

## Le compteur d'énergie à induction

---

Le compteur d'énergie à induction permet une approche concrète de la notion d'énergie. Ce texte a pour objet l'étude simplifiée du principe de fonctionnement et de la constitution du compteur monophasé.

Nous proposons également la transformation d'un compteur en un appareil didactique utilisable en travaux pratiques dans les L.E.P. ou dans le premier cycle.

### 1) ETUDE EXPERIMENTALE DU FONCTIONNEMENT.

Cette étude peut être facilement réalisée en modifiant un compteur de récupération qu'il est possible de se procurer auprès des services de l'E.d.F.

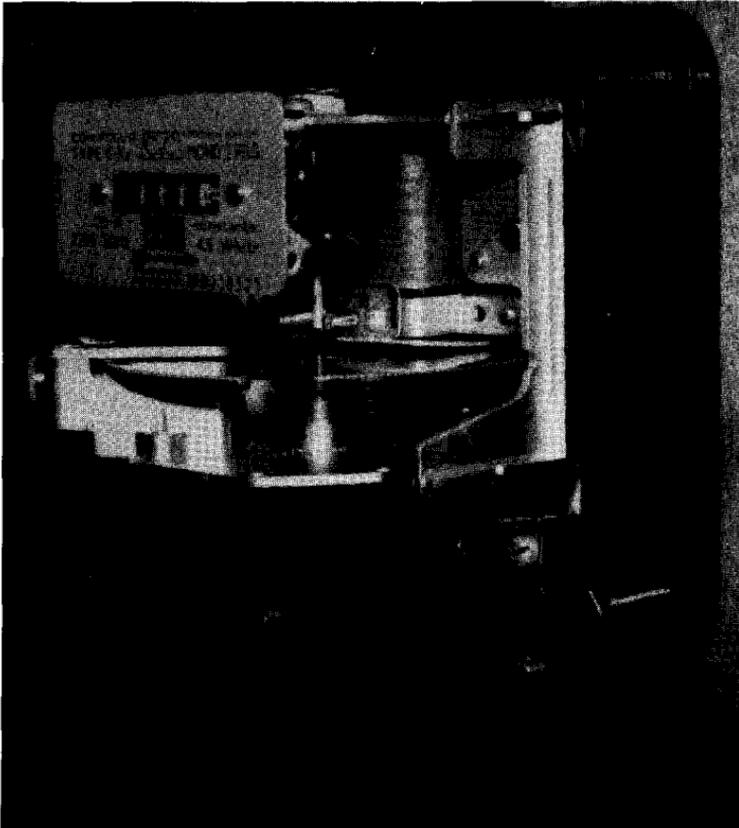


Photo 1

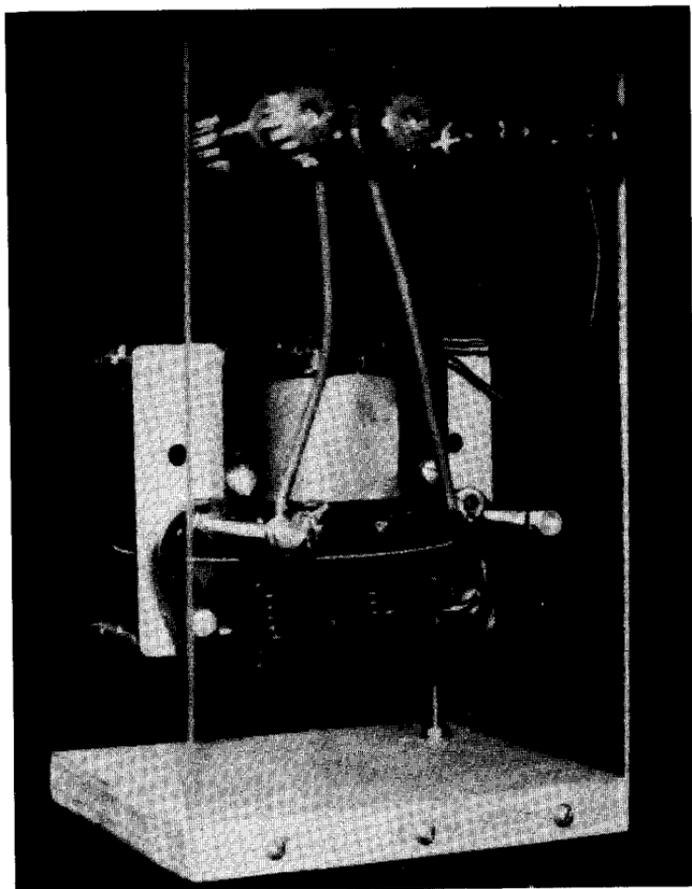


Photo 2

*Modifications à apporter (photographies 1 et 2).*

On enlève le capot de protection et la minuterie de comptage, afin de rendre très visibles les éléments essentiels, à savoir :

- le disque d'aluminium constituant le rotor,
- l'inducteur « tension » constitué par une bobine comportant un grand nombre de spires de fil fin,
- l'inducteur « intensité » constitué par quelques spires de gros fil,
- l'aimant de freinage.

On fixe le compteur sur un support vertical, et on relie chaque bobine à deux bornes universelles.

### Observation du fonctionnement.

Le compteur, préparé ainsi qu'il vient d'être dit, est installé dans le montage représenté par la fig. 1 :

