

# Machines électriques

## Transformateur

André Hodder

# Sommaire

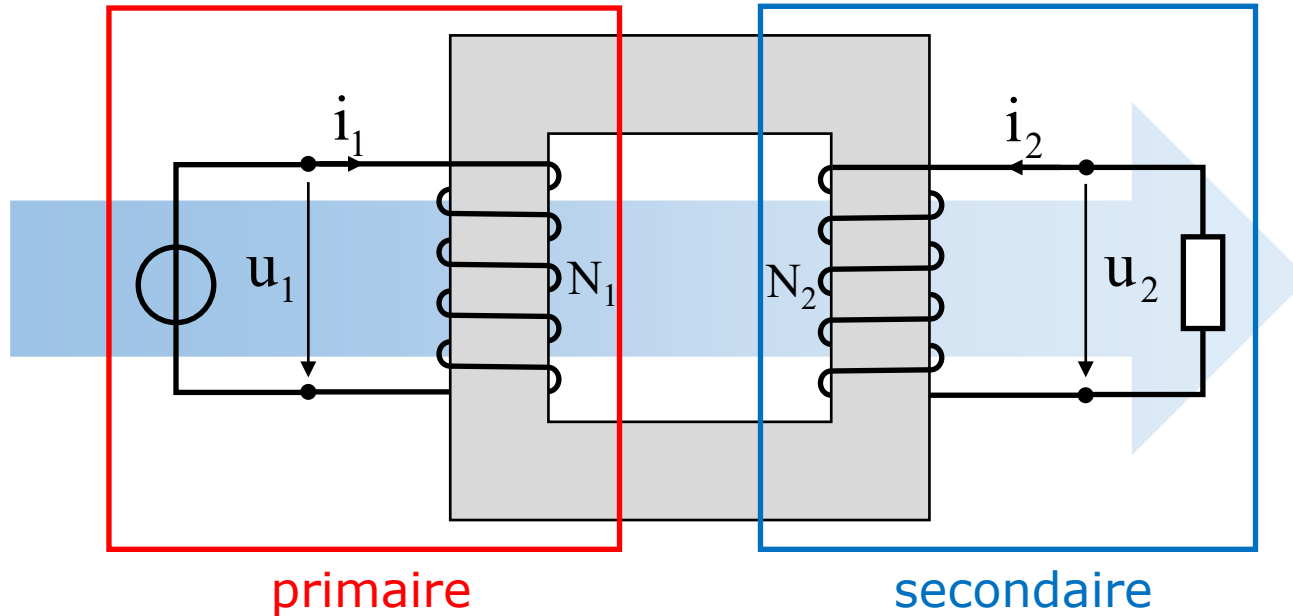
- Introduction
- Circuit magnétique
- Transformateur
- Éléments de base des machines
- Machine asynchrone
- Machine à courant continu
- Machine synchrone
- Moteur synchrone à aimants permanents
- Moteur pas à pas

# Sommaire

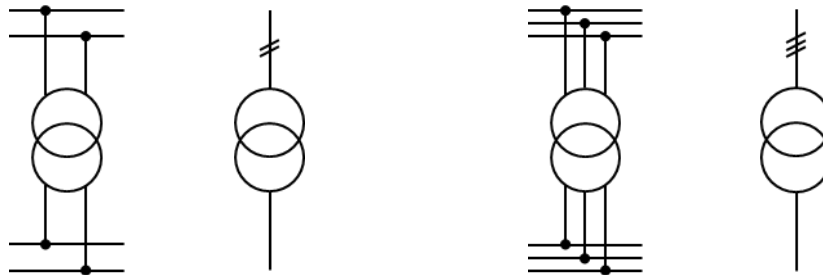
- Introduction
- Transformateur monophasé idéal
  - Rapport de transformation
  - Grandeurs rapportées
- Transformateur monophasé réel
  - Equations de tensions
  - Schéma équivalent et bilan de puissance
    - Introduction des pertes fer
  - Grandeurs relatives (per unit)
  - Fonctionnement en court-circuit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

# Le transformateur

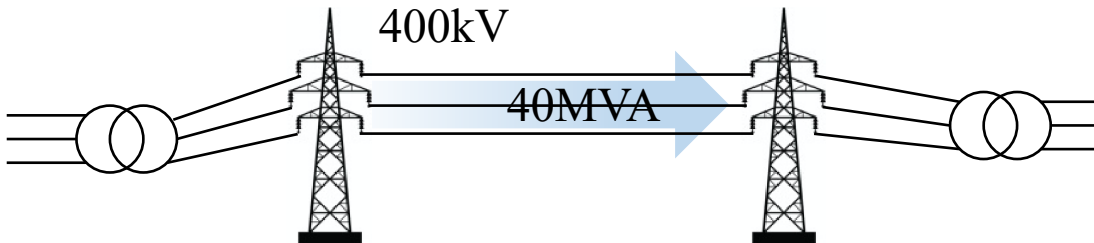
Transforme un système de tension/courant variable en un autre système de tension/courant de même fréquence.



Symboles



# Le transformateur



$$S = UI$$

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

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

$$\rightarrow \text{pertes} \sim I^2 \rightarrow 100\text{x moins}$$

sg Swissgrid - Niveaux de re X

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

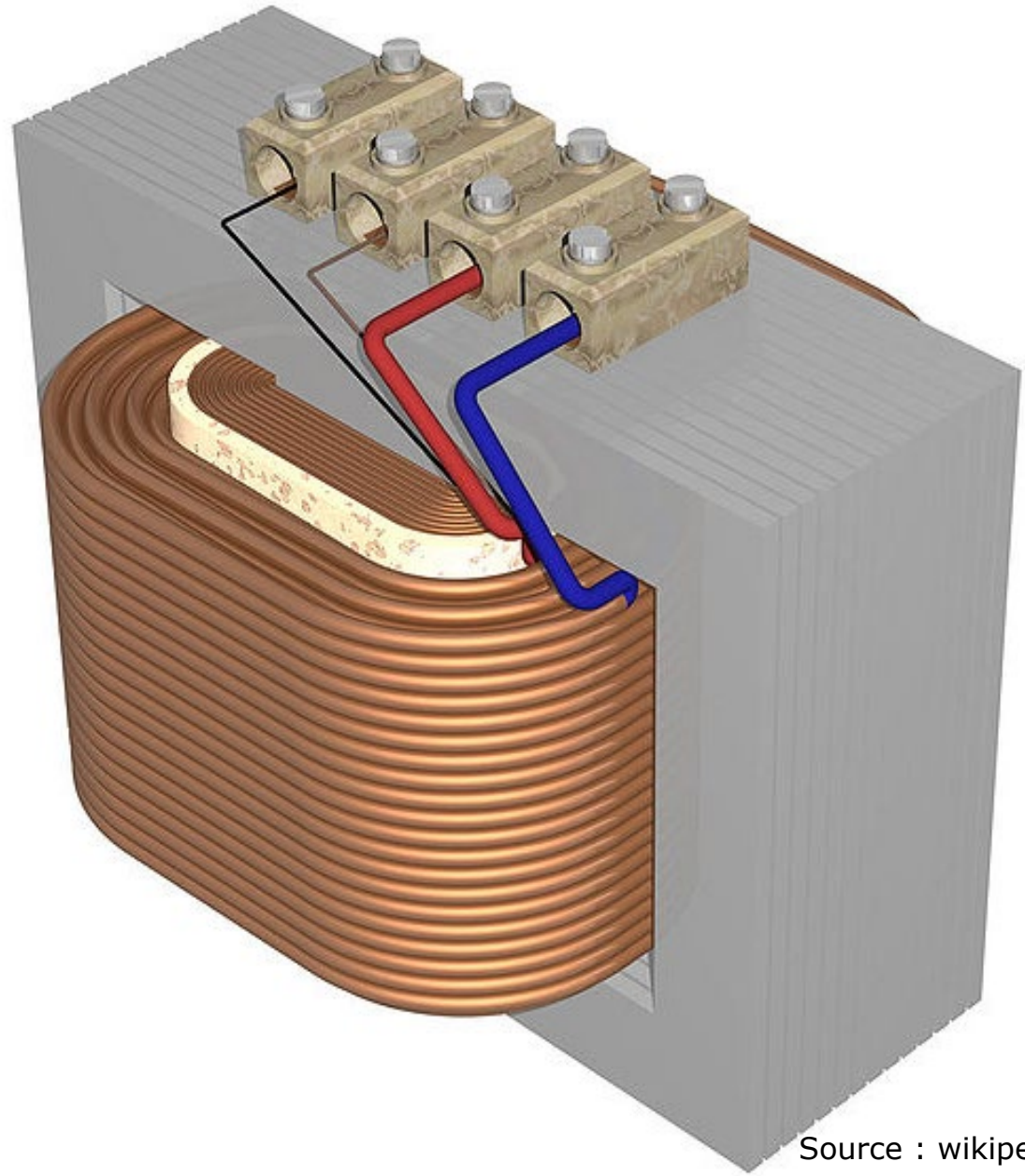
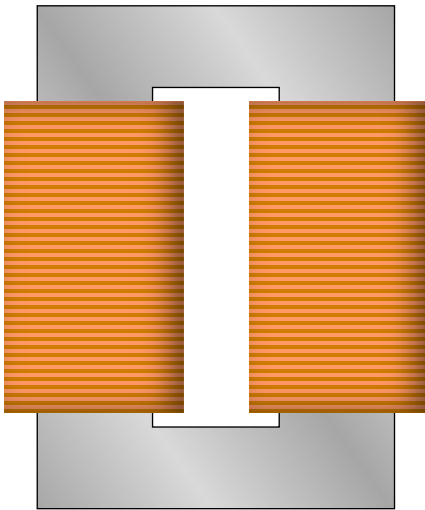
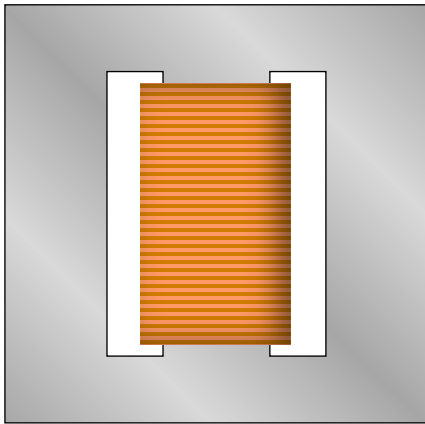
**Moyenne tension dans le réseau de distribution régional (niveau 5)**  
La moyenne tension (1 kV - 36 kV) est utilisée pour la distribution régionale de courant. Des réseaux locaux de distribution approvisionnent certains quartiers des villes ou des villages ainsi que des petites et moyennes exploitations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

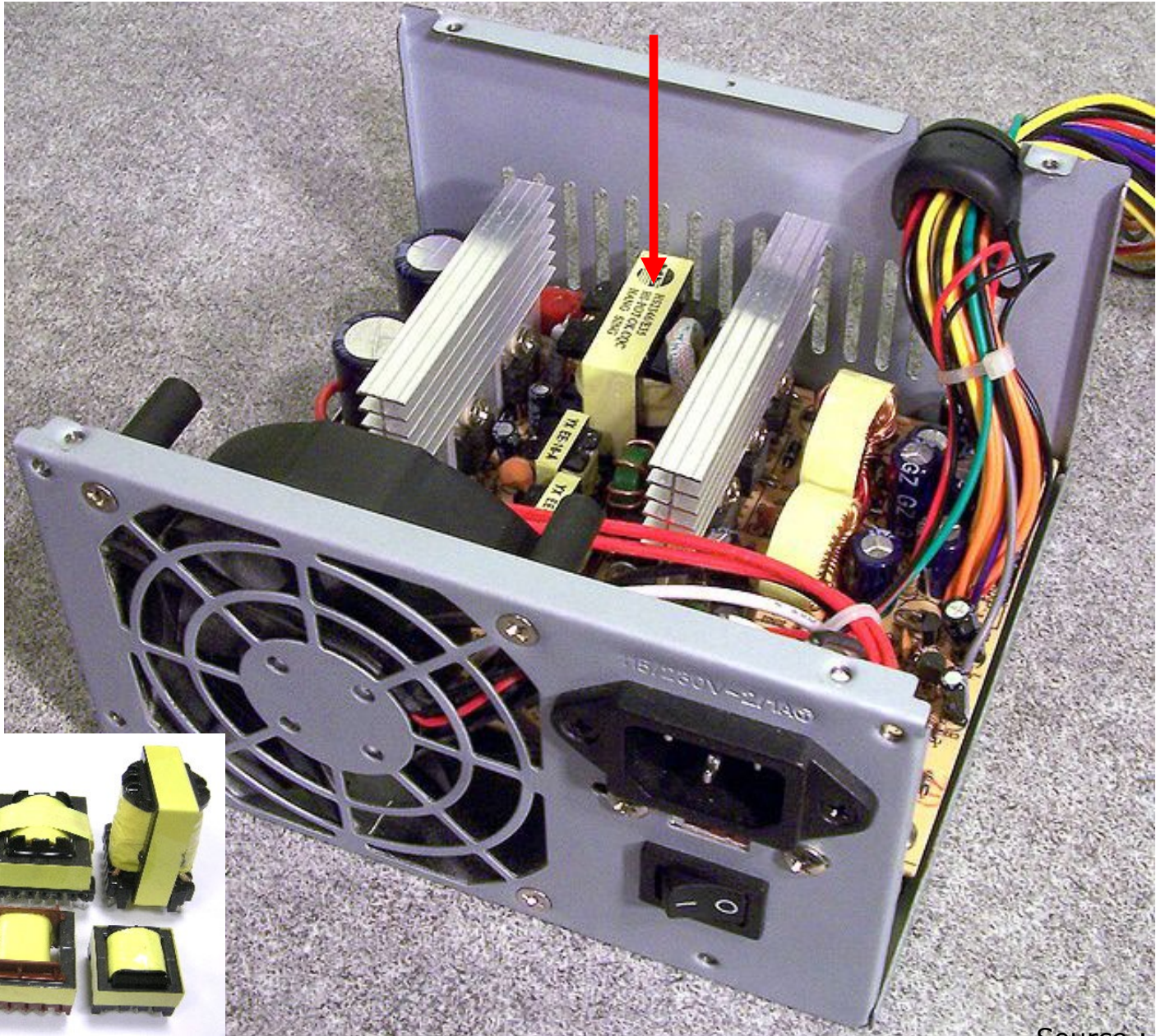
**Stations de transformation**  
Dans les stations de transformation, la moyenne tension est convertie en basse tension de 400 volts, utilisée par les ménages et les artisans.

