

# Machines électriques

pour Génie Mécanique

## Transformateur

André Hodder

# Sommaire

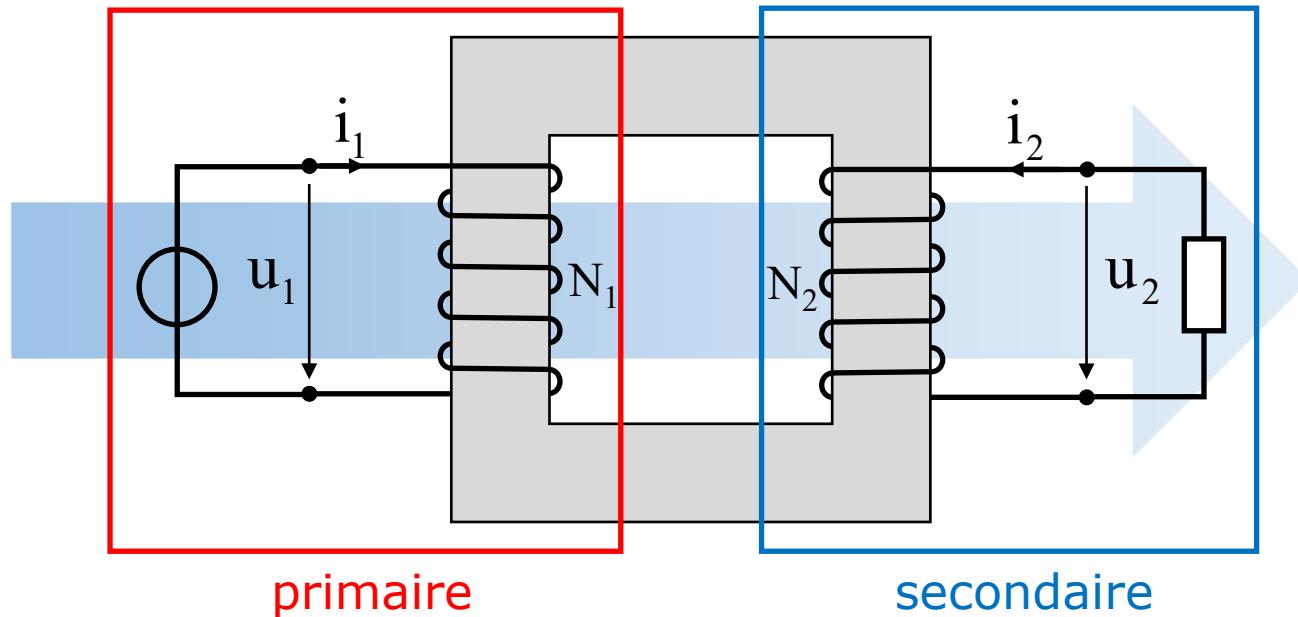
- Introduction
- Circuit magnétique
- Transformateur
- Eléments de base des machines
- Machine asynchrone
- Machine à courant continu
- Machine synchrone
- Moteur synchrone à aimants permanents
- Moteur pas à pas

# Sommaire

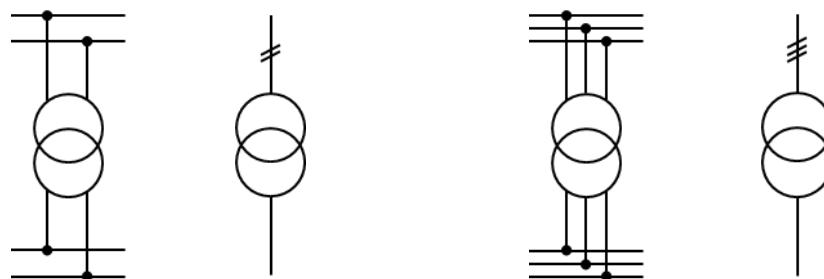
- Introduction
- Transformateur monophasé idéal
  - Rapport de transformation
  - Grandeurs rapportées
- Transformateur monophasé réel
  - Equations de tensions
  - Schéma équivalent et bilan de puissance
    - Introduction des pertes fer
  - Fonctionnement en court-circuit et Hypothèse de Kapp
- Résumé des schémas équivalents
- Rappel sur le triphasé
- Transformateur triphasé
  - Groupes de couplages
- Transformateur spéciaux

# Le transformateur

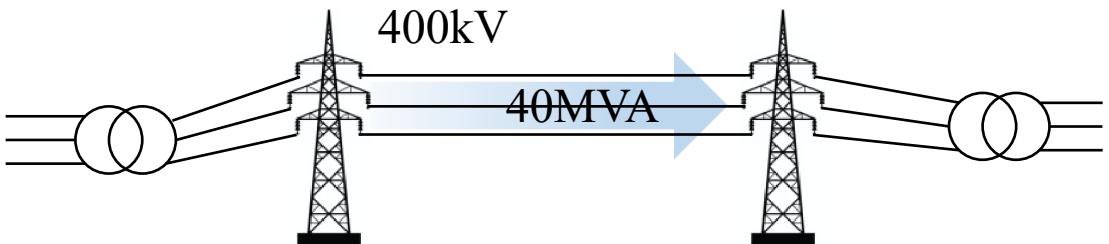
Transforme un système de tension/courant variable en un autre système de tension/courant de même fréquence.



Symboles



# Le transformateur



$$S = UI$$

$$\frac{40\text{MVA}}{400\text{kV}} = I = 100\text{A}$$

$$\frac{40\text{MVA}}{40\text{kV}} = I = 1000\text{A}$$

$\rightarrow$  pertes  $\sim I^2 \rightarrow 100x$  moins

sg Swissgrid - Niveaux de réseau

Secure | <https://www.swissgrid.ch/swissgrid/fr/home/grid/transmission...>

ACTUALITÉ ENTREPRISE RÉSEAU SÉCURITÉ AVENIR PORTAIL

Réseau > Réseau de transport > Niveaux de réseau

## Différents niveaux de réseau transportent le courant

Le réseau suisse d'électricité se compose de plus de 250 000 kilomètres de lignes au total. Il combine un réseau de transport et un réseau de distribution. Avant d'arriver au consommateur, la tension électrique est progressivement réduite de 380 000 volts (380 kV) ou 220 000 volts (220 kV) – la très haute tension du réseau de transport – à 230 volts chez les particuliers et dans les entreprises.

Le réseau suisse d'électricité comporte sept niveaux de réseau. On trouve, outre le réseau basse tension, moyenne tension, haute tension et très haute tension, trois niveaux de transformation.

**Très haute tension dans le réseau de transport (niveau 1)**  
Le réseau de transport accueille le courant produit par les grandes centrales électriques ou les pays voisins. Le courant est transporté avec une tension de 380 kV ou 220 kV à proximité des consommateurs. Il est alors mis à la disposition des niveaux de transport inférieurs, les réseaux de distribution. Le réseau de transport suisse est la propriété de Swissgrid.

**Haute tension dans le réseau de distribution supraregional (niveau 3)**  
Dans la haute tension (> 36 kV - 150 kV), le courant est distribué pour l'approvisionnement énergétique supraregional à des exploitants de réseaux de distribution cantonaux, régionaux et municipaux ainsi qu'à de grandes installations industrielles.

**Moyenne tension dans le réseau de distribution régional (niveau 5)**  
La moyenne tension (1 kV - 36 kV) est utilisée pour la distribution régionale de courant. Des réseaux locaux de distribution approvisionnent certains quartiers des villes ou des villages ainsi que des petites et moyennes exploitations industrielles.

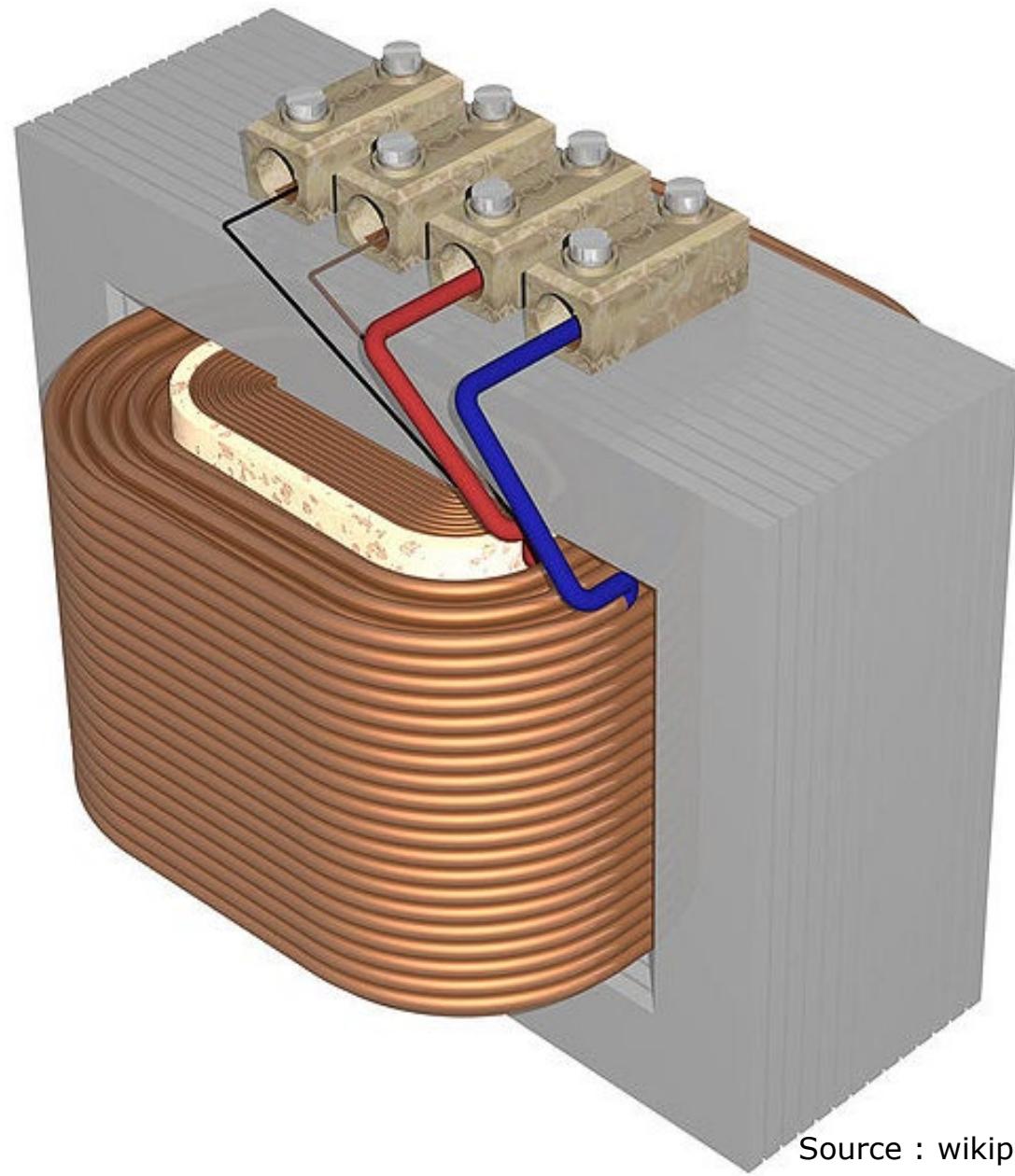
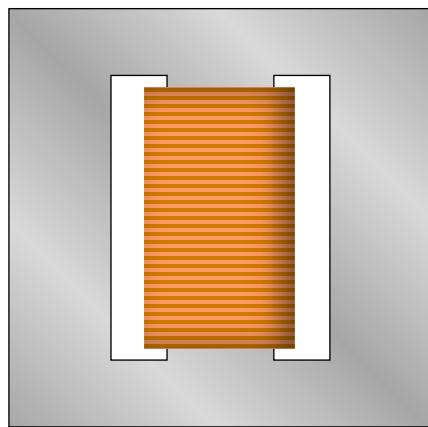
**Basse tension dans le réseau de distribution local (niveau 7)**  
Le courant à basse tension (< 1 kV) alimente quant à lui les foyers, les exploitations agricoles et les commerces.