La bobine « intensité » est en série avec la lampe et la « tension » est montée en dérivation sur l'alimentation. Deux interrupteurs permettent d'observer le comportement du disque lorsque l'une ou l'autre des bobines sont alimentées.

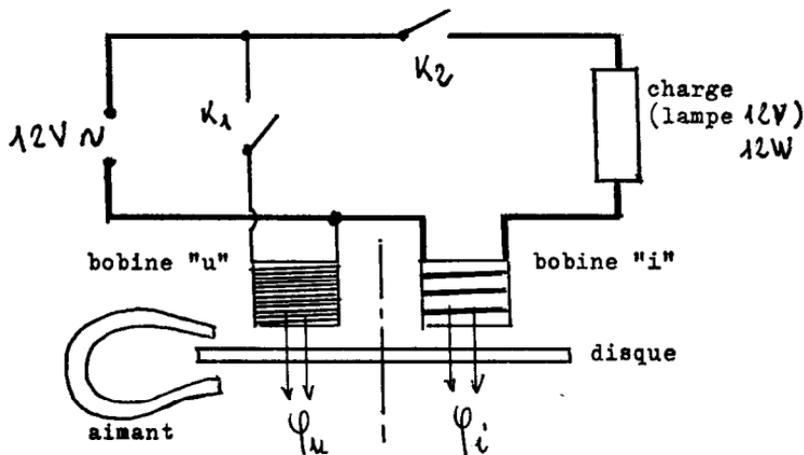


Fig. 1

Enlever l'aimant et constater que le disque ne tourne que si  $K_1$  et  $K_2$  sont fermés ; remettre l'aimant en place pour observer le freinage.

On peut conclure que le compteur est un moteur à induction freiné par un aimant permanent.

### 2) PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.

En régime permanent, le disque tourne à vitesse constante sous l'action de deux couples antagonistes dont les moments sont égaux : le couple moteur dû à l'action simultanée des deux inducteurs, et le couple de freinage dû à un aimant permanent.

Le lecteur trouvera en annexe un calcul des moments de ces couples. Le calcul aboutit :

— pour le couple moteur à un moment de la forme  $CUI \cos \Phi$  :

C étant une constante caractéristique du compteur,

U la tension d'alimentation,

I l'intensité dans le circuit d'utilisation,

$\cos \Phi$  le facteur de puissance du circuit d'utilisation,  $\Phi$  étant le déphasage entre l'intensité et la tension ;

- pour le couple de freinage à un moment de la forme  $D \cdot \Omega$  :  
 $D$  étant une constante caractéristique du compteur et  $\Omega$  étant la vitesse angulaire du disque.

