L'induction et l'énergie magnétique

Kenneth Maussang

▶ **To cite this version:**

Kenneth Maussang. L'induction et l'énergie magnétique. Licence. HA8402H - Physique et sciences de l'ingénieur 4, Université de Montpellier, France. 2023, pp.72. hal-04423139

HAL Id: hal-04423139
https://cel.hal.science/hal-04423139

Submitted on 29 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

L'induction et l'énergie magnétique

HA8402H – Physique et sciences de l'ingénieur 4

Kenneth MAUSSANG

Université de Montpellier

Polytech Montpellier — PeiP

2022 – 2023

Objectifs du chapitre

- O2.1 Établir les actions mécaniques d'un champ magnétique sur un circuit filiforme (force de Laplace).
- O2.2 Connaître et appliquer la loi de Faraday.
- O2.3 Connaître les aspects qualitatifs du phénomène d'induction (notamment la loi de Lenz).
- O2.4 Établir les équations électrique et mécanique d'un couplage électromécanique.
- O2.5 Connaître quelques applications industrielles.
- O2.6 Retrouver les résultats (caractéristique et énergie) d'une bobine au sens de l'électronique.

L'induction et l'énergie magnétique

1 Introduction

2 Maxwell-Faraday en dynamique

3 Induction : circuit mobile dans un champ fixe

4 Autoinduction

5 Énergie magnétique dans une bobine

L'induction et l'énergie magnétique

1 Introduction
- Force de Laplace
- Constatations expérimentales

2 Maxwell-Faraday en dynamique

3 Induction : circuit mobile dans un champ fixe

4 Autoinduction

5 Énergie magnétique dans une bobine

L'induction et l'énergie magnétique

1 Introduction
- Force de Laplace
- Constatations expérimentales

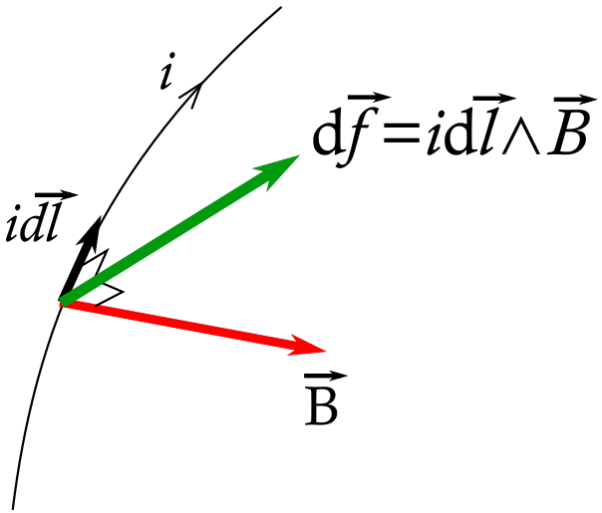
2 Maxwell-Faraday en dynamique

3 Induction : circuit mobile dans un champ fixe

4 Autoinduction

5 Énergie magnétique dans une bobine

Force de Laplace dans le cas d'un circuit filiforme.



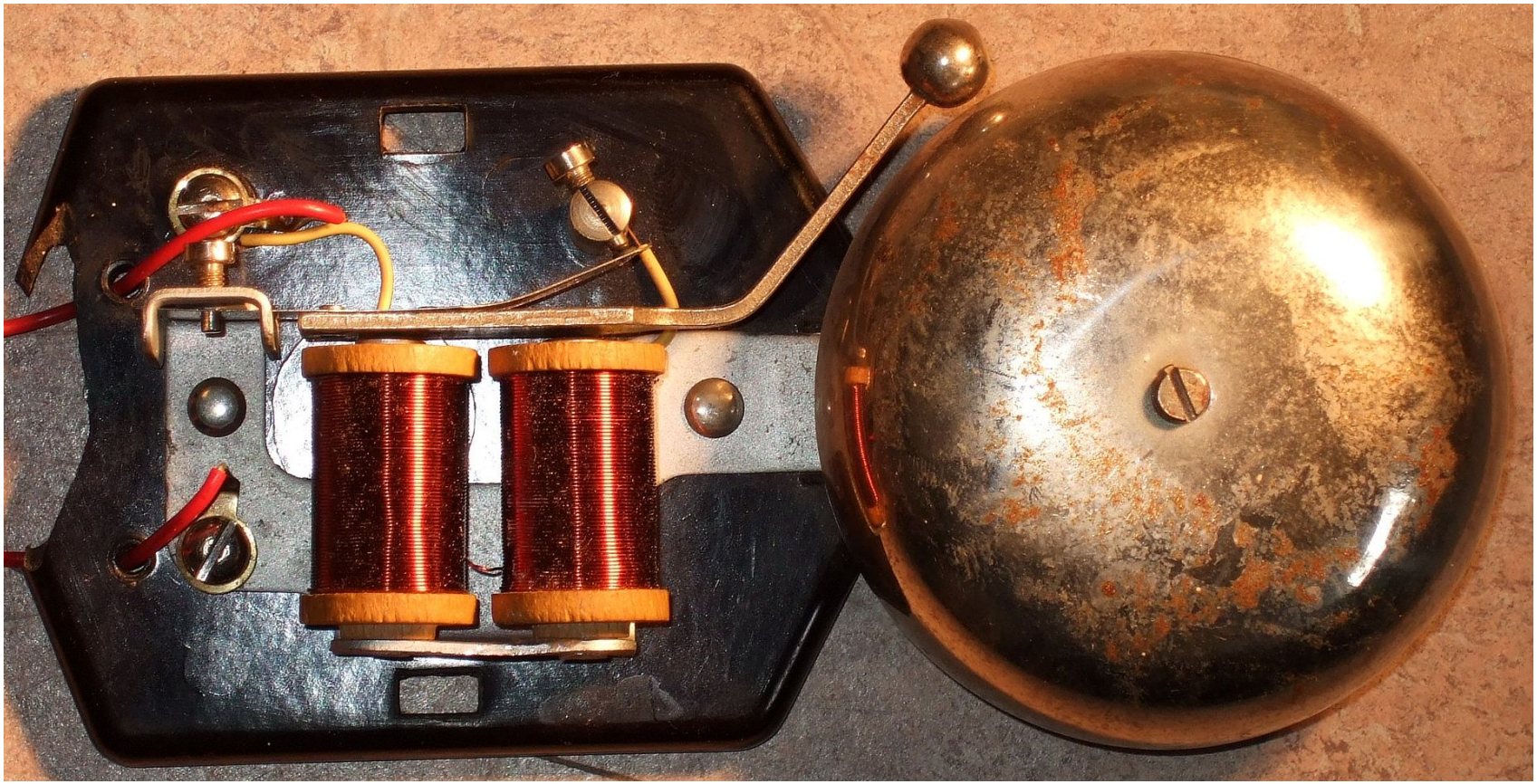
Soit un circuit filiforme plongé dans un champ magnétique $\vec{B}$, parcouru par un courant i. Le champ magnétique exerce sur le fil une *force de Laplace* $\mathrm{d}\vec{f}$ sur tout élément $\mathrm{d}\vec{l}$ du circuit selon

$$\mathrm{d}\vec{f} = i\mathrm{d}\vec{l} \wedge \vec{B}.$$

Illustration expérimentale de la force de Laplace

`https://www.youtube.com/watch?v=xZut1K0UWbs`

Principe des actionneurs électromagnétiques.



https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnet

L'induction et l'énergie magnétique

1 Introduction
- Force de Laplace
- Constatations expérimentales

2 Maxwell-Faraday en dynamique

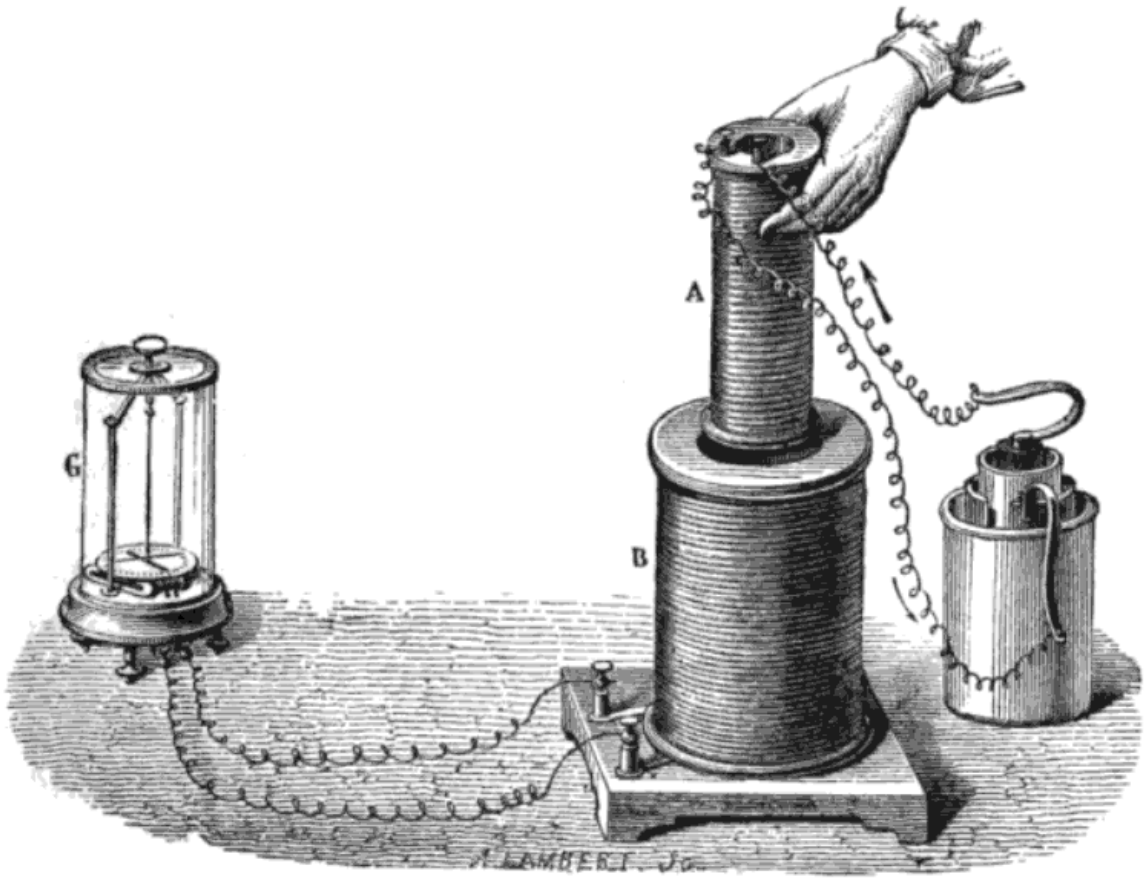
3 Induction : circuit mobile dans un champ fixe

4 Autoinduction

5 Énergie magnétique dans une bobine

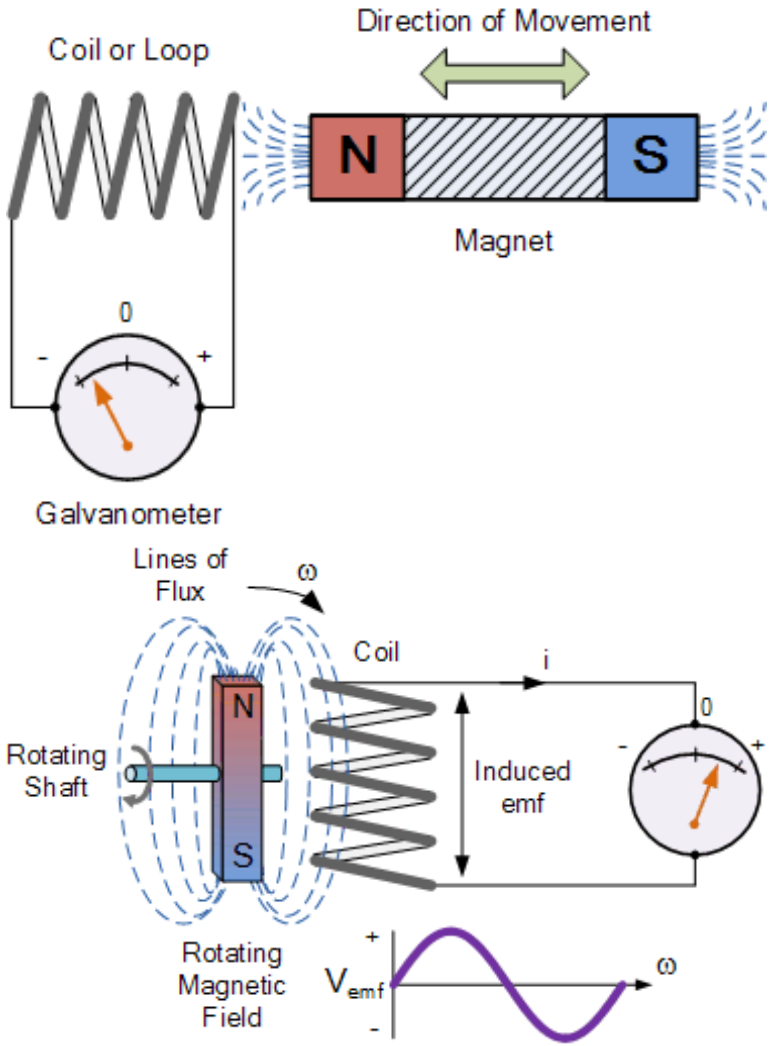
1.2. Constatations expérimentales

Expérience historique de Faraday



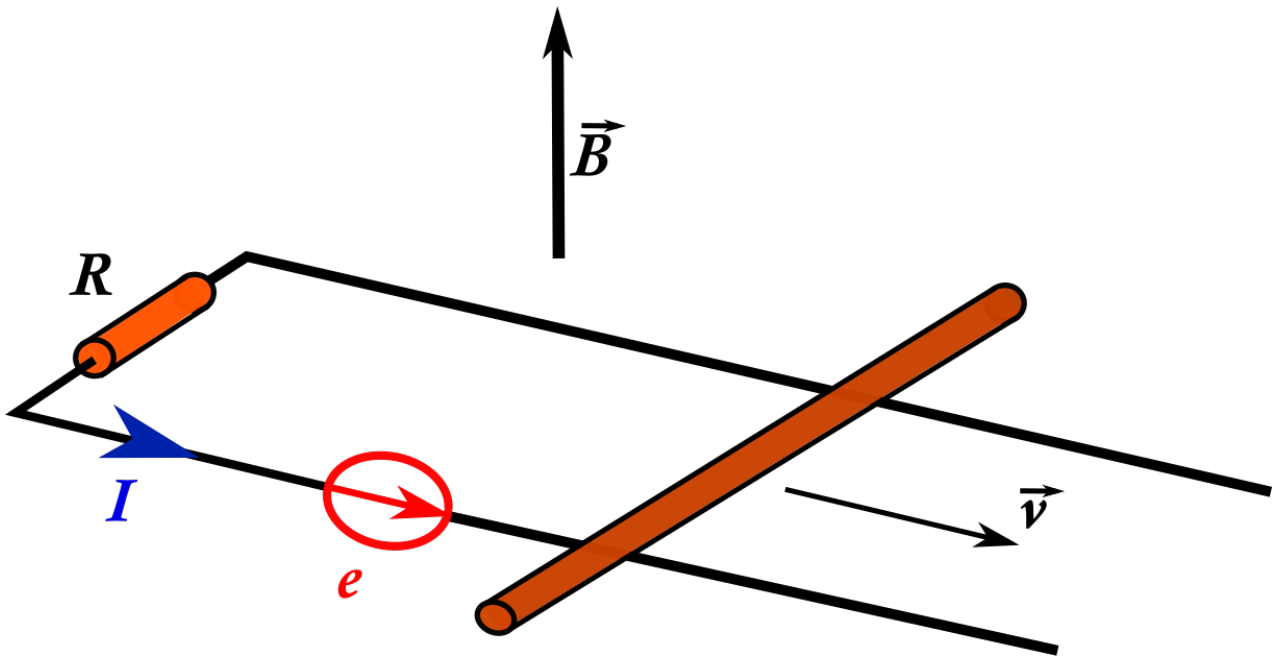
https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_induction

