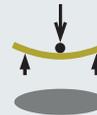
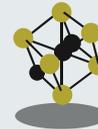
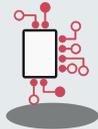
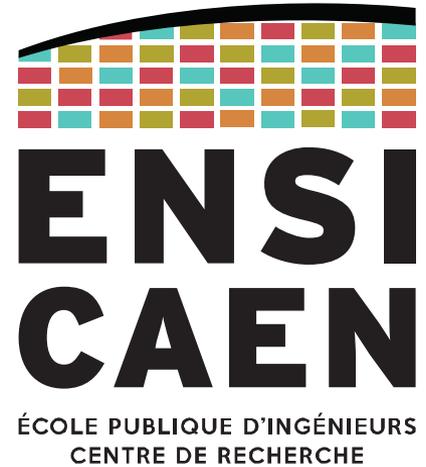


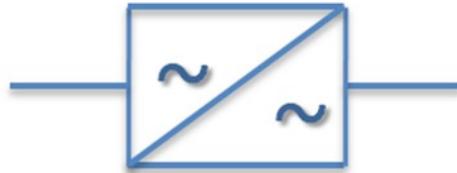
# Chapitre 4

# Transformateur



Le transformateur est un convertisseur d'énergie électrique.

Il a pour rôle de convertir des courants et tensions alternatifs en autres courants et tensions alternatifs. Il s'agit donc d'un **convertisseur AC/AC**.

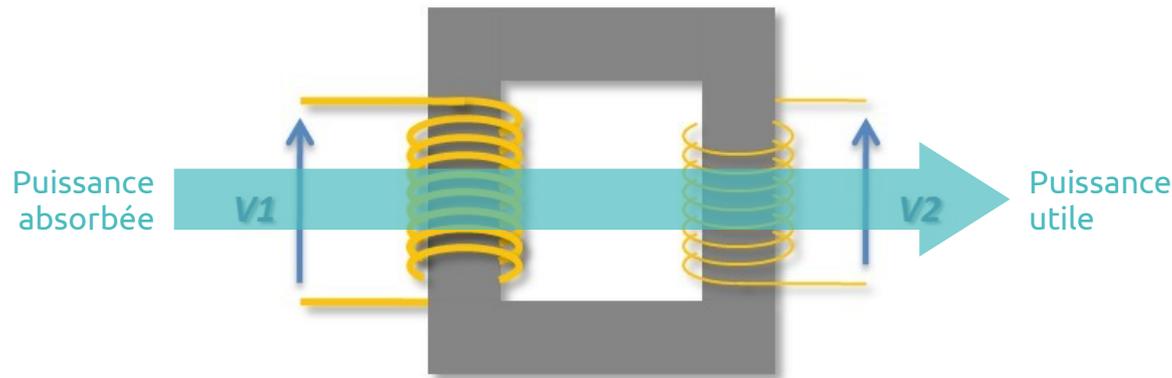


Dans le cas de courants et tensions de forme sinusoïdale, la fréquence est conservée et les amplitudes sont modifiées. Dans le cas de formes plus complexes en entrée, la forme en sortie peut être modifiée.

## Transfert de puissance

Le transformateur effectue un transfert direct d'énergie électromagnétique (sans stockage), avec un rendement  $> 98 \%$  selon les technologies et puissances de travail.

Par convention, le circuit primaire (noté 1 ou P) absorbe une puissance électrique et le circuit secondaire (noté 2 ou S) fournit une puissance électrique.



Nous verrons plus tard d'autres circuits (flyback, forward, ...) qui utilisent deux inductances couplées afin de stocker de l'énergie.

On retrouve les transformateurs dans une multitude d'applications.

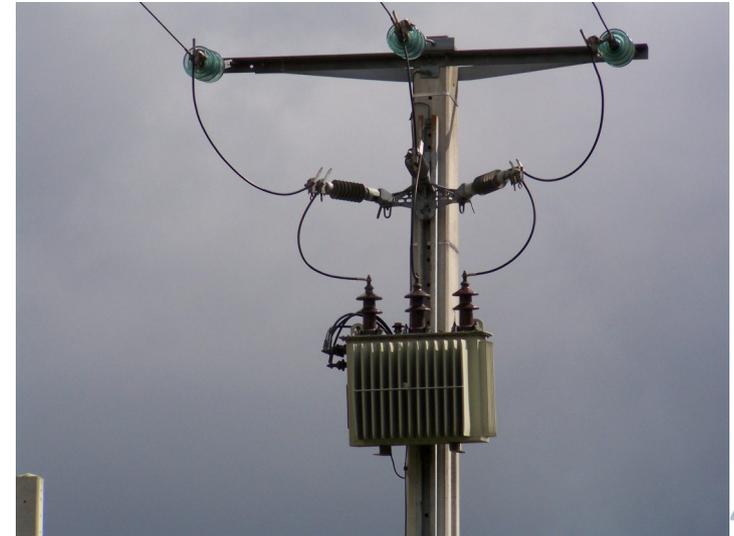
Transformateur HTB dans un poste source



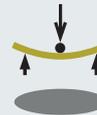
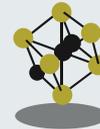
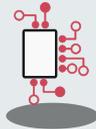
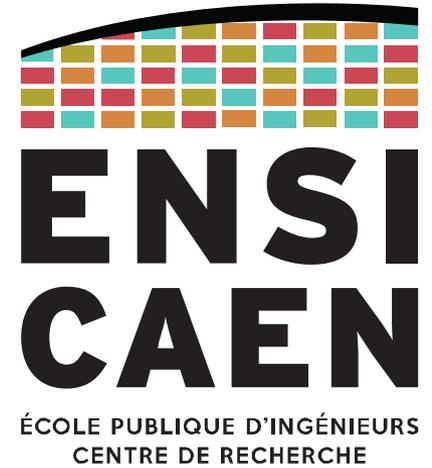
Transformateur  
230-415 V / 12-230 V



Transformateur  
HTA/BT 20 kV / 230 V

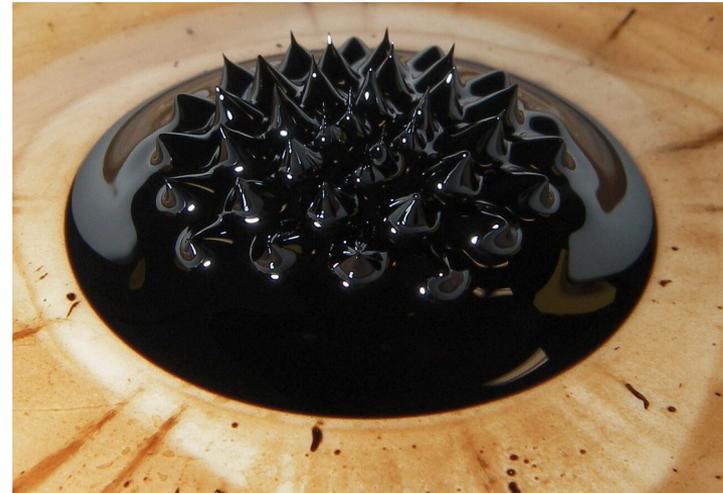
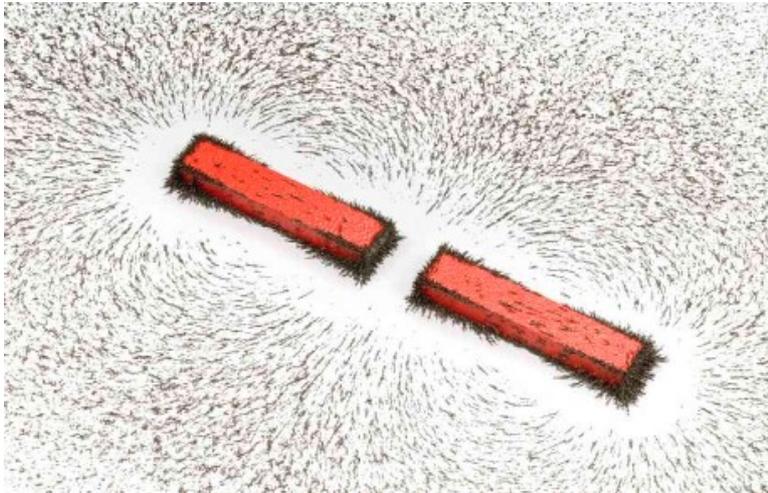


# ÉLECTROMAGNÉTISME



Pour comprendre comment fonctionne un transformateur, il convient de revenir sur les bases de l'électro-magnétisme.

Le **champ magnétique** est un espace dans lequel évoluent une infinité de lignes de champs qui ne se coupent jamais. Ces lignes de champs sont orientées, se déplaçant d'un nord magnétique vers un sud magnétique.



Le champ magnétique peut être caractérisé en tout point sous forme d'un vecteur :

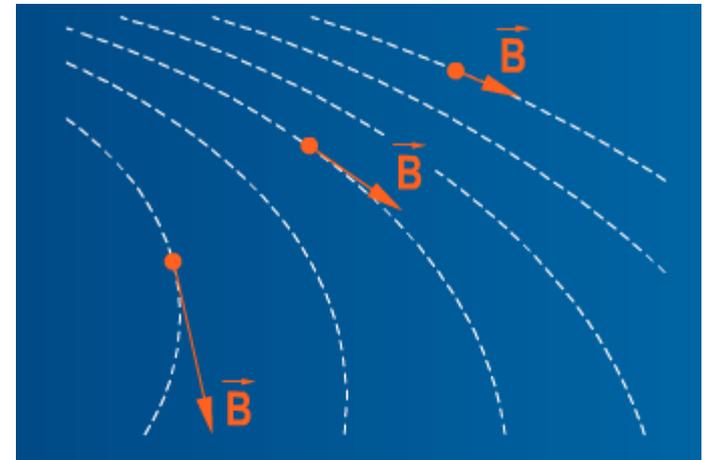
- Sa direction est tangente à la ligne de champ au point considéré
- Son sens est nord→sud à l'extérieur de l'aimant (sud→nord à l'intérieur)
- Son intensité se note  $B$ , et s'exprime en Tesla (T).

Ici  $\vec{B}$  désigne l'**induction magnétique**, ou densité de flux magnétique, ou encore champ magnétique.

Ce dernier terme est à proscrire, puisque  $\vec{H}$  (qu'on verra plus tard) est aussi parfois appelé champ magnétique.

Quelques ordres de grandeurs :

- Champ magnétique terrestre :  $47 \mu\text{T}$
- Aimant permanent :  $0,1 - 1 \text{ T}$
- IRM :  $0,1 - 7 \text{ T}$
- Electro-aimant :  $10 - 100 \text{ T}$



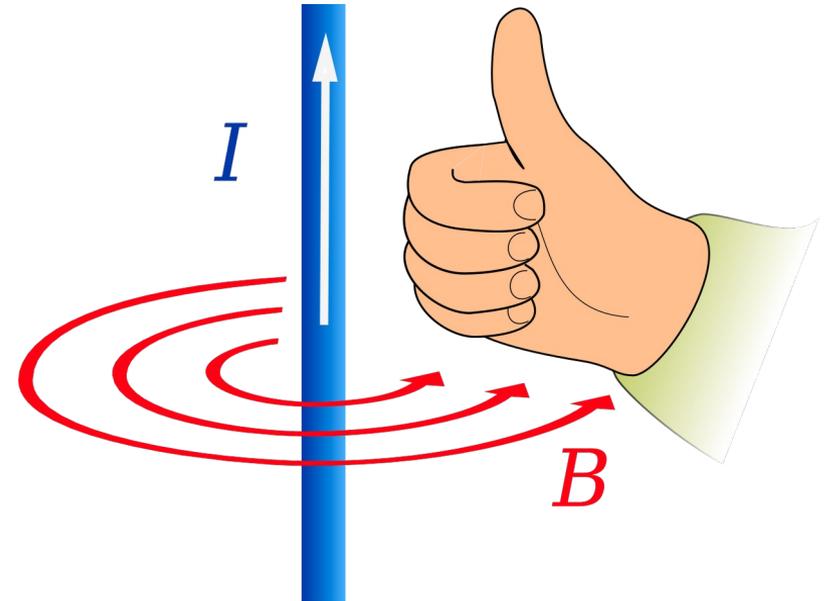
Un conducteur rectiligne parcouru par un courant d'intensité  $I$  va générer un champ magnétique circulaire en tout point de sa longueur.

Le sens des lignes de champ peut se trouver avec la règle de la main droite ou celle du tire-bouchon.

À une distance  $d$  du fil, la valeur de l'induction magnétique  $B$  s'exprime ainsi.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2 \pi d} = \frac{2 \cdot 10^7 I}{d} \quad \text{avec } \mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

la perméabilité magnétique du vide



En enroulant le fil sur lui-même, l'ensemble des lignes de champ se concentrent au centre de la spire.

