# Production et transformation de l'énergie électrique : L'alternateur et le transformateur Introduction au magnétisme

---

## 1 - Introduction

L'énergie électrique, d'origine nucléaire, hydraulique, éolienne, tirée du charbon ou du pétrole, est obtenue au moyen d'un alternateur mis en rotation par une turbine à 1500 tours par minute.

Le transport de l'électricité nécessite de réduire l'intensité $I$ et d'augmenter la tension $U$ pour une puissance donnée $P = U \cdot I$ de l'électricité transportée. Ceci permet de minimiser les pertes par effet Joule $R \cdot I^2$ , réduites en pratique à 2,5 % de l'énergie transportée. $R$ est la résistance électrique de la ligne, mesurée en ohm. On obtient ce résultat grâce à un transformateur élévateur de tension. La tension obtenue est de l'ordre de 200 kV et peut atteindre 765 kV en France, et même 1500 kV (Inde, Chine, Russie) pour des très grandes distances. La densité de courant dans ces lignes est de l'ordre de 0,8 A/mm$^2$ pour une section de 500 mm$^2$, ce qui donne une intensité $I$ = 400 A et une puissance transportée $P = U \cdot I$ = 306 MW.

L'énergie électrique transportée par les lignes haute tension est ensuite convertie en plusieurs étapes par des transformateurs abaisseurs de tension. On obtient une tension alternative de 220 volts dans les prises de courant chez l'usager.

Ces appareils sont tous basés sur des effets magnétiques.

Les notions évoquées dans ce qui suit peuvent être illustrées par quelques expériences (voir la vidéo 12'30"  77 Mo).

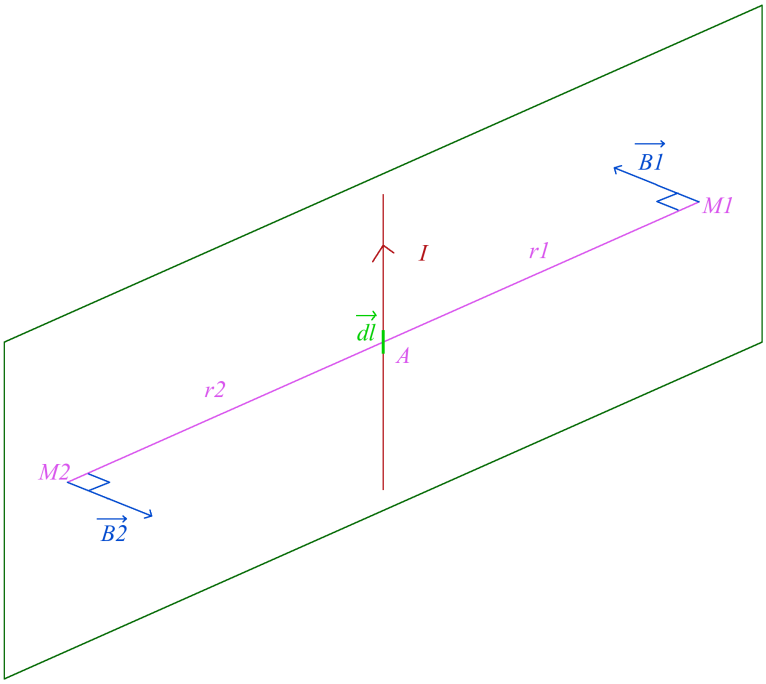
## 2 - Champ magnétique créé par un fil parcouru par un courant