1.2. Constatations expérimentales



https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/electromagnetic-induction.html

Expérience des rails de Laplace



Circuit mobile

Un circuit se déplaçant dans un champ magnétique permanent peut se comporter comme un générateur de tension : *il est le siège d'un phénomène d'induction*. On parle dans ce cas d'induction de Lorentz.

Champ magnétique variable : l'alternateur

Lorsqu'un circuit fixe est soumis à un champ magnétique variable, il est encore le siège d'un phénomène d'induction. On parle alors de phénomène d'induction de Neumann.

L'induction et l'énergie magnétique

1 Introduction

2 Maxwell-Faraday en dynamique
- Loi de Faraday
- Principe de l'alternateur

3 Induction : circuit mobile dans un champ fixe

4 Autoinduction

5 Énergie magnétique dans une bobine

L'induction et l'énergie magnétique

1 Introduction

2 Maxwell-Faraday en dynamique
- Loi de Faraday
- Principe de l'alternateur

3 Induction : circuit mobile dans un champ fixe

4 Autoinduction

5 Énergie magnétique dans une bobine

2.1. Loi de Faraday

Équation de Maxwell-Faraday

$$\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}.$$

En introduisant le potentiel vecteur, l'équation de Maxwell-Faraday devient

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) = \vec{0}.$$

Donc il existe un potentiel scalaire V tel que

$$\boxed{\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}\,V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}}.$$

Calculons la circulation sur un chemin $\mathcal{C}$ fermé

$$\oint_{\mathcal{C}} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = -\underbrace{\oint_{\mathcal{C}} \overrightarrow{\mathrm{grad}}\, V \cdot \mathrm{d}\vec{l}}_{=0} - \oint_{\mathcal{C}} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = -\oint_{\mathcal{C}} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \cdot \mathrm{d}\vec{l},$$

On note ϕ le flux de champ magnétique à travers la surface Σ délimitée par le contour $\mathcal{C}$. En utilisant le théorème de Stokes, on obtient

$$\boxed{\oint_{\mathcal{C}} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = -\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}}.$$

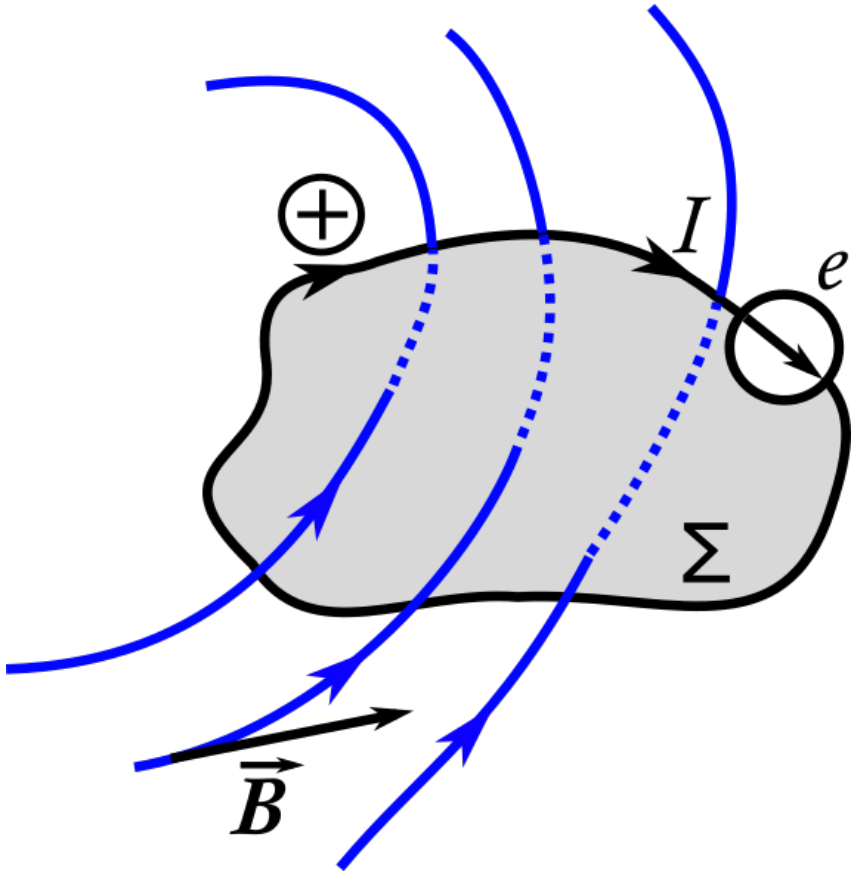
Loi de Faraday

Pour un circuit filiforme, de contour orienté $\mathcal{C}$, plongé dans un champ magnétique $\vec{B}$, on note ϕ le flux de champ magnétique à travers une surface $\mathcal{C}$ prenant pour support le contour $\mathcal{C}$. Alors, si I est le courant du circuit suivant le sens d'orientation de $\mathcal{C}$, une f.e.m. induite e, orientée dans le sens de $\mathcal{C}$ (convention générateur), apparaît suite à une variation de flux ϕ. On parle de f.e.m. induite, avec

$$\boxed{e = -\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}}.$$

Loi de Faraday

$$e = -\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}$$



L'induction et l'énergie magnétique

1 Introduction

2 Maxwell-Faraday en dynamique
- Loi de Faraday
- Principe de l'alternateur

3 Induction : circuit mobile dans un champ fixe

4 Autoinduction

5 Énergie magnétique dans une bobine

2.2. Principe de l'alternateur

On considère un aimant mis en mouvement de rotation devant une bobine : on a un flux magnétique oscillant. Soit $B_\perp$ la composante du champ normale à la surface de la bobine. On a alors

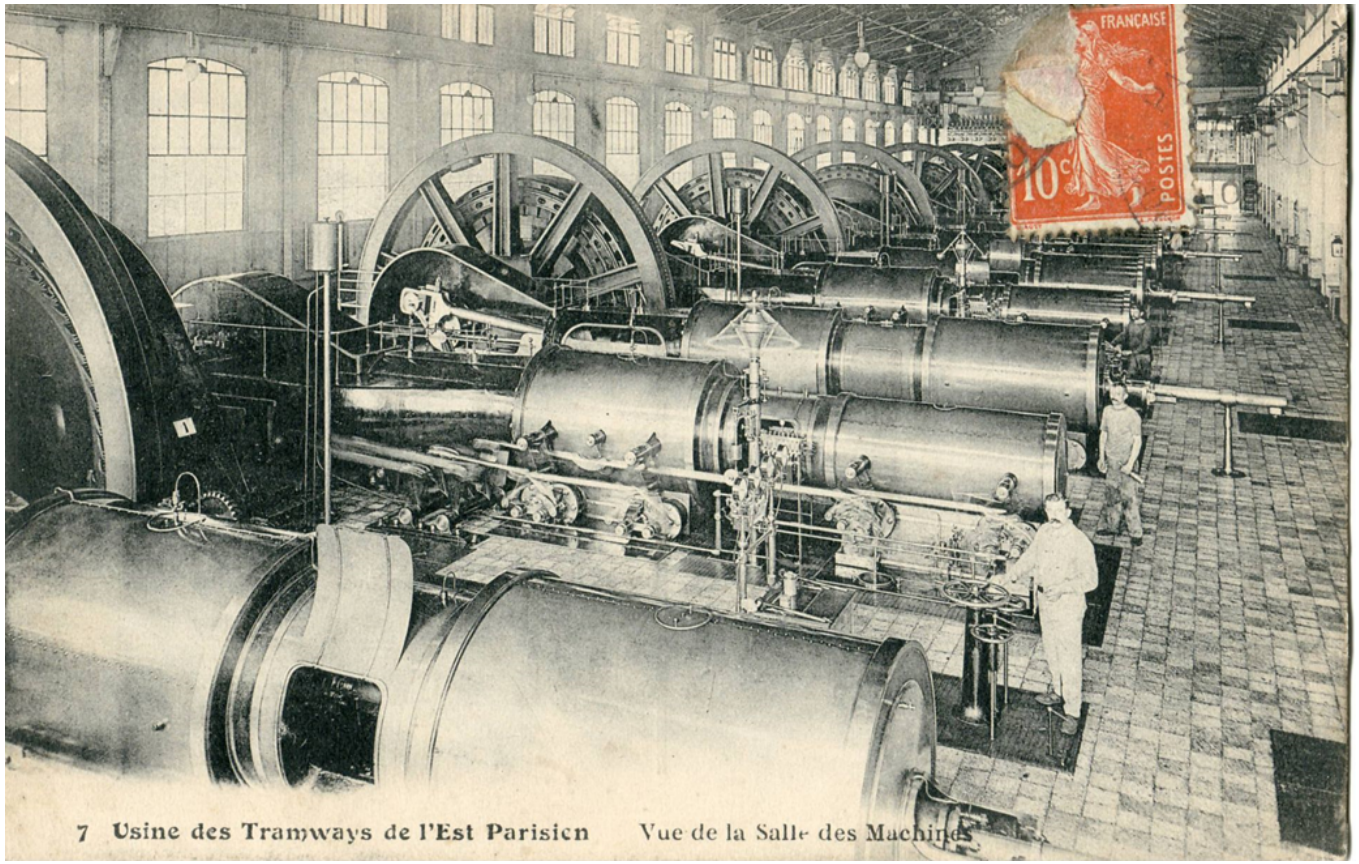
$$B_\perp = B_0 \cos \omega t.$$

La spire est un bobinage de résistance équivalente R. On a alors un courant circulant dans la bobine I selon la loi d'Ohm

$$I = \frac{e}{R} = \frac{B_0 S \omega}{R} \sin \omega t.$$

On obtient ainsi un courant alternatif à la fréquence de rotation ω. C'est le principe de base qui est à l'origine toutes les centrales de production électrique, qu'elles soient hydroélectriques, thermiques ou nucléaires.

2.2. Principe de l'alternateur



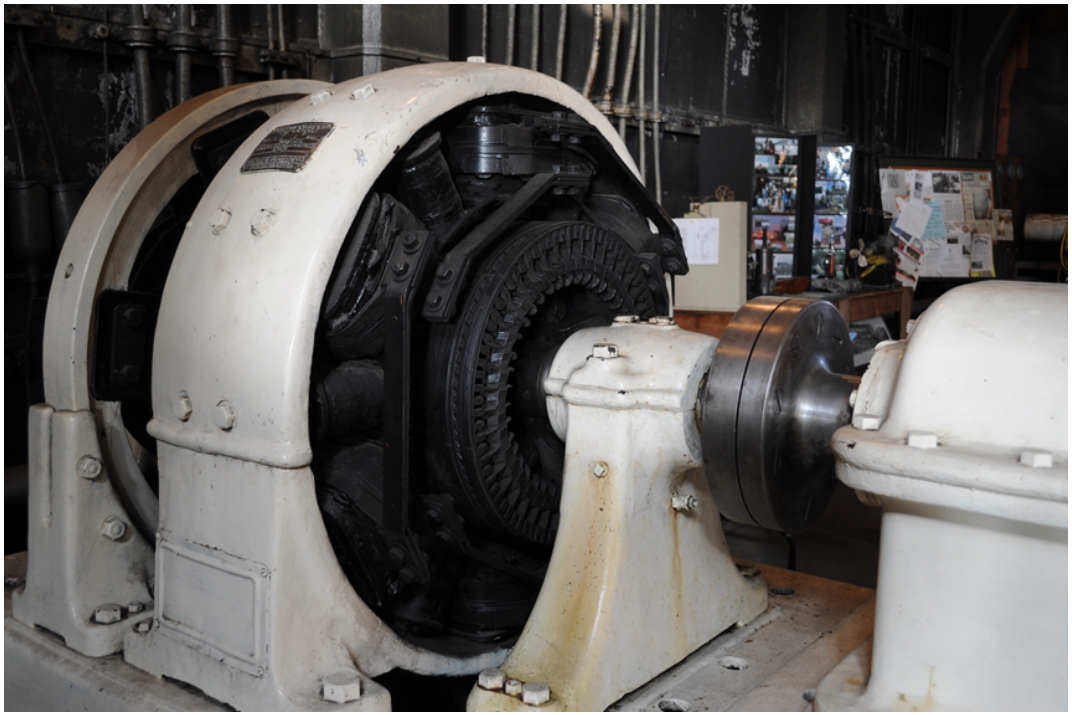
Machines à vapeur et dynamos d'une usine de production électrique de la Compagnie des tramways de l'Est parisien.