La puissance active consommée dans la charge,  $P = UI \cos \Phi$  est donc proportionnelle à la vitesse de rotation du disque, et par suite l'énergie est proportionnelle à l'angle de rotation. Un train d'engrenages permet de totaliser les tours et d'afficher l'énergie consommée en kWh.

Sans aborder le calcul qui sera développé plus loin, indiquons l'origine du couple moteur. Si une bobine parcourue par un courant alternatif est placée perpendiculairement à un disque conducteur, il en résulte des courants induits, ces courants sont placés dans le champ magnétique qui les a créés, et subissent des forces électromagnétiques (fig. 2).

L'effet global de ces forces est nul en raison de la symétrie des courants et du champ.

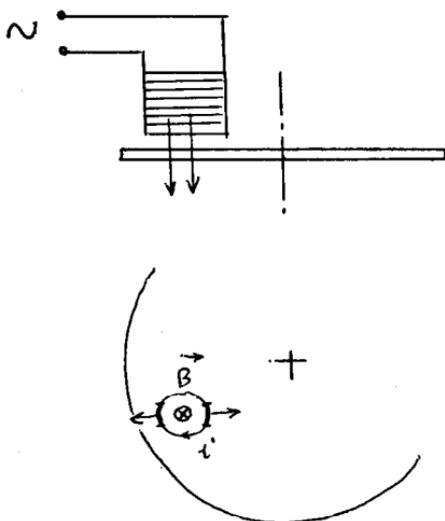


Fig. 2

Il en est autrement si le disque est soumis aux flux de deux inducteurs assez proches pour que les courants induits par l'un des inducteurs soient soumis au champ de l'autre.

Sauf dans le cas où la charge est constituée par une réactance pure (capacité ou inductance pure), la dissymétrie géométrique

trique et le déphasage des flux ont pour conséquence l'existence d'un couple moteur dont le moment a une valeur moyenne proportionnelle à la puissance active consommée.

### 3) REALISATION.

#### Circuit magnétique.

La fig. 3 représente un exemple de circuit magnétique utilisé : les flux créés par les deux inducteurs doivent être proches et convenablement déphasés.

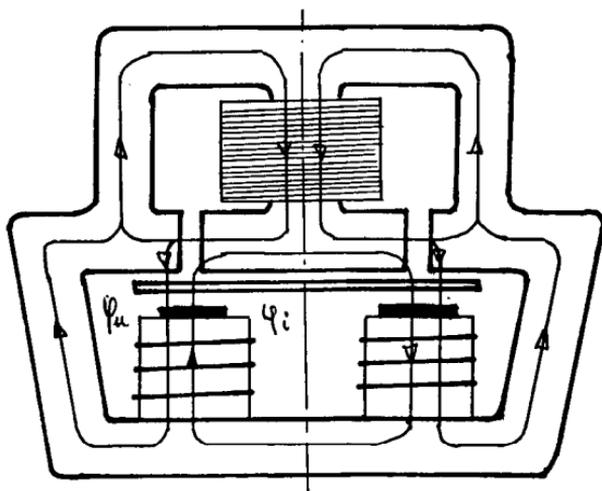


Fig. 3

Le flux  $\varphi_i$  créé par la bobine « intensité » circule dans un circuit magnétique en forme de U et traverse totalement le disque. L'enroulement comporte quelques spires de gros fil réparties en deux bobines. Le flux  $\varphi_i$  est en phase avec l'intensité.

Le flux  $\varphi_u$  n'est qu'une partie (le tiers environ) dérivée du flux créé par la bobine « tension » dans un circuit en W. Le flux dérivé est en phase avec le flux et l'inducteur « tension » et, en raison du grand nombre de spires et de l'étroitesse de l'entrefer, ce flux est en quadrature retard sur la tension.

En réalité, le déphasage est légèrement inférieur à  $\frac{\pi}{2}$  et

une spire de FRAGER permet de l'ajuster à la valeur exacte. En effet, une spire de FRAGER se comporte comme un secondaire de transformateur en court-circuit et déphase en arrière le flux qu'elle embrasse.