**Sous-stations**  
Le poste de couplage – appelé également sous-station – établit le lien entre deux niveaux de réseau. Le transformateur en constitue le cœur: il fait passer la tension d'un niveau de réseau à un autre, de la très haute tension à la haute tension et de la haute tension à la moyenne tension.

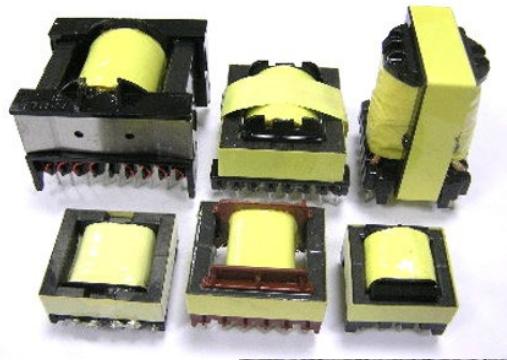
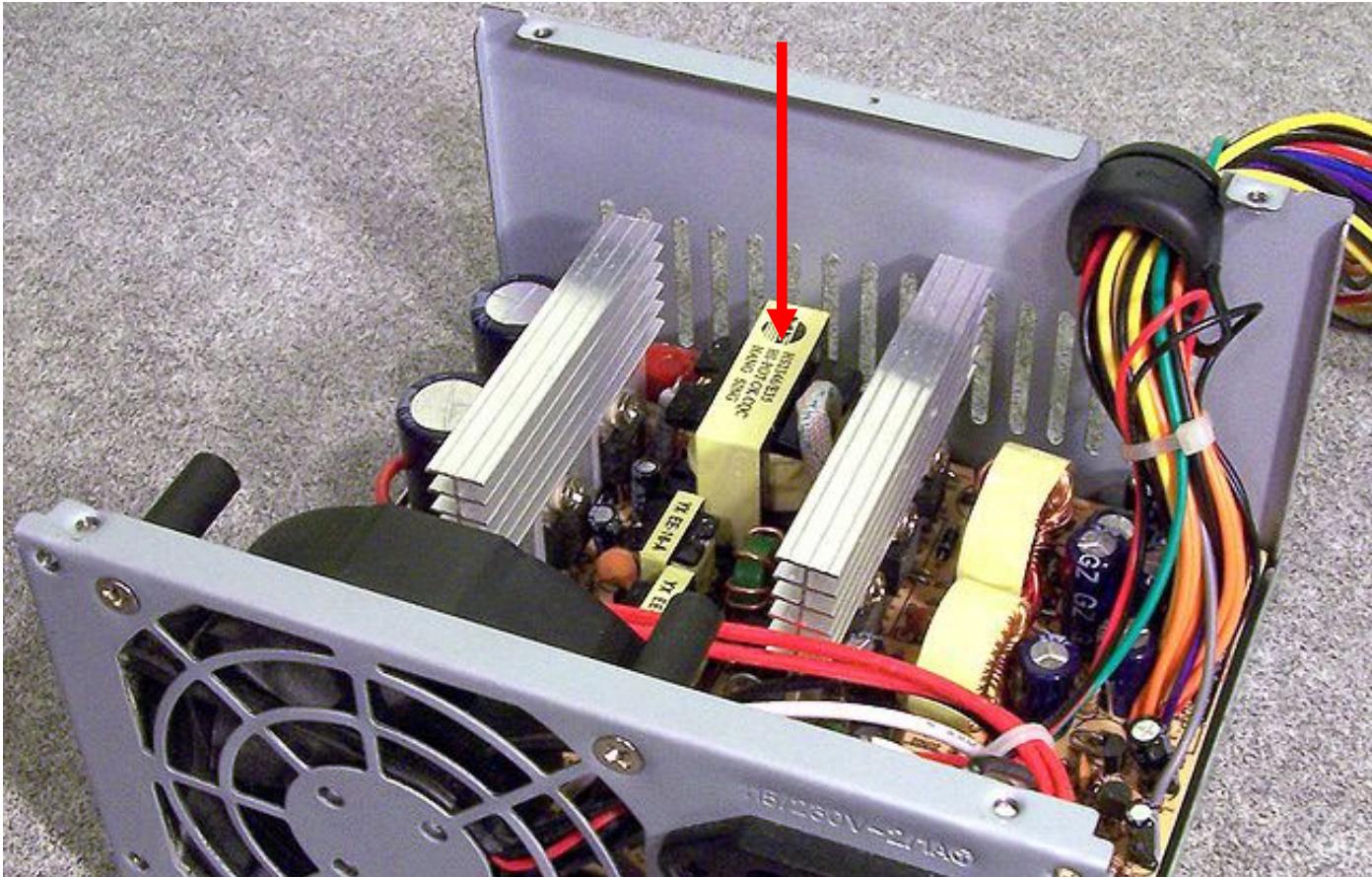
**Stations de transformation**  
Dans les stations de transformation, la moyenne tension est convertie en basse tension de 400 volts, utilisée par les ménages et les artisans.

5

# Transformateur monophasé



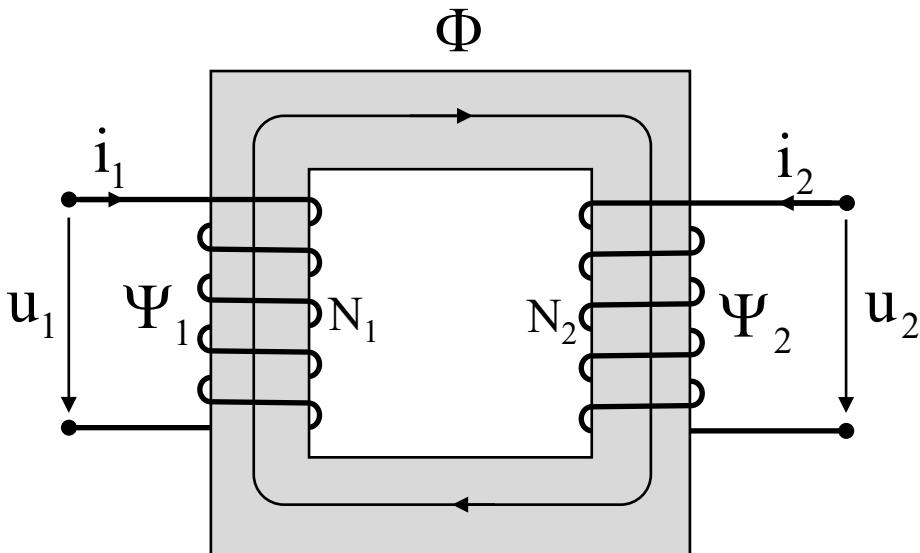
# Transformateur monophasé



# Sommaire

- Introduction
- Transformateur monophasé idéal
  - Rapport de transformation
  - Grandeurs rapportées
- Transformateur monophasé réel
  - Equations de tensions
  - Schéma équivalent et bilan de puissance
    - Introduction des pertes fer
  - Grandeurs relatives (per unit)
  - Fonctionnement en court-circuit et Hypothèse de Kapp
- Résumé des schémas équivalents
- Fonctionnement en parallèle
- Rappel sur le triphasé
- Transformateur triphasé
  - Groupes de couplages
- Transformateurs spéciaux

# Transformateur monophasé idéal

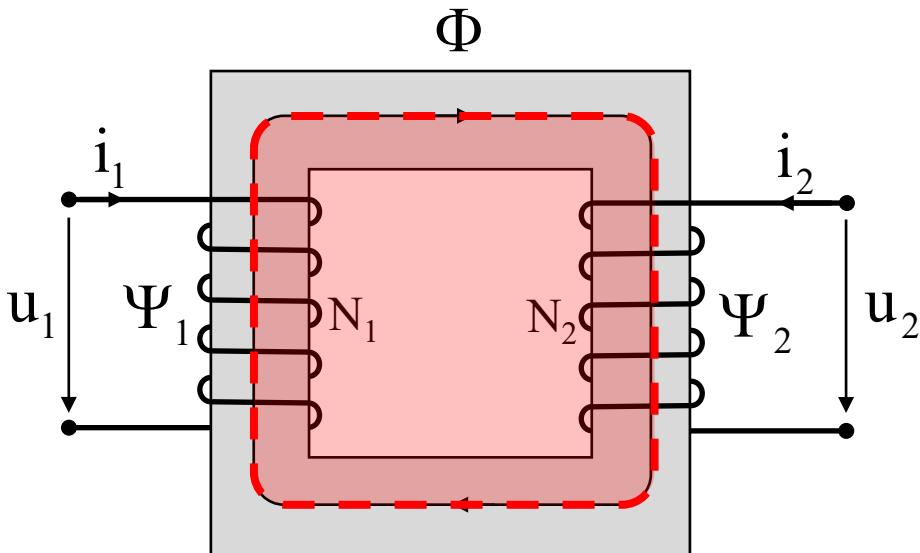


Hypothèses :

- Alimentation sinusoïdale (le flux varie sinusoïdalement)
- La perméabilité du circuit magnétique est infinie
  - Pas de flux de fuite
  - Pas de pertes fer
- La résistance des enroulements est négligée

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1 = R_1 i_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} \\ u_2 = R_2 i_2 + \frac{d\Psi_2}{dt} \end{array} \right. \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} u_1 = \frac{d\Psi_1}{dt} = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ u_2 = \frac{d\Psi_2}{dt} = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \end{array} \right. \rightarrow \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

# Transformateur monophasé idéal



Hypothèses :

- Alimentation sinusoïdale (le flux varie sinusoïdalement)
- La perméabilité du circuit magnétique est infinie
  - Pas de flux de fuite
  - Pas de pertes fer
- La résistance des enroulements est négligée

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = 0 = N_1 i_1 + N_2 i_2 \rightarrow \frac{N_1}{N_2} = -\frac{I_2}{I_1}$$

exemple

rapport de transformation

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = -\frac{I_2}{I_1} = \ddot{u}$$

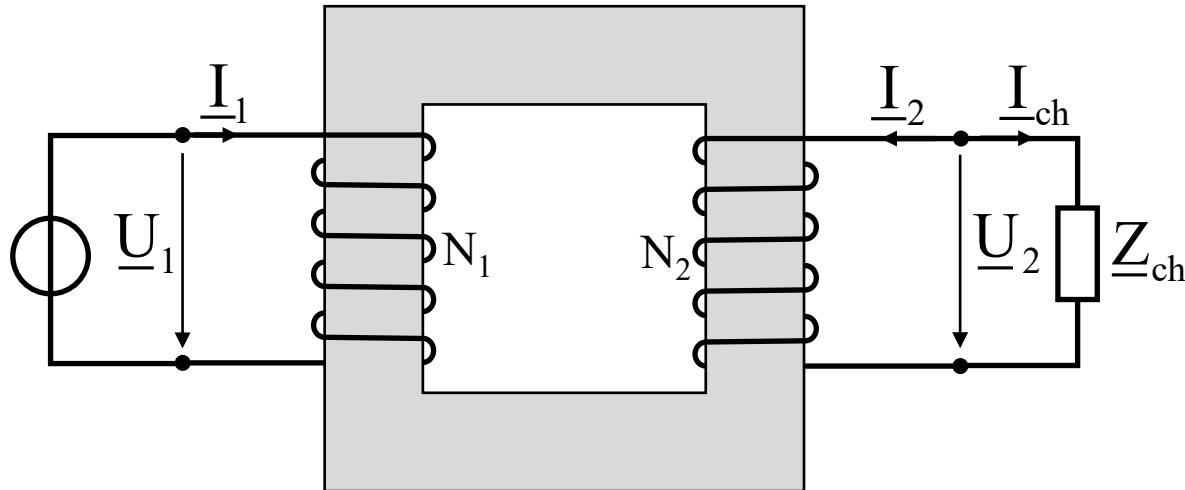
230V / 9V

$$\ddot{u} = 25.56$$

12mA / 300mA



# Grandeurs rapportées



$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{U}_1 = \frac{N_1}{N_2} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_1 = -\frac{N_2}{N_1} \underline{I}_2 \end{array} \right.$$

$$\underline{Z}_{ch} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_{ch}} = \frac{\underline{U}_2}{-\underline{I}_2} = \frac{\underline{U}_1 \frac{N_2}{N_1}}{\underline{I}_1 \frac{N_1}{N_2}} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 = \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2 \underline{Z}'_{ch}$$

$$\boxed{\underline{Z}'_{ch}} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \underline{Z}_{ch} = \ddot{u}^2 \underline{Z}_{ch}$$