`https://fr.wikipedia.org/wiki/Dynamo`

2.2. Principe de l'alternateur

Dynamo de vélo.

`https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bicycle_dynamo.jpg`



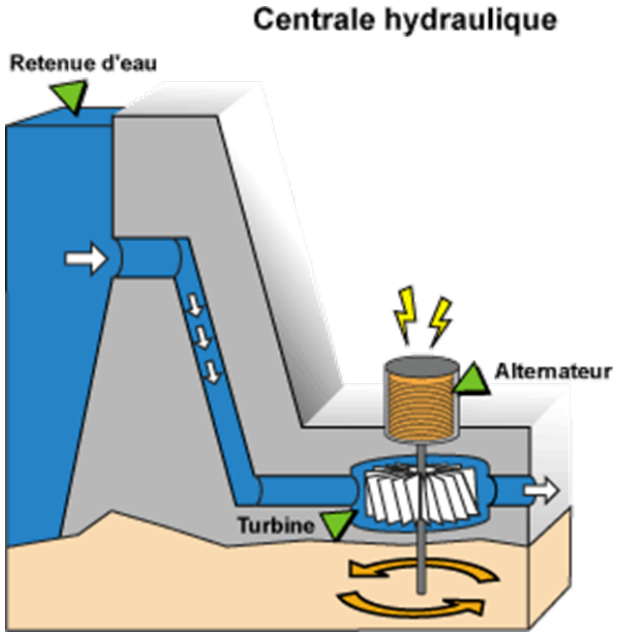
General Electric DC generator (Georgetown PowerPlant Museum, Georgetown, Seattle, Washington).

`https://fr.wikipedia.org/wiki/Générateur_électrique`

2.2. Principe de l'alternateur

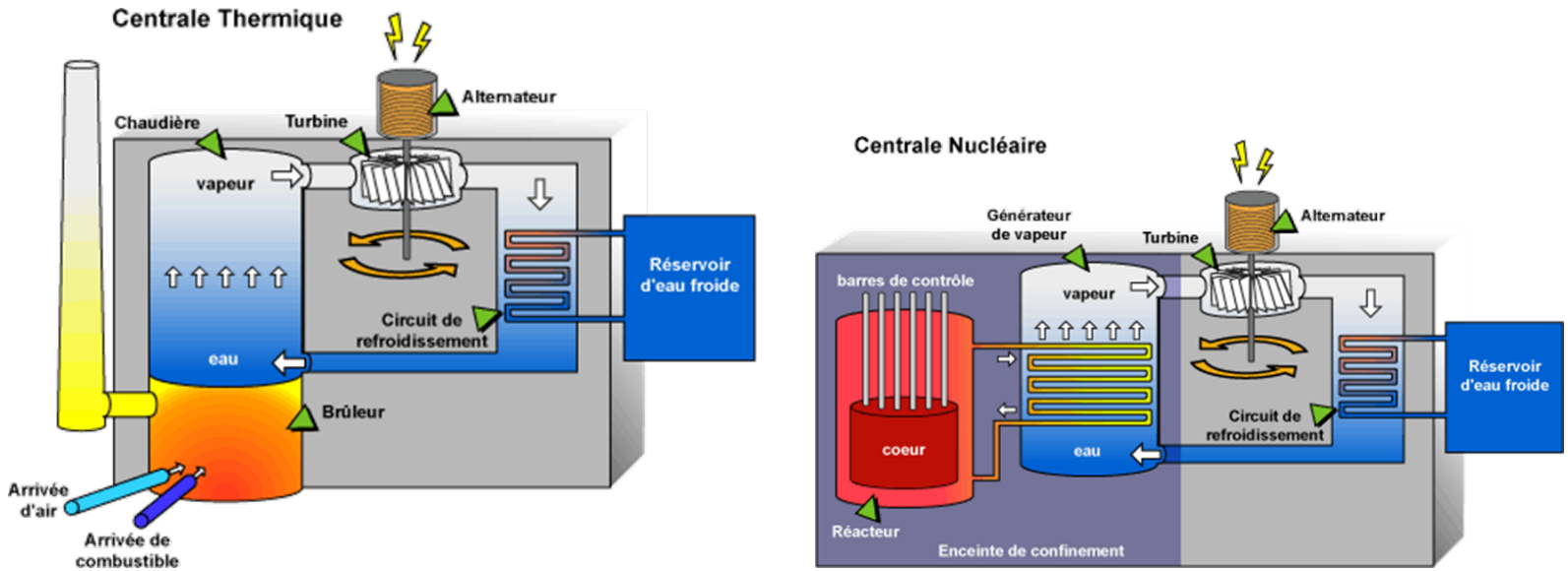
Fonctionnement d'une turbine hydroélectrique.
https://www.youtube.com/watch?v=vqbdbigU900

Rotor d'une centrale hydroélectrique.



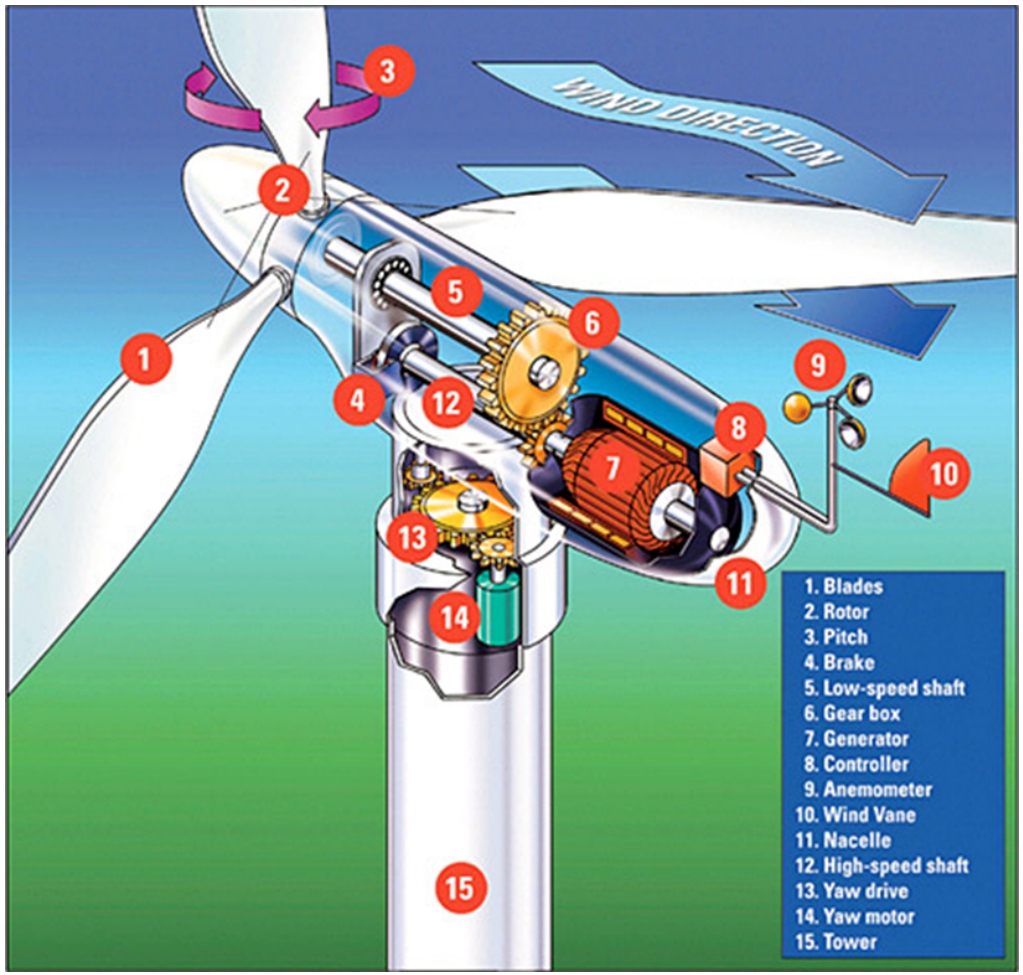
http://www.energies-services.org/page410-409-la-centrale-electrique.html

Centrale thermique et centrale nucléaire.



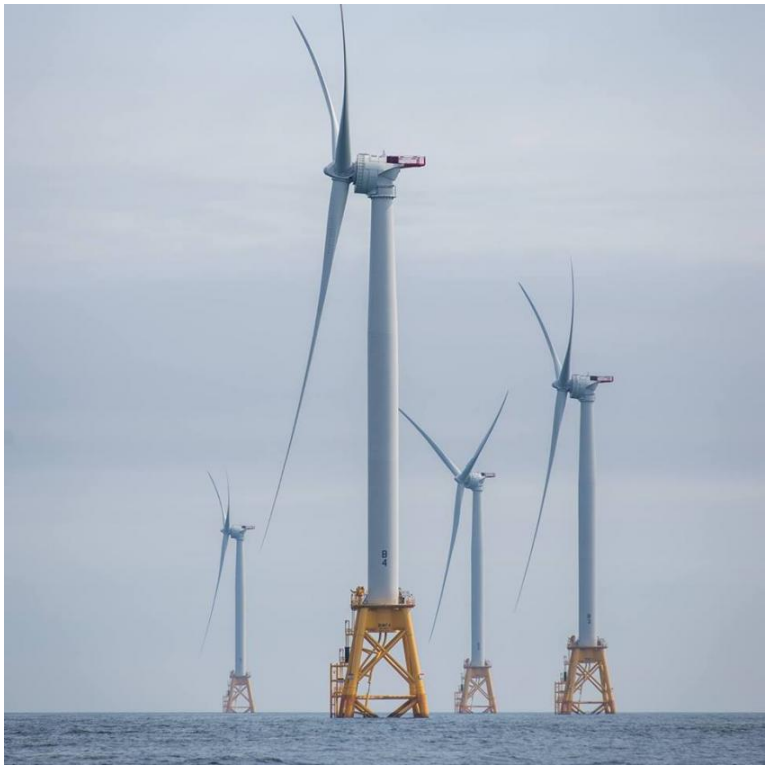
http://www.energies-services.org/page410-409-la-centrale-electrique.html

Éolienne.



https://sites.google.com/site/kaufmanwindenergy/background-information-on-wind-turbines

2.2. Principe de l'alternateur



Quatre des cinq éoliennes offshore du parc éolien de Block Island, premier parc éolien offshore des États-Unis. Il est situé à 6 km de l'île de Block Island, au large de l'état du Rhode Island. Composé de 5 turbines développant 30 MW, le parc a été mis en service en décembre 2016.

©Deepwater Wind
https://www.meretmarine.com/fr/content/ge-montoir-livre-les-premieres-turbines-du-champ-allemand-merkur
https://fr.wikipedia.org/wiki/Parc_%C3%A9olien_de_Block_Island

2.2. Principe de l'alternateur

Usine d'assemblage de la nacelle de l'Haliade-X 12 MW (General Electric Renewable Energy), l'éolienne offshore qui devrait être la plus puissante au monde (site de Montoir-de-Bretagne).

©GE
https://www.usinenouvelle.com/article/ge-fait-tourner-l-offshore-francais.N401227

2.2. Principe de l'alternateur

General Electric (GE) Renewable Energy a dévoilé le 22 juillet 2019 la nacelle de son Haliade-X, l'éolienne offshore qui devrait être la plus puissante au monde (12 MW).

©GE
https://www.usinenouvelle.com/article/video-a-la-decouverte-de-l-eolienne-offshore-haliade-x-futur-geant-des-mers-concu-en-f N868725

2.2. Principe de l'alternateur

Lots de nacelles livrés pour le projet Merkur (novembre 2017). Le projet Merkur a pour but de développer un parc éolien Merkur de 396 MW, constitué de 66 éoliennes offshore à 45 km au nord de l'île allemande de Borkum, en mer du Nord. Une production de 1 750 GWh est attendue (de quoi alimenter 500 000 foyers).

©GE
https://www.meretmarine.com/fr/content/ge-montoir-livre-les-premieres-turbines-du-champ-allemand-merkur
https://www.deme-group.com/news/merkur-project-confirms-financial-close?lang=fr

2.2. Principe de l'alternateur

Embarquement d'une nacelle destinée au projet Merkur.

©GE
https://www.meretmarine.com/fr/content/
ge-montoir-livre-les-premieres-turbines-du-champ-allemand-merkur

2.2. Principe de l'alternateur

Transport de l'hélice de 67m du rotor (décembre 2020).

P. Adams Schwertransporte
https://www.linkedin.com/posts/p-adams-schwertransporte_finishing-the-year-with-a-set-of-67m-rotor-activity-6749570622407360512-1AyD/

2.2. Principe de l'alternateur

Transport de l'hélice de 67m du rotor (décembre 2020).