En deux endroits du disque, on trouve deux zones proches où le courant induit par  $\varphi_i$  est exposé à  $\varphi_u$ , et réciproquement.

#### Dispositifs de réglage.

Nous ne citons que quelques exemples des artifices utilisés pour maintenir la précision prévue aux différents régimes :

- aux faibles débits : les frottements mécaniques deviennent proportionnellement importants ; pour compenser leur effet, on crée un couple moteur proportionnel à la tension au moyen d'une légère dissymétrie du circuit magnétique de tension. Cette dissymétrie est obtenue par déplacement de la spire de FRAGER ;
- aux forts débits : le disque tournant plus rapidement, des courants de FOUCAULT produisent sous chaque bobine des forces d'auto-freinage dont le module est proportionnel au carré du courant d'excitation. Pour atténuer cette cause d'erreur, on privilégie  $\varphi_u$ , dont l'amplitude, comme celle de la tension, est constante, par rapport à  $\varphi_i$  dont l'amplitude croît avec le débit. On augmente également le couple de freinage de l'aimant permanent pour diminuer l'influence relative de l'auto-freinage. Enfin, on peut utiliser un shunt magnétique saturable qui détourne du disque une partie de  $\varphi_i$ , dans des proportions qui diminuent lorsque la saturation intervient.

#### 4) ADAPTATION DU COMPTEUR AUX TRES BASSES TENSIONS.

Le but de la modification est de rendre le compteur utilisable en travaux pratiques aux tensions de sécurité.

On augmente notablement la sensibilité du compteur en éloignant l'aimant de freinage de l'axe du disque.

La précision, quoique altérée, reste convenable. On peut donc, surtout si on utilise des compteurs de récupération, obtenir des joule-mètres à bon compte.

La photographie n° 3 montre la transformation : l'aimant est fixé sur une plaquette d'altuglass qui prolonge le support métallique ; l'aimant doit être fixé à la même hauteur que dans sa position initiale.

Nous indiquons les mesures réalisées avec le montage de la fig. 4.

$U_V$	$I_A$	$t_s$ (1 tour)	W = UIT
13,3	2,0	31,5	838
12,7	3,0	21	800
12,2	4,0	16	781
11,9	4,9	13,5	787
11,4	6,0	11,5	787