↑  
Impédance de la charge rapportée au primaire

Tension secondaire rapportée au primaire

$$\underline{U}'_2 = \ddot{u} \underline{U}_2$$

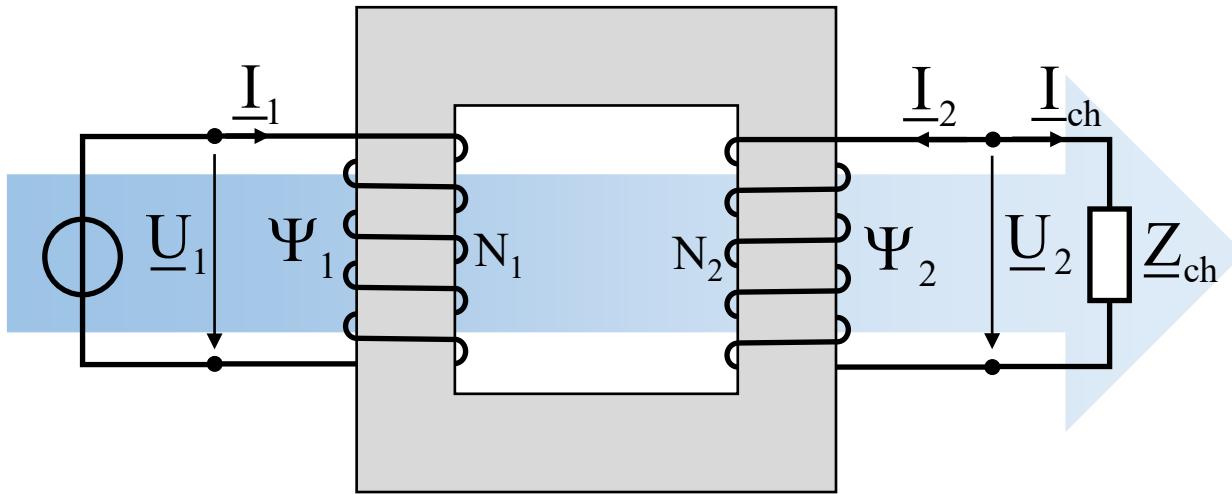
Courant secondaire rapporté au primaire

$$\underline{I}'_2 = \frac{1}{\ddot{u}} \underline{I}_2$$

Impédance secondaire rapportée au primaire

$$\underline{Z}'_{ch} = \ddot{u}^2 \underline{Z}_{ch}$$

# Transformateur monophasé idéal



rapport de transformation

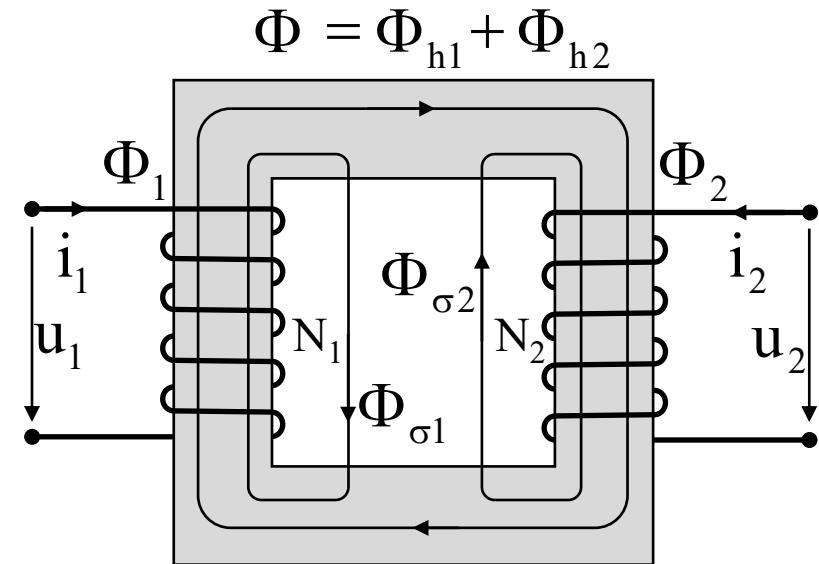
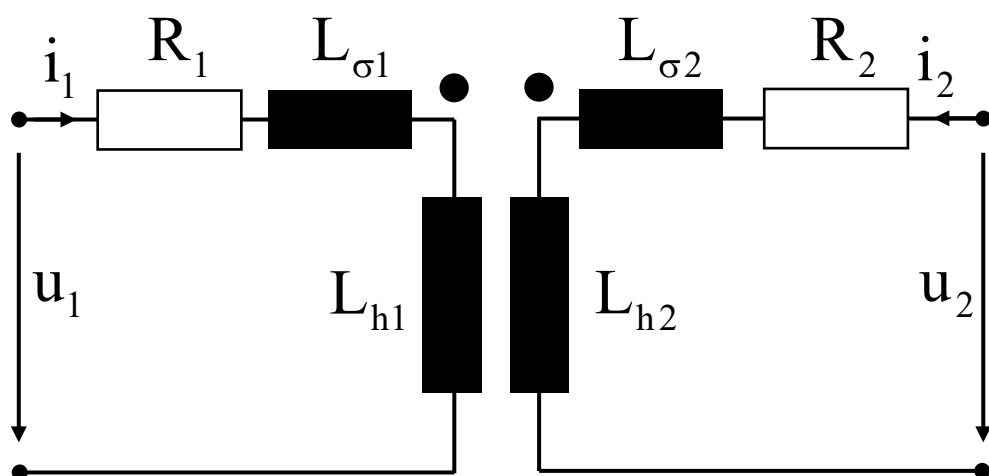
$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = -\frac{I_2}{I_1} = \ddot{\nu}$$

$$\underline{S}_1 = \underline{U}_1 \underline{I}_1^* = \frac{N_1}{N_2} \underline{U}_2 \left( -\frac{N_2}{N_1} \right) \underline{I}_2^* = -\underline{U}_2 \underline{I}_2^* = -\underline{S}_2$$

# Sommaire

- Introduction
- Transformateur monophasé idéal
  - Rapport de transformation
  - Grandeurs rapportées
- **Transformateur monophasé réel**
  - Equations de tensions
  - Schéma équivalent et bilan de puissance
    - Introduction des pertes fer
  - Grandeurs relatives (per unit)
  - Fonctionnement en court-circuit et Hypothèse de Kapp
- Résumé des schémas équivalents
- Fonctionnement en parallèle
- Rappel sur le triphasé
- Transformateur triphasé
  - Groupes de couplages
- Transformateurs spéciaux

# Transformateur monophasé réel



$$\begin{cases} u_1 = R_1 i_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} \\ u_2 = R_2 i_2 + \frac{d\Psi_2}{dt} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Psi_1 = L_{11} i_1 + L_{12} i_2 = (L_{h1} + L_{\sigma 1}) i_1 + L_{12} i_2 \\ \Psi_2 = L_{22} i_2 + L_{21} i_1 = (L_{h2} + L_{\sigma 2}) i_2 + L_{21} i_1 \end{cases}$$

$$L_{\sigma 1} = N_1^2 \Lambda_{\sigma 1}$$

$$L_{h1} = N_1 N_1 \Lambda_h$$

$$L_{12} = L_{21} = N_1 N_2 \Lambda_h$$

$$L_{h2} = N_2 N_2 \Lambda_h$$

$$L_{\sigma 2} = N_2^2 \Lambda_{\sigma 2}$$

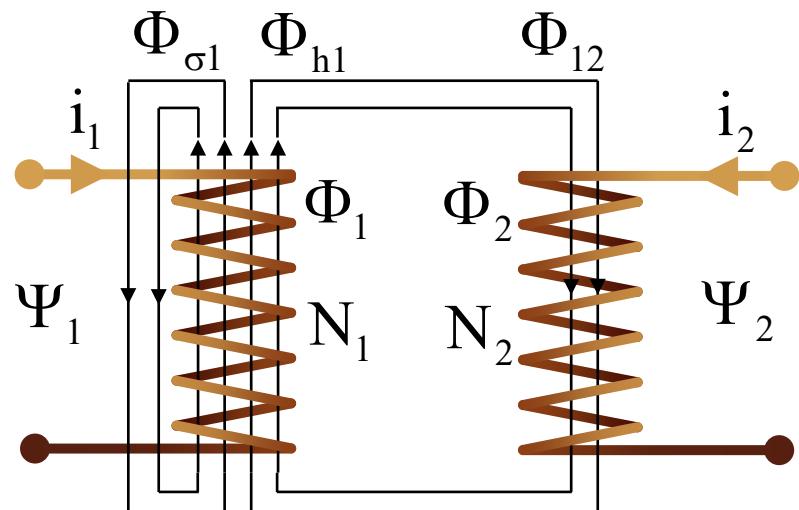
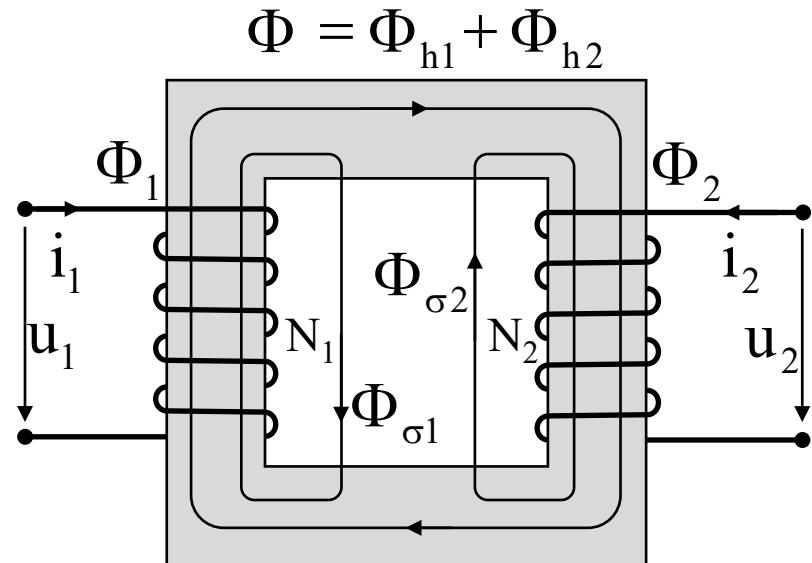
# Tension induite généralisée

$$u = R i + \frac{d\Psi}{dt}$$

$$u_1 = R_1 i_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt}$$

$$u_1 = R_1 i_1 + (L_{h1} + L_{\sigma 1}) \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt}$$

$$u_2 = R_2 i_2 + (L_{h2} + L_{\sigma 2}) \frac{di_2}{dt} + L_{21} \frac{di_1}{dt}$$



# Équations de tensions

$$\begin{cases} u_1 = R_1 i_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} = R_1 i_1 + L_{h1} \frac{di_1}{dt} + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt} \\ u_2 = R_2 i_2 + \frac{d\Psi_2}{dt} = R_2 i_2 + L_{h2} \frac{di_2}{dt} + L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} + L_{21} \frac{di_1}{dt} \end{cases}$$

grandeur rapportées au primaire

$$\begin{cases} u_1 = R_1 i_1 + L_{h1} \frac{di_1}{dt} + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + L_{h1} \frac{di'_2}{dt} \\ u'_2 = R'_2 i'_2 + L_{h1} \frac{di'_2}{dt} + L'_{\sigma 2} \frac{di'_2}{dt} + L_{h1} \frac{di_1}{dt} \end{cases}$$