P. Adams Schwertransporte
https://www.linkedin.com/posts/p-adams-schwertransporte_finishing-the-year-with-a-set-of-67m-rotor-activity-6749570622407360512-1AyD/

L'induction et l'énergie magnétique

1 Introduction

2 Maxwell-Faraday en dynamique

3 Induction : circuit mobile dans un champ fixe
- Force exercée sur un circuit mobile dans un champ fixe
- Travail des forces de Laplace

4 Autoinduction

5 Énergie magnétique dans une bobine

L'induction et l'énergie magnétique

1 Introduction

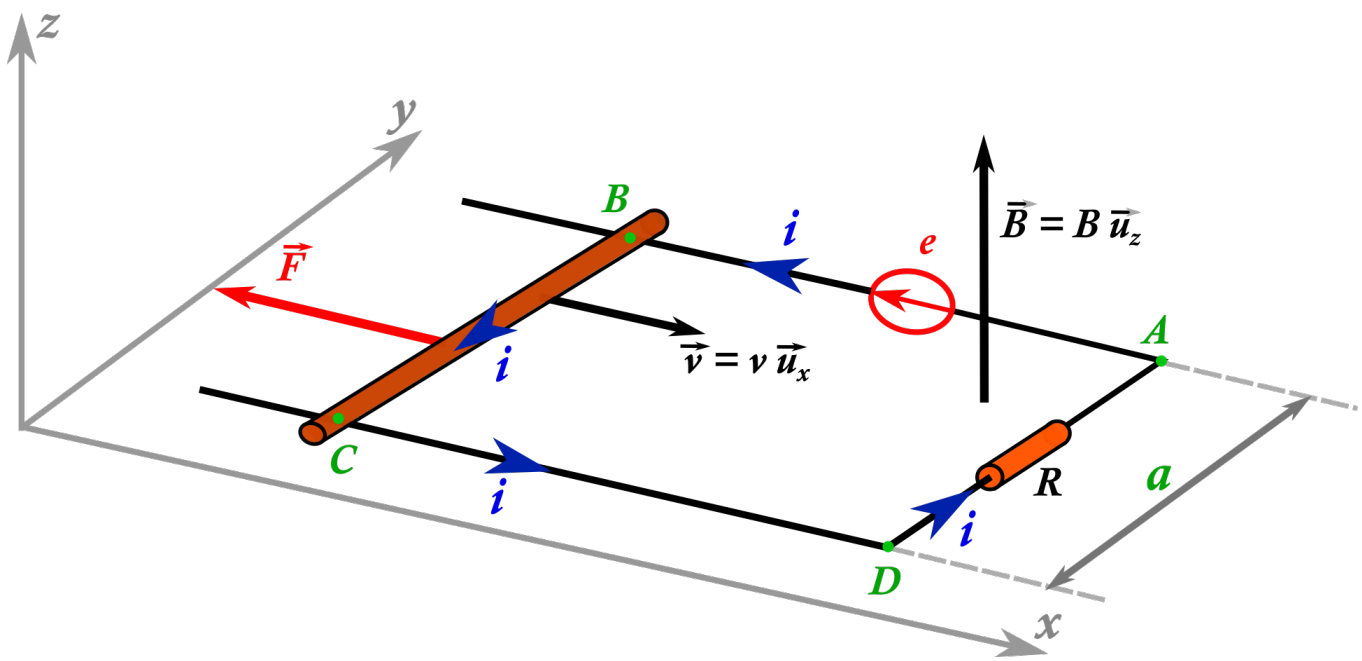
2 Maxwell-Faraday en dynamique

3 Induction : circuit mobile dans un champ fixe
- Force exercée sur un circuit mobile dans un champ fixe
- Travail des forces de Laplace

4 Autoinduction

5 Énergie magnétique dans une bobine

3.1. Force exercée sur un circuit mobile dans un champ fixe

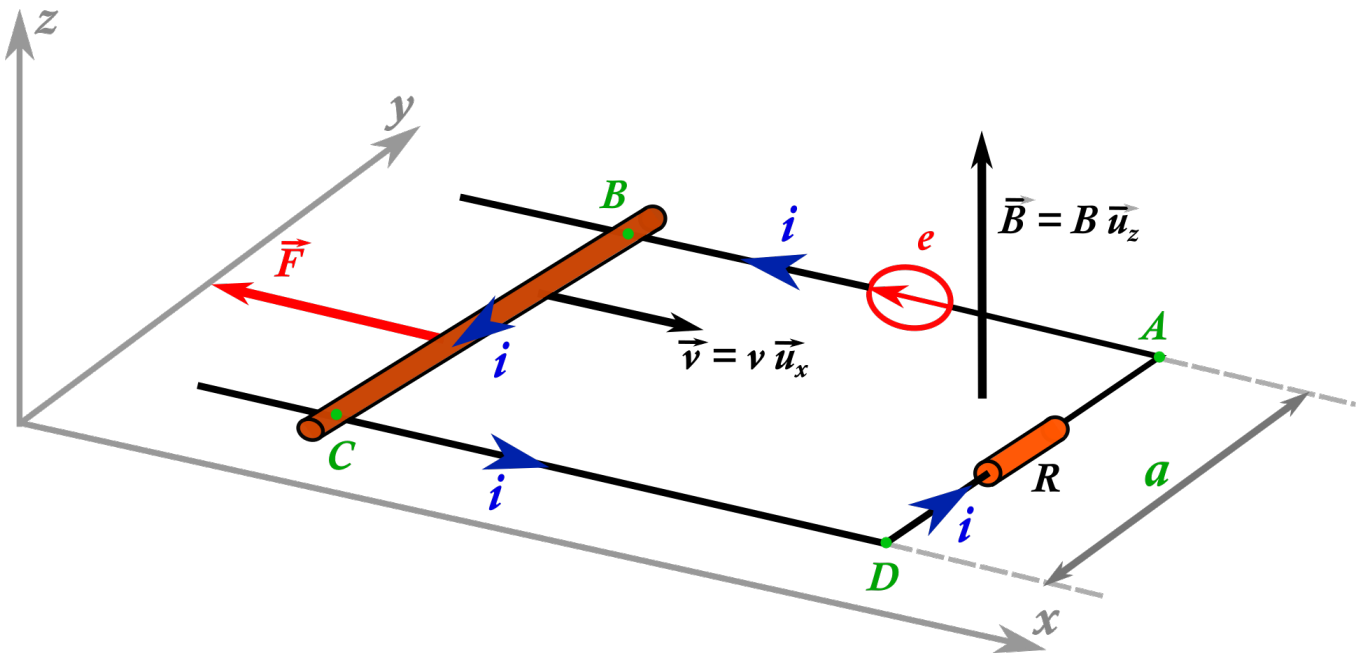


On considère la géométrie des rails de Laplace. Le barreau se déplace à la vitesse v, maintenue constante par un opérateur extérieur.

Avec les conventions utilisées

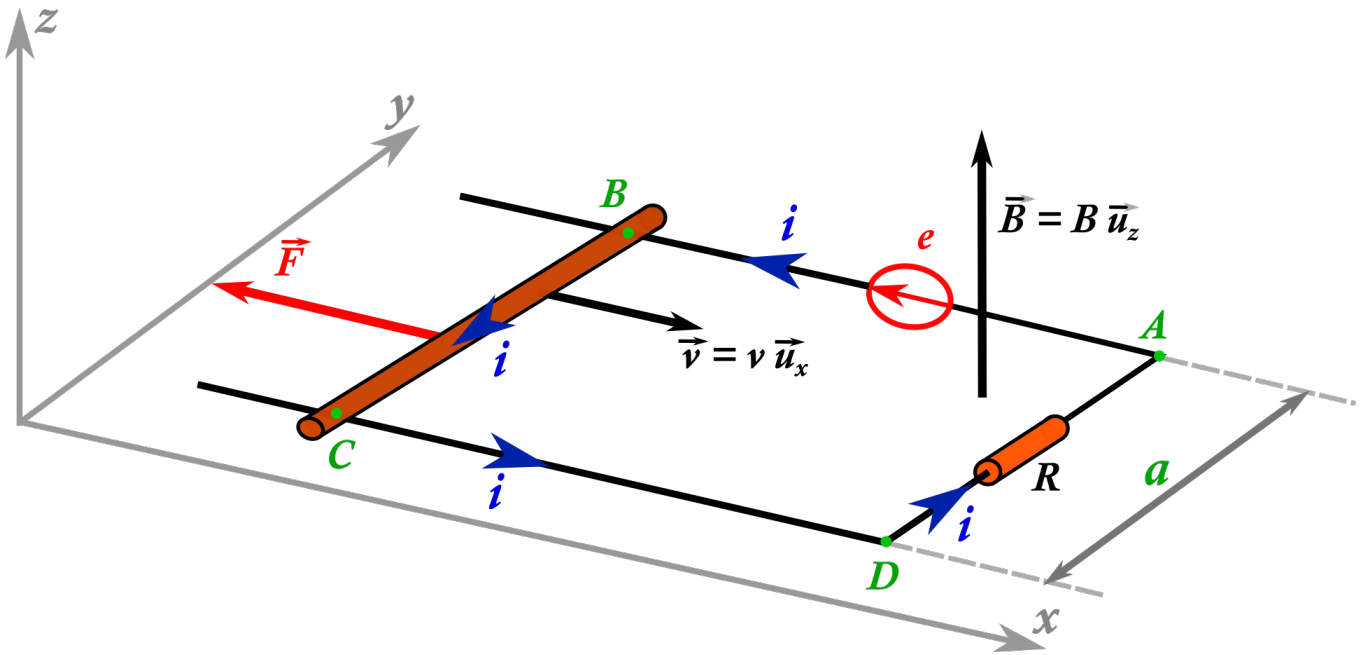
$$\phi = BS = Ba\,(l - vt) \Rightarrow e = Bav.$$

3.1. Force exercée sur un circuit mobile dans un champ fixe



La f.e.m. induite $e > 0$ génère un courant $i > 0$ dans le circuit résistif et donc une force de Laplace sur la barre BC. On calcule alors la force totale

$$\vec{F} = \int_B^C i \mathrm{d}\vec{l} \wedge \vec{B},$$



soit

$$\boxed{\vec{F} = -iaB\vec{u}_x}.$$

La force est opposée à la vitesse de déplacement.

L'induction et l'énergie magnétique

1 Introduction

2 Maxwell-Faraday en dynamique

3 Induction : circuit mobile dans un champ fixe
- Force exercée sur un circuit mobile dans un champ fixe
- Travail des forces de Laplace

4 Autoinduction

5 Énergie magnétique dans une bobine

Loi de Lenz

Le courant induit a un sens tel que le flux induit qu'il crée s'oppose aux variations du flux inducteur.

Pour une transformation quasistatique de déplacement du rail, l'opérateur doit exercer une force

$$\vec{F}_{\text{op}} = -\vec{F},$$

et le travail correspondant

$$\delta W_{\text{op}} = \vec{F}_{\text{op}} \cdot \vec{v} \mathrm{d}t,$$

de puissance mécanique

$$\mathcal{P}_{\text{op}} = \vec{F}_{\text{op}} \cdot \vec{v} > 0.$$

D'où

$$\mathcal{P}_{\text{op}} = Biav = \frac{B^2 a^2 v^2}{R}.$$

Cette puissance est directement utilisée dans le circuit électrique, de puissance $\mathcal{P}_{\text{élec}} = ei$. D'où le bilan d'énergie suivant

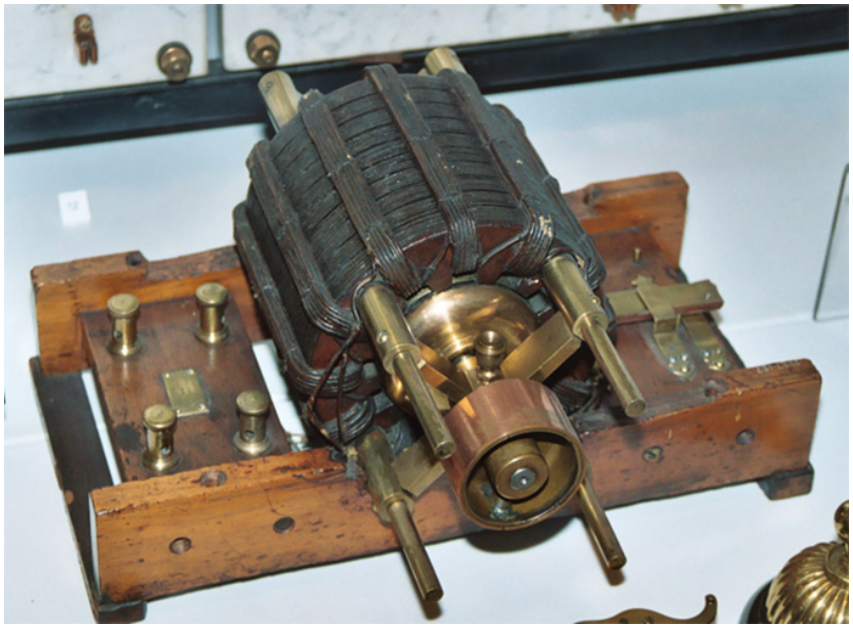
$$\mathcal{P}_{\text{élec}} = ei = \frac{e^2}{R} = \frac{B^2 a^2 v^2}{R} = \mathcal{P}_{\text{op}}.$$

3.2. Travail des forces de Laplace

La force s'oppose au mouvement, l'opérateur doit "forcer" pour déplacer le barreau. Ainsi, l'énergie déployée mécaniquement est transformée en énergie électrique : on a une **conversion d'énergie électromécanique.**

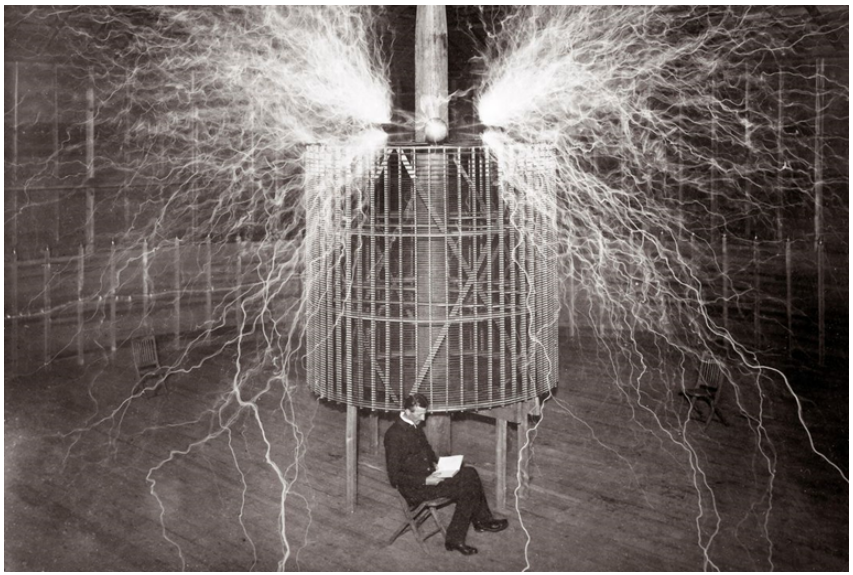
Dans ce modèle simple, le rendement est de 100%. Dans les machines électromécaniques réelles, de nombreux phénomènes limitent le rendement : pertes cuivre, pertes fer, fuites de flux magnétique, etc...

3.2. Travail des forces de Laplace



Moteur asynchrone développé par Nikola Tesla (Tesla Museum, Belgrade).

