

- Les phénomènes d'induction électromagnétique furent découverts par Michaël Faraday en 1831. Les courants permanents produisent des champs magnétiques, et c'est en cherchant expérimentalement à mettre en évidence, mais sans succès une réciprocity stricte que Faraday découvrit l'effet des variations de flux magnétique à travers un circuit.
  - L'induction électromagnétique intervient de façon omniprésente dans le domaine de l'électrotechnique, c'est-à-dire pour la production, le transport et l'utilisation des énormes quantités d'énergie électrique nécessaire aux sociétés industrielles.
- D'où l'importance et la multiplicité des applications industrielles de l'induction électromagnétique (moteurs, alternateurs, transformateurs, haut-parleurs, chauffage à induction...)

## I. Le flux

### I.1. Élément de surface

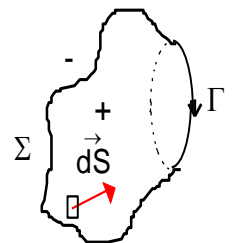
- Soit  $\Sigma$  une surface s'appuyant sur un contour fermé  $\Gamma$ . Le sens de la normale en un point M de la surface est lié de façon conventionnelle au sens de circulation positif sur le contour.

#### Règles pratiques

- « **Le tire bouchon de Maxwell** » On fait tourner le tire-bouchon dans le sens de rotation positif choisi pour  $\Gamma$ . Le sens de translation du tire-bouchon donne le sens de la normale positive.
- « **La règle de la main droite** » Les doigts de la main droite épousent le sens de rotation positif choisi pour  $\Gamma$ , le pouce ouvert donne le sens de la normale positive.

- Vecteur élément de surface : Soit M un point de  $\Sigma$  entouré d'un élément de surface  $dS$

$$\vec{dS} = dS \vec{n} \quad \vec{n} \text{ normale positive.}$$



### I.2. Définition du flux

Soit  $\vec{B}$  un champ magnétique défini dans une région  $\mathcal{D}$  de l'espace et  $\Sigma$  une surface dans cette région.

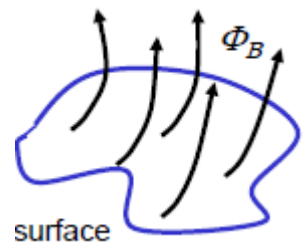
#### ➤ Le flux élémentaire

Soit M un point de  $\Sigma$  entouré d'un élément de surface  $dS$

$$\text{Flux élémentaire à travers } d\vec{S} = dS \vec{n} \quad d\Phi = \vec{B} \cdot d\vec{S} = (\text{scalaire})$$

#### ➤ Le flux du vecteur $\vec{B}$ à travers $\Sigma$

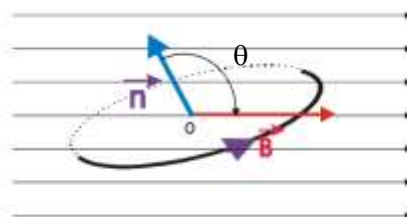
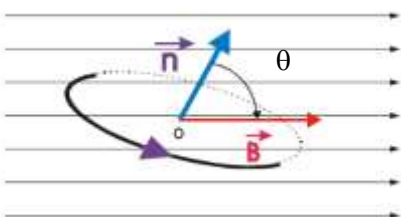
$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{S}$$



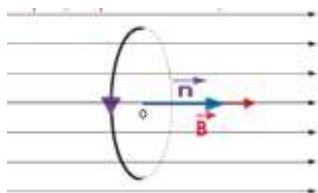
#### ➤ Cas d'un champ magnétique uniforme à travers une surface plane

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

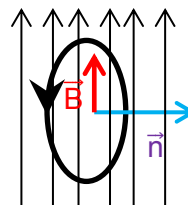
$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{S} =$$



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



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

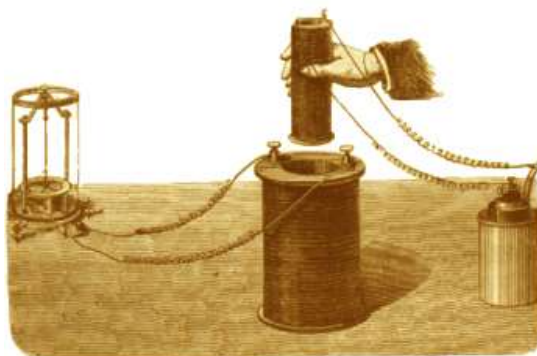


- Unités:  
L'unité du flux du champ magnétique est le weber (Wb)

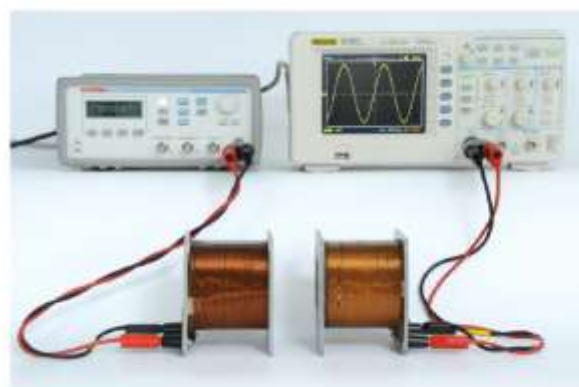
## II. Expériences d'induction électromagnétique

