

# ELECTROTECHNIQUE

## Chapitre 4 : Systèmes triphasés équilibrés

---

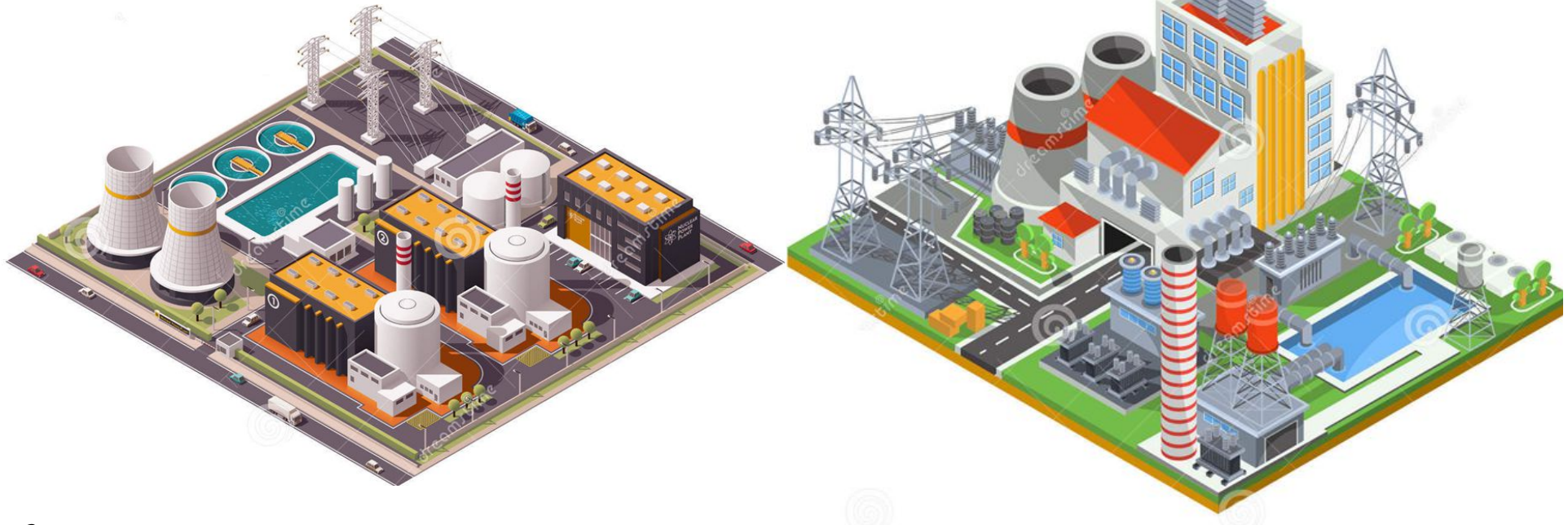


# Systemes triphasés équilibrés

## 1. Production de l'énergie électrique

### 1.1 Introduction:

- L'électricité est la forme d'énergie la plus utilisée dans quasiment tous les secteurs de l'économie mondiale.
- Elle est la base du développement de l'humanité.
- Indispensable à l'industrie, aux bâtiments et à tous les aspects de la vie quotidienne.
- Forte augmentation de la demande depuis la révolution industrielle, très forte augmentation récente.



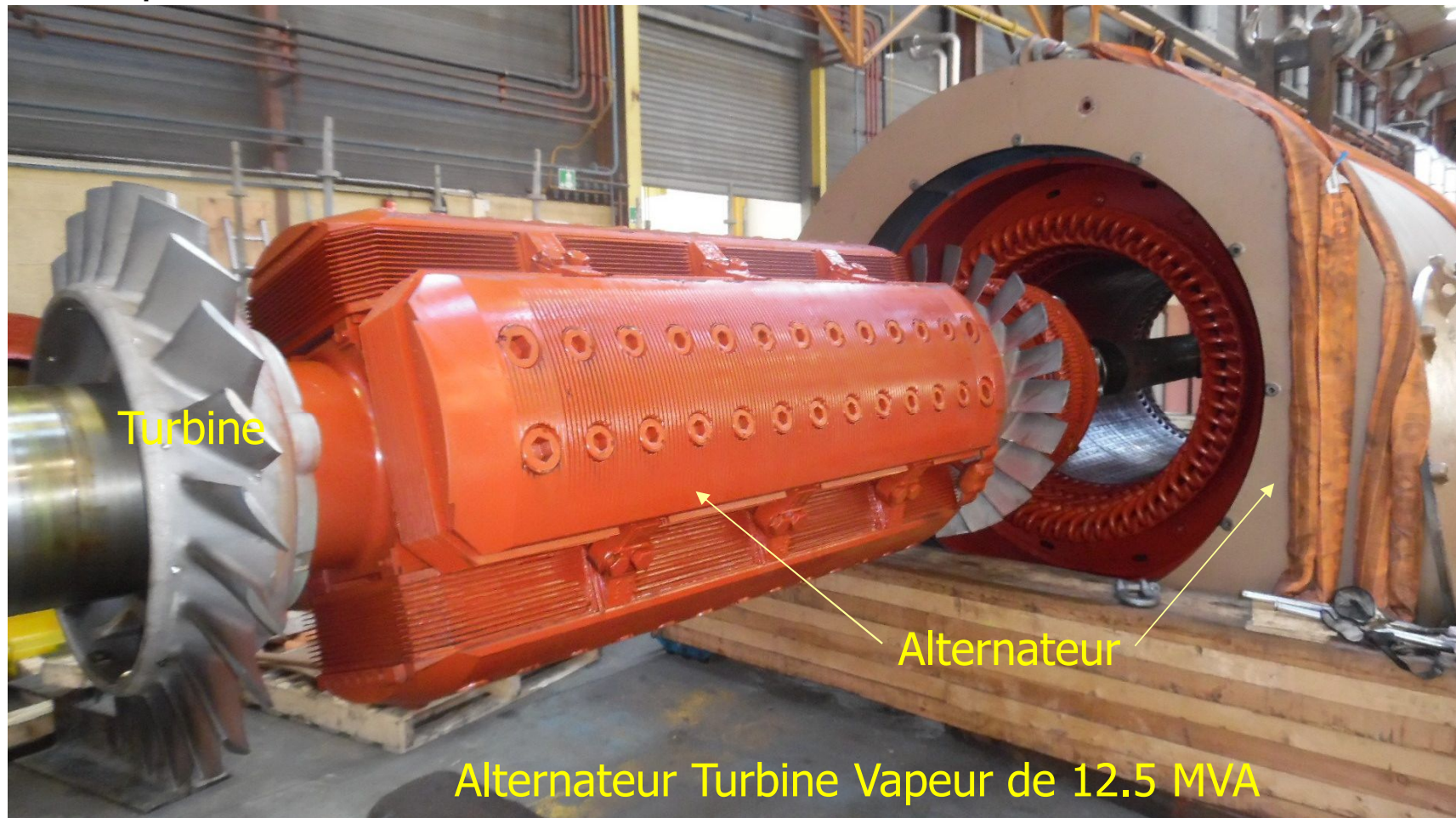
## Systemes triphasés équilibrés

- Produire de l'électricité nécessite une source d'énergie primaire: pétrole, charbon, gaz, uranium, soleil, vent ou eau...



