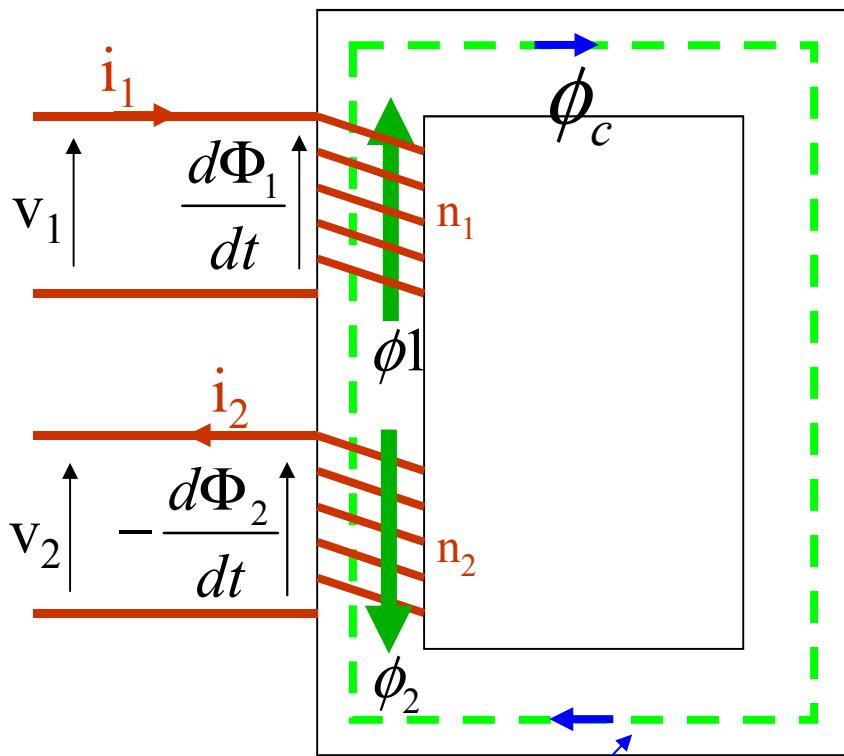


Conventions, notations



circuit magnétique

2 bobinages n_1 et n_2 spires (primaire, secondaire)

Sens de i_1 arbitraire et convention récepteur

Sens du flux déterminé par le sens de i_1

$$i_1 > 0 \Leftrightarrow \phi_c > 0$$

f.c.e.m. primaire (convention récepteur)

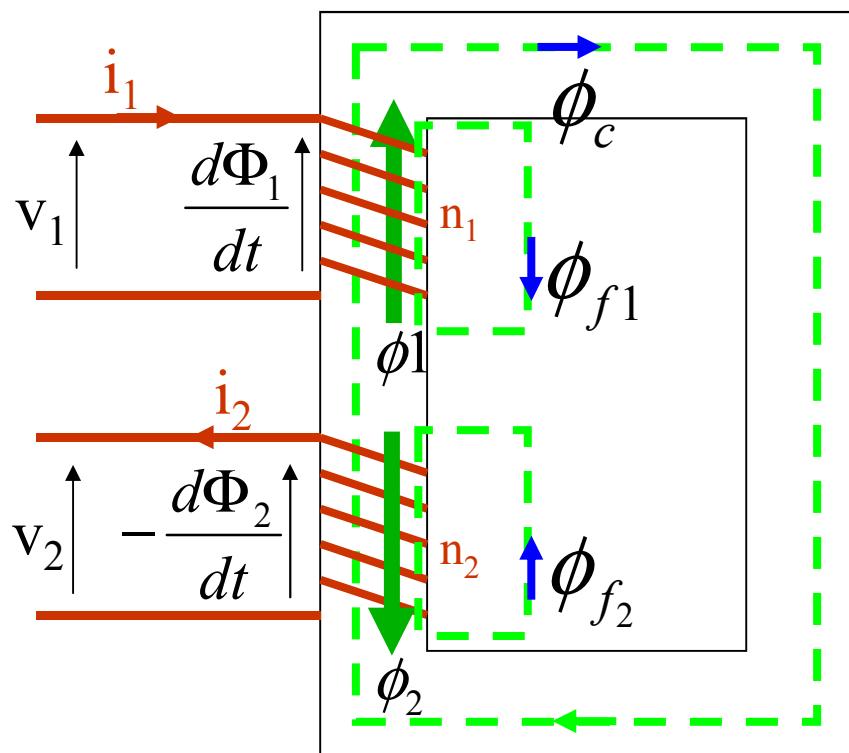
$$e_1 = + \frac{d\Phi_1}{dt}$$

Sens de i_2 tel que : $i_2 > 0 \Leftrightarrow \phi_c < 0$

convention générateur au secondaire

donc f.e.m. au secondaire : $e_2 = - \frac{d\Phi_2}{dt}$

Expression des flux



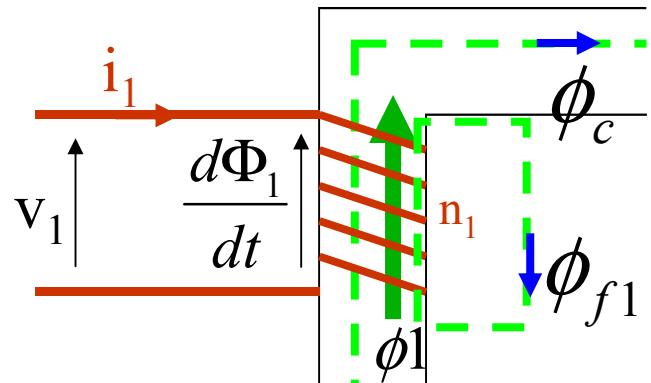
$$\begin{cases} \Phi_1 = n_1 \varphi_1 \\ \Phi_2 = n_2 \varphi_2 \end{cases}$$

Flux de fuite primaire et secondaire :

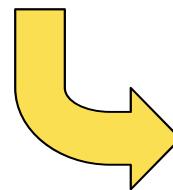
$$\begin{cases} \Phi_1 = n_1 (\varphi_c + \varphi_{f1}) \\ \Phi_2 = n_2 (-\varphi_c + \varphi_{f2}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Phi_1 = n_1 (\varphi_c + \varphi_{f1}) = n_1 \varphi_c + \Phi_{f1} \\ \Phi_2 = n_2 (-\varphi_c + \varphi_{f2}) = -n_2 \varphi_c + \Phi_{f2} \end{cases}$$

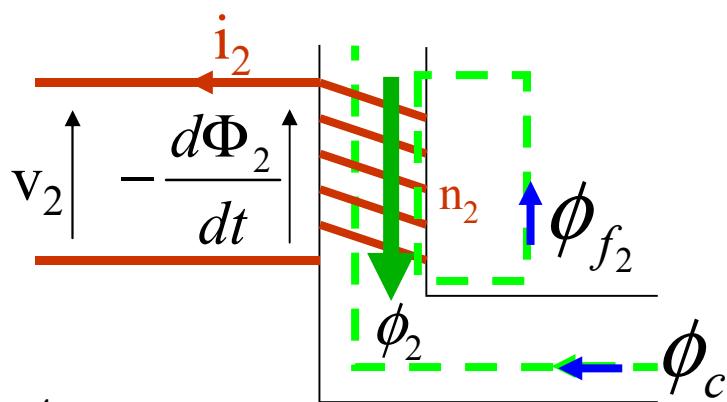
équations générales de fonctionnement



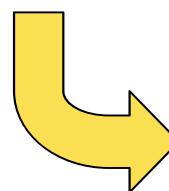
$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_1 = n_1(\phi_c + \phi_{f1}) = n_1\phi_c + \Phi_{f1} \\ v_1 = r_1 i_1 + \frac{d\Phi_1}{dt} \end{array} \right.$$



$$v_1 = r_1 i_1 + l_1 \frac{di_1}{dt} + n_1 \frac{d\phi_c}{dt}$$



$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_2 = n_2(-\phi_c + \phi_{f2}) = -n_2\phi_c + \Phi_{f2} \\ v_2 = -r_2 i_2 - \frac{d\Phi_2}{dt} \end{array} \right.$$



$$v_2 = -r_2 i_2 - l_2 \frac{di_2}{dt} + n_2 \frac{d\phi_c}{dt}$$

équations générales de fonctionnement

Hopkinson

Charge au secondaire

$$\left\{ \begin{array}{l} v_1 = r_1 i_1 + l_1 \frac{di_1}{dt} + n_1 \frac{d\phi_c}{dt} \\ v_2 = -r_2 i_2 - l_2 \frac{di_2}{dt} + n_2 \frac{d\phi_c}{dt} \\ \Re \phi_c = n_1 i_1 - n_2 i_2 \\ f(v_2, i_2) = 0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (1) \\ (2) \\ (3) \\ (4) \end{array}$$

Transformateur Parfait

résistances nulles

fuites nulles

matériau parfait, $\mathcal{R}=0$

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= \cancel{r_1 i_1} + l_1 \frac{di_1}{dt} + n_1 \frac{d\phi_c}{dt} \\ v_2 &= -\cancel{r_2 i_2} - l_2 \frac{di_2}{dt} + n_2 \frac{d\phi_c}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$v_2 = -\cancel{r_2 i_2} - l_2 \frac{di_2}{dt} + n_2 \frac{d\phi_c}{dt} \quad (2)$$

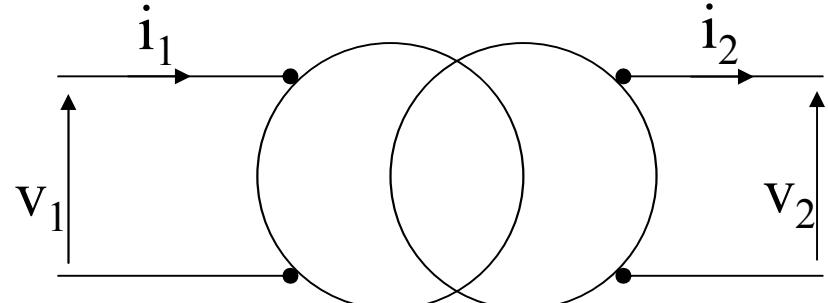
$$\cancel{\mathfrak{R}} \phi_c = n_1 i_1 - n_2 i_2 \quad (3)$$

Transformateur Parfait

$$\left\{ \begin{array}{l} v_1 = n_1 \frac{d\phi_c}{dt} \\ v_2 = n_2 \frac{d\phi_c}{dt} \\ n_1 i_1 - n_2 i_2 = 0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (1) \\ (2) \\ (3) \end{array}$$

- résistances des bobinages nulles
- fuites inexistantes
- Matériau magnétique idéal

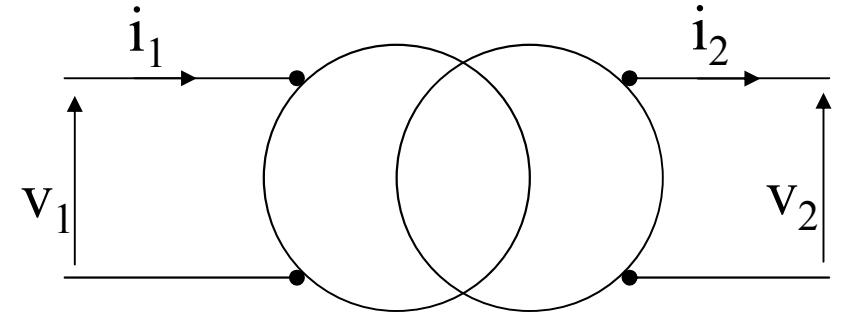
représentation symbolique :



Transformateur Parfait

Machine à flux forcé

$$\left\{ \begin{array}{l} v_1 = n_1 \frac{d\phi_c}{dt} \\ v_2 = n_2 \frac{d\phi_c}{dt} \\ n_1 i_1 - n_2 i_2 = 0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (1) \\ (2) \\ (3) \end{array}$$



$$\phi_c = \frac{1}{n_1} \int v_1 dt$$

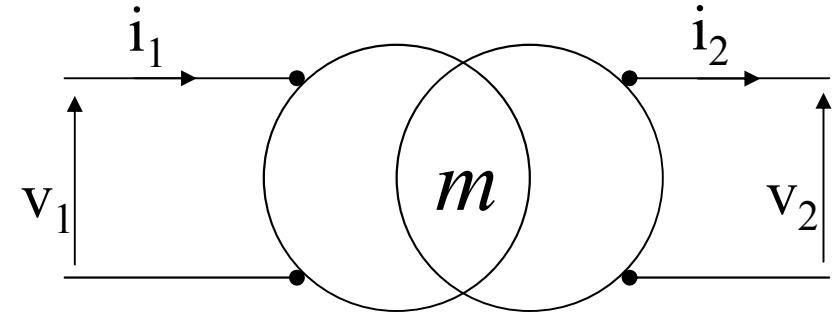
Le flux est forcé par la tension

Attention :
tension alternative !

Transformateur Parfait

Rapport de transformation

$$\left\{ \begin{array}{l} v_1 = n_1 \frac{d\phi_c}{dt} \\ v_2 = n_2 \frac{d\phi_c}{dt} \\ n_1 i_1 - n_2 i_2 = 0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (1) \\ (2) \\ (3) \end{array}$$



$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{n_2}{n_1} = m$$

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{n_2}{n_1} = m$$

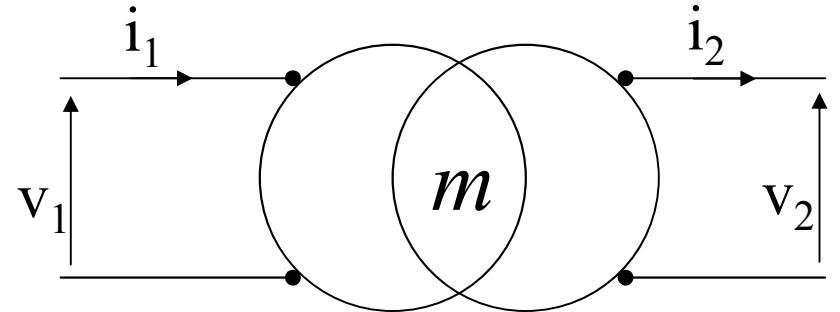
$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{n_2}{n_1} = m$$

avec les orientations algébrique choisies au départ

Transformateur Parfait

Conservation des puissances

$$\left\{ \begin{array}{l} v_1 = n_1 \frac{d\phi_c}{dt} \\ v_2 = n_2 \frac{d\phi_c}{dt} \\ n_1 i_1 - n_2 i_2 = 0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (1) \\ (2) \\ (3) \end{array}$$



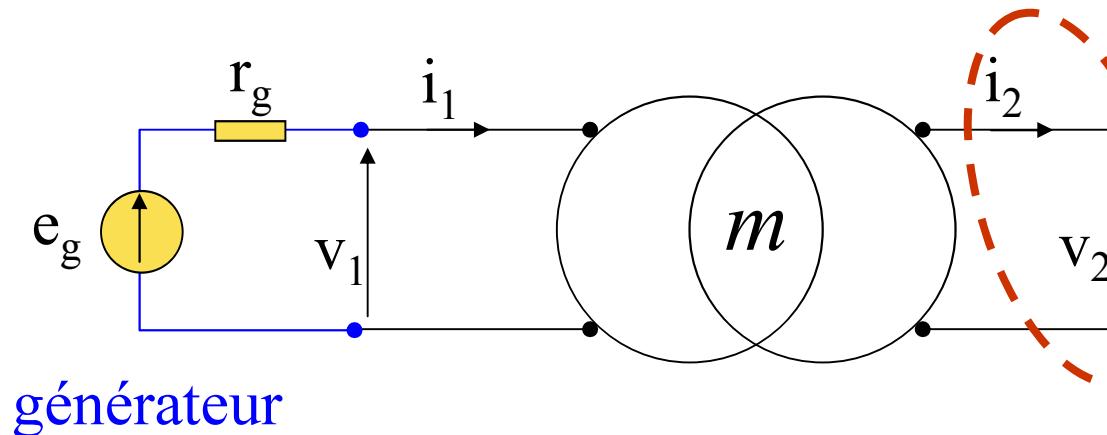
$$p_1 = v_1 i_1$$

$$p_2 = v_2 i_2$$

$$p_2 = v_2 i_2 = (m v_1) \left(\frac{i_1}{m} \right) = v_1 i_1 = p_1$$

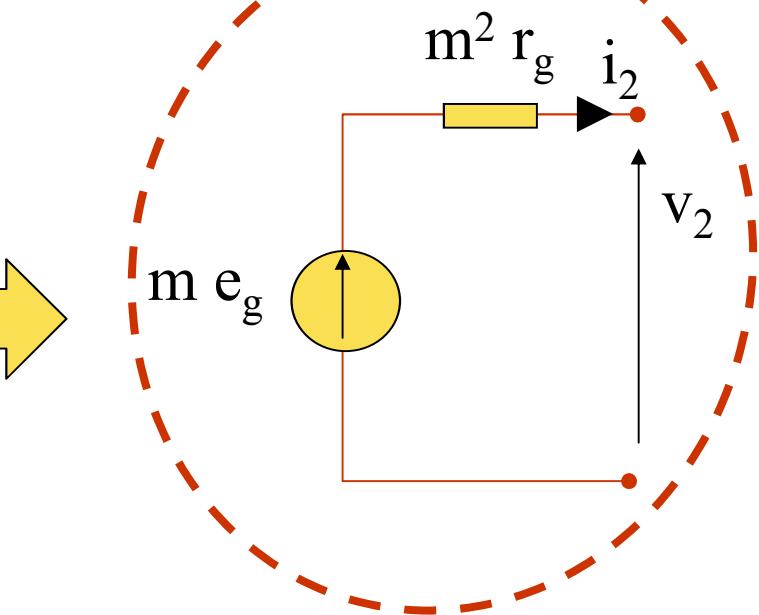
Transformateur Parfait

Schémas équivalents vu du secondaire



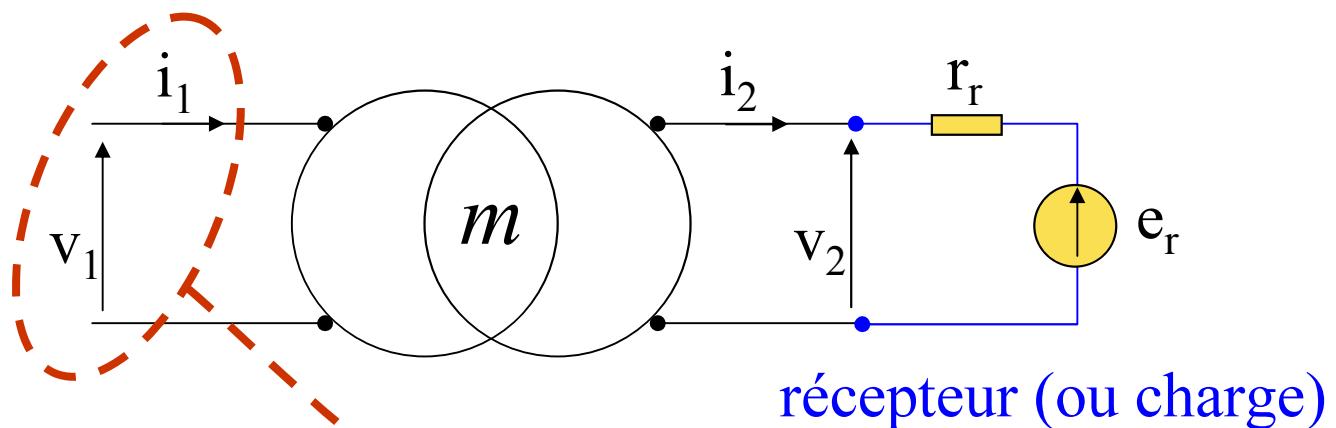
$$v_2 = m v_1 = m (e_g - r_g i_1)$$

$$v_2 = m e_g - m^2 r_g i_2$$



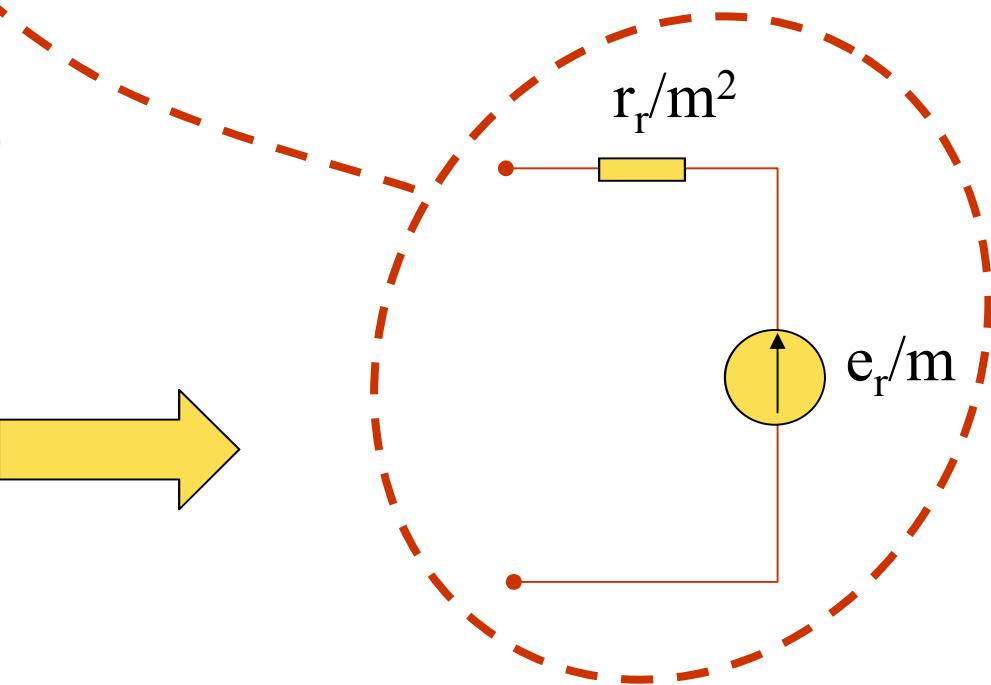
Transformateur Parfait

Schémas équivalents vu du primaire



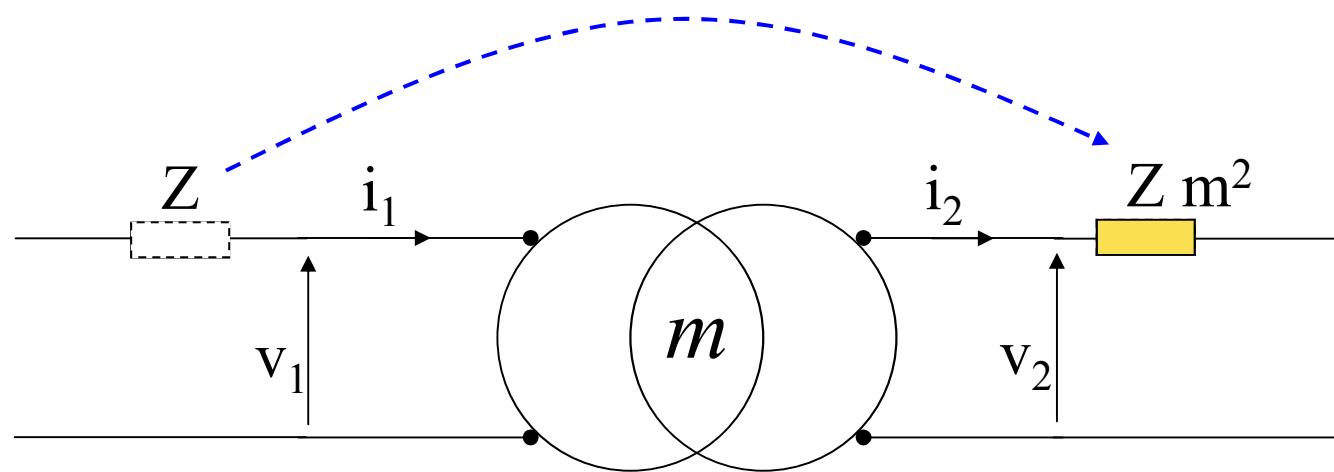
$$v_1 = \frac{v_2}{m} = \frac{1}{m} (e_r + r_r i_2)$$

$$v_1 = \frac{e_r}{m} + \frac{r_r i_1}{m^2}$$



Transformateur Parfait

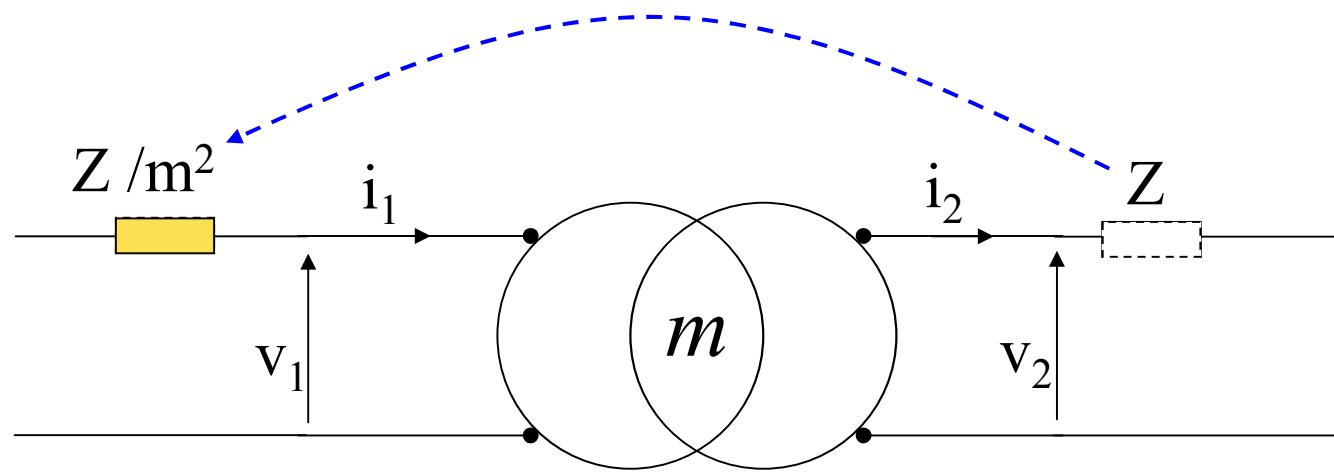
Transfert d'impédances



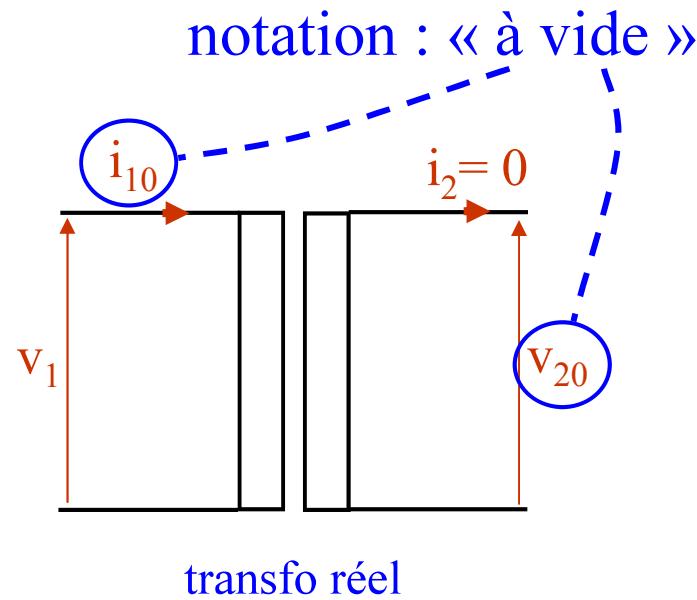
Application : adaptation d'impédance

Transformateur Parfait

Transfert d'impédances

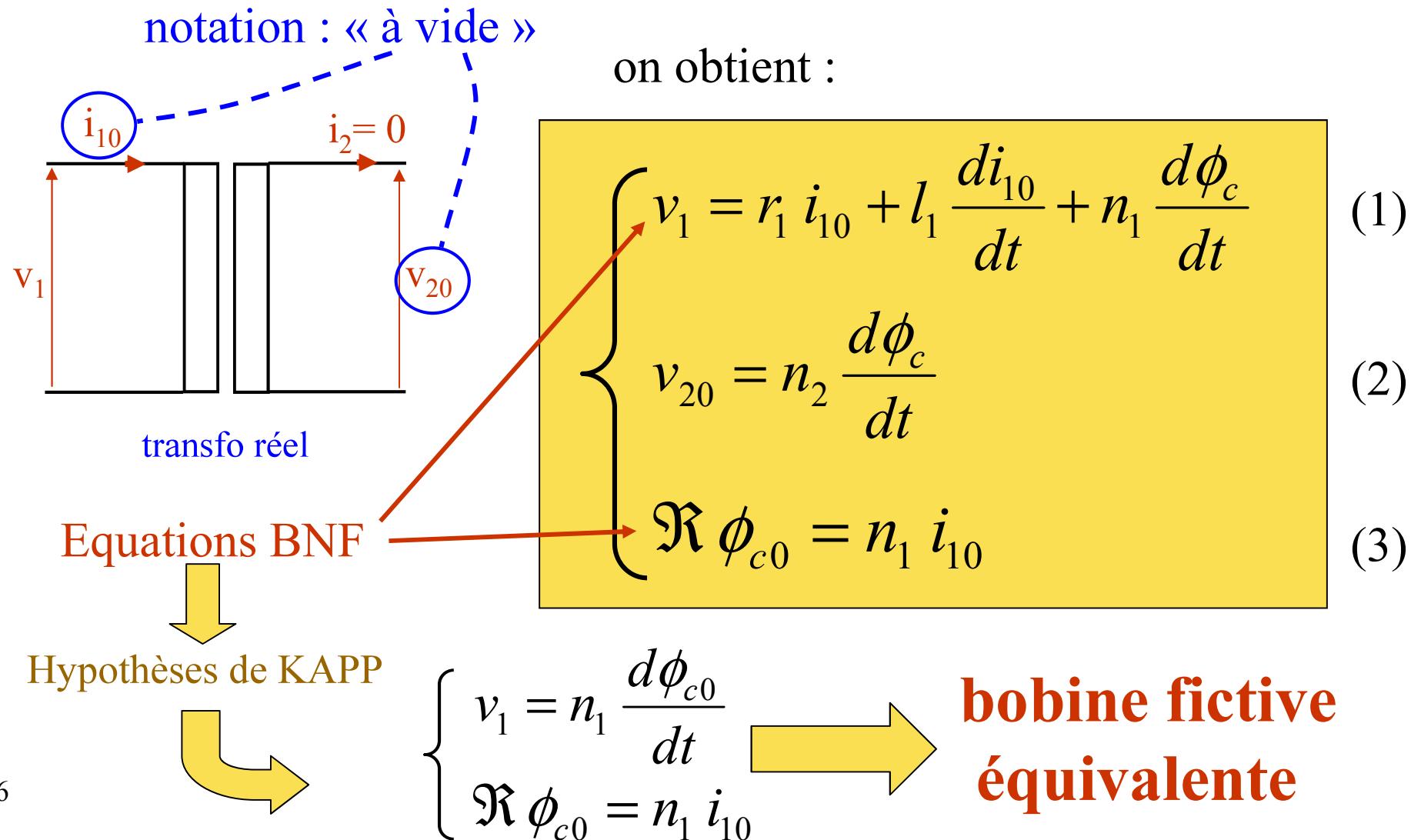


Transformateur Réel à vide

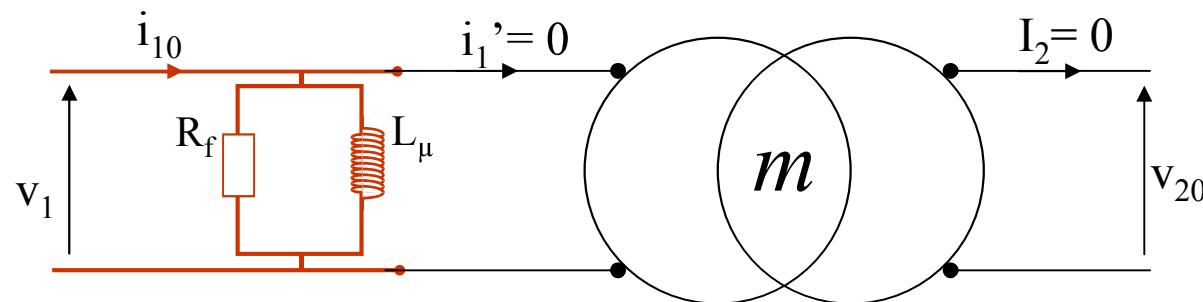


$$\left\{ \begin{array}{l} v_1 = r_1 i_1 + l_1 \frac{di_1}{dt} + n_1 \frac{d\phi_c}{dt} \\ v_2 = -r_2 i_2 - l_2 \frac{di_2}{dt} + n_2 \frac{d\phi_c}{dt} \\ \Re \phi_c = n_1 i_1 - n_2 i_2 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (1) \\ (2) \\ (3) \end{array}$$