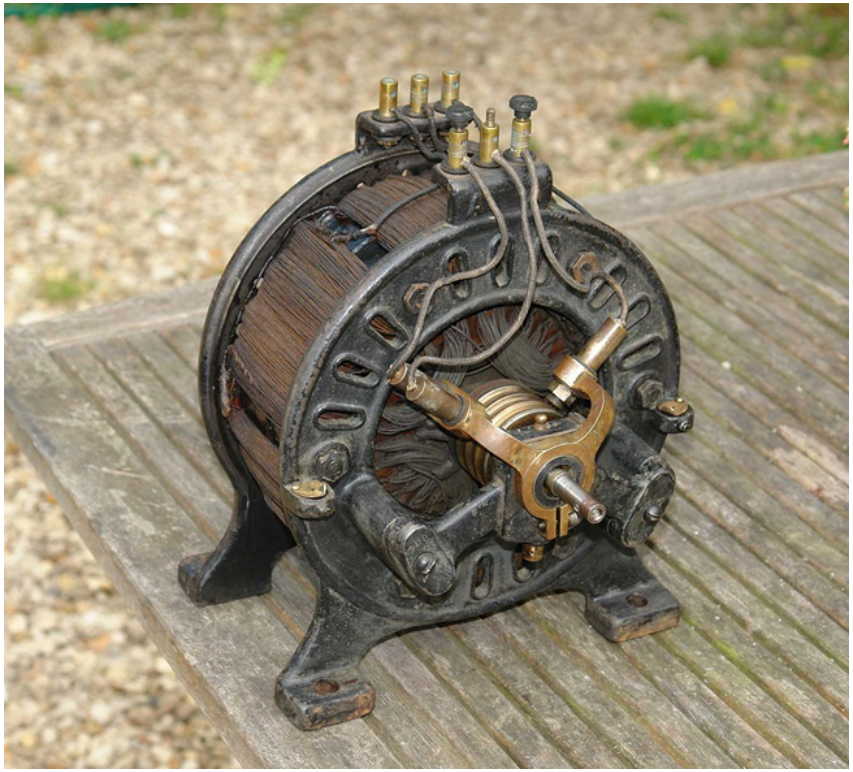
https://www.teslasociety.com/hall_of_fame.htm



Nikola Tesla (Tesla Museum, Belgrade).

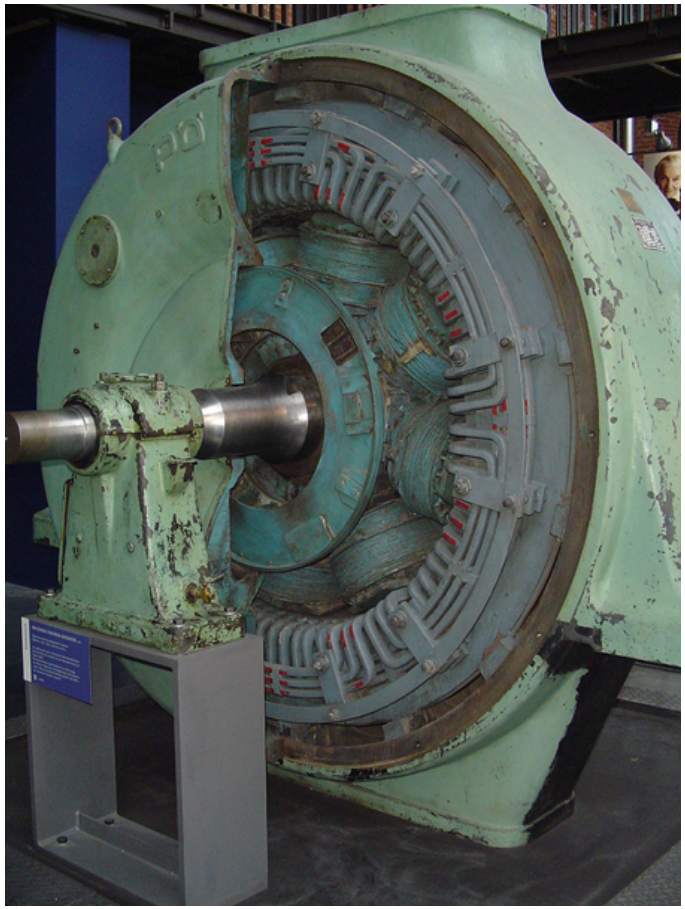
https://www.history.com/news/nikola-tesla-files-declassified-fbi

3.2. Travail des forces de Laplace



Moteur asynchrone (1910).

https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_électrique



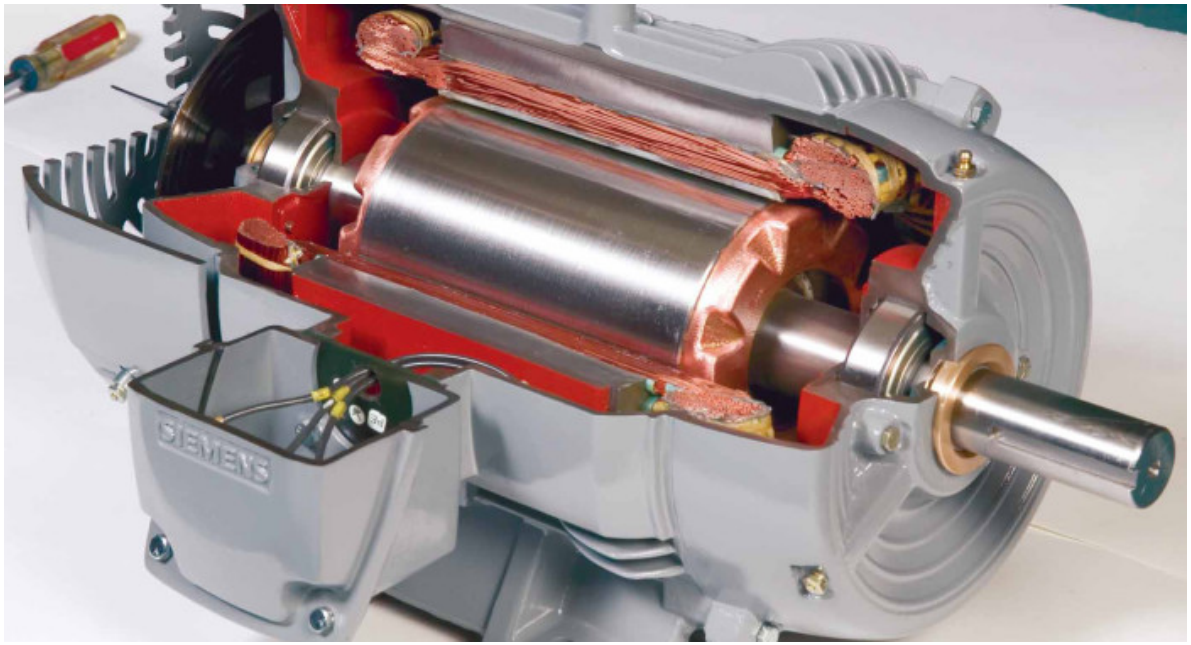
Moteur asynchrone (1920).

2 000 kVA.

http://www.electrosup.com/machine_electrique.php

3.2. Travail des forces de Laplace

Moteur asynchrone moderne.

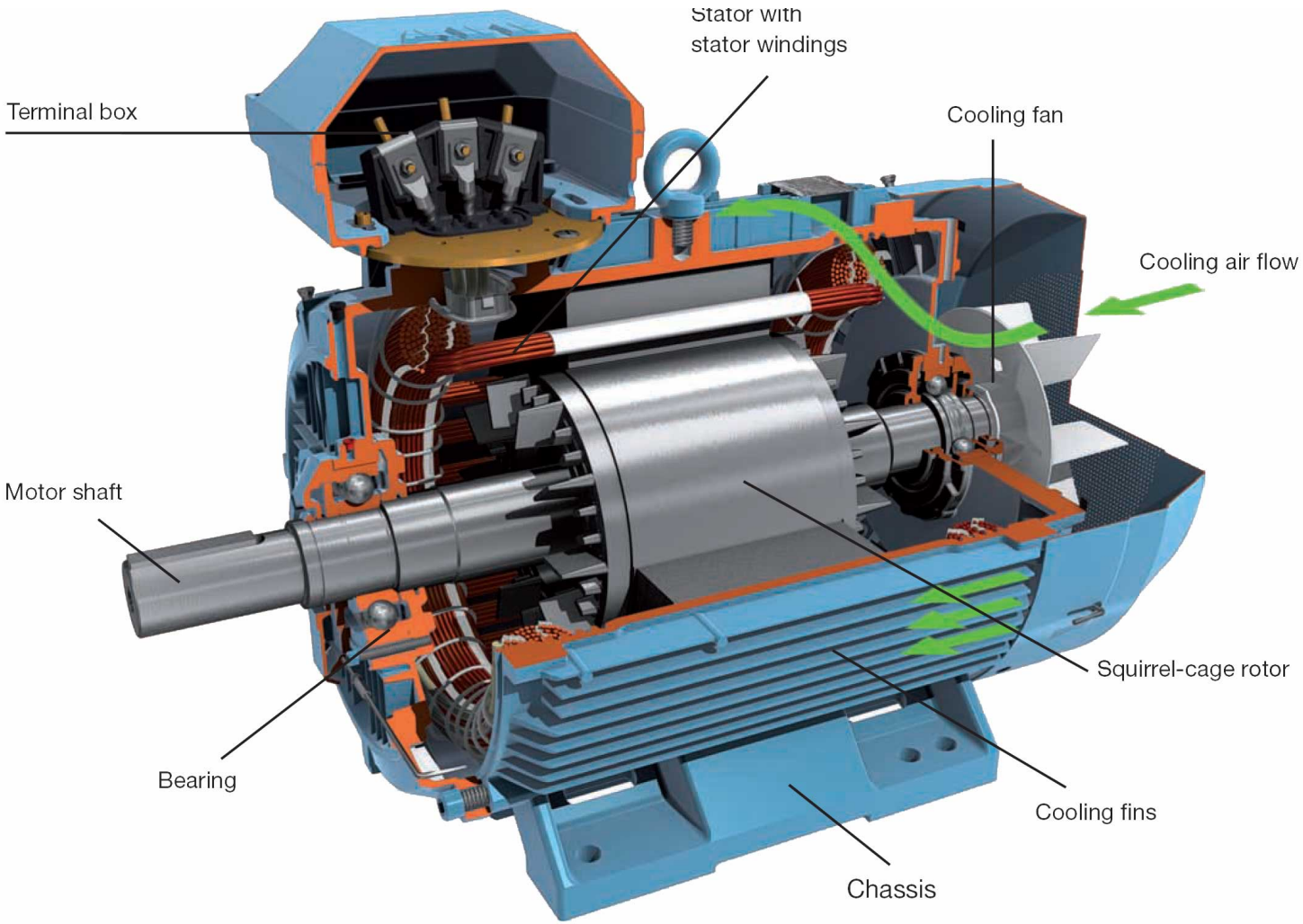


Vue éclatée d'un moteur asynchrone.

https://www.copper.org/environment/sustainable-energy/electric-motors/case-studies/a6141.html

https://wonderfulengineering.com/download-electrical-motor-images-free-here/

3.2. Travail des forces de Laplace



http://www.trielectricinternational.com/Home/Spare_Parts_for_Motors

3.2. Travail des forces de Laplace

Rame de TGV duplex.

3.2. Travail des forces de Laplace

Rame de TGV duplex.

3.2. Travail des forces de Laplace

Bogie de MF 67. JPO Atelier de Bobigny 24/05/2008.
https://fr.wikipedia.org/wiki/MF_67

L'induction et l'énergie magnétique

1 Introduction

2 Maxwell-Faraday en dynamique

3 Induction : circuit mobile dans un champ fixe

4 Autoinduction

5 Énergie magnétique dans une bobine

4. Autoinduction

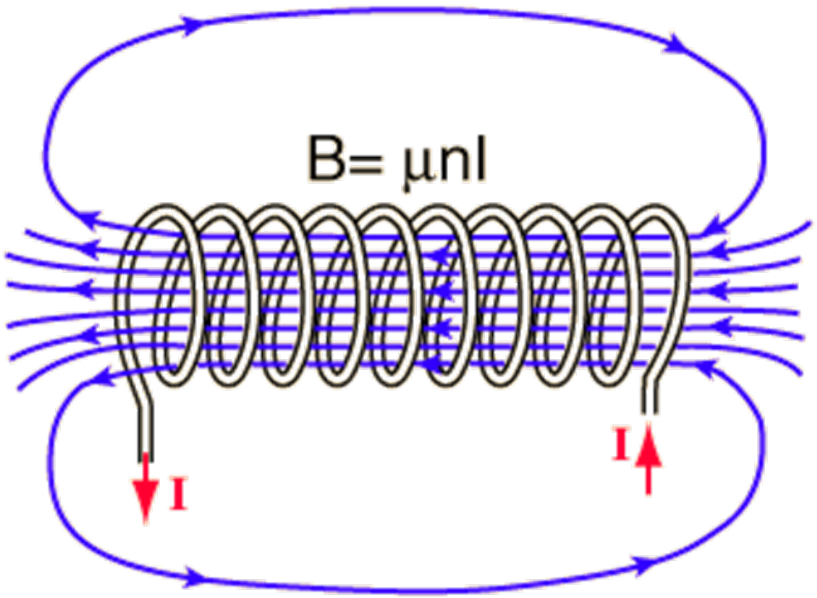
On considère une spire parcourue par un courant i, générant un champ magnétique $\vec{B}$. Ce champ magnétique génère un flux ϕ à travers la spire, proportionnel à B et donc à i. La relation entre le flux et le courant est linéaire, définissant l'autoinductance du circuit