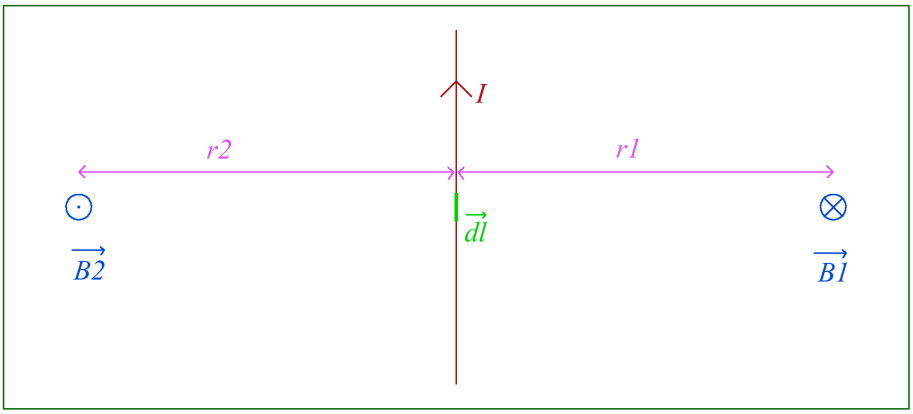
Un élément de fil de longueur très petite $dl$ (la lettre $d$ devant le $l$ signifie "très petit") au voisinage du point $A$, parcouru par un courant électrique $I$, crée un champ magnétique $\overrightarrow{B_1}$ dirigé vers l'arrière $\otimes$ au point $M_1$ et un champ magnétique $\overrightarrow{B_2}$ dirigé vers l'avant $\odot$ au point $M_2$. Ces 2 vecteurs sont orthogonaux au plan qui contient le fil et le point considéré $M_1$ ou $M_2$.

La valeur du vecteur $\overrightarrow{B_1}$ est :

$$B_1 = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{1}{4\pi} \frac{I \cdot dl}{r_1^2}$$

où $r_1$ est la distance en mètre entre le point $A$ et le point $M_1$,
$\mu_0$ est la "perméabilité magnétique du vide" : $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} T.m.A^{-1} \approx 1{,}257 \cdot 10^{-6} T.m.A^{-1}$
$\mu_r$ est la perméabilité relative du milieu : $\mu_r$ = 1 dans l'air et $\mu_r$ = 1600 dans le fer doux (sans unité)
$I$ est l'intensité électrique dans le fil, en ampère,
$B_1$ est le champ magnétique au point $M_1$ en tesla (T).

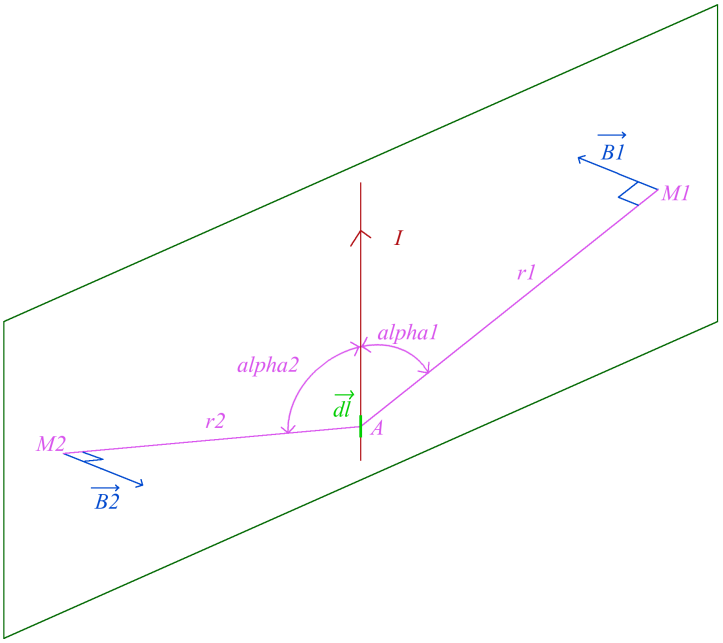



Si $\overrightarrow{dl}$ n'est pas perpendiculaire à $\overrightarrow{OM_1}$ ou $\overrightarrow{OM_2}$, on nomme $\alpha_1$ l'angle $(\widehat{\overrightarrow{dl}, \overrightarrow{AM_1}})$ et $\alpha_2$ l'angle $(\widehat{\overrightarrow{dl}, \overrightarrow{AM_2}})$ , on a alors :

$$B_1 = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{1}{4\pi} \frac{I \cdot dl}{r_1^2} \cdot \sin(\alpha_1)$$

et l'équivalent pour $B_2$ .