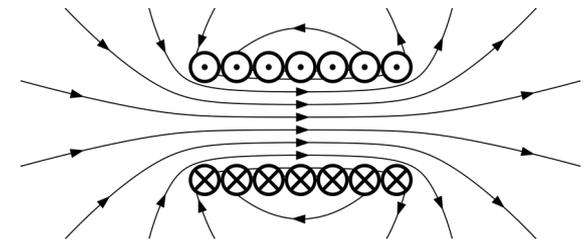
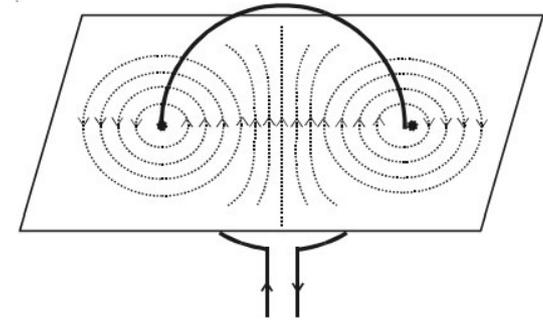
L'induction magnétique  $B$  au centre de la spire vaut :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2r} = \frac{2\pi \cdot 10^7 I}{r}$$

En formant un solénoïde de  $N$  spires et de longueur  $l$ , le champ magnétique à l'intérieur est constant et uniforme.

$$B = \mu_0 \frac{N I}{l}$$

Hypothèse : solénoïde de longueur  $l \gg$  rayon  $r$ .



Ainsi le solénoïde parcouru par un courant continu se comporte comme un aimant : on parle d'**électro-aimant**.

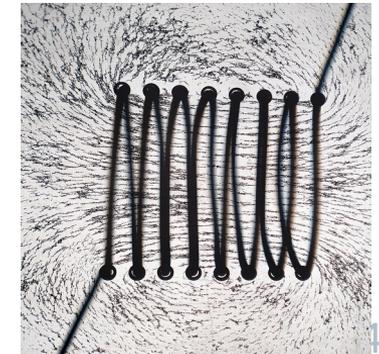
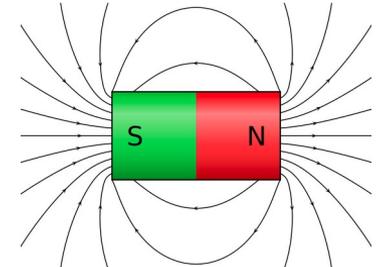
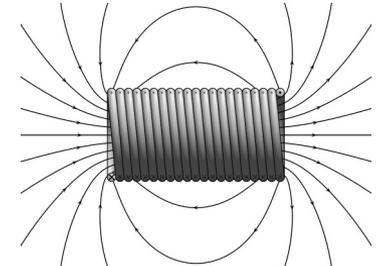
Pour augmenter l'induction magnétique  $B$ , on enroule la bobine autour d'un matériau ferromagnétique. La perméabilité relative  $\mu_r$  de ce matériau par rapport au vide augmente alors la perméabilité absolue  $\mu$ .

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{NI}{l} = \mu \frac{NI}{l}$$

On définit la grandeur **flux magnétique**  $\Phi$ , intégrant l'ensemble des lignes de champ embrassées dans une section  $S$  du solénoïde :

$$\Phi = B \cdot S \quad \text{exprimé en Wb (Weber)}$$

Note : il a été dit que  $B$  était parfois appelée « densité de flux magnétique ». Ça prend sens ici.



## Excitation magnétique et force magnétomotrice

Générer un champ magnétique à partir d'un courant électrique s'appelle **excitation magnétique  $H$** . Elle s'exprime en A/m :

$$H = \frac{NI}{l}$$

Note : on l'appelle aussi intensité du champ magnétique, ou champ magnétique (à proscrire pour cause de confusion avec  $B$ !).

Considérant un tube magnétique parfait<sup>(\*)</sup> de longueur  $l$ , on définit la **force magnétomotrice  $\varepsilon$**  exprimée en A ou A·tr:

$$\varepsilon = \int \vec{H} \cdot d\vec{l} = N \cdot I$$

(\*)Hypothèse :  $\mu$  constant  $\rightarrow \Phi_{entrant} = \Phi_{sortant} \rightarrow$  lignes de champ parallèles

### Magnétisme

$\varepsilon$	[A·tr] ou [A]	Force magnéto-motrice
$\Phi$	[Wb] = [V·s]	Flux magnétique
$B$	[T] = [Wb·m <sup>-2</sup> ]	Induction magnétique
$\mathcal{R}$	[H <sup>-1</sup> ]	Réductance
$\mathcal{P}$	[H]	Perméance
$\mu$	[H·m <sup>-1</sup> ]	Perméabilité magnétique
$H$	[A·m <sup>-1</sup> ]	Excitation magnétique

$$\varepsilon = \mathcal{R} \cdot \Phi \quad \text{Loi d'Hopkinson}$$

$$\mathcal{R} = l / \mu \cdot S = 1 / \mathcal{P}$$

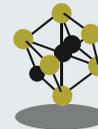
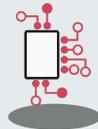
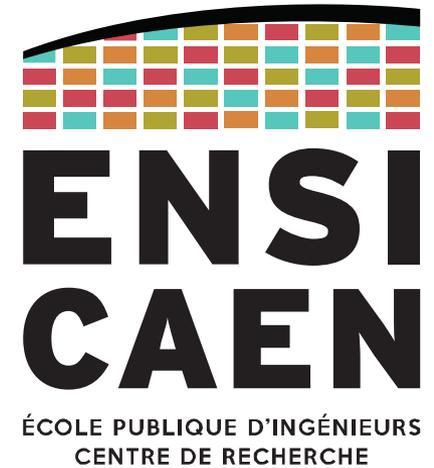
### Électricité

$U$	[V]	Tension
$I$	[A]	Intensité du courant
$J$	[A·m <sup>-2</sup> ]	Densité de courant
$R$	[Ω]	Résistance
$Y$	[S] = [Ω <sup>-1</sup> ]	Conductance
$\sigma$	[S·m <sup>-1</sup> ]	Conductivité
$E$	[V·m <sup>-1</sup> ]	Champ électrique

$$U = R \cdot I \quad \text{Loi d'Ohm}$$

$$R = l / \sigma \cdot S = 1 / Y$$

# PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT



Un solénoïde de  $N$  spires et soumis à flux magnétique  $\phi$  variable, verra apparaître à ses bornes une **force électro-motrice (f.é.m.)  $e$**  induite telle que :

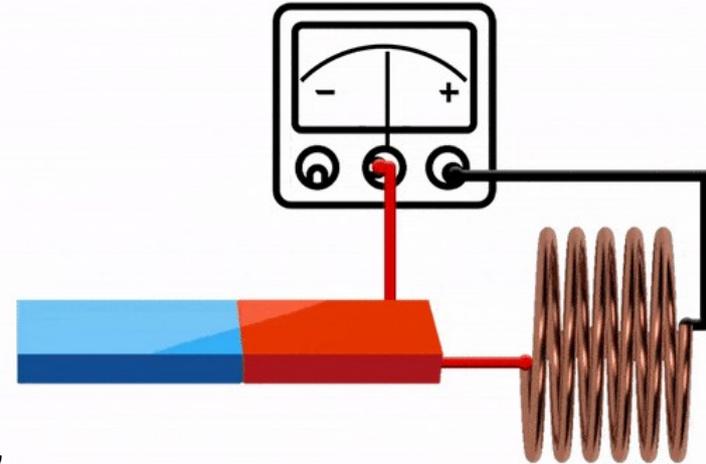
$$e(t) = -N \frac{d\phi(t)}{dt} \quad \text{exprimée en Volt (V)}$$

Il s'agit de la loi de Lenz-Faraday.

À noter que le champ magnétique créé par le courant induit vient s'opposer à la variation du champ magnétique initial :

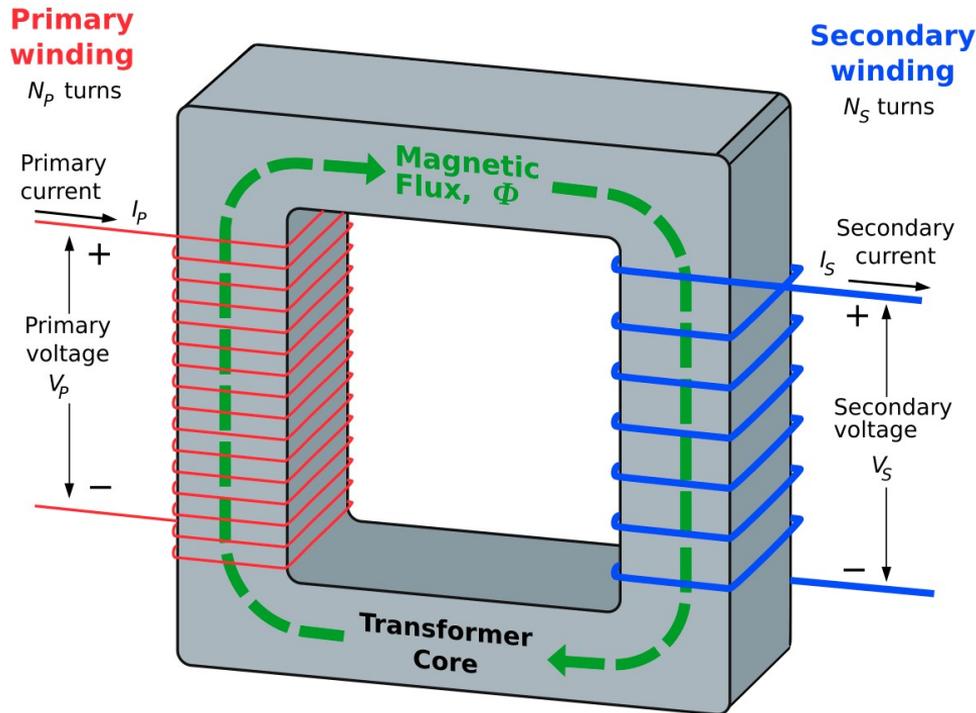
c'est ce qu'on appelle une loi de modération.

Note : la f.é.m. augmente avec la fréquence. À puissance donnée, on peut réduire la taille d'un transformateur en augmentant  $f$ .



## Transformateur monophasé parfait

En associant deux solénoïdes (l'un générateur de flux magnétique, l'autre recevant ce même flux magnétique), on forme un **transformateur** électrique.



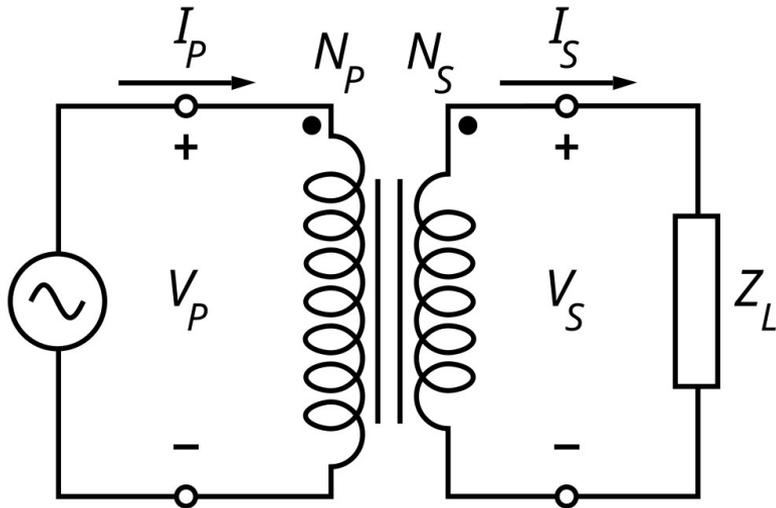
(1) Le **circuit primaire** est alimenté par une tension alternative  $v_1(t)$ .  
Le courant primaire  $i_1(t)$  génère donc un flux magnétique  $\phi_1(t)$  variable.

(2) Le **circuit magnétique** est constitué d'un noyau ferromagnétique (très forte perméabilité magnétique).  
On ne considère aucune perte de flux magnétique dans le noyau :  
 $\phi_2(t) = \phi_1(t)$

(3) Le **circuit secondaire** est traversé par un flux magnétique  $\phi_2(t)$  variable.  
On voit alors apparaître une f.é.m. aux bornes du circuit secondaire :  
 $v_2(t) = e(t)$

## Rapport de transformation

Considérant un transformateur idéal (bobines parfaitement couplées, aucune perte électrique ou magnétique), on obtient les relations suivantes.



Les indices 1 et P désignent le primaire.  
Les indices 2 et S désignent le secondaire.