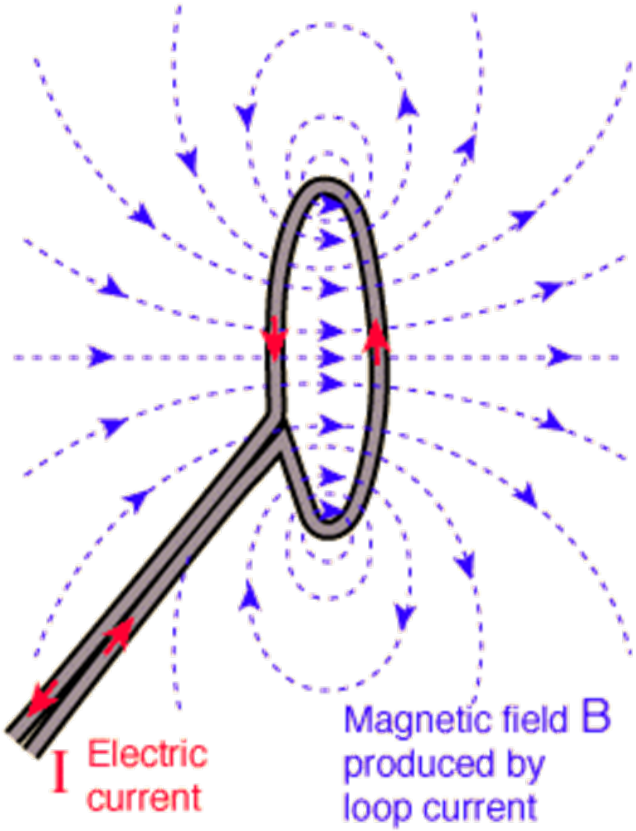
$$\boxed{L = \frac{\phi}{i}}.$$

Il s'agit de l'équivalent de la capacité en électrostatique

$$C = \frac{Q}{V}.$$

Exemple : calcul de l'auto-inductance d'un solénoïde





http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/curloo.html
http://hydrogen.physik.uni-wuppertal.de/hyperphysics/hyperphysics/hbase/magnetic/solenoid.html

Exemple : calcul de l'auto-inductance d'un solénoïde

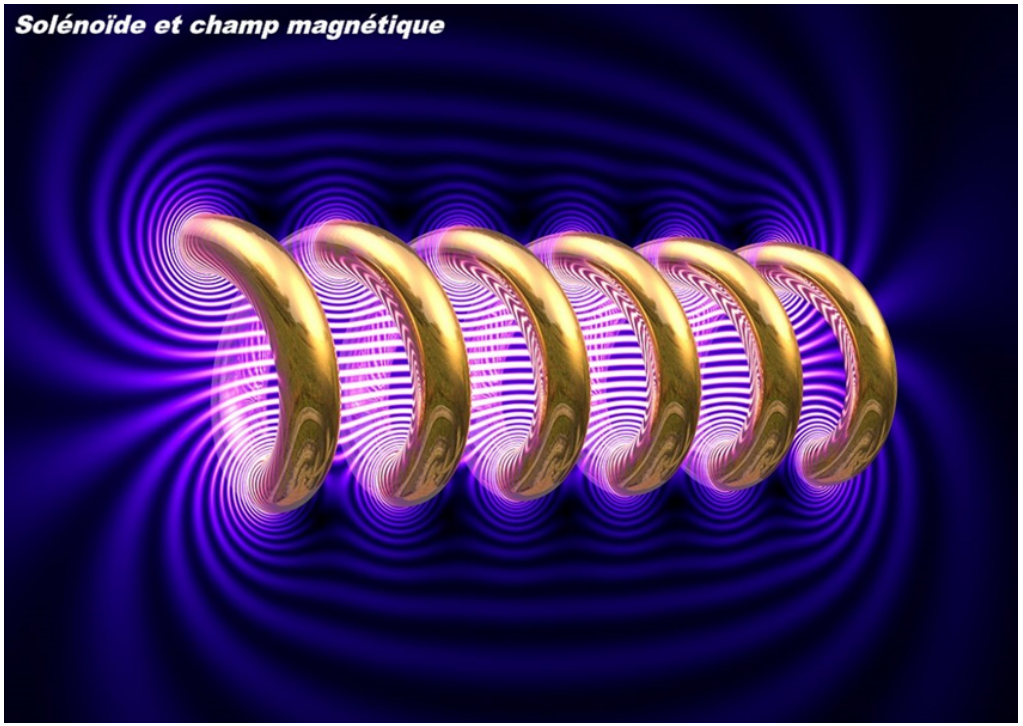


Image : Paul Nylander.

`http://bugman123.com/Physics/index.html`.

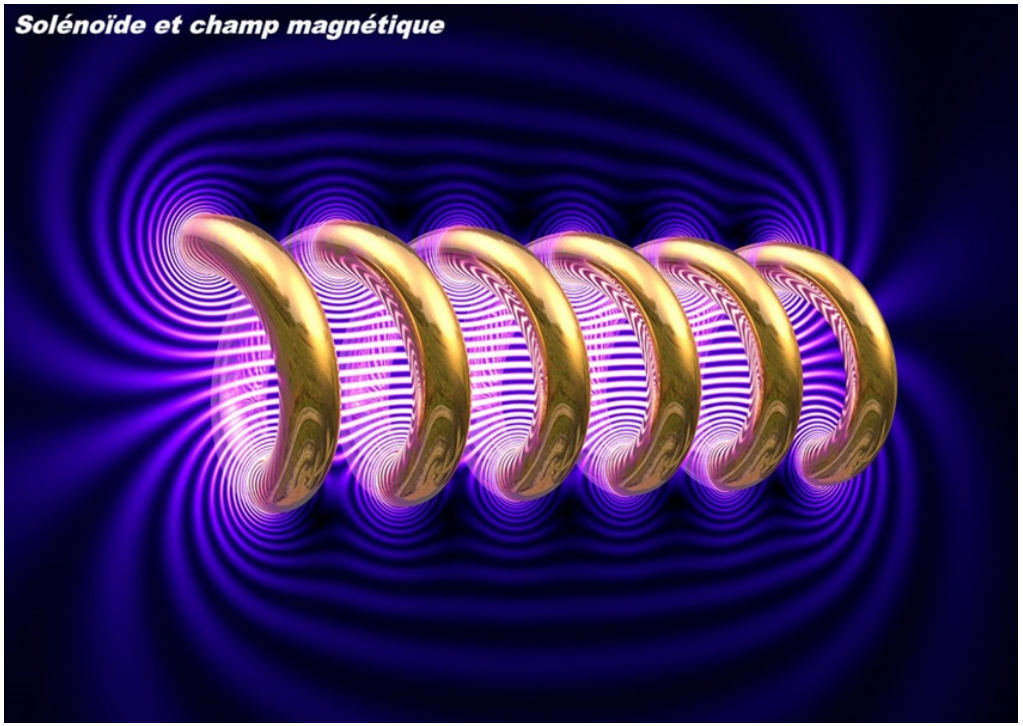
Approximation du solénoïde infini : le champ B à l'intérieur est homogène

$$B = \mu_0 ni.$$

Pour un solénoïde de longueur l, de section S, le flux magnétique total ϕ à travers le solénoïde vaut

$$\phi = BnlS = \mu_0 n^2 lSi.$$

Exemple : calcul de l'auto-inductance d'un solénoïde



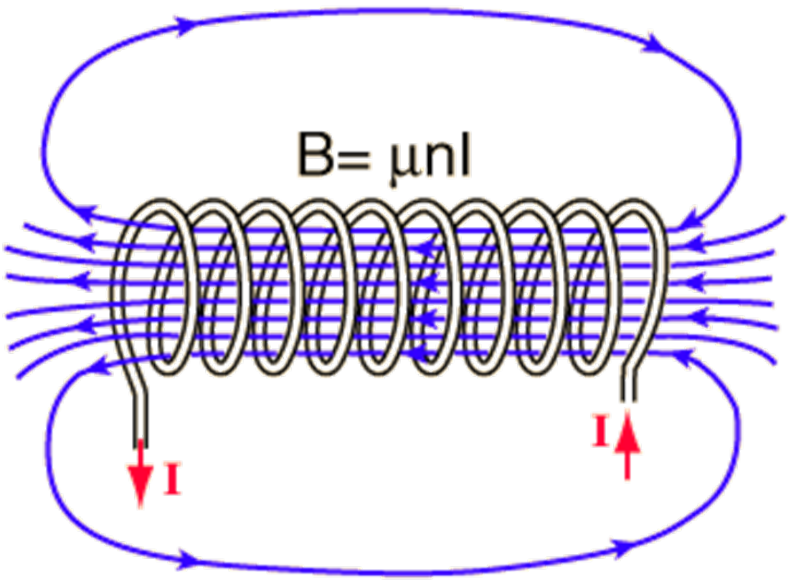
On obtient alors le coefficient d'auto-induction d'un solénoïde de densité linéique de spires n, de longueur l et de section S

$$\boxed{L = \mu_0 n^2 l S}.$$

Image : Paul Nylander.

`http://bugman123.com/Physics/index.html`.

Exemple : calcul de l'auto-inductance d'un solénoïde
Désormais on se place en convention récepteur du point de vue électrique pour la bobine. Ainsi, le sens positif du flux est défini par le sens positif du courant.



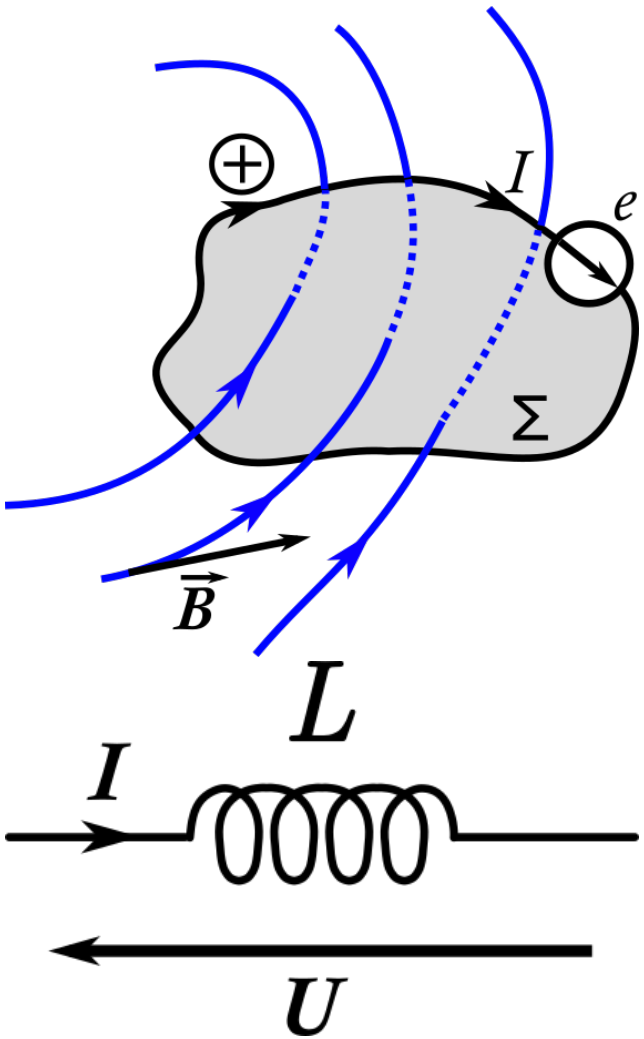
Alors

$$\phi = BS = Li.$$

Et d'après la loi de Faraday, une f.e.m. est induite aux bornes de la spire, **en convention générateur**, selon

$$e = -\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t} = -L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}.$$

Exemple : calcul de l'auto-inductance d'un solénoïde



Soit U la tension aux bornes de la bobine **en convention récepteur** : $U = -e$, soit

$$\boxed{U = L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}}.$$

On retrouve le relation entre tension et courant aux bornes d'une bobine en convention récepteur.

L'induction et l'énergie magnétique

1 Introduction

2 Maxwell-Faraday en dynamique

3 Induction : circuit mobile dans un champ fixe

4 Autoinduction

5 Énergie magnétique dans une bobine

5. Énergie magnétique dans une bobine

Pour calculer l'énergie magnétique d'autoinduction dans une bobine, on considère la transformation suivante

$$\begin{array}{ccc} \text{Etat initial} & & \text{Etat final} \\ i = 0 & \Longrightarrow & i = i_0 \\ \phi = 0 & & \phi = \phi_0 \end{array}$$

On considère un état intermédiaire (i, ϕ) de la transformation. Un opérateur augmente le courant de δi en exerçant un travail δW avec un générateur de f.e.m. U pendant δt. On a alors

$$\delta W = iU\delta t = Li\delta i.$$

Le travail total de l'opérateur W lors de la transformation s'exprime alors selon

$$W = \int_{i=0}^{i=i_0} Li\delta i = \frac{1}{2}Li_0^2.$$

5. Énergie magnétique dans une bobine

On obtient ainsi l'énergie magnétique E_{mag} emmagasinée par une bobine parcourue par un courant i_0 selon

$$\boxed{E_{\text{mag}} = \frac{1}{2} L i_0^2}.$$

Exemple : cas d'un solénoïde.
On considère une bobine de densité linéïque de spire n, de longueur l et de section S, parcourue par un courant i_0. On a alors une énergie magnétique E selon

$$E = \frac{1}{2} L i_0^2 = \frac{B^2}{2\mu_0} V,$$

où V est le volume de l'espace où règne un champ magnétique B.