**<u>Exemple :</u>** $I = 2A$ , $r_1 = 0{,}5m$ , $dl = 1cm = 10^{-2}m$ , $\alpha_1 = 90°$ (soit $\sin(\alpha_1) = 1$) dans l'air ($\mu_r$ =1).

$$B_1 = 1 \times 4\pi \times 10^{-7} \times \frac{1}{4\pi} \times \frac{2 \times 10^{-2}}{0{,}5^2} = 8 \times 10^{-9} \text{ tesla} = 8 \text{ nT} \qquad \text{(nanotesla).}$$

Pour un fil de **longueur infinie**, on somme les contributions au champ magnétique total de tous les éléments très petits $\overrightarrow{dl}$ . On trouve :

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \frac{I}{2\pi r}$$

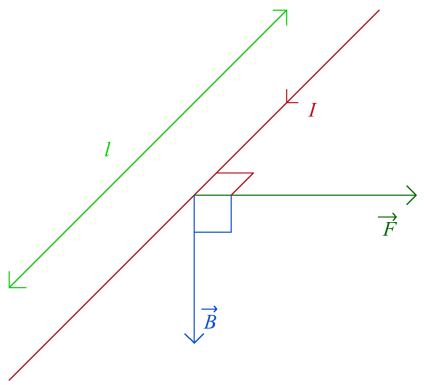
où $r$ est la distance entre le point M et le fil, c'est à dire la plus petite distance entre le point M et un point situé sur le fil.

**<u>Exemple</u>** : fil infiniment long avec $r = 0{,}5$ m $I = 2$ A dans l'air ( $\mu_r = 1$ ) :

$$B = 1 \times 4\pi \times 10^{-7} \times \frac{2}{2\pi \times 0{,}5} = 8 \times 10^{-7}T = 800nT$$ soit 100 fois plus grand que pour le petit élément de longueur 1 cm de l'exemple précédent.

**<u>Remarque</u>** : le sens de $\overrightarrow{B}$ peut être retrouvé en considérant un tire-bouchon qui s'enroule autour du fil dans le sens du courant.

# 3 - Force magnétique sur un fil parcouru par un courant




On considère un élément de fil de longueur $l$ parcouru par un courant d'intensité $I$ , soumis à un champ magnétique $\vec{B}$ , ici orthogonal à la direction du fil (ce n'est pas une condition nécessaire pour avoir une force magnétique, mais la formule obtenue est plus simple).

Il s'exerce alors sur le fil une force magnétique $\vec{F}$ , toujours orthogonale au fil et toujours orthogonale au champ magnétique $\vec{B}$. La valeur de cette force dans ce cas est :

$$F = I \times l \times B$$

Le sens de $\vec{B}$ peut se retrouver avec la règle du tire-bouchon qui tourne de $I$ vers $\vec{B}$ et progresse dans le sens de la force $\vec{F}$ .

**<u>Exemple 1</u>** : si $I$ = 5 A  $l$ = 20 cm = 0,2 m et $B$ = 10 mT = 10 . $10^{-3}$ T  , on a :

$$F = 5A \times 0{,}2m \times 10 \times 10^{-3}T = 10^{-2}N$$

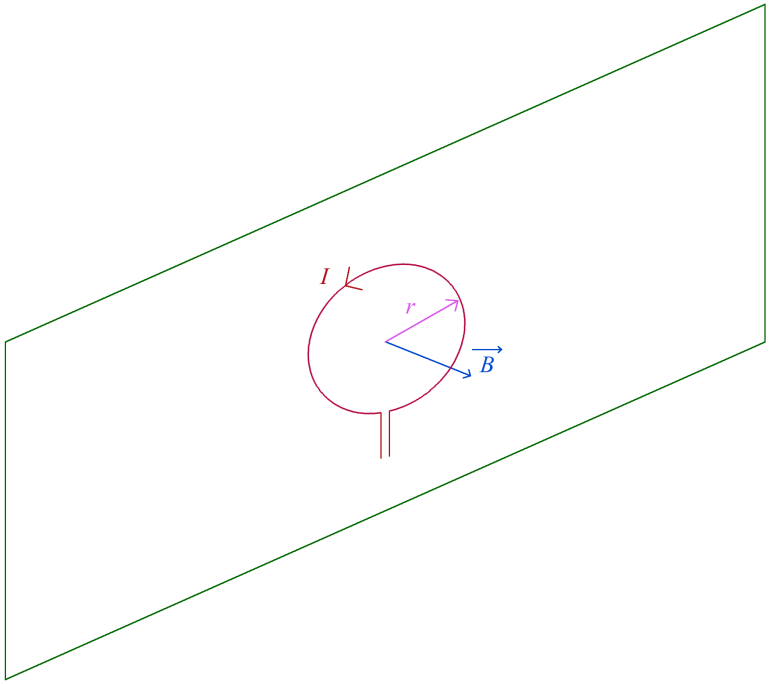
En comparaison, une masse $m$ = 10 kg est soumise à une force de pesanteur (son poids) :

$$F = m \cdot g = 10kg \cdot 9{,}81m \cdot s^{-2} = 98{,}1N \text{ soit 10000 fois plus grande.}$$

