

La notion de réluctance

MESURES ET APPLICATIONS

par Daniel SCACHE,

Professeur à l'E.N.N.A. de Villeneuve-d'Ascq

et Pierre DELBARRE,

Professeur au L.E.P. de Villeneuve-d'Ascq.

I) INTRODUCTION.

II) NOTION DE RÉLUCTANCE :

- 1) Circuits magnétiques :
 - a) circuit magnétique ;
 - b) réluctance et force magnétomotrice ;
 - c) circuit magnétique linéaire.
- 2) Circuits électriques à courant continu.
- 3) Circuits électriques et circuits magnétiques linéaires.
- 4) Réluctance et flux.

III) MESURES :

Etude de la variation de la réluctance en fonction des dimensions et de la nature du circuit.

- 1) Matériel.
- 2) Montage.
- 3) Méthode.
- 4) Mesures.
- 5) Constatations.
- 6) Conclusion.

IV) APPLICATIONS :

- 1) en électrotechnique :
 - a) poste de soudure ;
 - b) électro-aimant pour contacteur ;
- 2) en électronique : transformateur à impulsions :
 - a) principe ;
 - b) application :
 - hypothèses,
 - constitution,
 - fonctionnement.

V) CONCLUSION.

I. INTRODUCTION.

La discrétion des auteurs à propos de la réluctance des circuits magnétiques est liée aux difficultés des mesures expérimentales et de leur reproductibilité ; de plus, la composition chimique des matériaux ferromagnétiques et les traitements subis ne sont pas toujours connus avec la précision souhaitée.

Après un bref rappel de la notion de circuit magnétique et une modélisation dans un domaine de fonctionnement déterminé, nous avons effectué une série de mesures avec des matériaux susceptibles d'exister dans les laboratoires ; des applications importantes justifient l'intérêt de cette étude.

II. NOTION DE RELUCTANCE.

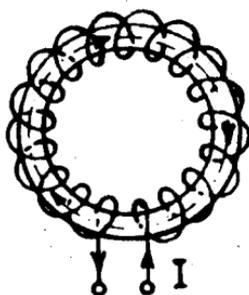
1. Circuits magnétiques.

a) CIRCUIT MAGNÉTIQUE.

Un tore est un volume engendré par une surface plane tournant autour d'un axe situé dans son plan.

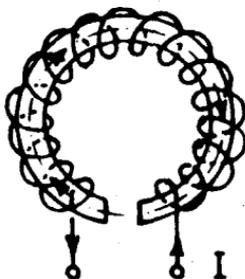
Une bobine en forme de tore est formée de spires enroulées régulièrement sur un mandrin qui peut avoir comme surface génératrice un carré, un rectangle ou un cercle.

Le plus simple des circuits magnétiques est un tore de fer de section *constante* entouré d'une bobine dont les spires sont réparties régulièrement. Si on effectue une mince coupure dans le tore, ce dernier est un exemple de circuit magnétique avec entrefer.



circuit sans entrefer.

D'une façon générale, un circuit magnétique est un anneau fermé ou presque, formé de matériaux magnétisables et enserré par des bobines magnétisantes.



circuit avec entrefer.

b) RÉLUCTANCE ET FORCE MAGNÉTOTRICE.

Considérons un circuit magnétique :

- fermé,
- homogène,
- de section constante,
- de dimension transversale petite devant le rayon moyen de l'anneau,
- régulièrement entouré par N spires parcourues par un courant constant I.

En l'assimilant à un tube de champ auquel on applique :

- le théorème d'Ampère pour la ligne moyenne de champ Γ ,
- le théorème de la conservation du flux :

$$* \quad \int_{\Gamma} \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI = \int_{\Gamma} H \cdot dl$$

puisque Γ est une ligne de champ et \vec{B}, \vec{H} colinéaires ;