Loi de Lenz-Faraday :

$$v_1(t) = -N_1 \frac{d\phi(t)}{dt} \quad \text{et} \quad v_2(t) = -N_2 \frac{d\phi(t)}{dt}$$

Loi de conservation de l'énergie :

$$S_1 = S_2 \quad \text{donc} \quad V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2$$

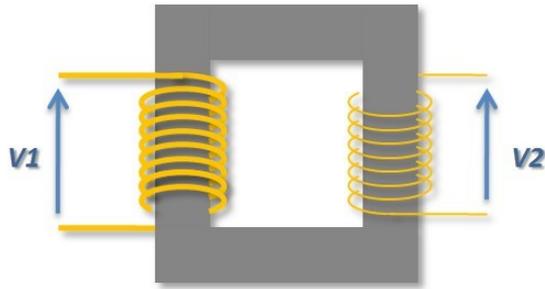
On définit ainsi le **rapport de transformation  $m$**  :

$$m := \frac{V_2}{V_1} = \frac{\Phi_2}{\Phi_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

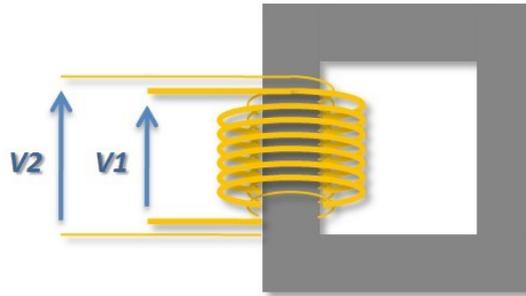
## Enroulements et circuit magnétique

Un transformateur est donc constitué de deux enroulements, l'un effectuant un transfert électro-magnétique d'énergie et l'autre un transfert magnéto-électrique.

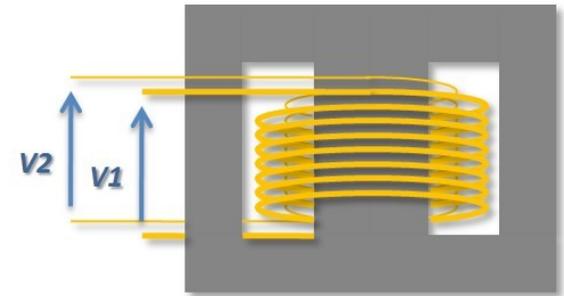
Le circuit magnétique permet de canaliser au mieux les lignes de champ magnétique.



Économique,  
relativement peu utilisé



Légèrement plus cher,  
mais moins de pertes.



Le plus complexe (et plus cher)  
à fabriquer, mais adapté aux  
très fortes puissances et  
minimisation des fuites.

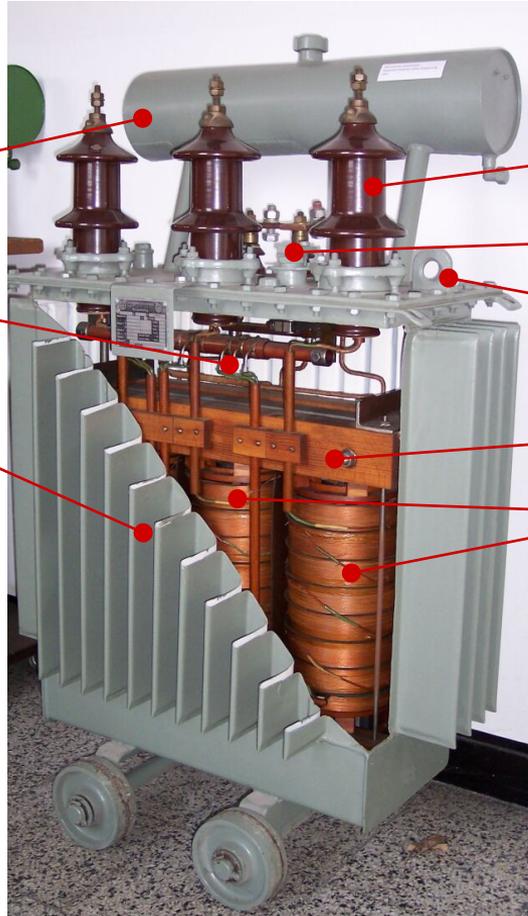
## Constitution

### Vue ouverte d'un transformateur triphasé

Réservoir d'expansion

Plongé dans un bain d'huile

Ailettes de dissipation thermique



Connexions haute tension

Connexions basse tension

Anneau de levage

Circuit magnétique

Enroulements

Le refroidissement d'un transformateur est

donné par 4 lettres : WXYZ

W : Nature du diélectrique

X : Circulation du diélectrique

Y : Nature du caloporteur

Z : Circulation du caloporteur

W/Y = Oil, Gaz, Air, Solid insulator

X/Z = Natural, Forced, Directed

## Plaque signalétique

Transformateur triphasé

Puissance apparente nominale  $S_n$

$U_{CC,\%}$  ou  $I_{CC,\%}$  en pourcent (\*)

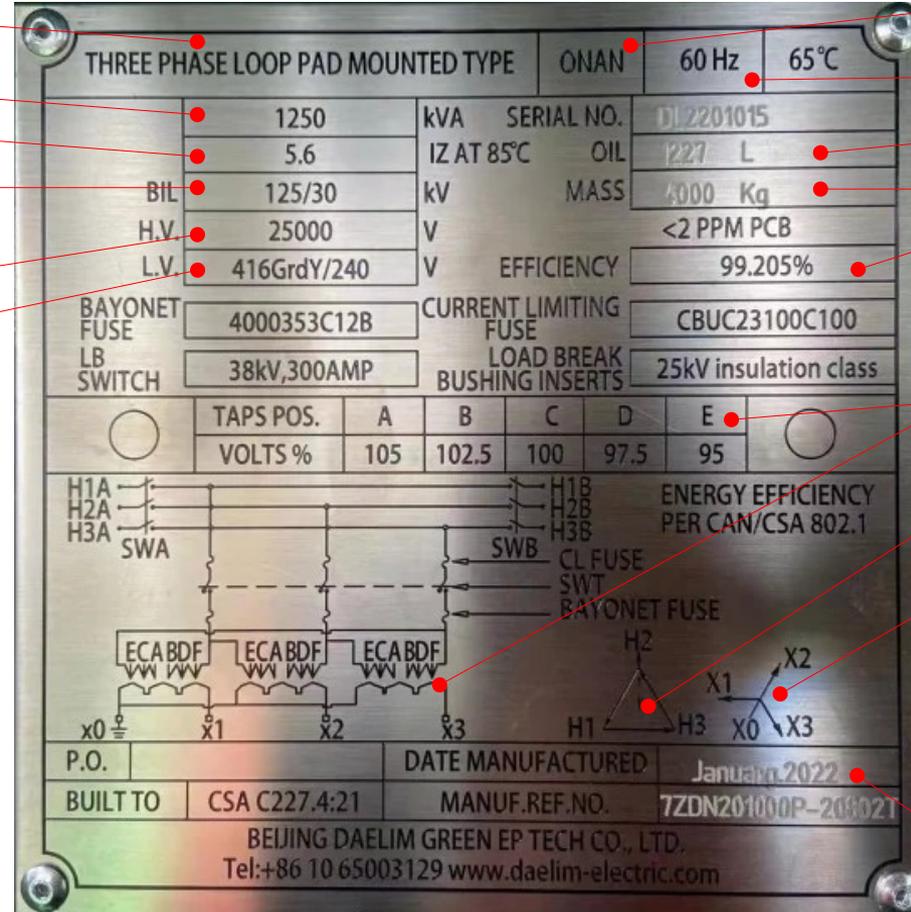
Basic Insulation Level

(tension supportable par le transfo)

Tension primaire nominale  $U_{1,n}$

Tension secondaire nominale  $U_{2,n}$

(416 V) ou  $V_{2,n}$  (240 V)



Diélectrique et refroidissement

Fréquence nominale de fonctionmt

Volume de diélectrique

Masse totale

Rendement

Tension du secondaire en fonction des connexions utilisées

Primaire en triangle (D ou Δ)

Secondaire en étoile avec neutre (Grdy = Grounded y)

Ici, transfo Dyn11 :

D = Delta au primaire

Yn = étoile + neutre au secondaire

Indice horaire 11h = décalage de  $-\pi/6$

Année de fabrication

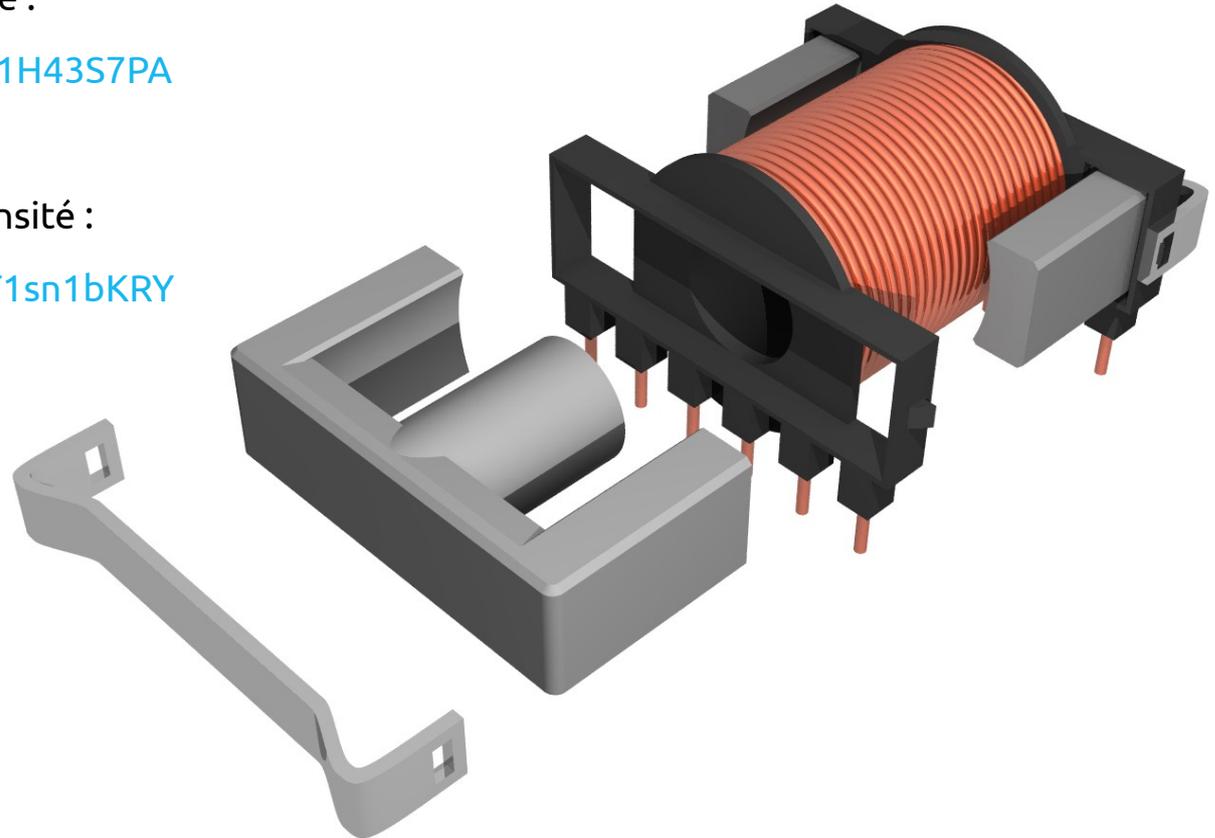
(\*)  $U_{CC,\%}$  indique le pourcentage de  $U_{1,n}$  à appliquer au primaire pour obtenir  $I_1 = I_{1,n}$ , en condition de secondaire court-circuité. Utilisé pour retrouver les pertes Joule et fuites magnétiques

Assemblage d'un transformateur triphasé :

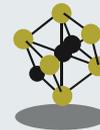
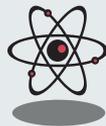
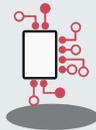
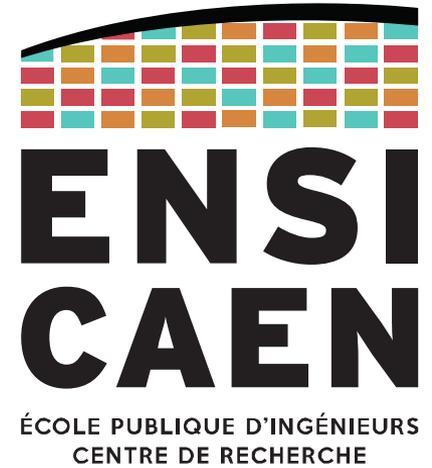
<https://www.youtube.com/watch?v=4EX1H43S7PA>

Electroboom, transformateur haute intensité :

<https://www.youtube.com/watch?v=LMT1sn1bKRY>



# MODÉLISATION

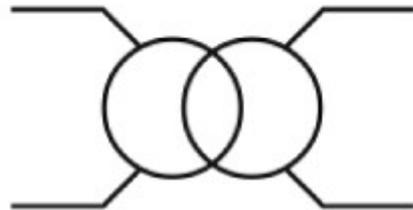


On rencontre deux symboles pour représenter un transformateur.