### II.1. Expérience historique de Faraday

- Le champ magnétique peut être créé par un courant. En 1831 Faraday se demanda si l'inverse était possible : créer un courant à l'aide d'un champ magnétique. Il a donc mis en regard deux bobines, l'une est alimentée par un générateur l'autre est reliée à un ampèremètre. Malheureusement rien n'est observé dans l'ampèremètre. C'est alors qu'en débranchant le générateur de la première bobine qu'il observe une déviation brève de l'aiguille de l'ampèremètre relié à la deuxième bobine. Après plusieurs expériences en changeant le noyau des bobines, l'intensité de la f.e.m, il arriva à la conclusion que c'était la variation du courant et donc du champ magnétique créée par la première bobine qui était à l'origine du courant créé dans la seconde.



- Expérience avec deux bobines et un courant variable



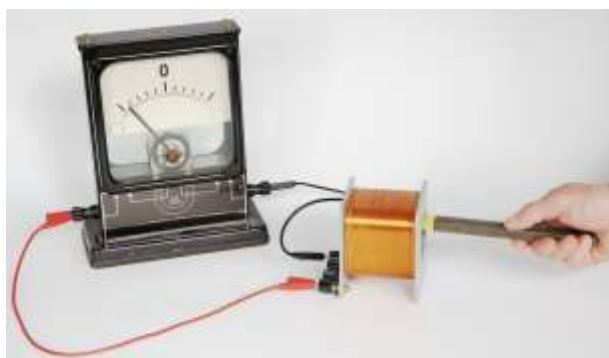
Ou encore



## II.2. Expérience d'un aimant et d'une bobine

On approche un aimant d'une bobine. La bobine est reliée à un ampèremètre à aiguille (circuit fermé), ce qui permet de détecter le passage d'un courant.

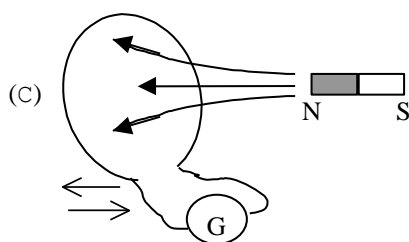
Le bout avec la bande claire de l'aimant est son pôle nord donc les lignes de champ magnétique sortent de ce bout et rentrent dans l'autre.





- 
- 

### II.3. Circuit mobile dans un champ permanent



On déplace la bobine C dans le champ permanent de l'aimant fixe. Les observations sont les mêmes: apparition d'un courant induit.

- Si (C) est immobile,  $i = 0$
- Le signe de  $i(t)$  dépend du sens de déplacement de C par rapport à l'aimant.
- L'amplitude de  $i(t)$  augmente avec la vitesse de déplacement de C.

Un conducteur en mouvement dans un champ magnétique stationnaire peut aussi créer un courant induit dans un circuit à distance.

### II.4. Le phénomène d'induction électromagnétique

Les expériences vues permettent de mettre en évidence le phénomène d'induction électromagnétique. Il consiste en l'apparition d'une f.é.m., dite induite et, s'ils peuvent s'écouler, de courants induits dans un circuit électrique soumis à un flux magnétique variable au cours du temps.

Il suffit d'une des deux causes suivantes pour que le phénomène se manifeste :

- 
- 

## III. Loi de modération de Lenz

### III.1. La loi

Dans tous les cas les phénomènes d'induction vérifient la loi de modération de Lenz :

Loi de Lenz : l'induction s'oppose toujours par ses effets à la cause qui l'a produite

Le courant induit dans un cadre (ou une bobine) est tel que le champ magnétique induit généré par ce courant dans la région à l'intérieur du cadre (ou de la bobine) s'oppose à la variation du flux magnétique (champ magnétique qui traverse une surface) externe qui traverse le cadre.

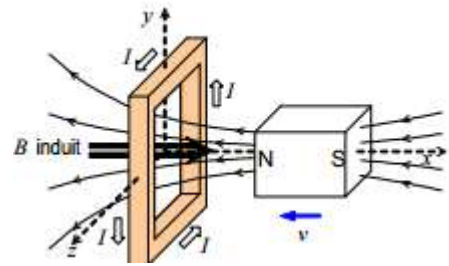
Cette loi explique le retard à l'établissement du courant dans le circuit RL vu en électricité

### III.2. Interprétation des expériences

- Cas 1

→ Aimant :

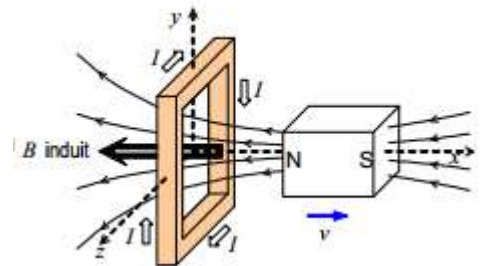
→ Courant induit



- Cas 2

→ Aimant :

→ Courant induit



### IV. Loi de Faraday

#### IV.1. Enoncé de la loi

L'étude expérimentale de la f.é.m. induite dans un circuit C fermé et orienté à travers lequel le flux magnétique  $\Phi(t)$  varie dans le temps, montre que la f.é.m. induite ne dépend que de la vitesse de variation du flux magnétique  $\frac{d\Phi}{dt}$  et qu'elle croît (en valeur absolue) avec celle-ci.