5. Énergie magnétique dans une bobine

Ainsi, l'énergie magnétique est localisée là où il existe un champ magnétique, sous la forme d'une densité volumique d'énergie magnétique e_{mag}

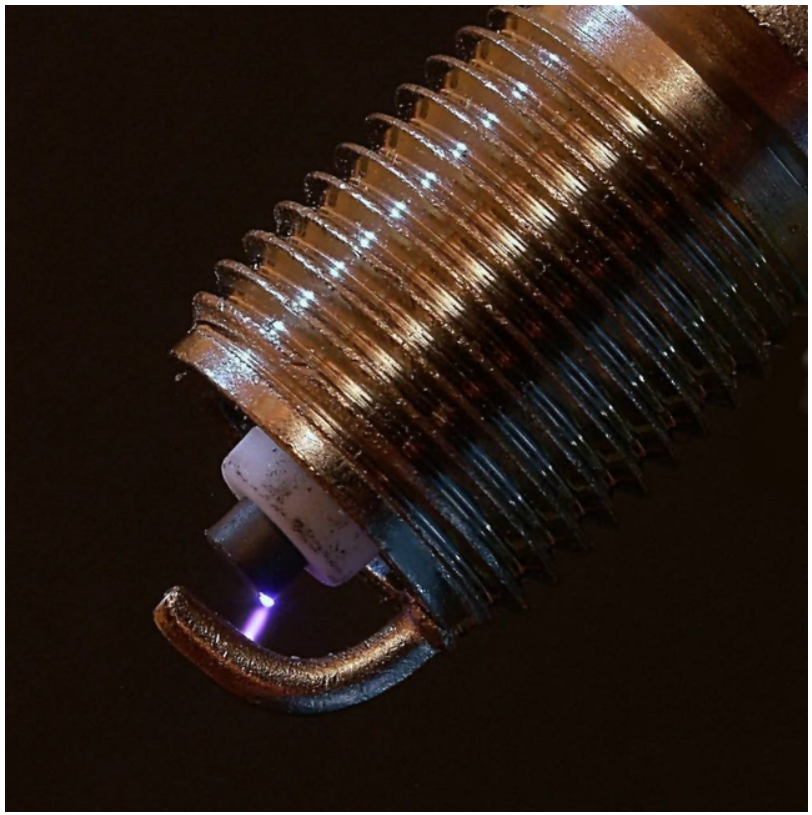
$$\boxed{e_{\text{mag}} = \frac{B^2}{2\mu_0}}.$$

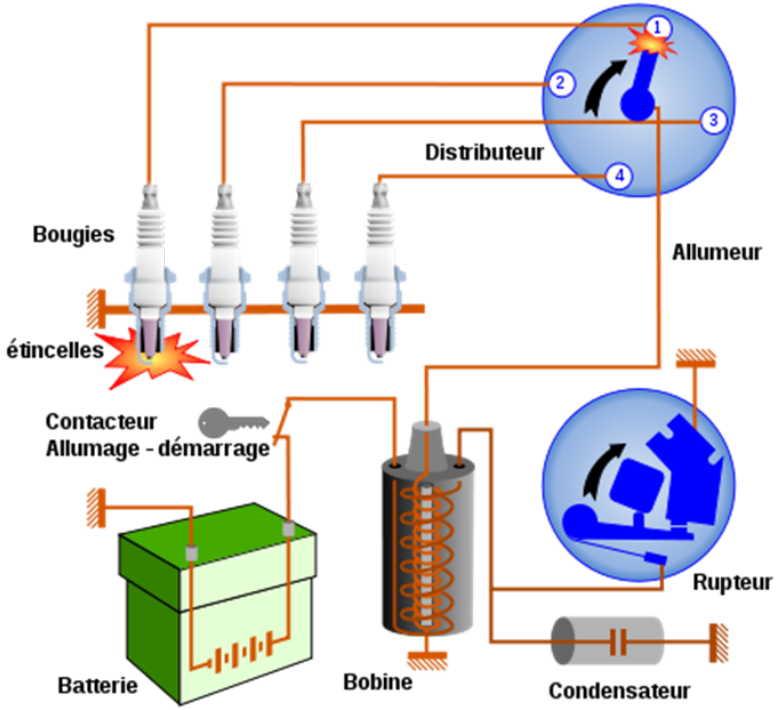
Remarque : on peut effectuer le même raisonnement en électrostatique dans le cas d'un condensateur plan infini et montrer que la densité d'énergie électrostatique $e_{\text{élec}}$ peut se mettre sous la forme

$$\boxed{e_{\text{élec}} = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2}}.$$

Applications : bougies d'allumage des moteurs thermiques, le haut-parleur, le microphone, le moulage par induction électromagnétique, les plaques à inductions, etc ...

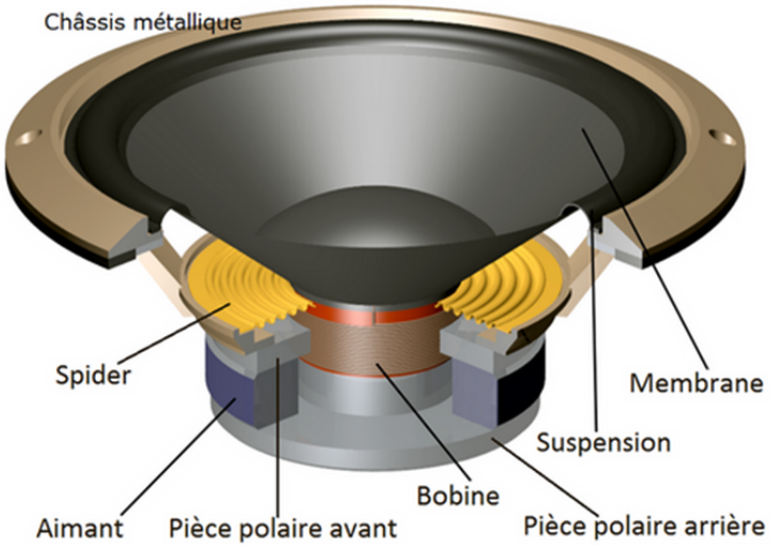
Application : bougies d'allumage des moteurs thermiques

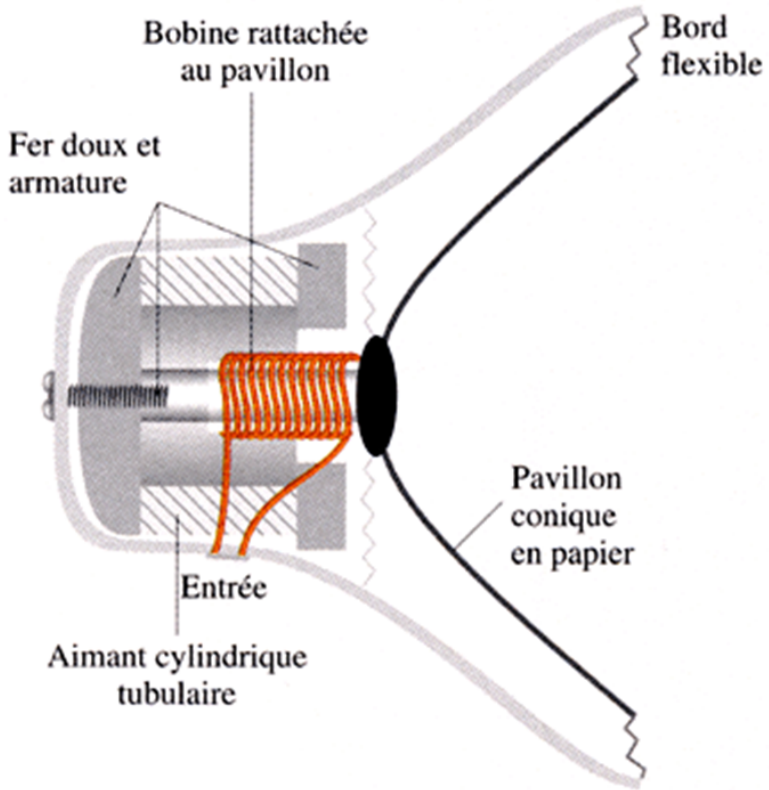




https://fr.wikipedia.org/wiki/Bougie_d'allumage
https://fr.wikipedia.org/wiki/Allumage

Application : le haut-parleur





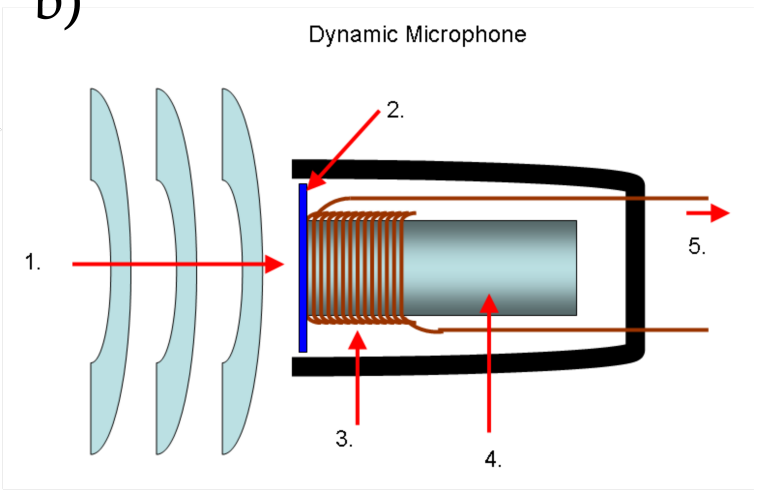
Complément : les microphones

Application : les microphones

Les microphones électrodynamiques.

a)

b)



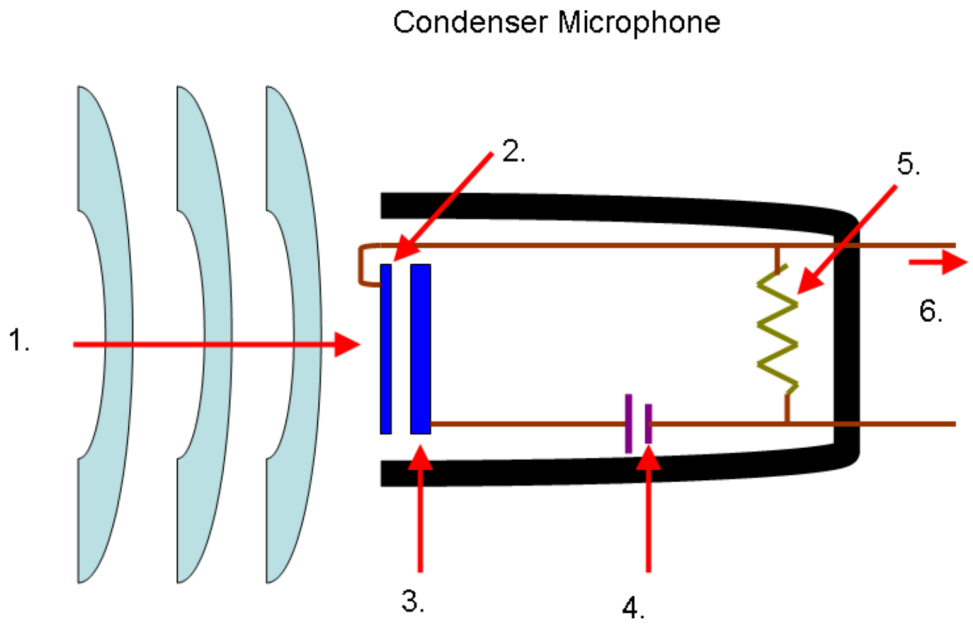
a) Le microphone dynamique à main Shure SM58. b) Schéma de principe d'un microphone électrodynamique. 1. Onde sonore incidente. 2. Membrane mobile. 3. Bobine solidaire de la membrane mobile. 4. Aimant permanent. 5. Signal électrique induit par le mouvement de la bobine.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Shure_SM58.jpg
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mic-dynamic.PNG

Complément : les microphones

Application : les microphones

Les microphones électrostatiques.



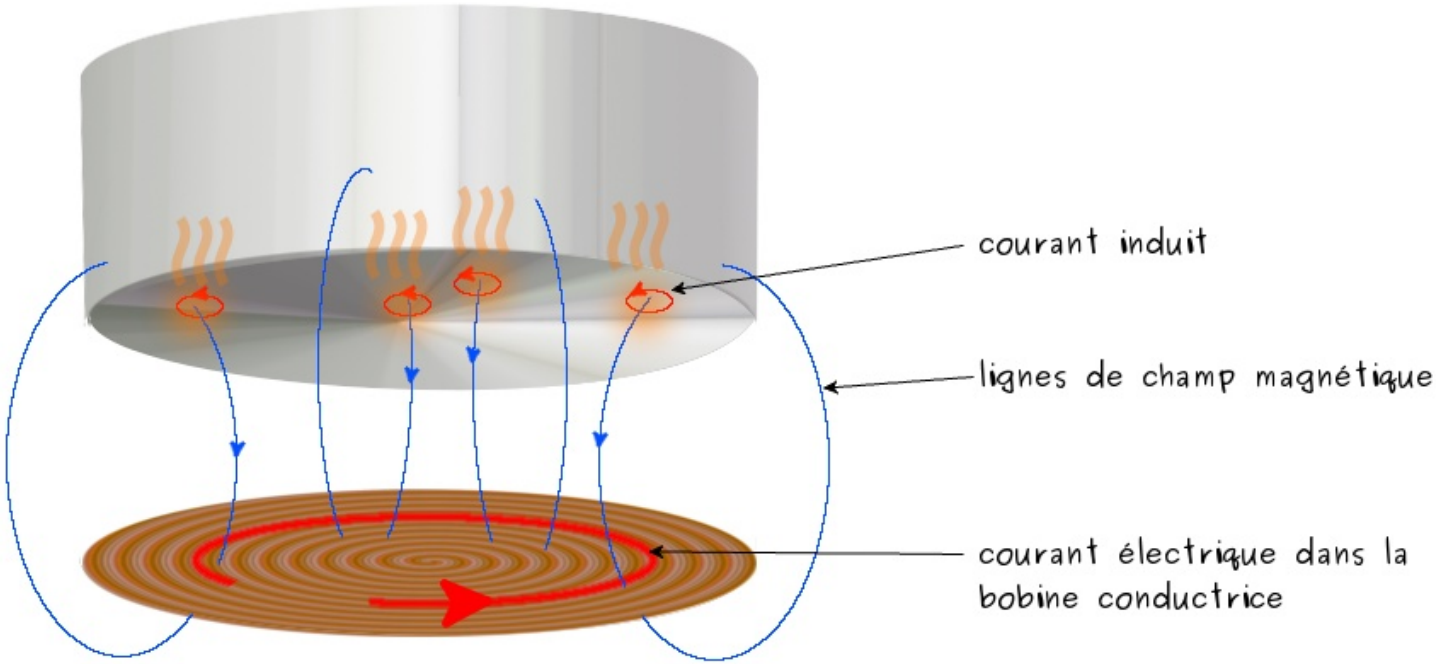
Principe de fonctionnement d'un microphone électrostatique. 1. Onde sonore incidente. 2. Membrane mobile. 3. Armature arrière. 4. Alimentation. 5. Résistance. 6. Signal électrique.