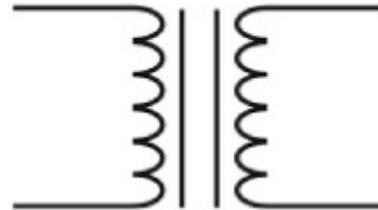
Le symbole (a) représente surtout le rapport de transformation d'un transformateur idéal, ainsi que son isolation galvanique (= absence de conducteur électrique entre les deux parties).

Le symbole (b) représente clairement les deux bobines, avec la double barre || indiquant le couplage électromagnétique de ces inductances. La fonction élévateur de tension ( $m > 1$ ) ou abaisseur de tension ( $m < 1$ ) est parfois mise en avant en utilisant une version asymétrique de ce symbole.

(a)



(b)



Sur ces deux symboles, on retrouve parfois un point côté primaire et un autre côté secondaire. Si les deux points sont en haut, alors les tensions primaire et secondaire sont en phase. Si un des deux points est en bas, alors les tensions sont en opposition de phase.

## Transformateur sans pertes

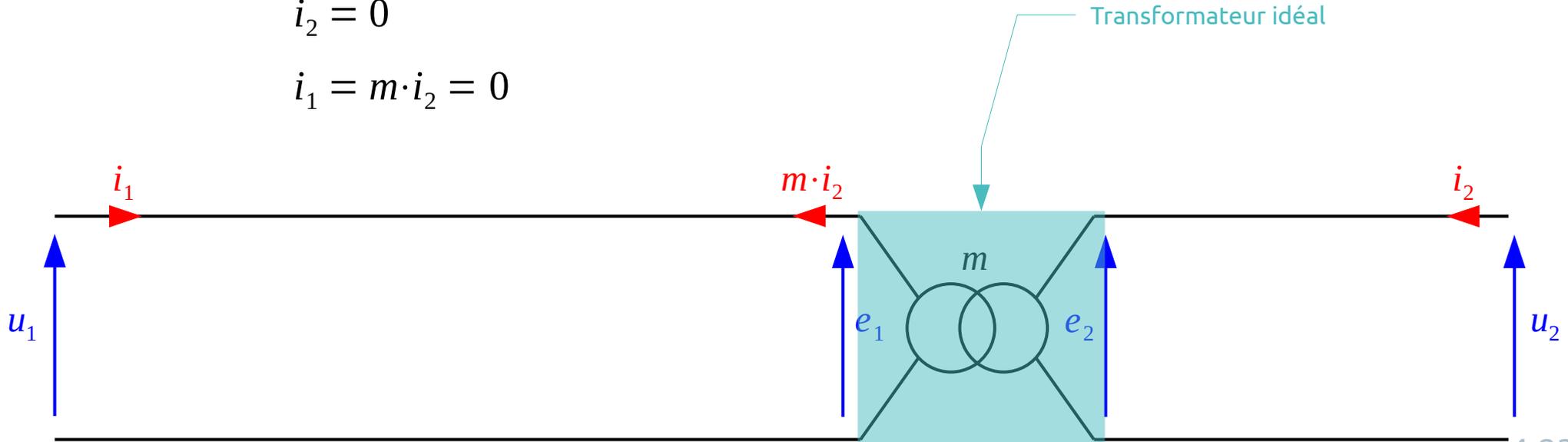
Partons d'un transformateur idéal, à vide (circuit secondaire ouvert).

Avec ces hypothèses, nous obtenons les relations suivantes :

$$u_2 = e_2 = m \cdot e_1 = u_1$$

$$i_2 = 0$$

$$i_1 = m \cdot i_2 = 0$$



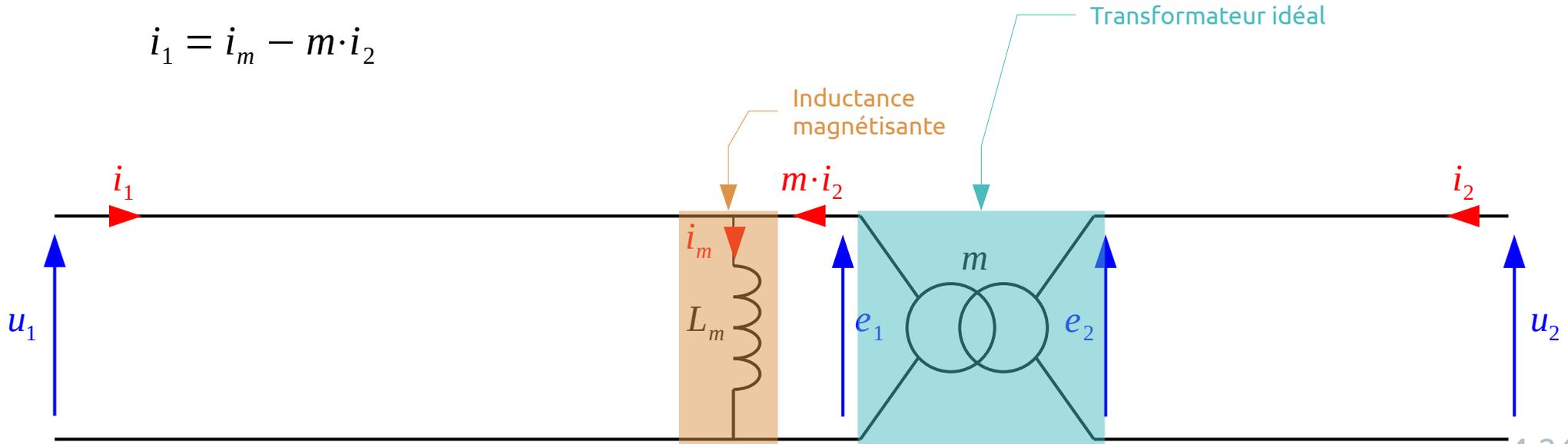
Inductance magnétisante

Transformateur à vide : inductance magnétisante

Théoriquement avec un secondaire ouvert,  $i_2$  et  $i_1$  sont nuls. Or il existe un courant circulant dans le circuit primaire, dû à un échange d'énergie (purement réactive) entre le circuit électrique et le circuit magnétique.

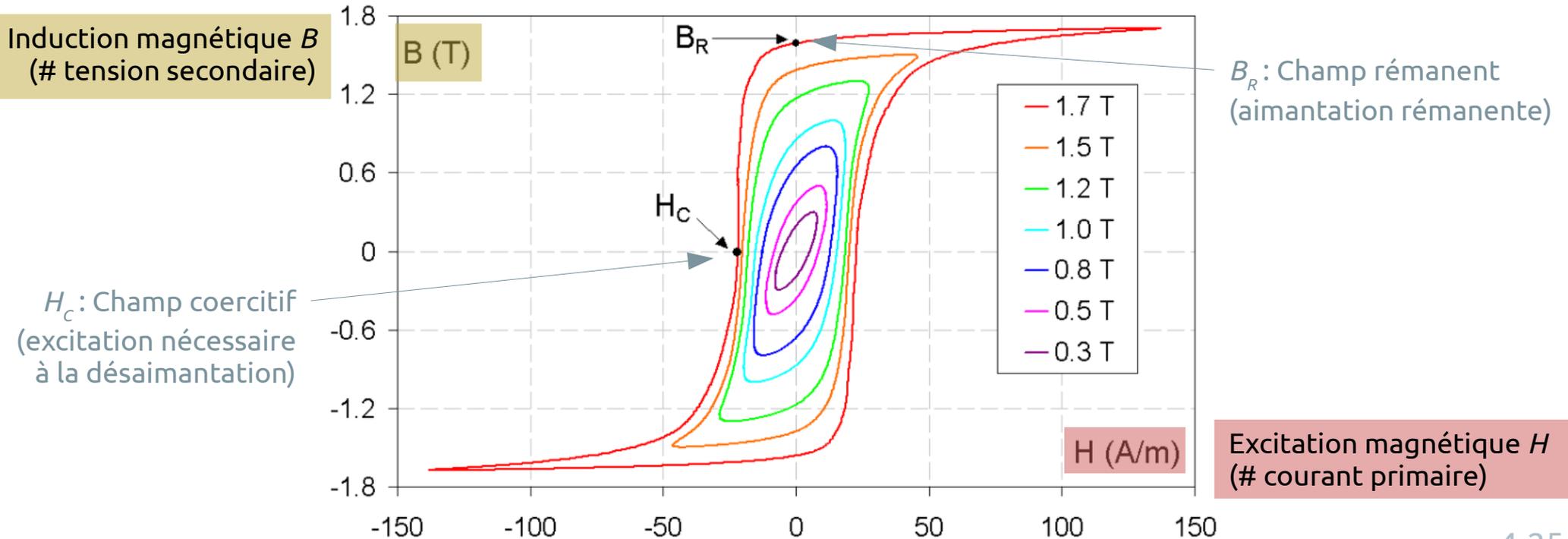
On symbolise ceci par une inductance magnétisante  $L_m$ , parcourue par le courant magnétisant  $i_m$ .

$$i_1 = i_m - m \cdot i_2$$



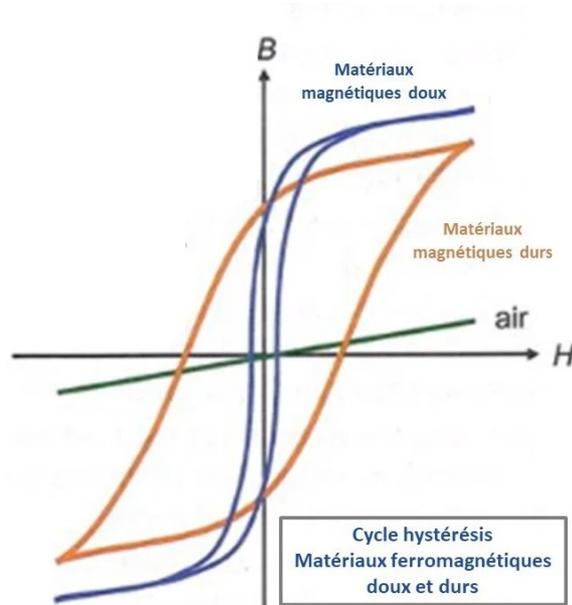
## Transformateur à vide : inductance magnétisante

L'aimantation d'un circuit magnétique dépend de son matériau et de sa perméabilité relative  $\mu_r$ .



## Transformateur à vide : inductance magnétisante

Le cycle d'hystérésis d'un matériau décrit (1) la facilité avec laquelle le moment magnétique de ses atomes s'aligne avec une excitation magnétique imposée, (2) sa rémanence magnétique et (3) sa résistance à la démagnétisation. La surface de cet hystérésis représente l'énergie dissipée dans le matériau pendant un cycle d'excitation magnétique.



On distingue les matériaux diamagnétiques ( $\mu_r \leq 1$  : cuivre, or, eau, ...), paramagnétiques ( $\mu_r \geq 1$  mais proche de 1 : air, aluminium, ...) et ferromagnétiques ( $\mu_r \gg 1$  : fer, cobalt, nickel, ...).

Ces derniers sont répartis en deux familles :

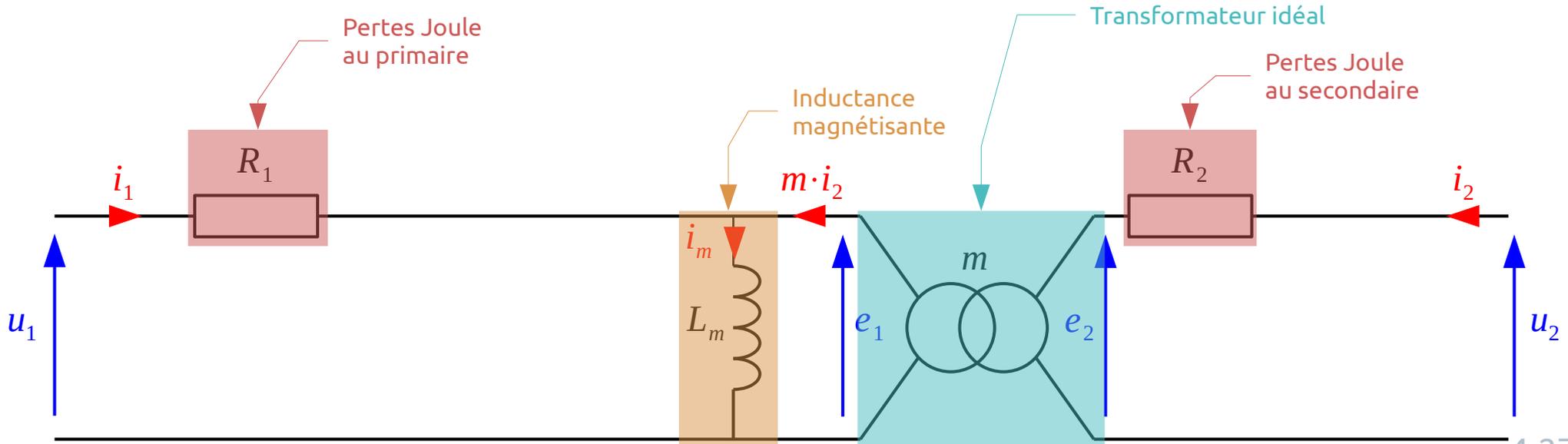
- Les matériaux durs : machines à aimants
  - Ex : Néodyme Fer-Bore, Acier, Cobalt, ...
- Les matériaux doux : transformateurs et machines
  - Ex : Fer, Nickel, Cobalt, ...

Pertes par effet Joule dans les conducteurs

Transformateur en charge : pertes Joule (ou pertes cuivre)

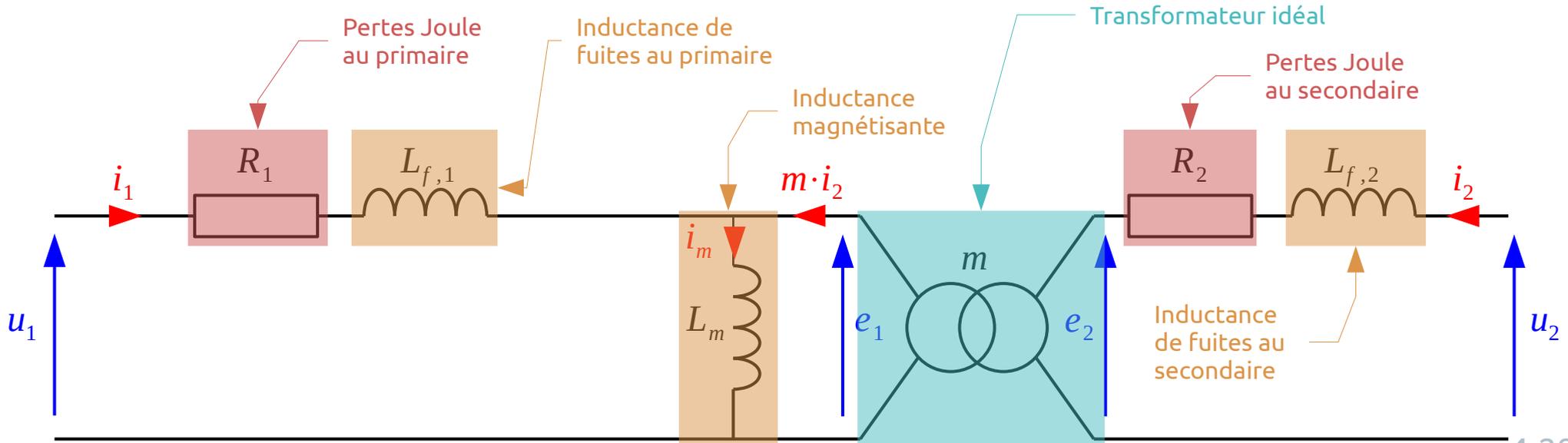
Dans un transformateur en charge, les courants  $i_1$  et  $i_2$  circulent dans les enroulements et dissipent de la chaleur par effet Joule. On symbolise ces pertes Joule par les résistances au primaire  $R_1$  et au secondaire  $R_2$ .

En forte puissance, les pertes Joule sont généralement négligeables (car section des conducteurs élevée).



## Transformateur en charge : fuites magnétiques

De chaque côté du transformateur, une partie du flux magnétique « s'échappe » du circuit magnétique et ne participe pas à l'échange d'énergie entre primaire et secondaire. On symbolise ceci par deux inductances de fuite au primaire  $L_{f,1}$  et au secondaire  $L_{f,2}$ .



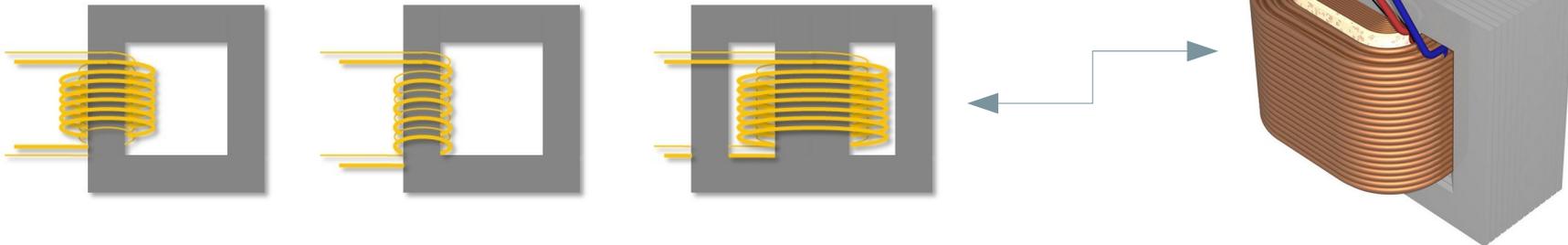
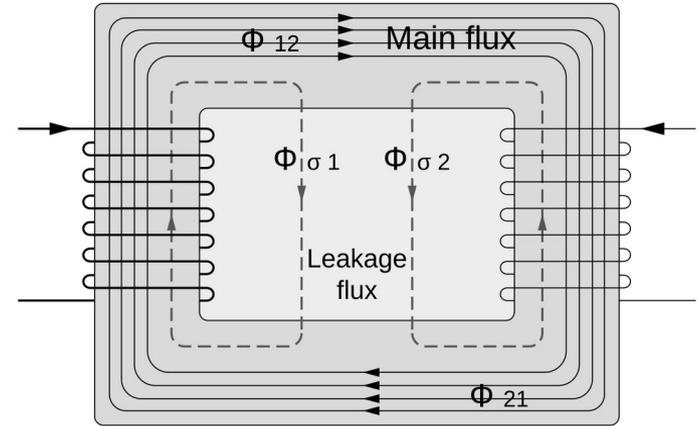
### Transformateur en charge : fuites magnétiques

Les fuites ne sont pas des pertes : le flux magnétique qui quitte le circuit magnétique y retourne quoiqu'il arrive.

En revanche le flux de fuites ne participe pas à l'échange d'énergie entre primaire et secondaire.

Pour réduire ces fuites, les enroulements primaire et secondaire sont généralement concentriques.

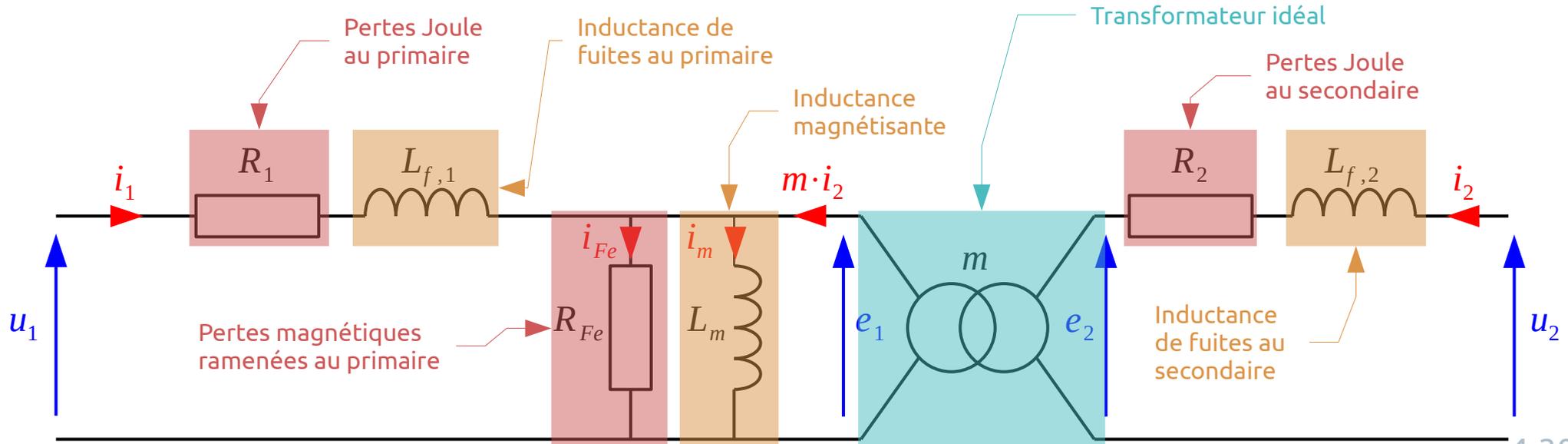
De plus, on cherchera à utiliser un circuit magnétique en « 8 » (ou *shell*) plutôt qu'un simple anneau.



Pertes fer dans le circuit magnétique

Transformateur en charge : pertes magnétiques (ou pertes fer)

Les dernières pertes à prendre en compte sont les pertes dans le circuit magnétique. Il s'agit des pertes par hystérésis ( $\propto f$ ) et pertes par courants de Foucault ( $\propto f^2$ ), modélisées conjointement par la résistance de pertes fer  $R_{Fe}$  (pertes fer totalisées ramenées au primaire).

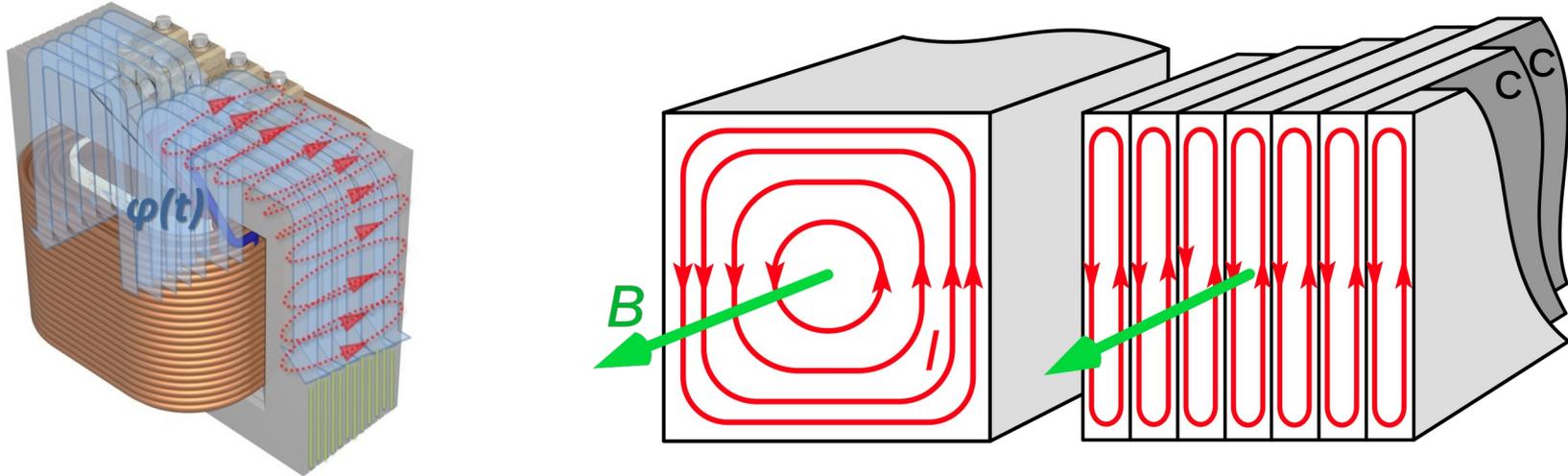


## Pertes fer dans le circuit magnétique

## Transformateur en charge : pertes magnétiques (ou pertes fer) → courants de Foucault

Un champ magnétique variable induit une f.é.m. aux bornes du conducteur (loi de Lenz-Faraday). Or le noyau ferromagnétique est parcouru par un champ magnétique variable, ce qui implique l'apparition de courants électriques dans le noyau magnétique : ce sont les courants de Foucault. Ces courants dissipent ensuite de la chaleur par effet Joule.

Pour limiter ces pertes par courants de Foucault, le noyau magnétique n'est pas monolithique. Il est en réalité constitué d'un feuilletage de tôles, isolées entre elles par une couche isolante (papier, vernis ou résine).

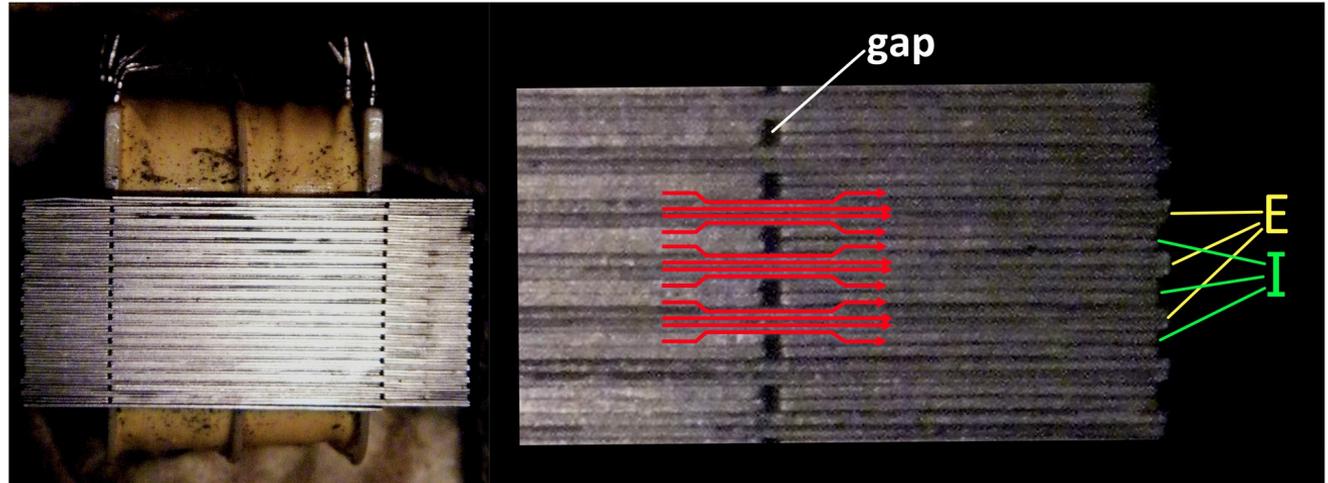
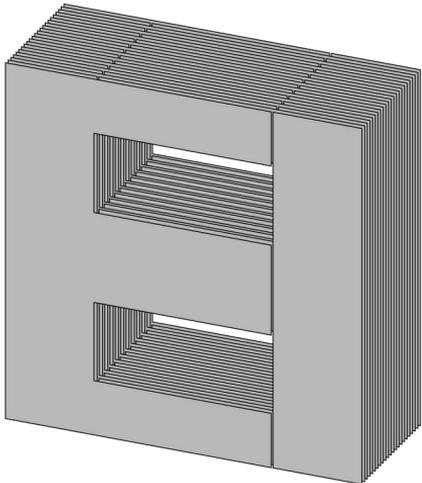


Transformateur en charge : pertes magnétiques (ou pertes fer) → courants de Foucault

Pour réduire le courant, il faut également choisir pour le circuit magnétique un matériau qui soit à la fois résistif électriquement et perméable magnétiquement.

On trouve alors des combinaisons FeSi (3% Si, peu coûteux), FeCo (coûteux mais léger, ex : aérospatial) ou FeNi (coûteux mais perméabilité très élevée, ex : minimisation de rayonnement dans un sous-marin, ...)

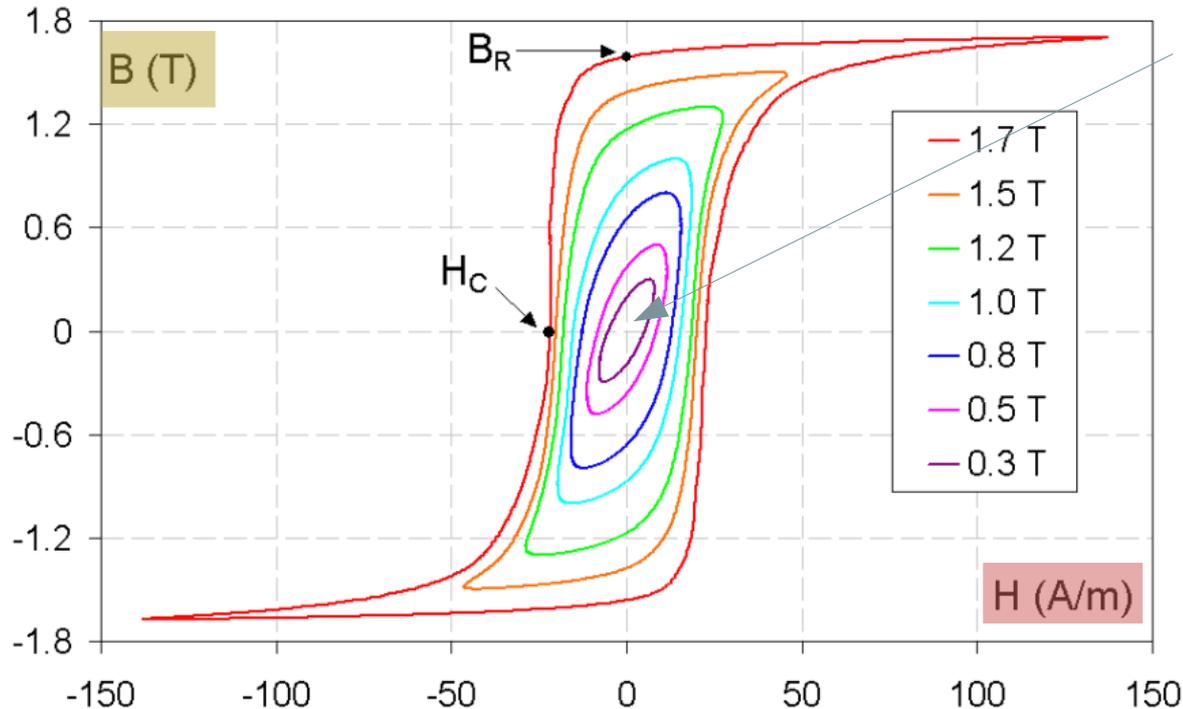
Les tôles sont assemblées les unes sur les autres, en alternant régulièrement le sens de pose. Ainsi les défauts de continuité du circuit magnétiques ne sont pas localisés en un point, mais sont répartis.



## Pertes fer dans le circuit magnétique

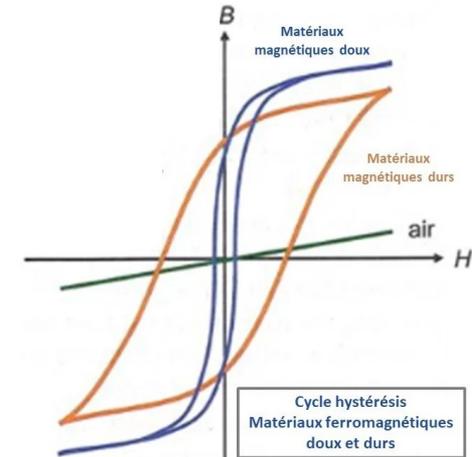
Transformateur en charge : pertes magnétiques (ou pertes fer) → hystérésis

Les pertes par hystérésis correspondent à l'énergie dépensée afin de parcourir le cycle (à chaque période donc).



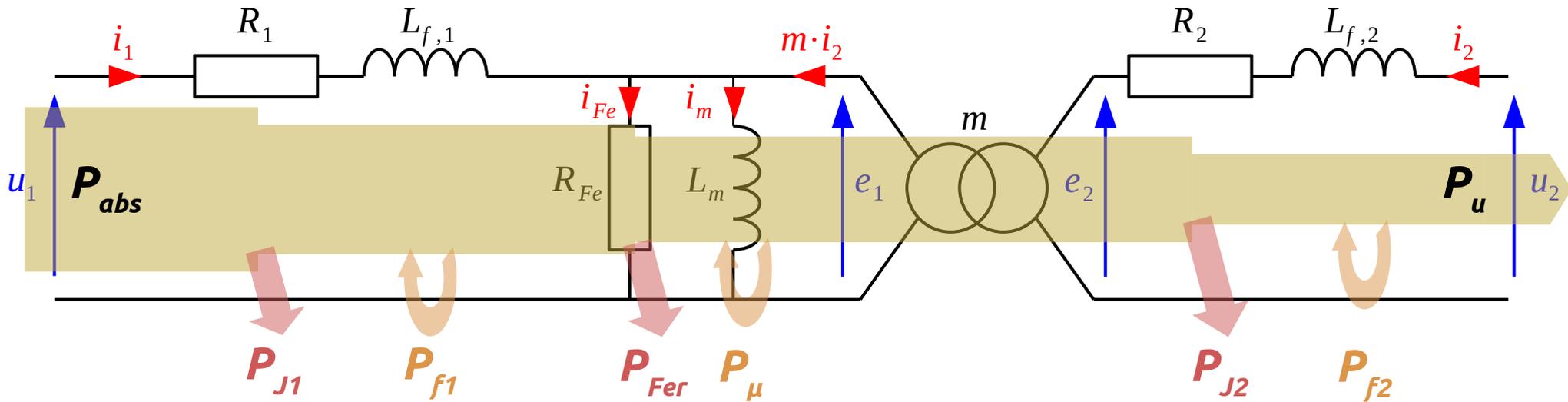
Les pertes par hystérésis correspondent à la surface intérieure du cycle d'hystérésis.

D'où l'intérêt de prendre un matériau magnétique doux.



## Modèle à fuites séparées

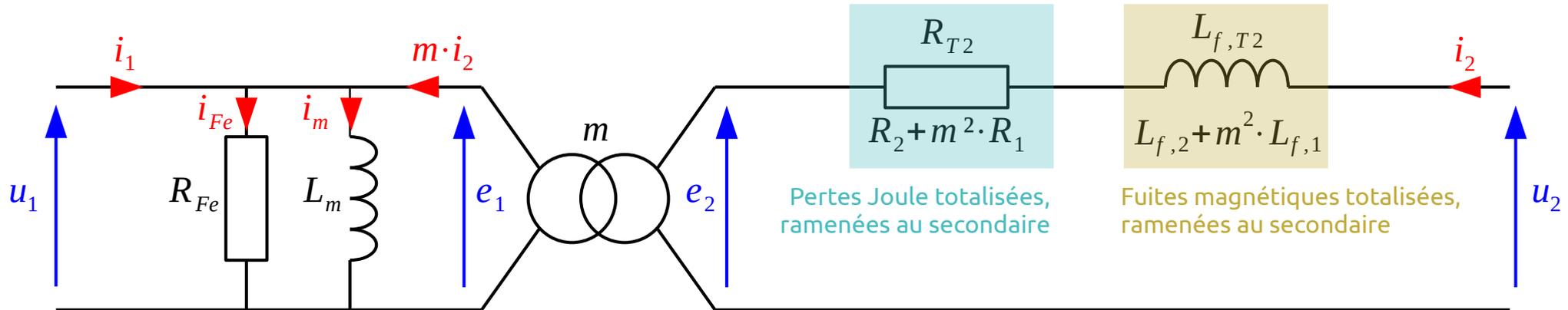
Avec ce modèle (appelé modèle de Steinmetz ou modèle à fuites séparées), il est possible de faire le bilan de puissance du transformateur.



## Modèle à fuites totalisées au secondaire

L'inconvénient du modèle à fuite séparées (ou de Steinmetz) est qu'il n'est pas identifiable.

On passe par d'autres modèles pour identifier les paramètres du transformateur, le plus utilisé étant celui des pertes et fuites totalisées au secondaire (les paramètres du primaire sont ramenés au secondaire, au rapport de transformation près).



## Modèle à fuites totalisées au secondaire

### Identification du modèle

#### Essai en DC

Pertes fer et fuites magnétiques inexistantes en DC.

→ Toutes les inductances sont nulles

$$R_1 = V_1 / I_1 \quad \text{avec } I_1 = I_{1,n}, \text{ et secondaire à vide}$$

$$R_2 = V_2 / I_2 \quad \text{avec } I_2 = I_{2,n}, \text{ et primaire à vide}$$

#### Essai à vide (secondaire ouvert)

Le courant au secondaire est nul → Le courant  $m \cdot I_2$  ramené au primaire est nul.

Pertes Joule au primaire  $R_1 \cdot I_1$ , négligeables

Fuites magnétiques au primaire  $X_{f,1} \cdot I_1$ , négligeables

$$m = U_{2,0} / U_1$$

$$R_{Fe} = U_1^2 / P_{1,0} \quad \text{et } I_{Fe} = U_1 / R_{Fe}$$

$$X_m = L_m \cdot \omega = U_1^2 / Q_{1,0} \quad \text{et } I_m = U_1 / X_m$$

#### Essai en court-circuit

Imposer  $U_{1,CC}$  tel que  $I_{1,CC} = I_{1,n}$

À si basse tension, les pertes fer  $R_{Fe}$  et l'inductance magnétisante  $L_m$  sont négligeables.

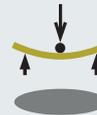
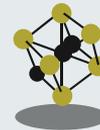
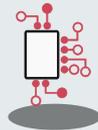
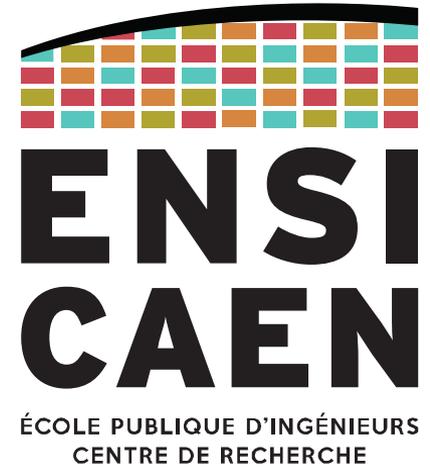
!/ Attention : courants très élevés !/

$$\frac{R_{T2}}{m^2} + \frac{j L_{f,T2} \omega}{m^2} = \frac{U_{1,CC}}{m \cdot I_{2,CC}} \quad \text{avec } R_{T2} = R_2 + m^2 \cdot R_1$$

$$P_{1,CC} = P_{magn} + P_J \simeq P_J = R_{T2} \cdot I_{2,CC}^2$$

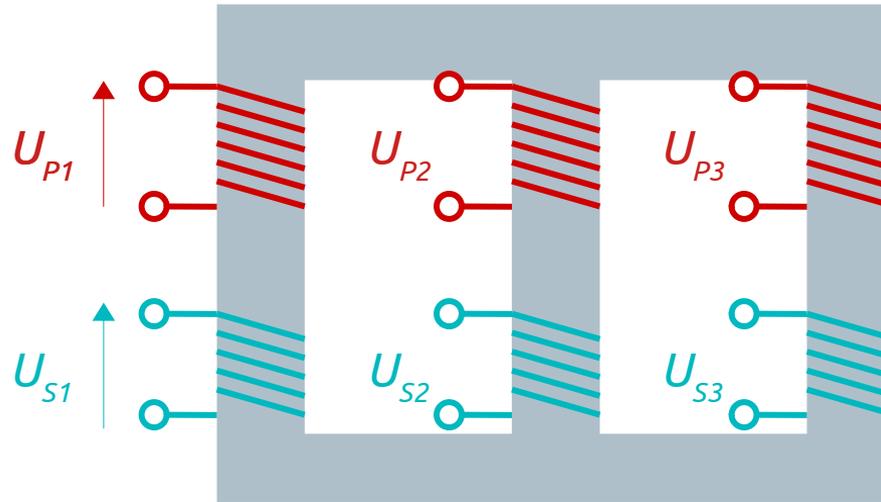
$$Q_{1,CC} = L_{f,T2} \cdot \omega \cdot I_{2,CC}^2$$

# TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ



## Constitution

Le transformateur triphasé est équivalent à trois transformateurs monophasés. Le premier indice indique le côté et le second indique le numéro de phase.



← 3 enroulements primaires

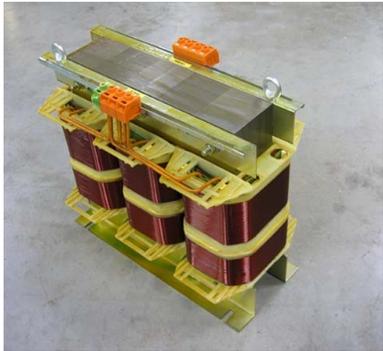
← 3 enroulements secondaires

Le rapport de transformation pour chaque phase vaut :

$$m = \frac{U_S}{U_P} = \frac{I_P}{I_S} = \frac{N_S}{N_P}$$

Les trois phases d'un transformateur triphasé sont intégrées autour d'un unique circuit magnétique. L'usage le plus répandu (pour des raisons de coût et d'encombrement) est un noyau magnétique à 3 colonnes, à flux forcé (voir images).

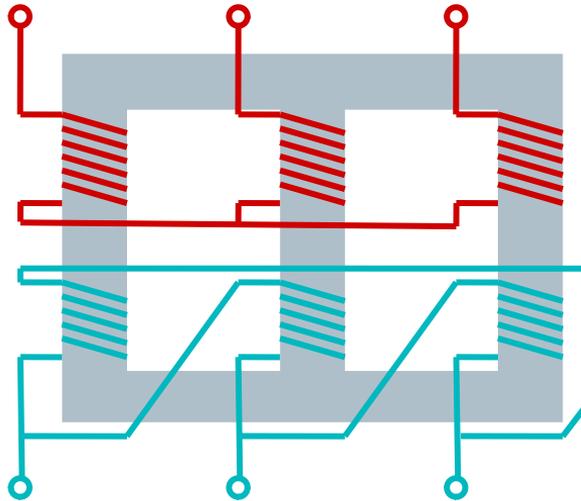
On peut voir apparaître d'autres formes (5 colonnes à flux libre), mais uniquement dans des cas particuliers (notamment en régime déséquilibré).



## Couplages

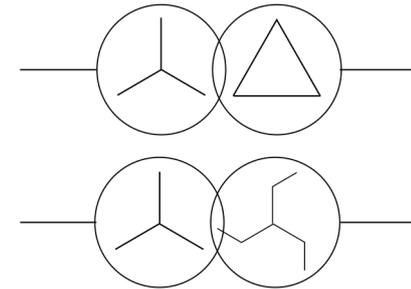
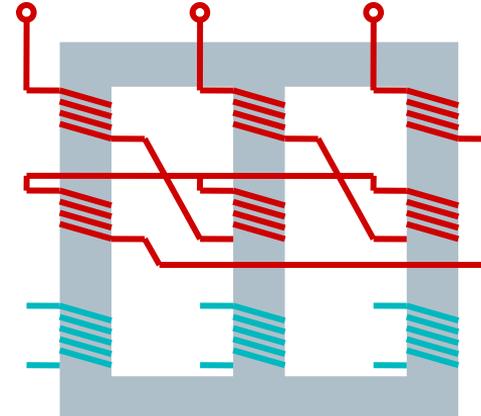
Les trois enroulements (du primaire comme du secondaire) peuvent être couplés de trois manières : étoile, triangle et zig-zag.

**Couplage étoile**  
Symbole : Y ou y  
Si neutre : YN ou yn



**Couplage triangle**  
Symbole : D ou d

**Couplage zig-zag**  
Symbole : Z ou z  
Si neutre : ZN ou zn



Le couplage zig-zag est obtenu en divisant les trois enroulements en six. Chaque demi-enroulement est mis en série avec un autre du noyau suivant. Il permet de répartir le déséquilibre de charge sur les trois noyaux.

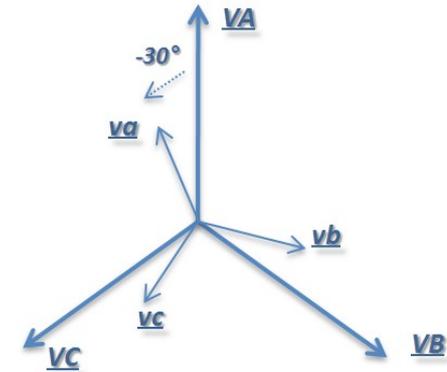
## Couplages

Les tensions du primaire et du secondaire peuvent être déphasées. On note ce déphasage « indice horaire », exprimé de 0h à 11h (1h =  $\pi/6$ ).

Exemple :

Supposons un couplage étoile-triangle (schéma à gauche diapo précédente).

La tension simple primaire  $V_A$  est en phase avec la tension composée secondaire  $u_{ab}$ , puisque sur la même colonne du circuit magnétique. Ainsi la tension simple secondaire  $v_a$  est décalée de  $-\pi/6$  par rapport à la tension simple primaire  $V_A$ , soit un indice horaire de 11h.



*$V_i$  tensions simples côté haute tension*

*$v_i$  tensions simples côté basse tension*

On note le couplage du transformateur en utilisant une majuscule (Y, D, Z) pour le primaire, minuscule (y, d, z) pour le secondaire, avec N ou n si présence d'un neutre. On complète le sigle par l'indice horaire.

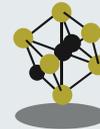
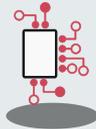
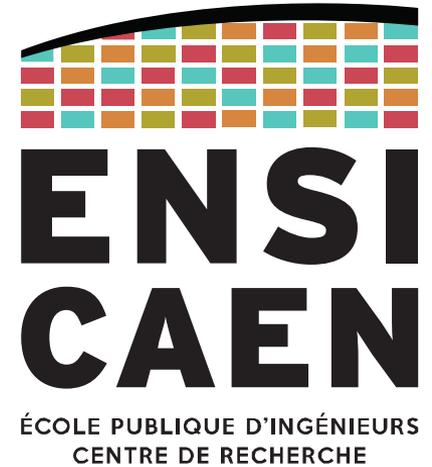
On retrouve souvent ces couplages : Yyn0, Yyn6, Yzn5, Yzn11, Dyn5, Dyn11.

Le choix du couplage se fait en réponse à différents critères.

- Éviter d'avoir le même couplage au primaire et au secondaire, pour répartir les déséquilibres.
  - On retrouve alors des couplages  $Dy$  ou  $Yd$ ,  $Zy$  ou  $Yz$ .
- Du côté HT, un neutre peut être intéressant pour des raisons de sécurité.
- Du côté BT, un neutre peut être intéressant pour laisser le choix entre deux niveaux de tension.
- La présence d'un neutre est préférable quand le côté concerné est déséquilibré
  - Exemple : réseau de distribution où chaque phase du secondaire est branché à une charge différente.
- L'indice horaire n'est généralement pas un critère, sauf :
  - en régime déséquilibré
  - s'il y a une mise en parallèle de transformateurs

Note : la mise en parallèle de transformateurs se fait pour plusieurs raisons : redondance (sûreté et continuité de service), réseau maillé ou bouclé (transport et distribution), évolution de la demande, ...

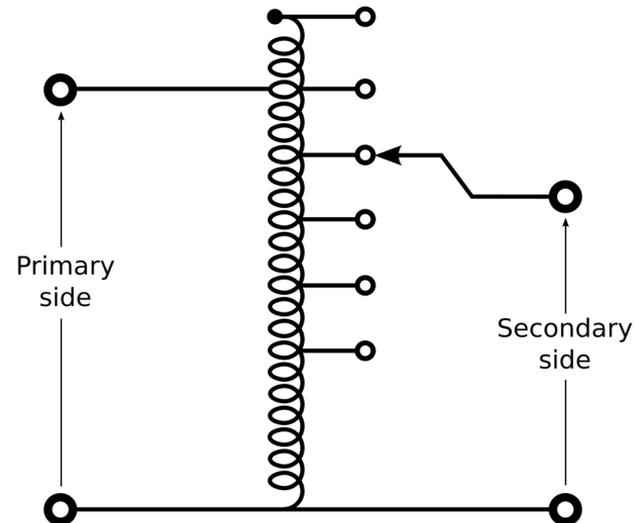
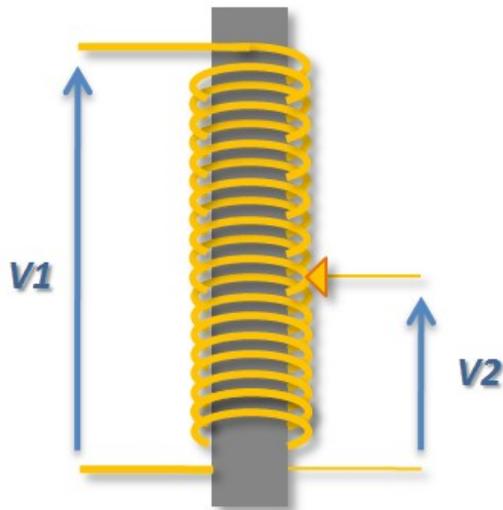
# TRANSFORMATEURS SPÉCIAUX



L'**autotransformateur** est un transformateur à un seul enroulement, servant à la fois au primaire et au secondaire, le tout autour d'un circuit magnétique.

Le primaire et le secondaire ont une connexion commune. De fait il n'y a pas d'isolation galvanique, contrairement aux transformateurs classiques.

Comme le transformateur classique, il peut servir à élever ou abaisser la tension.



En ne disposant que d'un seul enroulement, l'autotransformateur n'a pas d'isolation galvanique (danger !) et a généralement rapport de transformation proche de l'unité (puisque le conducteur est dimensionné à la fois pour  $I_1$  et  $I_2 \rightarrow$  compromis).