- Enoncé de la loi

Dans un circuit C électrique fermé et orienté, soumis à un flux magnétique  $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{S}$  variable au cours du temps, il y a apparition d'un courant induit d'intensité égale à celle que produirait une source de tension idéale de f.e.m. : 
$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

- Remarques :

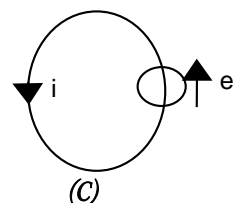
- Le signe négatif dans la loi de Faraday est justifié par la loi de Lenz. Elle stipule que si la f.e.m. induite e produit un courant qui génère un champ magnétique et par le fait même un flux magnétique, celui-ci doit s'opposer à la variation qui le génère.

- La relation  $e = - \frac{d\Phi}{dt}$  est valable quelle que soit la cause de la variation de flux magnétique ((C) fermé) :

- variation du champ magnétique au cours du temps ;
- déplacement ou déformation d'un circuit dans un champ magnétique ;
- action simultanée des causes précédentes.

Orientation du circuit choisie : e,  $\Phi$  et i (courant induit) sont algébriques. e est orienté dans le sens positif choisi pour le circuit.

(Le sens réel du courant observé dans le circuit ne dépend évidemment pas de l'orientation choisie pour le circuit).





## IV.2. Mise en évidence expérimentale

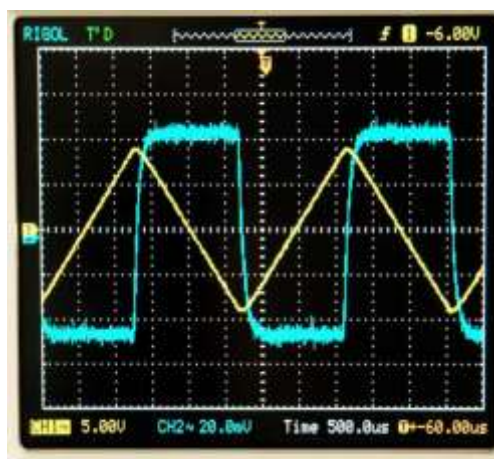
- Expérience 1 : le flux est la grandeur mise en jeu

Une antenne hyperfréquence (MHz) crée un champ magnétique dans l'espace perpendiculaire au plan de l'antenne. La lampe ne s'allume que quand le flux de  $B$  n'est pas nul et éclaire d'autant plus vivement que ce flux est important. Il y a alors environ 100 V à ses bornes.



- Expérience 2 : la f.e.m. est proportionnelle à l'opposé de la dérivée du flux par rapport au temps
- Un générateur alimente une première bobine de rayon  $a$  (que l'on pourra supposer infinie) avec un courant  $i_1$  triangulaire.

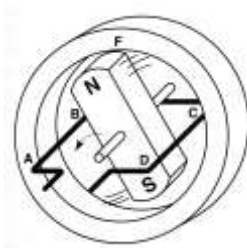
Une deuxième bobine ( $N_2$  spires, rayon  $b < a$ ) est insérée dans la première et on mesure la tension à ses bornes : on observe une tension créneau de valeur positive quand le triangle est décroissant.



## IV.3. Exemple d'utilisation

- Dynamo de vélo (alternateur)

Un générateur électrique peut être réalisé en faisant tourner un aimant (NS) à l'intérieur d'un cadre conducteur (ABCD). Le flux du champ magnétique à travers le cadre varie: une force électromotrice induite apparaît aux bornes du cadre. Des alternateurs de ce type sont placés dans le moyeu des bicyclettes: elles fournissent l'énergie électrique nécessaire à l'éclairage.

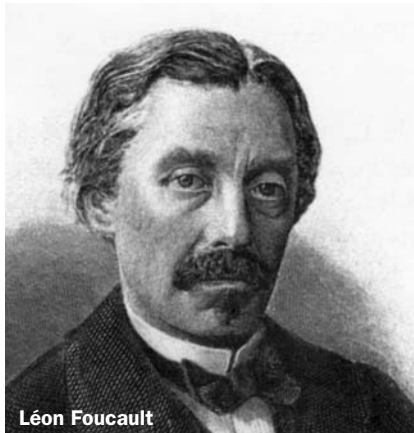


<u>I. Le flux</u> .....	<u>1</u>
<u>I.1. Elément de surface</u> .....	<u>1</u>
<u>I.2. Définition du flux</u> .....	<u>1</u>
<u>II. Expériences d'induction électromagnétique</u> .....	<u>2</u>
<u>II.1. Expérience historique de Faraday</u> .....	<u>2</u>
<u>II.2. Expérience d'un aimant et d'une bobine</u> .....	<u>3</u>
<u>II.3. Circuit mobile dans un champ permanent</u> .....	<u>4</u>
<u>II.4. Le phénomène d'induction électromagnétique</u> .....	<u>4</u>
<u>III. Loi de modération de Lenz</u> .....	<u>4</u>
<u>III.1. La loi</u> .....	<u>4</u>
<u>III.2. Interprétation des expériences</u> .....	<u>5</u>
<u>IV. Loi de Faraday</u> .....	<u>5</u>
<u>IV.1. Enoncé de la loi</u> .....	<u>5</u>
<u>IV.2. Mise en évidence expérimentale</u> .....	<u>6</u>
<u>IV.3. Exemple d'utilisation</u> .....	<u>6</u>