**<u>Exemple 2</u>** : si $I$ = 1 A,  $l$ = 1 m,  et $F$ = 1 N, que vaut le champ magnétique $B$ à l'origine de cette force ?

$$B = \frac{F}{I \times l} = \frac{1N}{1A \times 1m} = 1T \quad \text{(c'est la définition du tesla)}$$

# 4 - Champ magnétique créé par une spire




Le champ magnétique $\overrightarrow{B}$ créé par une spire en son centre est la somme des champs créés par tous les petits éléments de longueur $dl$ , tous situés à la distance $r$ du centre de la spire. Ce champ est donc celui créé par un fil de longueur $l = 2\pi r$ , c'est à dire le périmètre du cercle. On a donc :

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{I \times 2\pi r}{r^2} = \mu_r \cdot \mu_0 \frac{I}{2r}$$

**<u>Exemple 1</u>** : Si $I$ = 5 A , $r$ = 10 cm = 0,1 m dans l'air :

$$B = \frac{4\pi 10^{-7} \times 5}{2 \times 0{,}1} = 3{,}14 \times 10^{-5} T$$

Dans le cas d'une bobine plate constituée de $N$ spires jointives, ce champ est multiplié par $N$ :

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \frac{N \times I}{2r}$$

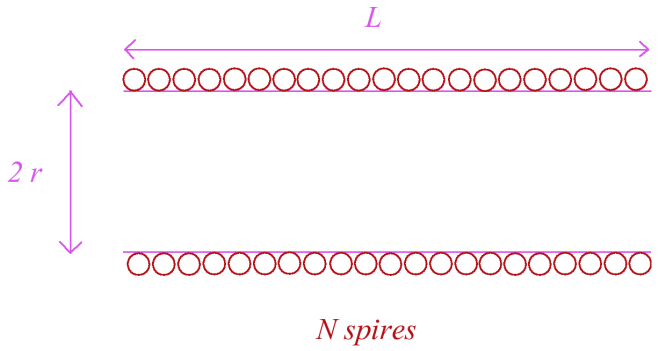
**<u>Exemple 2</u>** : si $N$ = 100 spires identiques à celles de l'exemple précédent :

$$B = \frac{4\pi 10^{-7} \times 5 \times 100}{2 \times 0{,}1} = 3{,}14 \times 10^{-3} T$$

L'augmentation du nombre de spires est donc un moyen simple et efficace pour obtenir un champ intense. On peut associer à ce principe l'utilisation d'un fil supraconducteur à très basse température pour avoir une intensité électrique élevée et des pertes par effet Joule nulles. Un matériau supraconducteur a en effet une résistance électrique nulle, tant que le champ magnétique créé n'est pas trop intense (un champ magnétique trop élevé fait perdre la propriété supraconductrice du matériau). Un champ magnétique intense est par exemple requis pour l'imagerie médicale (IRM).

# 5 - Champ magnétique créé par une bobine longue

Une bobine longue peut être appelée un solénoïde.




Le calcul du champ magnétique créé par une telle bobine donne le résultat :

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{N \times I}{L}$$ (résultat indépendant du rayon $r$ de la bobine)

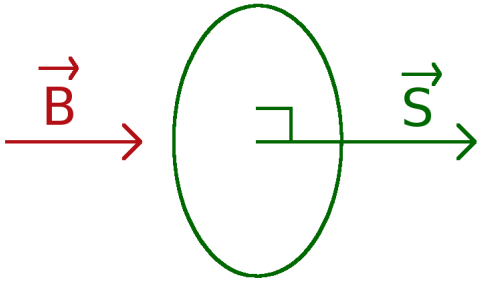
**<u>Exemple 1</u>** : $L$ = 10 cm = 0,1 m  $N$ = 100 spires  $I$ = 5 A  dans l'air :

$$B = 4\pi 10^{-7} \cdot \frac{100 \times 5}{0{,}1} = 6{,}28 \cdot 10^{-3} T$$

**<u>Exemple 2</u>** : mêmes caractéristiques pour la bobine, mais l'environnement est du fer de perméabilité magnétique relative $\mu_r$ = 1600 :

$$B = 1600 \times 4\pi 10^{-7} \cdot \frac{100 \times 5}{0{,}1} = 10{,}05 T$$ (1600 fois plus élevé)