## Systemes triphasés équilibrés

- L'énergie électrique est consommée au moment où elle est produite;
- L'usine de production de l'énergie électrique est la centrale électrique;
- Deux éléments clés sont nécessaires à la production de l'énergie électrique: **La turbine et l'alternateur.**

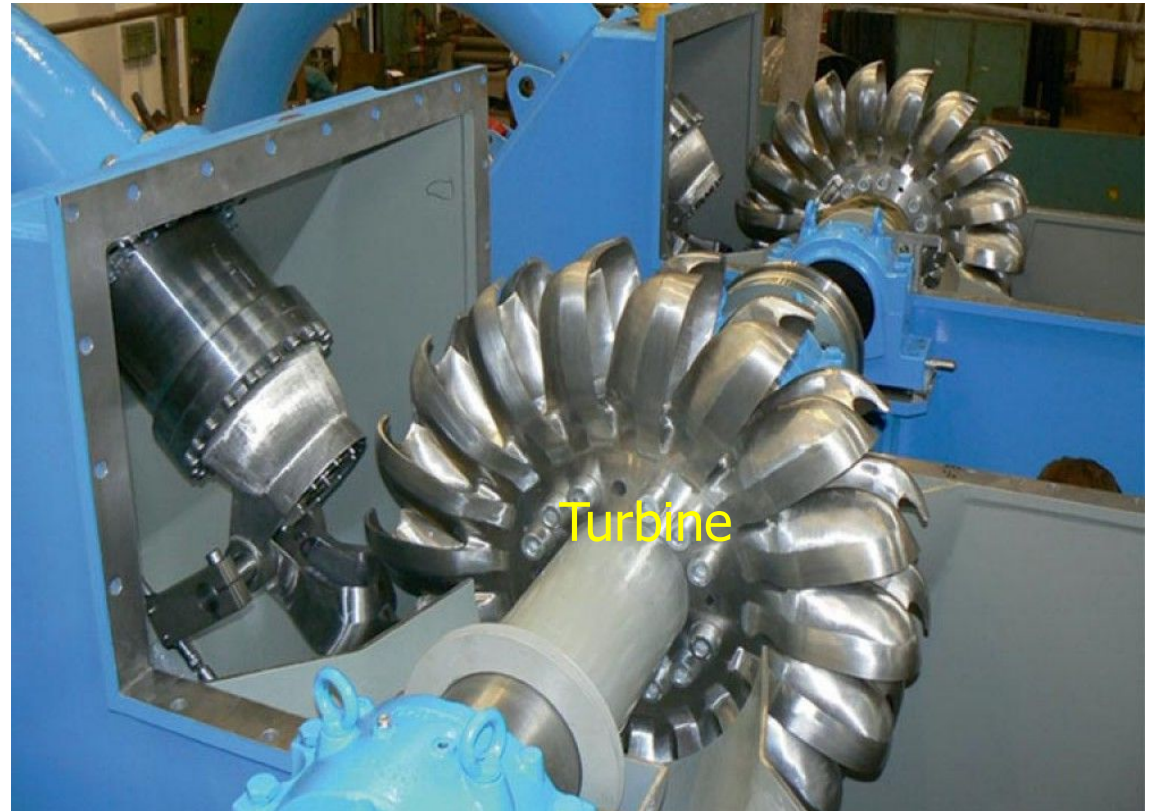


Alternateur Turbine Vapeur de 12.5 MVA

# Systemes triphasés équilibrés

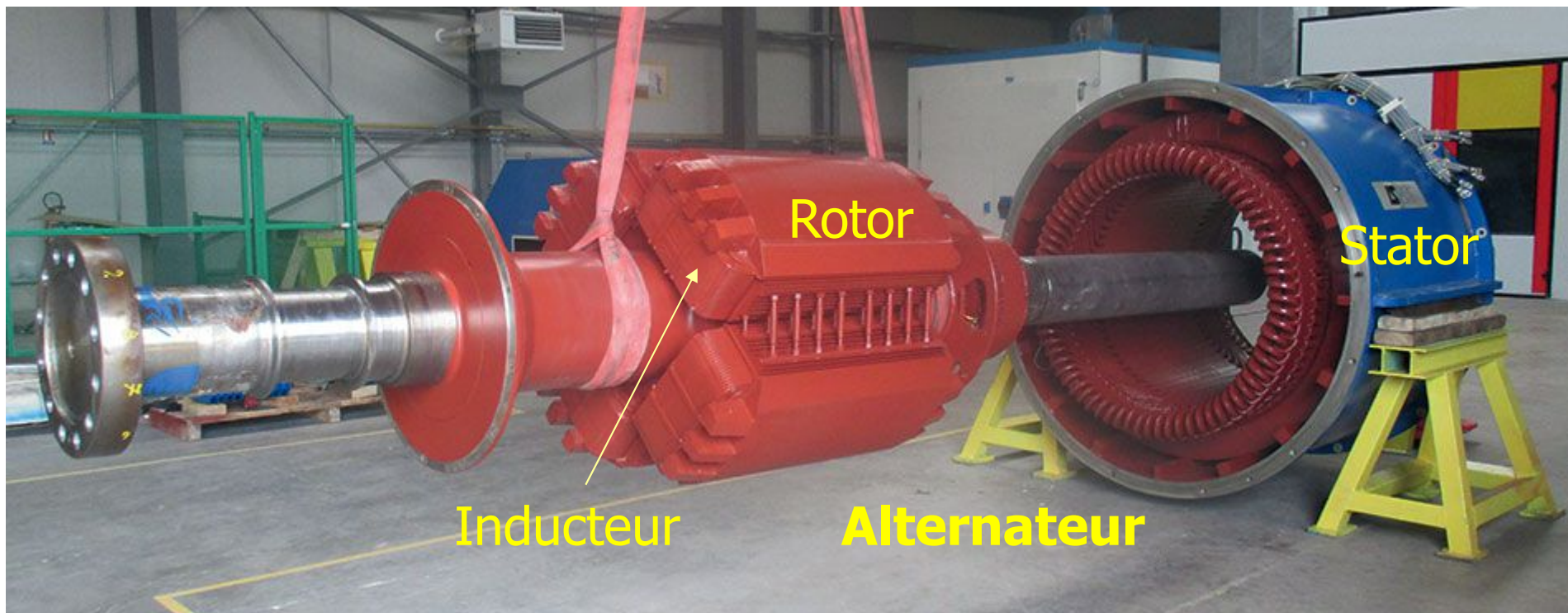
## Groupe turbo-alternateur:

- Dans les centrales, l'électricité est fournie par les groupes "turbo-alternateur":
- **La turbine** sert à transformer l'énergie de l'eau, de la vapeur ou du vent en énergie mécanique avec, pour but, de faire tourner un alternateur:



## Systemes triphasés équilibrés

- L'alternateur est une machine tournante qui convertit l'énergie mécanique fournie au rotor en énergie électrique à courant alternatif.
- La turbine est en liaison mécanique complète avec la partie tournante de **l'alternateur** (le rotor).
- **Le rotor** est l'inducteur. Il peut être constitué d'un aimant permanent ou d'un bobinage alimenté en courant continu à l'aide d'un collecteur à bagues et balais.