# Transformateur monophasé





# Transformateur monophasé

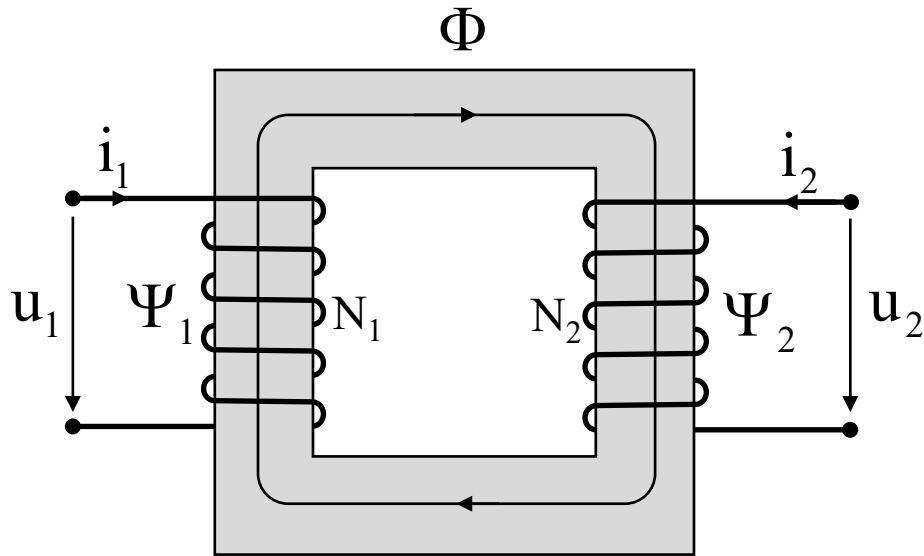


# Sommaire

- 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

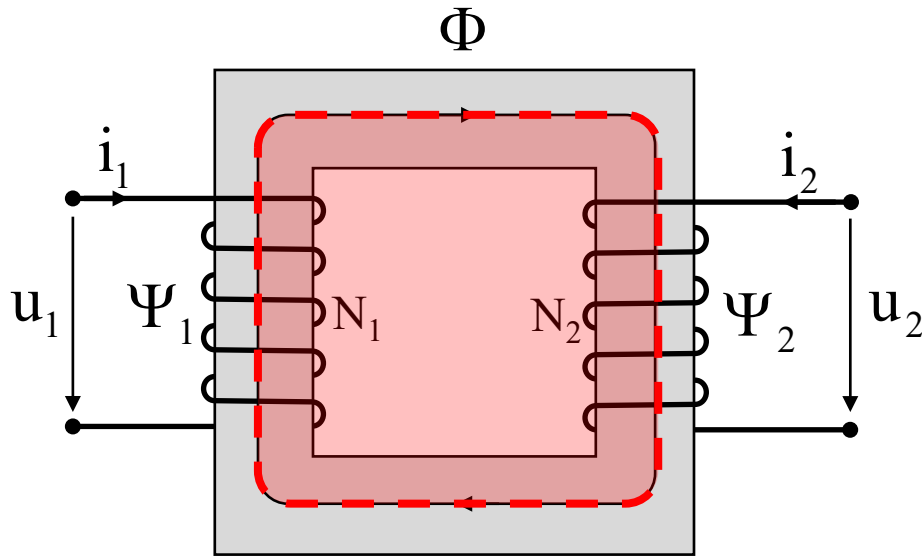


Hypothèses :

- 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

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

# 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

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = 0 = N_1 \mathbf{i}_1 + N_2 \mathbf{i}_2 \longrightarrow \frac{N_1}{N_2} = -\frac{I_2}{I_1}$$

rapport de transformation

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

230V / 9V

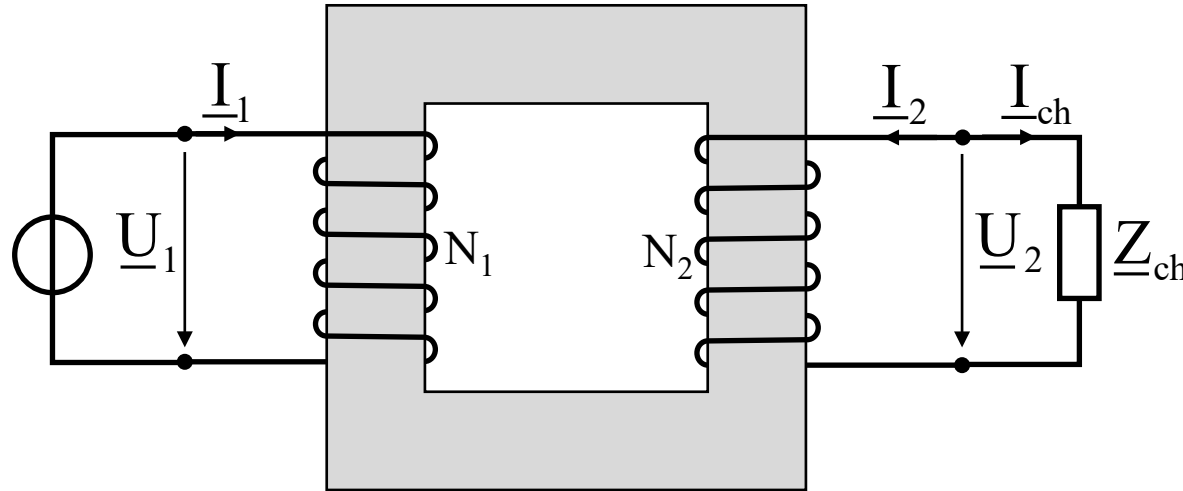
$\ddot{u} = 25.56$

12mA / 300mA

exemple



# Grandeurs rapportées



$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \frac{N_1}{N_2} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_1 = -\frac{N_2}{N_1} \underline{I}_2 \end{cases}$$

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

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

↑  
Impédance de la charge  
rapportée au primaire

Tension secondaire  
rapportée au primaire

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

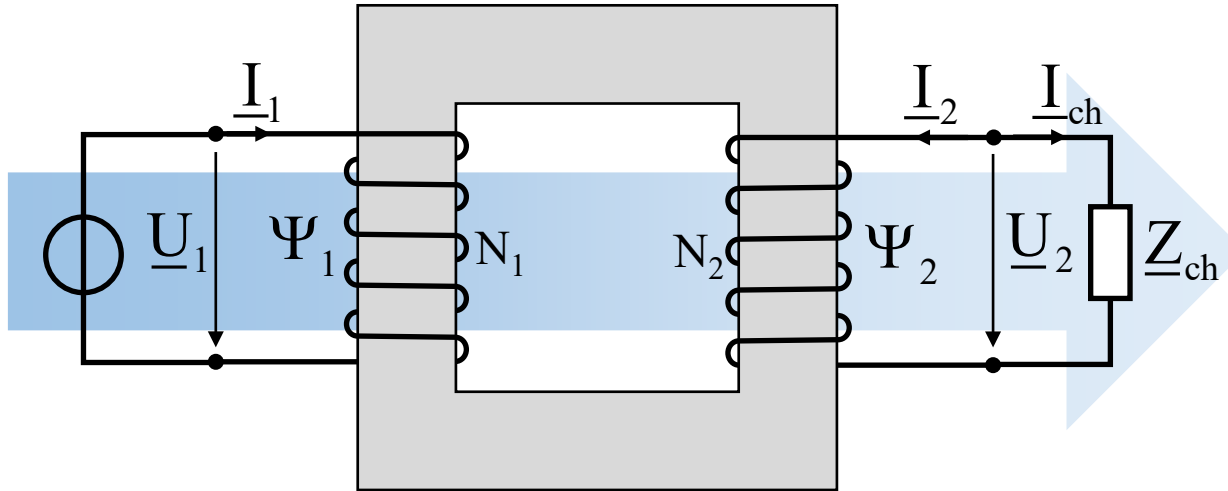
Courant secondaire  
rapporté au primaire

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

Impédance secondaire  
rapportée au primaire

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

# Transformateur monophasé idéal

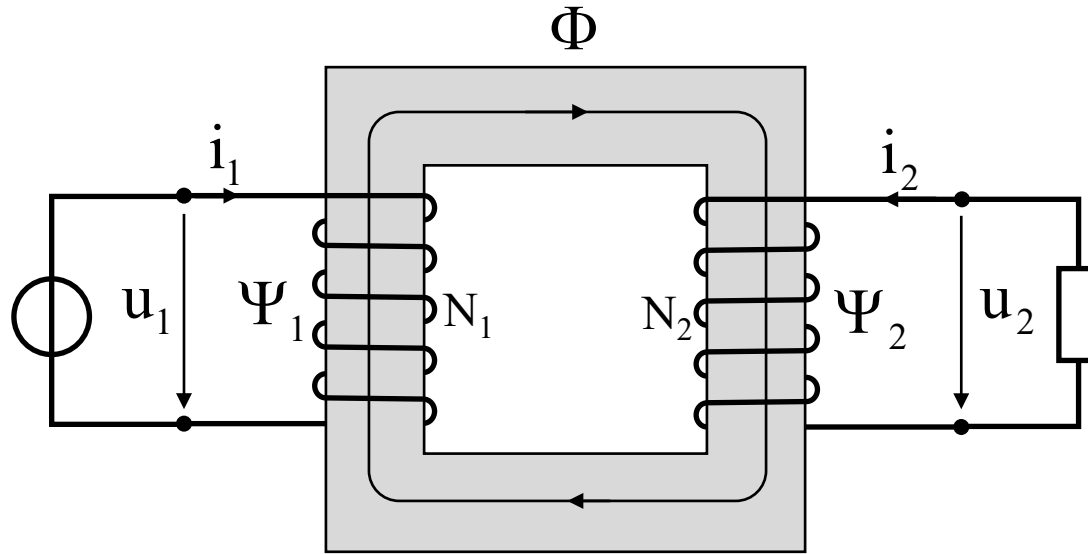


rapport de  
transformation

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

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

# Considération sur le circuit magnétique



Exemple: 9V~

50 Hz → 100 kHz  
100 mm<sup>2</sup> → 0.05 mm<sup>2</sup>

Hypothèses :

- $R_1 = R_2 = 0$
- $\mu_{\text{rfer}} = \infty$
- $P_{\text{fer}} = 0$

$$\Psi_1 = N_1 \Phi$$

$$\Psi_2 = N_2 \Phi \rightarrow u_2 = \frac{d\Psi_2}{dt}$$

$$\rightarrow u_2 = \frac{d}{dt}(N_2 \Phi) \rightarrow u_2 = N_2 S \frac{dB}{dt}$$

$$\text{Alimentation sinusoïdale} \rightarrow U = \frac{1}{\sqrt{2}} N S \omega B = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N S f B = 4.44 N S f B$$

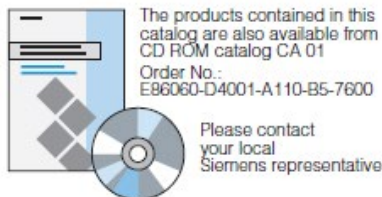


## SITOP

Power supplies  
SITOP power  
LOGO!Power

Catalog KT 10.1 · 2002

Supersedes: Catalog KT 10.1 · 1999



The products contained in this catalog are also available from CD ROM catalog CA 01  
Order No.: E86060-D4001-A110-B5-7600

Please contact your local Siemens representative

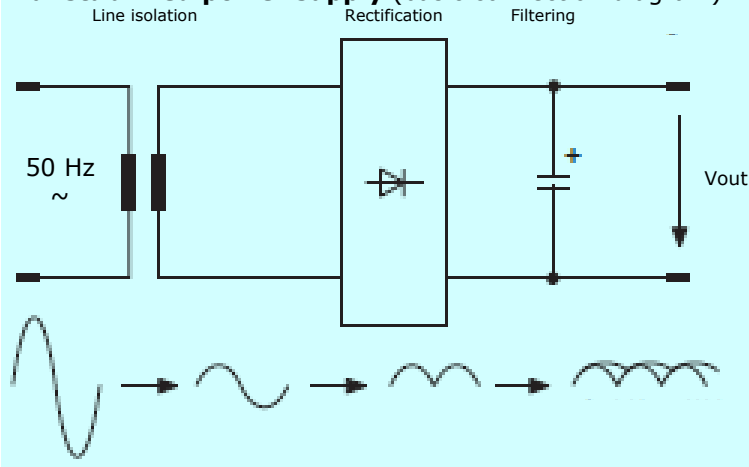
Further information and news on SITOP can also be found on the internet at:  
<http://www.siemens.com/sitop>

The products and systems described in this catalog are manufactured under application of a quality management system certified by DQS in accordance with DIN EN ISO 9001 (Certificate Registration No.: 1108). The DQS Certificate is recognized in all EQ Net countries (Reg. No.: 1108).

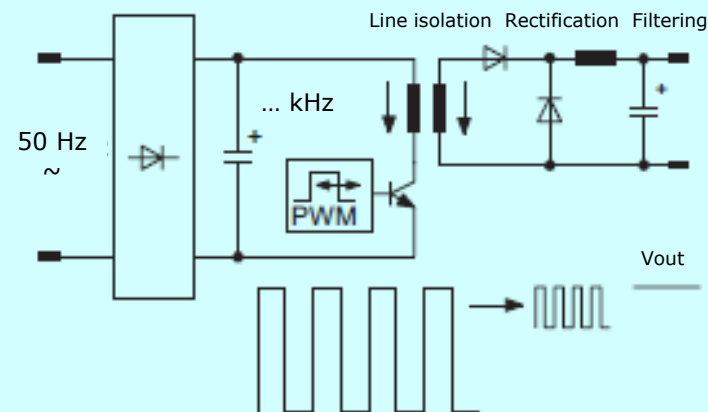


<b>Introduction</b>	Overview, Selection guide	1
<b>SITOP power</b> • Standard 24 V	Single-phase, output currents up to 2 A	2
	Single-phase, output currents 2.5 to 4 A	3
	Single-phase, output current 5 A	4
	Single-phase, output current 10 A	5
	Single-phase/two-phase, output current 20 A	6
	Three-phase, output currents 10 to 40 A	7
	Uninterruptible power supplies	8
	Accessories	9
<b>SITOP power</b> • Alternative voltages		10
<b>SITOP power</b> • Customized		11
<b>SITOP power</b> • AS interface power supplies		12
<b>LOGO!Power</b>		13
<b>Technical information and configuring notes</b>		14
<b>Dimension drawings</b>		15
<b>Appendix</b>	Service & Support Indexes Contact persons Conditions of sale/delivery	16

### unstabilized power supply (basic connection diagram)



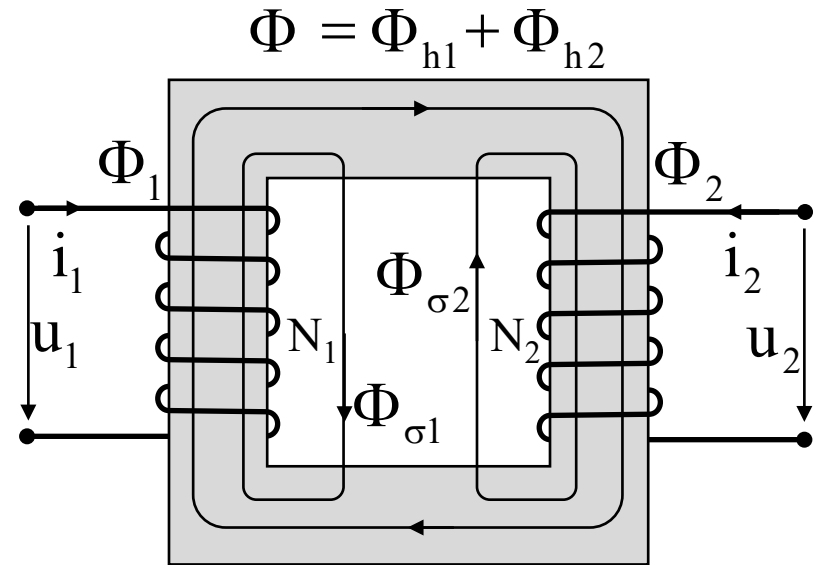
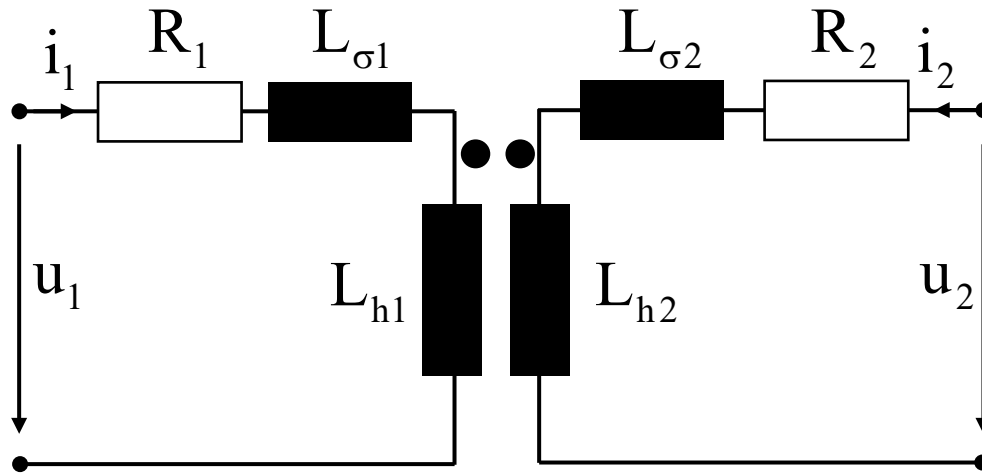
### stabilized power supply (basic connection diagram)



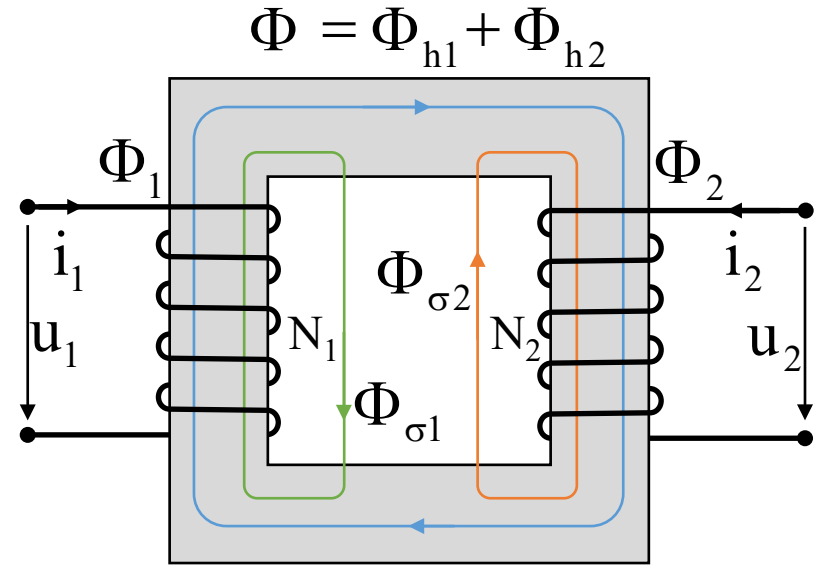
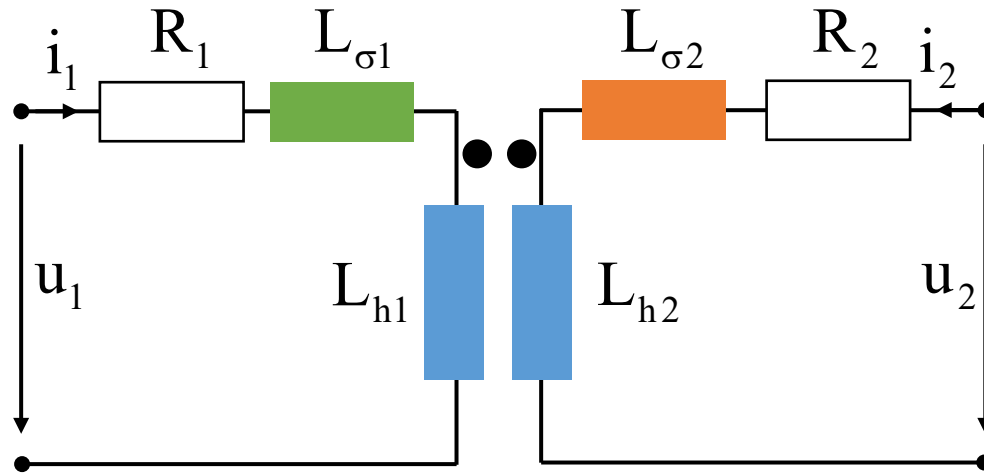
# Sommaire

- 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



# Transformateur monophasé réel



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

$$\begin{cases} \Psi_1 = L_{11} i_1 + L_{12} i_2 = (L_{h1} + L_{\sigma1}) i_1 + L_{12} i_2 \\ \Psi_2 = L_{22} i_2 + L_{21} i_1 = (L_{h2} + L_{\sigma2}) i_2 + L_{21} i_1 \end{cases}$$

$$L_{\sigma1} = N_1^2 \Lambda_{\sigma1}$$

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

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

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

$$L_{\sigma2} = N_2^2 \Lambda_{\sigma2}$$

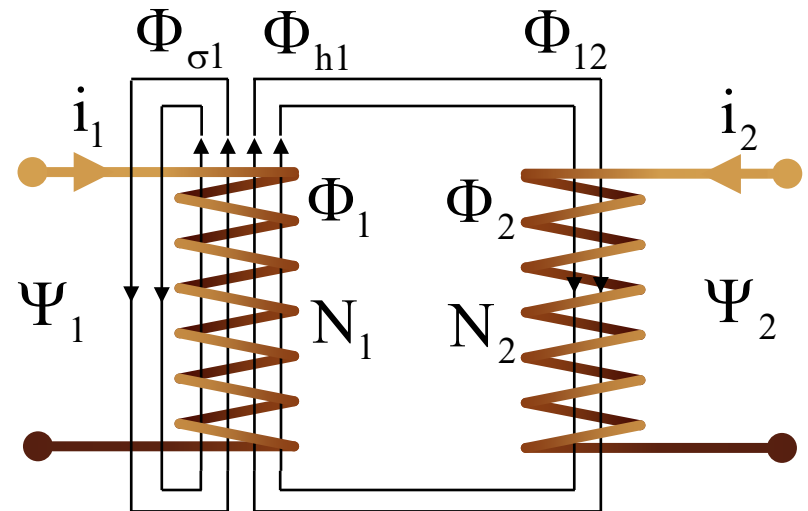
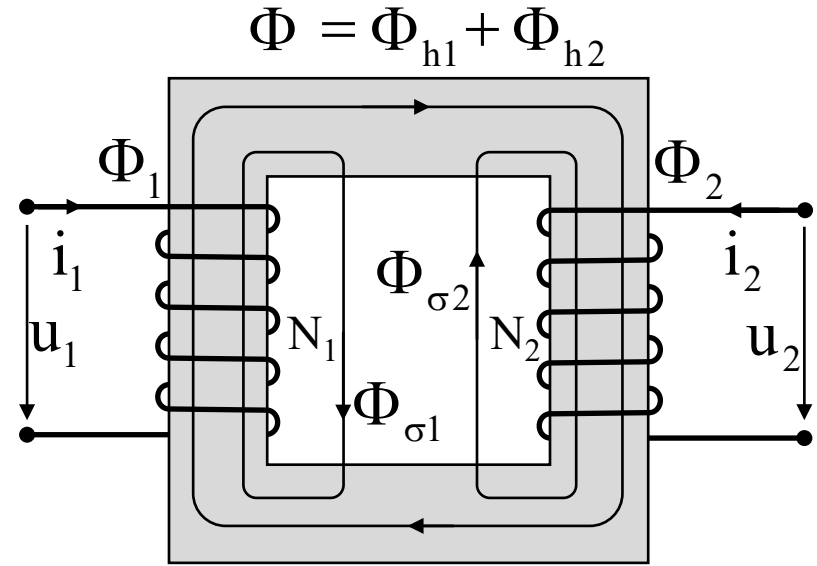
# Tension induite généralisée

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

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

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

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





# Equations de tensions

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

grandeurs  
rapportées  
au primaire

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

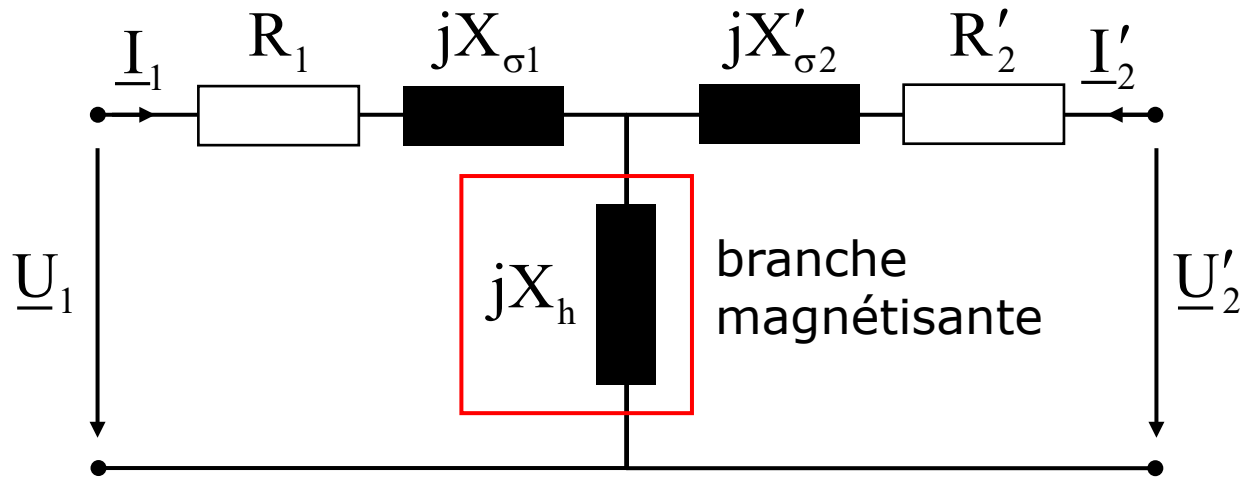
alimentation  
sinusoïdale

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

$X = \omega L$

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

# Schéma équivalent

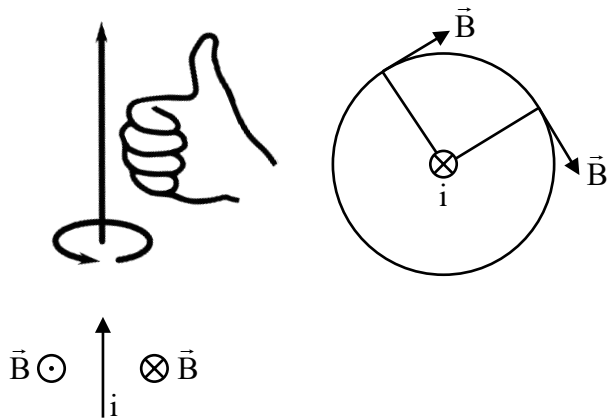


$$\begin{cases} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_h \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \underline{I}_1 + jX_h \underline{I}'_2 \\ \underline{U}'_2 = R'_2 \underline{I}'_2 + jX_h \underline{I}'_2 + jX'_{\sigma 2} \underline{I}'_2 + jX_h \underline{I}_1 \end{cases}$$

# 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
  - 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

# Champ d'induction magnétique

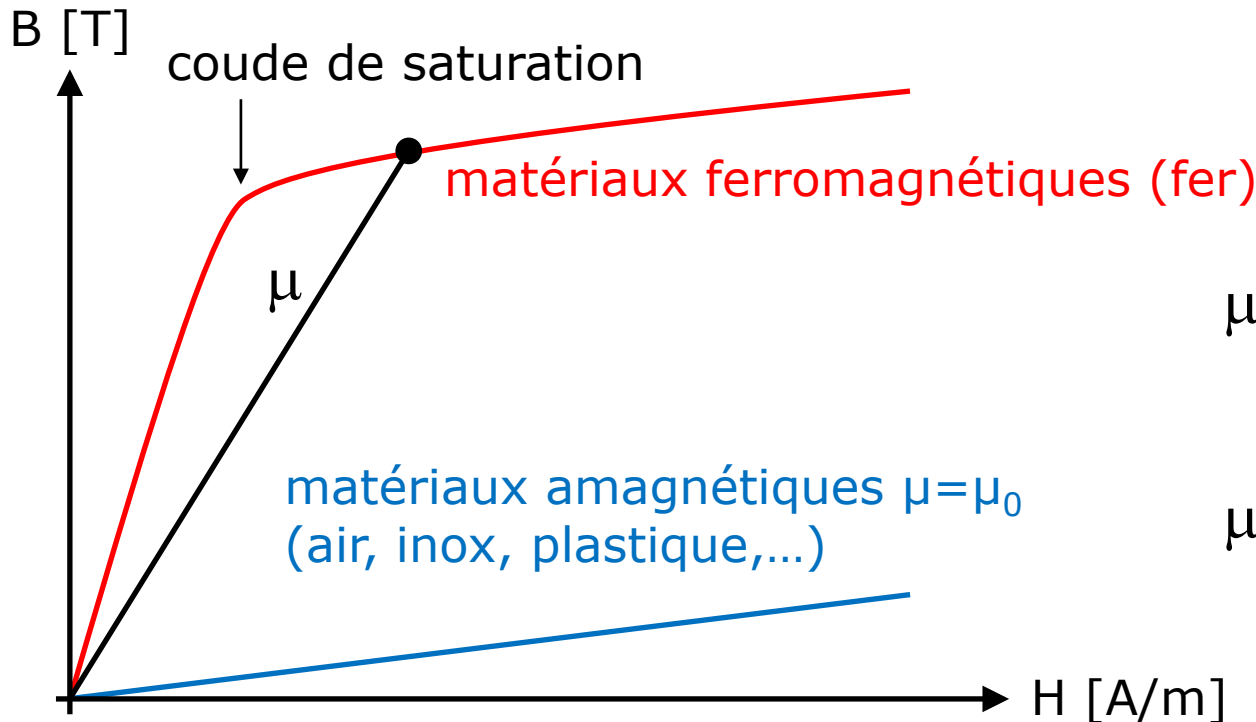


Champ d'induction magnétique

Perméabilité du matériau

Champ magnétique  
(indépendant du milieu)

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



Perméabilité du vide

Perméabilité relative

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

$$\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$$

# Propriétés des matériaux ferromagnétiques

Caractéristique B-H

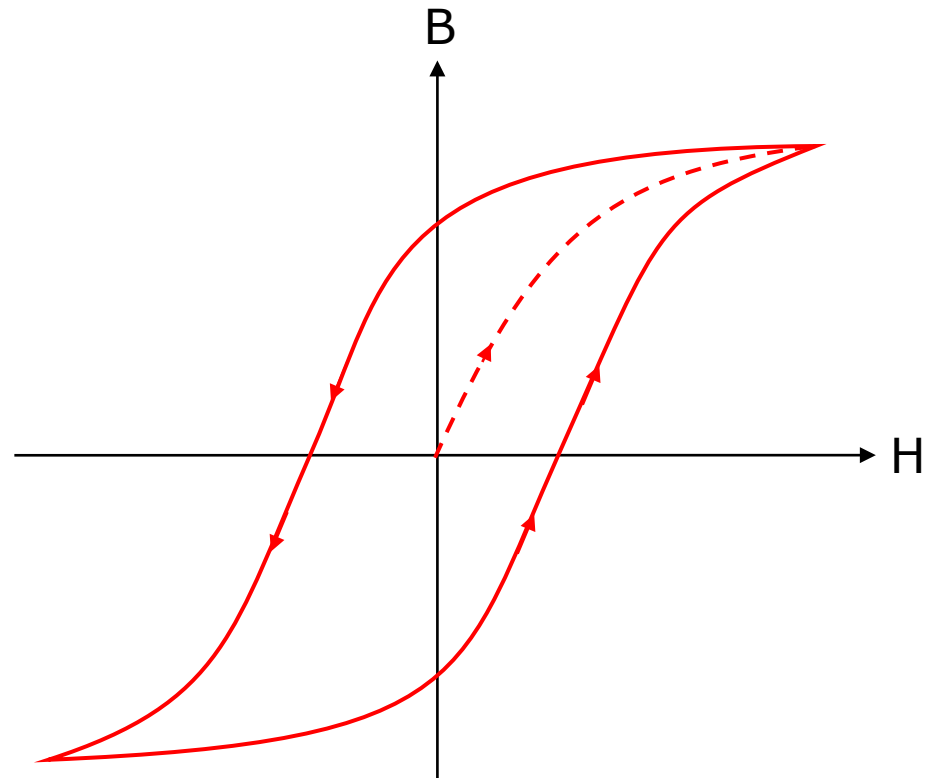
$$\Phi = \Theta \frac{\mu_0 \mu_r S}{l}$$

$\rightarrow \Theta = \oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = Ni$

$\rightarrow \Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$

2 non-linéarités :

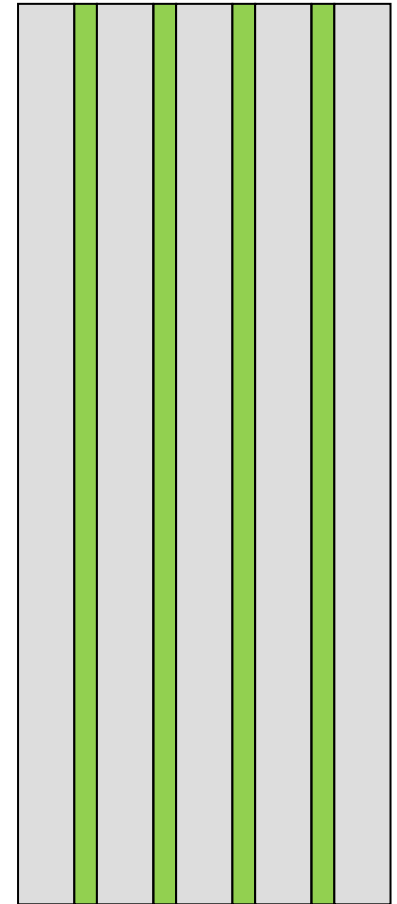
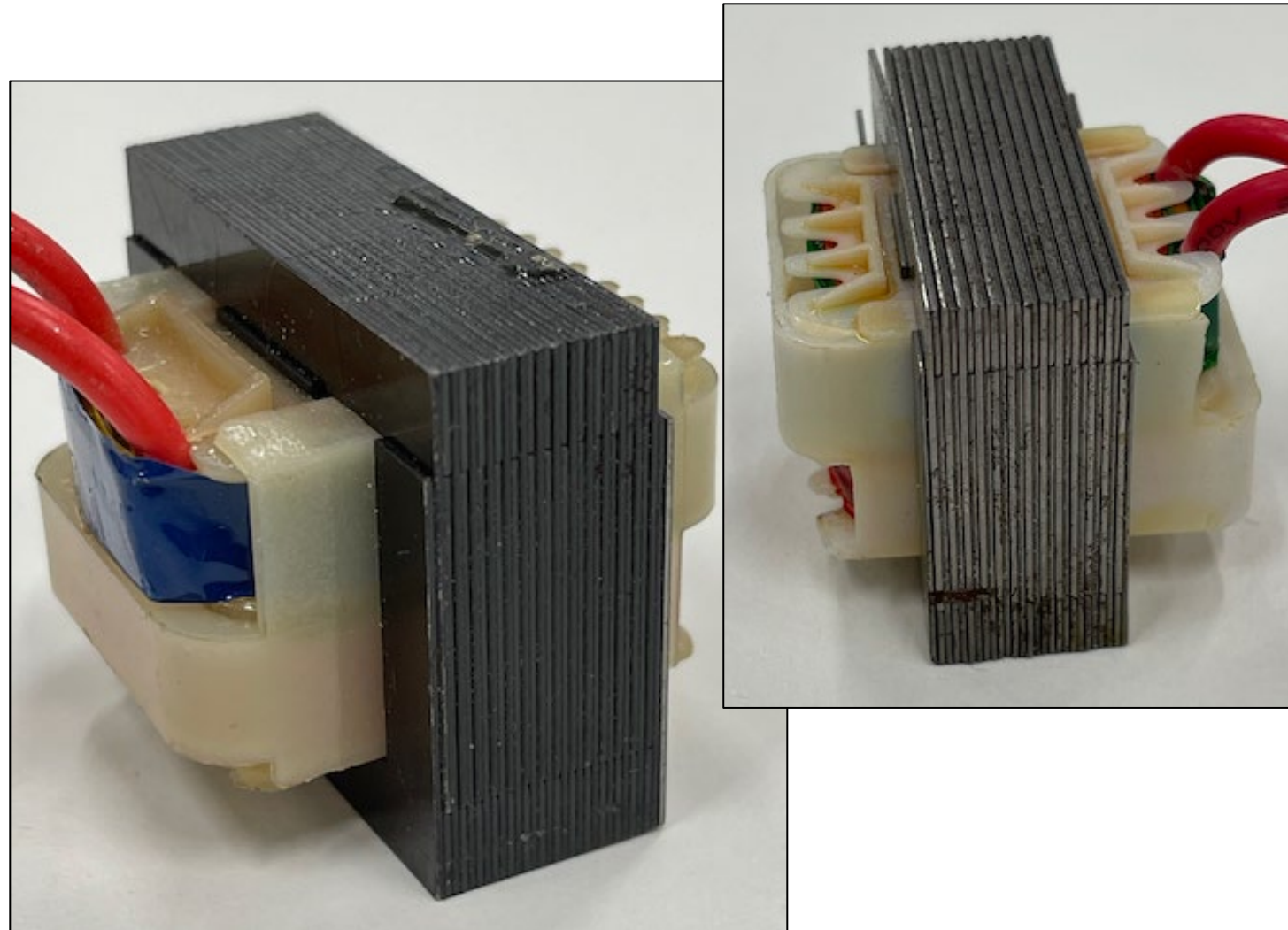
- Hystérésis
- Saturation





# Introduction des pertes fer

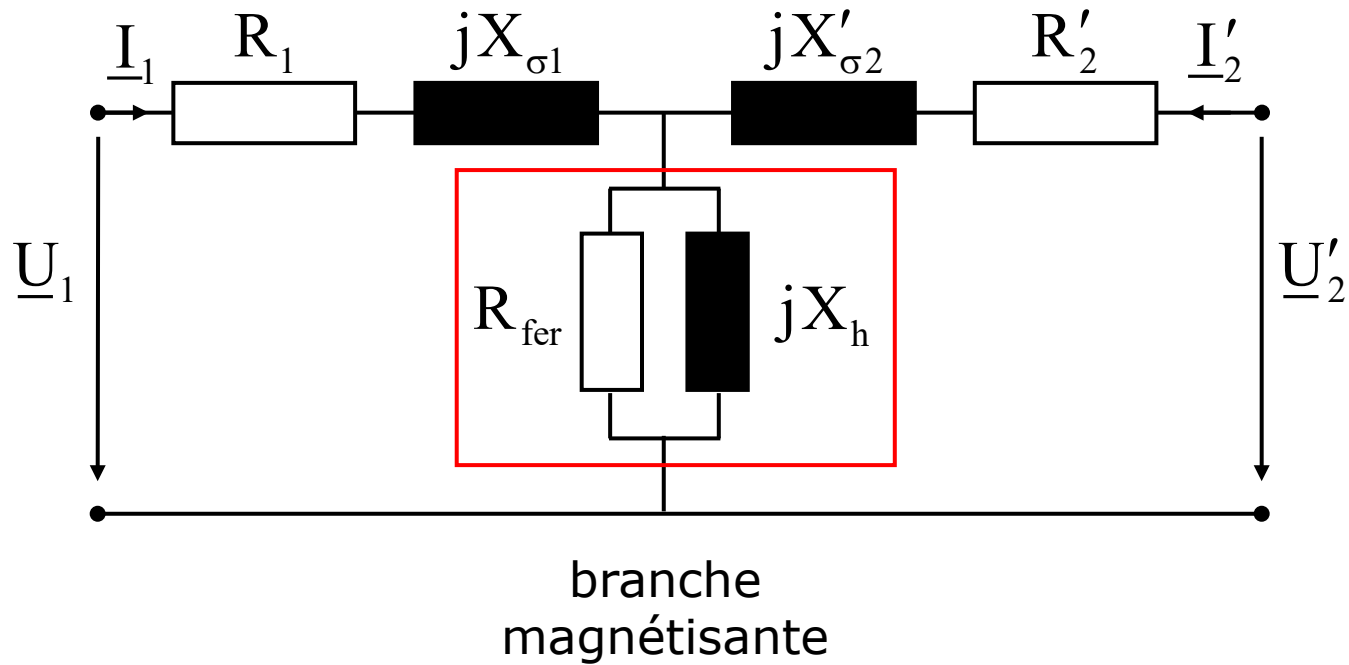
$$P_{\text{fer}} = P_{\text{hystérésis}} + P_{\text{courants de Foucault}}$$



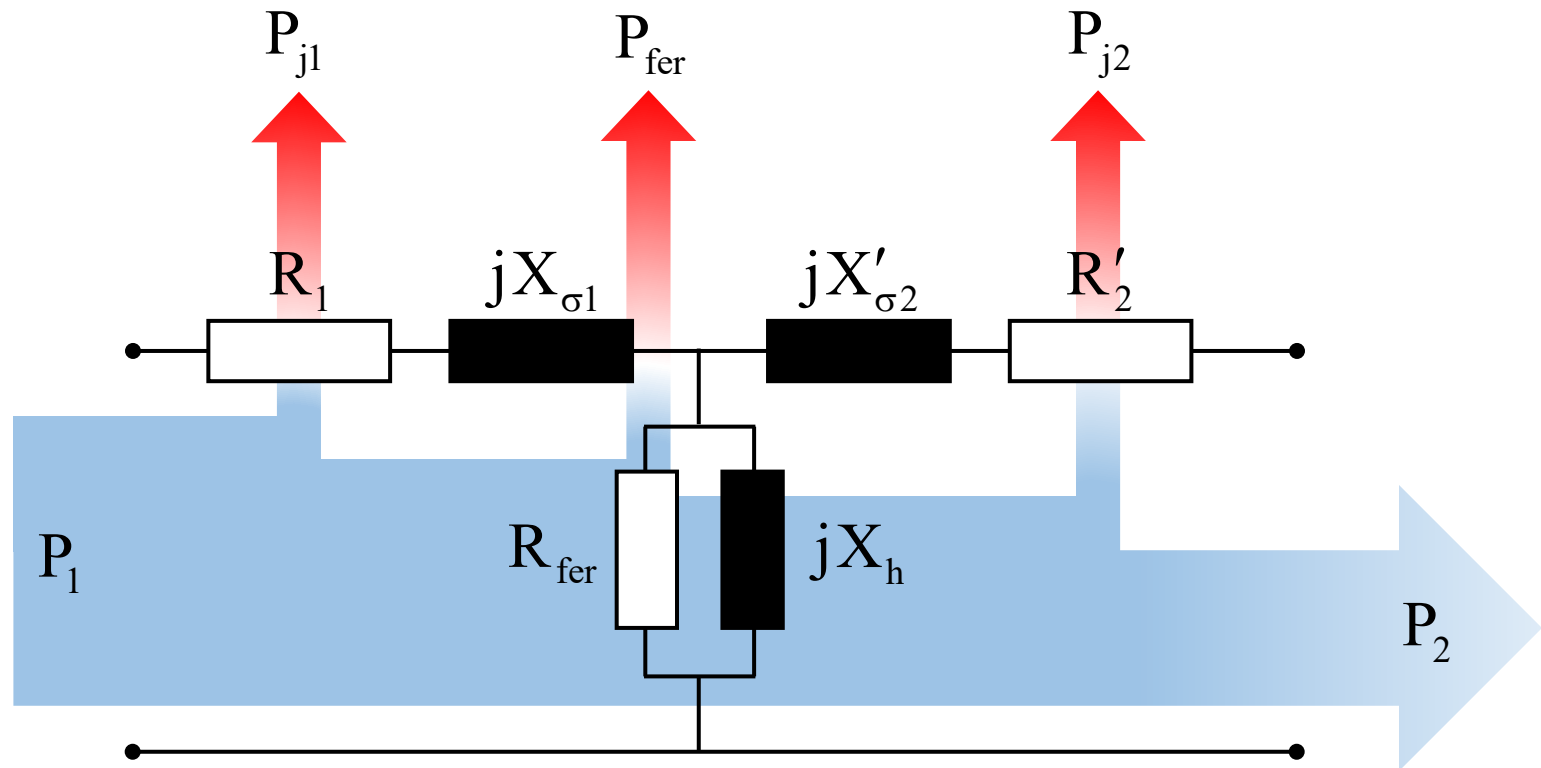
↑  
Tôle

↑  
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
  - **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

# Grandeurs relatives – Per Unit – [pu]

- Tension
  - Courant
  - Puissance
  - Couple
  - Impédance
  - ...
- S'affranchir des **vraies grandeurs** physiques en établissant des **grandeurs relatives** à des valeurs de références.
- Les valeurs de références sont habituellement les grandeurs nominales.

Grandeurs nominales = ce pour quoi c'est dimensionné pour un fonctionnement « à vie ». Ne pas confondre avec les grandeurs max !  
Données dans le datasheet ou déduisibles de la plaque signalétique.

Exemple pour la tension et le courant au primaire d'un transformateur

- tension de référence  $U_{1n}$  (valeur efficace)
- courant de référence  $I_{1n}$  (valeur efficace)

$$u_1 = \frac{U_1}{U_{1n}} \quad i_1 = \frac{I_1}{I_{1n}}$$

per unit

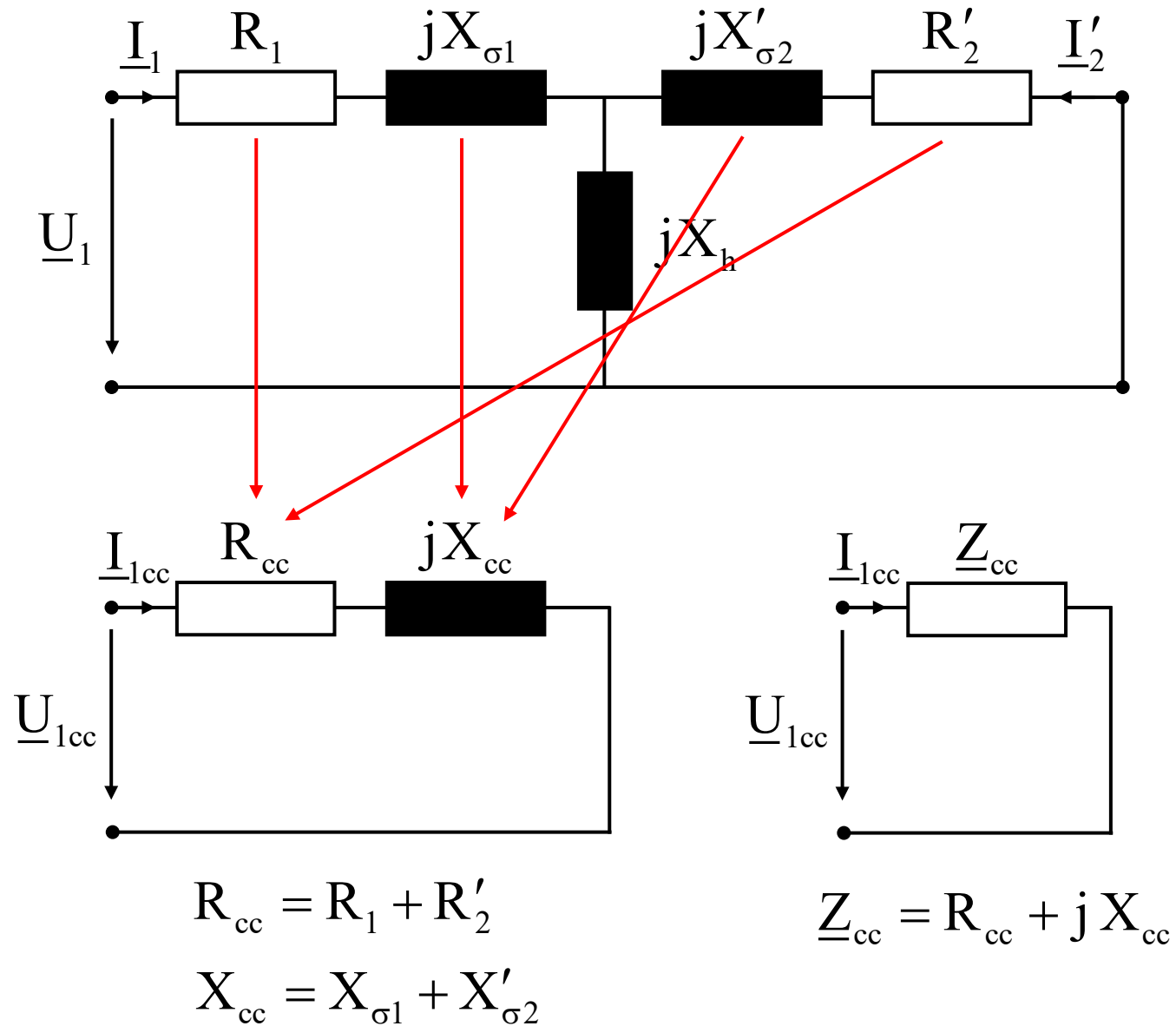
$$x[\text{pu}] = \frac{X}{X_n}$$

Les « per unit » [pu] sont notés en minuscule et la valeur est comprise entre 0 et 1 pour un fonctionnement normal.

# 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

# Fonctionnement en court-circuit



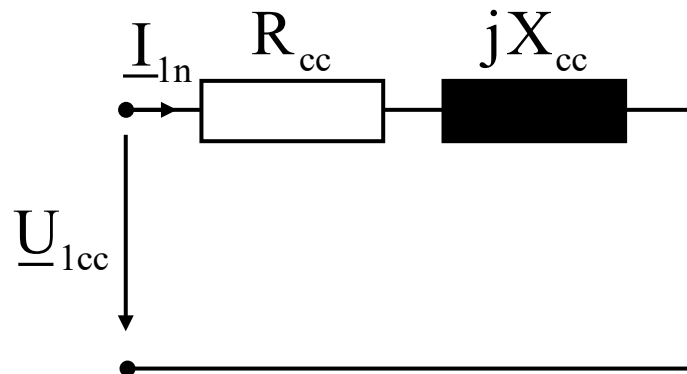
# Fonctionnement en court-circuit

## Tension de court-circuit

Tension de court-circuit  $\underline{U}_{1cc}$  est la tension (réduite) qu'il faut appliquer au primaire, avec le secondaire court-circuité, de telle façon que le courant nominal circule au primaire.

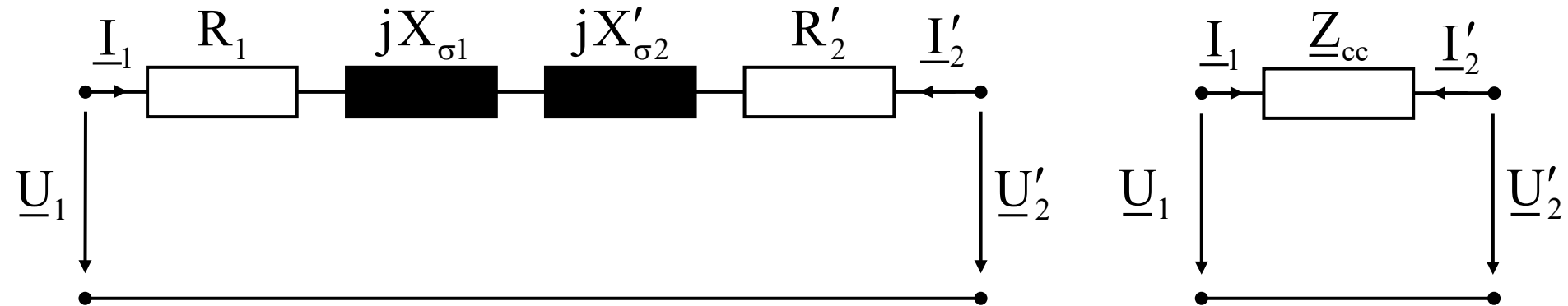
Exprimée en [%] ou en [pu]. C'est une valeur contractuelle importante.

$$u_{cc} = \frac{U_{1cc}}{U_{1n}} \cdot 100 \text{ [%]}$$





# Hypothèse de Kapp



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

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

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

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

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

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

$$u_{cc} = \frac{U_{1cc}}{U_{1n}} \text{ [pu]}$$

$$Z_{cc} = \frac{U_{1cc}}{I_{1cc}} = \frac{U_{1cc}}{I_{1n}}$$

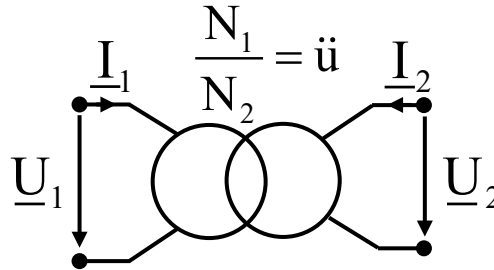
$$\boxed{Z_{cc} = u_{cc}} = \frac{\frac{U_{1cc}}{I_{1n}}}{\frac{I_{1n}}{I_{1n}}} \Bigg\} = 1$$

# Sommaire

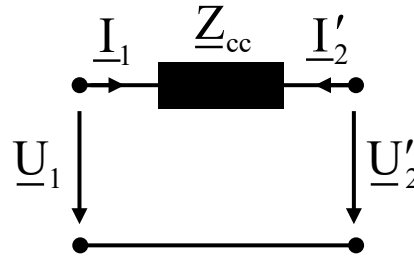
- Introduction
- Transformateur monophasé idéal
  - Rapport de transformation
  - Grandeurs rapportées
- Transformateur monophasé réel
  - Equations de tensions
  - Schéma équivalent et bilan de puissance
    - Introduction des pertes fer
  - Grandeurs relatives (per unit)
  - Fonctionnement en court-circuit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

# Résumé schémas équivalents

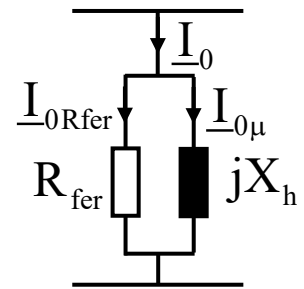
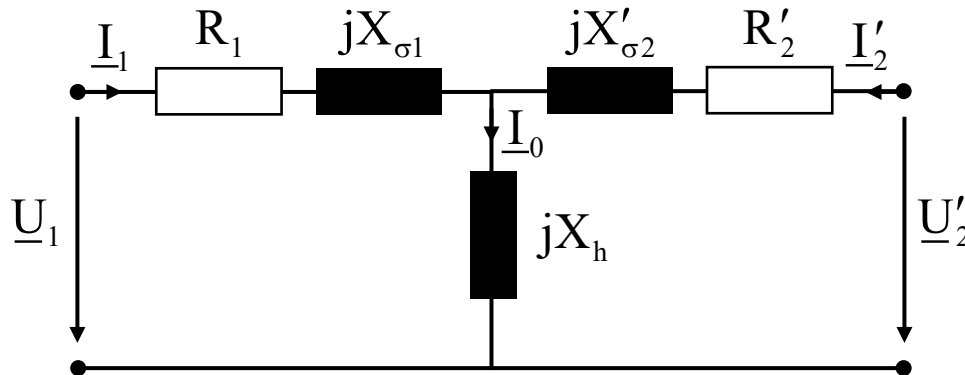
- Idéal



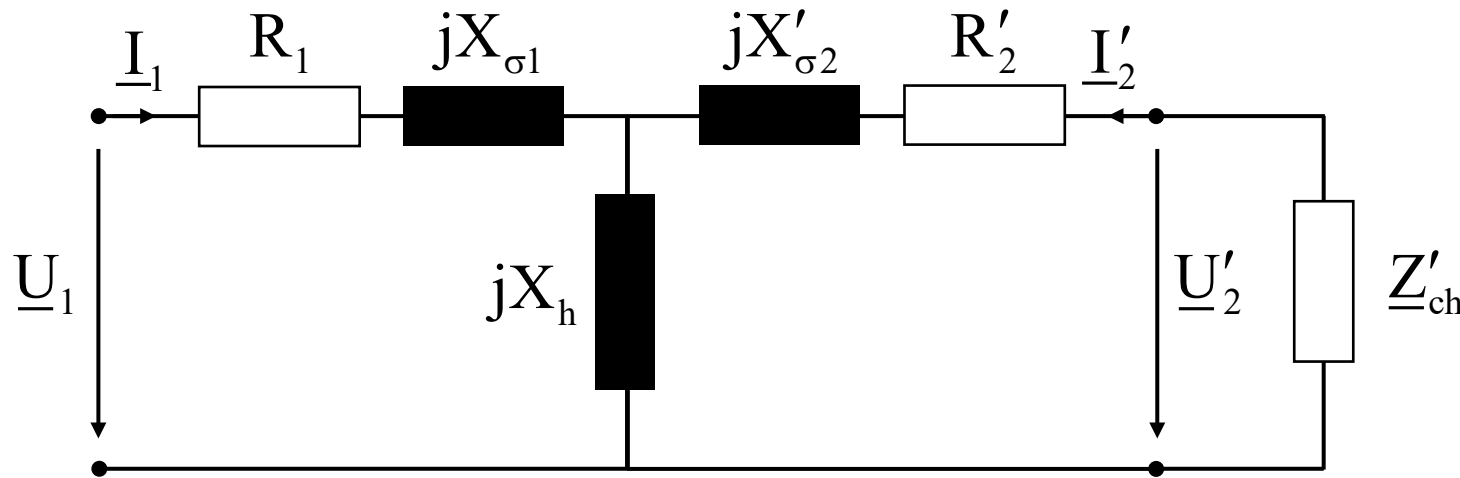
- Kapp



- Complet



# Exercice



$$R_1 = 0.1 \, [\Omega]$$

$$R_2 = 0.15 \, [\Omega]$$

$$X_h = 400 \, [\Omega]$$

$$X_{\sigma 1} = 0.08 \, [\Omega]$$

$$X_{\sigma 2} = 0.12 \, [\Omega]$$

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

$$\underline{Z}'_{ch} = 20 + j3 \, [\Omega]$$

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_{\sigma 1}$$

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

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

$$X'_{\sigma 2} = \ddot{u}^2 X_{\sigma 2}$$

$$\underline{Z}'_2 = R'_2 + jX'_{\sigma 2} + \underline{Z}'_{ch}$$

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

$$\underline{Z}_{eq} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_h // \underline{Z}'_2 = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_h \underline{Z}'_2}{\underline{Z}_h + \underline{Z}'_2} = R_1 + jX_{\sigma 1} + \frac{jX_h (R'_2 + jX'_{\sigma 2} + \underline{Z}'_{ch})}{jX_h + R'_2 + jX'_{\sigma 2} + \underline{Z}'_{ch}}$$

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

## Conseils avec Matlab:

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

Current Folder: C:\Users\hodder\Documents\\_NAS\Cours\Machines Electriques\Matlab\ExoTransfo\_v2.m

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+00 + 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;
14
15 R2p = (u^2)*R2;
16 Xs2p = (u^2)*Xs2;
17 Zchp = (u^2)*Zch;
18
19 Z1 = R1+1i*Xs1;
20 Zh = 1i*Xh;
21 Z2p = R2p + 1i*Xs2p + Zchp;
22
23 Zeq = Z1+(Zh*Z2p)/(Zh+Z2p);
24 ZeqABS = abs(Zeq);
25
26 I1 = U1/abs(Zeq);

```

Command Window

```

Zeq =
    10.7462 + 2.0212i

ZeqABS =
    10.9346

I1 =
    10.0598

fx >>

```

Données

Grandeurs rapportées

Calcul des impédances

Calcul de l'impédance équivalente

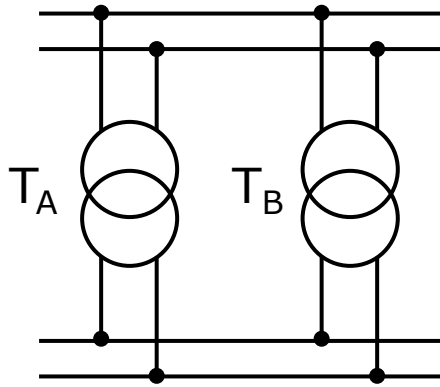
Calcul du courant (en norme)

UTF-8 script Ln 13 Col 10

# 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

# Fonctionnement en parallèle

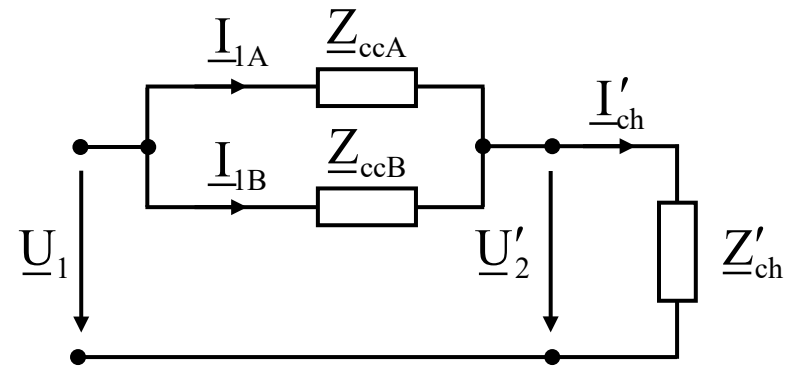
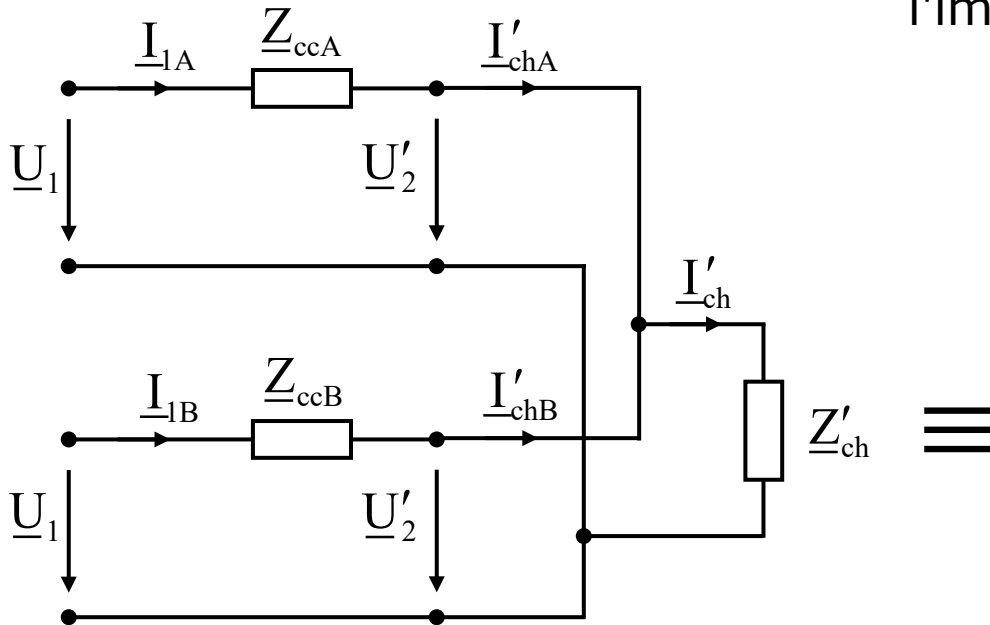


Conditions :

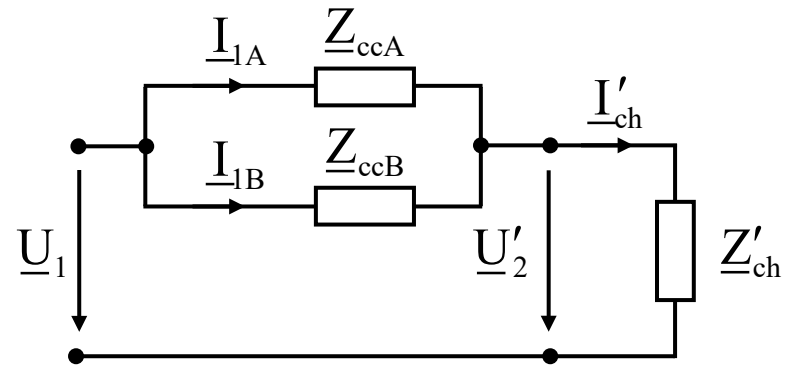
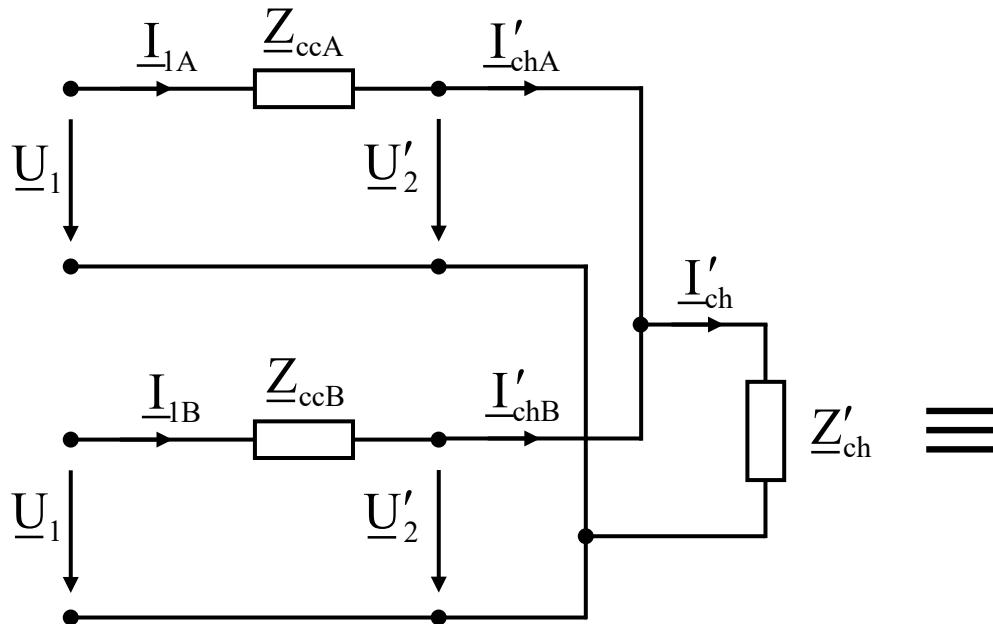
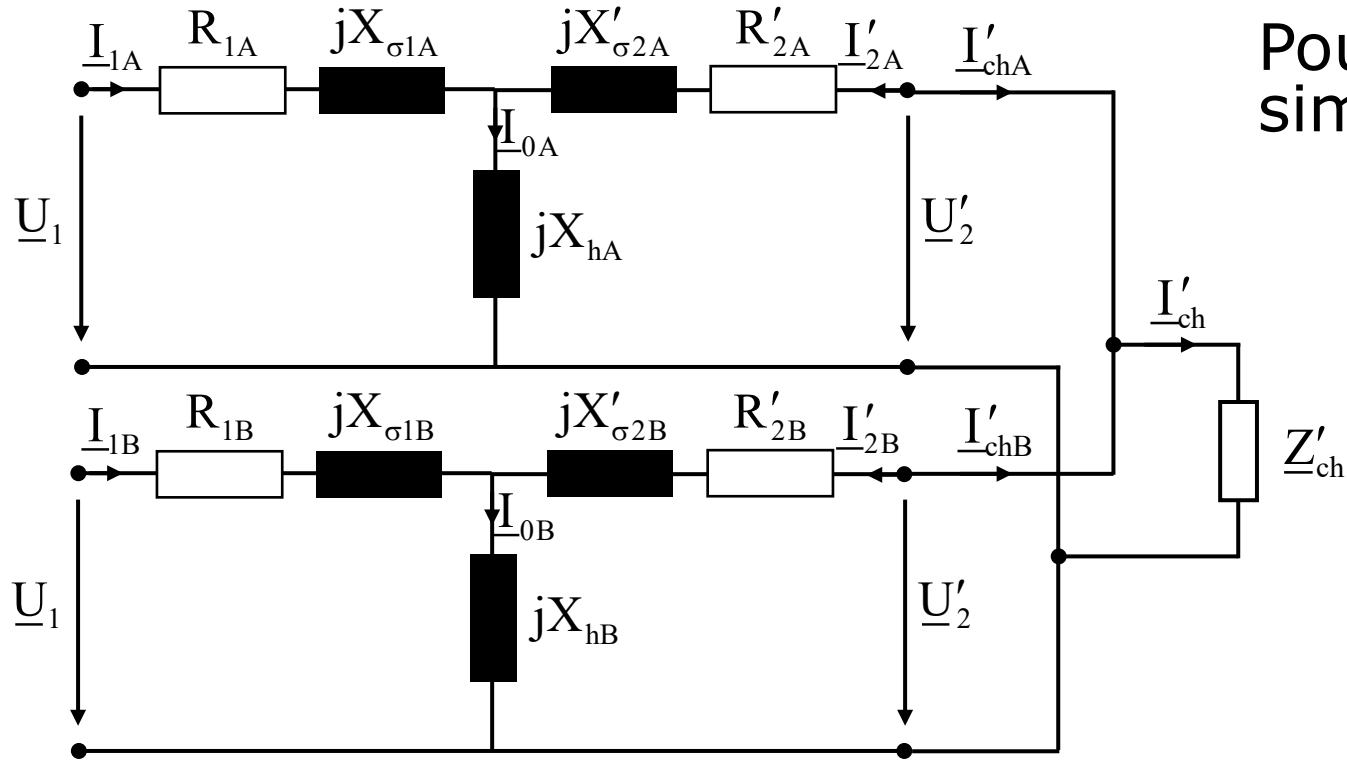
- mêmes tensions de lignes primaire et secondaire
- mêmes groupes horaires
- même tension de court-circuit  $u_{cc}$

Idéal si :

- même angle de phase de l'impédance de court-circuit  $\underline{Z}_{cc}$



Pourquoi le schéma simplifié de Kapp ?

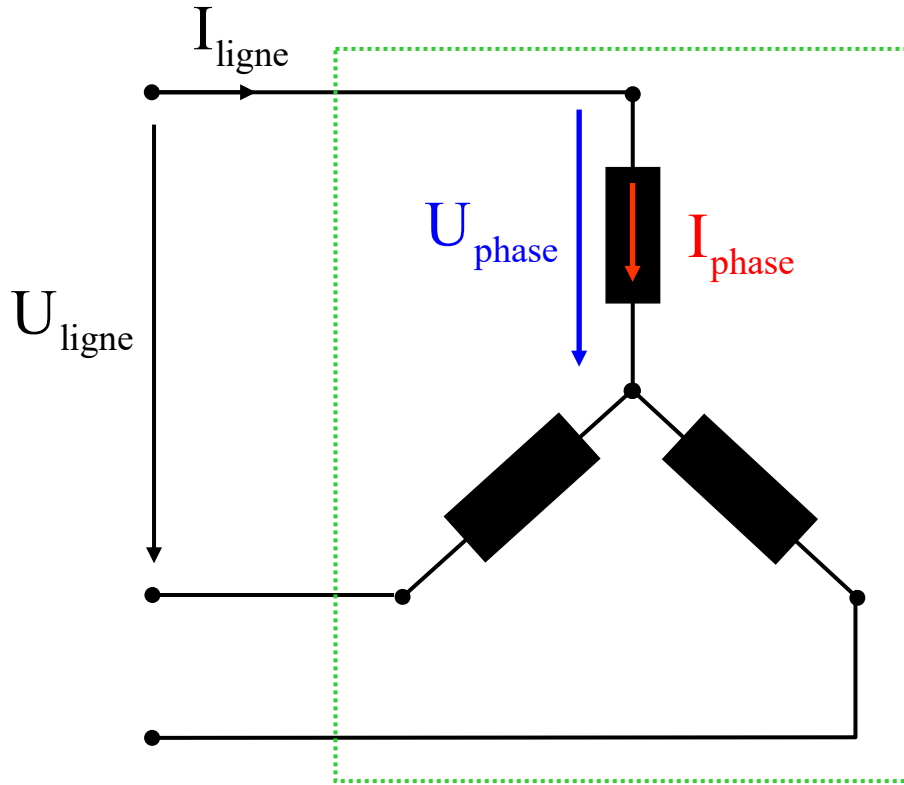




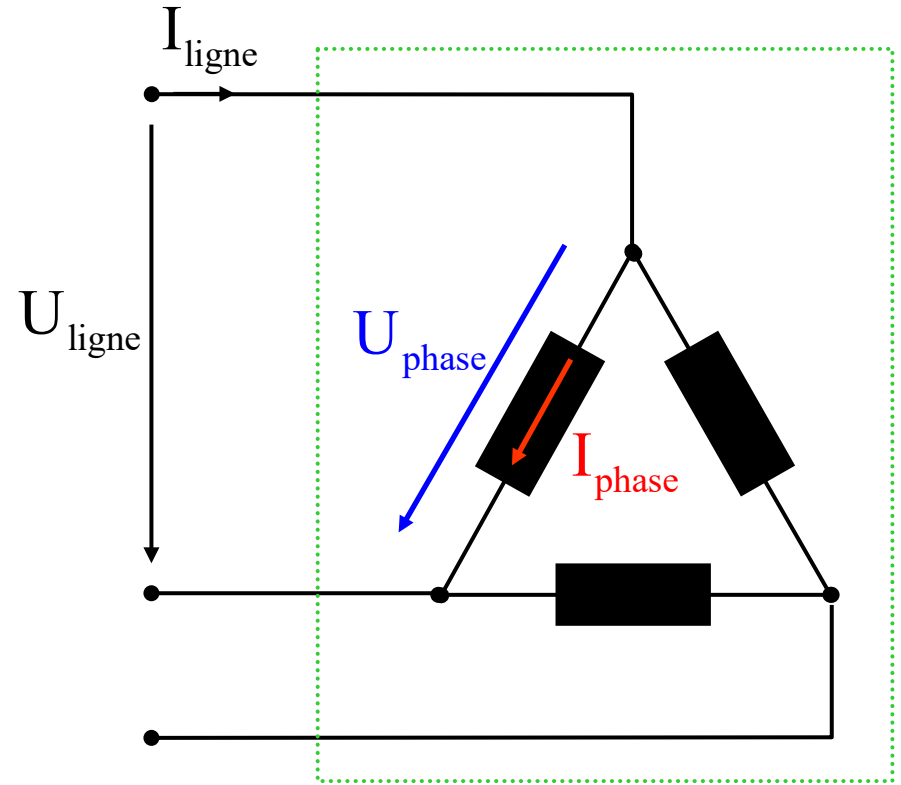
# Sommaire

- 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

# Rappel sur les couplages étoile-triangle



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



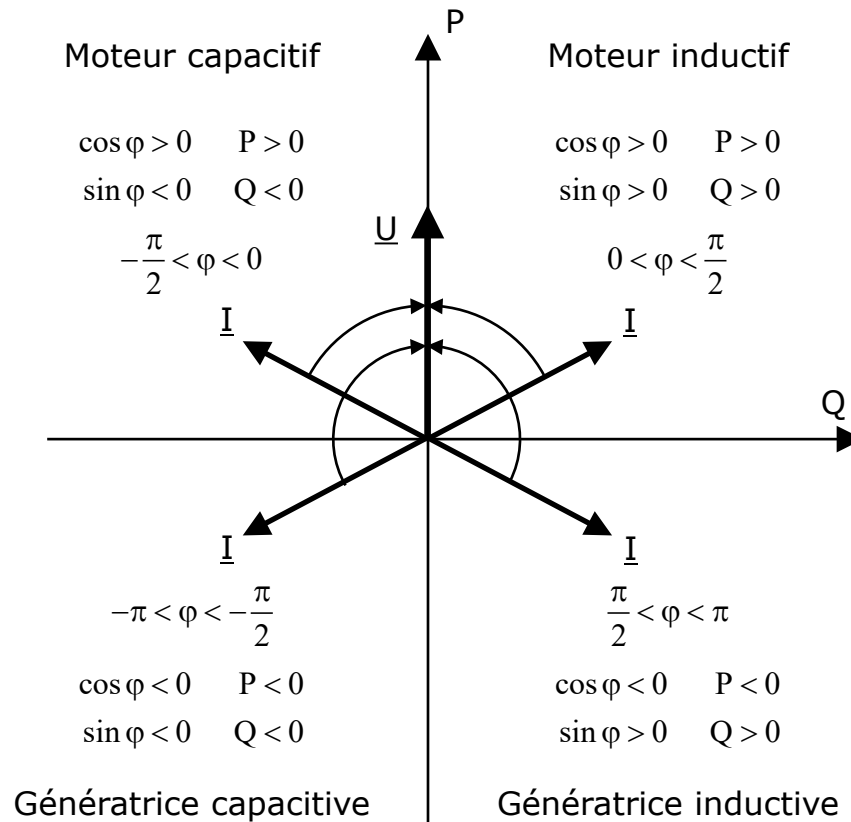
$$\begin{cases} U_{\text{phase}} = U_{\text{ligne}} \\ I_{\text{phase}} = I_{\text{ligne}} / \sqrt{3} \end{cases}$$

# Puissances triphasées

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

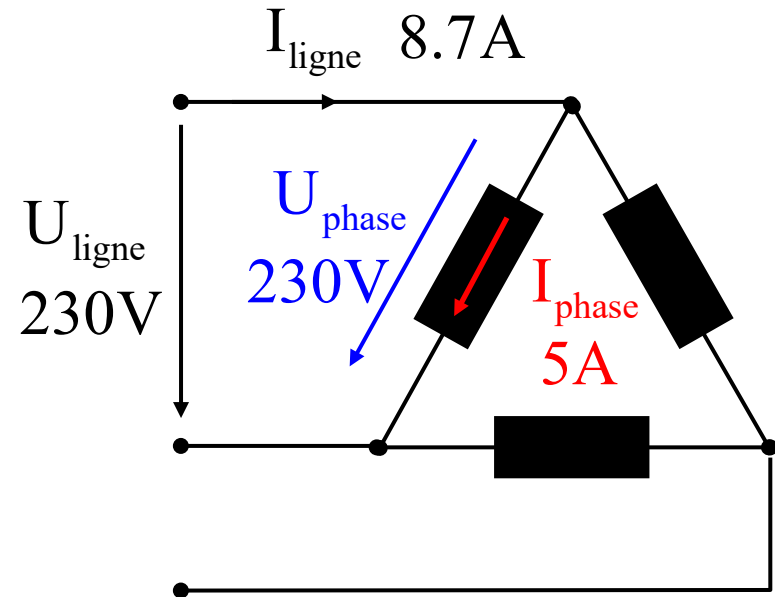
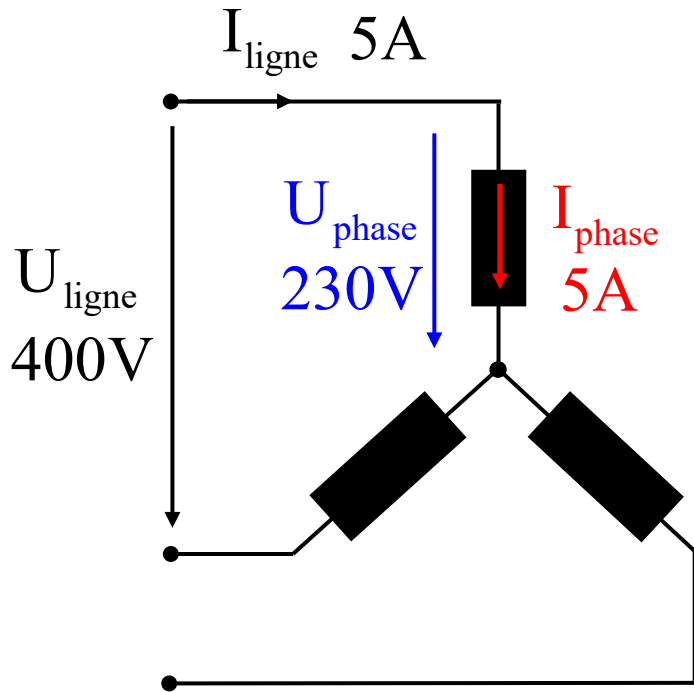
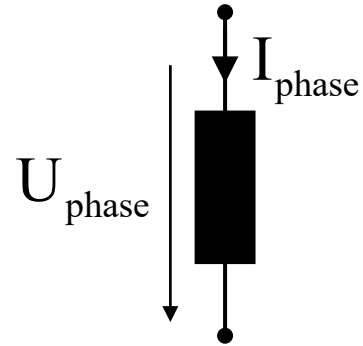
Puissance active  $P = 3 U_{ph} I_{ph} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{ligne} I_{ligne} \cos \varphi$  [W]

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



# Plaque signalétique triphasée

Y 400V / 5A  
 $\Delta$  230V / 8.7A



# Exercice

La plaque signalétique d'un dispositif triphasé donne :

Y 400V / 5A

$\Delta$  230V / 8.7A

On mesure avec un ampèremètre un courant de ligne 5.5A. Que vaut le courant de phase en p.u en étoile et en triangle ?

On mesure avec un Ohmmètre la résistance d'une des phases à  $2\Omega$ . Que vaut cette résistance en p.u ?

$$Y \rightarrow I_{\text{phase}} = I_{\text{ligne}}$$

$$\Delta \rightarrow I_{\text{phase}} = \frac{I_{\text{ligne}}}{\sqrt{3}}$$

$$X = \frac{X}{X_n}$$

$$Y \rightarrow I_{\text{phaseY}} = I_{\text{ligneY}} \rightarrow I_{\text{phaseY}} = 5.5\text{A} \rightarrow i_{\text{phaseY}} = \frac{I_{\text{phaseY}}}{I_n} = \frac{5.5}{5} = 1.1[\text{pu}]$$

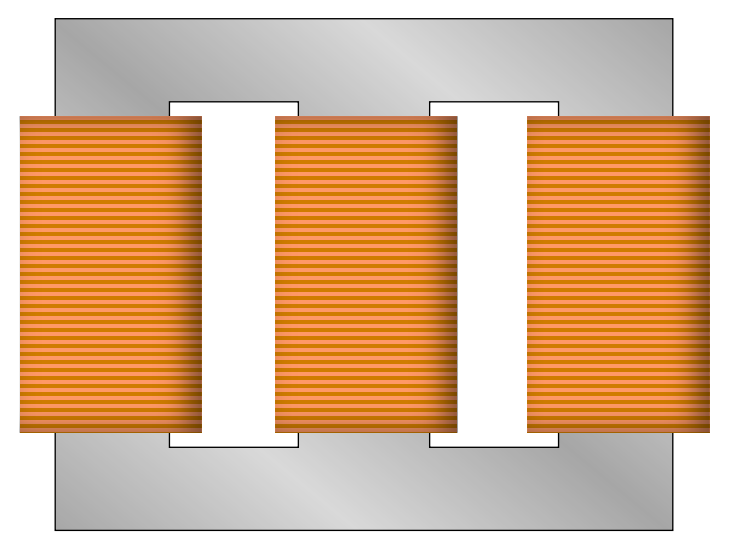
$$\Delta \rightarrow I_{\text{phase}\Delta} = \frac{I_{\text{ligne}\Delta}}{\sqrt{3}} \rightarrow I_{\text{phase}\Delta} = 3.2\text{A} \rightarrow i_{\text{phase}\Delta} = \frac{I_{\text{phase}\Delta}}{I_n} = \frac{3.2}{5} = 0.64[\text{pu}]$$

$$Z_n = \frac{U_n}{I_n} = \frac{230}{5} = 46[\Omega]$$

$$r = \frac{R}{Z_n} = \frac{2}{46} = 0.043[\text{pu}]$$

# 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



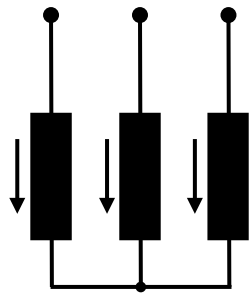
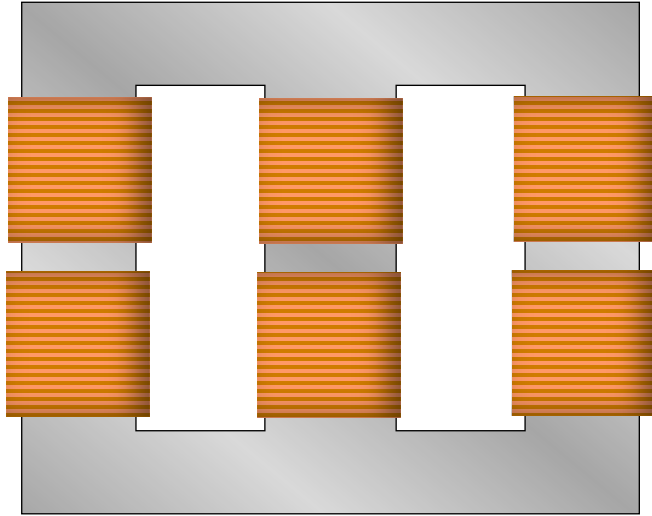




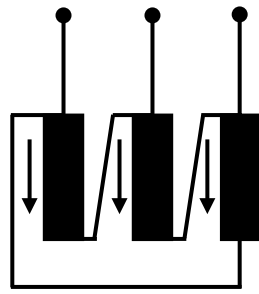


# Transformateur triphasé

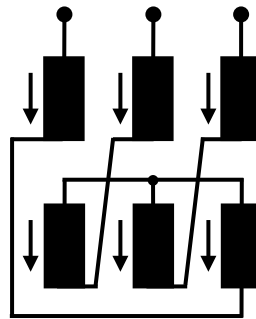
## Groupes de couplage



étoile  
Y ou y



triangle  
D ou d

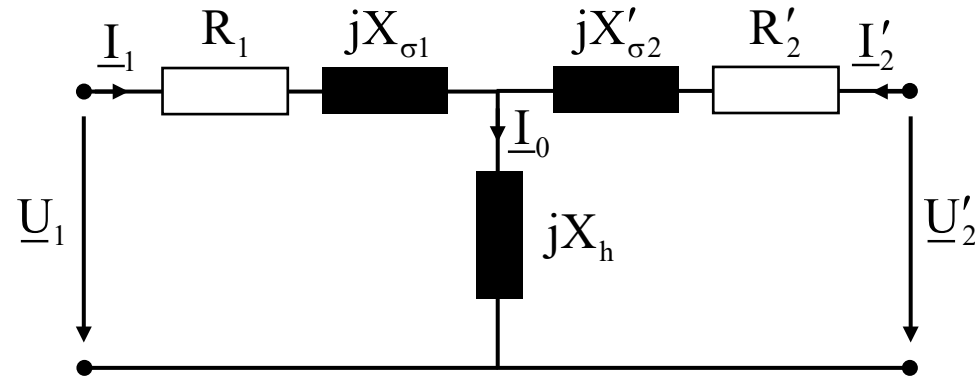


zig-zag  
Z ou z

# 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

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

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



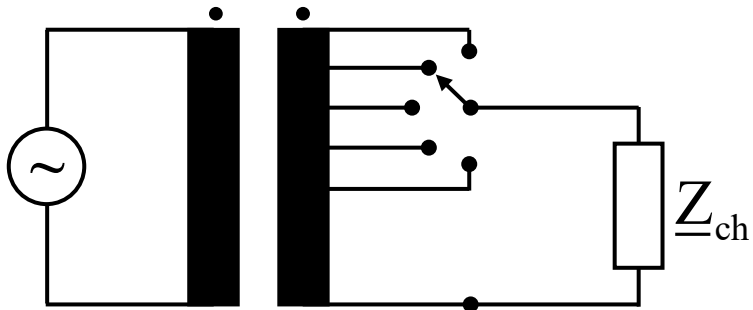
Montage Dy souvent utilisé entre machine (basse tension, fort courant) et sous-station (haute tension, faible courant)

# Sommaire

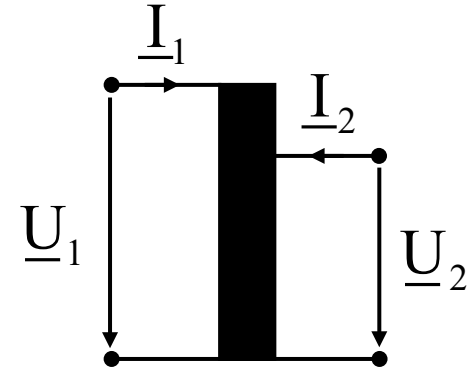
- Introduction
- Transformateur monophasé idéal
  - Rapport de transformation
  - Grandeurs rapportées
- Transformateur monophasé réel
  - Equations de tensions
  - Schéma équivalent et bilan de puissance
    - Introduction des pertes fer
  - Grandeurs relatives (per unit)
  - Fonctionnement en court-circuit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

# Transformateurs spéciaux

## Transformateur à gradins



## L'autotransformateur



## Le variac