On retrouve donc l'autotransformateur dans des applications de très haute tension, typiquement les transformateurs 225 kV – 400 kV du réseau de transport ou encore dans le ferroviaire (25 kV).



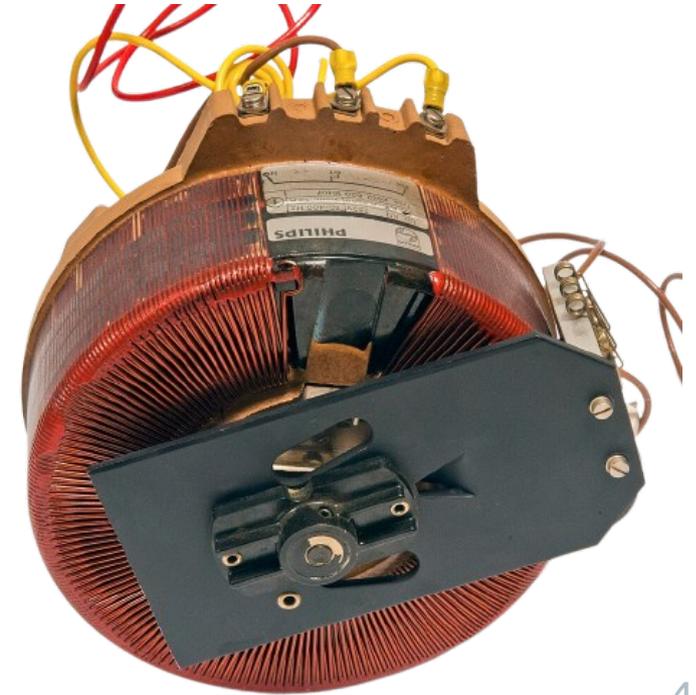
Transformateur 400 kV

Transformateur 400 kV, 500 MVA



Toutefois à puissance équivalente, l'autotransformateur sera moins cher (un enroulement en moins par phase) plus petit et plus léger (circuit magnétique). Ceci mène à une inductance de fuite et des pertes Joule et fer plus faibles.

On obtient donc des rendements très élevés (> 99%), ce qui en fait un incontournable pour les applications de très forte puissance.



Le **transformateur de courant** est un transformateur d'instrumentation (et non de puissance), utilisé pour mesurer des courants. Le circuit primaire est inséré dans le circuit pour lequel on veut mesurer le courant, le secondaire est relié à un ampèremètre ou à une résistance de *shunt*.



Transformateur de courant utilisé en HT



Transformateurs de courant utilisés en BT

Il est technologiquement conçu de sorte à fournir un courant de secondaire proportionnel au courant du primaire, avec un déphasage quasi-nul.

Le primaire est inséré dans le circuit pour lequel on souhaite mesurer le courant. Pour ne pas modifier ce courant, la résistance du primaire doit être la plus faible possible.

Pour que le courant du secondaire soit l'image parfaite du courant au primaire, le circuit secondaire doit se comporter comme une source de courant idéale. Là encore, la résistance de l'enroulement doit être la plus faible possible.

Autre particularité, le flux généré par le primaire et le secondaire se compensent :  $N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2 = 0 = \mathcal{R} \cdot \phi$ .

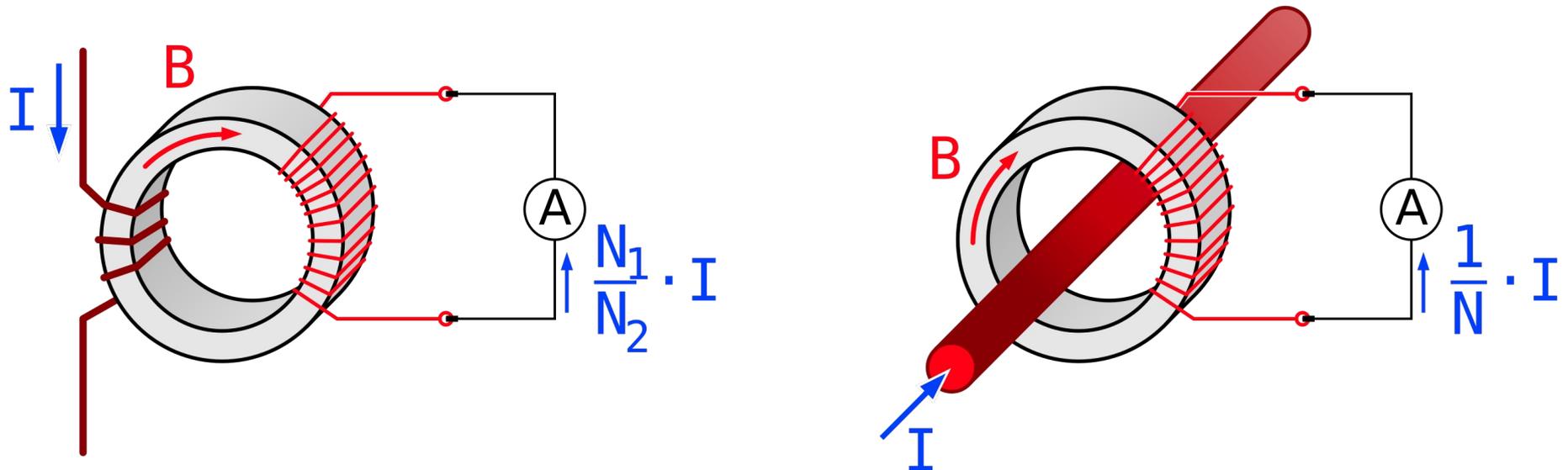
De tels transformateurs de courant sont qualifiés par leur ratio  $I_1 : I_2$  (ex : 5000A:5A), plutôt que par leur rapport de transformation  $m$ .

On l'utilise soit dans des applications à HT et/ou à très fort courant, soit dans des applications BT avec mesure non-invasive.

## Transformateur de courant

En passant du primaire au secondaire, on cherche à abaisser le courant. En raisonnant en tensions, il s'agit alors d'un transformateur élévateur avec un rapport de transformation élevé ( $m > 100$ ).

Il y a donc peu de spires au primaire, voire pas du tout (ce qui s'apparente à  $N_1 = 1$ ).



Le transformateur de courant est extrêmement dangereux.

1) Considérons que le primaire est alimenté et le secondaire chargé.

Si on cherche à déconnecter la charge du secondaire, le transformateur va tenter de maintenir le courant secondaire mais cette fois-ci dans une charge infinie, ce qui va faire drastiquement monter la tension du secondaire (conséquence de  $v_2 = L di_2 / dt$ ). Cette tension pourra alors atteindre plusieurs kV et provoquer des arcs électriques.

En généralisant, n'importe quelle variation brusque de la charge du secondaire peut être fatale.

2) Si le secondaire est ouvert, aucun courant ne peut circuler. Dans le circuit magnétique, le flux généré par le primaire n'est plus contre-balancé par le flux généré par le secondaire. Avec un rapport de transformation élevé pour ce type de transformateur, qui plus est avec un secondaire relié à une HT, alors le secondaire verra rapidement apparaître plusieurs kV à ses bornes.

**Bilan : un transformateur de courant en fonctionnement doit toujours être chargé !**

En BT on retrouve les transformateurs de courant dans les pinces ampèremétriques bas de gamme (puisque un transformateur de courant ne fonctionne qu'en alternatif).

Les sondes plus sophistiquées utiliseront plutôt un capteur à effet Hall avec boucle de rétroaction.



### Exemple de mesure non-invasive

Le circuit magnétique et l'enroulement secondaire sont placés autour du câble constituant le primaire.

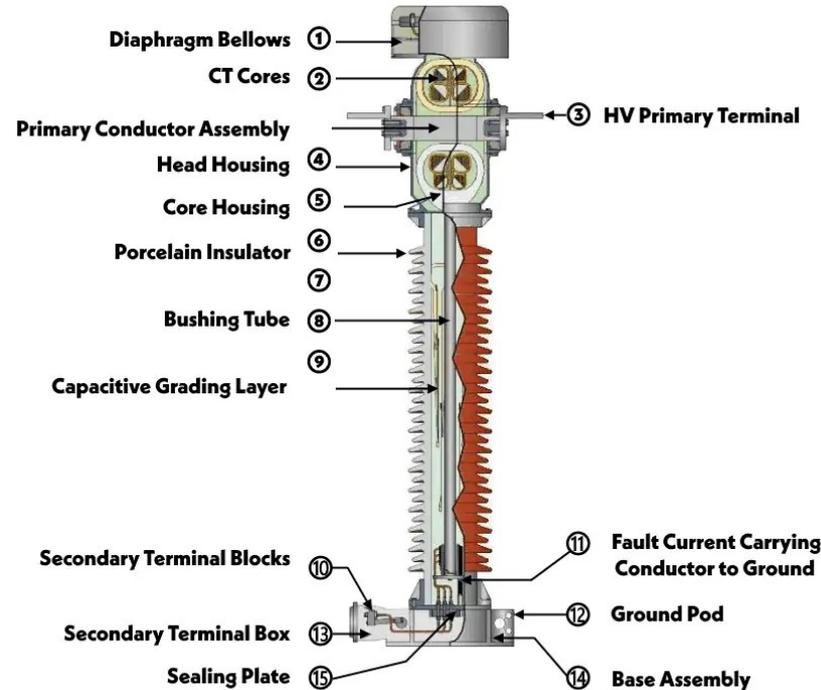
Ici : mesure sur trois phases, 400 A.



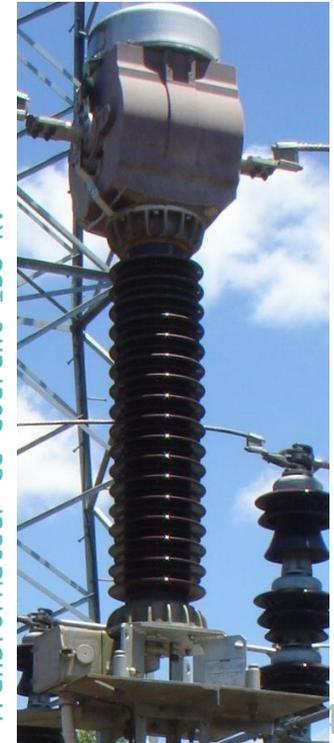
On les retrouve surtout dans les postes de transformation HT, puisqu'il s'agit du seul composant capable de mesurer des courants aussi forts (de 50 A à quelques kA), à des niveaux de tension aussi élevés (> 100 kV).



Transformateur de courant GE Vernova  
72.5-800 kV - jusqu'à 6000 A  
De 310 à 3500 kg (dont 39 à 930 d'huile!)

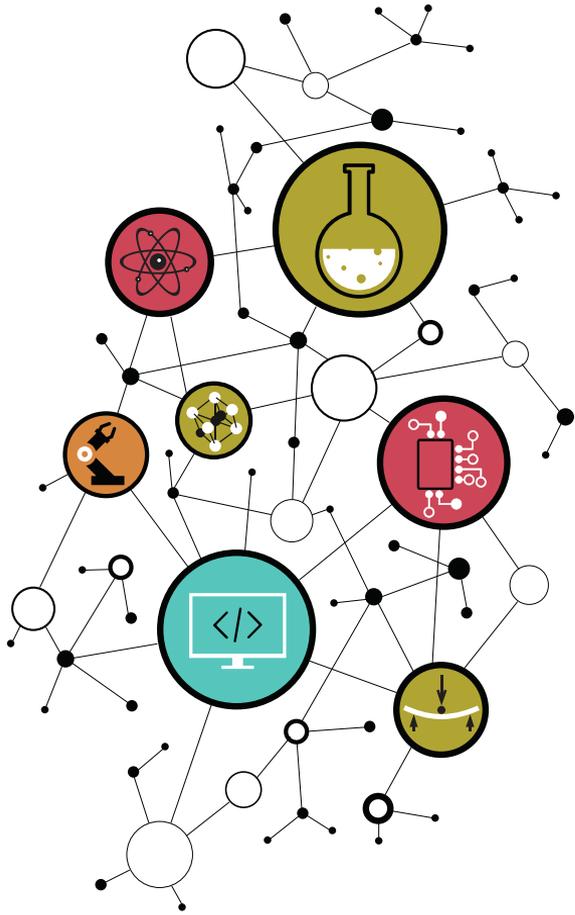


WWW.ELECTRICALTECHNOLOGY.ORG



Transformateur de courant 138 kV

# CONTACT



Dimitri Boudier – PRAG ENSICAEN  
[dimitri.boudier@ensicaen.fr](mailto:dimitri.boudier@ensicaen.fr)