* si Φ est le flux à travers une spire :

$$\Phi = \int \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \Rightarrow \Phi = BS \text{ si } \vec{B} \text{ conserve un module constant sur toute la section.}$$

$$\Phi = \mu_o \mu_r HS \Rightarrow H = \frac{\Phi}{\mu_o \mu_r S}$$

et donc :

$$\int_{\Gamma} H \cdot dl = \int_{\Gamma} \frac{\Phi}{\mu_o \mu_r S} \cdot dl = NI = \Phi \int_{\Gamma} \frac{1}{\mu_o \mu_r S} \cdot dl$$

si le circuit magnétique est considéré comme un tube du champ magnétique ;

* posons :

$$\mathcal{R} = \int_{\Gamma} \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \cdot \frac{dl}{S};$$

\mathcal{R} est appelé réluctance dans les conditions d'aimantation de ce circuit, d'où :

$$\mathcal{R} \Phi = NI$$

qui est la relation d'HOPKINSON dans laquelle \mathcal{R} s'exprime en H^{-1} (henry)⁻¹.

La quantité NI est appelée force magnétomotrice F :

$$\boxed{\mathcal{R} \cdot \Phi = F}$$

c) CIRCUIT MAGNÉTIQUE LINÉAIRE.

Pour localiser l'excitation magnétique dans des domaines déterminés, on sera amené à utiliser des matériaux de grande perméabilité, donc ferromagnétiques et donc saturables. En l'absence de matériaux ferromagnétiques ainsi que pour de faibles valeurs de l'excitation magnétique en présence de matériaux ferromagnétiques, nous admettons, en première approximation, que la perméabilité μ_r est indépendante de l'excitation magnétique au point considéré; de tels circuits magnétiques seront dits linéaires et dans ce cas pour des champs localisés :

$$\mathcal{R} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \int_{\Gamma} \frac{dl}{S}$$

Nous limiterons l'étude théorique à ce seul cas; une extension sera envisagée dans les applications.

2. Circuits électriques à courant continu.

Une source de tension localisée U alimente un résistor constitué de fils conducteurs de section constante S , de longueur l et de conductivité γ ; si ce résistor est plongé dans un milieu isolant dont la conductivité est négligeable par rapport à celle des fils conducteurs, alors ceux-ci sont parcourus par un courant I .

$$I = JS \text{ avec } U = RI \text{ et } R = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{l}{S}; \text{ } J \text{ est le module}$$

du vecteur densité de courant \vec{J} .

Dans le cas d'une isolation imparfaite, la conductivité du milieu n'est plus négligeable et il passe un courant en dehors du fil conducteur : il s'agit d'un courant de fuite électrique.

3. Circuits électriques et circuits magnétiques (linéaires).

L'étude des circuits magnétiques présente donc des analogies avec celle des circuits électriques. Ces analogies résultent d'une similitude des lois locales de l'électrocinétique (en l'absence de champ magnétique variable) traduites par les expressions :

$$\vec{J} = \gamma \vec{E}; \quad \text{div } \vec{J} = 0; \quad \overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = \vec{0}$$

et de celles de la magnétostatique (en dehors des courants) :

$$\vec{B} = \mu \vec{H}; \quad \text{div } \vec{B} = 0; \quad \overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{0}.$$

On retrouve des comportements analogues des deux types de circuit notamment au niveau de :

- la loi d'OHM (loi d'HOPKINSON pour les circuits magnétiques),
- la loi de POUILLET,
- la loi de conservation des courants aux nœuds des circuits électriques et celle de conservation des flux aux lieux de jonction des circuits magnétiques,
- du théorème de superposition avec les circuits magnétiques linéaires,
- la « conduction magnétique » dans un tore avec entrefer étroit ; la réluctance se réduit pratiquement à celle de l'entrefer comme la résistance électrique peut se réduire à celle du milieu le moins conducteur lors d'une association série.

Néanmoins, comme toute « analogie », la correspondance présente des limites ; en particulier, si le courant I est lié à l'existence d'un déplacement de charges électriques, on ne peut aucunement associer au flux Φ un déplacement de charges.

4. Réluctance et flux.

De cette étude limitée, il découle qu'il est possible de considérer la réluctance d'un circuit magnétique comme une grandeur caractéristique, calculable à partir des dimensions et des matériaux qui constituent ce circuit. En réalité, comme la résistance de certains dipôles dépend du courant qui les traverse, la réluctance d'un circuit magnétique varie avec l'état d'aimantation, donc avec le flux pour un circuit donné ; c'est pour cette raison que le calcul d'un circuit magnétique se fait souvent à partir d'un flux donné.

Les difficultés rencontrées au cours des mesures qui vont suivre et notamment leur reproductibilité sont partiellement liées aux variations de la réluctance avec le flux.

III. MESURES.

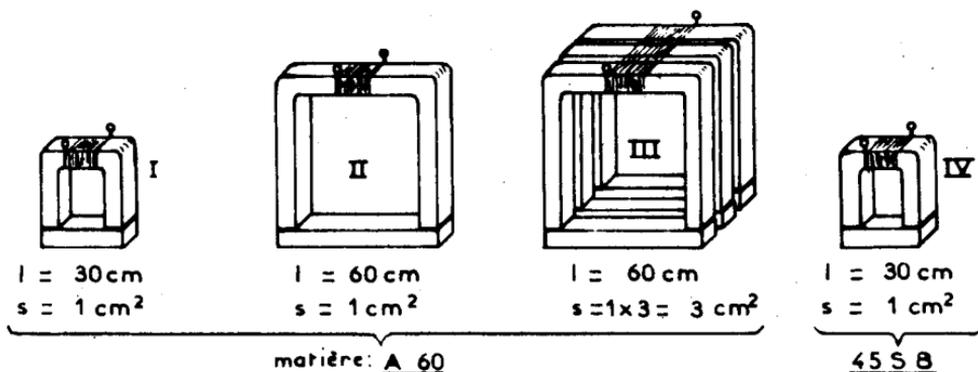
Etude de la variation de la réluctance en fonction des caractéristiques du circuit.

1. Matériel utilisé.

Caractéristiques des matériaux :

- A 60 : fer + 0,4 % de carbone
+ 0,1 % de phosphore et de soufre ;
- 45 S 8 : fer + 0,45 % de carbone
+ 2 % de silicium + 0,6 % manganèse.

Formes du circuit :



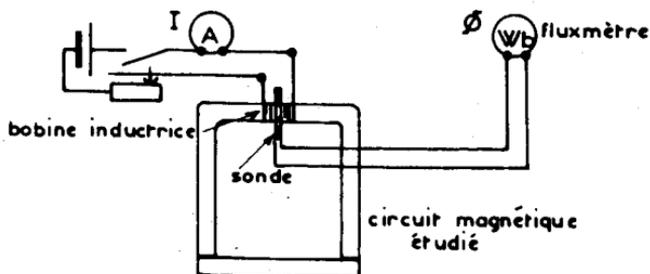
Bobine inductrice $\mathcal{N} = 30$ spires :

fluxmètre Grassot 1 division \Leftrightarrow 0,2 mWb,

sonde Grassot : 4 000 cm² — 400 tours,

sonde Jeulin : 2 000 cm² — 200 tours.

2. Montage.



3. Méthode.

Intensité du courant inducteur : 3 A.

Force magnétomotrice identique pour toutes les mesures :
 $30 \times 3 = 90 \text{ A}$.

On relève la valeur du flux total à travers la sonde pour chaque circuit.

Précautions à prendre :

- * Désaimanter les circuits magnétiques entre les mesures (par un choc brusque avec un petit marteau par exemple).
- * Vérifier la « portée » de l'armature, c'est-à-dire le fait que l'appui de l'armature soit total sur les 2 extrémités du reste du circuit.

4. Mesures.

Circuit N°	Longueur cm	Section cm ²	Nature acier	Fluxmètre** avec			
				sonde Grassot		sonde Jeulin	
				Lecture n. de div.	Valeur mWb	Lecture n. de div.	Valeur mWb
I	30	1	A 60	40	8	20	4
II	60	1	A 60	23	4,6	11	2,2
III	60	3	A 60	*		33	6,6
IV	30	1	4558	20	4	10	2

* Il n'a pas été possible de mesurer la déviation dans l'expérience III avec la sonde Grassot, de diamètre d'ouverture trop faible devant la section des 3 circuits accolés.

** Voir aussi construction d'un fluxmètre B.U.P. n° 651, page 551.

5. Constatations.*a) MESURES SUR LES CIRCUITS I ET II*

(même matériau A 60,
 même section 1 cm²).

A force magnétomotrice constante, lorsque la longueur du circuit double, le flux diminue de moitié et donc la réluctance \mathcal{R} a doublé.

La réluctance du circuit est proportionnelle à sa longueur.

b) MESURES AVEC LES CIRCUITS II ET III

(même matériau A 60,
même longueur 60 cm).

A force magnétomotrice constante, lorsque la section du circuit triple, le flux triple et donc la réluctance \mathfrak{R} a été divisée par 3.

La réluctance du circuit est inversement proportionnelle à sa section.

c) MESURES AVEC LES CIRCUITS I ET IV

(même longueur 30 cm,
même section 1 cm²).

* La composition chimique des matériaux est différente.

* Les flux sont différents ; la force magnétomotrice étant constante, la réluctance varie avec la perméabilité du circuit magnétique. En particulier, plus la perméabilité est grande, plus la réluctance est faible et le flux de fuites est d'autant plus faible.

Remarque.

La « section » des bobines détectrices n'intervient pratiquement pas : le champ \vec{B} est très faible à l'extérieur du circuit magnétique.

6. Conclusions.

* Nous avons approximativement pu vérifier l'influence des différents paramètres intervenant dans l'expression de la réluctance.

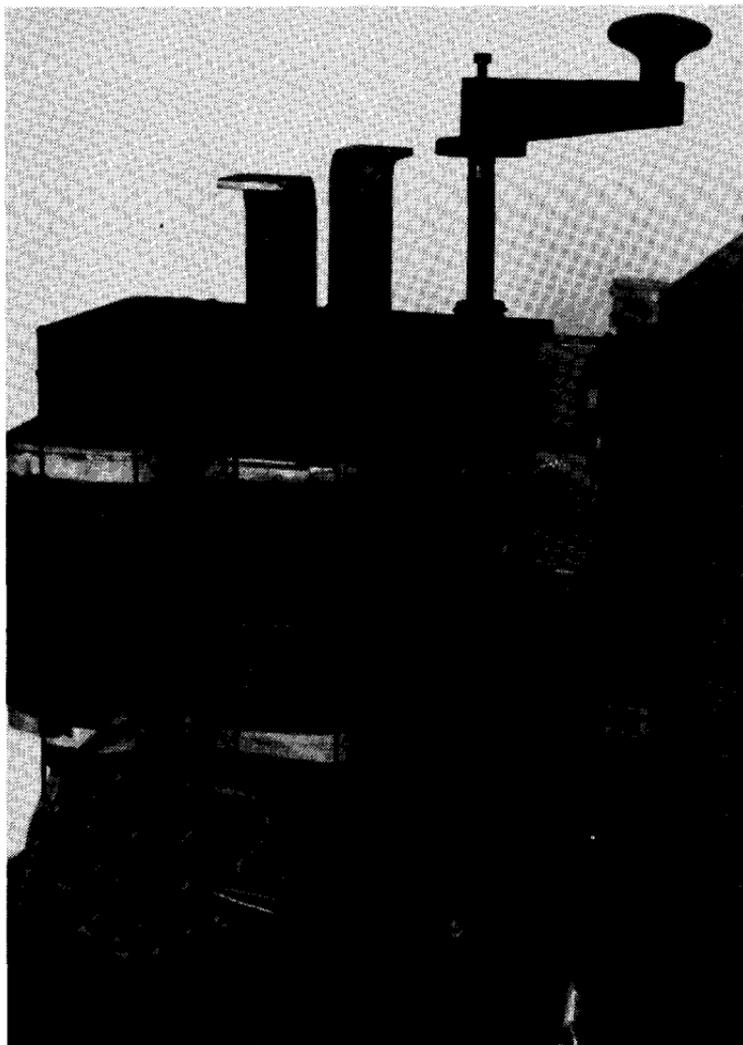
* Les circuits étudiés ont été construits entièrement aux ateliers du L.E.P. ; les mesures effectuées sont les valeurs obtenues au fluxmètre après de nombreux essais, à la division près. De plus, pour limiter les risques de non reproductibilité dans le temps, les travaux ont été repris mensuellement sur une durée de un an.

IV. APPLICATIONS.

1. En électrotechnique.

a) POSTE DE SOUDURE A ARC.

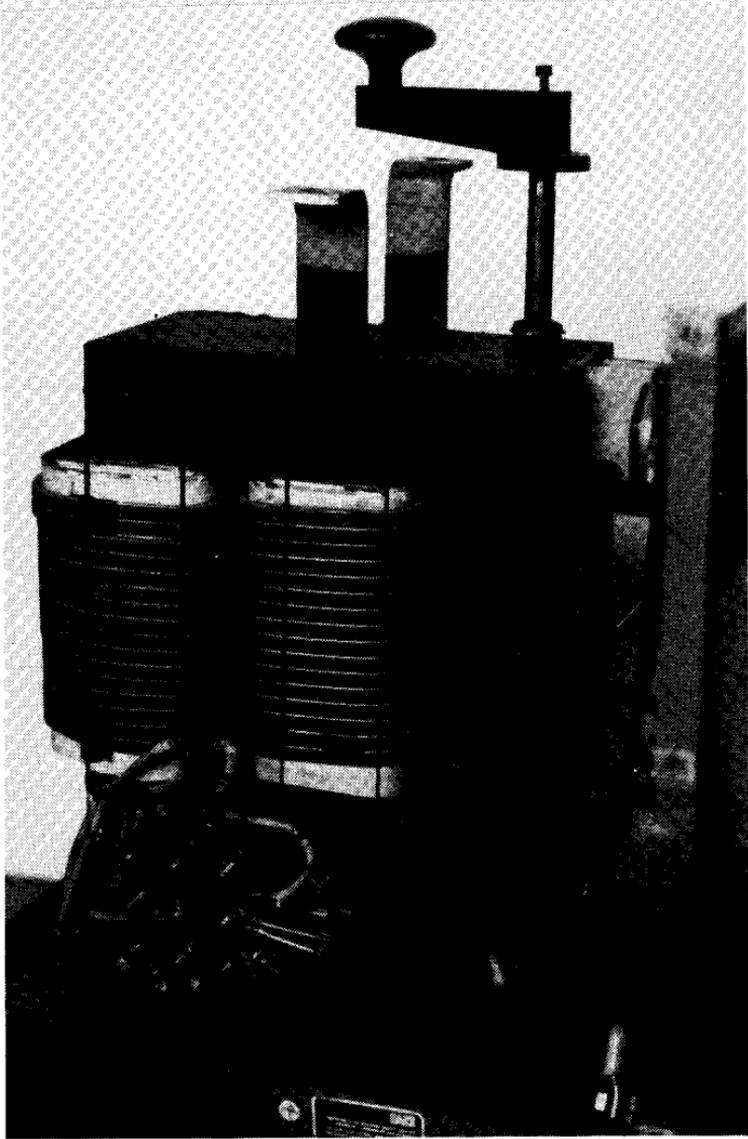
Le circuit magnétique est à réluctance variable grâce à un shunt magnétique réglable ; le flux créé au primaire peut être « dévié » du secondaire suivant la position du shunt : au secondaire, on peut donc obtenir un courant de soudage lui aussi réglable entre certaines limites.



Le shunt est éloigné du circuit magnétique ; la plus grande partie du flux produit par la bobine primaire est « canalisée » par le circuit magnétique : la tension au secondaire est maximale ainsi que le courant de soudage.

Le shunt est rapproché du circuit magnétique ; les lignes de champ se partagent entre le shunt et le secondaire : le flux

circulant à travers, ce dernier s'y trouve diminué ainsi que le courant de soudage.



Les positions intermédiaires du shunt permettent de régler le courant : la variation des caractéristiques du circuit, de sa réluctance, permet d'obtenir le réglage d'un courant électrique.

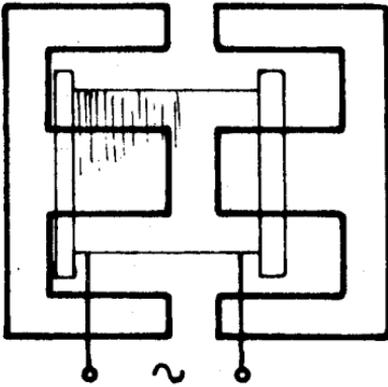
b) ÉLECTROAIMANT POUR CONTACTEUR TYPE LC1.

* *Caractéristiques et conséquences :*

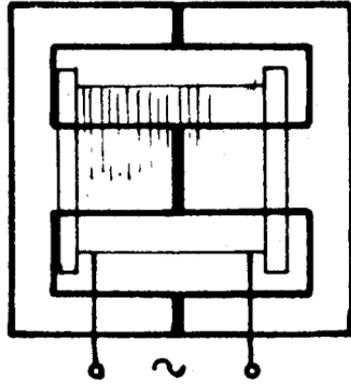
puissance apparente à l'appel 80 VA,

puissance apparente au maintien 8 VA.

A tension d'alimentation de valeur efficace constante, l'intensité efficace varie dans un rapport 10 entre l'appel et le maintien.



circuit magnétique ouvert
(appel).



circuit magnétique fermé
(maintien).

* *Justification :*

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}}$$

avec U, R, ω constants ; si I diminue, Z croît et l'inductance L augmente ; avec :

$$L = \frac{\mu N^2 S}{l} = \frac{N^2}{l/\mu S} = \frac{N^2}{\mathcal{R}}$$

Si le circuit magnétique est :

$$L_0 = \frac{N^2}{\frac{l}{\underbrace{\mu S}_{\mathcal{R}_{fer}}} + \frac{l_0}{\underbrace{\mu_0 S}_{\mathcal{R}_{air}}}}$$

$$L = \frac{N^2}{l} = \frac{N^2}{\mathcal{R}_{fer}}$$

$$L_0 \approx \frac{N^2}{\frac{l_0}{\mu_0 S}} = \frac{N^2}{\mathcal{R}_{air}}$$

la réluctance est élevée
et donc
l'inductance faible

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}_{fer}}$$

la réluctance est faible
et donc
l'inductance élevée

* *Conclusion :*

L'inductance au maintien est donc beaucoup plus élevée que l'inductance à l'appel ; il en est de même de l'impédance Z : le courant au maintien est donc plus faible qu'à l'appel par suite d'une *diminution* de la réluctance du circuit magnétique.

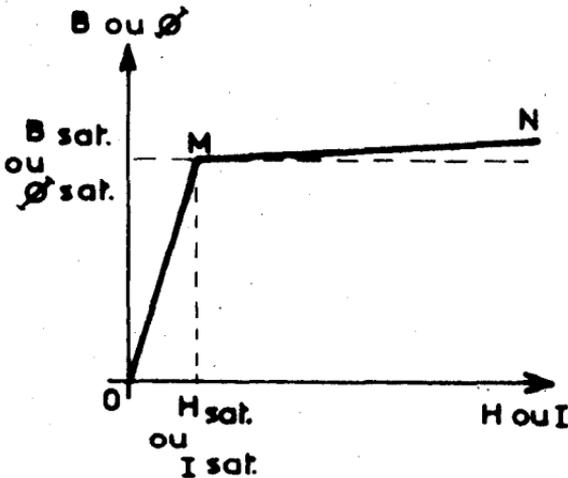


Contacteur LC1 (Télemécanique).

2. En électronique : les transformateurs générateurs d'impulsions.

a) PRINCIPE.

Dans certaines applications, la saturation du circuit magnétique est recherchée ; pour cela, on utilise des matériaux dont la courbe d'aimantation présente un palier de saturation à faible pente.



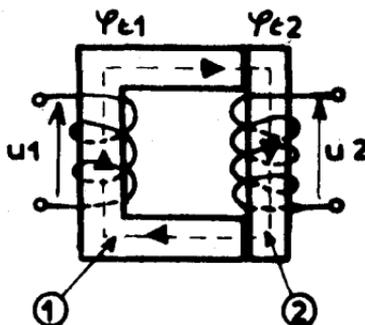
- zone OM : le matériau est non saturé (μ grand, réluctance faible),
- zone MN : le matériau est saturé ; une variation de l'excitation ΔH n'entraîne qu'une très faible variation du champ ΔB et donc du flux $\Delta \Phi$. De plus, la saturation est obtenue pour une excitation H_{sat} relativement faible.

b) APPLICATION : TRANSFORMATEUR D'IMPULSIONS.

* Hypothèses simplificatrices :

Nous supposons tensions, courants et flux sinusoïdaux.

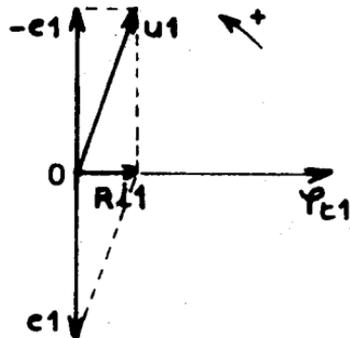
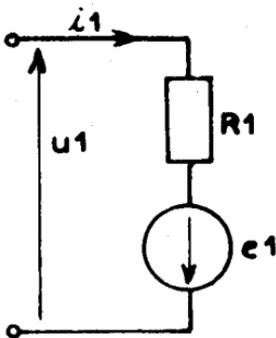
* Constitution :



Le circuit magnétique est hétérogène. La partie (1) est en acier doux et la partie (2) faite d'un matériau à saturation brusque ; il y a souvent 2 enroulements secondaires.

* Fonctionnement :

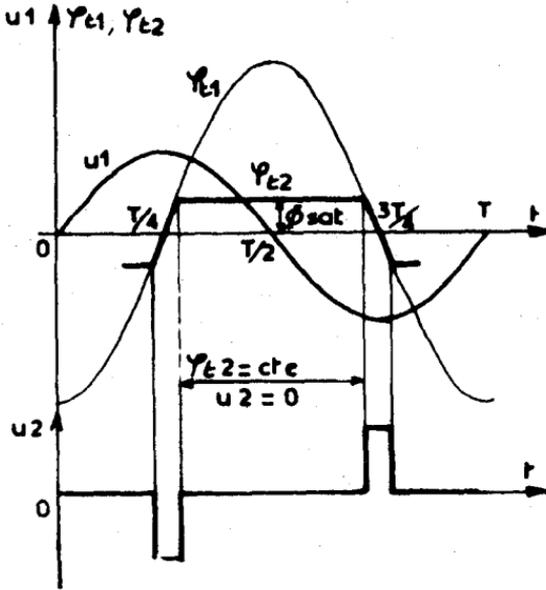
Il n'y a de tension au secondaire que lorsque le flux dans le circuit magnétique varie. Si le primaire est alimenté par une tension sinusoïdale u_1 , la f.é.m. d'auto-induction e_1 est également sinusoïdale d'après nos hypothèses ; en négligeant la résistance R_1 du bobinage, $e_1 \simeq -u_1$.



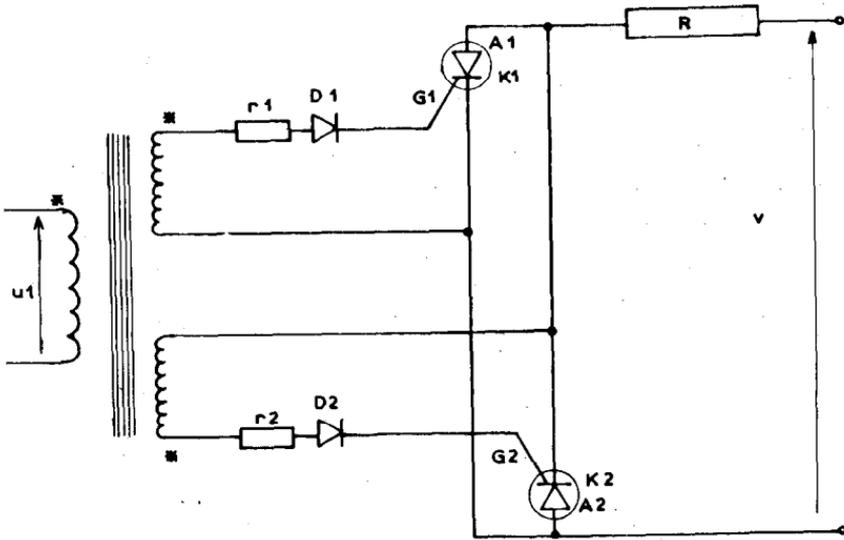
Le flux φ_{t1} , flux instantané total à travers la bobine du primaire est tel que $e_1 = -\frac{d\varphi_{t1}}{dt}$, il est en avance de $\pi/2$ sur e_1 et donc en retard de pratiquement $\pi/2$ sur u_1 .

Tant que le matériau saturable n'est pas saturé, sa réluctance est faible, les fuites dans l'air sont faibles, et $\varphi_{t1} = \varphi_{t2}$ (au voisinage des instants $T/4$ et $3T/4$). Dès que la saturation est atteinte, la réluctance du matériau augmente considérablement ($\varphi_{t2} = \Phi_{sat} = C^{ste}$) ; le flux φ_{t1} se conservant à tension primaire d'amplitude constante, la différence $\varphi_{t1} - \varphi_{t2}$ passe dans l'air (flux de fuite important).

Donc, une f.é.m. induite apparaît au secondaire lorsque le flux φ_{t2} varie, c'est-à-dire de façon impulsionnelle ; la tension secondaire est tantôt positive, tantôt négative suivant le signe de $d\varphi_{t2}/dt$ c'est-à-dire suivant le signe de la pente de la courbe $\varphi_{t2}(t)$. L'amplitude des impulsions est d'autant plus grande que la valeur de Φ_{sat} saturé est plus rapidement atteinte : le transformateur débite des impulsions de tension au secondaire.



Une application est envisageable : l'alimentation des circuits de commande de deux thyristors montés « tête-bêche ».



Ce montage nécessite des trains d'impulsions synchronisés avec le secteur ; un isolement galvanique des deux circuits d'amorçage est indispensable puisque les deux cathodes ne sont pas au même potentiel (un triac peut d'ailleurs résoudre cette difficulté).

V. CONCLUSIONS.

* Nous avons limité notre étude théorique aux circuits magnétiques linéaires, la perméabilité dynamique relative de la substance restant constante ; la courbe d'aimantation est rectiligne dans ce domaine et le circuit magnétique est dénué d'hystérésis ; dans ce cas, l'inductance de la bobine a pour valeur

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}}$$

* Si la réluctance du circuit magnétique est nulle, c'est-à-dire de perméabilité infinie, on peut écrire rigoureusement pour un transformateur parfait : $n_1 i_1 + n_2 i_2 = 0$ et les deux courants sont en opposition de phase ; c'est ainsi qu'au niveau d'un transformateur d'intensité, une des conditions à réaliser sera d'obtenir une réluctance du circuit magnétique aussi faible que possible. De plus, l'existence de fuites impose aussi la plus faible valeur de \mathfrak{R} et donc la plus grande valeur de μ : d'où l'emploi de tôles « Mumétal » de forte perméabilité relative et un circuit magnétique court.

* Les mesures de réluctance doivent donc être abordées dans des conditions bien déterminées de fonctionnement en ce qui concerne les caractéristiques du matériau à étudier. De plus, certains appareils de mesures et tubes d'oscillographes cathodiques utilisés pour mesurer sont constitués d'alliages fer-nickel à grande perméabilité se prêtant à la réalisation d'écrans magnétiques ; là encore pour que l'écran fonctionne au mieux, il faut que sa réluctance soit la plus faible possible, mais il est quelquefois indispensable d'en tenir compte pour les mesures, ce qui accroît encore leur difficulté et celle de leur reproductibilité.