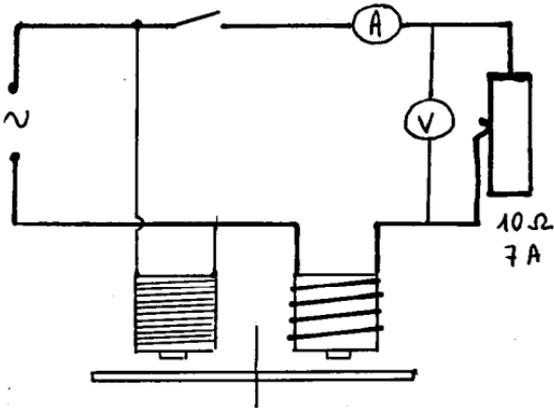


Fig. 4

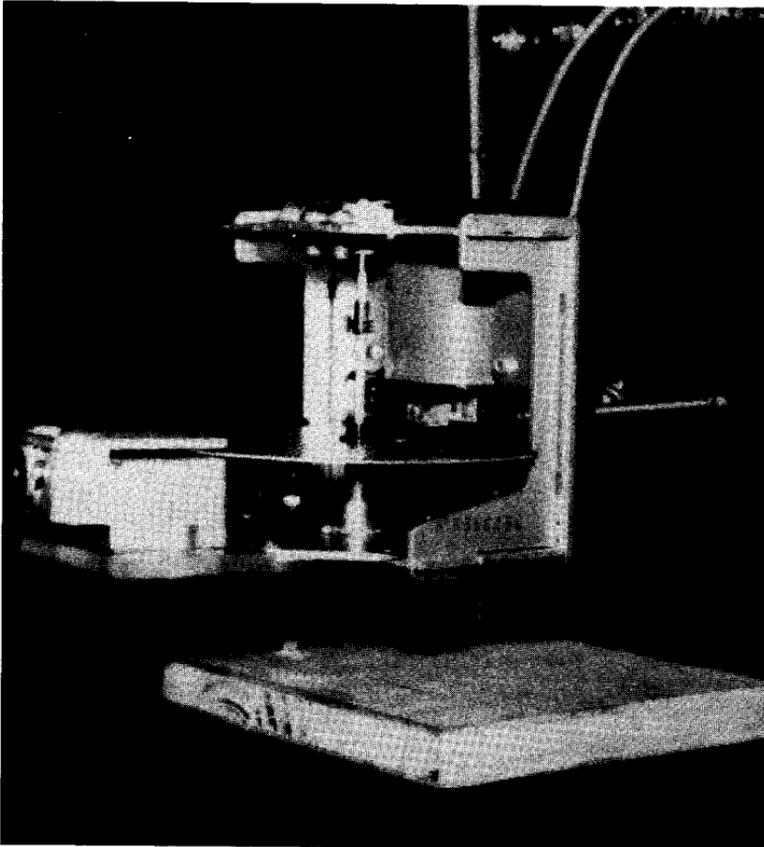


Photo 3

La constante du compteur est ramenée de 4,8 Wh/tr à 0,22 Wh/tr.

## ANNEXE

## EXPRESSION DU MOMENT DU COUPLE MOTEUR.

Le calcul simplifié produit ici est suffisant pour comprendre le principe de fonctionnement : il est basé sur une hypothèse simplificatrice : on néglige la réactance des tubes de courants induits dans le disque, en assimilant ces tubes à des résistances pures.

Le trajet des courants induits n'étant pas connu, on raisonne sur des parcours supposés, l'accord avec les résultats expérimentaux légitimant les approximations utilisées.

Soit (fig. 5)  $f_{i/u}$  la force électromagnétique subie par un élément de courant  $j_u$  induit par le flux variable  $\varphi_u$  et placé dans le champ  $\vec{B}_i$  de la bobine intensité.

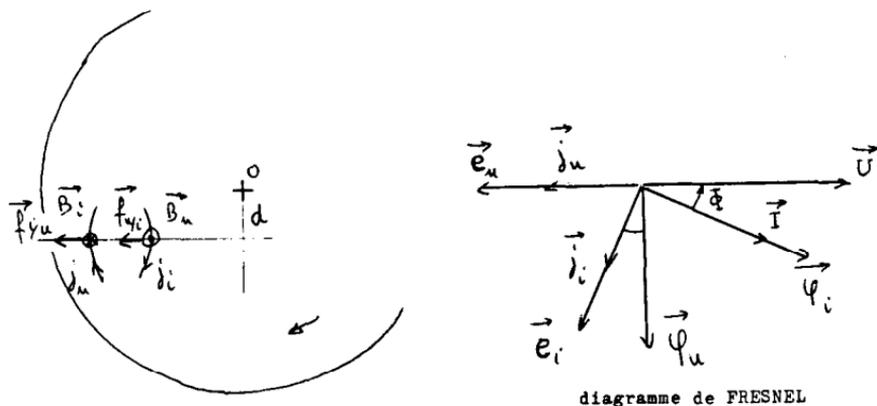


Fig. 5

Soient  $u = U_m \cos \omega t$  la tension aux bornes de la charge,  $Z_u$  l'impédance de la bobine « tension » et  $L_u$  son inductance propre.

$Z_u$  diffère peu de  $L_u \omega$  car la bobine comporte de nombreuses spires sur un circuit magnétique peu ouvert :

$$i_u = \frac{U_m}{Z_u} \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

$\varphi_u = k_u i_u$  car le circuit n'est pas saturé.

