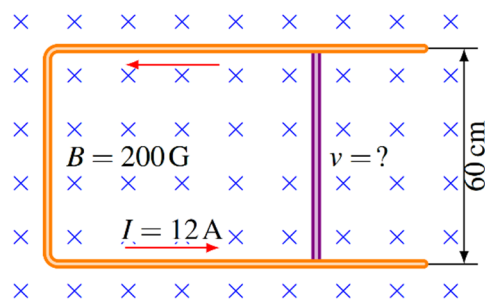
13. La figure montre la variation de champ magnétique dans un anneau. Le champ varie à un rythme constant de sorte qu'il s'est écoulé 0,12 s entre les configurations initiale et finale montrées sur la figure. Il y a 500 tours de fil dans l'anneau et le courant qui circule dans le fil pendant les 0,12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



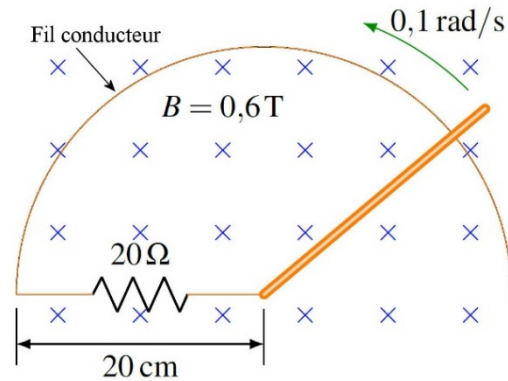
14. Dans la situation suivante, la grandeur du champ magnétique diminue au rythme de 1000 G/s. Le rayon du solénoïde est de 12 cm. Quelle est la puissance dissipée en chaleur dans la résistance ? (Spécifiez aussi la direction du courant.)



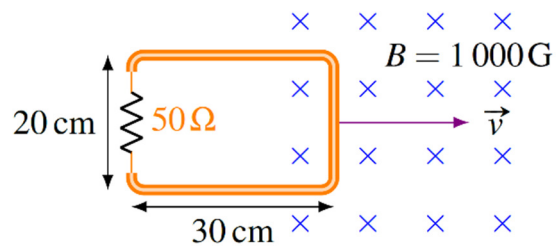
15. Dans la situation montrée sur la figure, il y a un courant de 12 A qui circule dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. Les rails n'ont pas de résistance, mais la tige (en rose) a une résistance de  $0,2 \Omega$ . Quelle est la vitesse de déplacement de la tige (grandeur et direction) ?



16. 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  $20 \Omega$ .



17. 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 ?

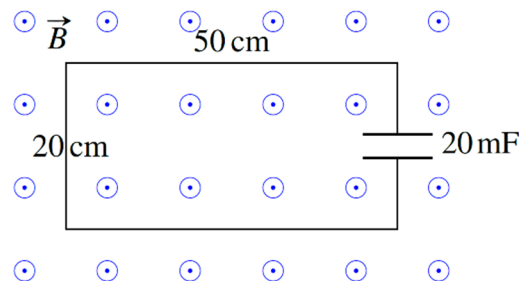


18. Il y a 3000 tours de fil dans une bobine rectangulaire de  $20 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  dont la résistance est  $10 \Omega$ . On fait tourner la bobine de fil dans un champ magnétique qui augmente continuellement. L'angle entre le vecteur aire ( $\vec{A}$ ) et le champ magnétique est donné 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  $t = 2 \text{ s}$  ?

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

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

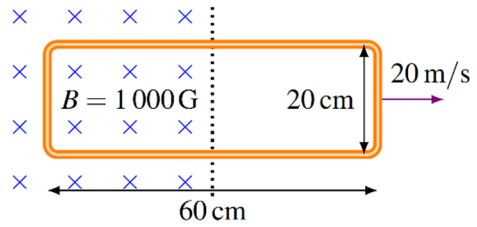
(La figure montre la direction du champ quand il est positif. Si le champ est négatif, il entre plutôt dans la page). Le fil qui relie les deux côtés du condensateur n'a pas de résistance. Quelle est la charge du condensateur à  $t = 0,54 \text{ s}$  ?