# 6 - Flux magnétique



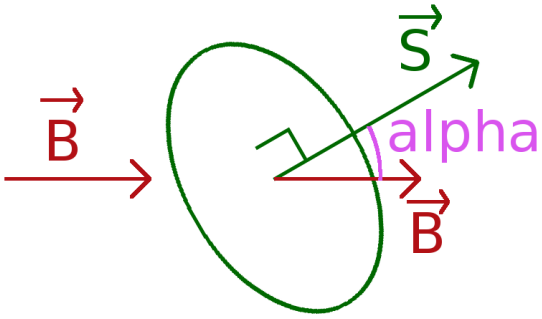

On définit le vecteur surface $\vec{S}$ perpendiculaire au plan qui contient la spire, de valeur égale à la surface de la spire. L'orientation de ce vecteur définit un sens de parcours de la spire (règle du tire-bouchon). Lorsque les vecteurs $\vec{B}$ et $\vec{S}$ sont colinéaires (même direction) et de même sens, on définit le flux magnétique $\Phi$ à travers la spire par le produit :

$$\Phi = B \times S$$

**<u>Exemple 1</u>** : $S$ = 3 cm$^2$ = 3.10$^{-4}$ m$^2$ et $B$ = 10 mT (**attention aux conversions** de surfaces : cm$^2$ vers m$^2$ )

$$\Phi = 10 \times 10^{-3} T \times 3 \times 10^{-4} m^2 = 3 \times 10^{-6} Wb = 3 \times 10^{-6} T \cdot m^2$$

L'unité de flux magnétique est le weber (Wb) identique au tesla . mètre carré (T.m$^2$).



Lorsque les vecteurs $\overrightarrow{B}$ et $\overrightarrow{S}$ ne sont plus colinéaires et de même sens, en notant $\alpha$ l'angle entre le vecteur $\overrightarrow{B}$ et le vecteur $\overrightarrow{S}$ , l'expression du flux magnétique à travers la spire devient :

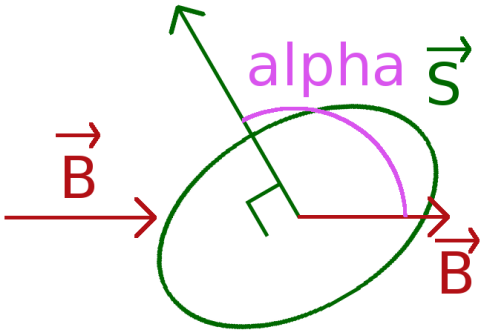
$$\Phi = B \times S \times \cos(\alpha)$$

**Attention au réglage** de la calculatrice en degrés ou en radians pour les calculs avec les angles.

Lorsque $\alpha$ = 0, le cosinus est égal à 1 et on retrouve la première formule pour le flux.

Lorsque $\alpha$ = 90°, le cosinus est nul et le flux magnétique est nul.

Lorsque $\alpha \geqslant$ 90°, le cosinus est négatif et le flux magnétique est négatif.




# 7 - Induction électromagnétique

L'expérience montre qu'il apparaît une tension électrique aux bornes d'une spire ou d'une bobine lorsque le flux magnétique qui la traverse varie (voir la vidéo).

Les causes de cette variation du flux peuvent être une variation du champ magnétique $\overrightarrow{B}$ en direction ou en valeur, une variation du vecteur surface $\overrightarrow{S}$ soit par déformation, par déplacement, ou par rotation de la spire, ou une variation de l'angle $\alpha$ .

La tension $e$ qui apparaît aux bornes d'une spire a pour valeur :

$$e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$ où la lettre grecque $\Delta$ signifie "variation de".

La tension $e$ est donc égale au quotient de la variation de flux magnétique $\Delta\Phi$ par la durée de cette variation $\Delta t$ c'est à dire à la vitesse de variation du flux magnétique $\Phi$ . Le signe "-" prend son sens lorsqu'on oriente la spire par le vecteur surface $\overrightarrow{S}$ , et donc le sens positif de circulation du courant dans la spire : règle du tire-bouchon.

Lorsqu'on considère une bobine de $N$ spires, la tension $e$ est multipliée par $N$ .

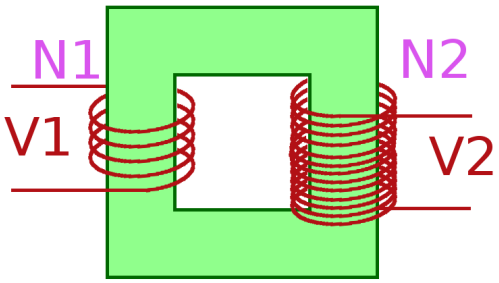
$$e = -N \times \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$ ou $\Phi$ est le flux magnétique à travers une spire de la bobine.

# 8 - Le transformateur

Un transformateur est constitué par 2 bobines dont l'une est soumise au champ magnétique créé par l'autre.

On utilise pour des circuits haute fréquence (plusieurs mégahertz), dans les émetteurs et récepteurs radio, des transformateurs où les 2 bobinages sont dans l'air.

Pour les applications liées au transport de l'énergie électrique alternative basse fréquence (50 hertz), les 2 bobinages sont montés sur un "circuit magnétique" constitué par un empilement de feuilles de métal magnétique comme le fer, c'est à dire dont la perméabilité magnétique $\mu_r$ est élevée (supérieure à 1000).




Le circuit magnétique canalise le champ magnétique dont le flux $\Phi$ a une valeur constante dans tout le circuit.

Indépendamment de "qui" crée le flux, la tension $V_1$ aux bornes du bobinage "primaire" (numéros 1) est :

$$V_1 = -N_1 \times \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

et la tension aux bornes du bobinage "secondaire" (numéros 2) est :

$$V_2 = -N_2 \times \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

On en déduit, en faisant le quotient de ces deux égalités, que :

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{-N_2 \times \dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}}{-N_1 \times \dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}} = \frac{N_2}{N_1}$$

Le rapport des tensions secondaire sur primaire est donc égal au rapport des nombres de spires secondaire $N_2$ sur primaire $N_1$ .

**Exemple** : si $N_1$ = 50 spires et $N_2$ = 200 spires, on a :

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{200}{50} = 4$$

donc si $V_1$ = 100 volts, on a :

$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} \times V_1 = 4 \times 100V = 400V$$

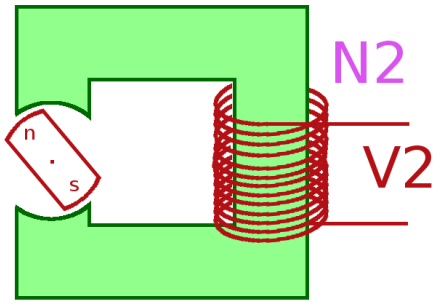
Un transformateur peut être utilisé dans un sens ou dans l'autre, pour élever ou abaisser une tension. Un transformateur reçoit sur le bobinage primaire une puissance $P_1 = V_1 \times I_1$ égale à la puissance électrique fournie par le bobinage secondaire $P_2 = V_2 \times I_2$ , aux pertes par effet Joule ou par dissipation dans le circuit magnétique (courants de Foucault) près et assez faibles.

On a donc également l'égalité :

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \qquad \text{(indices permutés)}$$

# 9 - L'alternateur

On remplace dans le schéma précédent le bobinage primaire par un aimant (ou un électroaimant).



La rotation de cet aimant crée une variation du flux magnétique dans le circuit magnétique et une tension apparaît aux bornes du bobinage.

On obtient un alternateur qui transforme l'énergie mécanique qui fait tourner l'aimant en énergie électrique, recueillie aux bornes du bobinage.

Ce dispositif est également réversible et une tension alternative synchronisée avec la rotation de l'aimant transforme l'énergie électrique reçue par le bobinage en énergie mécanique de rotation.

Le dispositif fonctionnant de cette façon est un "moteur synchrone", utilisé par exemple dans un sens comme dans l'autre dans les centrales hydroélectriques : production d'électricité aux heures pleines en fonctionnement "alternateur" (heures de forte consommation "d'électricité") en utilisant la chute d'eau depuis le réservoir (le barrage), et inversement pompage de l'eau par l'alternateur en fonctionnement "moteur" vers le réservoir aux heures creuses.