Transformateur Réel à vide



Transformateur Réel à vide

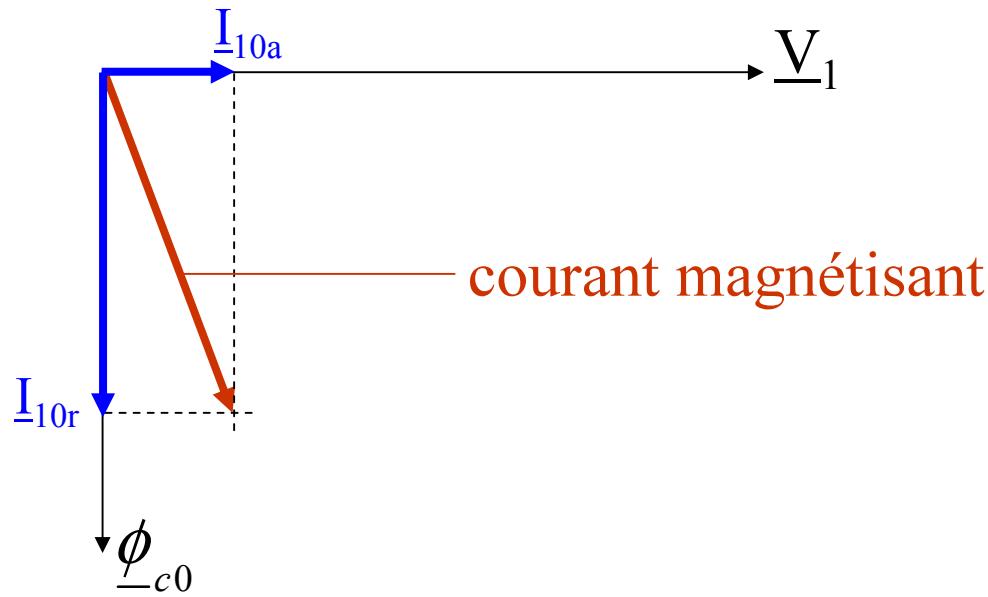
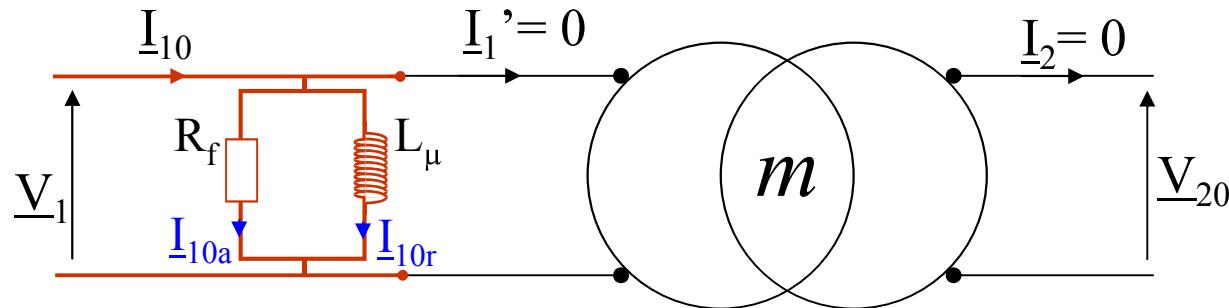


$$\left\{ \begin{array}{l} v_1 = n_1 \frac{d\phi_{c0}}{dt} \\ \Re \phi_{c0} = n_1 i_{10} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{v_{20}}{v_1} = \frac{n_2}{n_1} \frac{\frac{d\phi_{c0}}{dt}}{\frac{d\phi_{c0}}{dt}} = \frac{n_2}{n_1} = m \end{array} \right.$$

Transformateur Réel à vide

la tension v_1 est sinusoïdale



à $\pi/2$ en arrière

Transformateur Réel en charge

on pose :

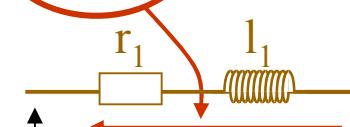
$$\begin{cases} v'_1 = n_1 \frac{d\phi_c}{dt} \\ v'_2 = n_2 \frac{d\phi_c}{dt} \end{cases}$$

avec : $n_1 i'_1 = n_2 i_2$

équation du transfo parfait

$$i_1 = \frac{\Re \phi_c}{n_1} + \frac{n_2}{n_1} i_2 = i'_{10} + i'_1$$

$$v_1 - v'_1 = r_1 i_1 + l_1 \frac{di_1}{dt}$$

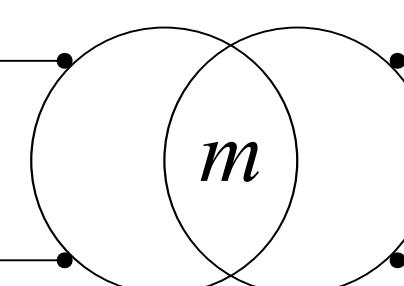


i_1

i'_{10}

i'_1

i_1'



$$\left\{ \begin{array}{l} v_1 = r_1 i_1 + l_1 \frac{di_1}{dt} + n_1 \frac{d\phi_c}{dt} \\ v_2 = -r_2 i_2 - l_2 \frac{di_2}{dt} + n_2 \frac{d\phi_c}{dt} \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v_1 = r_1 i_1 + l_1 \frac{di_1}{dt} + n_1 \frac{d\phi_c}{dt} \\ v_2 = -r_2 i_2 - l_2 \frac{di_2}{dt} + n_2 \frac{d\phi_c}{dt} \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\Re \phi_c = n_1 i_1 - n_2 i_2 \quad (3)$$

$$v_2' - v_2 = r_2 i_2 + l_2 \frac{di_2}{dt}$$

$r_2 \quad l_2$

i_2

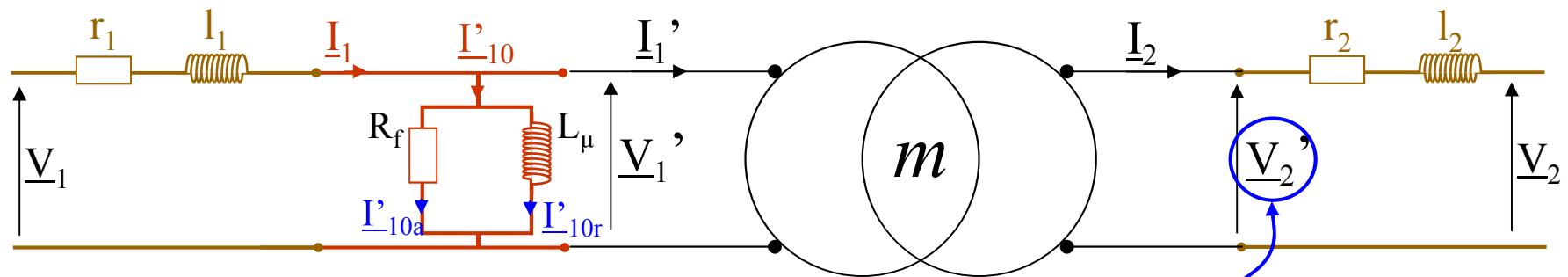
v_2'

v_2

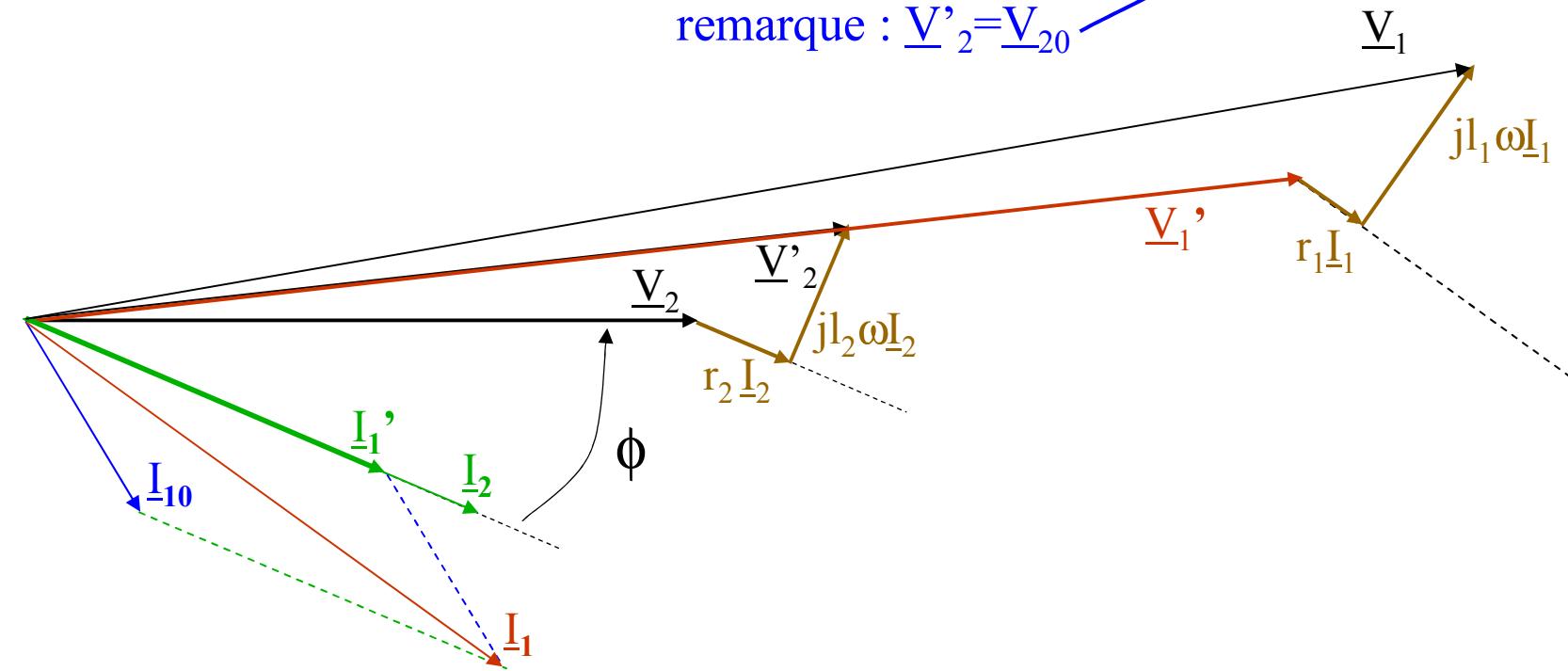
i_2

Transformateur Réel en charge

Diagramme de FRESNEL

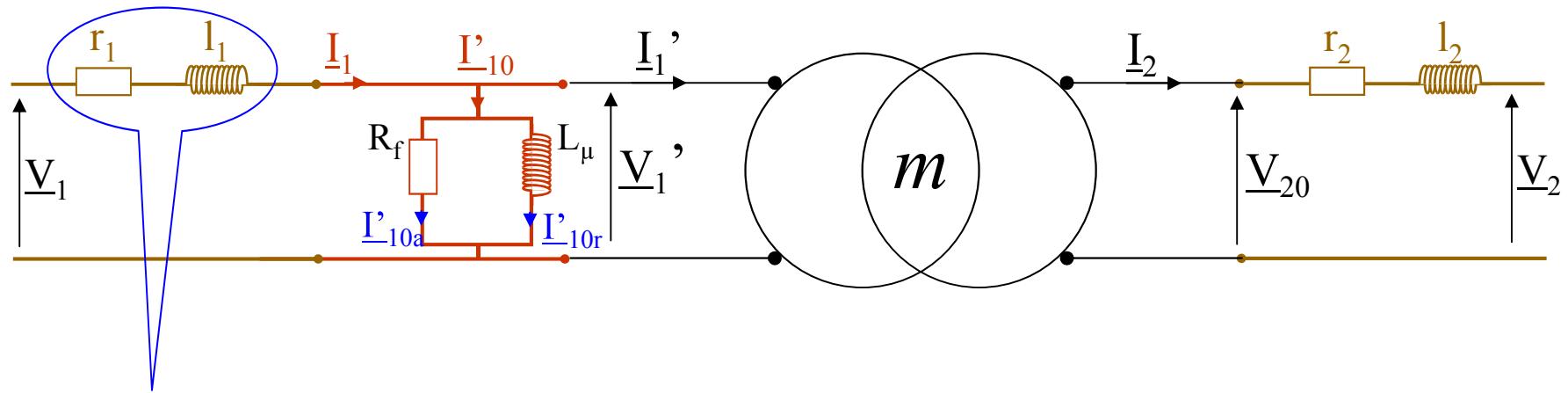


remarque : $\underline{V}'_2 = \underline{V}_{20}$



Transformateur Réel en charge

Diagramme de FRESNEL



Chute de tension
 primaire faible

flux à vide ϕ_{c0}
 \approx flux en charge ϕ_c

I'_{10} en charge
 $\approx I_{10}$ à vide

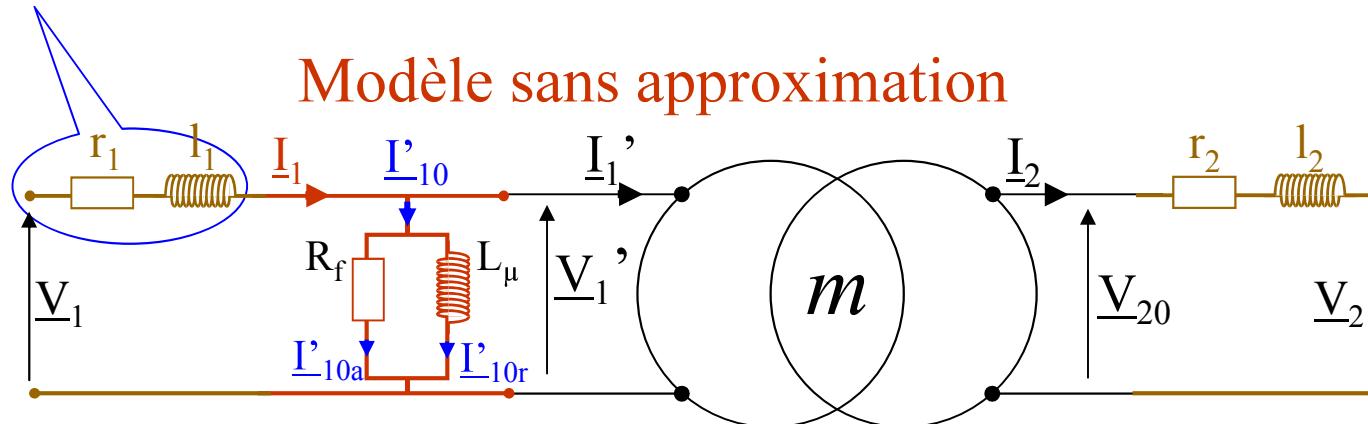
les pertes fer à vide et en charge sont identiques

Schéma équivalent

Approximation de KAPP

$$I_{10} \sqrt{r_1^2 + l_1^2 \omega^2} \ll V_1$$

Modèle sans approximation



résistance et inductance
de fuite primaire

inductance
magnétisante

tranfo parfait

résistance et inductance
de fuite secondaire

Modèle avec approximation

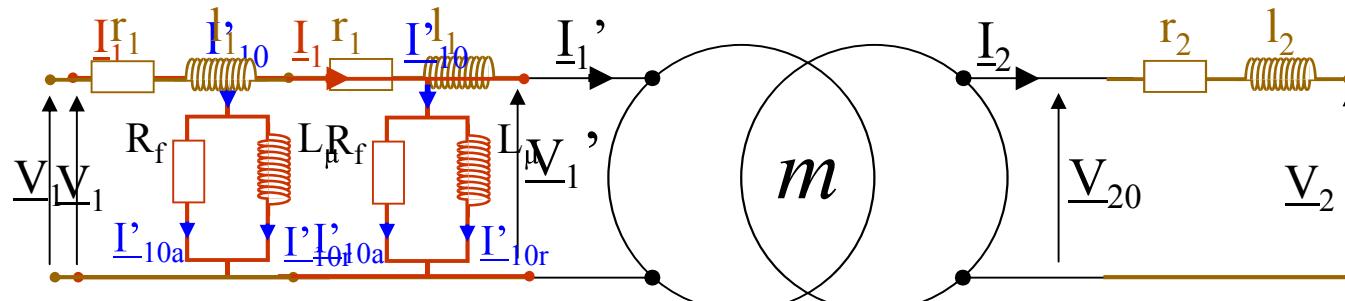
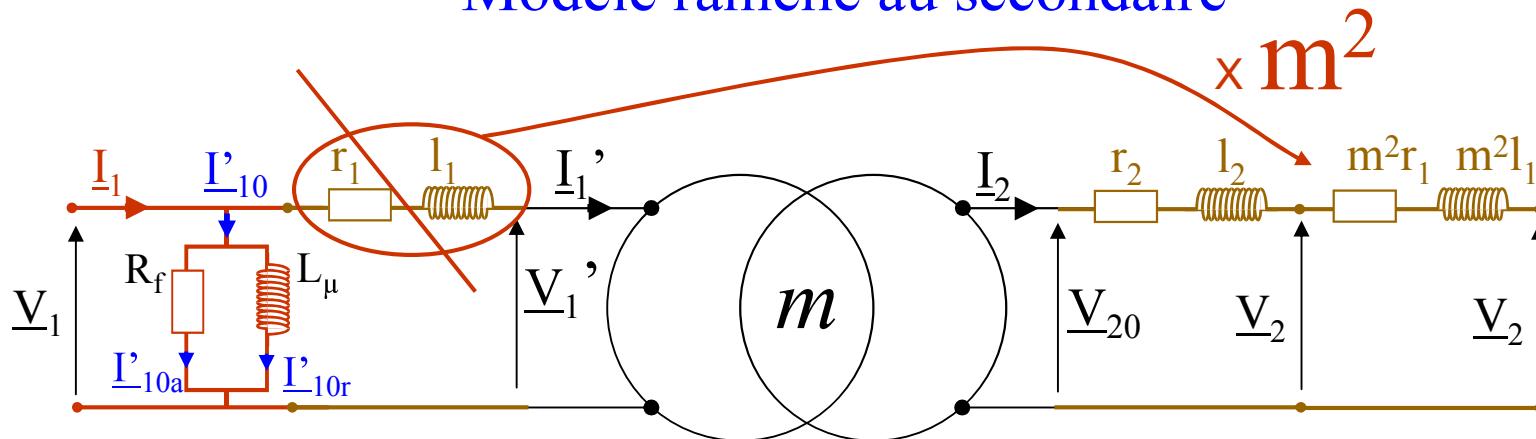


Schéma équivalent

Modèle ramené au secondaire



$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_2 = r_2 + m^2 r_1 \\ X_2 = \lambda_2 \omega = l_2 \omega + m^2 l_1 \omega \end{array} \right.$$

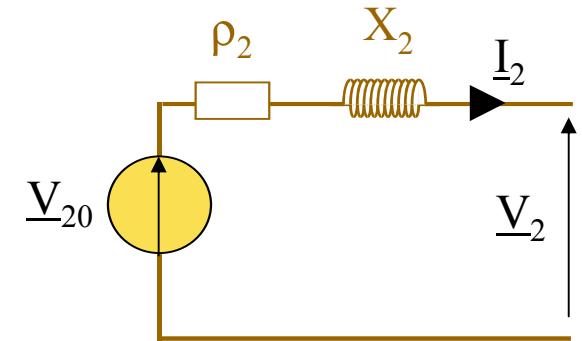


schéma
pour l'utilisateur

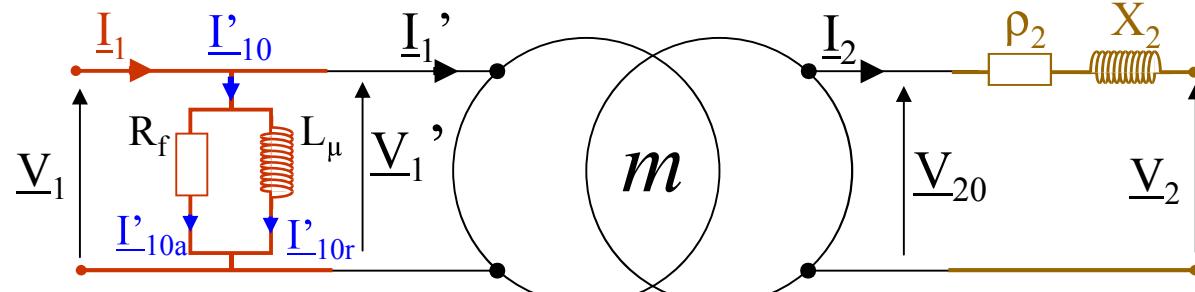
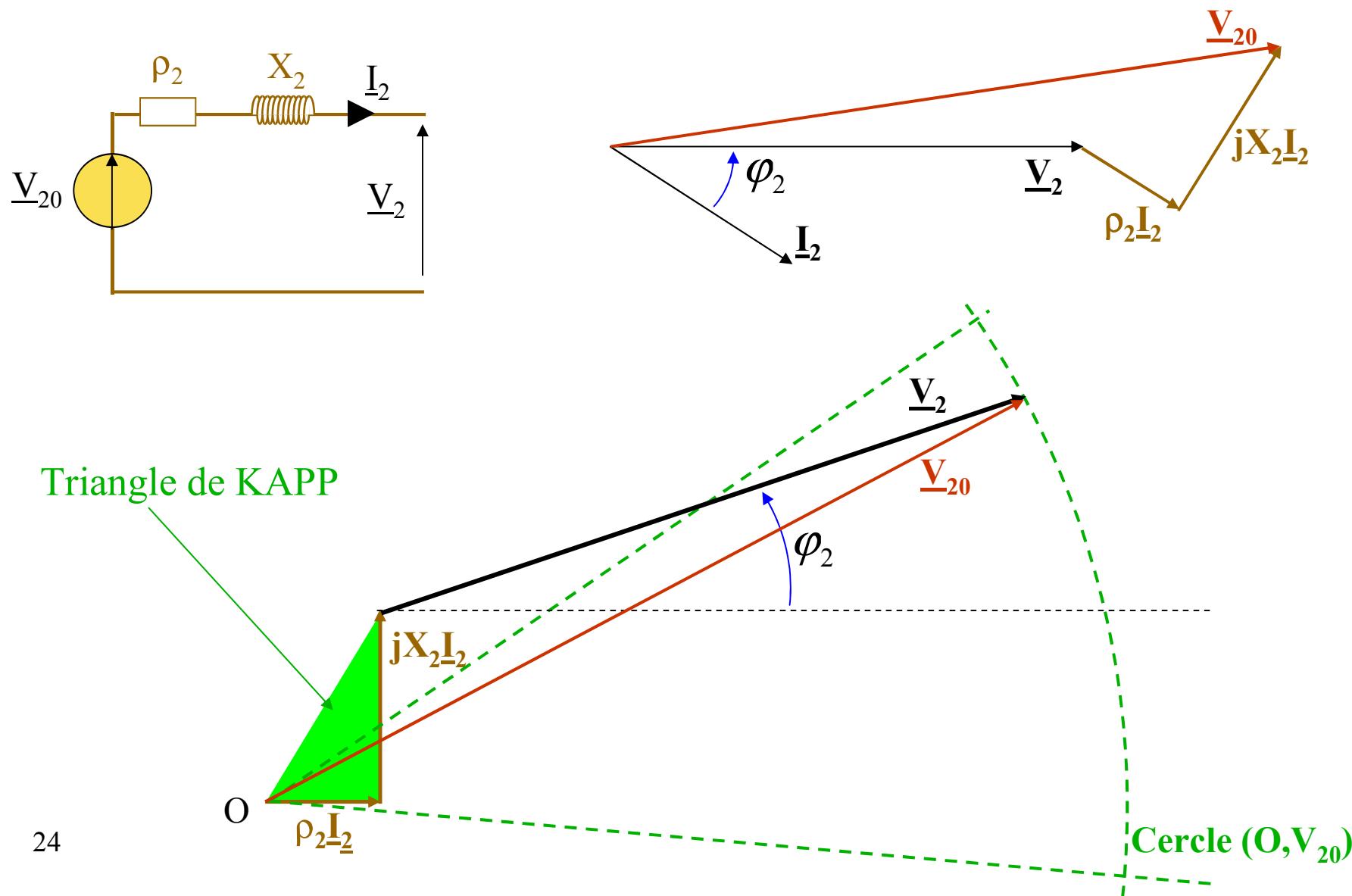
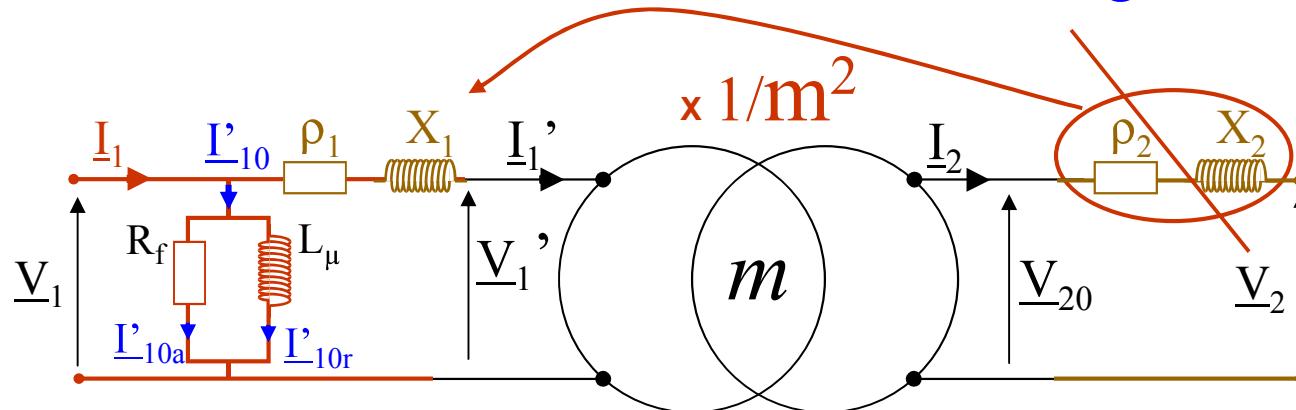