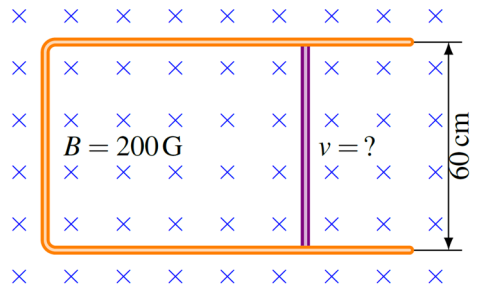
### 9.7 La force et le champ magnétique induit

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

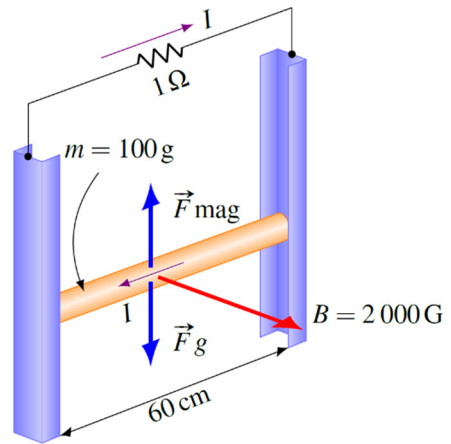
- a) Quel est le courant dans le fil ? (Spécifiez aussi la direction du courant.)
- b) Quelle est la force (grandeur et direction) sur le cadre ?



21. 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 ?



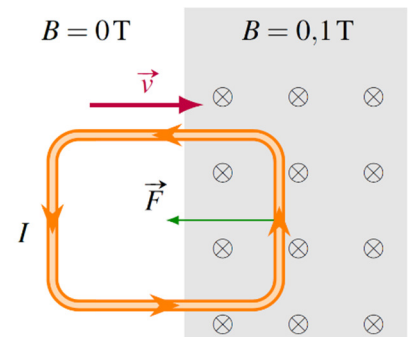
22. Cette tige sur des rails est initialement immobile. Quand on la lâche, elle tombe sous l'effet de la gravitation, tout en restant en contact avec les rails. Il n'y a pas de friction entre les rails et la tige. Les rails et la tige n'ont pas de résistance. Quelle sera la vitesse limite atteinte par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



### 9.8 La conservation de l'énergie

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

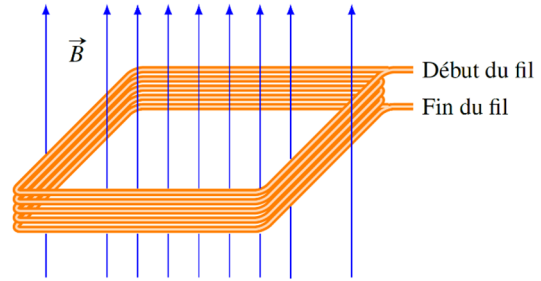
- a) Calculez à quel rythme l'énergie cinétique du cadre diminue. (On cherche donc la puissance de la force magnétique puisque c'est elle qui fait diminuer l'énergie cinétique.)



- b) Avec  $P = RI^2$ , calculez la puissance dissipée en chaleur dans la résistance du cadre.
- c) Ces deux puissances sont-elles égales comme elles devraient l'être ?

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

24. 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 T à 0,2 T en 1 minute. Quelle est alors la différence de potentiel entre les deux extrémités du fil ?

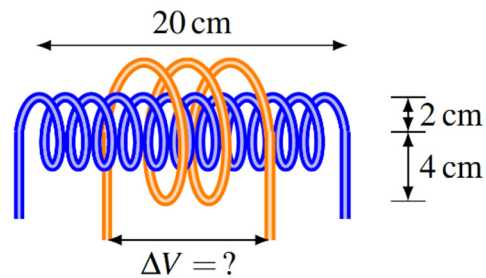


25. Dans la situation montrée sur la figure, le courant dans le solénoïde (celui ayant un rayon de 2 cm) est donné par la formule

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

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

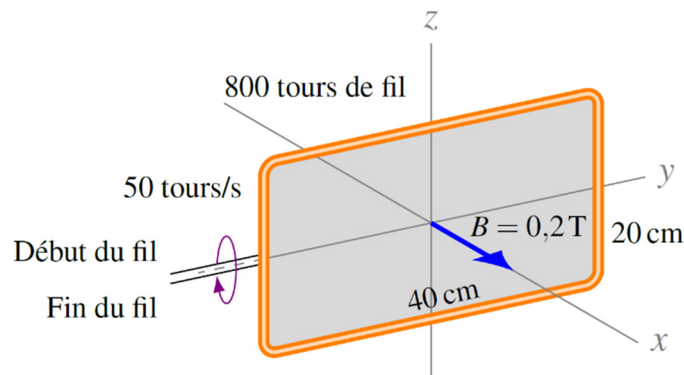
(Négligez le champ à l'extérieur du solénoïde)