# Pouvoirs de l'induction

JEAN-MICHEL COURTY • ÉDOUARD KIERLIK

**Faraday voulait «transformer le magnétisme en électricité». Son programme a eu de merveilleux succès, tant dans les freins ralentisseurs de camions que dans les plaques à induction.**



Léon Foucault

**D**e tous les moyens de cuisson, le plus singulier est la plaque à induction, où la chaleur est créée directement dans le métal de la casserole. Ce prodige est le résultat de l'induction électromagnétique, une des plus efficaces façons de transmettre de l'énergie sans contact.

Plaçons un morceau de cuivre près d'un aimant. Que se passe-t-il? Rien! En revanche, si nous déplaçons le cuivre par rapport au champ magnétique, un courant électrique apparaît dans le cuivre qui s'échauffe. Cet effet, découvert par Foucault et Faraday, est source de multiples applications comme les plaques à induction et les ralentisseurs électromagnétiques. Nous vous invitons à une promenade dans les applications de l'induction.

Dans un conducteur comme le cuivre une partie des électrons sont libres de se mouvoir, et leur mouvement, sous l'effet d'une force, engendre le courant électrique. Nous savons qu'un aimant crée un champ magnétique qui exerce une force sur les charges en mouvement, force perpendiculaire au mouvement des charges, qui tend à incurver leurs trajectoires. Quand nous déplaçons le morceau de cuivre, les électrons subissent cette force et sont animés d'un mouvement que l'on désigne par «courant de Foucault». L'intensité du courant est proportionnelle à la vitesse de déplacement du matériau et à l'amplitude du champ magnétique. Les courants de Foucault ont des parcours compliqués au sein de la matière où aucun fil ne les guide. On sait toutefois qu'ils forment des lacets et des boucles, d'où leur autre nom de «courants tourbillonnaires».



Michael Faraday inventa la dynamo vers 1831. Pour engendrer du courant, Faraday fit tourner un disque de cuivre dans le champ magnétique qui s'étend entre les pôles d'un aimant permanent.

## L'ÉNERGIE MÉCANIQUE TRANSFORMÉE

Ces courants de Foucault se manifestent chaque fois qu'un matériau conducteur est en mouvement au sein d'un champ magnétique : ils sont induits par le déplacement. Nombre de dispositifs industriels utilisent cette induction pour transformer l'énergie mécanique en énergie électrique, puis éventuellement en chaleur.

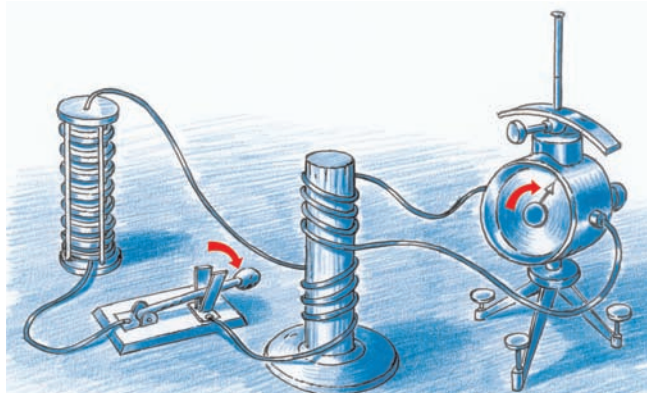
Tous exploitent le principe que Léon Foucault mit en œuvre dans une expérience de 1855 lorsqu'il fit tourner un disque de cuivre dans l'entrefer d'un aimant. Puisqu'il bouge, un tel disque est parcouru de courants de Foucault. Ces courants induits échauffent la matière qu'ils traversent, car les électrons qui les composent choquent sans cesse les autres charges électriques présentes dans le matériau et leur transfèrent une partie de leur énergie, qui est ainsi transformée en chaleur. Cette énergie provient de la seule source d'énergie présente : l'opérateur actionnant le disque. C'est pourquoi Foucault peinait à actionner la manivelle! Si le mouvement de rotation n'est pas entretenu, toute l'énergie mécanique initiale du disque se transforme en chaleur, et le disque arrête de tourner.