La f.é.m. induite dans le disque est  $e_u = -\frac{d\varphi_u}{dt}$  et le courant induit  $j_u$  dans un « tube de courant » de résistance  $r_u$  et de longueur  $l_u$  a pour expression :

$$j_u = -\frac{k_u U_m}{Z_u r_u} \omega \cos \omega t.$$

La force de LAPLACE s'écrit :  $f_{i/u} = B_i j_u l_u$ .

Désignons par  $\varphi_i$  le flux sinusoïdal produit par la bobine « intensité » à travers une surface  $S_i$ .

L'intensité est de la forme :

$$i_i = I_m \cos(\omega t - \Phi)$$

$$\varphi_i = k_i j_i \quad \text{et} \quad B_i = \frac{\Phi_i}{S_i} \dots$$

$$\dots f_{i/u} = -\frac{k_i k_u \omega l_u}{S_i Z_u r_u} U_m I_m \cos(\omega t - \Phi) \cos \omega t.$$

En supposant les tubes de courant identiques et situés à la même distance de l'axe de rotation, ce qui est vraisemblable si on considère la faible section des flux par rapport au rayon du disque, le moment résultant des forces  $f_{i/u}$  est de la forme :

$$\begin{aligned} M_{i/u} &= \Sigma f_{i/u} \cdot d = A \cdot UI \cos(\omega t - \Phi) \cos \omega t \dots \\ &\dots = A \frac{UI}{2} [\cos \Phi - \cos(2\omega t - \Phi)] \end{aligned}$$

A étant une constante liée aux bobinages, circuit magnétique et disque tournant.

$$\bar{M}_{i/u} = A \frac{UI}{2} \cos \Phi.$$

On peut développer un calcul parallèle pour la bobine « intensité » : on trouvera en prenant les notations symétriques des précédentes :

$$f_{u/i} = \frac{k_u k_i \omega l_i}{S_u Z_u r_i} U_m I_m \sin \omega t \sin(\omega t - \Phi)$$

La valeur moyenne du moment résultant est de la forme :

$$\bar{M}_{u/i} = B \cdot \frac{UI}{2} \cos \Phi \quad \text{et le moment du couple moteur peut s'écrire :}$$

$$C \cdot UI \cos \Phi.$$

**EXPRESSION DU MOMENT DU COUPLE DE FREINAGE (fig. 6).**

Soit  $S$  la surface du disque traversée par le flux de l'aimant permanent,  $S$  s'inscrivant dans un secteur angulaire  $\theta$ . La f.é.m. induite par le flux constant  $k B \theta$  traversant le disque mobile est :

$$e = -k B \frac{d\theta}{dt}.$$

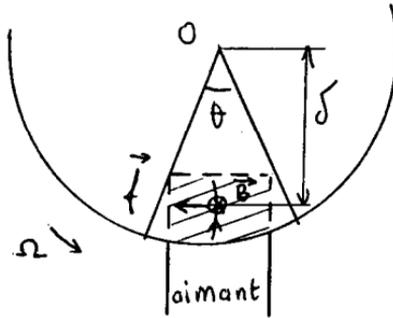


Fig. 6

L'intensité  $i$  dans un tube de courant de résistance  $r$  est en valeur absolue :

$$i = \frac{e}{r} = \frac{k B}{r} \frac{d\theta}{dt}.$$

Soit  $f$  la force agissant sur le tube de courant de longueur  $l$

distant de  $\delta$  de l'axe de rotation  $f = Bil = \frac{k B^2 l}{r} \frac{d\theta}{dt}.$

Le couple de freinage a pour moment  $\Sigma f \cdot \delta$ , il est donc de la forme  $D \cdot \frac{d\theta}{dt} = D \Omega$ ,  $D$  étant une constante du compteur.

EBENSTEIN,  
(E.N.N.A. - Antony).

*N.D.L.R.* : Nous remercions vivement les différents services de l'E.D.F. qui nous ont fourni les compteurs de récupération ainsi que la documentation sur leur fonctionnement.