

LA CONVERSION D'ÉNERGIE MÉCANIQUE EN ÉNERGIE ÉLECTRIQUE : FONCTIONNEMENT D'UN ALTERNATEUR.

Mots clés

Alternateur, stator, rotor, aimant, électroaimant, induction, conversion électromécanique.

Référence aux programmes

2.1 : Deux siècles d'énergie électrique

Savoirs

Les alternateurs électriques exploitent le phénomène d'induction électromagnétique découvert par Faraday puis théorisé par Maxwell au XIX^e siècle. Ils réalisent une conversion d'énergie mécanique en énergie électrique avec un rendement potentiellement très proche de 1.

Savoir-faire

Reconnaître les éléments principaux d'un alternateur (source de champ magnétique et fil conducteur mobile) dans un schéma fourni. Analyser les propriétés d'un alternateur modèle étudié expérimentalement en classe. Définir le rendement d'un alternateur et citer un phénomène susceptible de l'influencer.

Introduction et enjeux

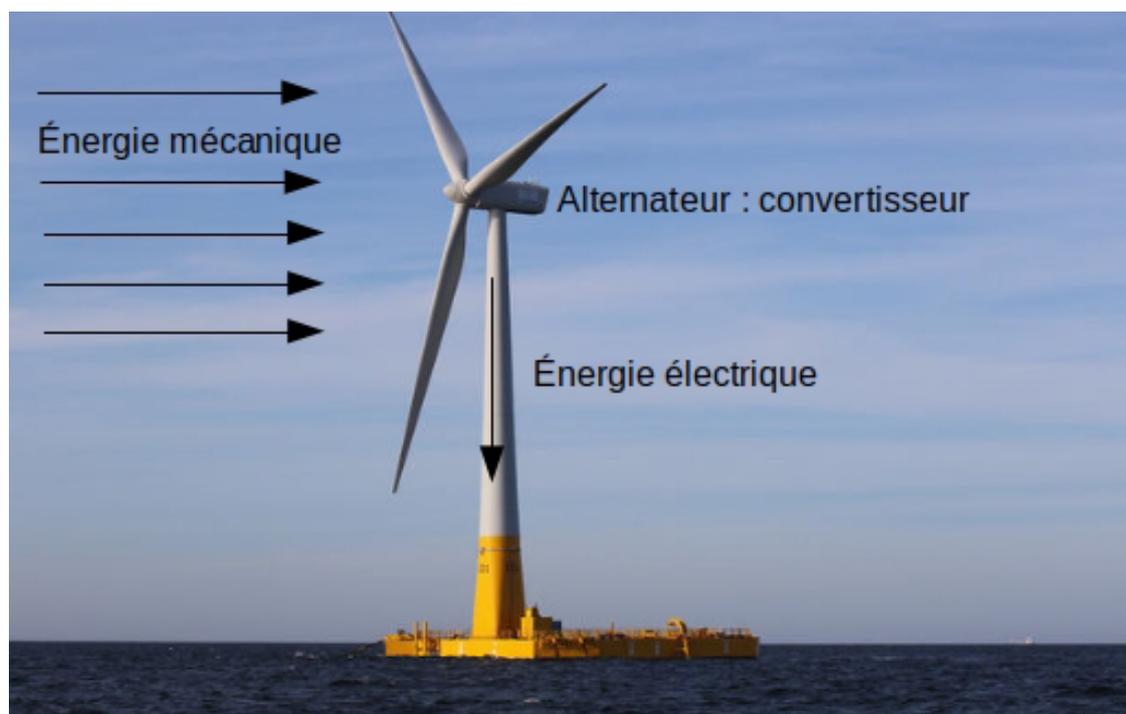
L'objectif de réduction drastique d'émissions de gaz à effet de serre à court ou moyen terme est aujourd'hui des plus importants. L'un de ces gaz à effet de serre, le dioxyde de carbone, est émis de manière anthropique et non renouvelable par la combustion de pétrole, gaz et charbon (énergies fossiles). Cette combustion permet par exemple le chauffage de bâtiments, le fonctionnement de moteurs thermiques ou de turboréacteurs. L'utilisation de ces énergies carbonées nécessite ainsi des convertisseurs d'énergie : par exemple, un moteur thermique est un convertisseur d'énergie chimique en énergie mécanique.