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

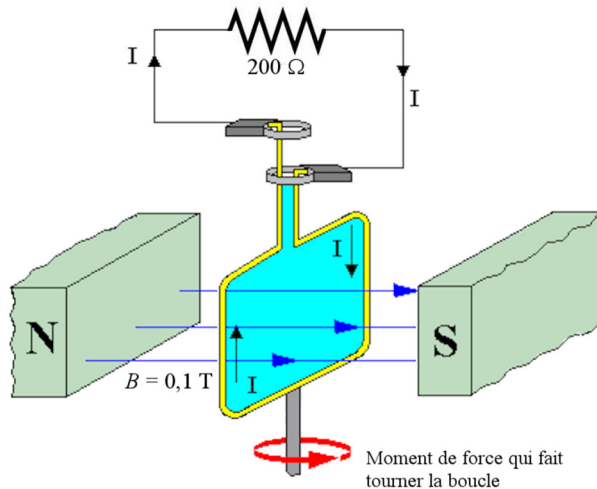
### 9.10 Les générateurs

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



27. La figure vous montre un générateur branché à une résistance de  $200 \Omega$ .

L'aire de la boucle qui tourne dans le champ magnétique est de  $0,8 \text{ m}^2$ . 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

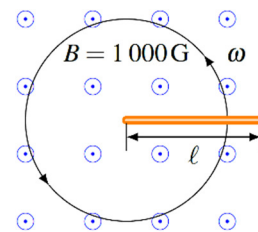
28. La figure du numéro 27 vous montre un générateur branché à une résistance de  $200 \Omega$ . L'aire de la boucle qui tourne dans le champ magnétique est de  $0,2 \text{ m}^2$  et la vitesse de rotation angulaire est de  $500 \text{ rad/s}$ . Au départ ( $t = 0 \text{ s}$ ), le plan de la boucle est perpendiculaire au champ magnétique.

- Quelle est la différence de potentiel maximale aux bornes de la résistance ?
- Quelle est le courant dans la résistance à  $t = 0,01 \text{ s}$  ?
- Quel 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 ?

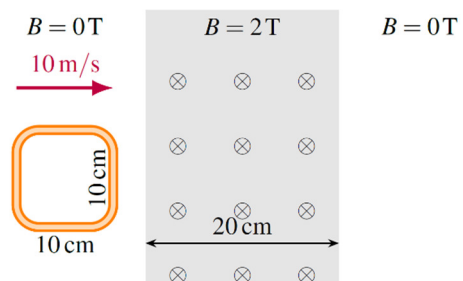
### Défis

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

29. Une tige métallique de  $2 \text{ m}$  de long est en rotation dans un champ magnétique de  $1000 \text{ gauss}$ , tel qu'illustré sur la figure. Quelle est la différence de potentiel entre les bouts de la tige si elle tourne avec une vitesse angulaire de  $20 \text{ rad/s}$  ?



30. 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

### 9.2 La différence de potentiel induite dans un conducteur en mouvement

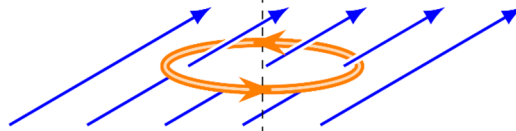
1. 0,9 V. Le côté droit de la tige a un potentiel plus élevé
2. 0,6 V
3. 0,5625 V
4. a) C'est le devant du cube qui a le potentiel le plus élevé et le derrière du cube qui a le potentiel le plus bas    b) 0,49 mV

### 9.3 La loi d'induction de Faraday

5. 7,794 mWb
6. 1,5 mWb
7. 9,186 mWb

### 9.6 L'utilisation de la loi d'induction de Faraday

8. 2,262 mA dans le sens contraire des aiguilles d'une montre
9. Le champ augmente au rythme de 281,25 T/s
10. 1,583  $\mu$ A dans le sens contraire des aiguilles d'une montre
11. 0,5372 mA dans cette direction



12. 22,5 A
13. 16,98  $\Omega$
14. 0,8186 W, le courant est vers la droite dans la résistance
15. 200 m/s vers la droite
16. 60  $\mu$ A vers la gauche
17. 120  $\mu$ C
18. 0,3194 A
19. 584,3  $\mu$ C

### 9.7 La force et le champ magnétique induit

20. a) 46,81 A dans le sens des aiguilles d'une montre    b) 0,9361 N vers la gauche
21. 400 m/s
22. 68,05 m/s

### 9.8 La conservation de l'énergie

23. a) 0,2 W    b) 0,2 W    c) oui

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

- 24. 0,008 V
- 25. 3,596 mV

### 9.10 Les générateurs

- 26. 4021 V
- 27. 625 rad/s
- 28. a) 10 V   b) 47,95 mA   c)  $9,195 \times 10^{-4}$  Nm   d) 0,4598 W   e) 0,4598 W

### Défis

- 29. 4 V
- 30. 6 m/s