Diagramme de FRESNEL vu du secondaire



Transformateur vu du primaire

Point de vue du fournisseur d'énergie



avec

$$\begin{cases} \rho_2 = r_2 + m^2 r_1 \\ X_2 = \lambda_2 \omega = l_2 \omega + m^2 l_1 \omega \end{cases}$$

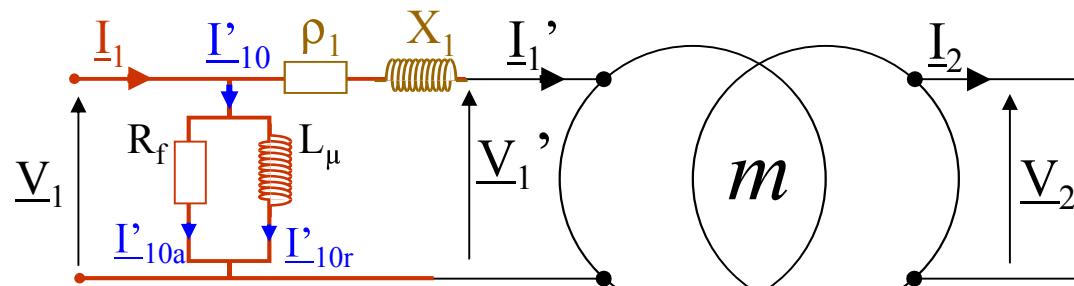
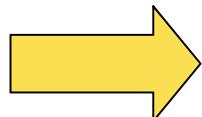
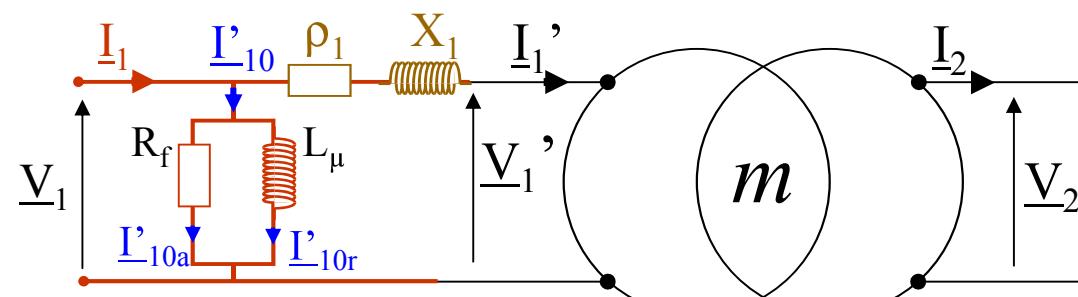
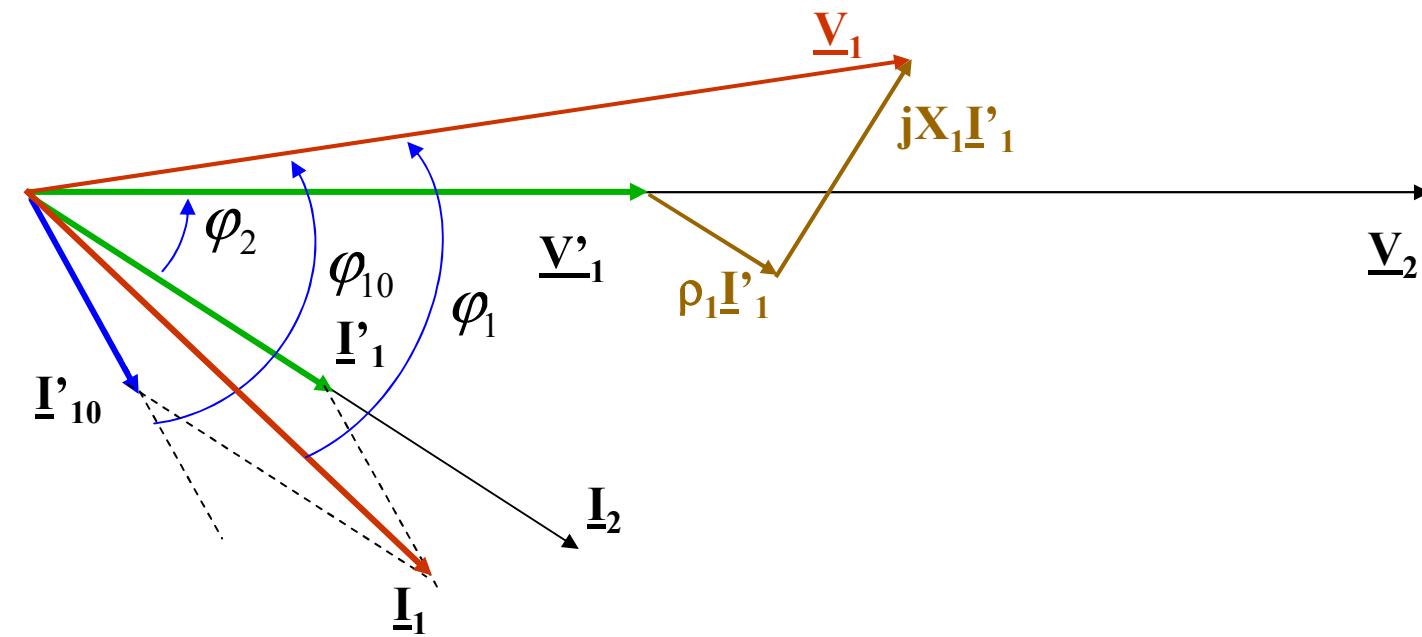
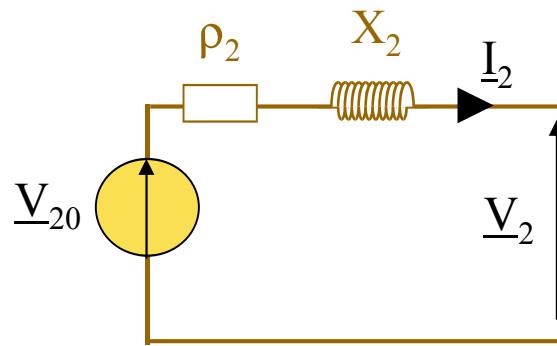


Diagramme de FRESNEL vu du primaire



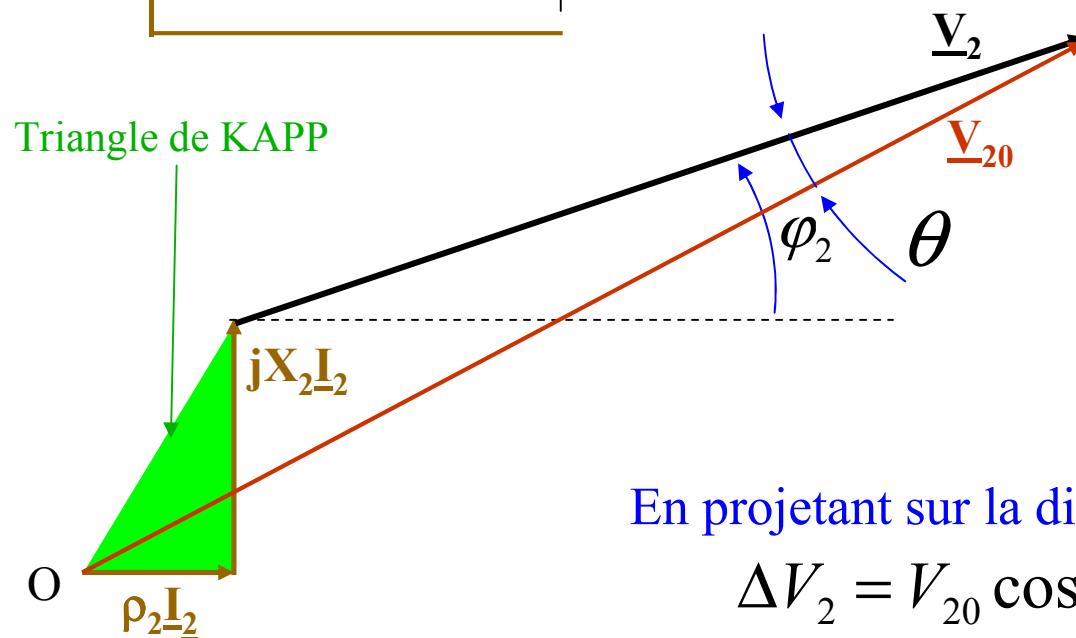
Etude de la chute de tension



$$\Delta V_2 = V_{20} - V_2$$

Attention, différent de :

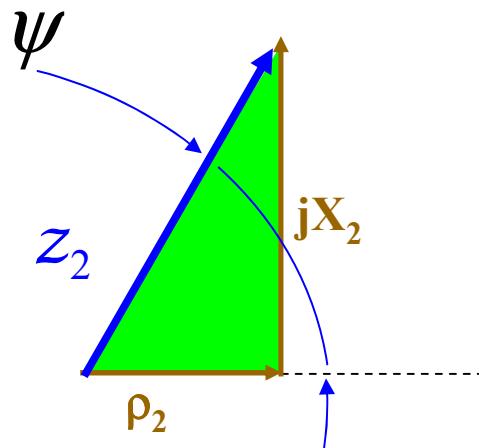
$$\underline{\Delta V}_2 = \underline{V}_{20} - \underline{V}_2$$



$$\Delta V_2 = V_{20} - V_2 \approx \rho_2 I_2 \cos \varphi_2 + X_2 I_2 \sin \varphi_2$$

Etude de la chute de tension

$$\Delta V_2 \approx \rho_2 I_2 \cos \varphi_2 + X_2 I_2 \sin \varphi_2$$



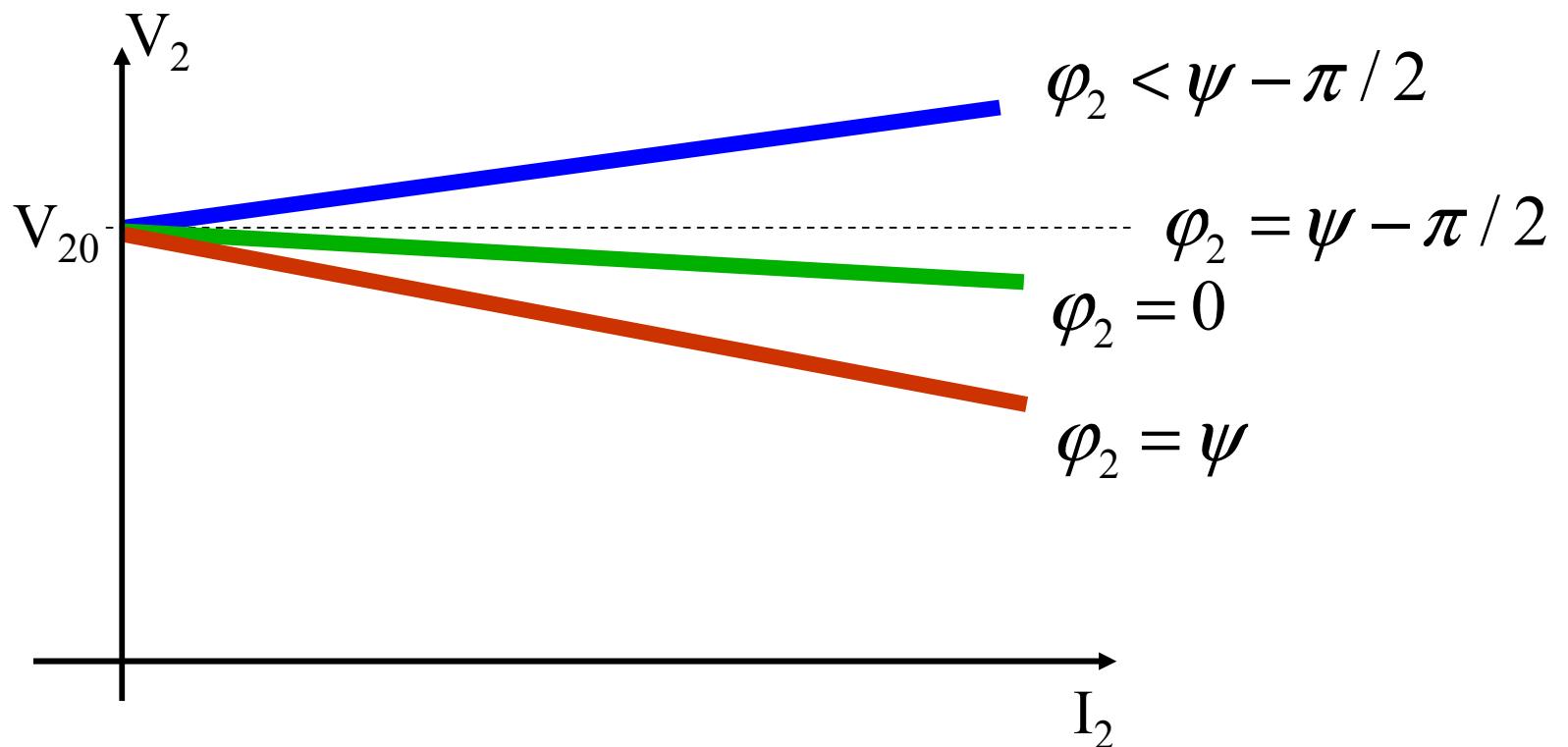
$$\begin{aligned}\Delta V_2 &= Z_2 I_2 [\cos \psi \cos \varphi_2 + \sin \psi \sin \varphi_2] \\ &= Z_2 I_2 \cos(\varphi_2 - \psi)\end{aligned}$$

φ_2	$\pi/2$	$\psi - \pi/2$	0	ψ	$\pi/2$
$d(\Delta V_2) / d\varphi_2$	+	+	+	0	-
ΔV_2	-	0	+	+ max	+

Etude de la chute de tension

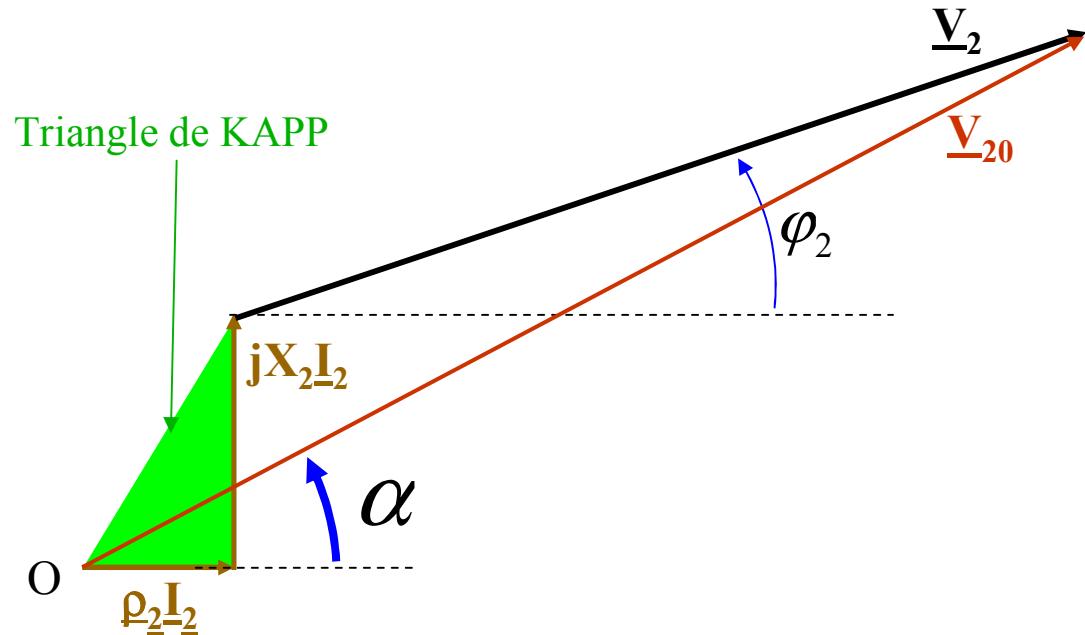
$$\Delta V_2 \approx \rho_2 I_2 \cos \varphi_2 + X_2 I_2 \sin \varphi_2$$

Remarque : la chute de tension est faible, qq% à 15%



Calcul de la chute de tension

sans approximation



$$V_{20} \cos \alpha = \rho_2 I_2 + V_2 \cos \phi_2$$

$$V_{20} \sin \alpha = X_2 I_2 + V_2 \sin \phi_2$$

$$\begin{aligned} V_{20}^2 &= (\rho_2 I_2 + V_2 \cos \phi_2)^2 + (X_2 I_2 + V_2 \sin \phi_2)^2 \\ &= (\rho_2^2 + X_2^2) I_2^2 + V_2^2 + 2V_2 I_2 (\rho_2 \cos \phi_2 + X_2 \sin \phi_2) \end{aligned}$$

Équation d'une ellipse

Calcul de la chute de tension

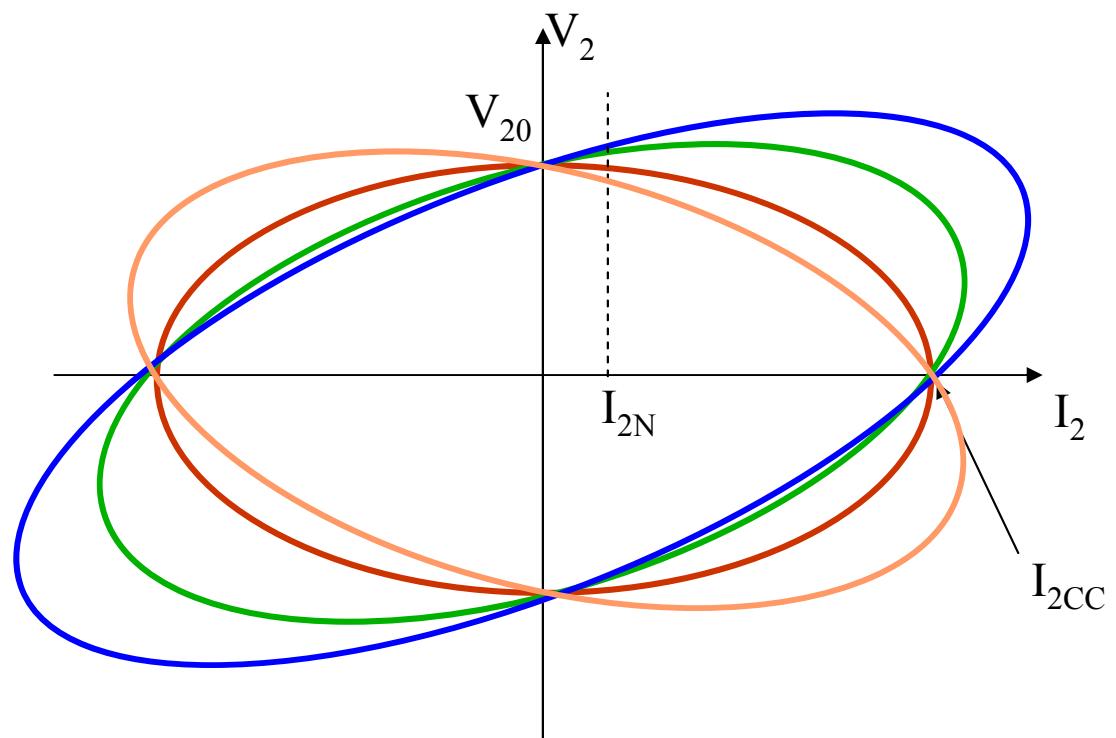
sans approximation

$$V_{20} = (\rho_2^2 + X_2^2) I_2^2 + V_2^2 + 2 V_2 I_2 (\rho_2 \cos \varphi_2 + X_2 \sin \varphi_2)$$

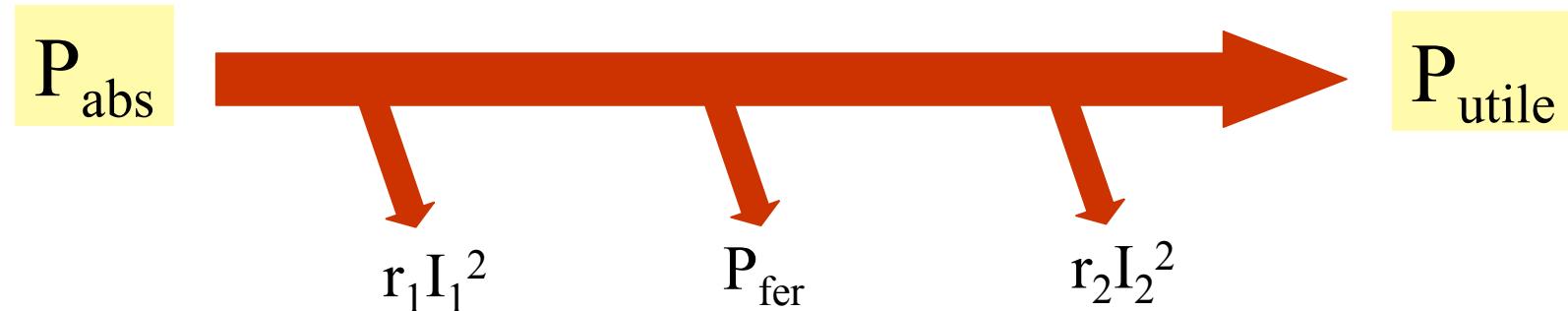
$$I_{2cc} = \frac{m V_1}{\sqrt{\rho_2^2 + X_2^2}}$$

Courant destructif

$$I_{2cc} \gg I_{2N}$$

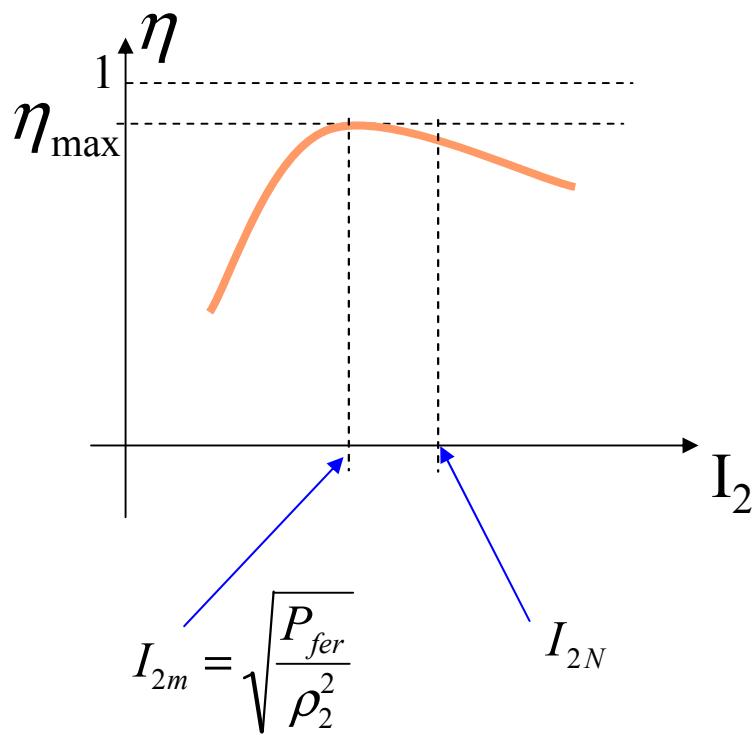


Pertes et rendement



$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{V_2 I_2 \cos \varphi_2 + p_{\text{cuivre}}} = \frac{V_2 I_2 \cos \varphi_2}{V_2 I_2 \cos \varphi_2 + \rho_2 I_2^2 + p_{\text{fer}}}$$

The term $V_2 I_2 \cos \varphi_2$ is circled in red and labeled P_{utile} . The term $\rho_2 I_2^2 + p_{\text{fer}}$ is circled in red and labeled p_{cuivre} .



Grandeurs caractéristiques

Puissance apparente nominale

$$S_N = V_{20} I_{2N}$$

Tension primaire nominale

$$V_{1N}$$

Tension secondaire en pleine charge

$$V_{2N} \left\{ \begin{array}{l} I_{2N} \\ \cos \varphi_2 \end{array} \right.$$

ou chute nominale relative

en % de V_{20} qq %

Puissance apparente absorbée à vide

en % de S_N 10 %

ordre de grandeur

Signification des grandeurs nominales

Puissance apparente nominale

$$S_N = V_{20} I_{2N}$$

En lien direct avec le volume du transformateur

courants nominaux

$$I_{1N} \text{ et } I_{2N}$$

Au delà de ces valeurs, l'échauffement du cuivre est trop important

Vrai uniquement en régime permanent

Tension primaire nominale

$$V_{1N}$$

$$U = 4,44 \ n f S B_M = 4,44 \ n f \phi_M$$

V est proportionnel à B_{\max} dans le matériau du transformateur

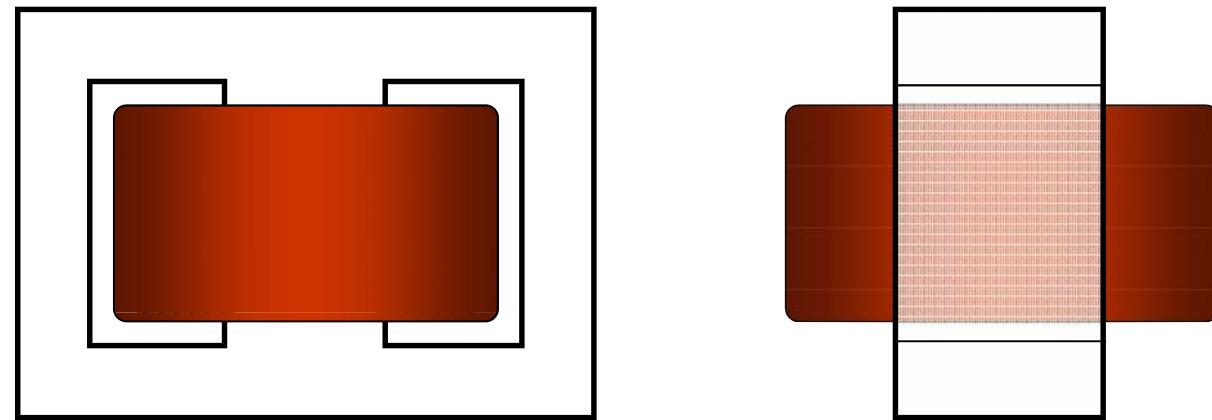
V_{1N} correspond à B_{\max} voisin de 1,5 Teslas

Si $V_1 >> V_{1N}$ le courant magnétisant augmente et devient destructif

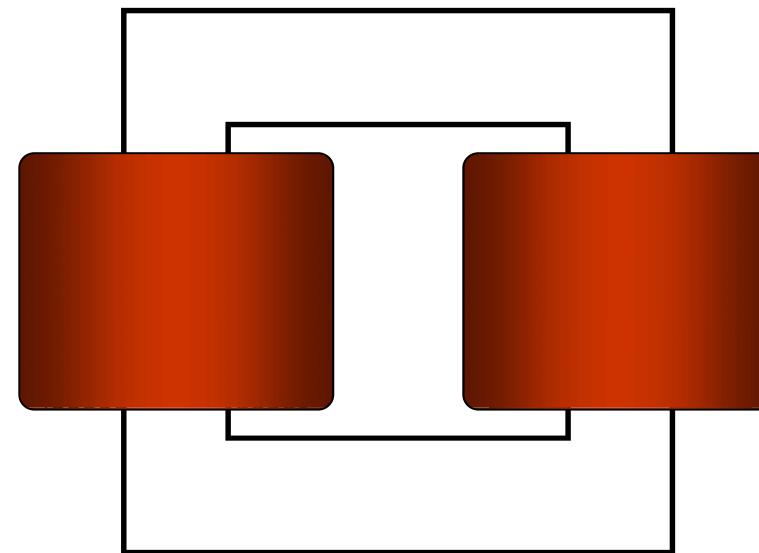
³⁴ Si $V_1 < V_{1N}$, il existe un transfo plus petit de même S_N (nS_{fer} plus petit)

Technologies de construction

Circuit cuirassé

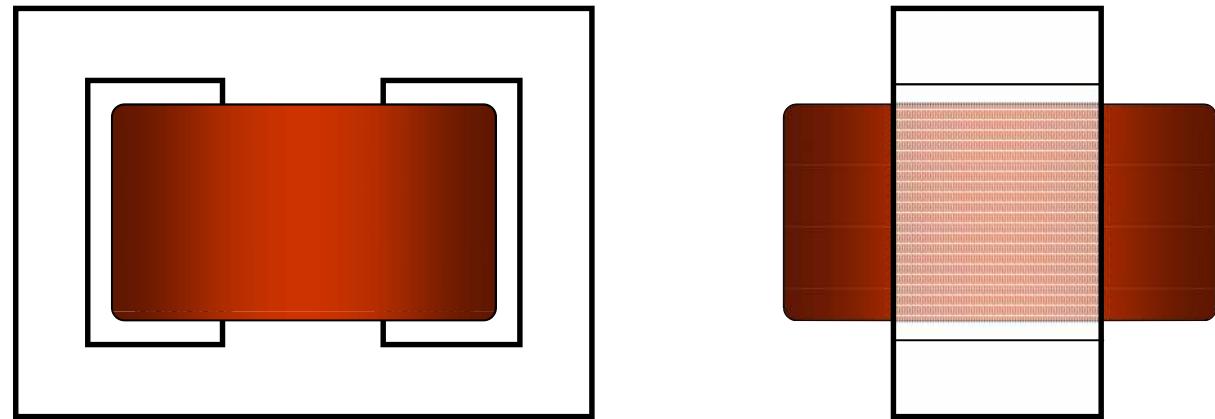


Circuit à 2 colonnes



Technologies de construction

Circuit cuirassé

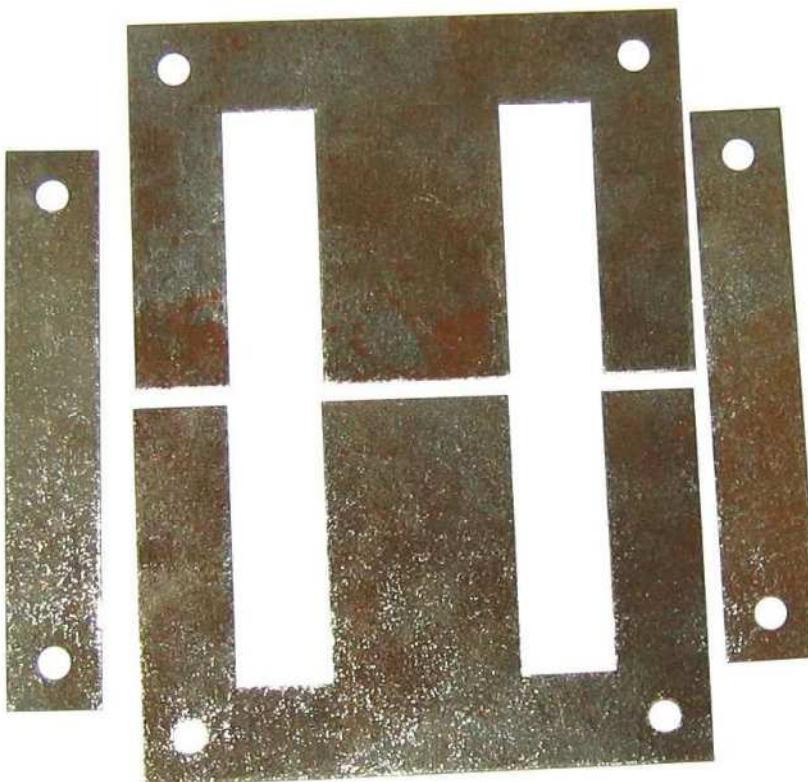


Circuit magnétique constitué
d'un empilage de tôles en I et E :



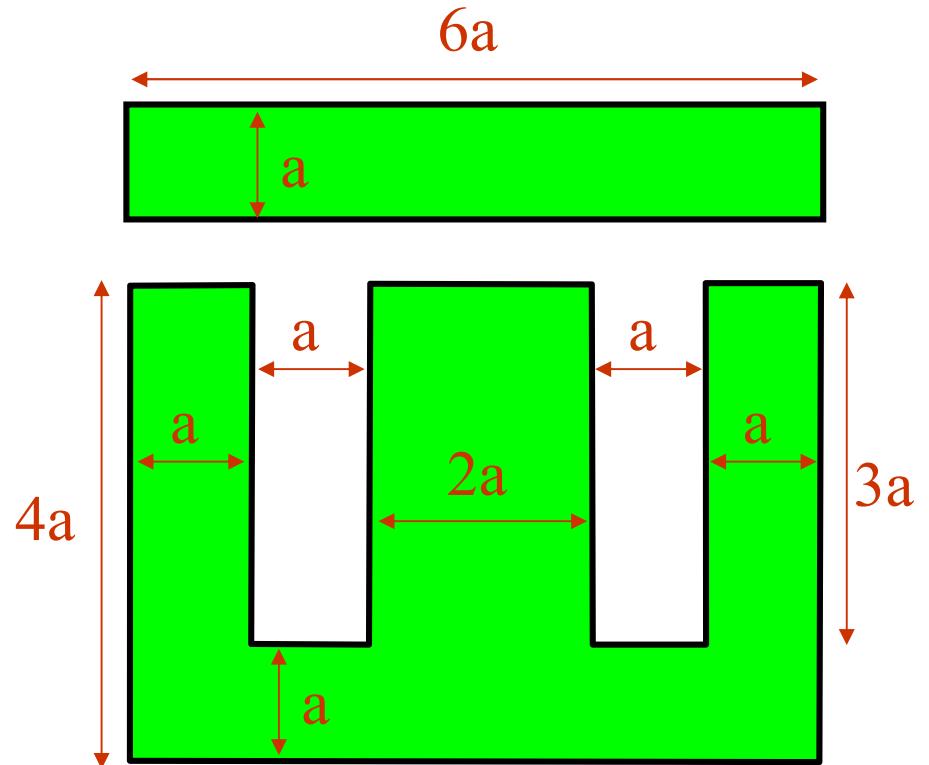
Technologies de construction

dimension des tôles

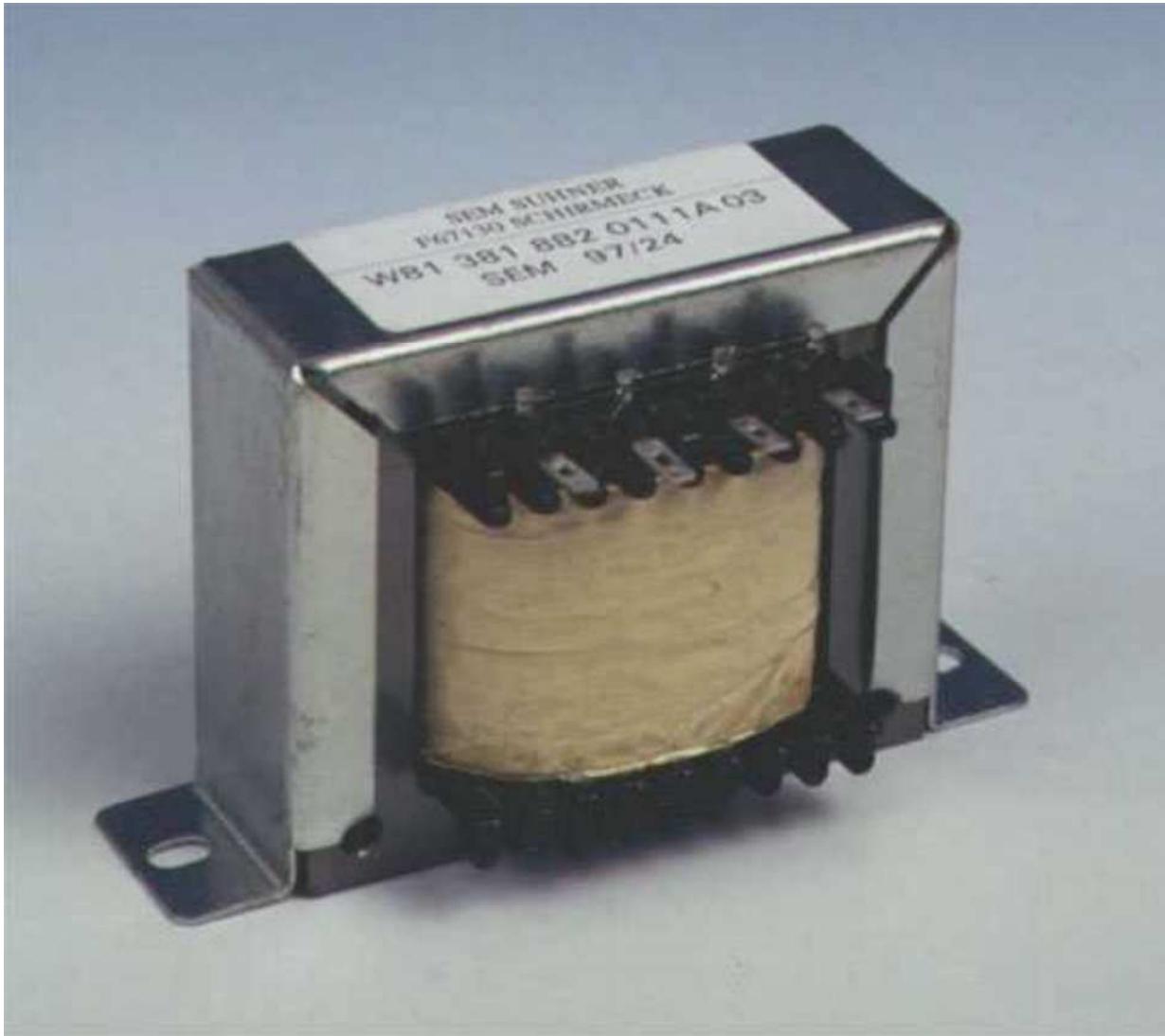


tôles au silicium en I et E isolées par traitement de surface

pour des raisons d'économie :



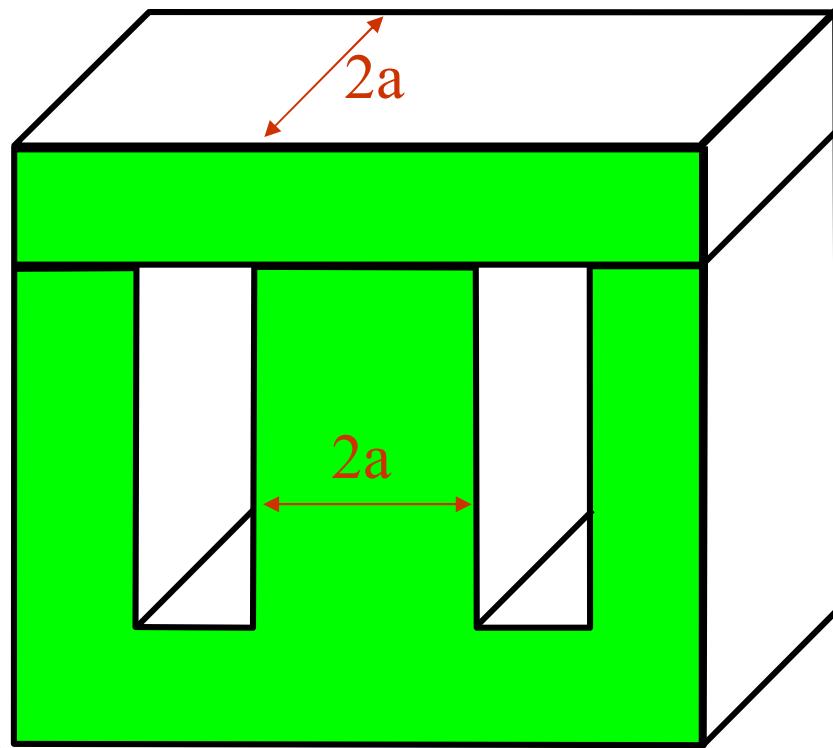
On mesure les dimensions externes, on déduit la section du circuit magnétique



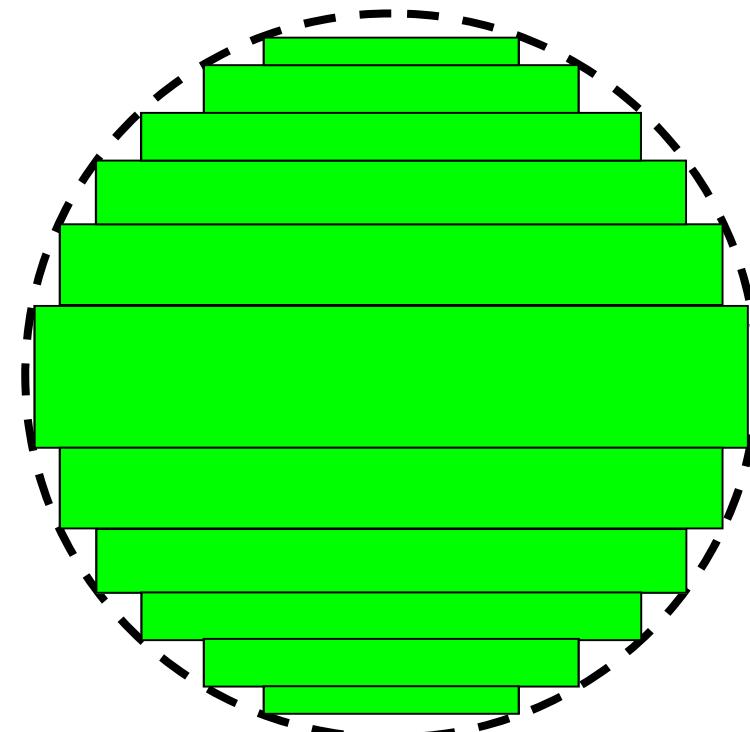
même si
elle est cachée !

Technologies de construction

pour minimiser le cuivre,
le noyau central est carré (ou presque) :

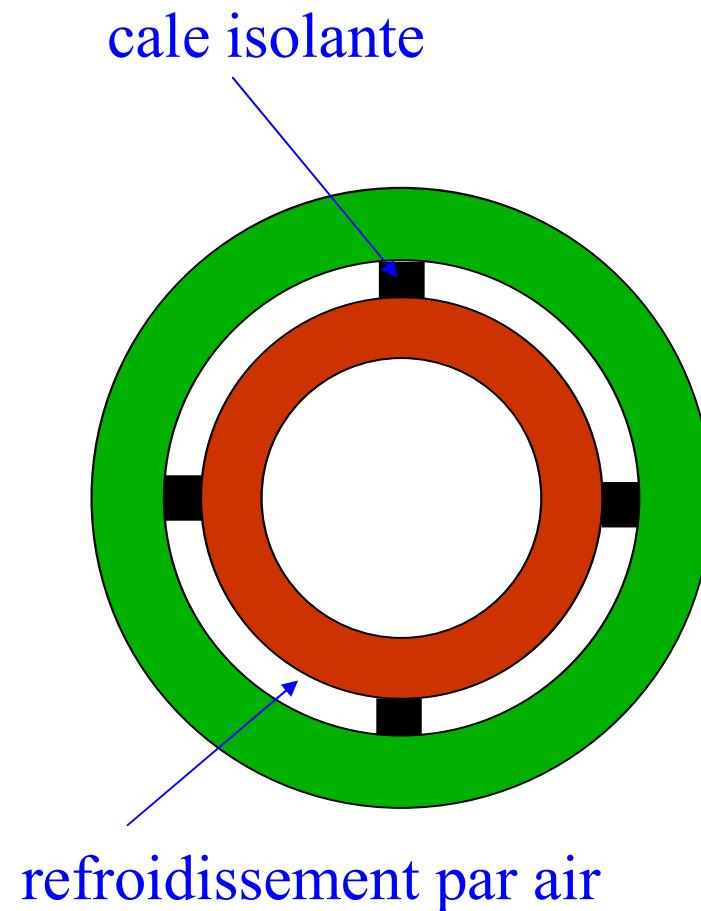
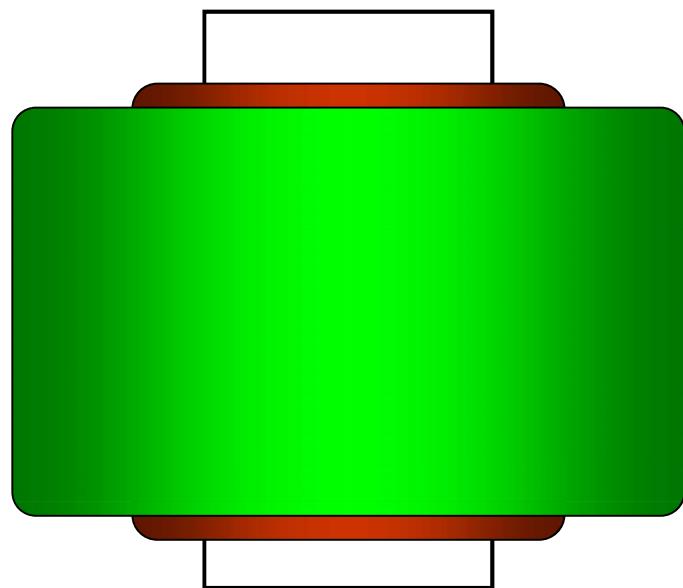


ou mieux, en gradin :



Technologies de construction

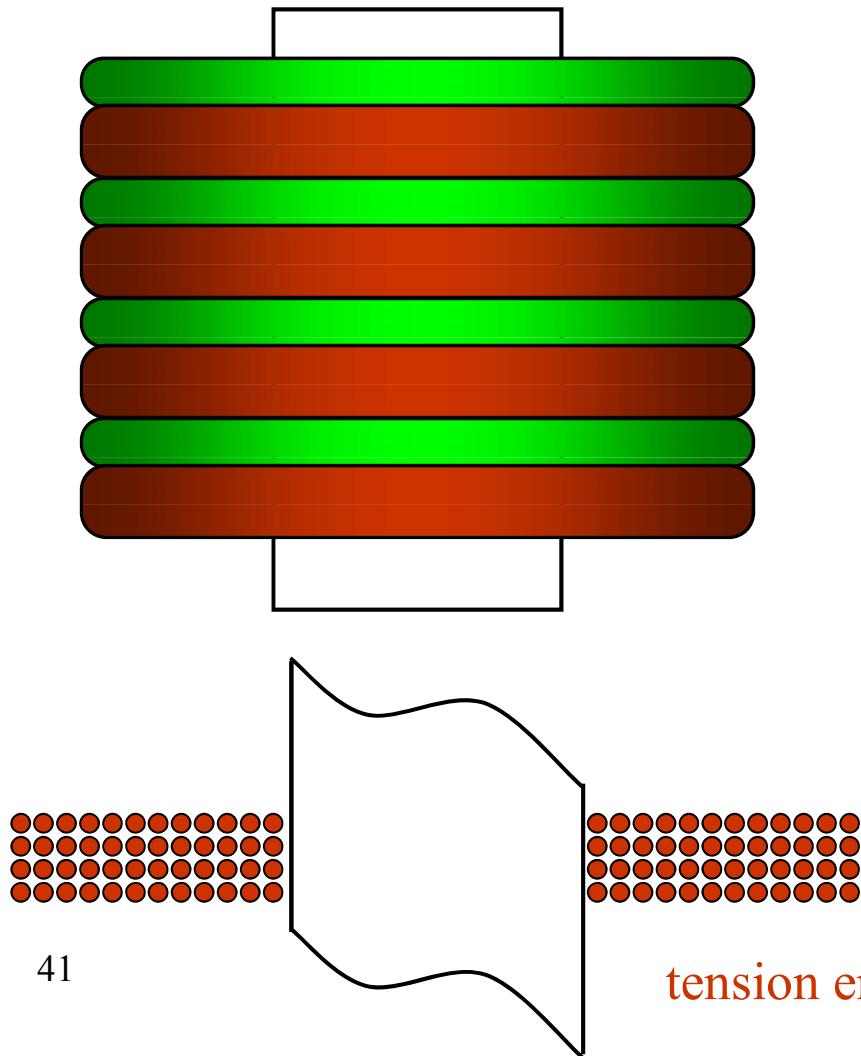
Enroulements concentriques



Technologies de construction

Enroulements en galettes

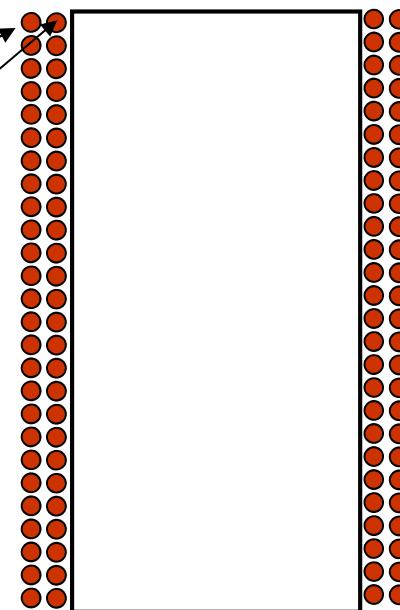
pour les problèmes d'isolation
en haute tension



$$\text{tension par spire} = U_s = 4,44 \ f S B_M$$

x spires par couche

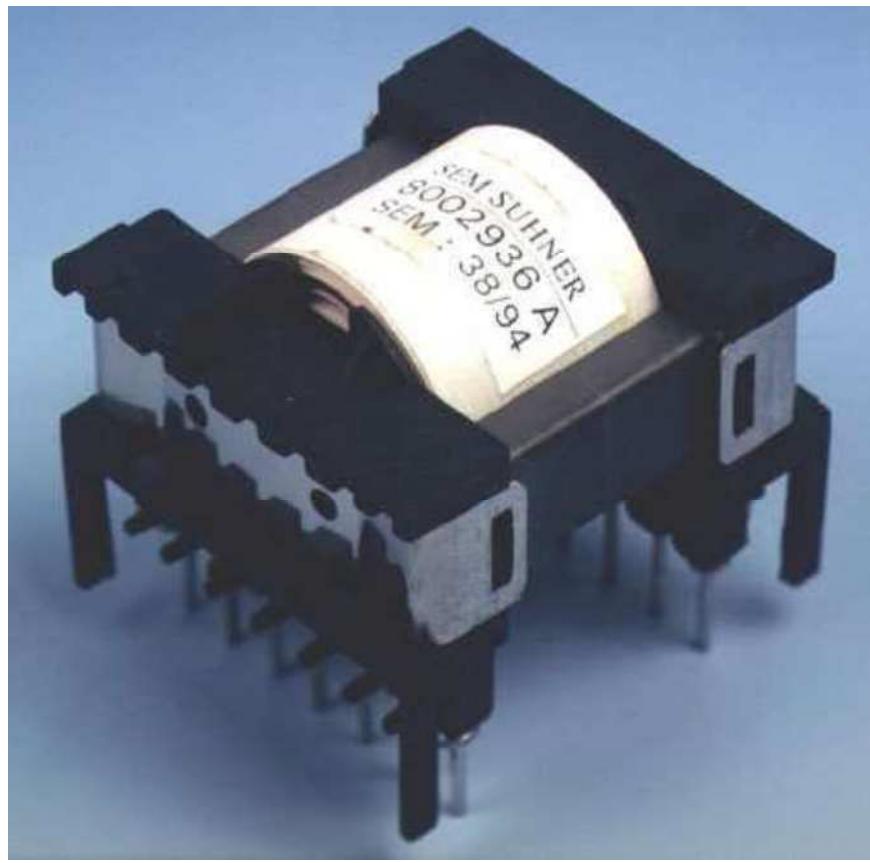
tension $2 \times U_s$
entre ces 2 spires



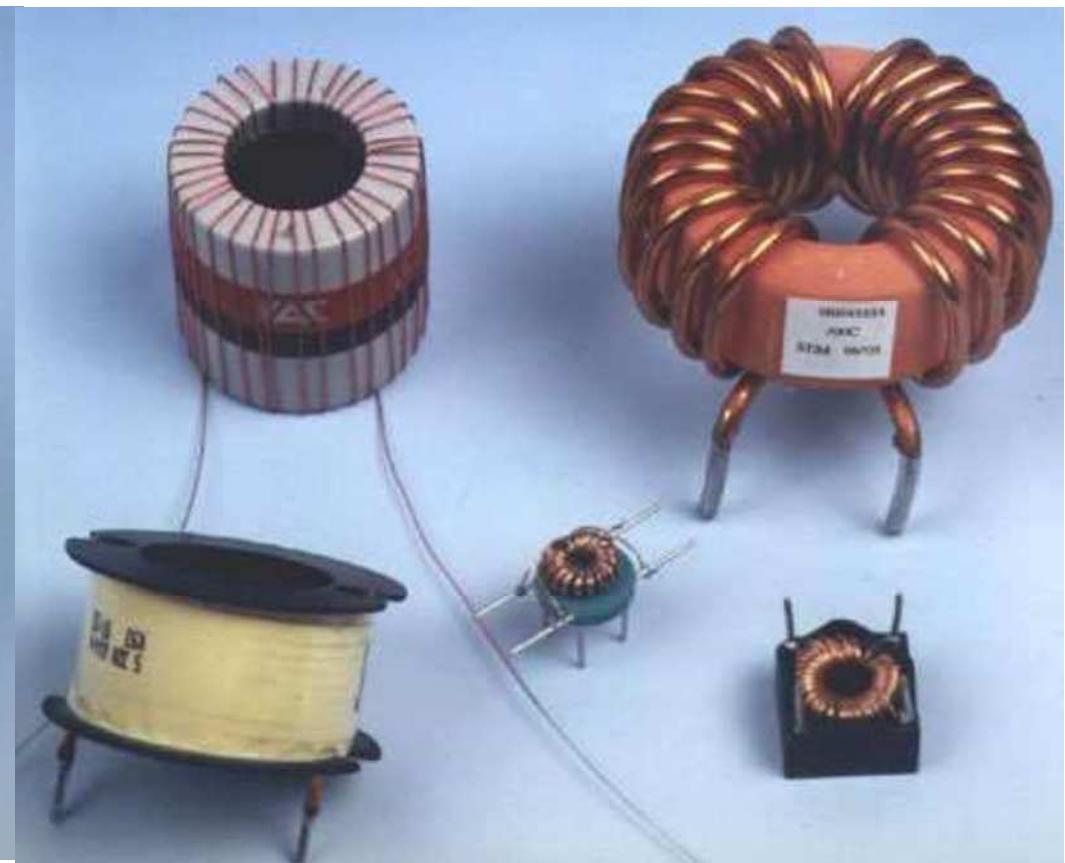
tension entre 2 spires voisines moindre

Exemples de réalisation

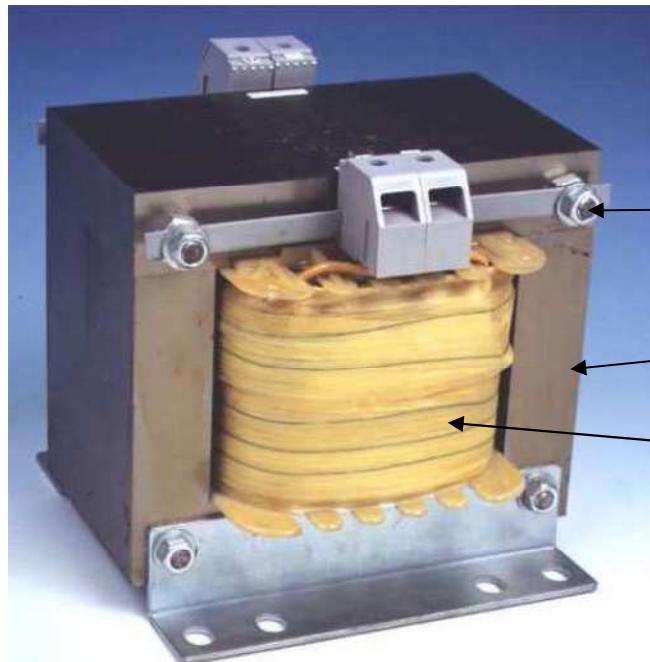
Noyau ferrite



Noyau torique



Exemples de réalisation



Tôles classique

tige d'acier isolée

tôles en E et en I

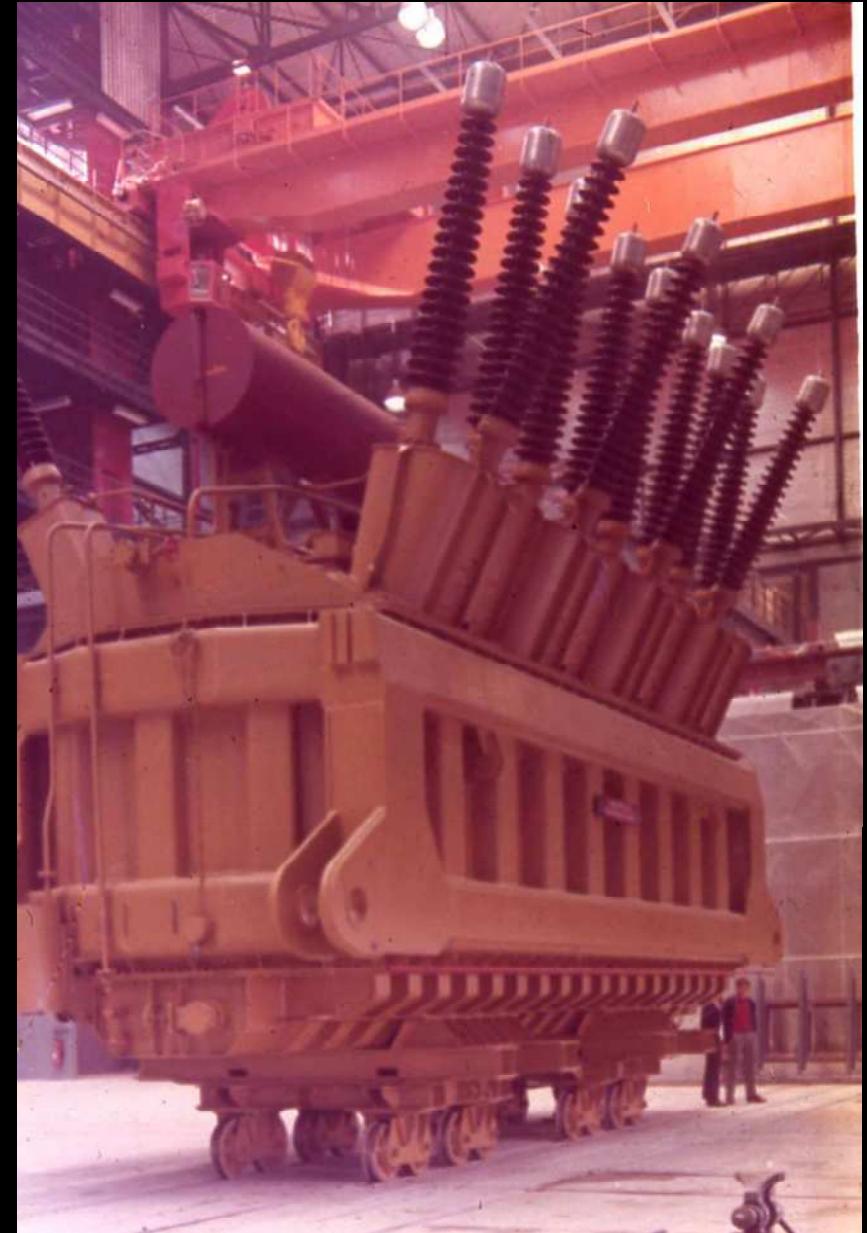
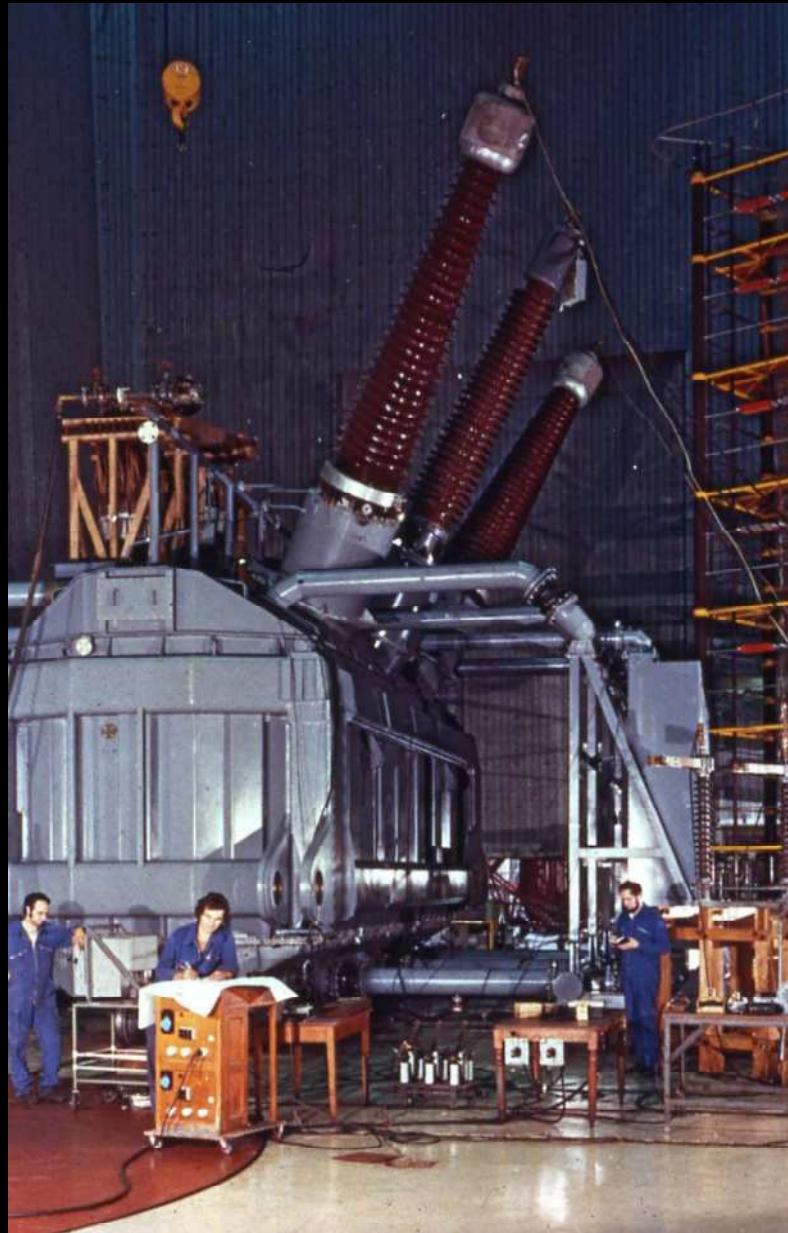
bobinage en cuivre



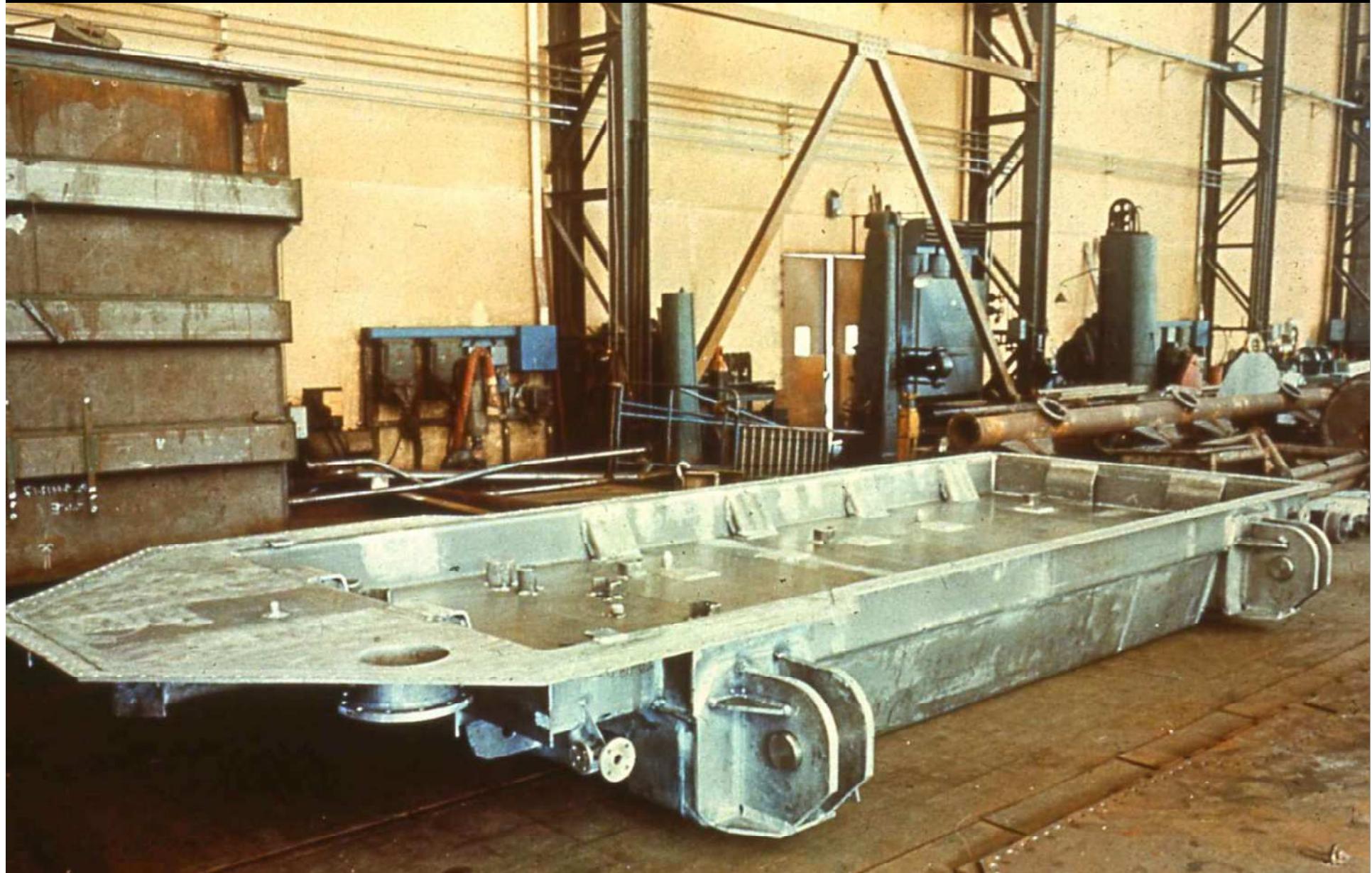
Transfo core faible fuites

faible volume

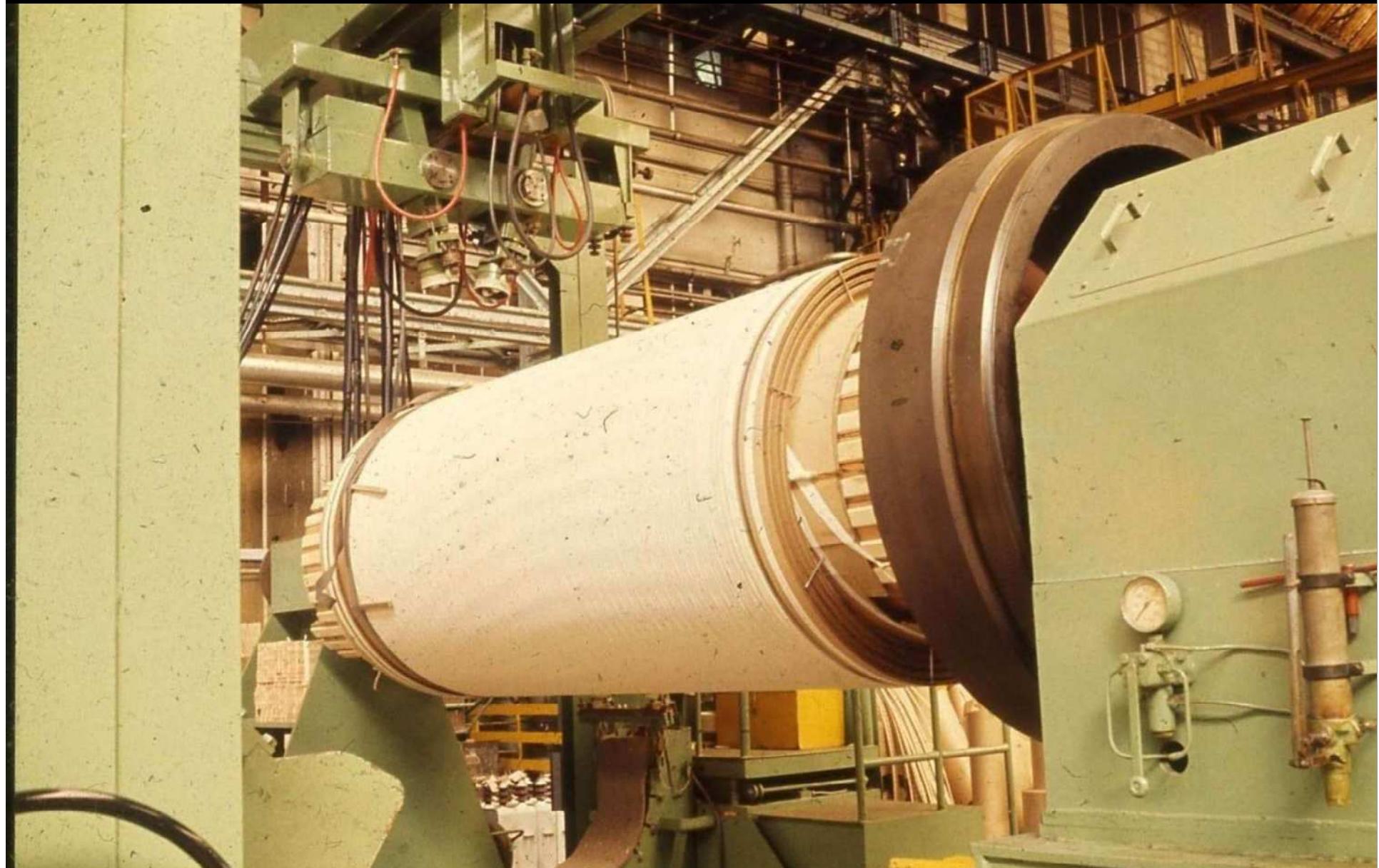
Exemples de réalisation (en triphasé)



Exemples de réalisation (en triphasé)



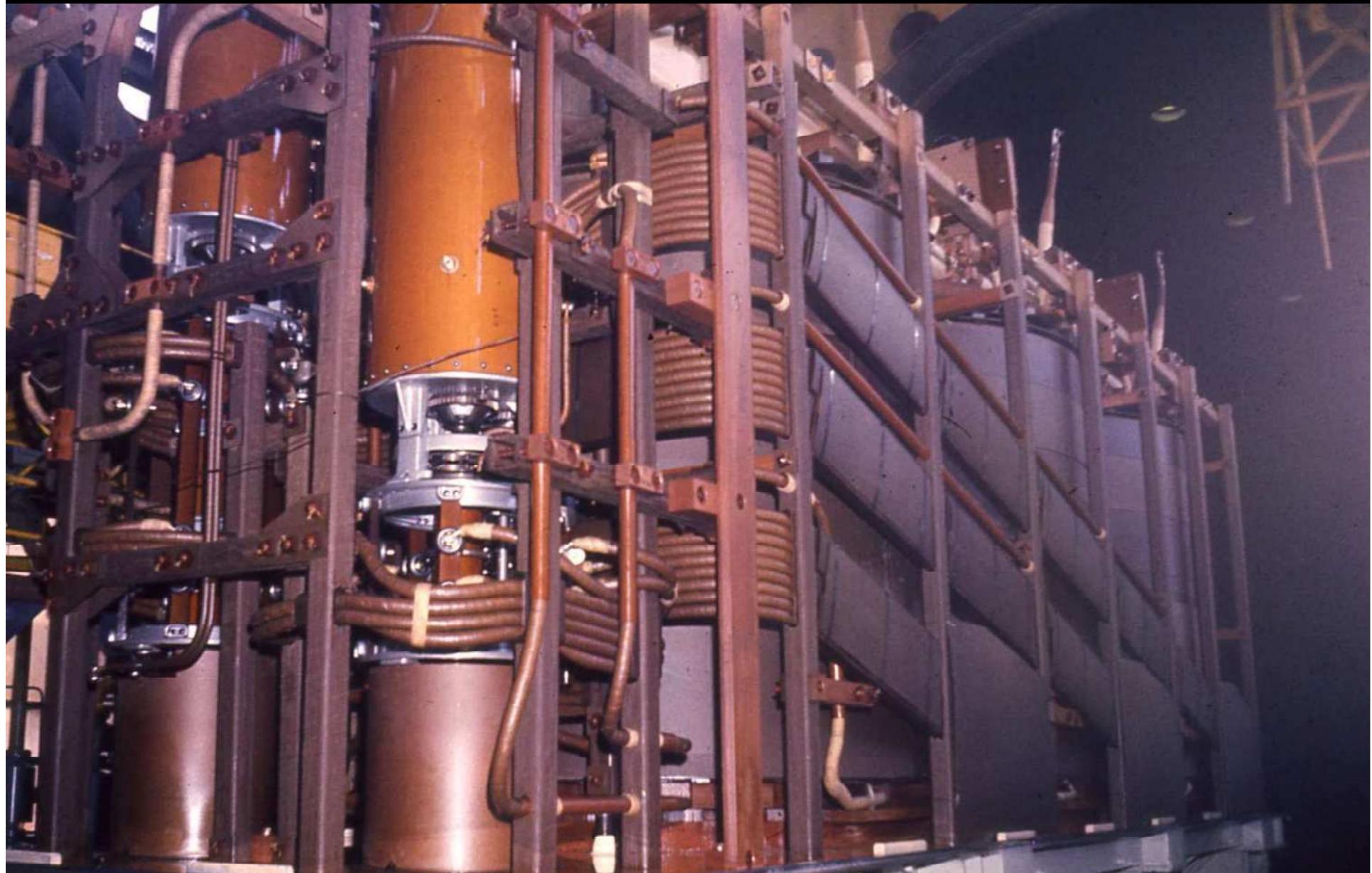
Exemples de réalisation (en triphasé)



Exemples de réalisation (en triphasé)



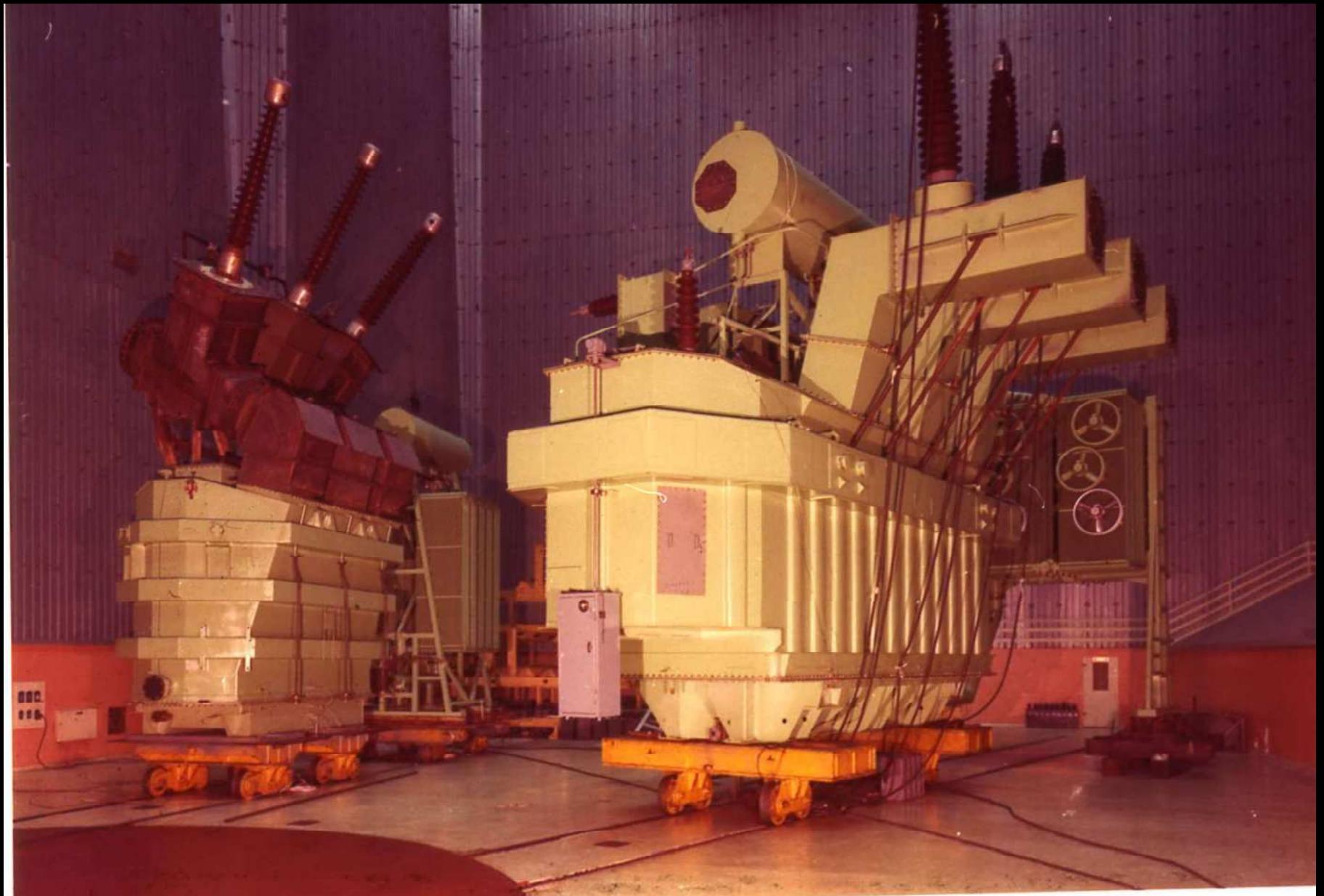
Exemples de réalisation (en triphasé)



Exemples de réalisation (en triphasé)

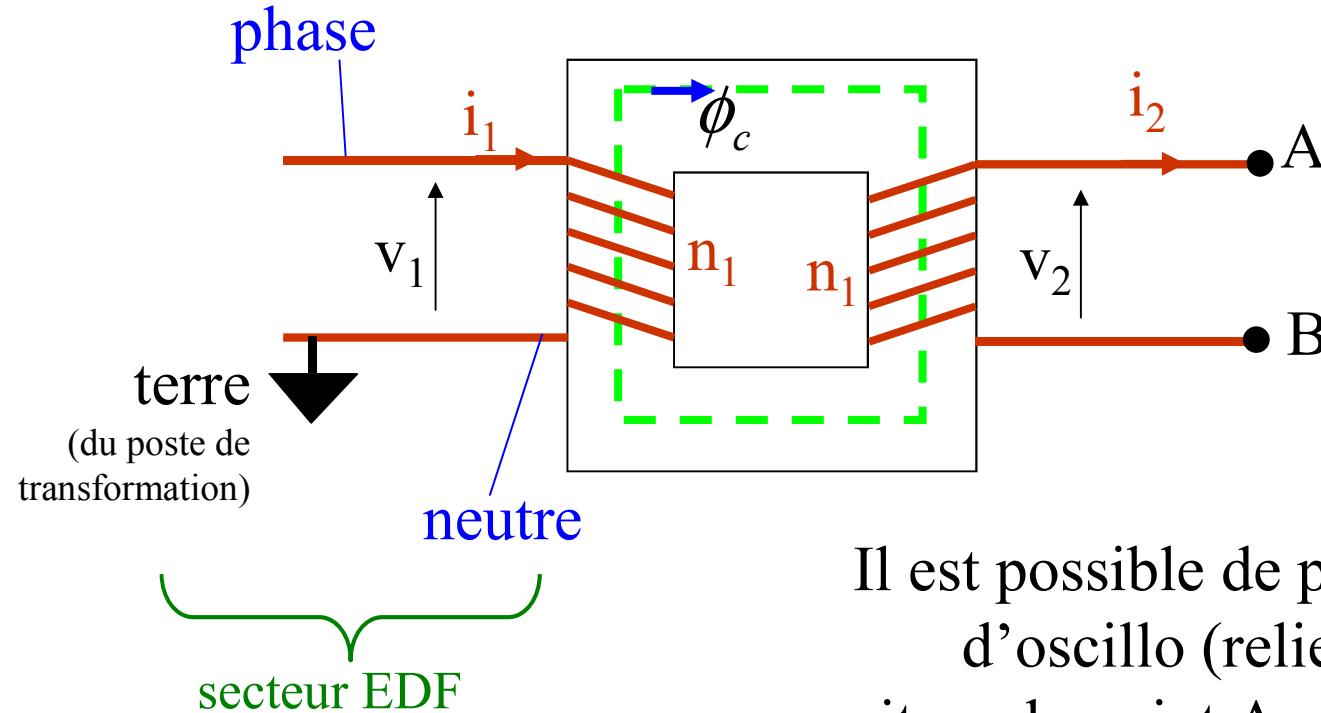


Exemples de réalisation (en triphasé)



Application : transformateur d'isolement

C'est un transformateur de rapport unité



Il est possible de placer une masse d'oscillo (reliée à la terre) soit sur le point A, soit sur le point B

le secondaire du transformateur est isolé du primaire

Remarque : le neutre et la terre seront définis plus précisément plus tard

Construction d'un transformateur

Si l'on néglige le courant magnétisant : $I_2 = n_1 / n_2 I_1$

Donc la section du cuivre au secondaire est : $S_{2cu} = n_1 / n_2 S_{1cu}$

En considérant la longueur l d'une spire moyenne identique au secondaire et au primaire : $\mathcal{V}_{2cu} = n_2 S_{2cu} l = n_1 S_{1cu} l = \mathcal{V}_{1cu}$

Les volumes de cuivre primaire et secondaire sont identiques

Construction d'un transformateur

On souhaite construire un transformateur de rapport de transformation m donné et de puissance apparente S_N donnée

$I_{1N} = S_N/V_{1N}$, on détermine la section S_{1cu} du cuivre au primaire avec (densité de courant $\delta = 5 \text{ A/mm}^2$)

On choisit des tôles en I et E « au hasard » dans un catalogue

$$V_{1N} = 4,44 n_1 f S B_M \rightarrow \text{on détermine } n_1$$

Diagram showing the formula for primary voltage V_{1N} with annotations: 50 Hz is connected to frequency f ; $4 a^2$ is connected to core area S ; $1,5 \text{ T}$ is connected to magnetic flux density B_M .

\rightarrow Surface totale du cuivre au primaire $S_{1cu} n_1$

si surface totale cuivre primaire > surface fenêtre/2

\rightarrow Il faut choisir un circuit magnétique plus grand, etc...
(ou bien augmenter la surface du fer par une section rectangulaire ...)

Construction d'un transformateur

On souhaite construire un transformateur de rapport de transformation m donné et de puissance apparente S_N donnée

Choix du circuit magnétique

surface fenêtre/2 > surface totale cuivre primaire

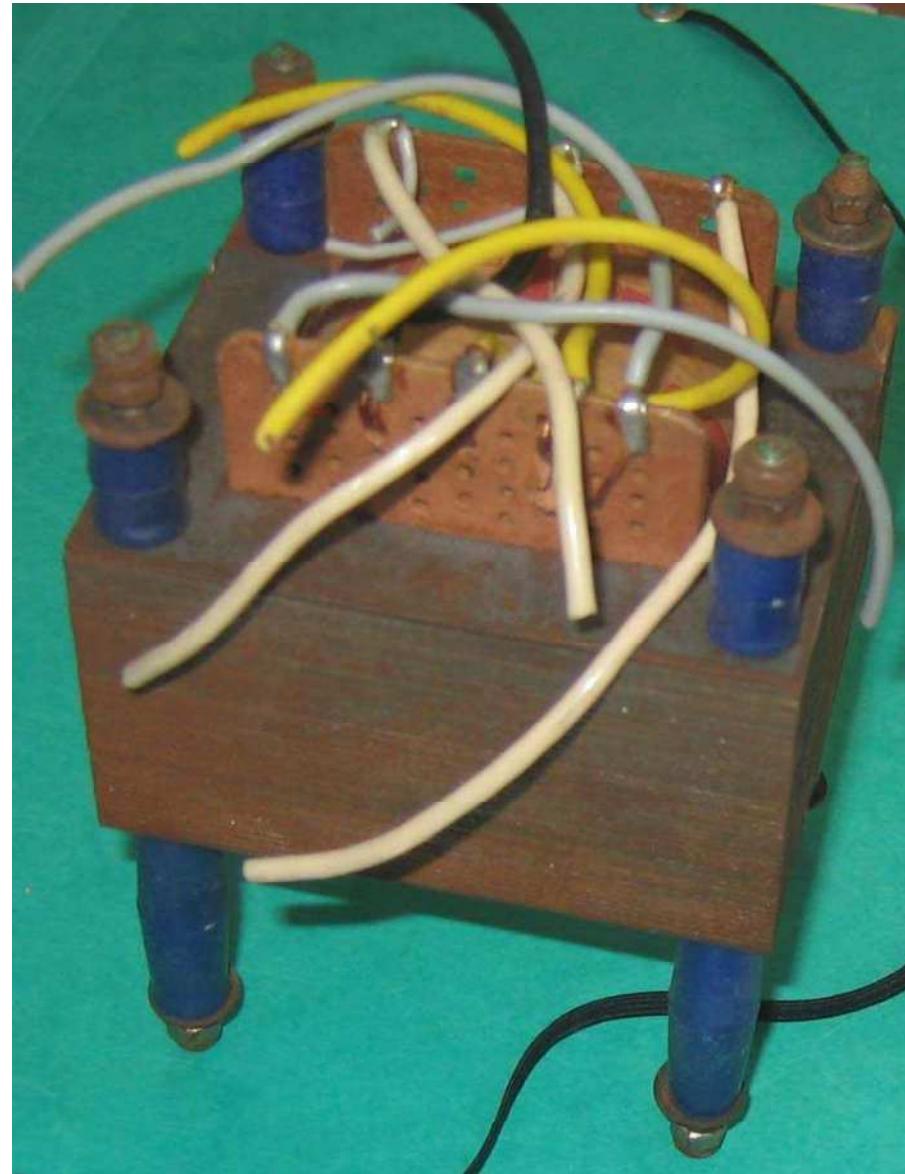
$$\frac{3a^2}{2} > n_1 s_{1cu} = \frac{U_{1N}}{4,44 f (4a^2) B_M} - \frac{S_N}{\delta U_{1N}}$$

$$a^4 > \frac{1}{6} \frac{S_N}{4,44 f B_M \delta}$$

Remarques :

- la section du noyau central n'est pas nécessairement carrée
- le volume du tranfo croît avec S_N et décroît avec la fréquence
- choix de B_M au coude de saturation

Détermination des caractéristiques d'un transformateur inconnu



Détermination des caractéristiques d'un transformateur inconnu

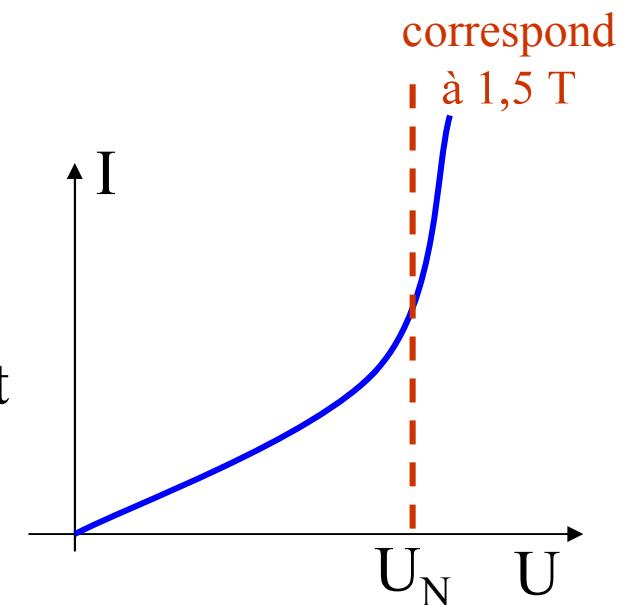
On mesure la section du (des) fils de cuivre $\approx 5 A/mm^2$ $\rightarrow I_N$

1°) si l'on connaît les dimensions du fer et le nombre de spires

$\approx 1,5 T$ \rightarrow on détermine U_N du transfo

2°) sinon :

on trace I fonction de U pour un enroulement

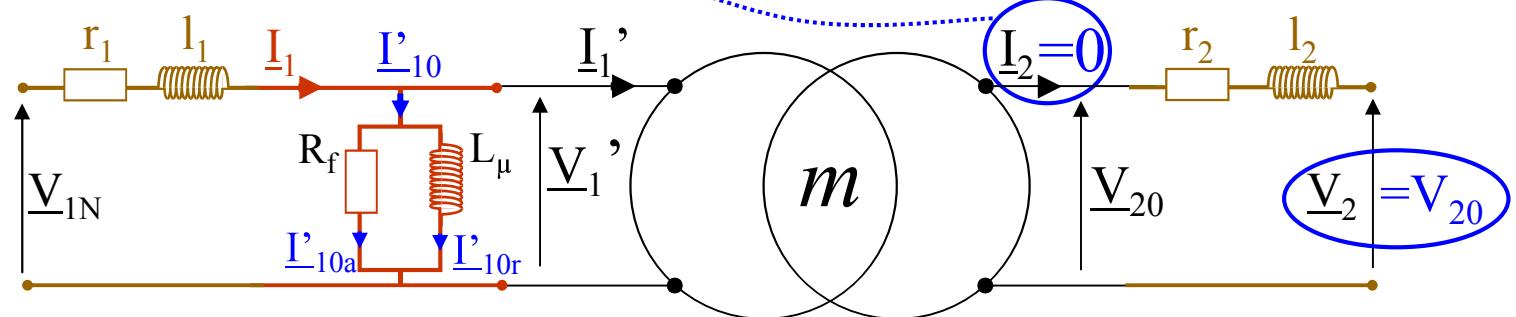


\rightarrow on détermine U_N pour cet enroulement (coude de saturation)
etc...

Essais standards du transfo

Essai à **vide** sous tension nominale

modèle sans approximation



on mesure :

$$V_{20} \quad \text{Kapp : } \sqrt{(r_1^2 + l_1^2 \omega^2)} \quad I_{10} \ll V_{1N} \quad \text{donc : } m = \frac{V_{20}}{V'_1} \approx \frac{V_{20}}{V_{1N}} \quad \text{mesure par défaut}$$

I_{10} et P_{10}

$$P_{10} = p_{fer} + r_1 I_{10}^2$$

$$\approx p_{fer} = \frac{V_{1N}^2}{R_f}$$

p_{cuivre} du même ordre de grandeur que
 p_{fer} pour I_N (rendement maximal)

$$R_f = \frac{V_{1N}^2}{P_{10}}$$

57

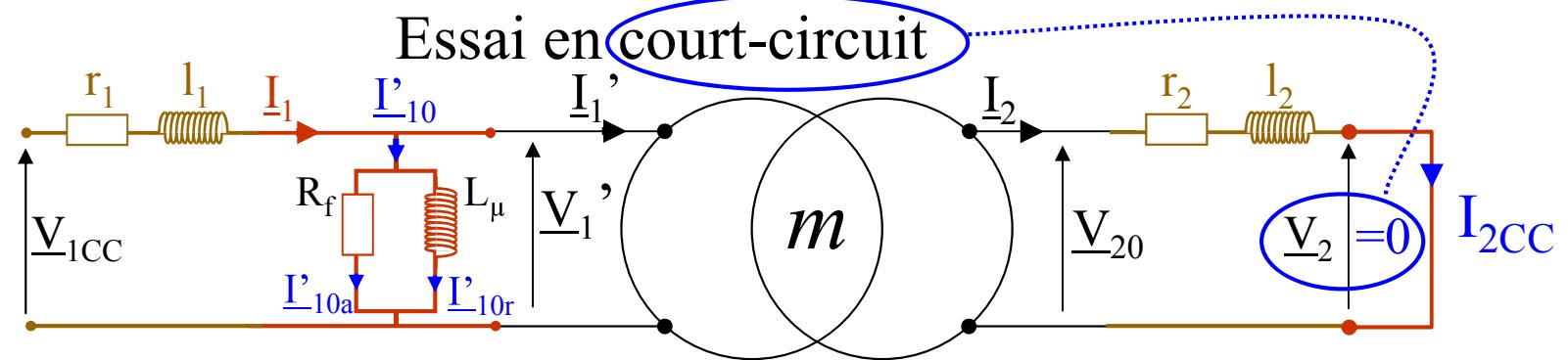
de même $L_\mu \gg l_1$

$$L_\mu \omega = \frac{V_{1N}^2}{Q_{10}} = \frac{V_{1N}^2}{\sqrt{V_{1N}^2 I_{10}^2 - P_{10}^2}}$$

Essais standards du transfo

modèle sans approximation

Tension réduite
 $V_{1CC} \ll V_{1N}$



pour une mesure précise, on choisit $I_{2CC} = I_{2N}$ (ou plus en transitoire), alors $I_1 = I_{1CC}$

$$V'_1 = \frac{1}{m} \sqrt{(r_2^2 + l_2^2 \omega^2)} \quad I_{2CC} \ll V_{1N} \implies I'_{10} \ll I_{1CC}$$

on mesure :

I_{1CC} et I_{2CC}

donc : $m = \frac{I'_1}{I_2} \approx \frac{I_{1CC}}{I_{2CC}}$ mesure par excès

V_{1CC} et P_{1CC}

$P_{1CC} = r_1 I_{1CC}^2 + p_{fer} + r_2 I_{2CC}^2$ p_{cuivre} du même ordre de grandeur que p_{fer} pour I_N et V_{1N} (rendement maximal)

⁵⁸
 donc p_{fer} négligeable car $V'_1 \ll V_{1N}$

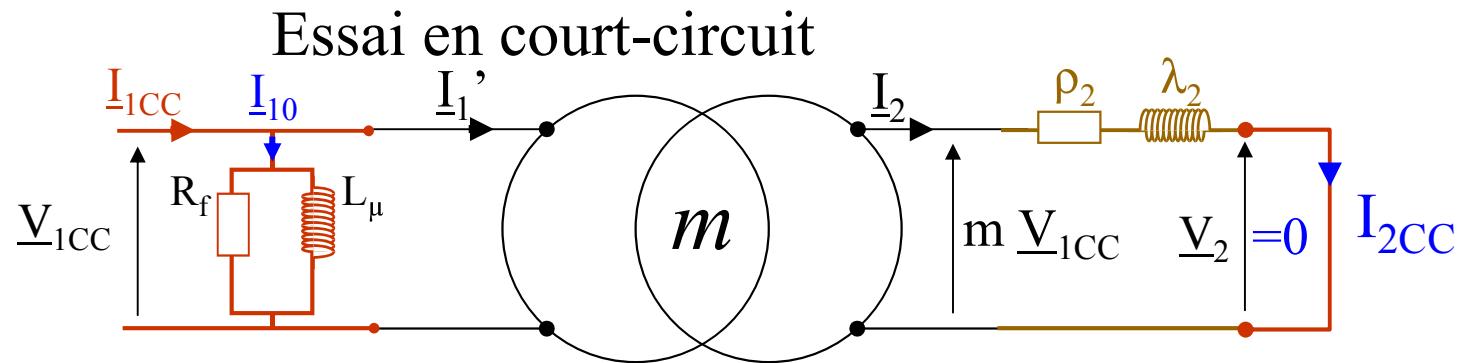


$$P_{1CC} \approx p_{cu} = \rho_2 I_{2CC}^2$$

Essais standards du transfo

modèle avec
approximation

Tension réduite
 $V_{1CC} \ll V_{1N}$



on mesure :

I_{1CC} et I_{2CC}

donc : $m = \frac{I'_1}{I_2} \approx \frac{I_{1CC}}{I_{2CC}}$ mesure par excès

V_{1CC} et P_{1CC}

$$P_{1CC} = r_1 I_{1CC}^2 + p_{fer} + r_2 I_{2CC}^2$$

$$P_{1CC} \approx p_{cu} = \rho_2 I_{2CC}^2$$

Détermination de λ_2 par la loi d'Ohm au secondaire :

$$X_2 = \lambda_2 \omega = \sqrt{\frac{m^2 V_{1cc}^2}{I_{2cc}^2} - \rho_2^2}$$

Remarque, ne pas écrire : puissance réactive au primaire Q_{1CC} absorbée par λ_2

Méthode d'opposition

Montage

REMARQUES :

Les 2 essais classiques (à vide et en court circuit) ne permettent pas de placer le transfo dans le même état que dans un fonctionnement en charge :

- saturation donc fuites faibles dans l'essai en court circuit
- température de fonctionnement à pleine charge

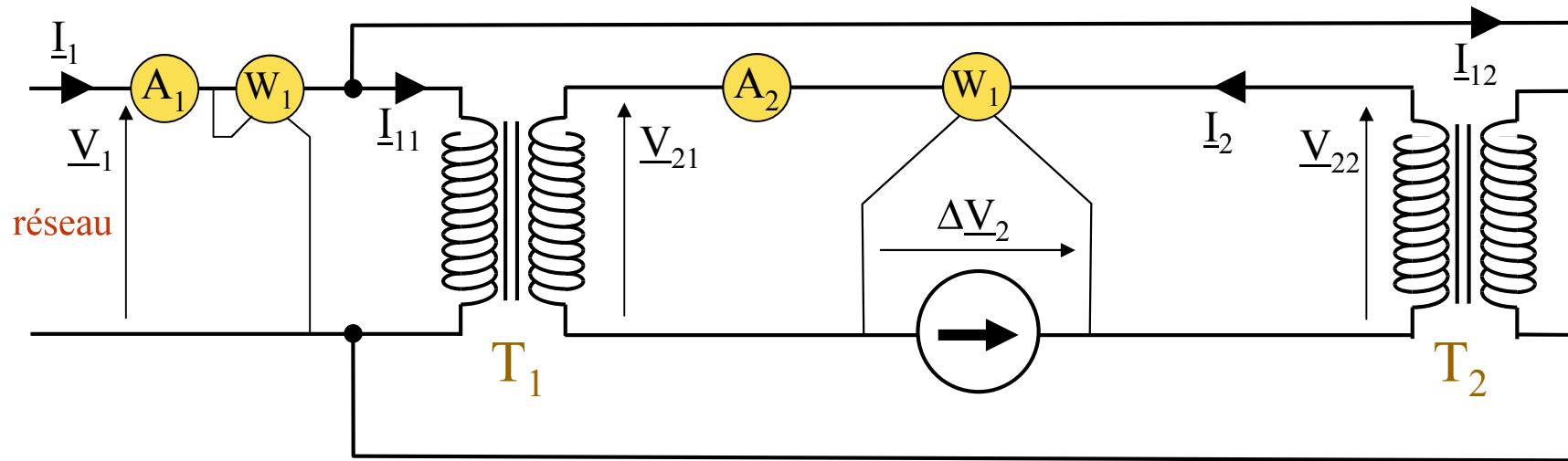
Une solution consiste à réaliser un essai direct à pleine charge
(impossible pour les très fortes puissances)

Autre solution : utilisation de 2 transformateurs identiques
60 (l'énergie à fournir ne représente alors que les pertes des 2 transfos)

Méthode d'opposition

Montage

Utilisation de 2 transformateurs identiques

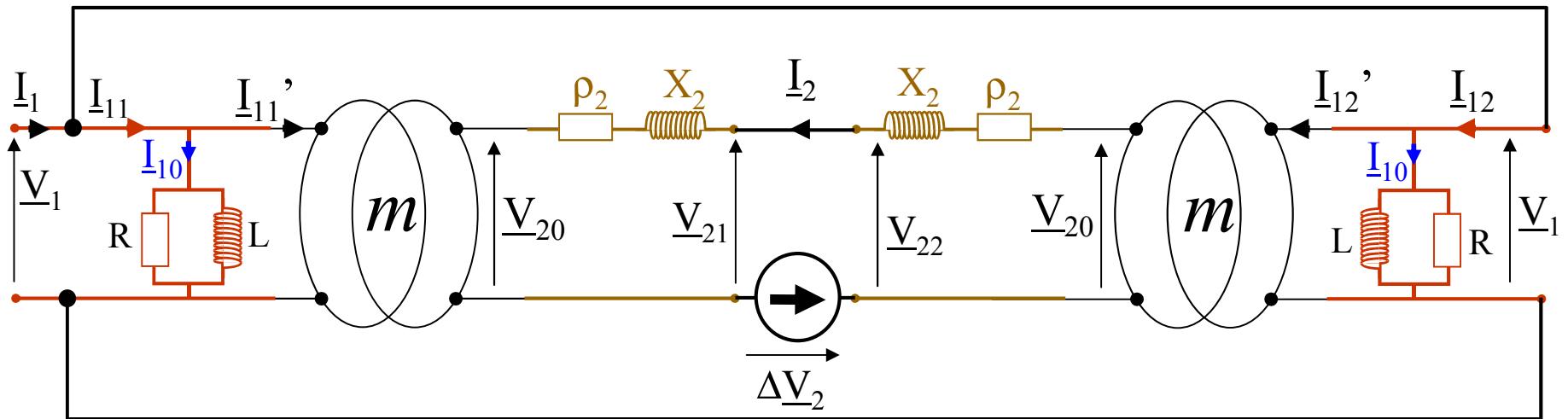


si $I_2 = 0$, W_1 mesure 2 fois les pertes fer et A_1 mesure 2 fois le courant à vide des 2 transformateurs identiques

ΔV_2 permet de faire circuler un courant au secondaire, donc de mettre les transformateurs identiques en charge

Méthode d'opposition

Schéma équivalent

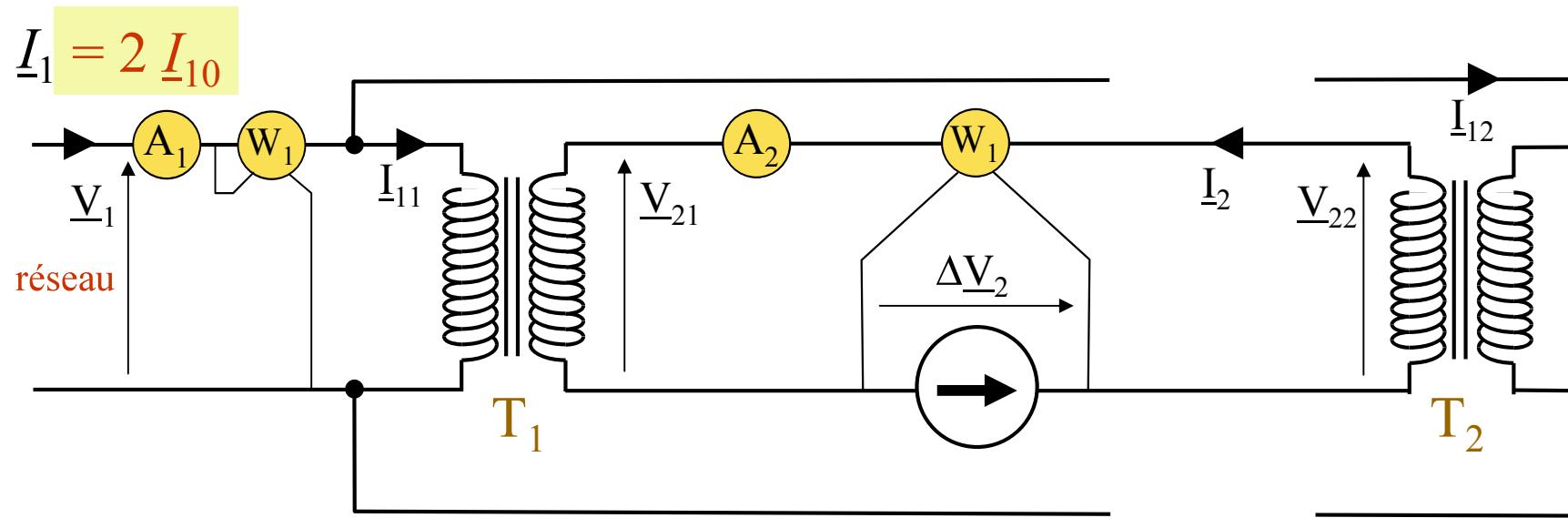


$$\Delta V_2 = 2 \sqrt{(r_2^2 + \lambda_2^2 \omega^2)} I_2 \quad \text{et} \quad W_2 = 2 \rho_2 I_2^2$$

$$\text{et} \quad I_1 = I_{11} + I_{12} = (I_{10} - mI_2) + (I_{10} + mI_2) = 2I_{10}$$

Méthode d'opposition

Remarques

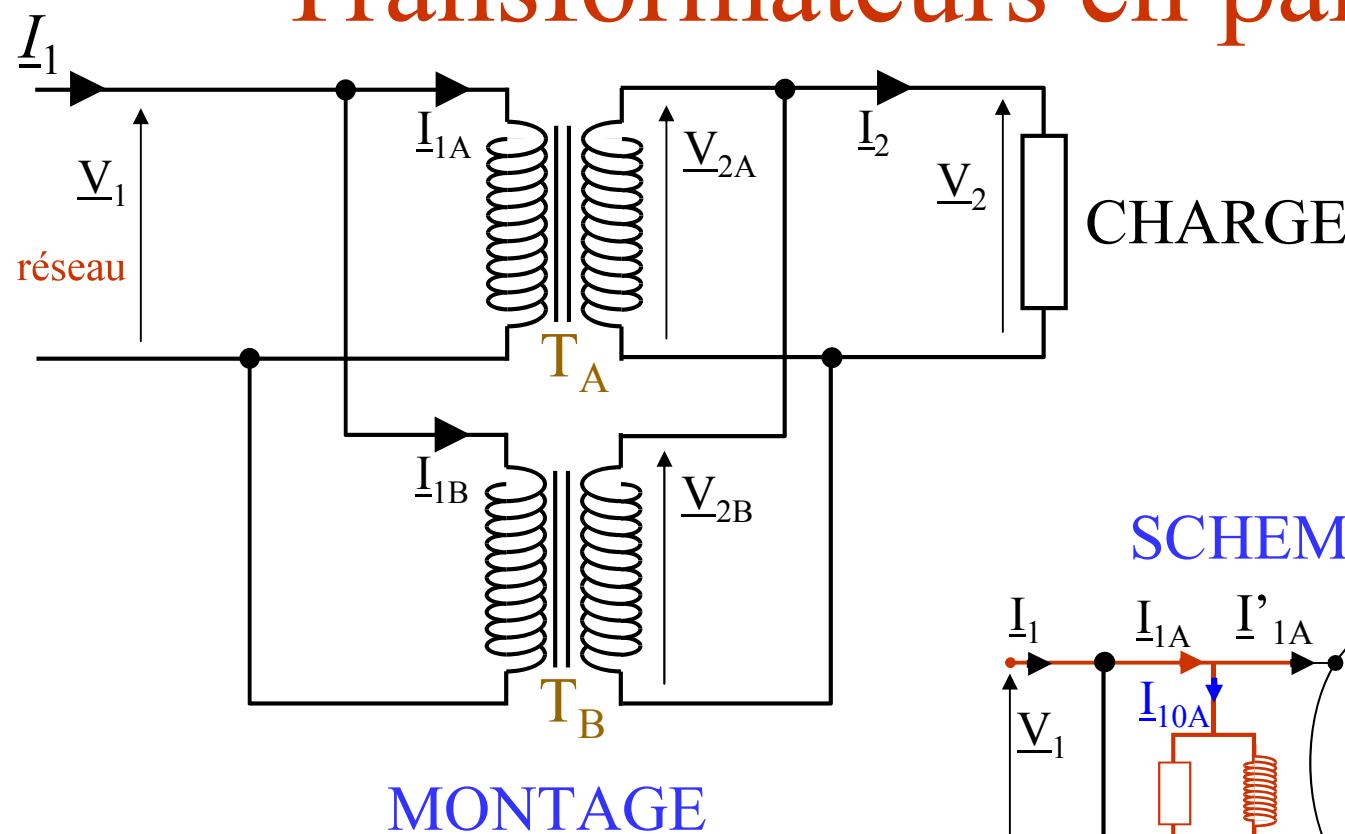


$$I_1 = 2 I_{10},$$

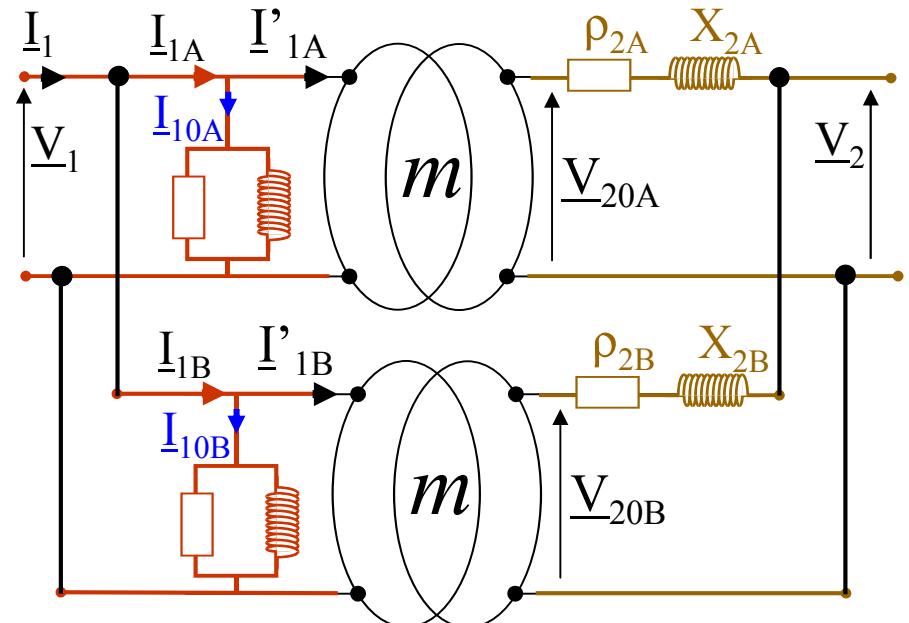
si $\Delta V_2 = 0$, I_1 reste égal à $2 I_{10}$

si l'on coupe le primaire de T_2 , I_{12} est nul et I_1 reste égal à $2 I_{10}$
($I_2 = 1/m I_{10}$)

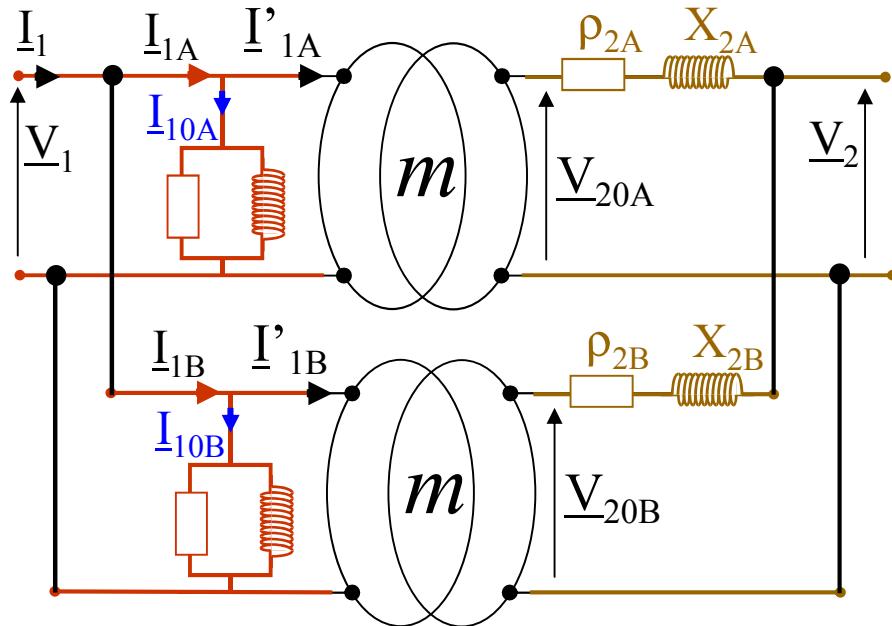
Transformateurs en parallèle



SCHEMA EQUIVALENT



Transformateurs en parallèle



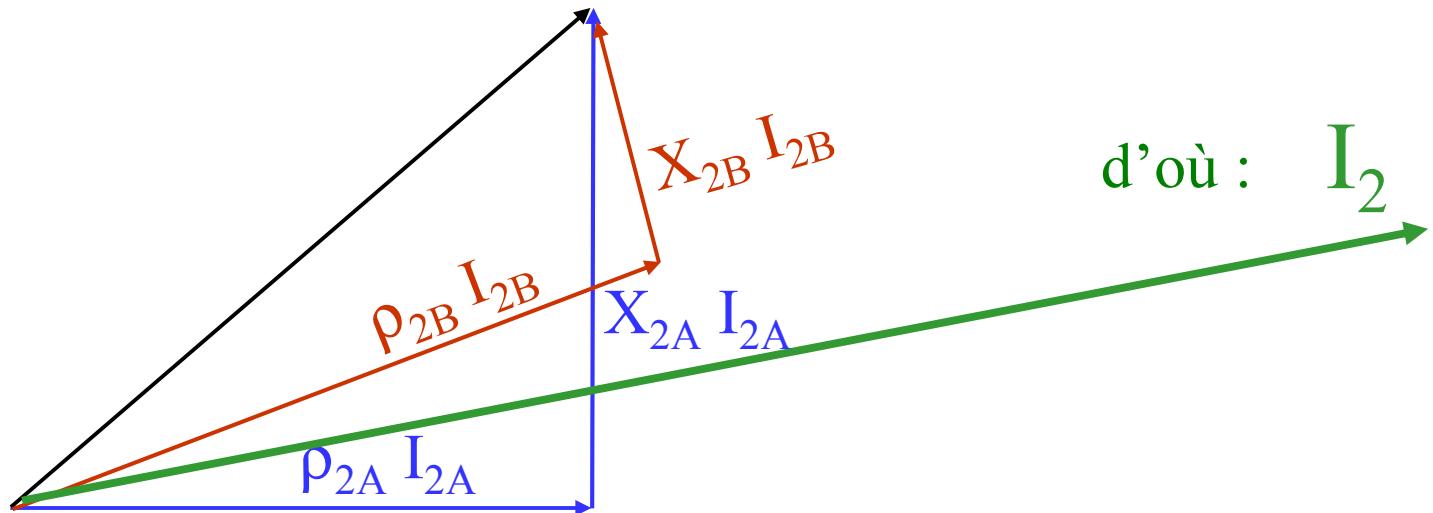
$$m \underline{V}_1 = \underline{Z}_{2A} \underline{I}_{2A} + \underline{V}_2$$

$$m \underline{V}_1 = \underline{Z}_{2B} \underline{I}_{2B} + \underline{V}_2$$



$$\underline{Z}_{2A} \underline{I}_{2A} = \underline{Z}_{2B} \underline{I}_{2B}$$

d'où : \underline{I}_2



Transformateurs en parallèle

On souhaite que l'ensemble des 2 transfos fournissent la puissance apparente maximale
(donc qu'ils arrivent au nominal en même temps)