Il en va de même dans les ralentisseurs pour camions, un type de frein magnétique qui équipe aujourd'hui la majorité des poids lourds. Leur avantage est d'être sans contact, donc sans usure! Dans ces dispositifs, des disques solidaires de l'arbre de transmission tournent entre des électroaimants alimentés par une batterie. Quand on désire freiner le véhicule on alimente en courant les électroaimants. Plus la vitesse du véhicule est grande, plus la rotation des disques entre les électroaimants est grande et plus le freinage est efficace. Les ralentisseurs sont donc d'autant plus efficaces que le véhicule roule vite, ce qui, en descente, est idéal. En revanche, leur efficacité s'amoindrit aux faibles vitesses jusqu'à s'annuler à l'arrêt : c'est pourquoi, pour les faibles allures, on leur adjoint des freins mécaniques.

Dans les trains à grande vitesse, l'évacuation de la chaleur produite par les ralentisseurs est problématique : la puissance de freinage nécessaire pour ralentir un train est si grande que les disques que l'on pourrait loger dans les bogies ne résisteraient pas aux échauffements associés. Une solution astucieuse est de réaliser le freinage en induisant des courants de Foucault directement dans les rails, qui ont le temps de refroidir entre deux trains.

Une question vient naturellement à l'esprit : comment récupérer les courants induits avant qu'ils ne se dégradent en chaleur? Dans le montage expérimental de Foucault, il suffit d'inclure le disque dans un circuit électrique grâce à deux contacts, l'un placé près de l'axe et l'autre à la périphérie du disque. Le courant induit ainsi capté peut alors alimenter un appareil électrique. Une idée simple mais prodigieuse, car on transforme ainsi de l'énergie mécanique en énergie électrique! Michael Faraday fut le premier, en 1831, à la mettre en œuvre grâce à un montage proche de celui de Foucault. Aujourd-





Deux bobines entourant un noyau de fer se transmettent les champs magnétiques variables. Lorsqu'on actionne l'interrupteur du circuit alimenté par la pile de la première bobine, le courant électrique, et donc le champ magnétique, varient dans les bobines et un courant, mesuré par un ampèremètre est induit dans la seconde bobine.

d'hui, les dynamos ont des architectures bien plus compliquées que celle que créa Faraday. Les dynamos aussi peuvent faire office de freins et l'énergie électrique produite peut alors être récupérée plutôt que dissipée. Ainsi, sur les véhicules électriques, elles rechargent la batterie de bord, et, sur certaines lignes de métro, les courants induits sont réinjectés dans le réseau électrique. Les dynamos de vélos font aussi l'effet de freins. Toutefois, ne nous y trompons pas : s'il est plus dur de pédaler avec une dynamo enclenchée, c'est avant tout à cause des frottements mécaniques !

## LES CHAMPS MAGNÉTIQUES TOURNANTS

La dynamo de Faraday est constituée d'un conducteur en rotation dans un champ magnétique constant. Échangeons les rôles et faisons tourner l'aimant autour du matériau conducteur immobile : le conducteur est alors parcouru des mêmes courants induits. Il s'agit là de la seconde forme d'induction électromagnétique, celle qui se manifeste chaque fois qu'un champ magnétique variable dans le temps baigne un matériau conducteur immobile. Cette autre forme d'induction magnétique semble plus difficile à interpréter que la première ! En effet, si le conducteur est immobile, ses charges électriques doivent l'être aussi. Comment alors, une force magnétique proportionnelle à la vitesse pourrait-elle les mouvoir ? En fait, les charges électriques contenues dans le conducteur ne sont pas mises en mouvement directement par le champ magnétique, mais par le champ électrique créé par les variations du champ magnétique. L'unité des deux formes d'induction a été montrée en 1865 par l'Écossais James Clerk Maxwell qui engloba dans une théorie électromagnétique unique les phénomènes électriques et magnétiques.

Comment crée-t-on ce champ magnétique variable ? On peut soit déplacer un aimant de champ magnétique constant soit alimenter un électroaimant avec un courant variable. Beaucoup plus efficace, cette seconde voie est utilisée dans les transformateurs, des appareils conçus pour modifier les tensions électriques. Dès 1831, c'est encore Faraday qui expérimentait leur principe, plaçant deux bobines de fil conducteur l'une à côté de l'autre. La première – la bobine primaire – est disposée pour que son axe coïncide avec celui de la seconde – la bobine secondaire. Lorsqu'un courant alternatif alimente le circuit de la bobine primaire, elle engendre un champ magnétique variable dans le temps au sein de la bobine secondaire, où il crée un champ électrique, donc un courant induit : la seconde bobine se comporte alors comme un générateur électrique. Le rapport des tensions aux bornes des deux bobines est égal au rapport de leurs nombres d'enroulements. Ainsi, en ajustant cor-



Faraday tenta-t-il d'exploiter les courants de Foucault pour chauffer son thé en agitant un aimant permanent au-dessous d'un pot en fer ? La méthode n'est pas très efficace, mais le principe est là. Aujourd'hui, les chauffages à induction engendrent un champ magnétique rapidement variable au moyen d'enroulements de cuivre.

rectement le nombre d'enroulements, il est possible de « transformer » la tension électrique. On passe ainsi des centaines de milliers de volts du courant qui circule dans les pylônes de transport aux 220 volts de l'usage domestique.

Comme la première forme d'induction magnétique, l'induction magnétique par champs variables est aussi accompagnée de dégagement de chaleur. Chacun a déjà constaté qu'un transformateur chauffe même s'il n'alimente aucun appareil. Cela est dû aux courants de Foucault qui tourbillonnent dans toutes les pièces métalliques qui le composent. Toutefois, un inconvénient peut être mué en un avantage : l'induction magnétique par champs variables est l'un des moyens les plus efficaces pour produire de la chaleur.

Pour cela, il suffit de remplacer la bobine secondaire d'un transformateur par une masse conductrice. Les courants induits dans celle-ci l'échauffent alors. Ce principe est exploité à l'aide de bobines géantes, dans les fours à induction, des fours industriels utilisés dans l'industrie métallurgique. On peut y porter au rouge des lingots de fer et même les faire fondre car leur température monte jusqu'à 1 700 °C ! Le grand avantage des fours à induction est qu'ils effectuent à volonté un chauffage en surface ou un chauffage « en masse », c'est-à-dire uniforme et contrôlé, de tout le matériau. Cette caractéristique est bienvenue en cuisine pour obtenir des surfaces de cuisson qui chauffent uniformément. Les tables de cuisson à induction sont constituées d'enroulements de cuivre recouverts d'une plaque sur laquelle on dépose une casserole au fond métallique, de préférence épais. La chaleur est créée par courants induits dans le fond même de la casserole. Comme les effets de l'induction sont d'autant plus importants que les variations du champ magnétique sont rapides, on emploie des champs magnétiques oscillant à une fréquence de 20 kilohertz, 400 fois plus élevée que les 50 hertz du secteur. Le rendement de ce type de dispositif est excellent : plus de 80 pour cent à comparer à celui des plaques classiques à résistance inférieur à 70 pour cent en général. En outre, aucune énergie n'est consommée et aucune chaleur n'est produite si la table à induction reste sous tension en l'absence de casserole.

Comme notre corps est insensible au champ magnétique, le cuisinier peut même poser sa main sur la plaque sans danger...

Jean-Michel COURTY est physicien, chargé de recherche au CNRS. Édouard KIERLIK est physicien et maître de conférences à l'Université Pierre et Marie Curie.

Eugène HECHT, *Physique*, De Boeck Université, 1999.

## IDÉES DE PHYSIQUE

## Des trains flottant au-dessus des rails

*L'avenir du transport ferroviaire passera-t-il par la lévitation magnétique des trains, assurée par des électro-aimants supraconducteurs ?*

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

**E**n 2011, à l'occasion du centenaire de la découverte de la supraconductivité (état de résistivité électrique nulle, obtenu à très basse température), des trains miniatures ou un skate supraconducteurs flottant au-dessus de rails magnétiques nous ont émerveillés. Ces prototypes glissant sans frottement annoncent-ils les transports du futur ? Les compagnies *Swissmetro* ou *ET3* (*Evacuated Tube Transport Technologies*) nous promettent en effet sécurité, rapidité et frugalité énergétique en faisant circuler dans le vide des véhicules à sustentation magnétique. Ce type de lévitation est d'ailleurs déjà mis en œuvre dans la liaison commerciale *Transrapid* à Shanghai ou dans les prototypes *MLX* des *Maglev* japonais, qui détiennent le record du monde de vitesse sur rail (581 kilomètres par heure en 2003).

### Lévitation stable ou instable ?

Comment le magnétisme permet-il de faire léviter de façon stable un train entier ? On pourrait croire qu'il est possible de faire léviter un aimant en le rapprochant d'un autre. En effet, avec des aimants au néodyme de quelques centimètres et quelques grammes, on obtient d'intenses forces d'attraction entre pôles opposés ou de répulsion entre pôles identiques, de plusieurs newtons. Mais on découvre vite que l'aimant que l'on cherche à faire léviter se retourne dès qu'on le lâche et se colle à l'aimant qui le repoussait. On démontre que quelle que soit la configuration

choisie, une lévitation à base d'aimants permanents (ou d'électro-aimants) est instable.

Pourtant, la lévitation d'un aimant au-dessus d'une plaquette de supraconducteur refroidi est stable (voir la figure 1). Que se passe-t-il ? Un matériau supraconducteur empêche les lignes de champ magnétique de pénétrer en son sein. Lorsqu'on approche un aimant, des courants électriques se forment à la surface du supraconducteur de telle façon que le champ magnétique qu'ils induisent compense le champ extérieur : le champ magnétique total reste nul à l'intérieur du matériau. Ces courants forment ainsi un



**1. UN AIMANT PLACÉ AU-DESSUS** d'un matériau supraconducteur lévite de façon stable. Il induit dans le supraconducteur des courants qui créent un champ magnétique opposé à celui qu'il exerce, quelle que soit la configuration géométrique (contrairement au cas de deux aimants que l'on rapproche). Ce phénomène correspond au diamagnétisme d'un supraconducteur : soumis à un champ magnétique, un tel matériau empêche les lignes de champ de pénétrer en son sein.

électro-aimant dont la polarité est en miroir de celle de l'aimant initial. Ce dernier est donc repoussé, quelle que soit son orientation, et la lévitation est stable. Hélas, comme on ne sait pas obtenir de supraconductivité à température ambiante, il est difficile d'imaginer l'installation de rails supraconducteurs sur plusieurs kilomètres.

Mais le même type de répulsion, dite diamagnétique, existe aussi avec de la matière à l'état normal, telle l'eau. Le champ magnétique d'un aimant que l'on approche crée en effet, au sein des nuages électroniques des molécules, des courants électriques, lesquels produisent un champ magnétique s'opposant à celui de l'aimant. Lorsque ce dernier est très intense, même l'eau s'aimante assez pour léviter. C'est ainsi qu'en 1997, le physicien russo-néerlandais Andre Geim a fait léviter de l'eau, une petite tomate et même une grenouille vivante (voir la figure 2) dans un champ magnétique de 16 teslas.

Cette valeur, 16 teslas, du champ est énorme et bien trop élevée pour des applications à grande échelle. Tout n'est cependant pas perdu. Un métal normal, tel le cuivre, peut aussi repousser un aimant. Il suffit pour cela que le métal et l'aimant soient en mouvement l'un par rapport à l'autre. Lorsqu'un aimant est déplacé parallèlement à la surface d'un conducteur, la variation avec le temps du champ magnétique en chaque point du conducteur induit des courants électriques, les courants dits de Foucault. Ces derniers engendrent un champ magnétique qui agit en retour sur l'aimant.

L'action des courants de Foucault s'oppose à la cause qui les a produits (loi de Lenz). Le premier effet est donc une force de traînée, opposée à la vitesse ; on le met à profit dans les freins à induction qui équipent les camions ou les trains à grande vitesse. Un second effet, moins connu, est l'apparition d'une force de portance qui repousse l'aimant : puisque le champ magnétique de l'aimant diminue avec la distance, et les courants induits aussi, la loi de Lenz favorise l'éloignement. De façon remarquable, la portance croît avec la vitesse de l'aimant pour atteindre une certaine valeur maximale, tandis que la traînée passe par un maximum, puis diminue à vitesse plus élevée.

## Le train flotte grâce aux courants induits

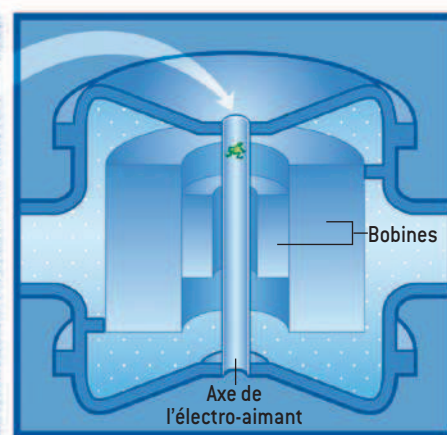
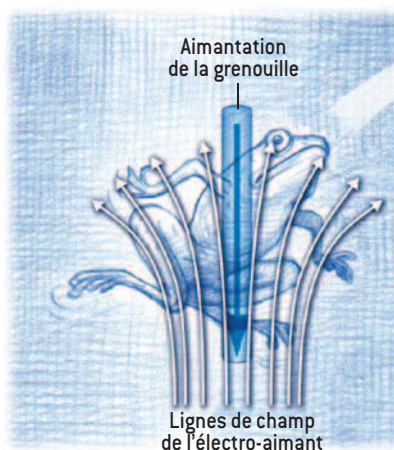
En 1966, les chercheurs américains James Powell et Gordon Danby ont proposé d'utiliser ce mécanisme pour sustenter un train, et ont contribué à développer sur ce principe le *Maglev* japonais. Dans ce système, la force de portance, qui augmente avec la vitesse, n'est suffisamment élevée que si la vitesse du train dépasse un certain seuil, de l'ordre de 100 kilomètres par heure pour les MLX. Le train est donc muni de roues ne servant qu'aux phases de démarrage ou d'arrêt. En phase de lévitation, la stabilité du train est automatiquement assurée : si le véhicule se rapproche du sol, la force de portance, répulsive, augmente et empêche le contact.

La force de traînée pose en revanche un sérieux problème. Elle serait rédhibitoire si J. Powell et G. Danby n'avaient eu l'idée d'utiliser pour les rails, non pas un conducteur massif placé sous le train, mais des bobines conductrices en forme de huit connectées les unes aux autres et placées de chaque côté (voir la figure 3). Les deux boucles qui composent le huit ont des enroulements de sens opposés. Il s'ensuit que lorsque l'aimant qui lui fait face est centré, les flux magnétiques qui traversent ces deux boucles se compensent. Il n'y a alors pas de courant induit, donc pas de dissipation d'énergie.