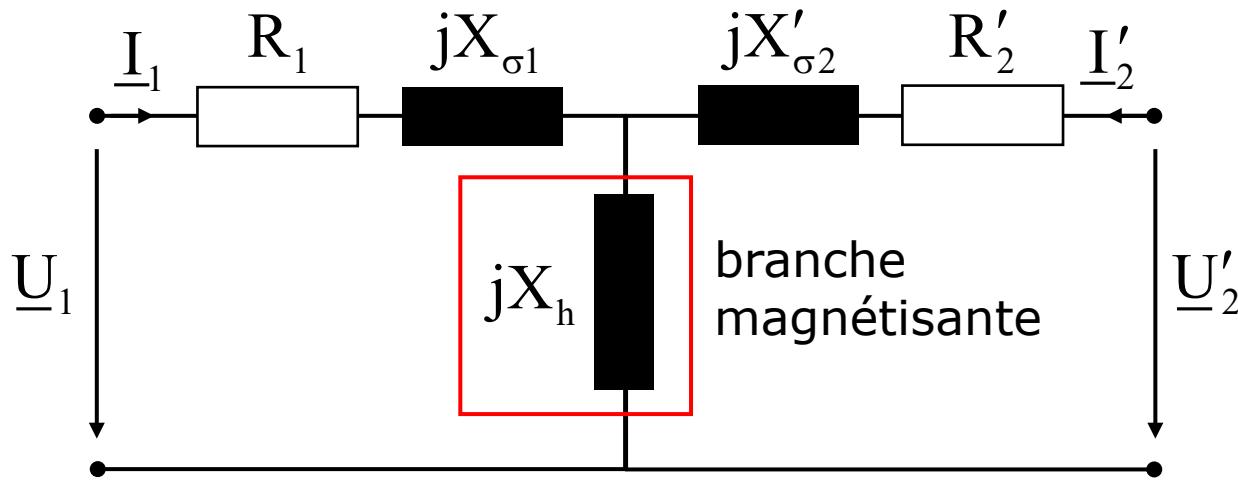
alimentation sinusoïdale

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + j\omega L_{h1} \underline{I}_1 + j\omega L_{\sigma 1} \underline{I}_1 + j\omega L_{h1} \underline{I}'_2 \\ \underline{U}'_2 = R'_2 \underline{I}'_2 + j\omega L_{h1} \underline{I}'_2 + j\omega L'_{\sigma 2} \underline{I}'_2 + j\omega L_{h1} \underline{I}_1 \end{cases}$$

$X = \omega L$

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_h \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \underline{I}_1 + jX_h \underline{I}'_2 \\ \underline{U}'_2 = R'_2 \underline{I}'_2 + jX_h \underline{I}'_2 + jX'_{\sigma 2} \underline{I}'_2 + jX_h \underline{I}_1 \end{cases}$$

# Schéma équivalent

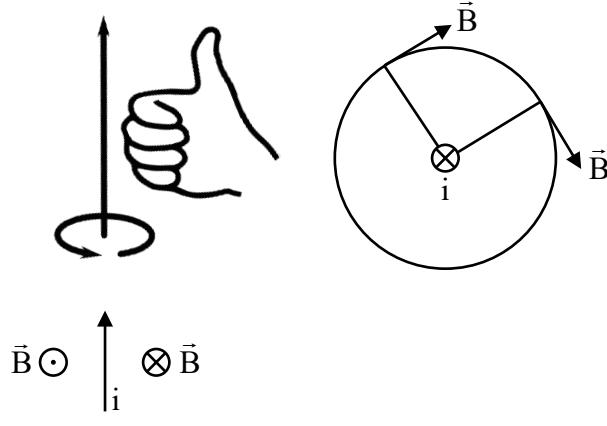


$$\begin{cases} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_h \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \underline{I}_1 + jX_h \underline{I}'_2 \\ \underline{U}'_2 = R'_2 \underline{I}'_2 + jX_h \underline{I}'_2 + jX'_{\sigma 2} \underline{I}'_2 + jX_h \underline{I}_1 \end{cases}$$

# Sommaire

- Introduction
- Transformateur monophasé idéal
  - Rapport de transformation
  - Grandeurs rapportées
- Transformateur monophasé réel
  - Equations de tensions
  - Schéma équivalent et bilan de puissance
    - Introduction des pertes fer
  - Fonctionnement en court-circuit et Hypothèse de Kapp
- Résumé des schémas équivalents
- Rappel sur le triphasé
- Transformateur triphasé
- Transformateur spéciaux

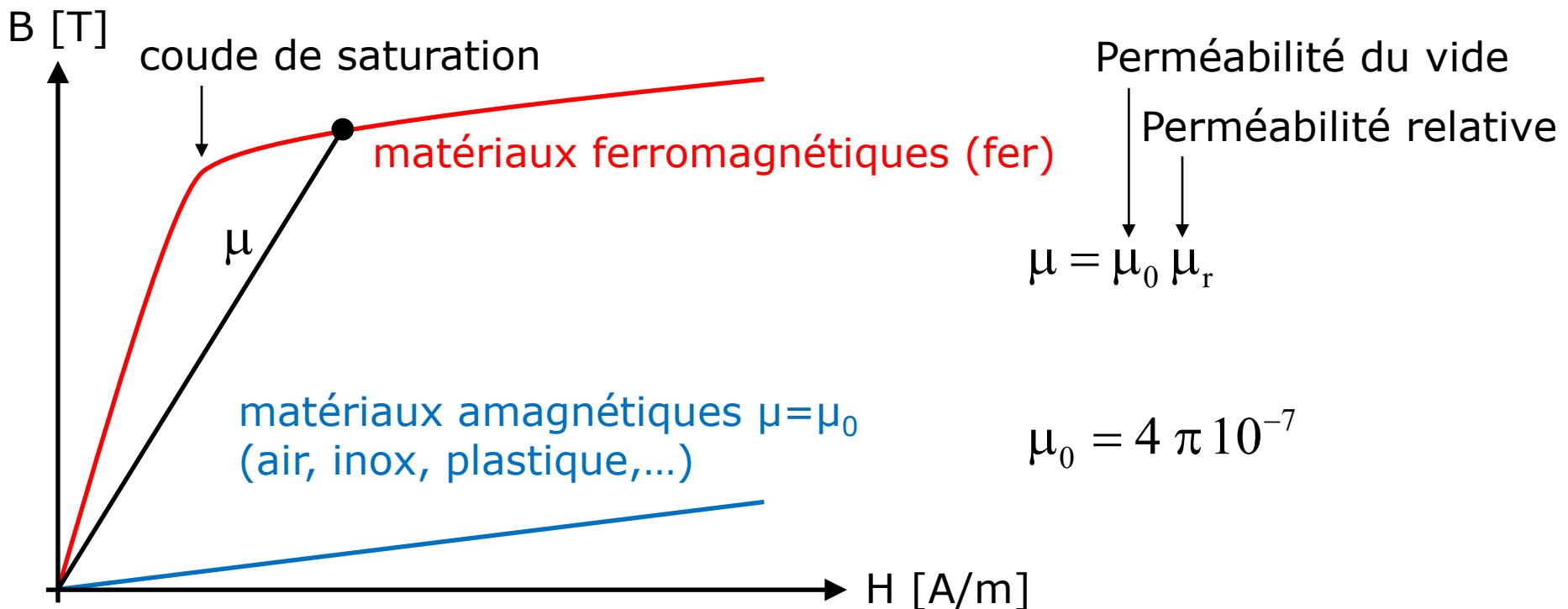
# Champ d'induction magnétique



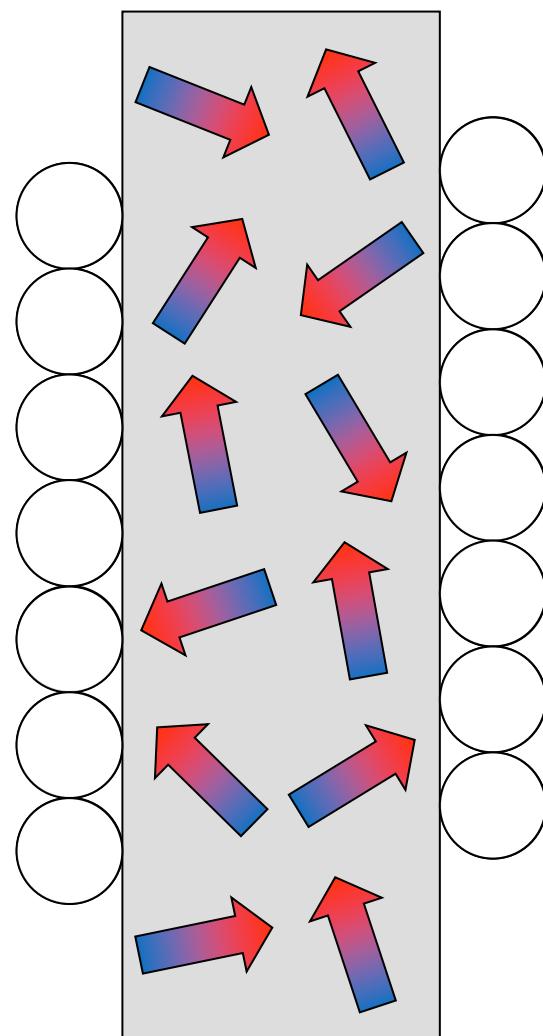
Champ d'induction magnétique  
Perméabilité du matériau  
Champ magnétique  
(indépendant du milieu)

$\downarrow$

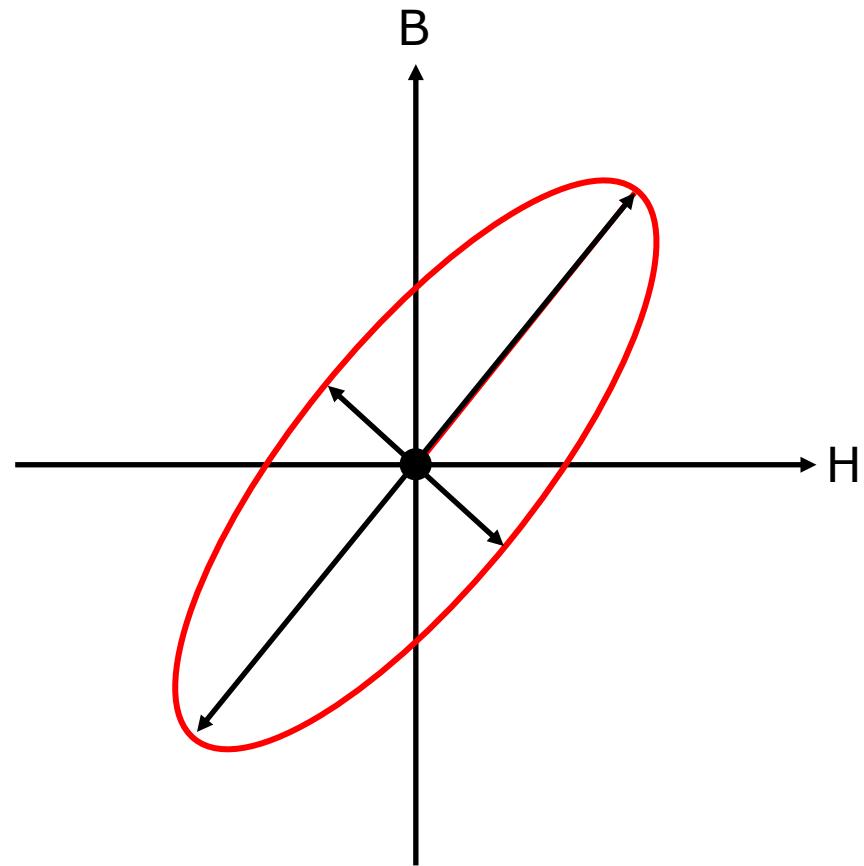
$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$



# Introduction des pertes fer

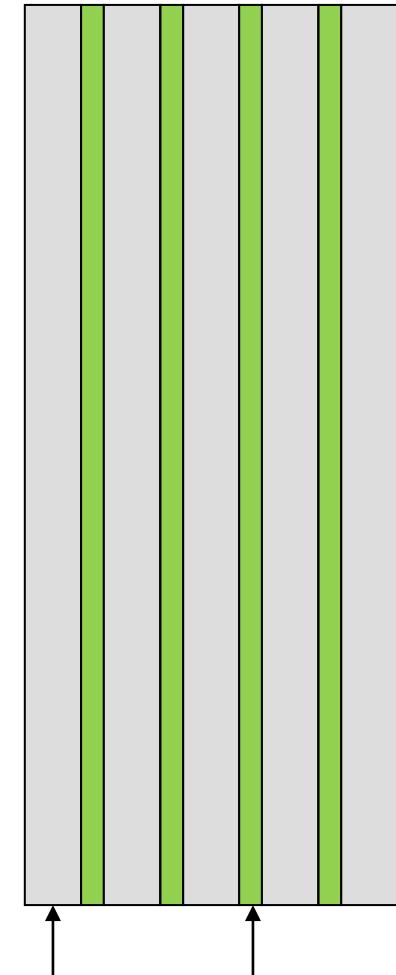
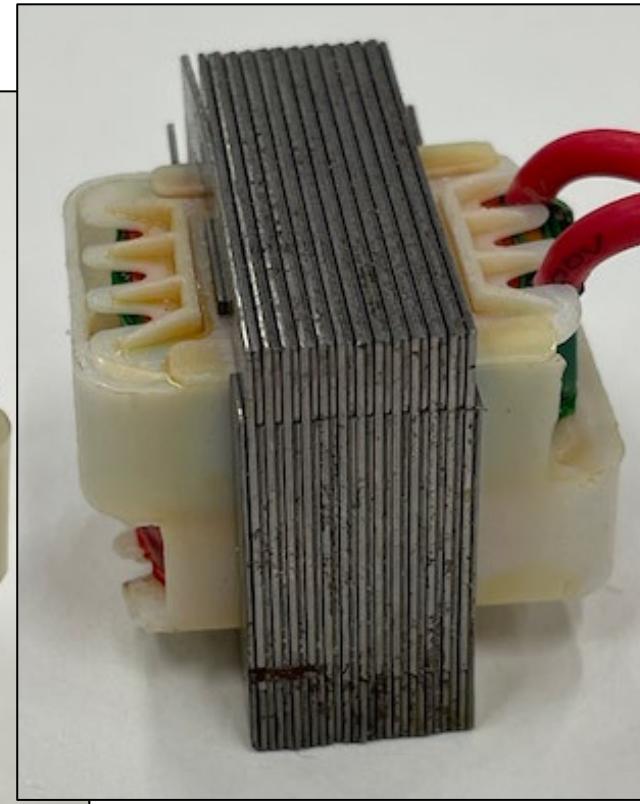
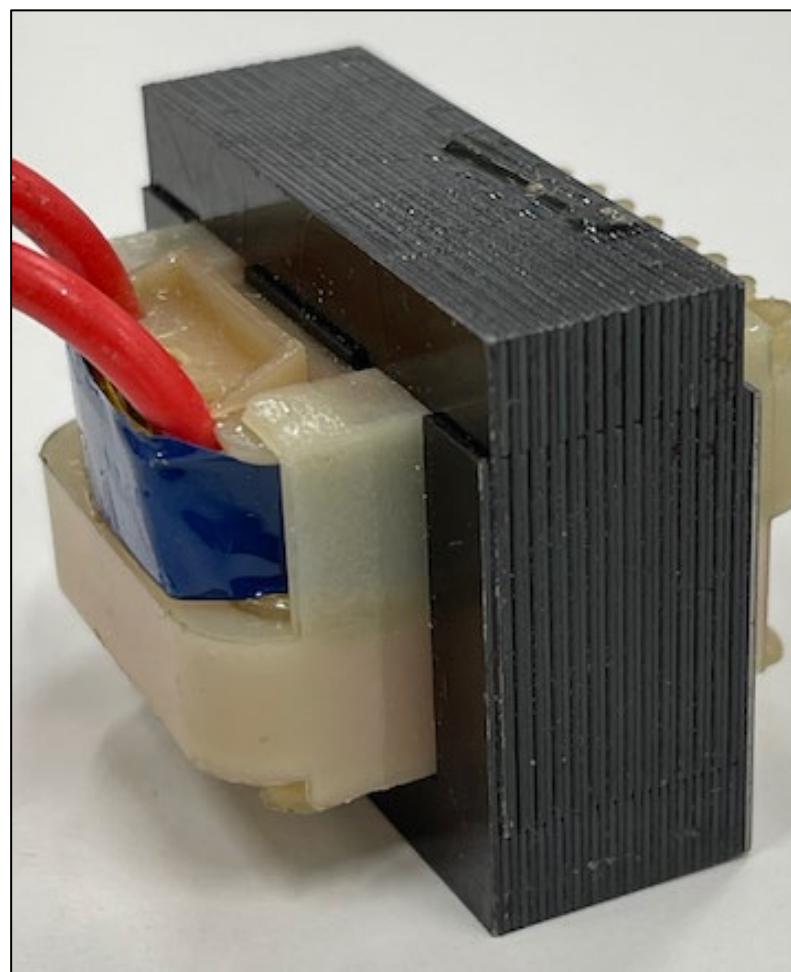


induction permanente



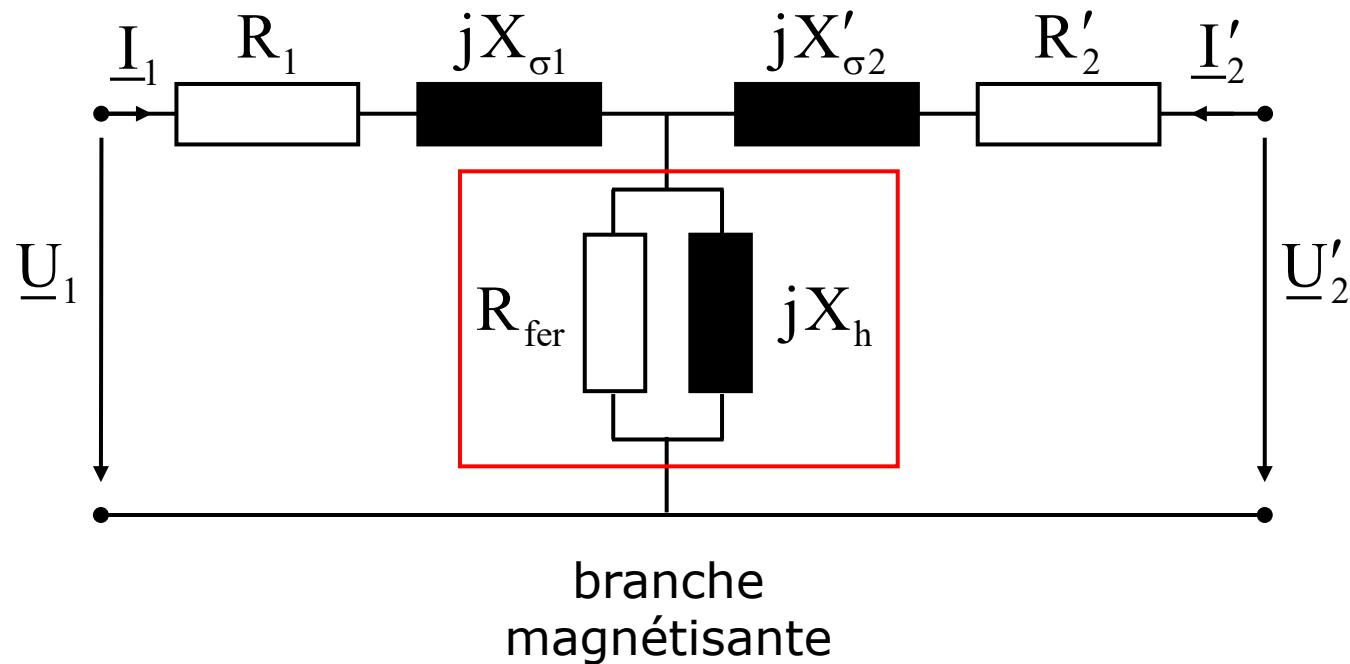
# Introduction des pertes fer

$$P_{\text{fer}} = P_{\text{hystérésis}} + P_{\text{courants de Foucault}}$$

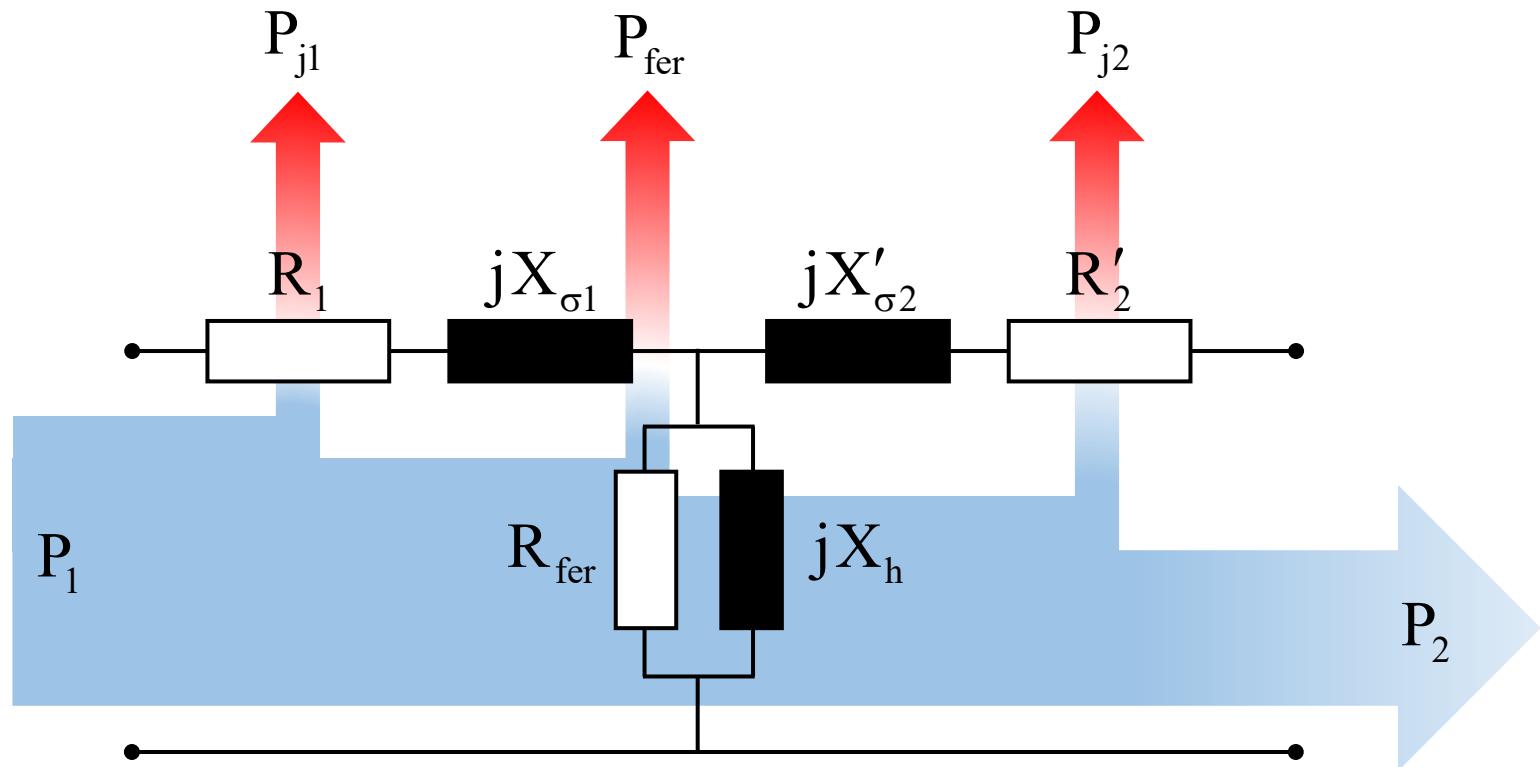


Tôle      Isolant

# Schéma équivalent en tenant compte des Pertes fer



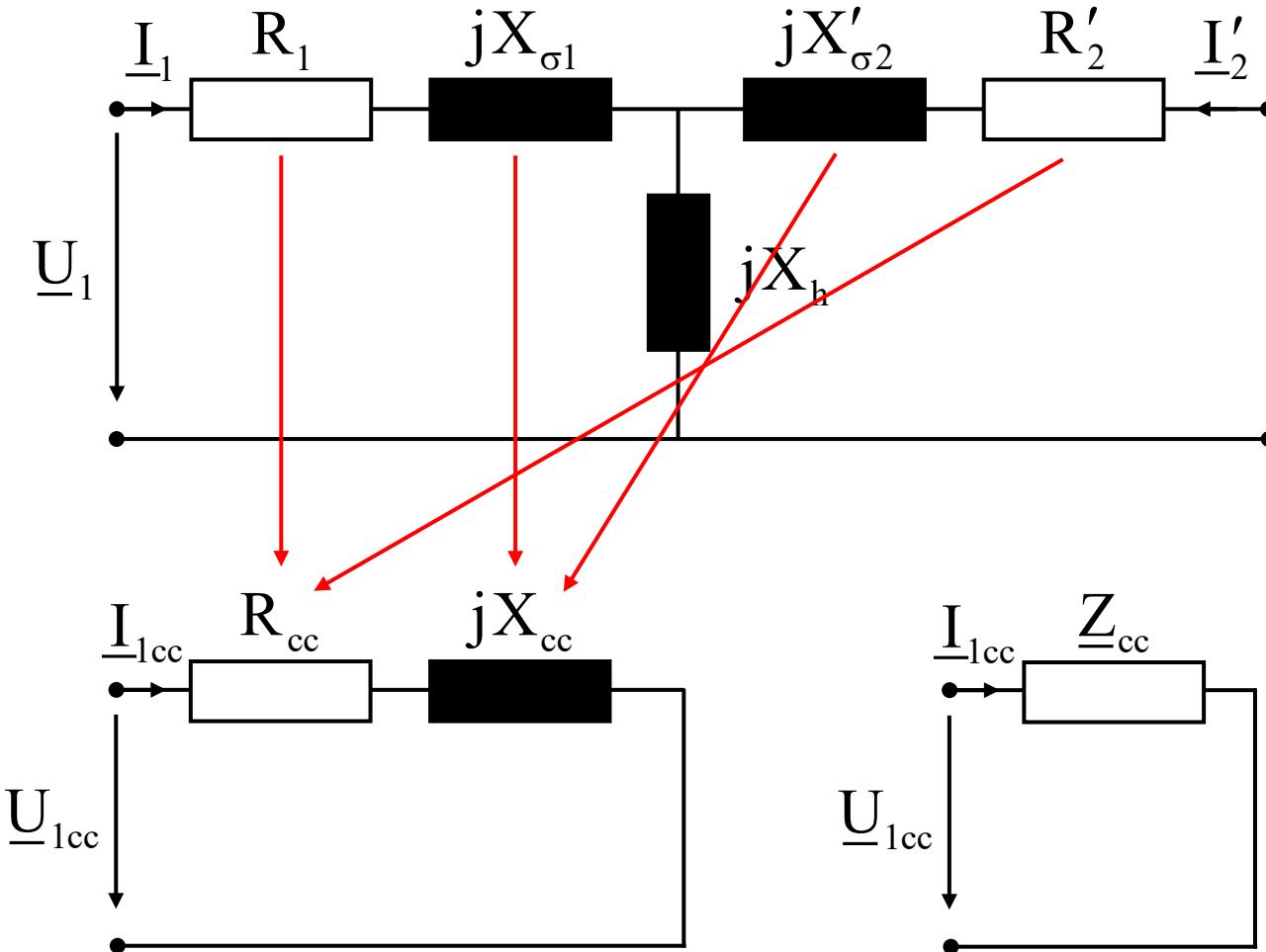
# Bilan de puissance



# Sommaire

- Introduction
- Transformateur monophasé idéal
  - Rapport de transformation
  - Grandeurs rapportées
- **Transformateur monophasé réel**
  - Equations de tensions
  - Schéma équivalent et bilan de puissance
    - Introduction des pertes fer
  - **Fonctionnement en court-circuit et Hypothèse de Kapp**
- Résumé des schémas équivalents
- Rappel sur le triphasé
- Transformateur triphasé
- Transformateur spéciaux

# Fonctionnement en court-circuit

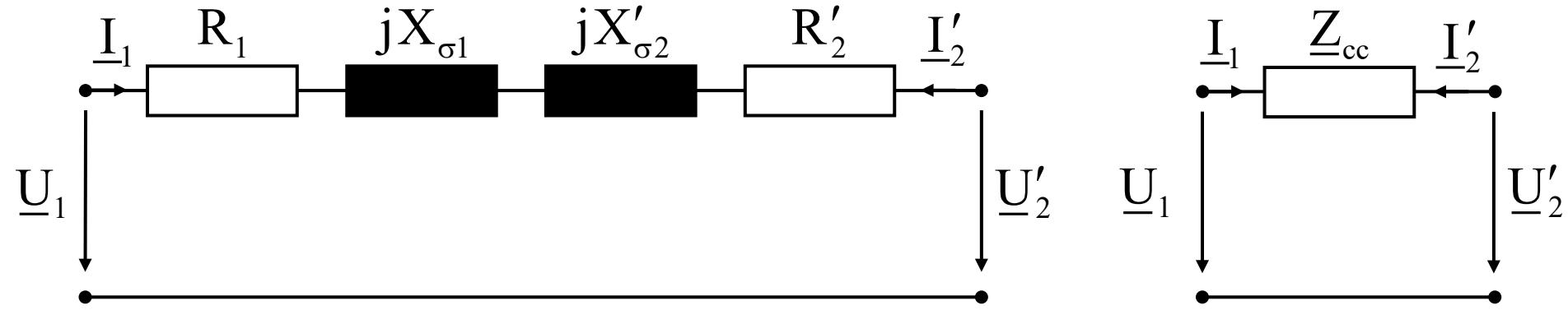


$$R_{cc} = R_1 + R'_2$$

$$X_{cc} = X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2}$$

$$\underline{Z}_{cc} = R_{cc} + j X_{cc}$$

# Hypothèse de Kapp



$$\underline{Z}_{cc} = R_{cc} + j X_{cc}$$

$$\underline{I}_1 = -\underline{I}'_2$$

$$R_{cc} = R_1 + R_2'$$

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_{cc} \underline{I}_1 + \underline{U}'_2$$

$$X_{cc} = X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}'$$

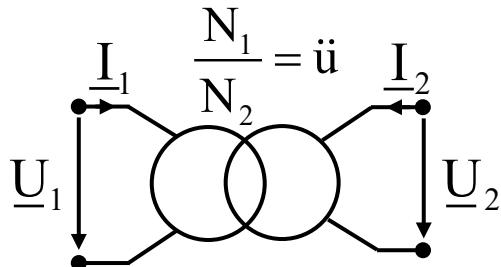
$$\underline{U}'_2 = \underline{U}_1 - \underline{Z}_{cc} \underline{I}_1$$

# Sommaire

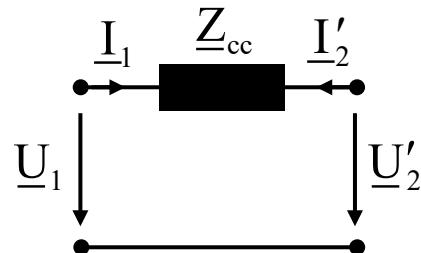
- Introduction
- Transformateur monophasé idéal
  - Rapport de transformation
  - Grandeurs rapportées
- Transformateur monophasé réel
  - Equations de tensions
  - Schéma équivalent et bilan de puissance
    - Introduction des pertes fer
  - Fonctionnement en court-circuit et Hypothèse de Kapp
- Résumé des schémas équivalents
- Rappel sur le triphasé
- Transformateur triphasé
- Transformateur spéciaux

# Résumé schémas équivalents

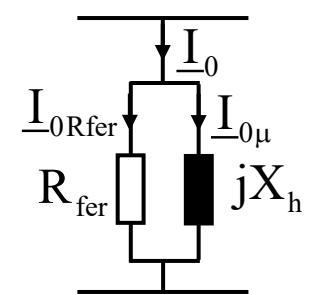
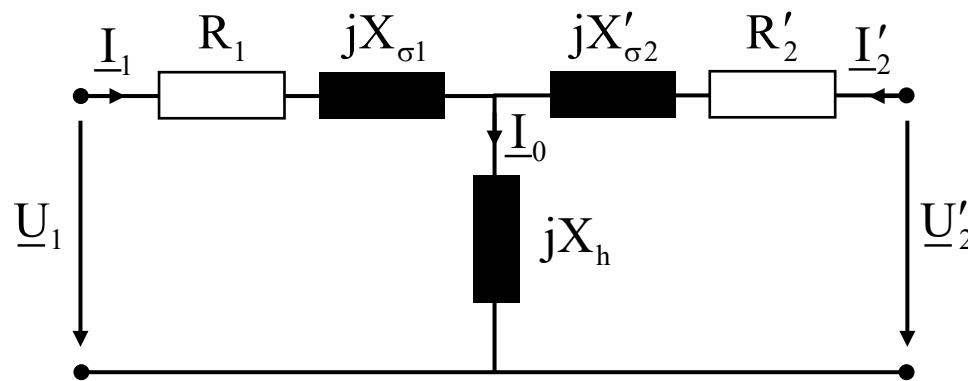
- Idéal



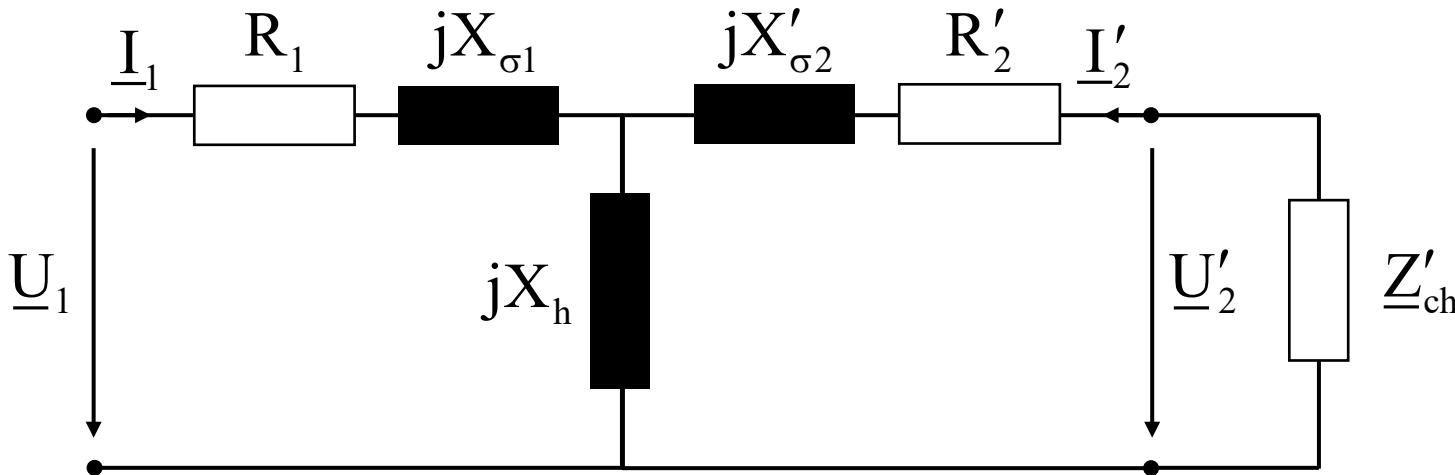
- Kapp



- Complet



# Exercice



$$R_1 = 0.1 \text{ } [\Omega]$$

$$R_2 = 0.15 \text{ } [\Omega]$$

$$X_h = 400 \text{ } [\Omega]$$

$$X_{\sigma1} = 0.08 \text{ } [\Omega]$$

$$X_{\sigma2} = 0.12 \text{ } [\Omega]$$

Alimenté à 110V. Quel est le courant au primaire ?

$$Z_{ch} = 20 + j3 \text{ } [\Omega]$$

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_{\sigma1}$$

$$R'_2 = \ddot{U}^2 R_2 \quad \ddot{U} = U_{1n} / U_{2n}$$

$$\underline{Z}_h = jX_h$$

$$X'_{\sigma2} = \ddot{U}^2 X_{\sigma2}$$

$$\underline{Z}'_2 = R'_2 + jX'_{\sigma2} + \underline{Z}_{ch}$$

$$Z'_{ch} = \ddot{U}^2 Z_{ch}$$

$$\underline{Z}_{eq} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_h // \underline{Z}'_2 = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_h \underline{Z}'_2}{\underline{Z}_h + \underline{Z}'_2} = R_1 + jX_{\sigma1} + \frac{jX_h (R'_2 + jX'_{\sigma2} + \underline{Z}_{ch})}{jX_h + R'_2 + jX'_{\sigma2} + \underline{Z}_{ch}}$$

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_{eq}} = 10 \text{ [A]}$$

MATLAB R2020b - academic use

André

## Conseils avec Matlab:

- Utiliser  $1i$  pour la partie complexe
- Utiliser  $p$  au lieu de  $'$  prime (transposition!)

Current Folder

- Name
- Champ\_tournant.m
- ChampTournant.m
- Couple\_reluctant.m
- Examen\_Conv\_Electromeca.m
- ExoCircMag3.m
- ExoTransfo.m
- ExoTransfo\_v2.m
- MAS.m
- MAS2Lionel.m
- MCC\_02.m
- MCC\_Pconst.m
- MS\_06\_Light.m
- SinusTri.m

ExoTransfo\_v2.m (Script)

Workspace

Name	Value
I1	10.0598
R1	0.1000
R2	0.1500
R2p	0.0800
u	0.7302
U1	110
U1n	230
U2n	315
Xh	400
Xs1	0.0800
Xs2	0.1200
Xs2p	0.0640
Z1	0.1000 + 0.0800i
Z2p	10.7426 + 1.6634i
Zch	20.0000 + 3.0000i
Zchp	10.6626 + 1.5994i
Zeq	10.7462 + 2.0212i
ZeqABS	10.9346
Zh	0.0000e+000 + 4.0000e+02i

Editor - C:\Users\hodder\Documents\\_NAS\Cours\Machines Electriques\Matlab\ExoTransfo\_v2.m

```
1 - clear
2 - clc
3 -
4 - U1n = 230;
5 - U2n = 315;
6 - R1 = 0.1;
7 - R2 = 0.15;
8 - Xh = 400;
9 - Xs1 = 0.08;
10 - Xs2 = 0.12;
11 - Zch = 20+1i*3;
12 - u = U1n/U2n;
13 - U1 = 110; | Données
```

```
14 -
15 - R2p = (u^2)*R2;
16 - Xs2p = (u^2)*Xs2;
17 - Zchp = (u^2)*Zch; | Grandeurs rapportées
```

```
18 -
19 - Z1 = R1+1i*Xs1;
20 - Zh = 1i*Xh;
21 - Z2p = R2p + 1i*Xs2p + Zchp; | Calcul des impédances
```

```
22 -
23 - Zeq = Z1+(Zh*Z2p) / (zh+Z2p)
24 - ZeqABS = abs(Zeq); | Calcul de l'impédance équivalente
```

```
25 -
26 - I1 = U1/abs(Zeq); | Calcul du courant (en norme)
```

Command Window

```
Zeq =
10.7462 + 2.0212i

ZeqABS =
10.9346

I1 =
10.0598
```

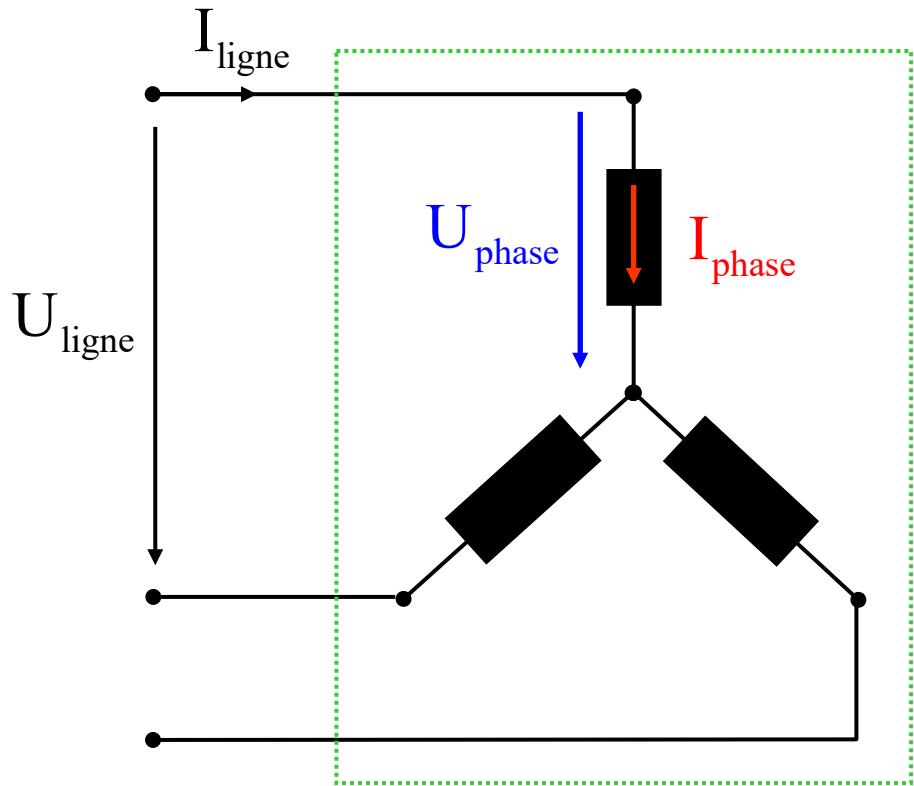
fx >>

UTF-8 script Ln 13 Col 10 30

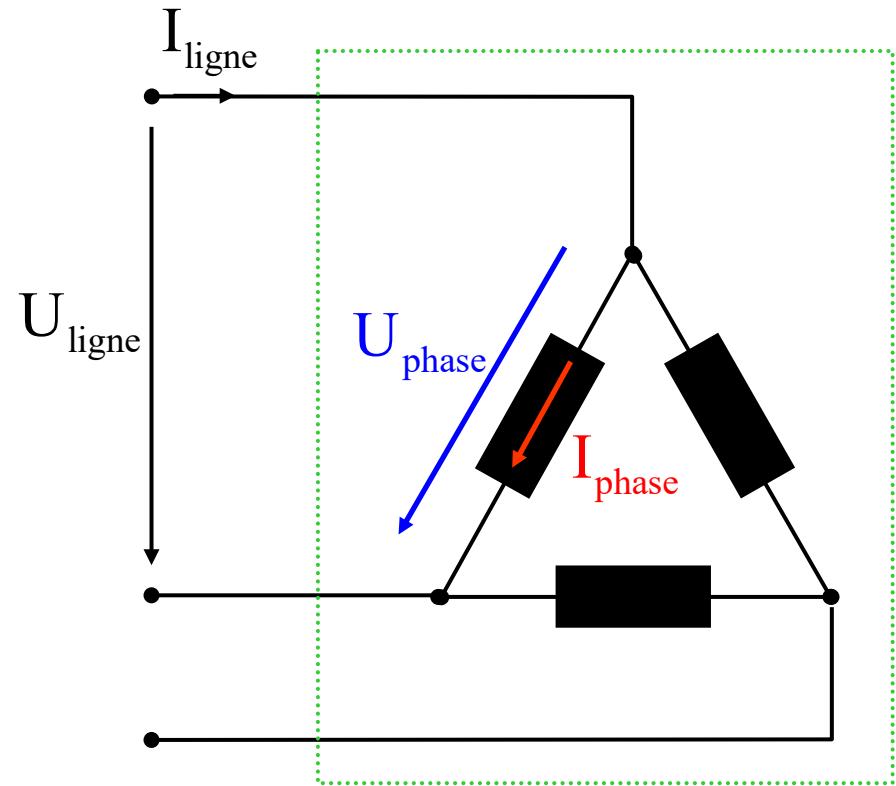
# Sommaire

- Introduction
- Transformateur monophasé idéal
  - Rapport de transformation
  - Grandeurs rapportées
- Transformateur monophasé réel
  - Equations de tensions
  - Schéma équivalent et bilan de puissance
    - Introduction des pertes fer
  - Fonctionnement en court-circuit et Hypothèse de Kapp
- Résumé des schémas équivalents
- **Rappel sur le triphasé**
- Transformateur triphasé
- Transformateur spéciaux

# Rappel sur les couplages étoile-triangle



$$\begin{cases} U_{\text{phase}} = U_{\text{ligne}} / \sqrt{3} \\ I_{\text{phase}} = I_{\text{ligne}} \end{cases}$$



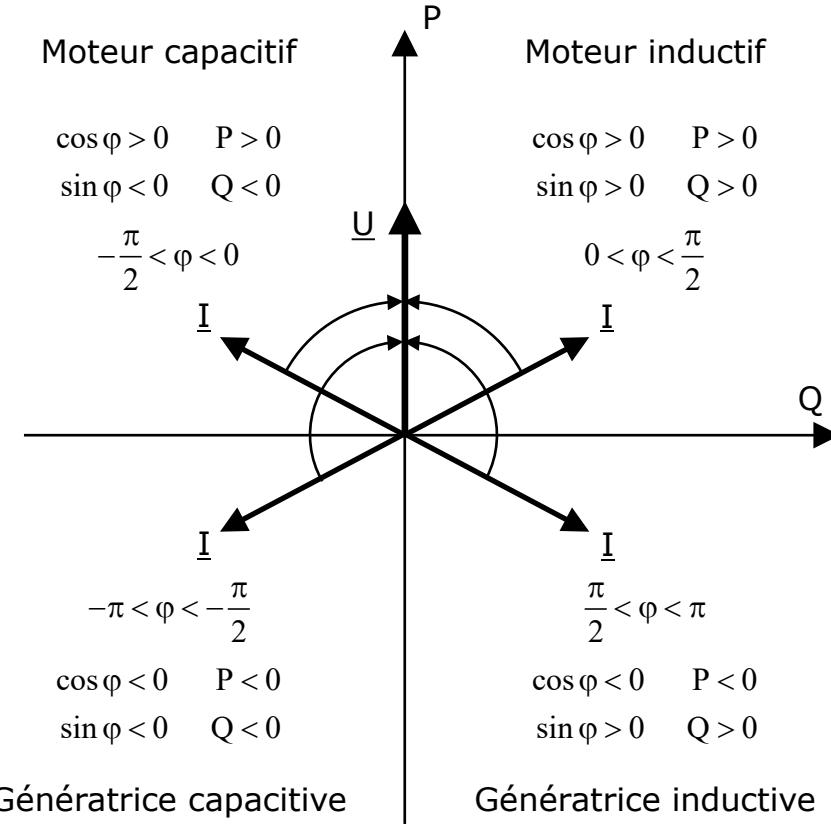
$$\begin{cases} U_{\text{phase}} = U_{\text{ligne}} \\ I_{\text{phase}} = I_{\text{ligne}} / \sqrt{3} \end{cases}$$

# Puissances triphasées

Puissance apparente  $S = 3 U_{\text{ph}} I_{\text{ph}} = \sqrt{3} U_{\text{ligne}} I_{\text{ligne}} = \sqrt{P^2 + Q^2}$  [VA]

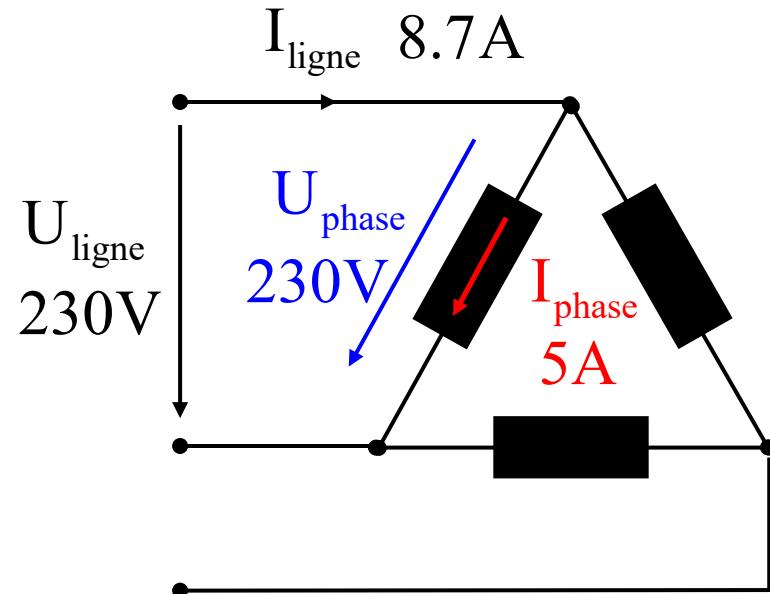
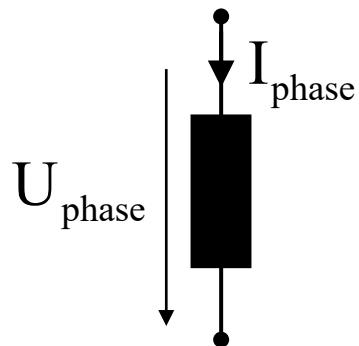
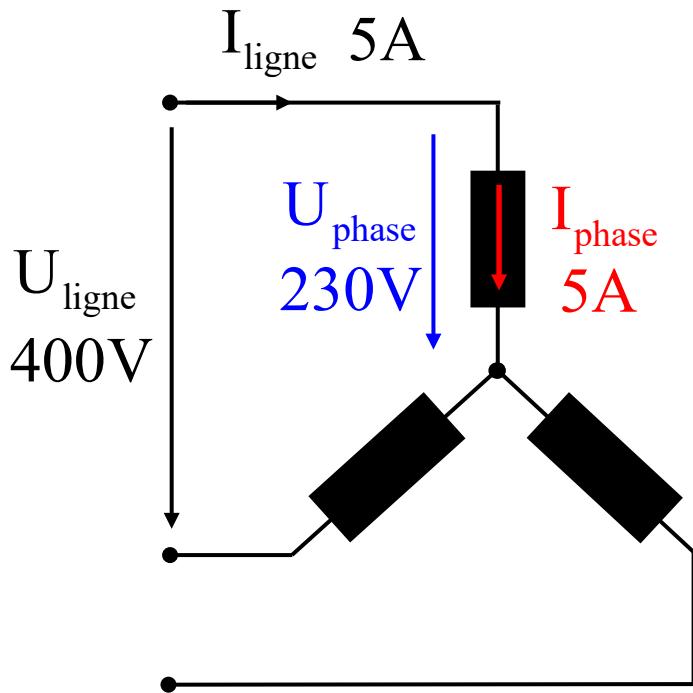
Puissance active  $P = 3 U_{\text{ph}} I_{\text{ph}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\text{ligne}} I_{\text{ligne}} \cos \varphi$  [W]

Puissance réactive  $Q = 3 U_{\text{ph}} I_{\text{ph}} \sin \varphi = \sqrt{3} U_{\text{ligne}} I_{\text{ligne}} \sin \varphi$  [VAr]



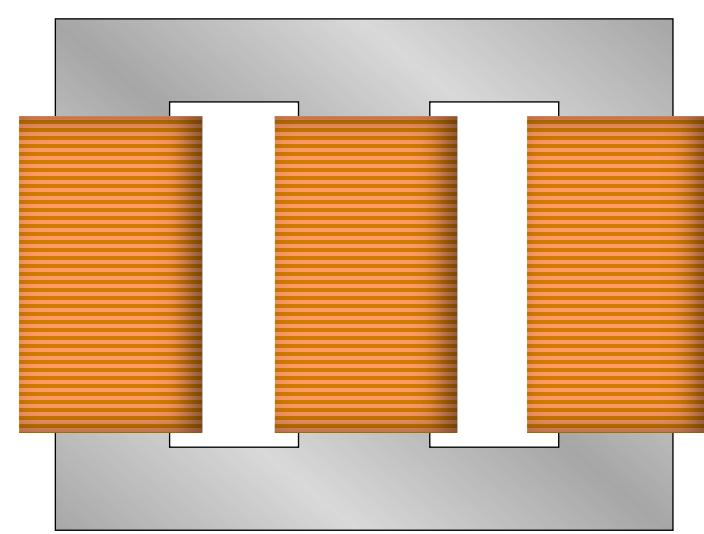
# Plaque signalétique triphasée

Y 400V / 5A  
Δ 230V / 8.7A



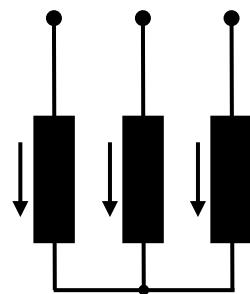
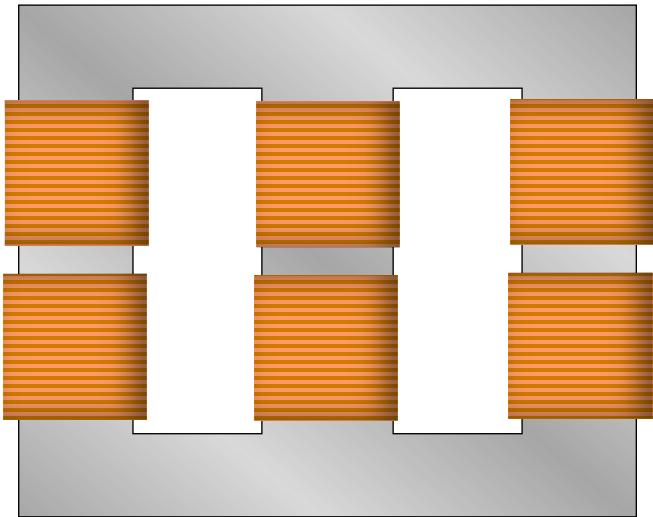
# Sommaire

- Introduction
- Transformateur monophasé idéal
  - Rapport de transformation
  - Grandeurs rapportées
- Transformateur monophasé réel
  - Equations de tensions
  - Schéma équivalent et bilan de puissance
    - Introduction des pertes fer
  - Fonctionnement en court-circuit et Hypothèse de Kapp
- Résumé des schémas équivalents
- Rappel sur le triphasé
- **Transformateur triphasé**
- Transformateur spéciaux

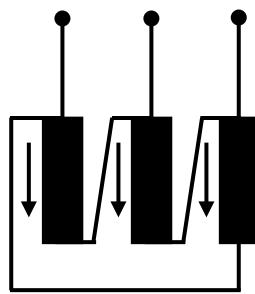




# Transformateur triphasé



étoile  
Y ou y

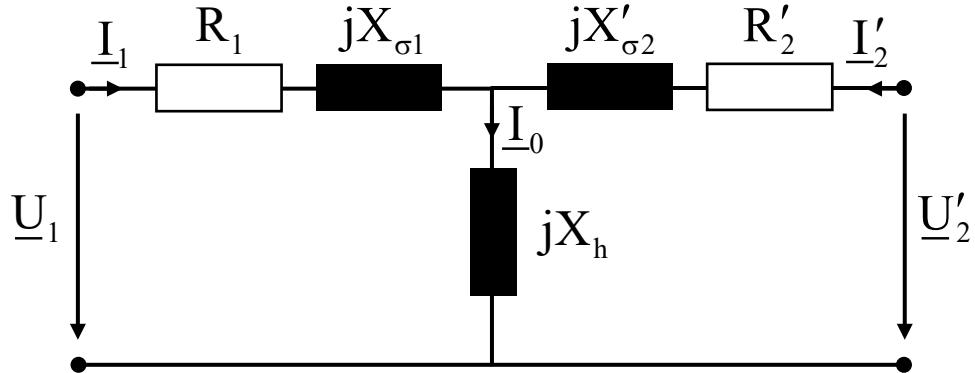


triangle  
D ou d

# Transformateur triphasé

Mais comment fait-on ?

Schéma équivalent par **phase**



On donne les grandeurs de lignes, donc on adapte la tension et le courant en fonction du couplage.

Exemple : 20 kV / 6.6 kV

$$\text{Yy} \rightarrow \underline{U}_{1\text{ph}} = \frac{20}{\sqrt{3}} \text{kV} \quad \underline{U}_{2\text{ph}} = \frac{6.6}{\sqrt{3}} \text{kV}$$

$$\text{Dy} \rightarrow \underline{U}_{1\text{ph}} = 20 \text{kV} \quad \underline{U}_{2\text{ph}} = \frac{6.6}{\sqrt{3}} \text{kV}$$



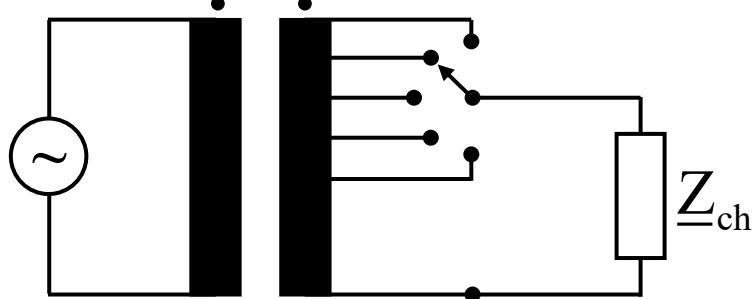
Montage Dy souvent utilisé entre machine (basse tension, fort courant) et sous-station (haute tension, faible courant)

# Sommaire

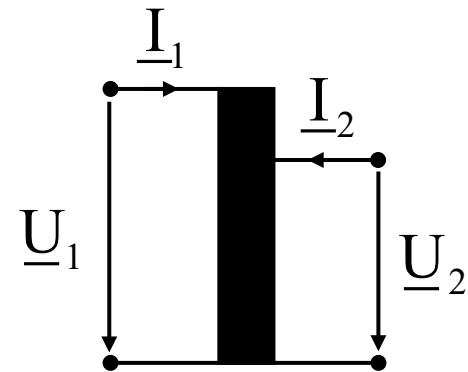
- Introduction
- Transformateur monophasé idéal
  - Rapport de transformation
  - Grandeurs rapportées
- Transformateur monophasé réel
  - Equations de tensions
  - Schéma équivalent et bilan de puissance
    - Introduction des pertes fer
  - Fonctionnement en court-circuit et Hypothèse de Kapp
- Résumé des schémas équivalents
- Rappel sur le triphasé
- Transformateur triphasé
- Transformateur spéciaux

# Transformateurs spéciaux

Transformateur à gradins



L'autotransformateur



Le variac