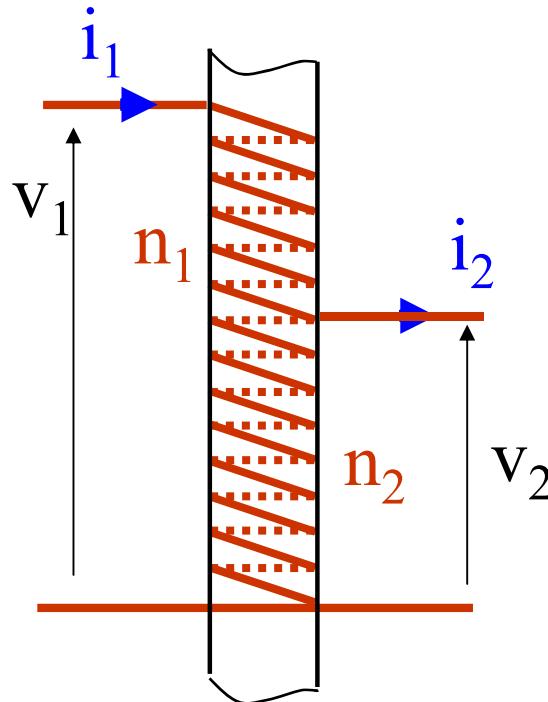
$$\underline{Z}_{2A} \underline{I}_{2A} = \underline{Z}_{2B} \underline{I}_{2B} \rightarrow \underline{Z}_{2A} I_{2AN} = \underline{Z}_{2B} I_{2BN} \quad (\text{même tension de CC pour le courant nominal})$$

$$S_{2TotN} = V_{20} I_{2TotN} = S_{2AN} + S_{2BN} = V_{20} I_{2AN} + V_{20} I_{2BN} = V_{20} (I_{2AN} + I_{2BN})$$

$$\rightarrow I_{2TotN} = I_{2AN} + I_{2BN} \rightarrow \text{courants } I_{2A} \text{ et } I_{2B} \text{ en phase} \\ (\text{ou triangles de Kapp homothétiques})$$

Pour que l'ensemble des 2 transfos fournissent la puissance apparente maximale il faut et il suffit que :

les tensions de court-circuit soient identiques et les triangle de Kapp homothétiques



Autotransformateur

un seul enroulement de n_1 spires

une prise sur cet enroulement pour n_2 spires

rapport de transformation et schéma équivalent
identique à celui du transformateur

Avantage : volume plus faible pour même S_N (dépend de m)

Inconvénient : pas d'isolation entre primaire et secondaire

→ attention avec la masse de l'oscilloscope

intérêt des autotransformateurs à rapport variable (contact glissant)

⁶⁷ Il existe des transformateur à rapport variable dans les laboratoires

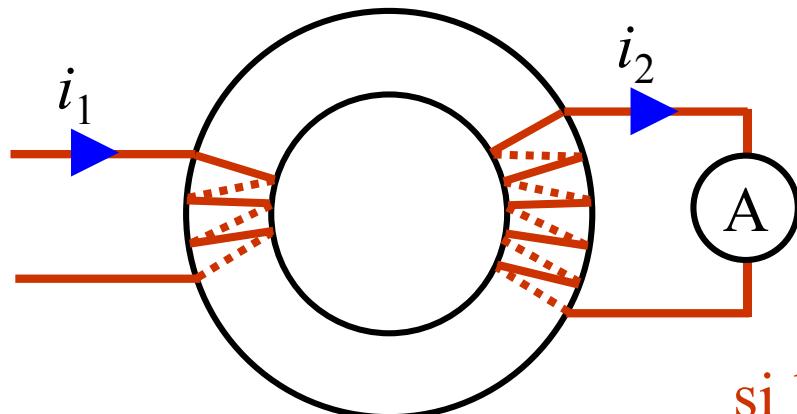
Autotransformateur à rapport fixe



Autotransformateur à rapport variable



Transformateur d'intensité



Utilisation comme ampèremètre :

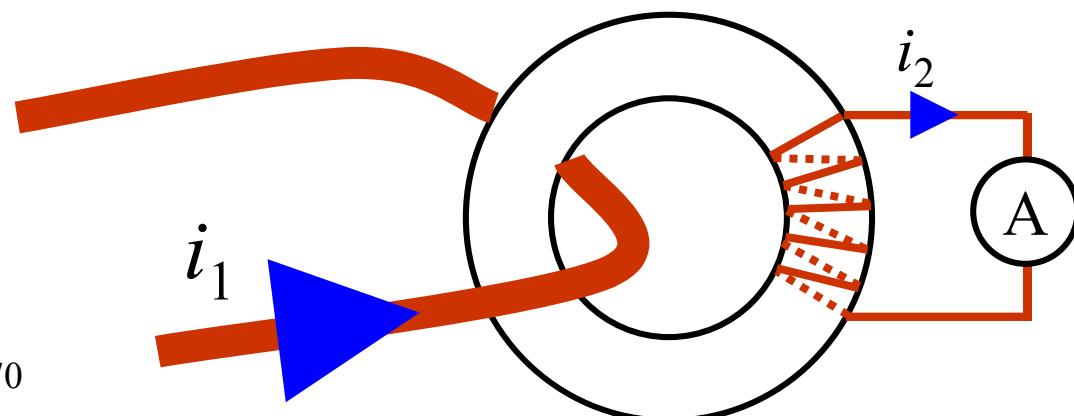
le secondaire est en court circuit

le primaire est inséré dans un circuit

si le transformateur est parfait, $i_2 = i_1 / m$

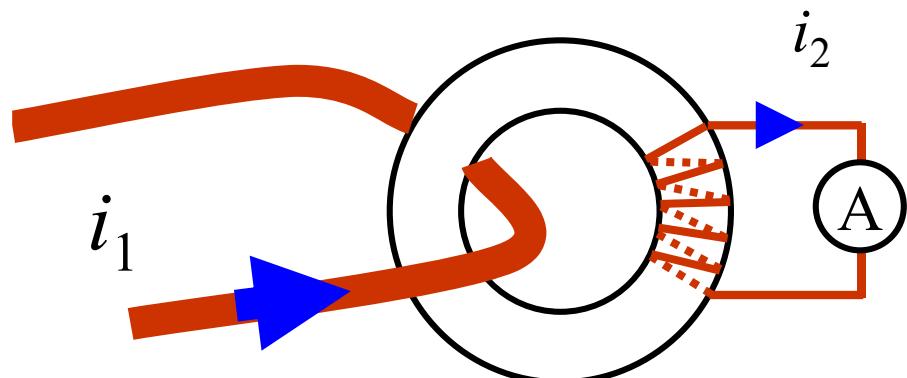
Généralement, $m = 5 ; 10 ; 50 ; 100 ; \dots ; 1000$ et $I_2 = 5 \text{ A}$

Le primaire est souvent formé d'une seule spire :



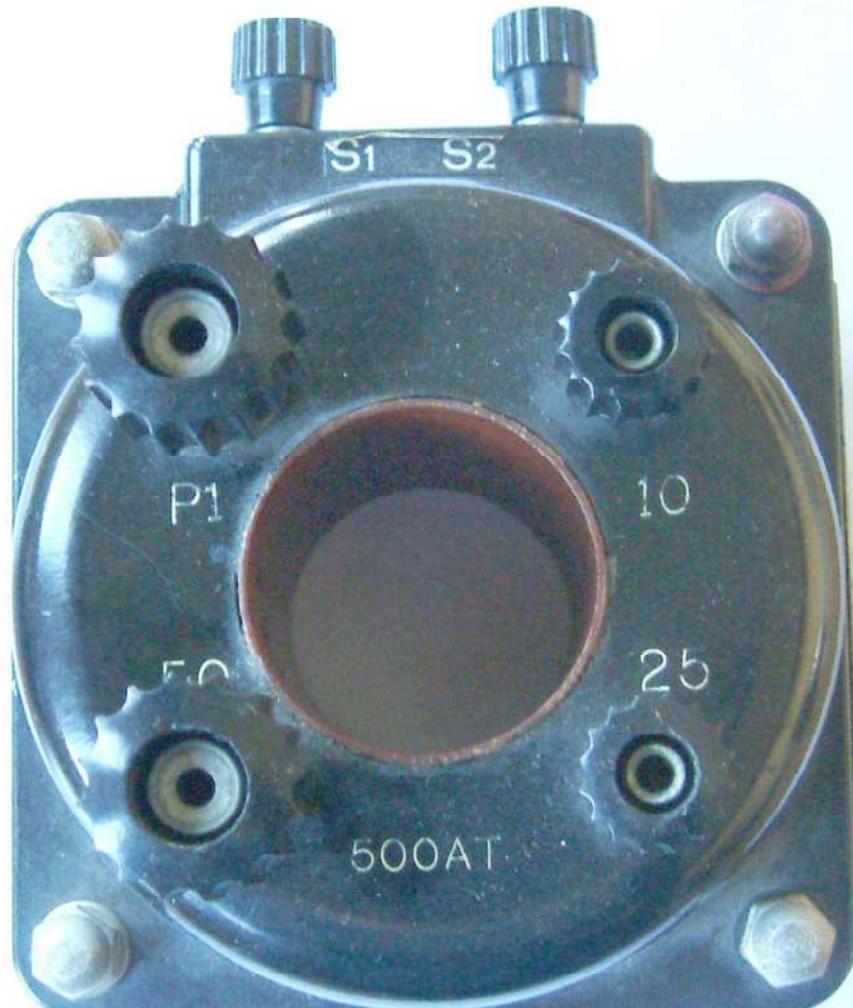
Transformateur d'intensité

TI des laboratoires



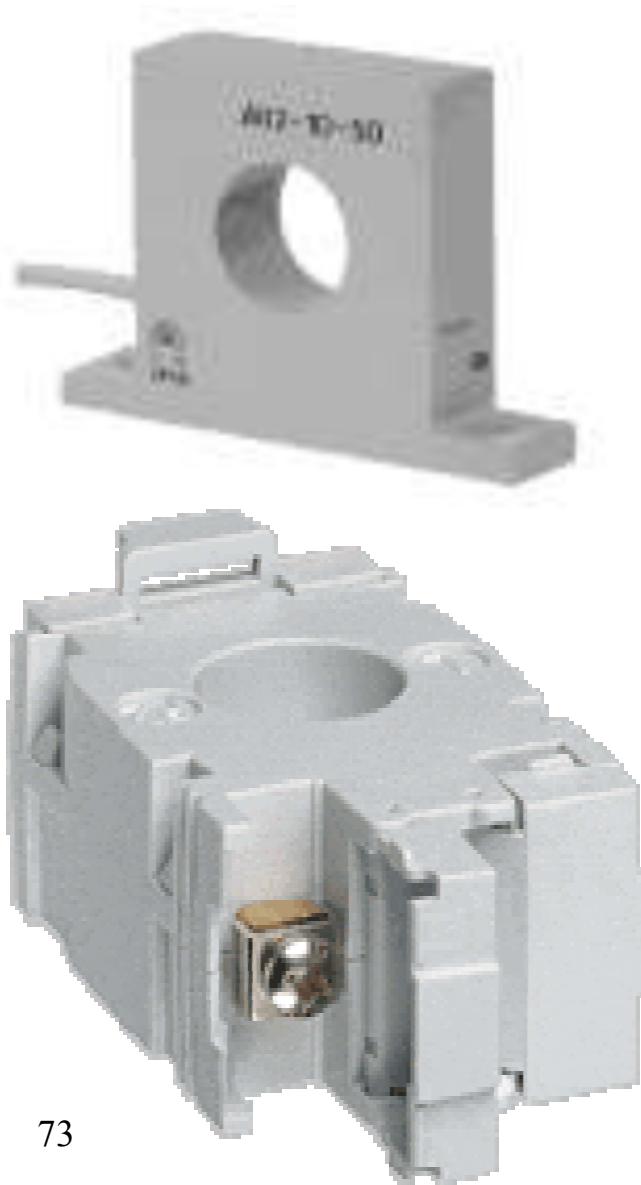
Transformateur d'intensité

TI des laboratoires



Transformateur d'intensité

exemples



Transformateur d'intensité

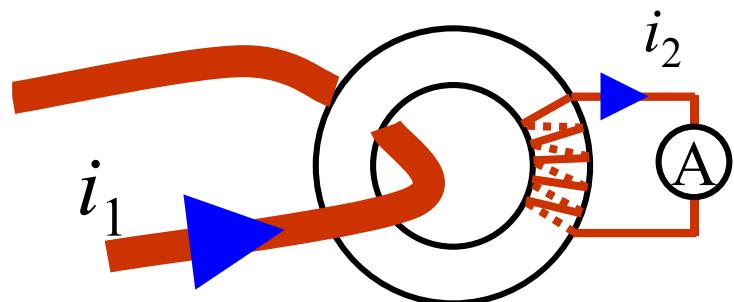
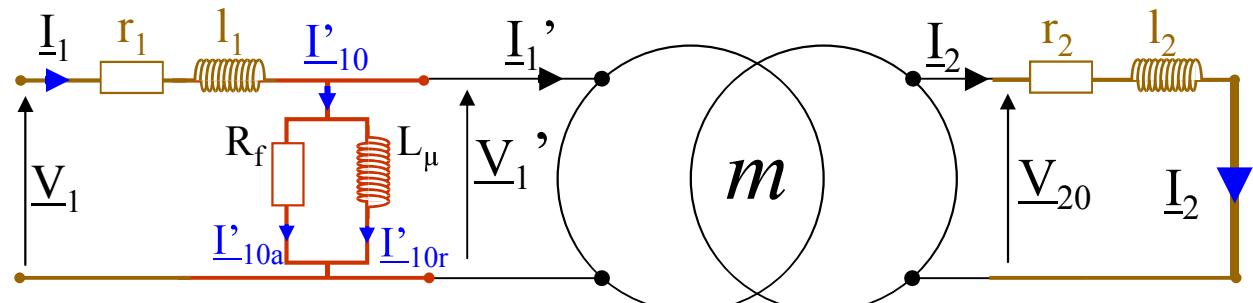
exemples



Transformateur d'intensité

Schéma équivalent

modèle sans approximation



il faut I'_{10} négligeable, donc V'_{10} faible

matériau de forte perméabilité

r_2 et l_2 faible

circuit torique pour fuites faibles

Remarque : si secondaire ouvert, V_{20} très grand

(en fait, l'inductance magnétisante sature)

Transformateur d'intensité

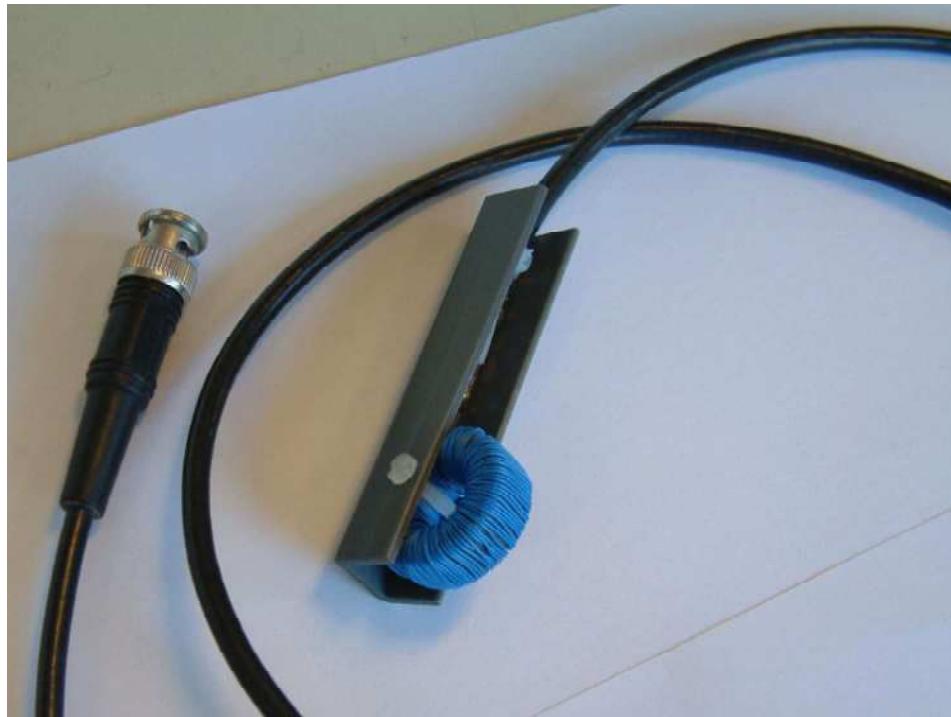
Sonde de courant des labos



un tore

100 spires au secondaire en court-circuit sur 5Ω

tension aux bornes des 5Ω vers l'oscillo par sonde BNC

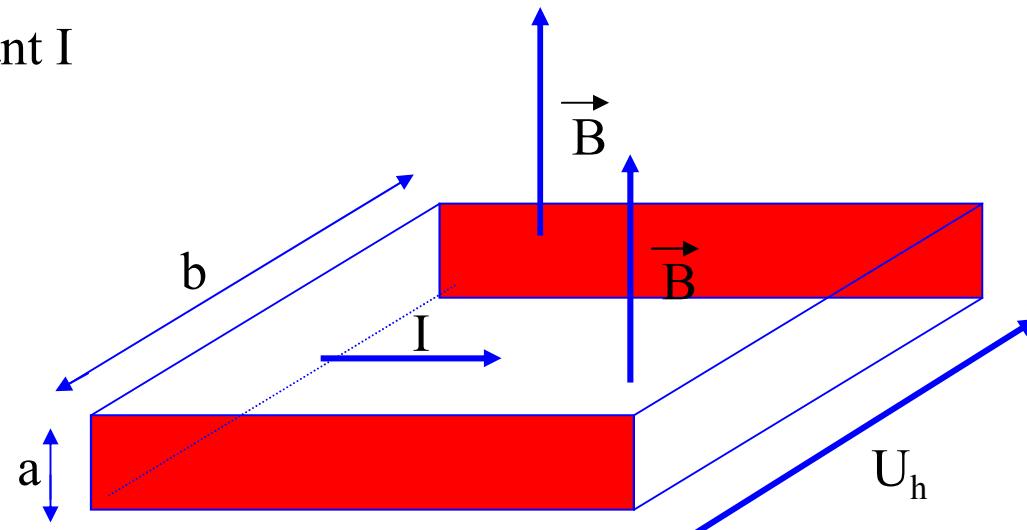


Effet Hall

Observation expérimentale

Considérons un ruban conducteur à section rectangulaire, de largeur b , d'épaisseur a
ce ruban est parcouru par un courant I

il est plongé dans un champ B



il apparaît une tension U_h , (tension Hall) entre les deux armatures

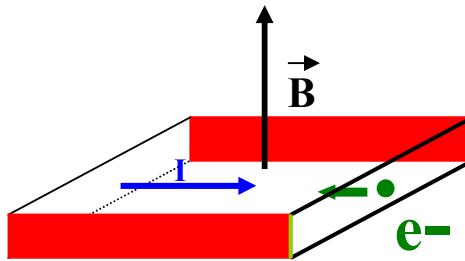
la tension Hall U_h est proportionnelle à I et à B

$$U_h = K_h \frac{I B}{a}$$

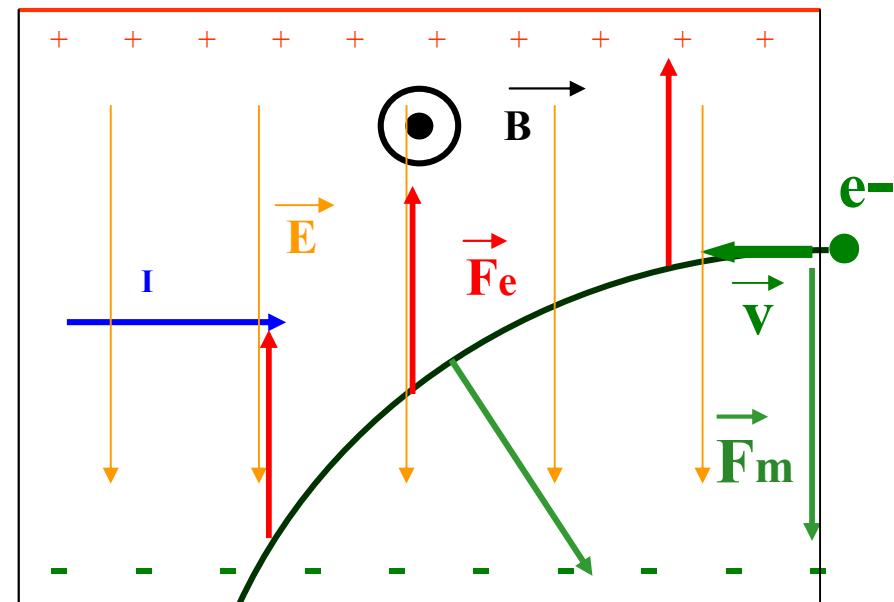
Effet Hall

Interprétation

courant créé par des électrons



électrons soumis à la force magnétique
 F_m qui les dévie vers le bas



Des charges négatives apparaissent sur l'armature inférieure.
Des charges positives apparaissent sur l'armature supérieure.

Un champ électrique apparaît

Les particules chargées sont soumises à la force:

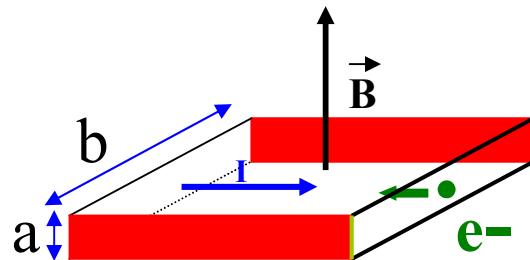
$$\vec{F}_e = (-e) \vec{E} = q \vec{E}$$

en régime permanent, F_m et F_e vont s'équilibrer

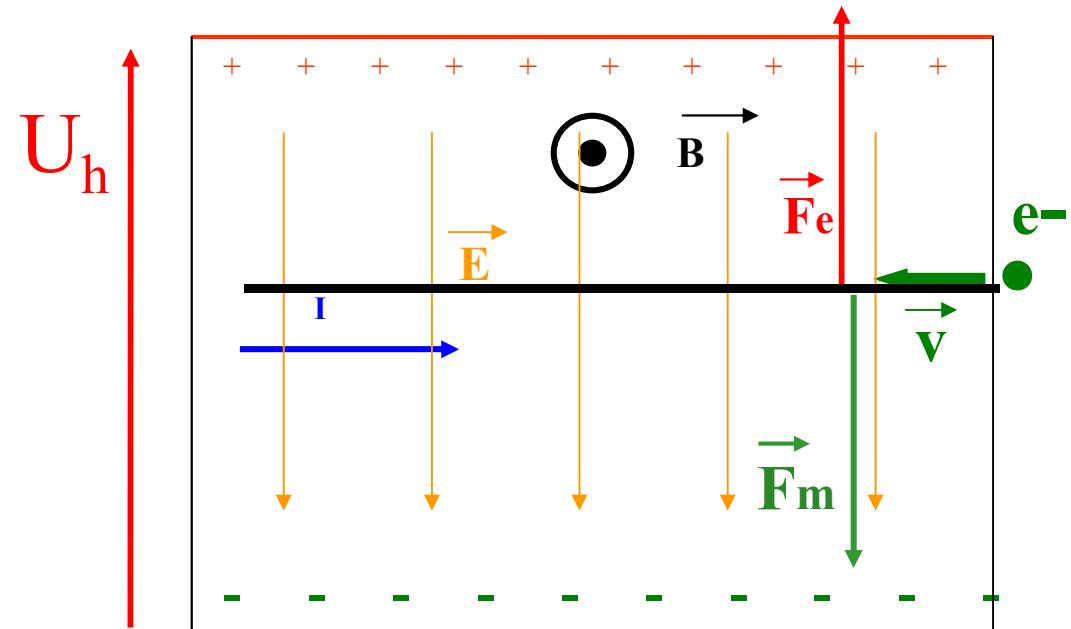
Effet Hall

Interprétation

courant créé par des électrons



en régime permanent,
F_m et F_e s'équilibrent



La trajectoire est une droite

$$q v B = q E \rightarrow \begin{cases} U_h = E b = v B b \\ I = n q v a b \end{cases} \rightarrow U_h = \frac{I}{n q a} B$$

Effet Hall

Constante de Hall : K_h

$$U_h = \frac{I}{n q a} B = K_h \frac{I}{a} B$$

K_h grandeur caractéristique du matériau conducteur utilisé

Ordre de grandeur

MATERIAU	Cu	Ag	GaAs	InAs	InSb
K_h ($A^{-1}s^{-1}m^3$)	$7,5 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^{-10}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$

Conducteurs Semi-conducteurs

Pour réaliser les capteurs à effet Hall, on utilise des semi-conducteurs

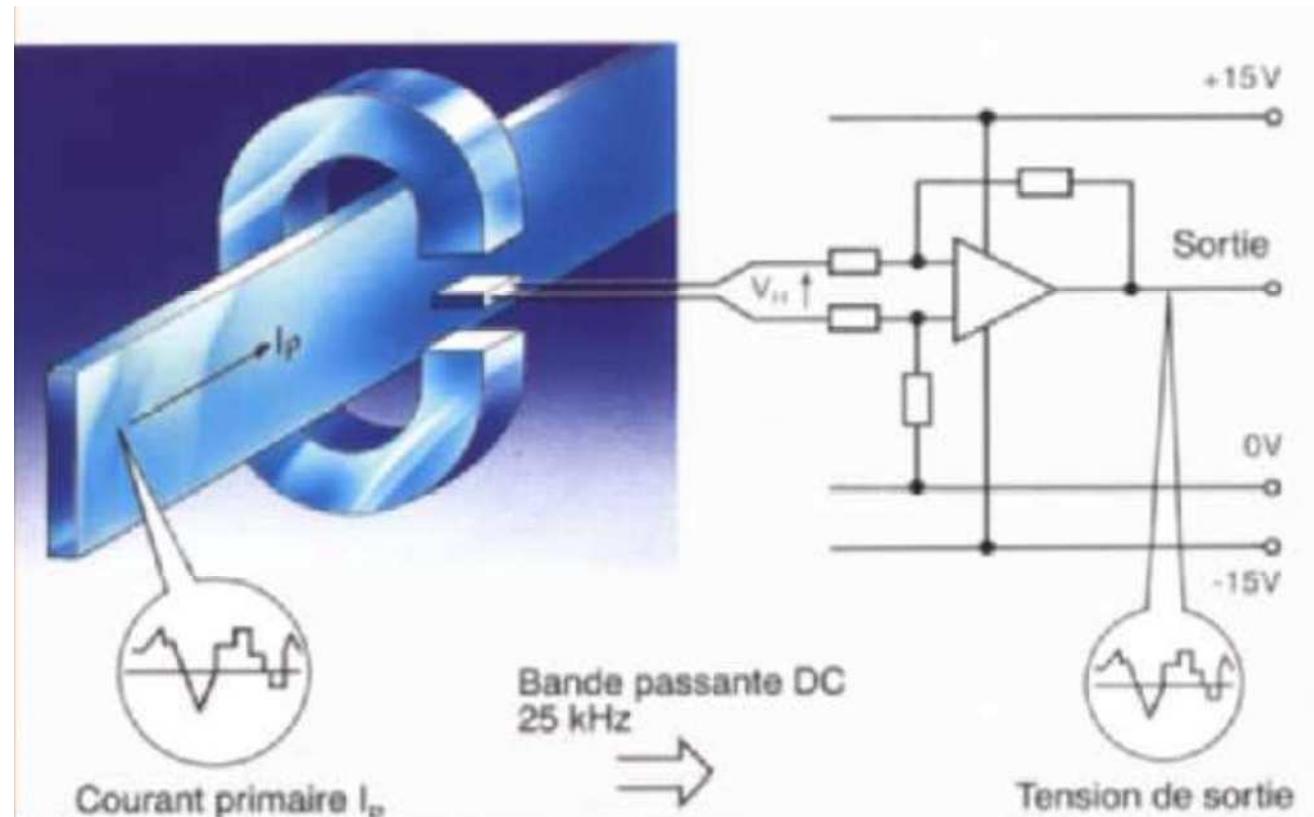
La conduction est assurée par des charges positives ou négatives suivant le matériau