Dans cette situation, il n'y a pas non plus de portance. Par conséquent, sous l'effet

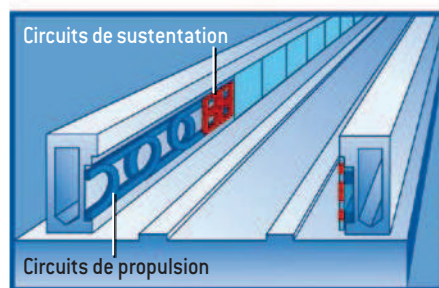
de son poids, le train s'abaisse légèrement sous le plan de symétrie. Des courants sont alors induits dans le circuit et engendrent une portance proportionnelle à l'abaissement, tandis que la traînée croît comme son carré. Pour les faibles écartements, cette traînée magnétique, 100 fois inférieure à la portance, est un ordre de grandeur inférieur à la traînée aérodynamique.

Le MLX fonctionne avec de tels rails. À grande vitesse, il flotte à quelques centimètres au-dessus du sol, un écart confortable pour pallier d'éventuels incidents. Par ailleurs, s'il se rapproche d'un des rails et



Dessins de Bruno Vacaro

**2. UN CHAMP MAGNÉTIQUE PUISSANT ET NON HOMOGÈNE**, produit par un électro-aimant, peut faire léviter de façon stable un objet ordinaire. En agissant sur les nuages électroniques des molécules, le champ magnétique induit en chacun des points de l'objet de minuscules boucles de courant électrique. Ces courants, via les champs magnétiques qu'ils engendrent, s'opposent aux causes qui les produisent : l'objet est repoussé vers des zones où règne un champ magnétique plus faible.



**3. LE TRAIN EXPÉRIMENTAL JAPONAIS MAGLEV** a un système de sustentation magnétique composé de circuits en huit (en rouge) disposés latéralement sur les rails et fonctionnant grâce à des électro-aimants supraconducteurs embarqués. Si le train dévie verticalement ou latéralement par rapport aux rails, le champ magnétique des électro-aimants induit dans les circuits en huit des courants, lesquels engendrent des champs magnétiques qui rectifient la posture du train. La propulsion est également assurée par des champs magnétiques, via un jeu de bobines embarquées et un autre jeu de bobines (en bleu) disposées le long des rails.



## LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>



## BIBLIOGRAPHIE

D. Oster *et al.*, Evacuated tube transport technologies [ET3]: A maximum value global transportation network [...], *Journal of Modern Transportation*, vol. 19[1], pp. 42-50, 2011.

J. Powell et G. Danby, Maglev : The new mode of transport for the 21st century, *21st Century Science and Technology*, vol. 16[2], pp. 43-57, 2003.

B. V. Jayawant, Electromagnetic suspension and levitation techniques, *Proceedings of the Royal Society of London A*, vol. 416, pp. 245-320, 1988.

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur

[www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)



s'éloigne donc de l'autre, par exemple sous l'effet du vent, une force latérale apparaît et vient le ramener dans le droit chemin.

L'autre idée astucieuse de J. Powell et G. Dandy est d'avoir suggéré l'utilisation d'électro-aimants supraconducteurs embarqués dans le train. Extrêmement puissants, capables de créer les forces de sustentation suffisantes, ces aimants ont une résistance électrique – donc une consommation électrique – nulle, même lorsqu'ils sont parcourus par des centaines de kiloampères. En revanche, il faut alimenter le système cryogénique qui refroidit et maintient l'alliage niobium-titane à la température de l'hélium liquide (4,2 kelvins, soit  $-269^{\circ}\text{C}$ ). On comprend l'intérêt que pourrait représenter pour ces trains le développement de matériaux restant supraconducteurs jusqu'à une température

relativement élevée (supérieure à 77 kelvins, la température de l'azote liquide) !

Par ailleurs, c'est aussi le magnétisme qui assure la propulsion, grâce à un moteur mettant en jeu des bobines embarquées alimentées en courant alternatif et un second jeu de bobines situées le long du rail.

On le devine, la conception des rails reste compliquée et le coût d'infrastructure élevé. Cela n'empêche pas certains de rêver déjà à la génération suivante : puisque le ralentissement principal est dû à la traînée aérodynamique, supprimons-la en faisant circuler ces trains dans des tubes où règne le vide ! C'est ainsi que les projets *Swissmetro* ou plus récemment encore ET3 promettent de gagner un ordre de grandeur en vitesse pour une même dépense énergétique. À quand des trains glissant à 5 000 kilomètres par heure ?

**MARS, MERCURE & VÉNUS, SATURNE, JUPITER, NEPTUNE & URANUS, PLUTON.  
EMBARQUEZ POUR SIX VOYAGES EXTRAORDINAIRES !**

# ENIGMES DES PLANETES

VOYAGE AU CŒUR DU SYSTÈME SOLAIRE

- Des images exceptionnelles et inédites rapportées par les sondes spatiales
- des interviews des plus grands spécialistes mondiaux
- de stupéfiantes reconstitutions en 3D.

**EN COFFRET 2 DVD LE 6 MAI 2013**

RETROUVEZ SHOWSHANK FILMS SUR FACEBOOK

**SHOWSHANK FILMS**

6 FILMS POUR COMPRENDRE NOTRE SYSTÈME PLANÉTAIRE

ENIGMES  
DES PLANETES  
VOYAGE AU CŒUR DU SYSTÈME SOLAIRE

2 DVD