`https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mic-condenser.PNG`

Application : échauffement par induction

https://www.youtube.com/watch?time_continue=2&v=k4xsqw463Hs

Application : plaques de cuisson à induction



https://couleur-science.eu/?d=23d1bf--comment-fonctionnent-les-plaques-a-induction

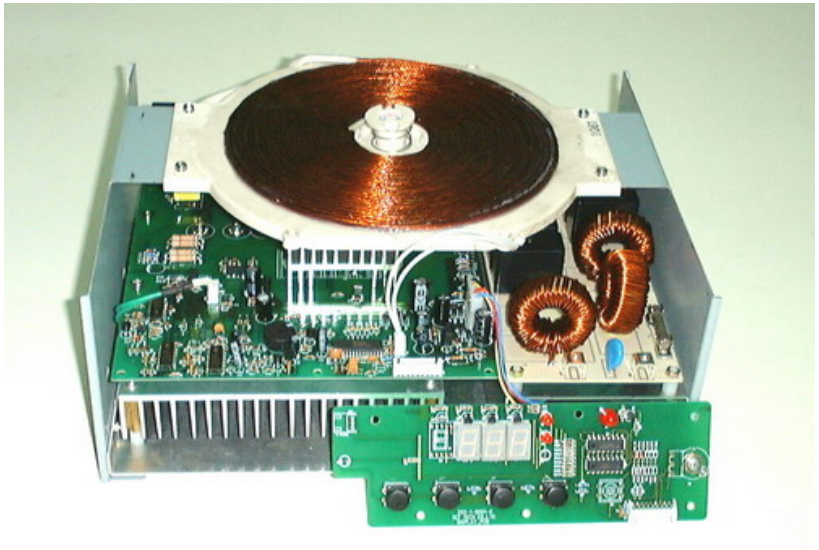
Complément : plaques de cuisson à induction

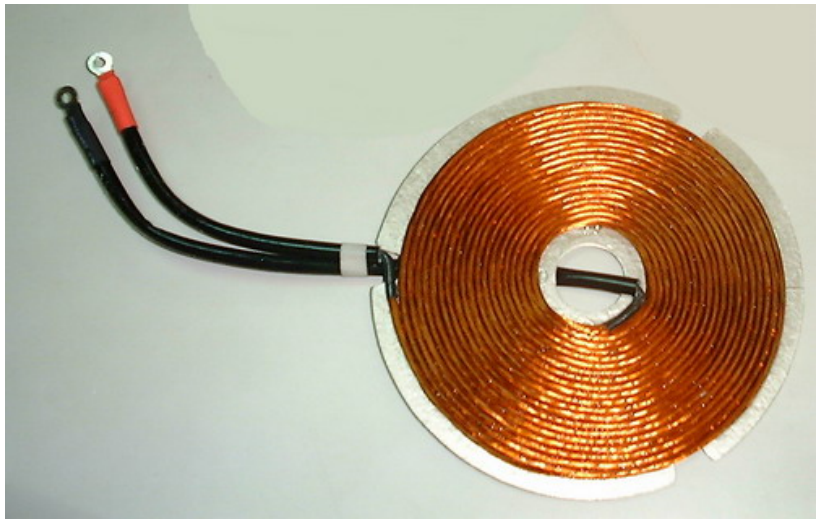
Application : plaques de cuisson à induction

https://couleur-science.eu/?d=23d1bf--comment-fonctionnent-les-plaques-a-induction

Complément : plaques de cuisson à induction

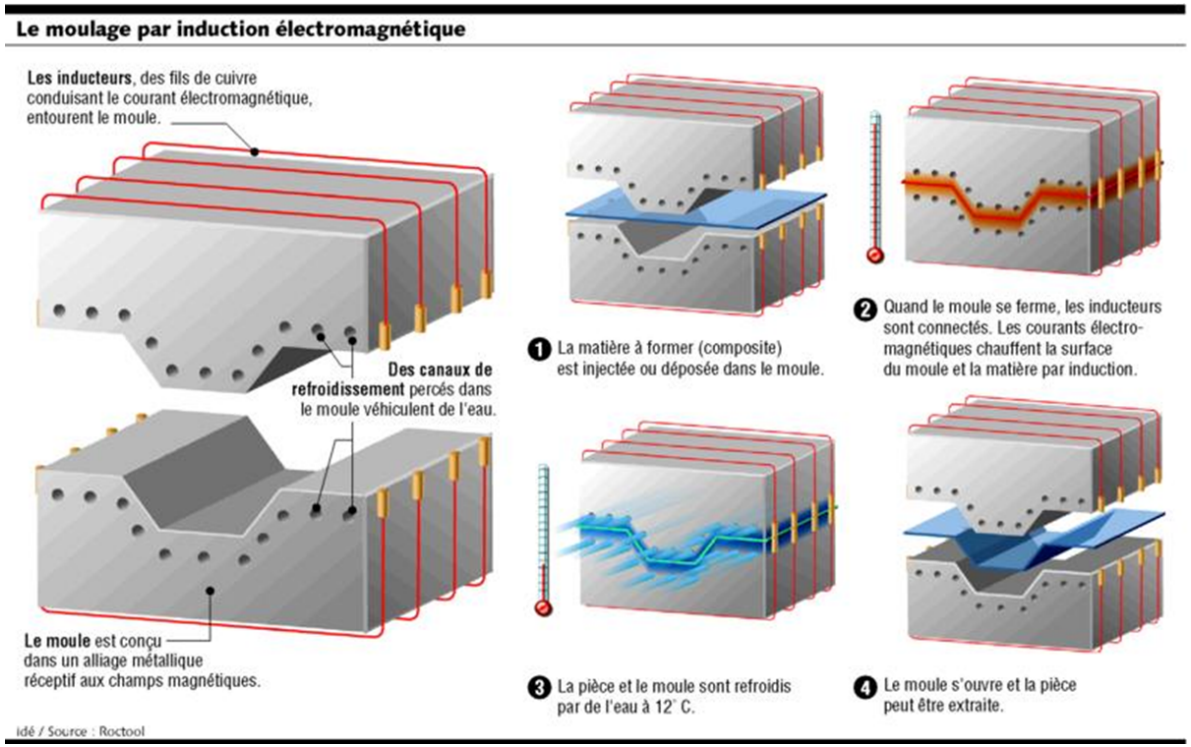
Application : plaques de cuisson à induction





https://en.sef.com.tw/index_down.php?CAhs=defuse&II=8&CA=4&sele=shop

Application : moulage par induction électromagnétique



Des pièces en composites à une vitesse record, Les Echos (7 juin 2006)

`https://www.lesechos.fr/2006/06/des-pieces-en-composites-a-une-vitesse-record-572601`

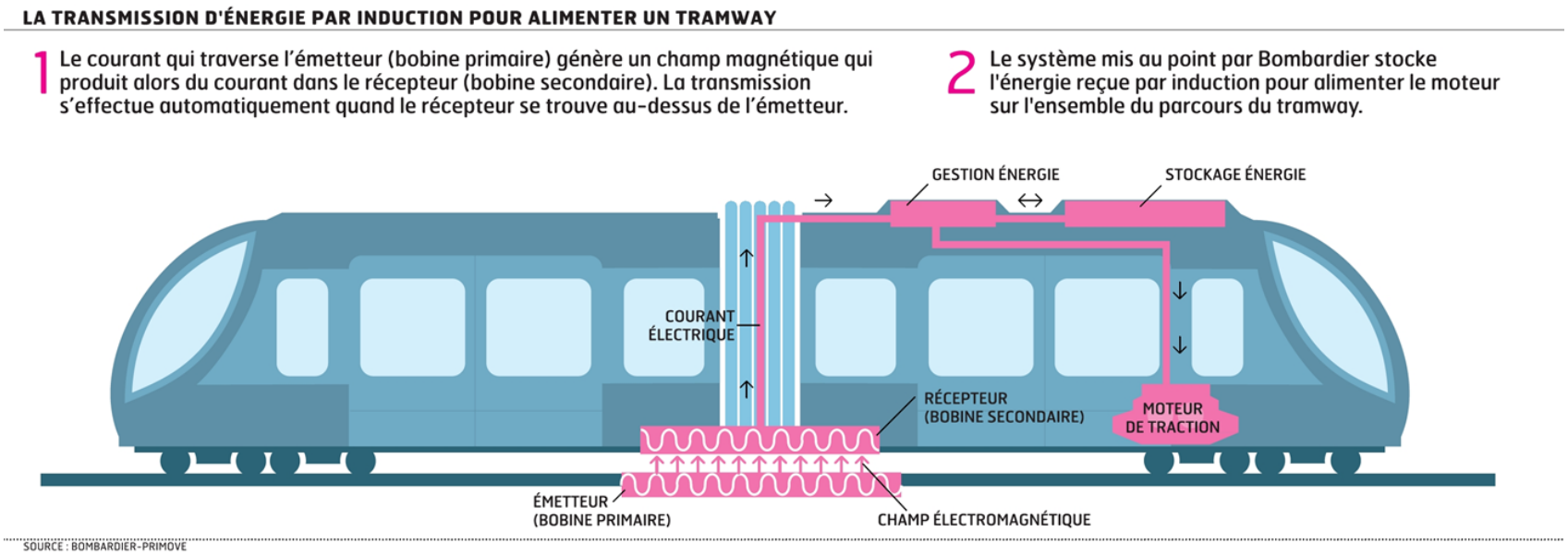
Complément : transfert d'énergie électrique sans contact

Application : transfert d'énergie électrique sans contact

Station de recherche sans fil pour téléphone portable Nexus 4.

`https://www.frandroid.com/dossiers/136322_dossier-la-technologie-sans-fil-qi`

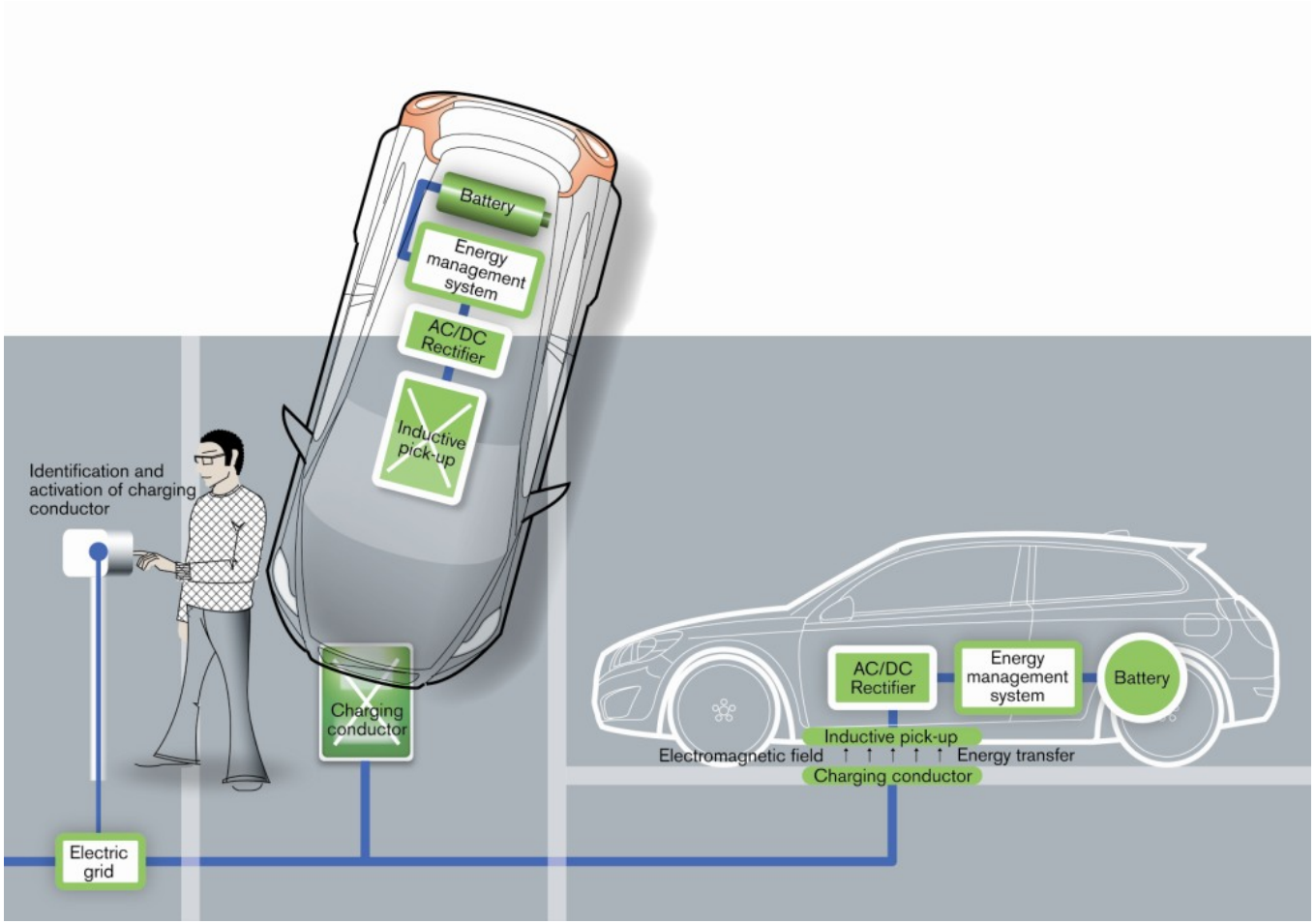
Application : transfert d'énergie électrique sans contact



L'électricité sans fil arrive dans les transports, Les Echos (19 juin 2012)

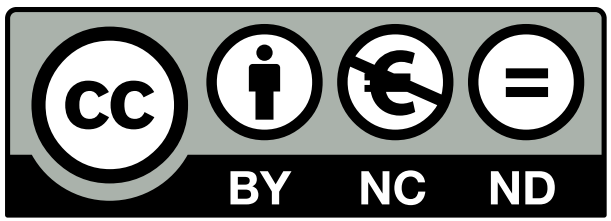
`https://www.lesechos.fr/2012/06/lelectricite-sans-fil-arrive-dans-les-transports-358748`

Application : transfert d'énergie électrique sans contact



https://www.frandroid.com/dossiers/136322_dossier-la-technologie-sans-fil-qi

Ce document est mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons “Attribution – Pas d’utilisation commerciale – Pas de modification 4.0 International”.



https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr