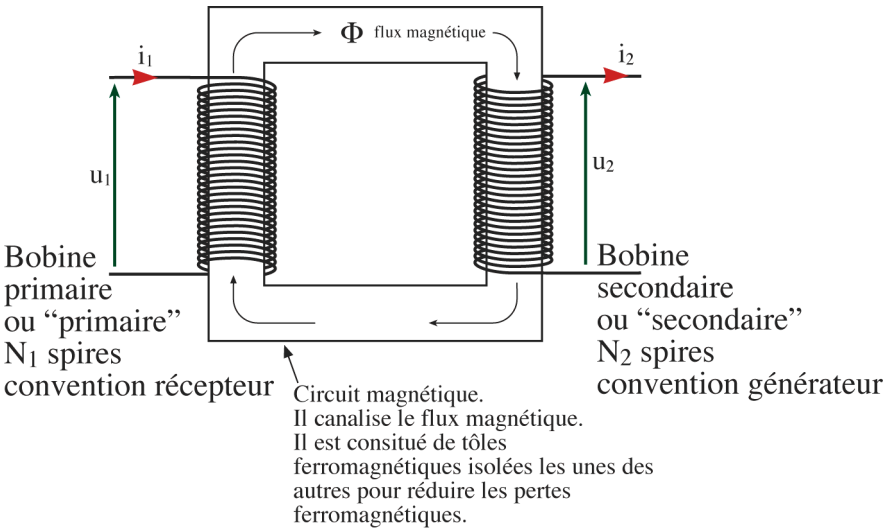
Transformateur

1 Présentation

1.1 Schéma



1.2 Principe de fonctionnement

Pour information

1.2.1 Rappel

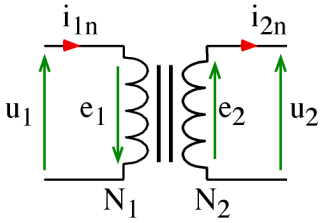
Loi de Faraday : une variation de flux à travers une spire créer une f.é.m. e. Inversement une f.é.m. e dans une spire crée une variation de flux à travers celle-ci.

$$e = -\frac{d\varphi}{dt}$$

1.2.2 Flux magnétique

Pour un transformateur parfait
L'enroulement du primaire, formé de N_1 spires, est le siège d'une f.é.m. :

$$e_1 = -N_1 \frac{d\varphi}{dt} \qquad et \qquad u_1 = -e_1$$



u_1 est sinusoïdal
Posons : $u_1 = U_1\sqrt{2}\cos\omega t$

D'où : $\frac{d\varphi}{dt} = \frac{U_1\sqrt{2}}{N_1}\cos\omega t$

Et : $\varphi = \frac{U_1\sqrt{2}}{N_1\omega}\cos(\omega t - \frac{\pi}{2})$

Le flux étant défini par la relation $b = \frac{\varphi}{s}$ où b est le champ magnétique à travers les spires et s la section (supposée constantes) du circuit magnétique.

Soit : $b = \frac{U_1\sqrt{2}}{N_1 s\omega}\cos(\omega t - \frac{\pi}{2})$

Posons : $\hat{B} = \frac{U_1\sqrt{2}}{N_1 s\omega}$ la valeur maximum du champ magnétique *b*.

Comme $\omega=2\pi f$, nous obtenons l'expression de la valeur efficace U_1 :

$\boxed{U_1 = 4{,}44 N_1 f s\hat{B}}$ c'est la **formule de Boucherot**.

1.2.3 Relation entre les tensions

Pour un transformateur parfait tout le flux crée par l'enroulement primaire traverse l'enroulement secondaire.

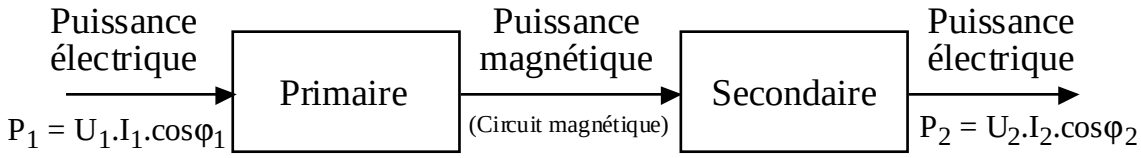
$u_1 = -e_1 = N_1\frac{d\varphi}{dt}$ et $u_2 = e_2 = -N_2\frac{d\varphi}{dt}$

Soit : $\frac{u_2}{u_1} = -\frac{N_2}{N_1} = -m$

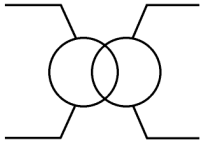
ou encore : $u_2 = -mu_1$

m est le rapport de transformation. Les tensions **u_1 et u_2 sont en opposition de phase**.

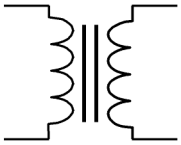
1.3 Transformation d'énergie



1.4 Symboles

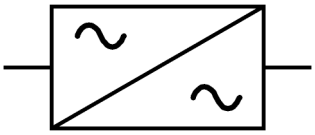


ou



Le transformateur est un <u>*convertisseur statique*</u> (pas de pièce en mouvement). Il transforme une tension sinusoïdale en une autre tension sinusoïdale de valeur efficace différente.

symbole :



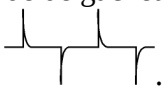
1.5 Transformateurs particuliers

1.5.1 Transformateur d'isolement

Transformateur de rapport m = 1 utilisé pour l'isolation galvanique entre deux parties d'une installation électrique.

En effet, quelque soit le transformateur, il n'y a aucun contact électrique entre le circuit primaire et le circuit secondaire.

1.5.2 Transformateur d'impulsion

Utilisé pour la commande de gâchette des thyristors, il transforme un signal carré en signal impulsionnel  .

2 Transformateur parfait

Parfait : il n'y a aucune perte ; le rendement est de 100%

On définit **<u>le rapport de transformation m</u>** par : $\boxed{m = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}}$

si m > 1, le transformateur et <u>élévateur</u> de tension ;
si m < 1, le transformateur est <u>abaisseur</u> de tension.

de plus $m = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}$

Comme le transformateur est parfait : $P_1 = P_2$; $Q_1 = Q_2$; $S_1 = S_2$; et $\varphi_1 = \varphi_2$.

Remarque : en observant les valeurs instantanées $u_1(t)$ et $u_2(t)$, on constate quelles sont en opposition de phase. C'est-à-dire que lorsque u_1 et maximum, u_2 est minimum. $m = -u_2/u_1$

3 Transformateur réel

3.1 Rapport de transformation

Le rapport de transformation se mesure <u>à vide</u> (pas de charge, I_2=0) $\boxed{m = \frac{U_{20}}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}}$

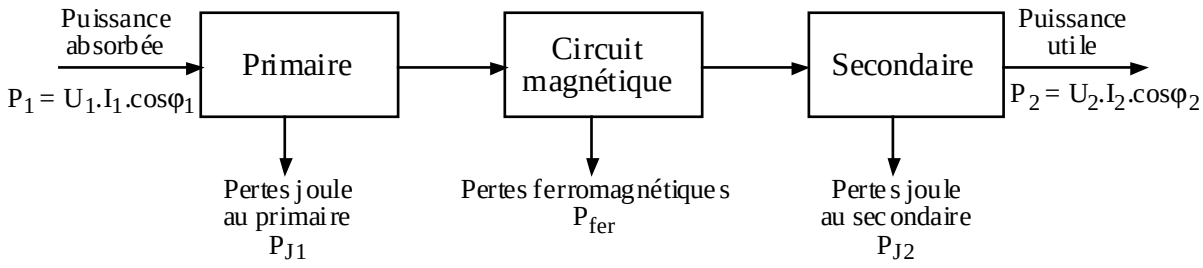
3.2 Transformateur en charge

On constate une chute de tension : $U_2 < m.U_1$.

Plus I_2 augmente (la charge augmente) plus U_2 diminue

Cette dernière observation vient du fait d'une chute de tension provoquée par la résistance du bobinage $\Delta U = r_2.I_2$ (si I_2 augmente ΔU augmente aussi).

3.3 Bilan énergétique



Les pertes fer sont dues à l'hystérésis du matériau ferromagnétique et aux courants de Foucault. Les pertes fer sont proportionnelles à B_{max}^2 -donc à U_1^2- et à la fréquence f (voir § 1.2.2.).

Bilan des puissances : $\boxed{P_1 = P_{J1} + P_{J2} + P_{fer} + P_2}$

3.4 Limitation des pertes fer

Pour réduire les pertes par hystérésis il faut choisir un matériau ferromagnétique avec un cycle d'hystérésis le plus étroit possible.

Pour réduire les pertes par courants de Foucault, le noyau est feuilleté. C'est à dire qu'il est constitué de tôles vernis, donc isolées les unes des autres. La taille des boucles de courant de Foucault est alors limitée par l'épaisseur de la tôle. Plus les boucles sont petites, plus les pertes sont réduites.

3.5 Rendement

$$\boxed{\eta = \frac{P_{utilisée}}{P_{absorbée}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{fer} + P_J}} \quad \text{ou} \quad \boxed{\eta = \frac{P_1 - P_{fer} - P_J}{P_1}}$$

$$P_J = P_{J1} + P_{J2}$$

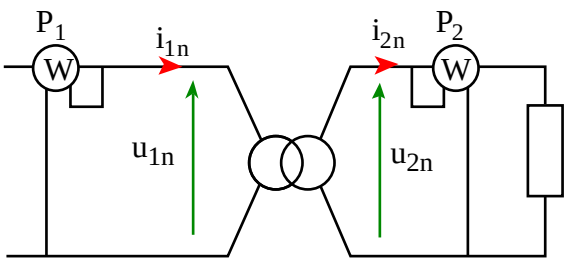
Le rendement varie en fonction des conditions d'utilisation du transformateur. Le meilleur rendement s'obtiendra pour les grandeurs d'utilisation nominales indiquées sur la plaque signalétique du transformateur.

Les bons transformateurs de fortes puissances peuvent atteindre un rendement de 98%.

4 Calcul du rendement

4.1 Mesure directe

Cette méthode consiste à mesurer avec deux wattmètres P_1 et P_2. $\eta = \frac{P_2}{P_1}$



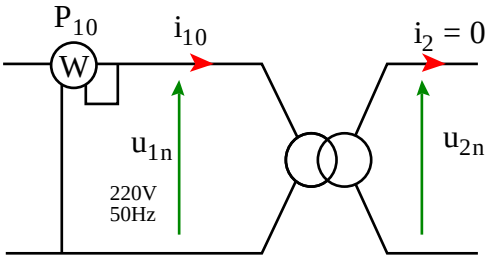
4.2 Mesure par la méthode des pertes séparées

Cette méthode consiste à évaluer les différentes pertes dans les conditions nominales d'utilisation.

4.2.1 Essai à vide : mesure des pertes fer

Montage :

Mesure à tension nominale.



A vide le circuit secondaire est ouvert : $I_2 = 0 \Rightarrow P_2 = 0$ et $P_{J2} = 0$

Bilan des puissances : $P_{10} = P_{J10} + P_{fer}$.

Toute l'énergie absorbée au primaire est utilisée pour compenser les pertes fer et les pertes joules au primaire.

Remarque : l'indice 0 (zéro) indique qu'il s'agit de valeurs à vide.

A vide I_{10} est très faible. Par conséquent $P_{J10} << P_{10}$.

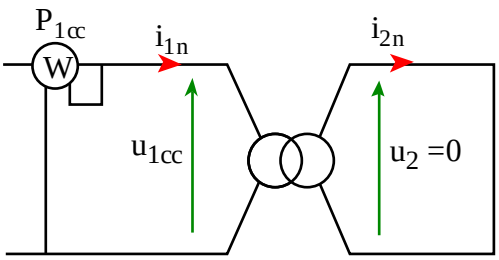
Finalement : **<u>essai à vide</u>** $\boxed{P_{10} = P_{fer}}$

Complément : les pertes fer dépendent essentiellement du champ magnétique donc de la tension U_1 et de la fréquence f. Comme ces deux grandeurs restent les mêmes à vide ou en charge les pertes fer mesurées à vide sont les mêmes que celles en charge.
Il faut donc naturellement faire cet essai à la tension nominale (ex. U_{1N} = 220 V).

4.2.2 Essai en court circuit : mesure des pertes joule

Montage :

Mesure à tension réduite et courant nominal.



Le circuit secondaire est en court-circuit : $U_2 = 0 \Rightarrow P_2 = 0$

Bilan des puissances : $P_{1cc} = P_{J1cc} + P_{J2cc} + P_{fer}$.

Toute l'énergie absorbée au primaire est utilisée pour compenser les pertes fer et les pertes joules.

Remarque : l'indice cc indique qu'il s'agit de valeurs mesurées en court-circuit.

En court-circuit, pour obtenir I_n, il faut travailler à très faible tension U_{1cc}. Par conséquent P_{fer} est très faible.

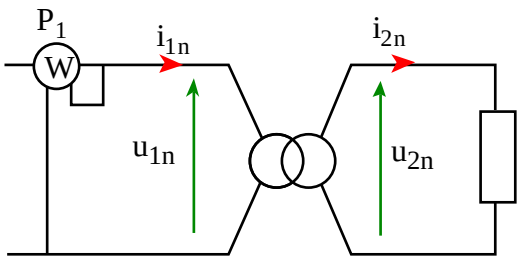
Finalement : **<u>essai en court-circuit</u>** $\boxed{P_{1cc} = P_J}$

4.2.3 Essai en charge

Montage :

il faut choisir une charge appropriée pour travailler dans les conditions nominales de tension et de courant.

On mesure P_1.



Rendement : $\eta = \dfrac{P_2}{P_1} = \dfrac{P_1 - P_{10} - P_{Jcc}}{P_1}$

5 Rôle du transformateur dans le transport de l'énergie électrique.

Chaque fois que l'on allume une lampe électrique ou que l'on démarre un moteur, il faut simultanément produire et transporter l'énergie. L'une des raisons principales du succès de l'électricité tient à ce qu'elle est très facilement transportable.

Les transformateurs sont les liens indispensables entres les différentes parties du réseau national de distribution de l'énergie électrique.

5.1 Structure du réseau national

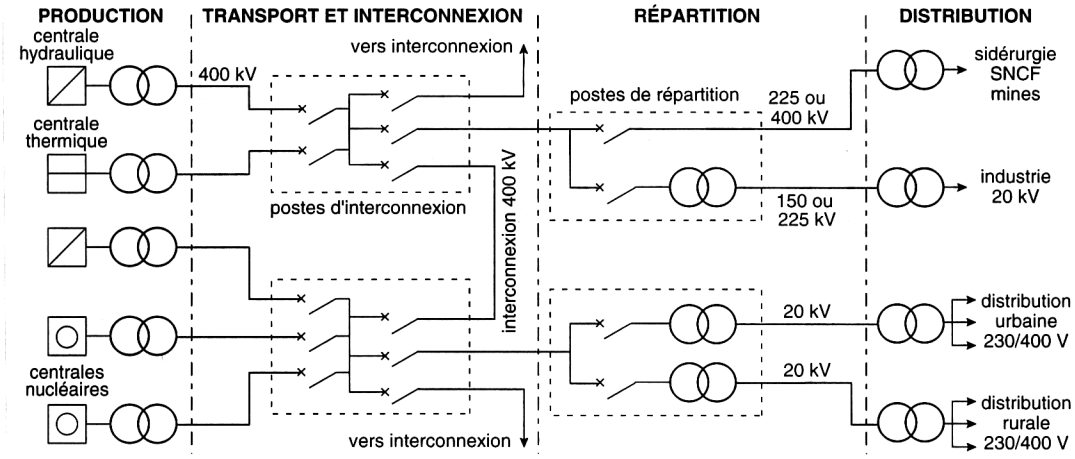


fig. 1. De la production à l'utilisation.

5.2 Conditions du transport

Perte en ligne $p = r_t . \frac{P^2}{U^2}$

P : puissance transportée
U : Tension au départ de la ligne
r_t : résistance de la ligne

Pour une puissance donnée, les pertes sont inversement proportionnelles au carré de la tension, ce qui explique l'intérêt de la très haute tension (THT) de 400 kV en France et de 750 kV au Canada (le Canada est beaucoup plus grand que la France).

Tableau 1. Résistance linéique des conducteurs en cuivre.

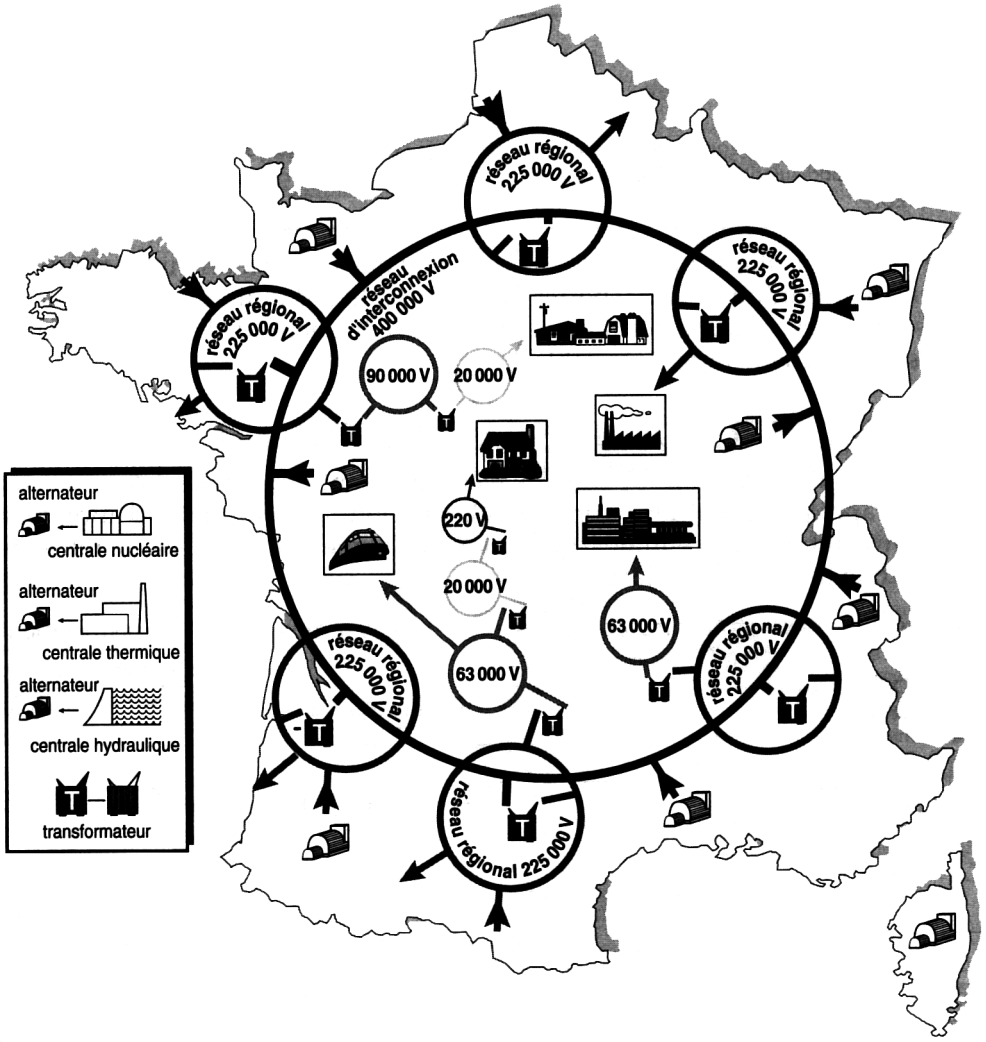
Section (mm^2)	120	185	300	500	800
Résistance (Ω/km)	0,153	0,0991	0,0601	0,0366	0,0221

Tableau 2. Les pertes d'énergie

Année	**1950**	**1960**	**1970**	**1980**	**1990**
Énergie transportée (TWh - 10^{12}Wh)	25,9	57,8	126,5	243,9	386,4
Pertes (TWh)	2,84	3,49	4,1	6	8,7
Pertes (%)	10,95 %	6 %	3,2 %	2,46 %	2,25 %

5.3 Rôle des postes d'interconnexion

Le réseau de transport, par son interconnexion, assure en permanence une liaison entre les centrales de production et les lieux de consommation, sachant que l'électricité ne se stocke pas.
Toutes les lignes à très haute tension (THT) sont interconnectées, c'est-à-dire qu'elles sont reliées par des *postes d'interconnexion* assurant la continuité entre les lignes de différents niveaux de tension. L'interconnexion permet: - des échanges d'énergie entre les régions; - en cas de défaut sur une ligne ou dans une centrale, l'alimentation par une autre ligne; - des échanges vers les pays voisins (exportation d'énergie).



§5 : Extraits de *Électrosystème 1ers STI*, H. Ney, édition Nathan Technique