Capteur de courant à effet Hall

$$\left\{ \begin{array}{l} \int \vec{H} \cdot d\vec{l} = n I \\ B = \mu H \end{array} \right.$$

seulement
si le matériau
n'est pas saturé :

$$B = K I_P$$



capteur en boucle ouverte

$$V_S = K' I_P$$

Fmax = 30 kHz

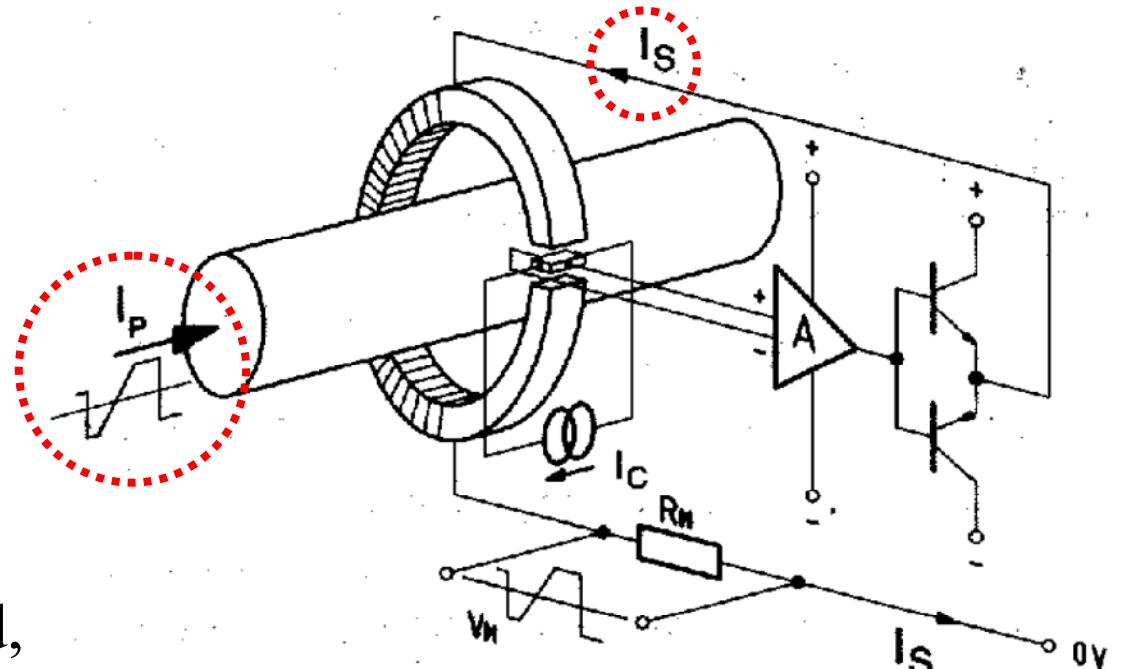
Capteur de courant à effet Hall

Principe :

$$I_P \rightarrow B \rightarrow V_h$$

$\rightarrow I_S$ qui s'oppose à B

Si le gain de l'ampli est grand,
 I_S est proportionnel à I_P ,
donc :



capteur en boucle fermé

$$V_S = R_M I_S = K' I_P$$

Fmax = 200 kHz

Capteur de courant à effet Hall

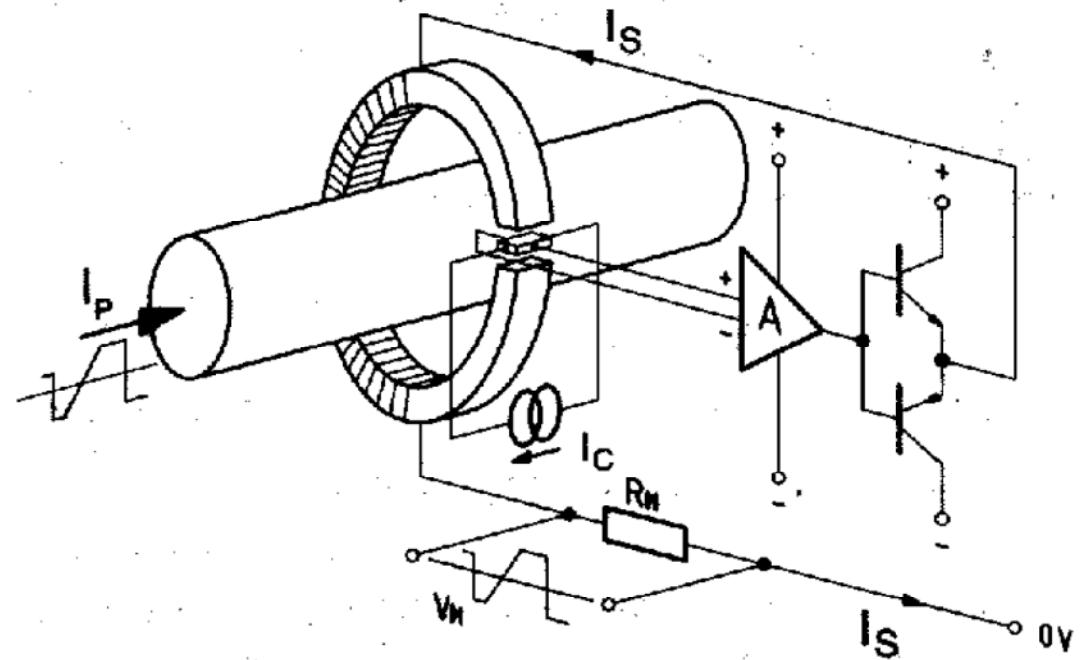
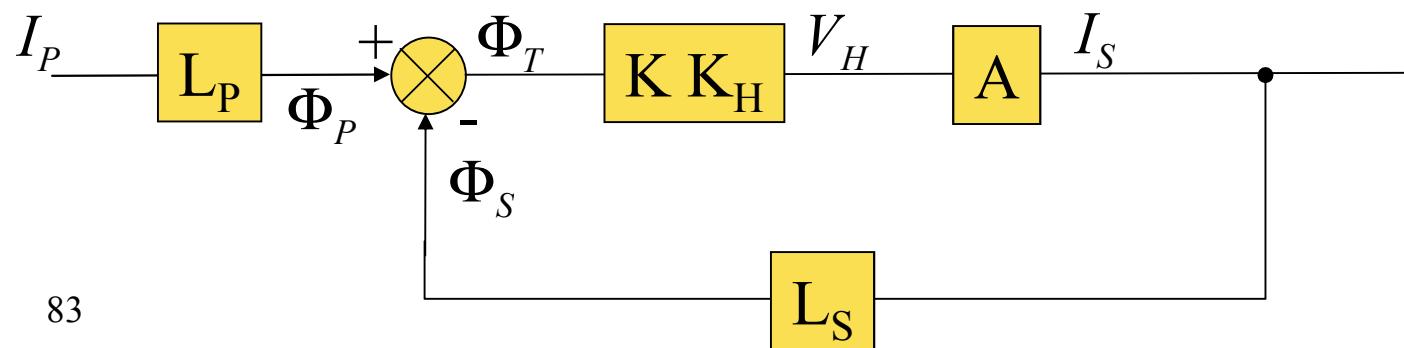
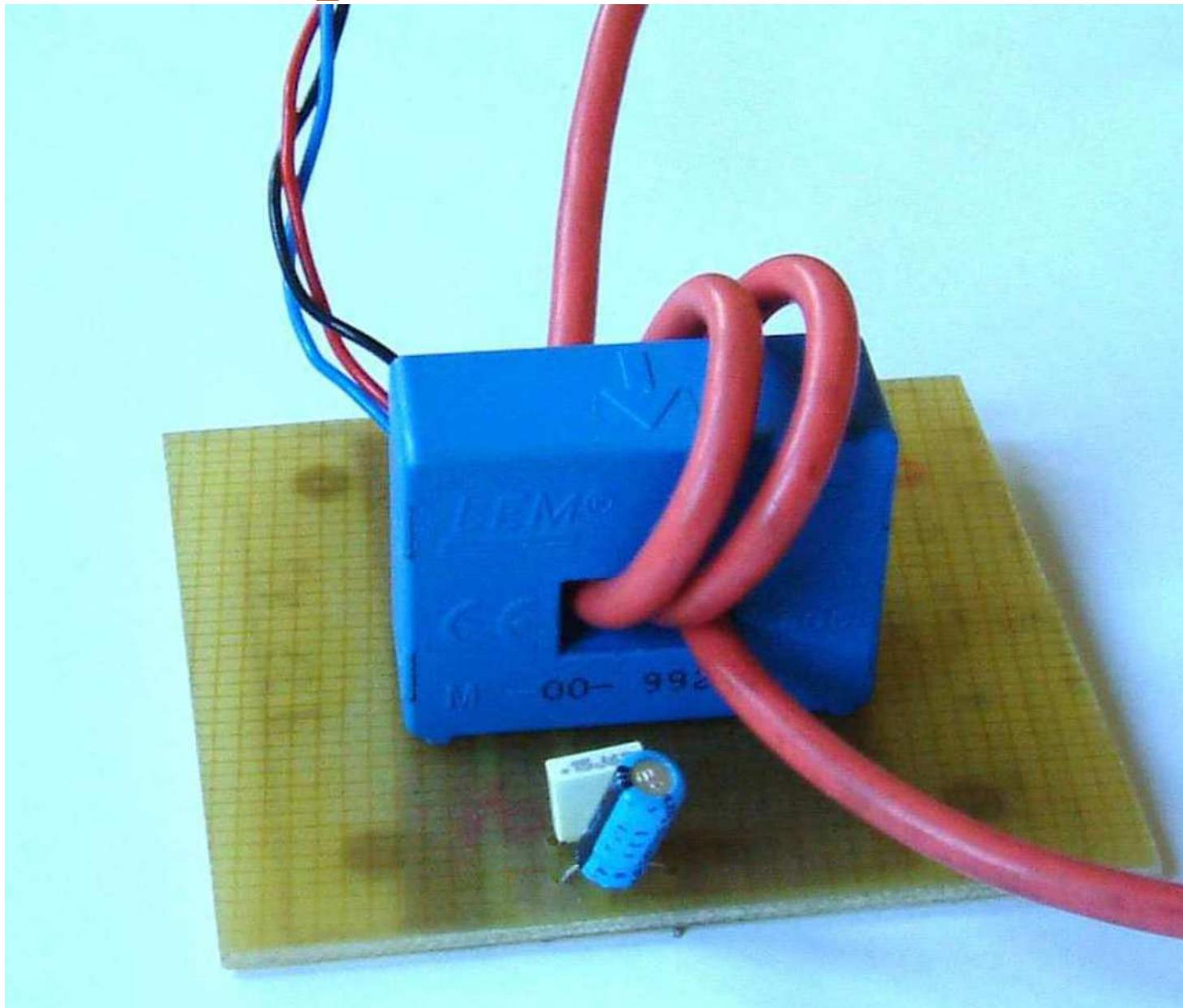


Schéma bloc

capteur en boucle fermé



Capteur à effet Hall



Pince ampèremétrique à effet Hall

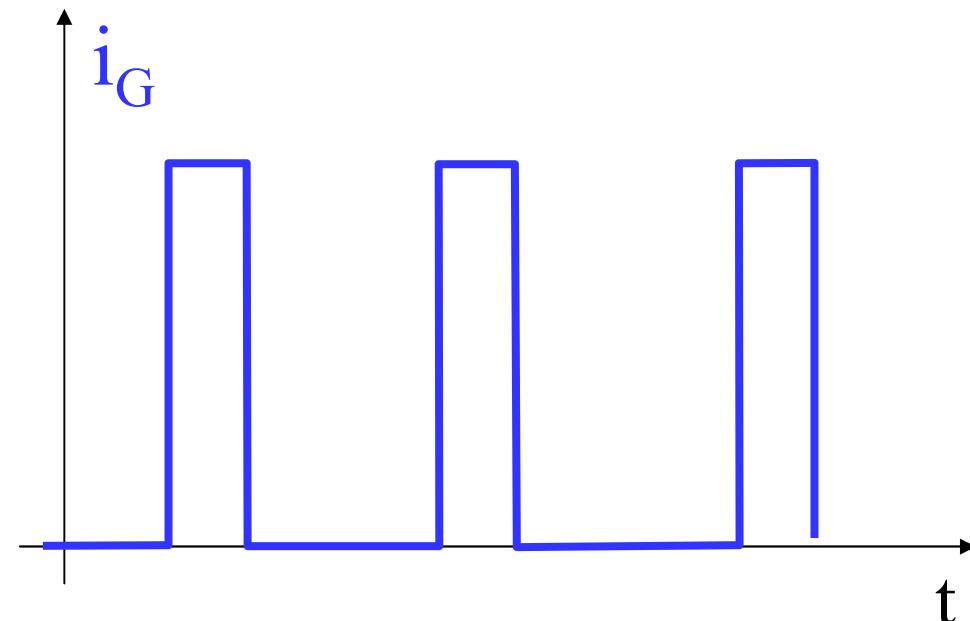
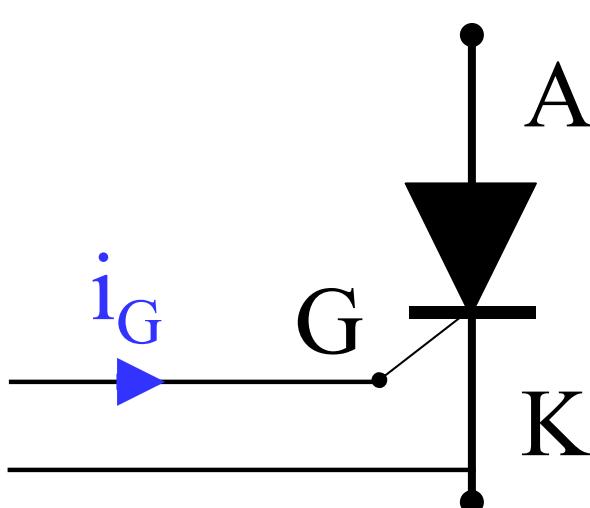


Transformateur en régime non sinusoïdal

transformateur d'impulsion

Problème :

envoyer une impulsion de courant dans la gâchette d'un thyristor tout en étant isolé



Transformateur d'impulsion

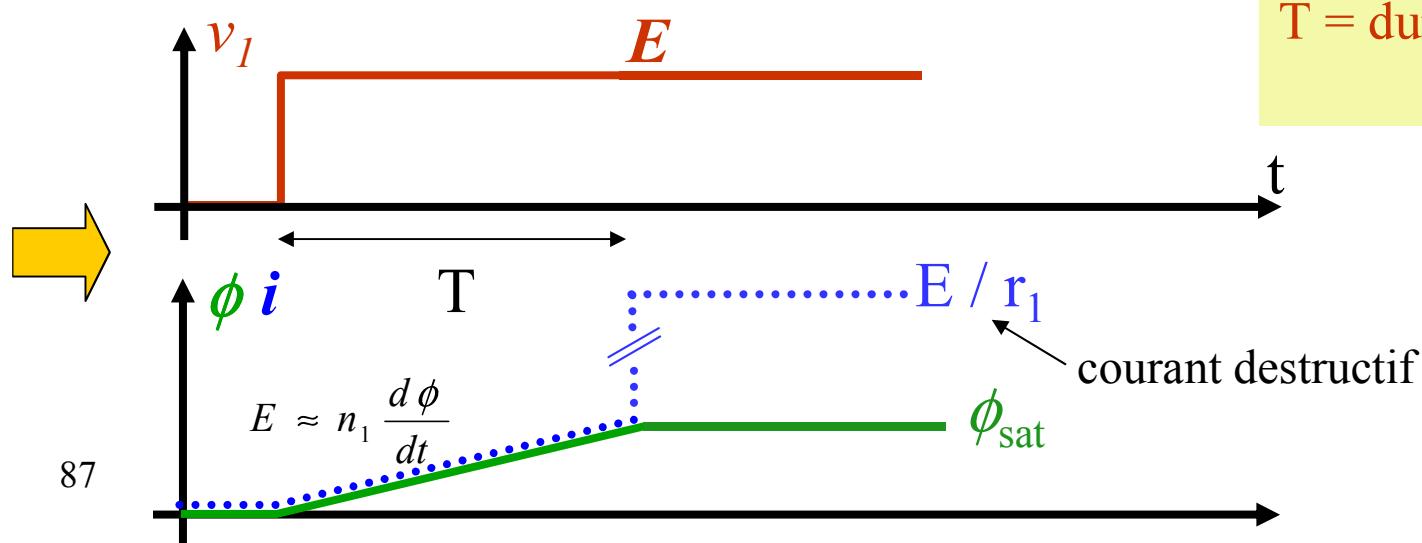
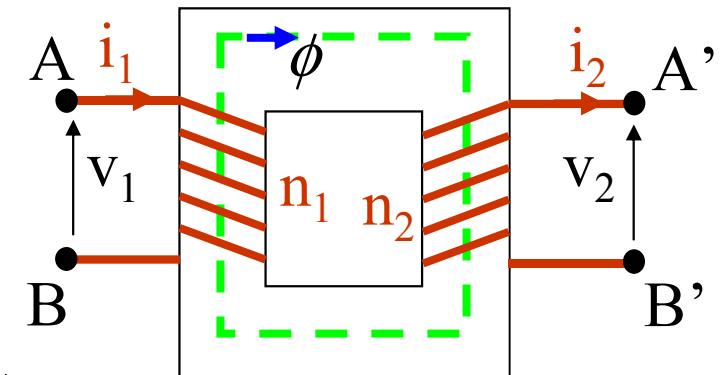
On néglige :

l'inductance de fuite (circuit torique)

les résistances primaire et secondaires

les pertes magnétiques

$$v_1 = r_1 i_1 + l_1 \frac{di_1}{dt} + n_1 \frac{d\phi}{dt} \Rightarrow \begin{cases} v_1 \approx n_1 \frac{d\phi}{dt} \\ n_1 \phi = L i \end{cases}$$



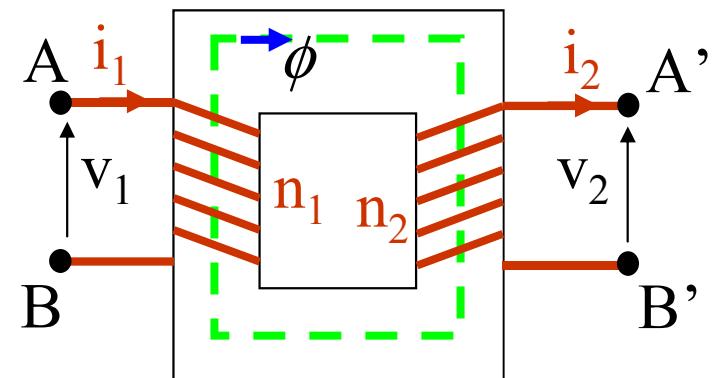
T = durée max de l'impulsion
d'amplitude E

$$E T = n_1 \phi_{sat}$$

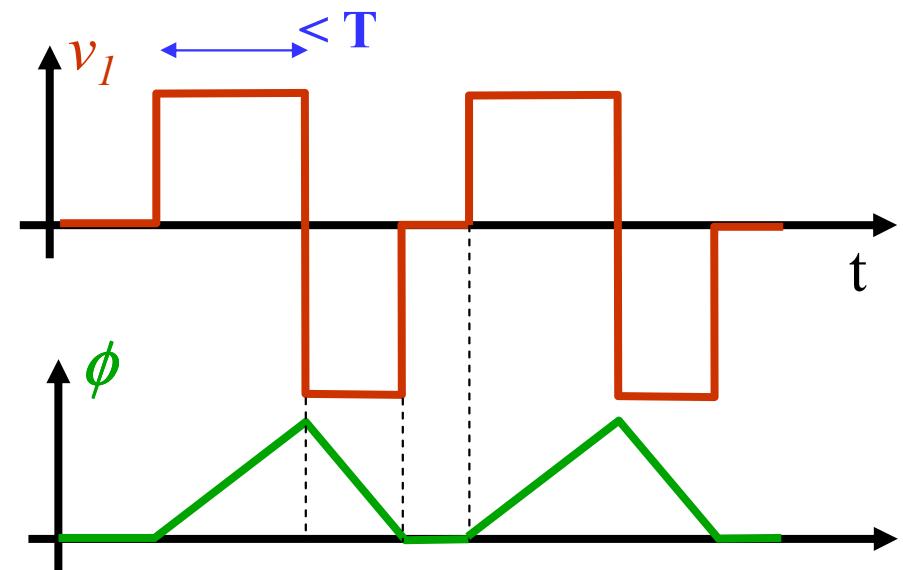
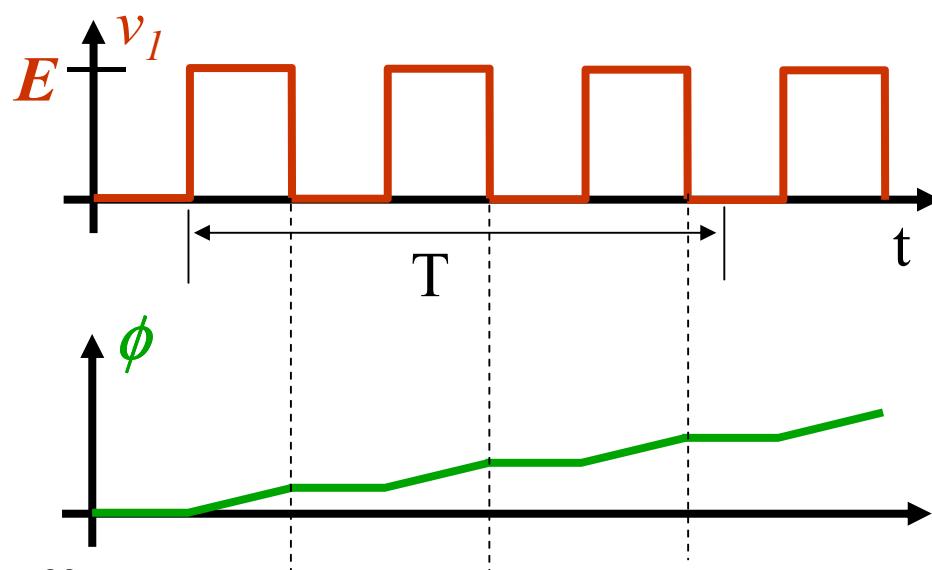
Caractéristique principale
des transfos d'impulsion

Transformateur d'impulsion

$$\begin{cases} v_1 \approx n_1 \frac{d\phi}{dt} \\ n_1 \phi = L i \end{cases}$$

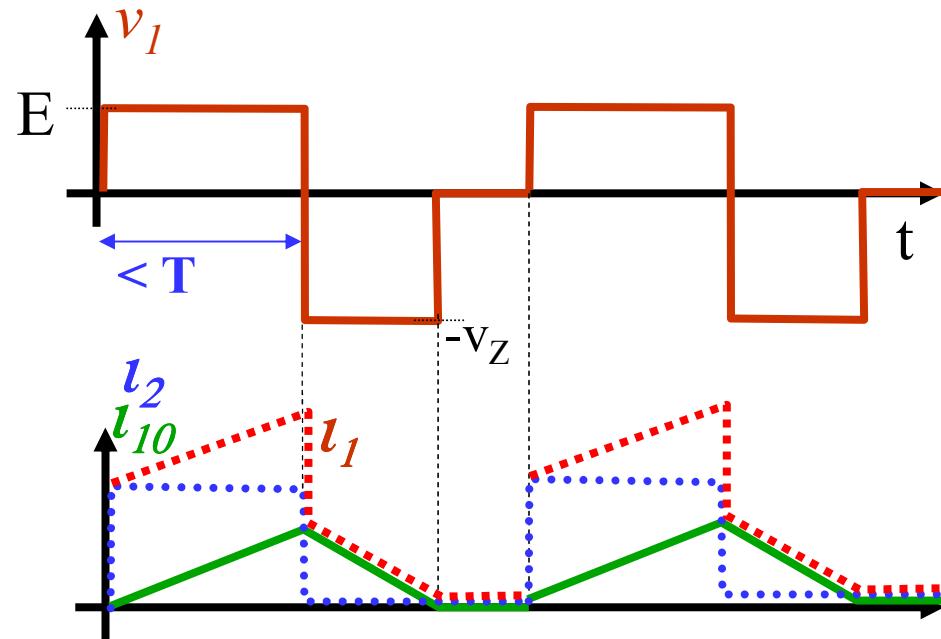
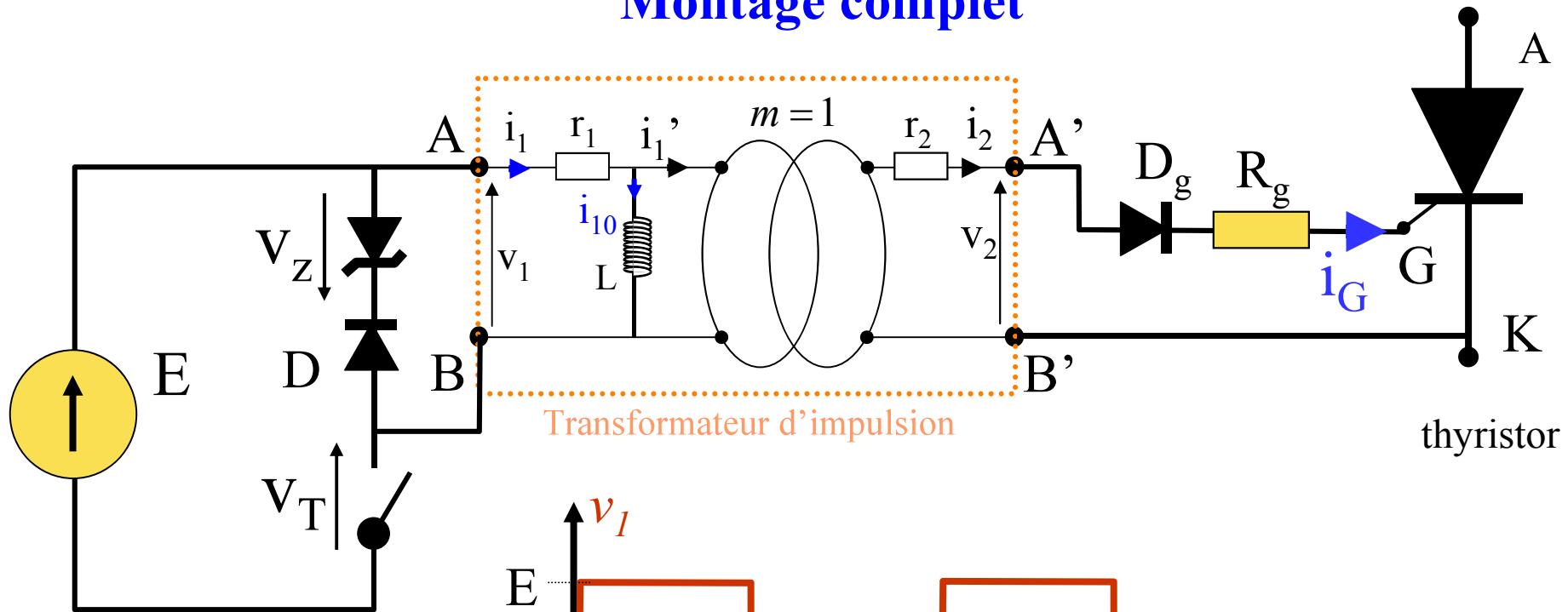


Nécessité de la démagnétisation :



Transformateur d'impulsion

Montage complet





Ecole Nationale
Supérieure
de l'Electronique
et de ses Applications

Julien Seigneurbieux
Année scolaire 2009-2010

téléchargement des ppt :

<http://www-jsb.ensea.fr/>

attention