L'abandon de ces ressources au profit d'énergies dites renouvelables (énergies éolienne, hydroélectrique, solaire, marémotrice...) nécessite également des convertisseurs d'énergie. Un panneau photovoltaïque est par exemple un convertisseur d'énergie électromagnétique (forme sous laquelle l'énergie solaire nous parvient) en énergie électrique : une autre ressource aborde ce sujet.

Dans le cas des énergies éolienne, hydroélectrique ou marémotrice, on dispose d'énergie mécanique (énergie cinétique du vent pour l'énergie éolienne ou énergie potentielle de pesanteur pour l'eau d'un barrage) que l'on convertit en énergie électrique : on parle de **conversion électromécanique**. L'un des convertisseurs les plus utilisés aujourd'hui est l'**alternateur**, qui permet d'obtenir de l'énergie électrique à courant alternatif à partir d'énergie mécanique. Ce mode de conversion est une technologie très bien maîtrisée de nos jours. Plus de 98 % de la production d'énergie électrique mondiale aujourd'hui provient d'une conversion électromécanique.

Pour limiter le dégagement de CO₂ lié à l'obtention d'énergie électrique, il faut disposer de dispositifs de production ou d'exploitation d'énergie mécanique qui ne nécessitent pas de combustion. C'est le cas des productions hydroélectrique, éolienne et nucléaire.

Dans les centrales nucléaires, en effet, la chaleur dégagée par les réactions thermonucléaires est utilisée pour former de la vapeur d'eau, qui fait fonctionner des turbines accouplées à des alternateurs. Dans le cas de centrales thermiques, le principe est identique, mais la chaleur nécessaire à l'obtention de la vapeur d'eau est issue de la combustion d'énergies fossiles : en ce cas, l'énergie électrique n'est pas « décarbonée ».



Retrouvez éducol sur



Découverte du phénomène d'induction

L'alternateur utilise le principe physique de l'**induction**, dont la découverte et la formalisation dans les équations de Maxwell est assez récente (XIX^e siècle). On peut donner les repères suivants :

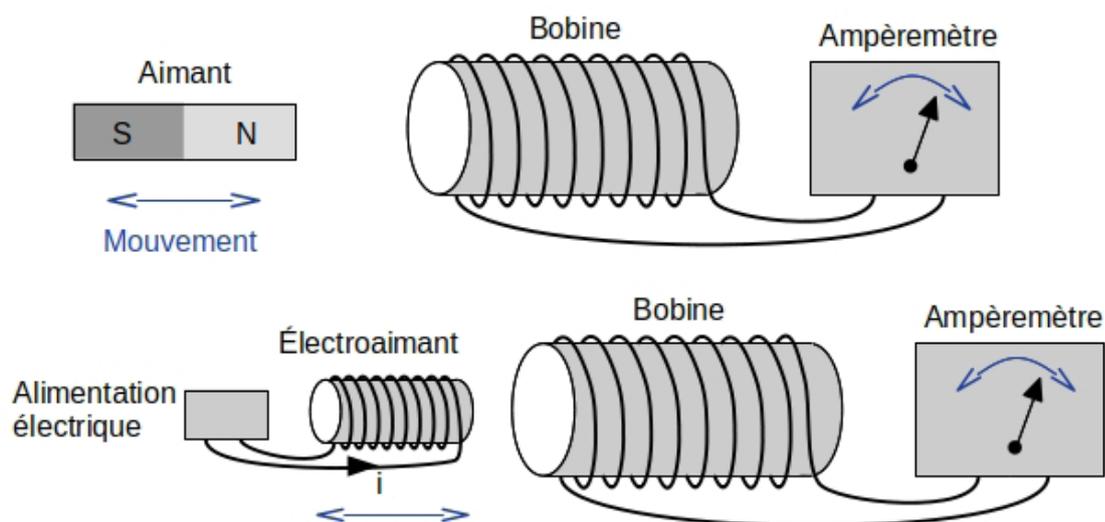
Jusqu'au XIX siècle, on distinguait :

- l'étude des phénomènes magnétiques, depuis l'Antiquité (boussoles ou d'aimants) ;
- l'étude des phénomènes électriques, étudiés par Charles-Augustin Coulomb en particulier à la fin du XVIII^e siècle. En 1800, la pile d'Alessandro Volta permet la génération de courants électriques, qui sont des charges électriques en mouvement.

Le lien entre ces deux branches de la physique n'est établi qu'en 1820, par Hans-Christian Ørsted. Il découvre de manière fortuite que le passage d'un courant électrique à proximité d'une boussole la dévie : le lien *phénomènes électriques => phénomènes magnétiques* est démontré.

La réciproque de cette découverte reste dès lors à établir. En 1831, Michael Faraday montre par l'expérience qu'un circuit électrique fermé est parcouru par un courant électrique lorsqu'il est plongé dans un champ magnétique variable dans le temps, obtenu par exemple par le mouvement d'un **aimant** à proximité du circuit électrique, ou encore par le mouvement d'un **électroaimant** (bobine alimentée électriquement, qui se comporte comme un aimant). Ce phénomène est également observable lorsque c'est le circuit électrique qui est en mouvement dans un champ magnétique qui n'est pas homogène. Dès lors, la réciproque *phénomènes magnétiques => phénomènes électriques* est démontrée : on parle d'**induction**.

Le schéma ci-dessous présente de façon schématique une illustration expérimentale aisément réalisable en classe :



En conclusion, lorsque le champ magnétique dans lequel est plongé un circuit électrique évolue dans le temps, tout se passe comme si ce circuit contenait un générateur électrique : c'est la **loi de Faraday** (qui ne figure pas au programme de l'enseignement scientifique) qui décrit et quantifie le phénomène d'induction. A titre documentaire, cette loi est précisée dans l'encadré ci-dessous.

Loi de Faraday

Cette loi relie la force électromotrice d'induction présente dans un circuit aux variations dans le temps du flux de champ magnétique qui traverse ce circuit. Pour un circuit plan plongé dans un champ uniforme, le flux du champ magnétique φ est le produit de la norme du champ (en tesla, T) par l'aire du circuit (en m²) ; il s'exprime donc en T.m².

La loi de Faraday, découverte expérimentalement énonce que les courants induits dans le circuit sont équivalents à ceux que produirait un générateur électrique dont la force électromotrice serait :

$$e(t) = -\frac{d\varphi}{dt}(t)$$

Cette loi est une conséquence des lois générales de l'électromagnétisme théorisées par Maxwell dans les années 1870.

Le phénomène d'induction permet donc, en mettant en mouvement un circuit ou un aimant d'obtenir de l'énergie électrique. Cette énergie n'est pas « gratuite » : pour l'obtenir, l'opérateur doit fournir une énergie mécanique car l'aimant (ou le circuit mobile) est soumis à une force d'origine magnétique qui fournit un travail résistant auquel l'opérateur doit s'opposer.

Principe général de l'alternateur

Un alternateur est un convertisseur d'énergie mécanique en énergie électrique qui exploite ce phénomène d'induction. L'énergie mécanique, qui est la grandeur d'entrée du convertisseur (énergie fournie, ou dépensée), est à l'origine de la mise en rotation d'une partie tournante (pales d'une éolienne, turbine d'une centrale hydroélectrique), qui elle-même entraîne en rotation des sources de champ magnétique : **aimants** ou **électroaimants** ; cette partie en rotation est nommée **rotor**. Ces sources de champ magnétique sont alors en mouvement à l'intérieur (parfois autour) d'un ou plusieurs circuits électriques fixes (le **stator**) dans le référentiel d'usage de l'alternateur. Ces circuits électriques sont alors le siège d'un phénomène d'induction, et peuvent être parcourus par un courant électrique lorsqu'ils sont reliés à une charge électrique. L'énergie électrique correspondante est la grandeur de sortie du convertisseur.

Ce convertisseur associant stator et rotor est appelé **alternateur**. Les puissances mises en jeu vont du W au GW suivant les applications.



Figure 1



Figure 2



Figure 3

Retrouvez éducol sur



Figure 1 : Alternateur de vélo (« dynamo »). Taille de l'ordre du cm. Puissance de l'ordre du W.

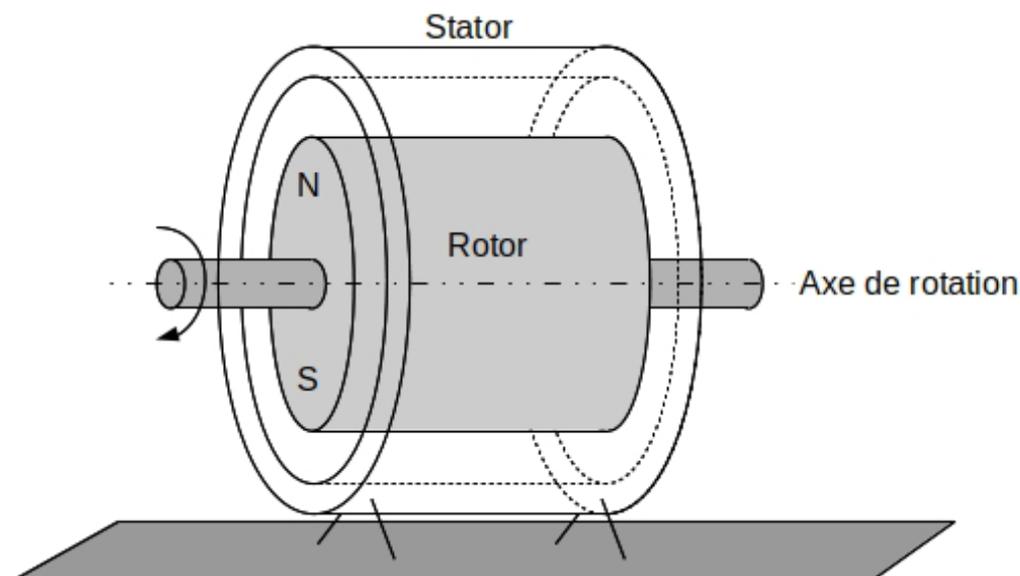
Figure 2 : Alternateur de voiture. Taille de l'ordre de la dizaine de cm. Puissance de l'ordre du kW.

Figure 3 : Alternateur de centrale nucléaire lors d'une opération de maintenance à Paluel : le rotor long de 20m et pesant 240 tonnes a été extrait du stator. Puissance de plusieurs centaines de MW.

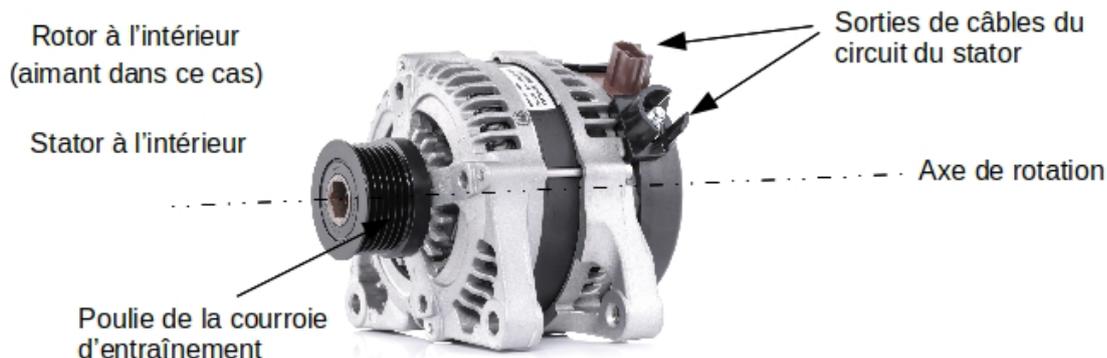
Quels que soient les ordres de grandeur des puissances délivrées par ces alternateurs, le schéma de principe est le même. Il comporte un rotor (composé d'aimants ou d'électroaimants qui doivent donc être alimentés électriquement, symbolisés par leurs pôles nord N et sud S en rotation), lié à l'axe de rotation du système, et un stator composé d'un ou plusieurs circuits électriques dans lesquels se produisent des phénomènes d'induction, et qui se comporteront dès lors comme des sources d'énergie électrique.

L'énergie mécanique est apportée par des éléments mécaniques liés à l'axe de rotation : pales d'une éolienne entraînées par le vent, turbine d'une centrale hydroélectrique entraînée par l'eau, courroie pour un alternateur d'automobile ou encore galet d'une dynamo entraîné par frottement avec le pneu du vélo.

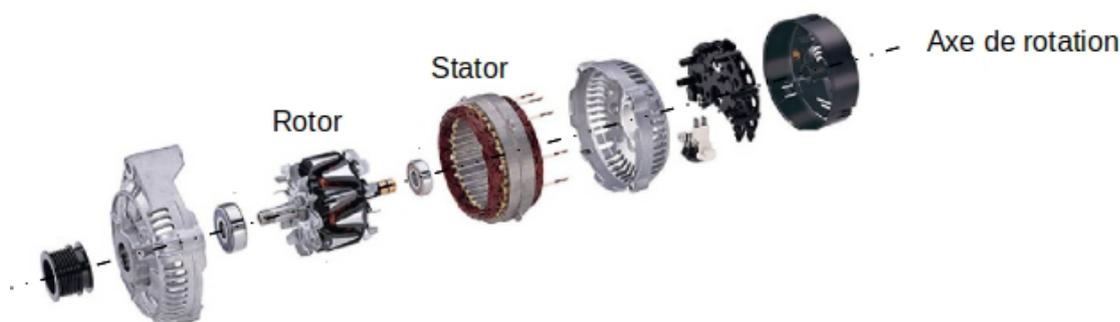
On peut donner ce schéma de principe :



Ces différents éléments peuvent facilement être repérés sur les systèmes réels, ici un alternateur de voiture non démonté :



Soit en vue éclatée d'un autre modèle :



Rendement d'un alternateur

Le rendement d'un convertisseur tel que l'alternateur est une propriété déterminante. Dans un système de type électro-magnéto-mécanique (ou électromécanique), les sources de dissipation d'énergie sont de plusieurs natures : pertes mécaniques (frottements), pertes par effet Joule dans les circuits électriques et pertes dites « fer ». Ces pertes sont comparables entre elles dans les systèmes réels. Dans tous les cas, la puissance dissipée l'est sous forme de chaleur. Si cette puissance est trop élevée et mal évacuée, le système va s'échauffer au risque de se détériorer.

On définit alors le rendement r d'un alternateur comme le rapport de l'énergie utile qu'il fournit sur une certaine durée, sous forme électrique donc (notée E_{elec}), à l'énergie mécanique qu'il reçoit sur cette même durée (notée E_{meca}) :

$$r = \frac{E_{elec}}{E_{meca}}$$

L'énergie mécanique non transformée en énergie électrique est dite « dissipée ».

On a alors

$$E_{meca} = E_{elec} + E_{diss} \text{ avec } E_{diss} \text{ l'énergie dissipée.}$$

De manière équivalente, on peut définir ce rendement à partir de la puissance électrique que fournit l'alternateur (P_{elec}) et de la puissance mécanique qu'il reçoit (P_{meca}) :

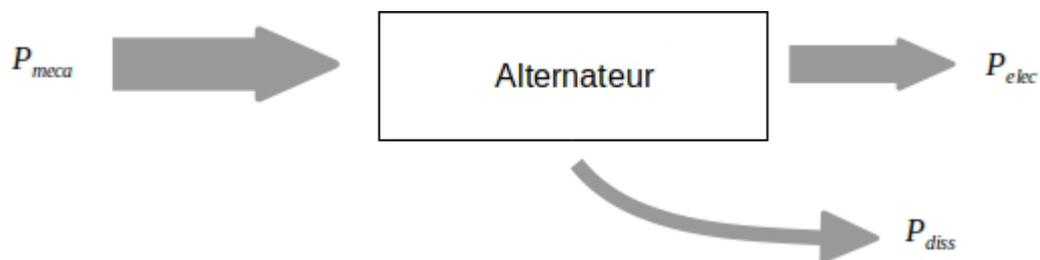
$$r = \frac{P_{elec}}{P_{meca}}$$

De même que plus haut, on aura $P_{meca} = P_{elec} + P_{diss}$ avec P_{diss} la puissance dissipée.

$$\text{On en déduit : } r = \frac{P_{elec}}{P_{meca}} = \frac{P_{meca} - P_{diss}}{P_{meca}} = 1 - \frac{P_{diss}}{P_{meca}} \leq 1 .$$

Le rendement est ainsi nécessairement compris entre 0 et 1. Pour les systèmes industriels haute performance, les rendements dépassent 0,99 (soit 99 %). Pour un alternateur de 100MW, un rendement de 99 % signifie tout de même qu'il est nécessaire d'évacuer une puissance thermique de 1MW, soit l'équivalent d'un millier de radiateurs électriques de 1kW.

On peut résumer ceci par le schéma énergétique suivant :



Ouverture

Alors qu'un alternateur est un convertisseur d'énergie mécanique en énergie électrique, les moteurs électriques sont des convertisseurs d'énergie électrique en énergie mécanique. Certaines machines sont dites réversibles en puissance : elles peuvent fonctionner autant en alternateur qu'en moteur.

Un microphone est également un convertisseur d'énergie mécanique (portée par les ondes sonores) en énergie électrique. Un haut-parleur convertira une énergie électrique en énergie mécanique (onde sonore).