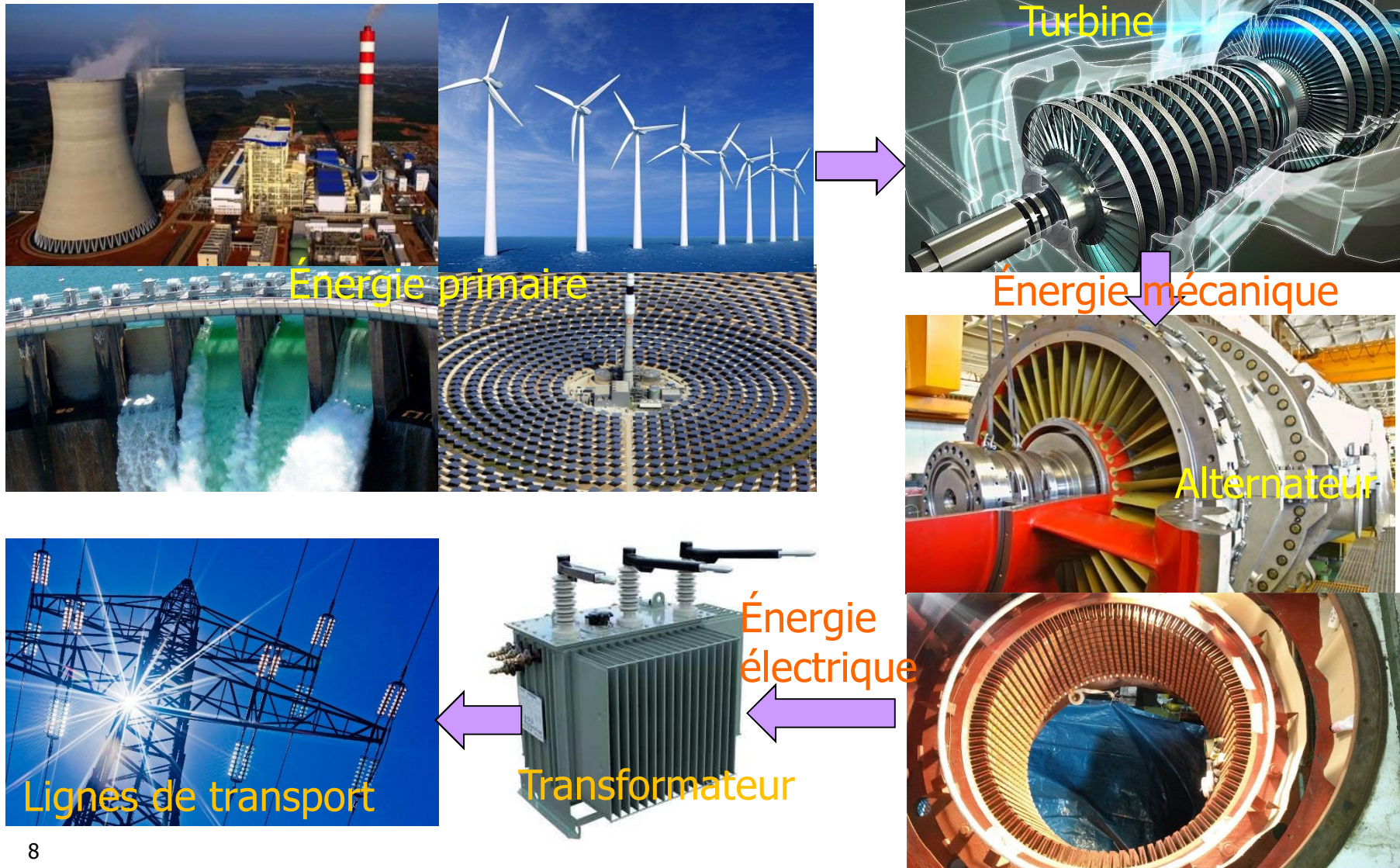
## Systemes triphasés équilibrés

- Le rotor tournant crée un champ magnétique tournant qui donne naissance à des forces électromotrices dans chacune des phases de l'enroulement du **stator** qui est l'induit (partie fixe de l'alternateur).



# Systemes triphasés équilibrés

- L'alternateur couplé à une turbine en rotation est la partie commune à toutes les centrales électriques. Il fournit une tension alternative triphasée.





# Systemes triphasés équilibrés

---

## 1.2 Centrales électriques:

Une centrale électrique réalise une chaîne énergétique : une énergie primaire subit une ou plusieurs conversions, pour finalement devenir de l'énergie électrique. Il y a deux types d'énergies primaires:

### Sources d'énergies renouvelables:

- Les énergies renouvelables proviennent de sources inépuisables (soleil, vent, eau, géothermies, marées) ou renouvelables à l'échelle d'une vie (biomasse: bois, plantes).

### Sources d'énergies non renouvelables:

- les énergies non renouvelables proviennent de sources épuisables dont les réserves sont limitées (pétrole, gaz, charbon, uranium).

### Les différents types de centrale électrique:

L'électricité peut être produite par de nombreux types d'installations:

- Les centrales nucléaires;
- Les centrales thermiques;
- Les centrales hydrauliques;
- Les centrales solaires;
- Les centrales éoliennes;

# Systemes triphasés équilibrés

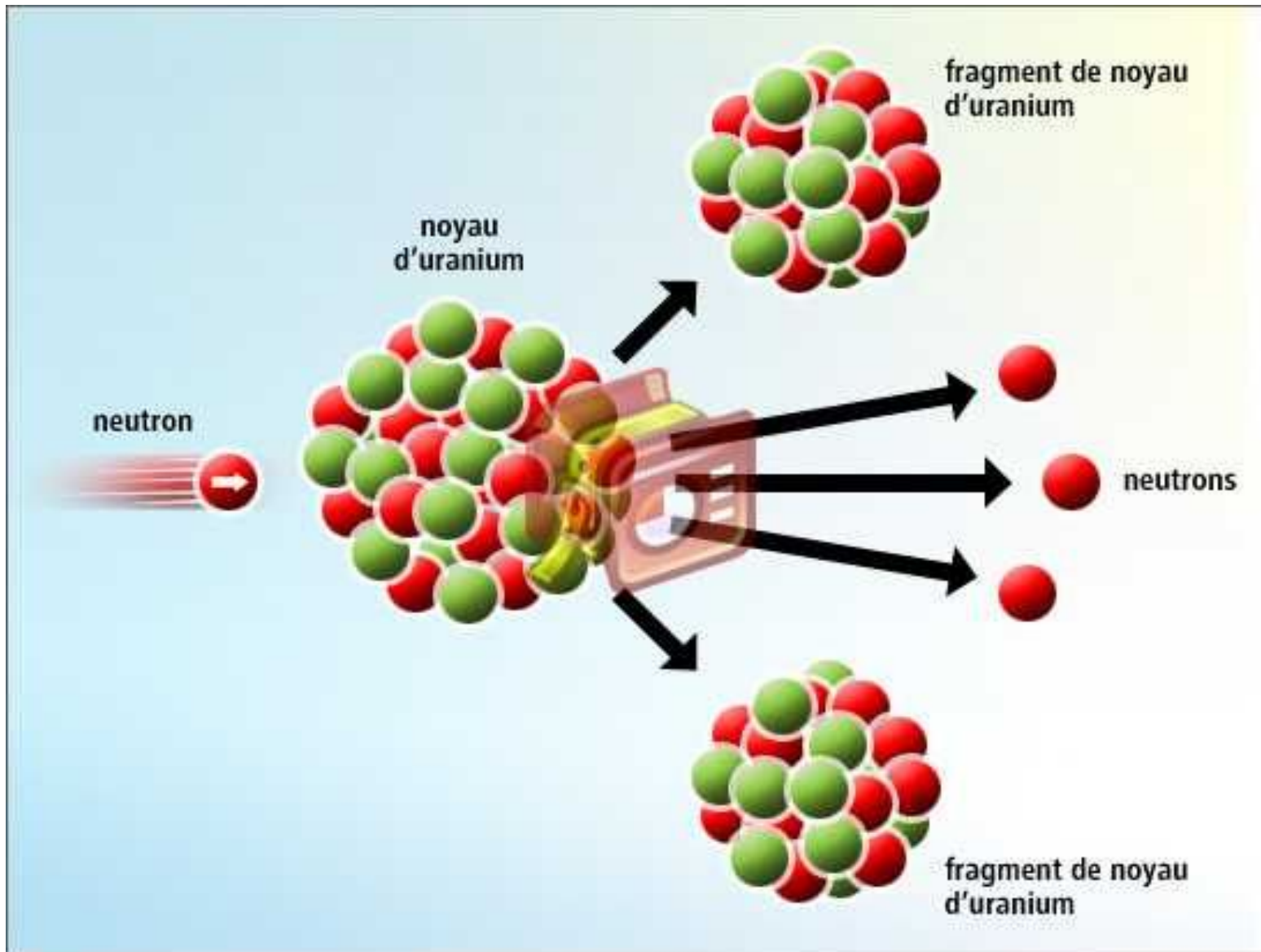
## □ Centrales nucléaires:

- La chaleur permettant la génération de vapeur d'eau est produite par la réaction nucléaire (fission d'uranium).



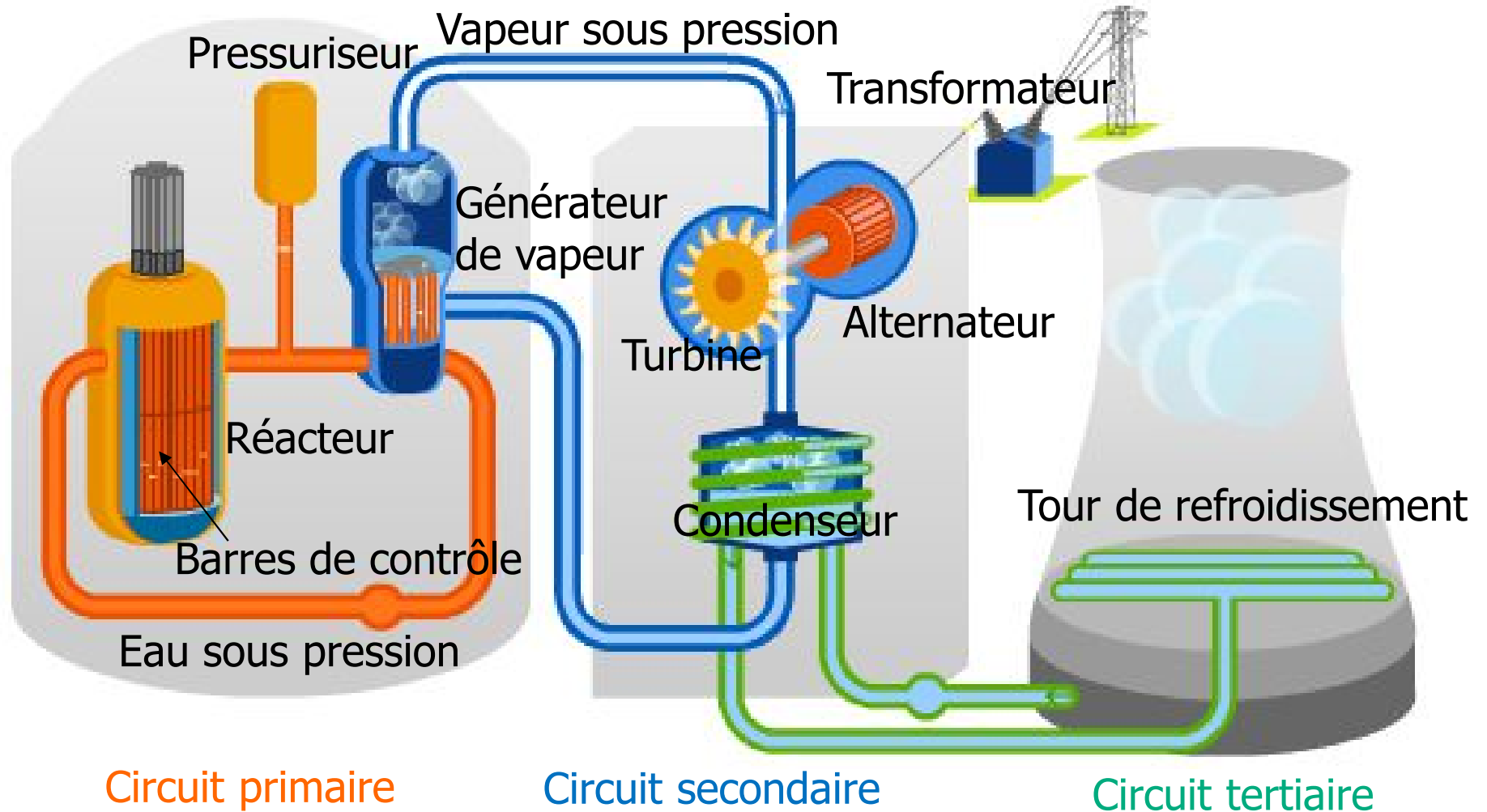
# Systemes triphasés équilibrés

Schématisation de la fission des noyaux d'uranium



# Systemes triphasés équilibrés

- L'énergie produite par la fission nucléaire permet de chauffer un fluide qui passe à l'état gazeux et active une turbine de production d'électricité. Un circuit primaire permet de refroidir le réacteur et de transférer la chaleur dégagée à un générateur de vapeur (chaudière) qui produit la vapeur d'eau alimentant la turbine à vapeur.





## Systemes triphasés équilibrés

---

Le rendement correspondant aux technologies actuellement disponibles est 35%.

### **Avantages:**

- Pas d'émissions de gaz à effet de serre pour la production d'électricité;
- Coût marginal de production d'électricité faible, en raison notamment du coût relativement faible du combustible;
- Longue durée de vie (40 à 60 ans);
- Forte densité énergétique (Un réacteur nucléaire fournit une puissance électrique de l'ordre du millier de mégawatts);
- Utilise peu de combustible;
- Indépendante des conditions météorologiques.

### **Inconvénients:**

- Source d'énergie non renouvelable (matière première en quantité limitée);
- Gestion des déchets nucléaires radioactifs (difficiles à gérer);
- Accidents graves possibles en cas d'incident (demande beaucoup de sécurité et d'entretien);

# Systemes triphasés équilibrés

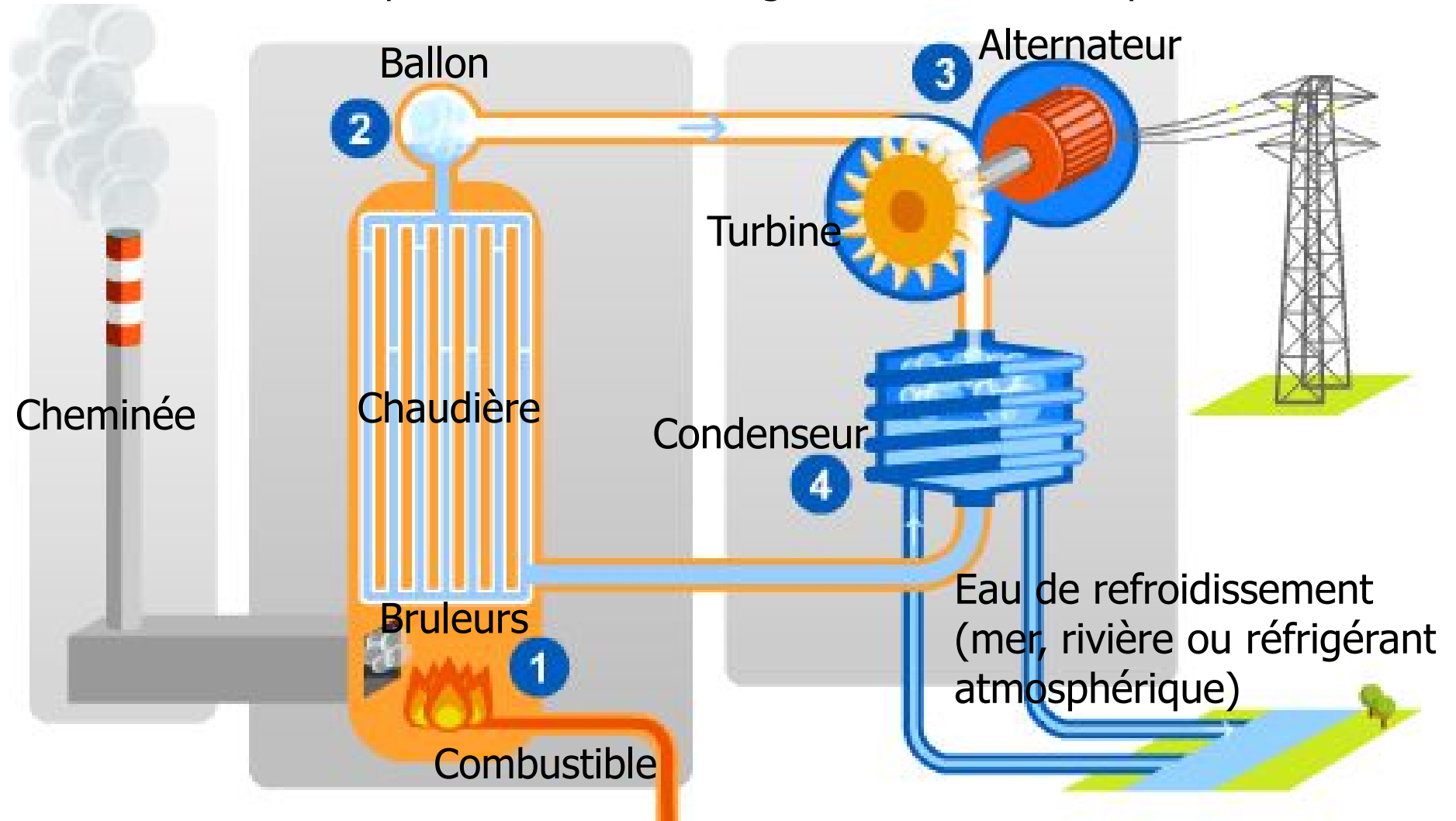
## □ Centrales thermiques:

- Un combustible (pétrole, gaz naturel, charbon, fioul,...) dégage de la chaleur en brûlant.
- La chaleur transforme l'eau liquide en vapeur d'eau. La vapeur sous pression fait tourner les pales de la turbine qui entraine l'alternateur qui produit l'électricité.



# Systemes triphasés équilibrés

- Diverses technologies existent, en fonction du combustible (charbon, fioul, gaz) ou du type de chaudière.
- Le rendement correspondant aux technologies actuellement disponibles 45%





# Systemes triphasés équilibrés

---

## Avantages :

- Facile à construire et à utiliser;
- Indépendante des conditions météorologiques;
- Énergie thermique produite permet de chauffer des usines, des habitations;
- Autonomie (dépendant de l'approvisionnement et du stock de combustible);
- Flexibilité dans le choix du combustible (pour certaines technologies);
- Longue durée de vie (30 à 40 ans);
- Système d'appoint lorsque la demande est forte.

## Inconvénients :

- Usage de combustibles fossiles non renouvelables (raréfaction et coût de la ressource, dépendance énergétique);
- Réactivité faible au démarrage (plus d'1h pour atteindre la puissance max);
- Dépendance par rapports aux pays producteurs de pétrole, gaz naturel et charbon;
- Emissions de gaz à effet de serre et d'éléments polluants, en particulier sur charbon et fioul (dioxyde de carbone, oxydes de soufre, poussières ...).

# Systemes triphasés équilibrés

## □ Centrales hydrauliques:

Une centrale hydraulique exploite l'énergie potentielle gravitaire fournie par une masse d'eau en mouvement pour produire de l'énergie électrique.

On distingue:

- Les ouvrages hydroélectriques disposant d'un stock d'énergie (Un barrage retient une grande quantité d'eau sous la forme d'un lac de retenue), sont des centrales de haute chute;



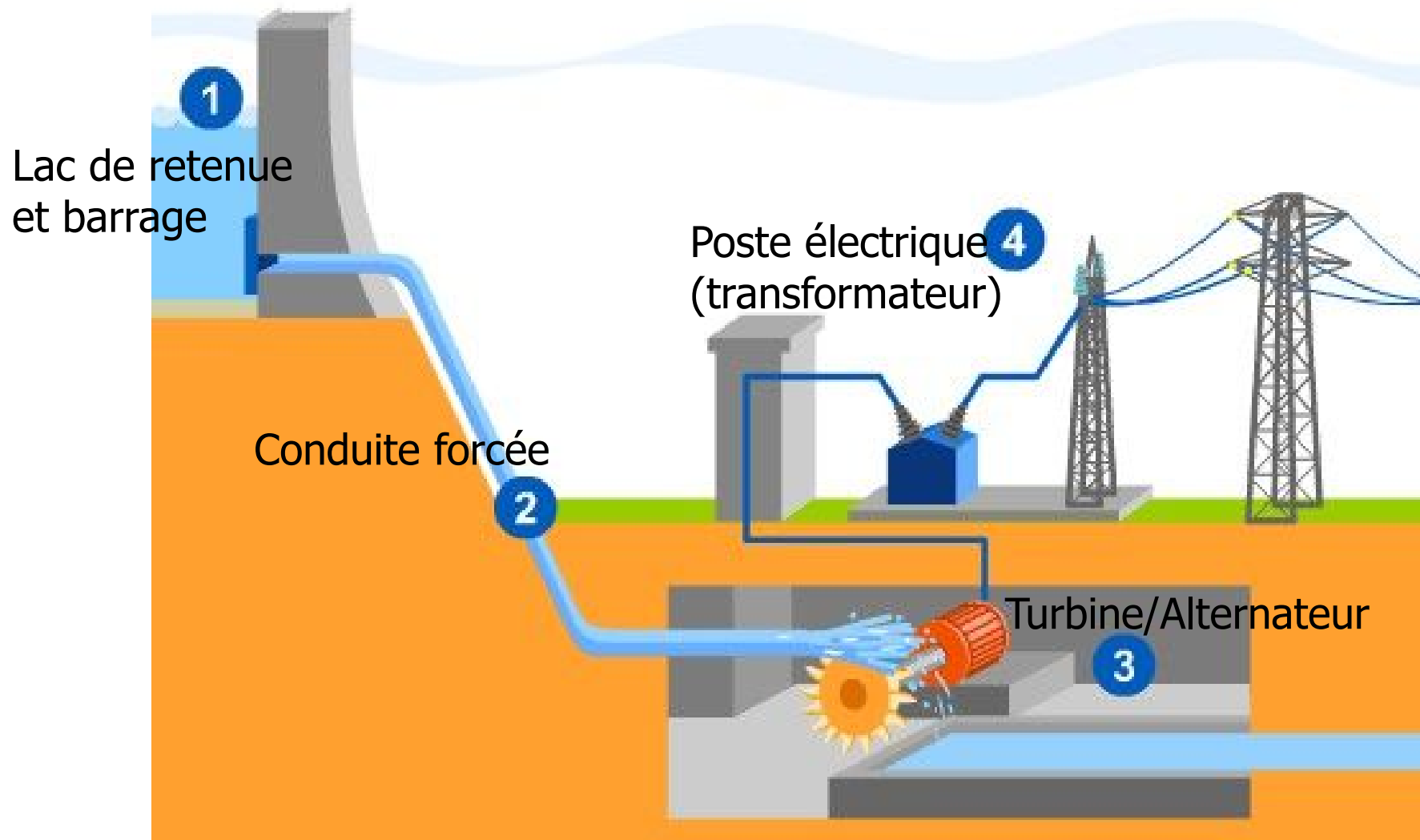
# Systemes triphasés équilibrés

- Les ouvrages hydroélectriques produisant au "fil de l'eau", sont des centrales de basse chute.



# Systemes triphasés équilibrés

- La chute de l'eau, guidée par un réseau de conduite, entraîne des turbines reliées à un alternateur.





## Systemes triphasés équilibrés

---

- Certains ouvrages, disposent en plus d'une capacité de pompage qui offre un degré de flexibilité supplémentaire, en remontant l'eau dans un bassin supérieur pendant les périodes creuses de consommation électrique et en produisant de l'électricité durant les périodes de plus forte consommation.
- Le rendement dépend de la technologie de la turbine (Pelton, Francis, Kaplan) ainsi que des caractéristiques de la centrale est 80%.

### **Avantages :**

- Usage de ressources propres renouvelables;
- Forte réactivité (démarrage en quelques secondes);
- Production d'électricité flexible pour les centrales disposant d'un stock (et d'une capacité de pompage);
- Longue durée de vie (supérieure à 50 ans);
- Coût marginal de production d'électricité faible (dépendant du stock).

### **Inconvénients :**

- Un peu dépendante des conditions météorologiques (problème lors des sécheresses);
- Raréfaction des sites exploitables (fortes contraintes géographiques);
- Production limitée par la réserve d'eau disponible ;
- Impacts environnementaux peuvent être très importants, surtout lors de la mise en place de structures de types barrages.

# Systemes triphasés équilibrés

## ☐ Centrales solaires photovoltaïques:

- Les systèmes solaires photovoltaïques (PV) convertissent l'énergie du rayonnement solaire en électricité grâce à des cellules à base d'un matériau semi-conducteur, sous l'excitation des photons de la lumière, le matériau crée un déplacement d'électrons.



# Systemes triphasés équilibrés

- Chaque cellule délivrant une faible tension, les cellules sont assemblées en série pour former des modules;
- Les modules sont reliés entre eux (série et parallèle) pour former des panneaux;
- Les systemes photovoltaïques se présentent sous forme de panneaux disposés, dans un nombre variant de un à plusieurs centaines de panneaux.

Panneau photovoltaïque

Module photovoltaïque

Cellule photovoltaïque

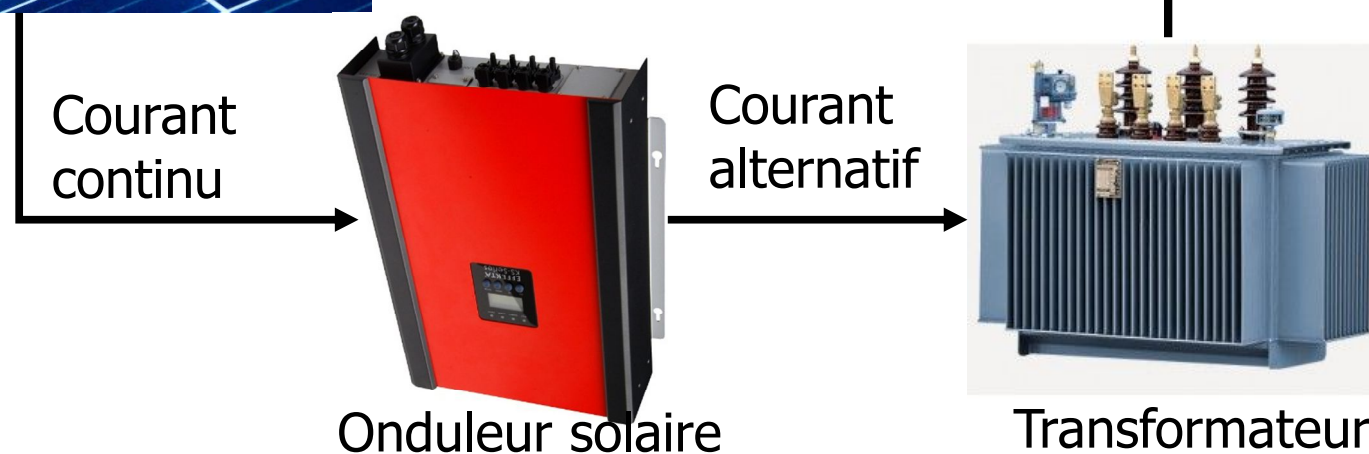


# Systemes triphasés équilibrés

- Le courant délivré est continu, l'installation d'un onduleur est nécessaire pour délivrer un courant alternatif, notamment dans le cas d'une injection de l'électricité sur le réseau.
- Le rendement est faible. Il est actuellement compris entre 6 et 25%, selon le type de cellules de silicium utilisées.



Réseau électrique





# Systemes triphasés équilibrés

---

## **Avantages :**

- Usage de ressources renouvelables, sans émissions de gaz à effet de serre pour la production d'électricité;
- Abondance de la ressource;
- Coût marginal de production d'électricité faible ("gratuité de la ressource")
- Forte modularité d'installation, adaptée au logement particulier et à l'autoconsommation.

## **Inconvénients :**

- Intermittence de la production d'électricité (variabilité dans le temps et dans l'espace de l'ensoleillement), et dépendante des conditions météorologiques;
- Incertitude dans la prévision de la ressource;
- Création de perturbations sur le réseau (variations brutales d'ensoleillement);
- Rendement des panneaux solaires n'est pas très bon;
- Nécessite des surfaces gigantesques;
- Coût des panneaux est encore relativement élevé.

# Systemes triphasés équilibrés

## ☐ Centrales solaires thermiques:

- Les systèmes solaires thermiques convertissent l'énergie contenue dans les rayons du soleil en chaleur. Ils se présentent sous forme de panneaux exposés au soleil, et dans lesquels des tubes remplis d'un liquide caloporteur captent la chaleur des rayonnements.
- On distingue l'énergie **solaire thermique** et l'énergie **solaire thermodynamique**:



# Systemes triphasés équilibrés

## Énergie solaire thermique:

- Dans ce cas, les panneaux solaires servent à capter de la chaleur pour fournir notamment de l'eau chaude (chauffe-eau domestiques).

## Énergie solaire thermodynamique:

- Cette technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire à l'aide de collecteurs (miroirs ou réflecteurs) pour chauffer un fluide à haute température (généralement comprises entre 400 et 1000°C) transformée en vapeur, qui fait tourner une turbine et produire ainsi de l'électricité ou alimenter en énergie des procédés industriels.



Réflecteurs cylindro-paraboliques



Réflecteurs linéaires de Fresnel

Tour solaire à Concentration (réflecteurs héliostats)

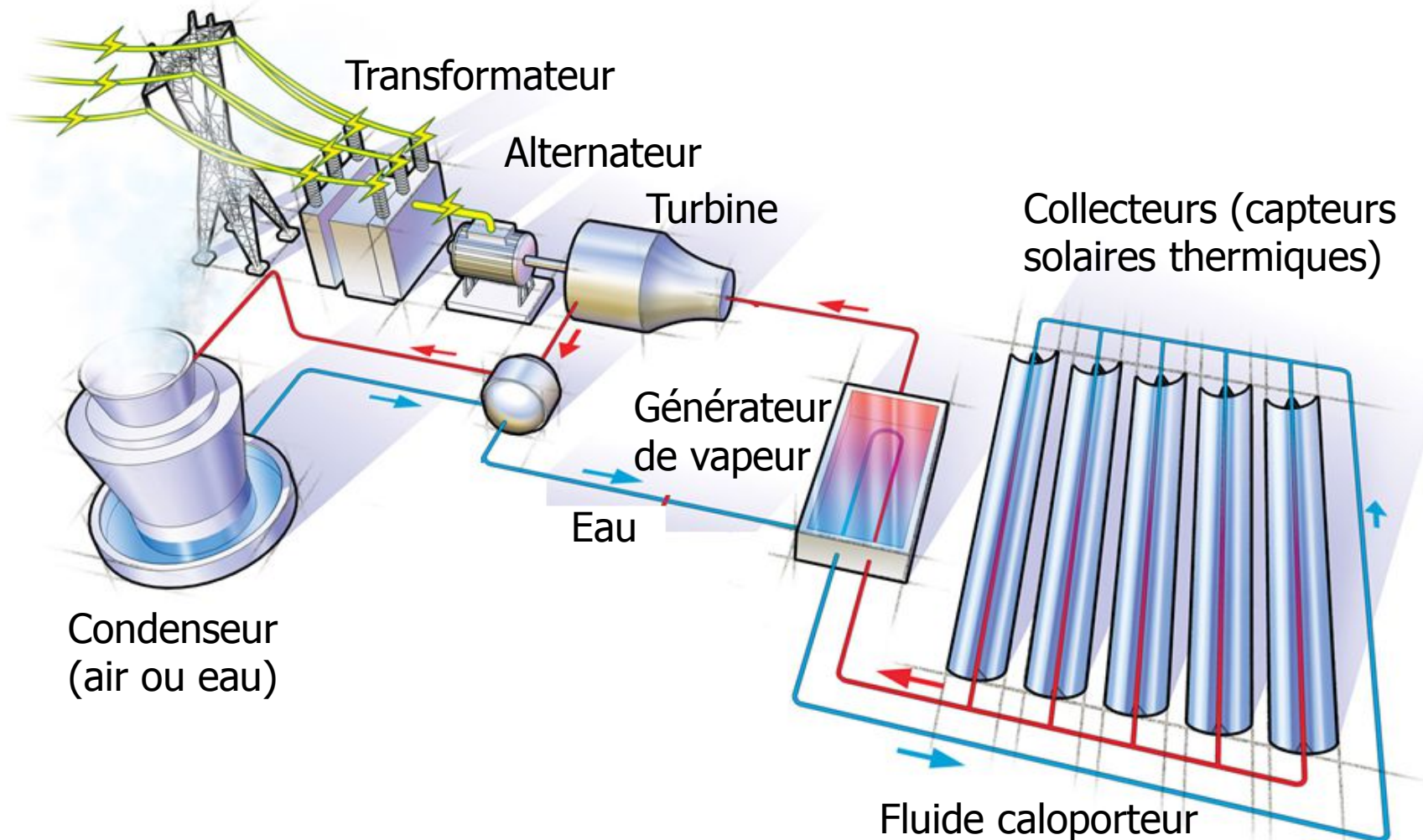


Parabole solaire



# Systemes triphasés équilibrés

- L'énergie thermique provenant du rayonnement solaire collecté est convertie en électricité, en général par l'intermédiaire de deux fluides: un fluide caloporteur et un fluide thermodynamique.





## Systemes triphasés équilibrés

---

- Le rendement de 20 à 90%, dépend fortement de la technologie (isolation du panneau solaire thermique, température au sein des tubes, etc.) ainsi que de la température ambiante:

### **Avantages :**

- Usage de ressources renouvelables, sans émissions de gaz à effet de serre pour la production de chaleur;
- Abondance et gratuité de la ressource;
- Utilisation locale de l'énergie (pas besoin de raccordement à un réseau);
- Forte modularité d'installation;
- Composante de stockage permettant un usage en continu;
- Prolongement de la génération d'électricité jusqu'à plusieurs heures après la disparition des rayonnements solaires (le fluide chauffé ayant une certaine inertie thermique (capacité à stocker de la chaleur));

### **Inconvénients :**

- Performance dépendante de la localisation géographique et des conditions météorologiques (ensoleillement, température ambiante);

# Systemes triphasés équilibrés

## □ Centrales éoliennes:

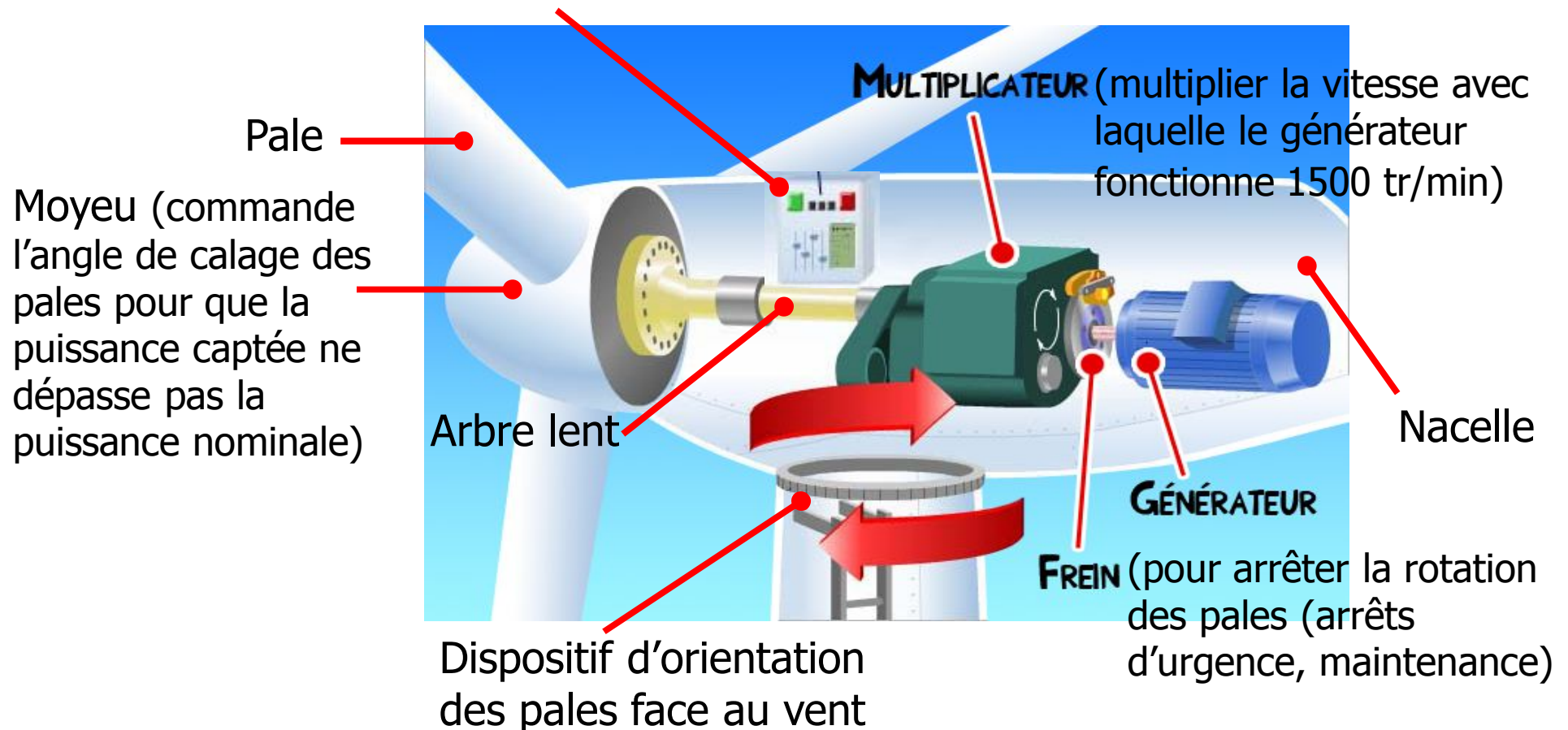
- Une éolienne transforme l'énergie cinétique du vent (déplacement d'une masse d'air) en électricité via un rotor lié aux pales orientables; qui entraine un alternateur (génératrice), qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.



# Systemes triphasés équilibrés

- L'éolienne (aérogénérateur) couramment utilisée dans la génération d'électricité est composée de plusieurs composants mécaniques et électriques:

Systeme de contrôle pour adapter l'énergie électrique aux exigences du réseau électrique (fréquence 50Hz, tension,...)

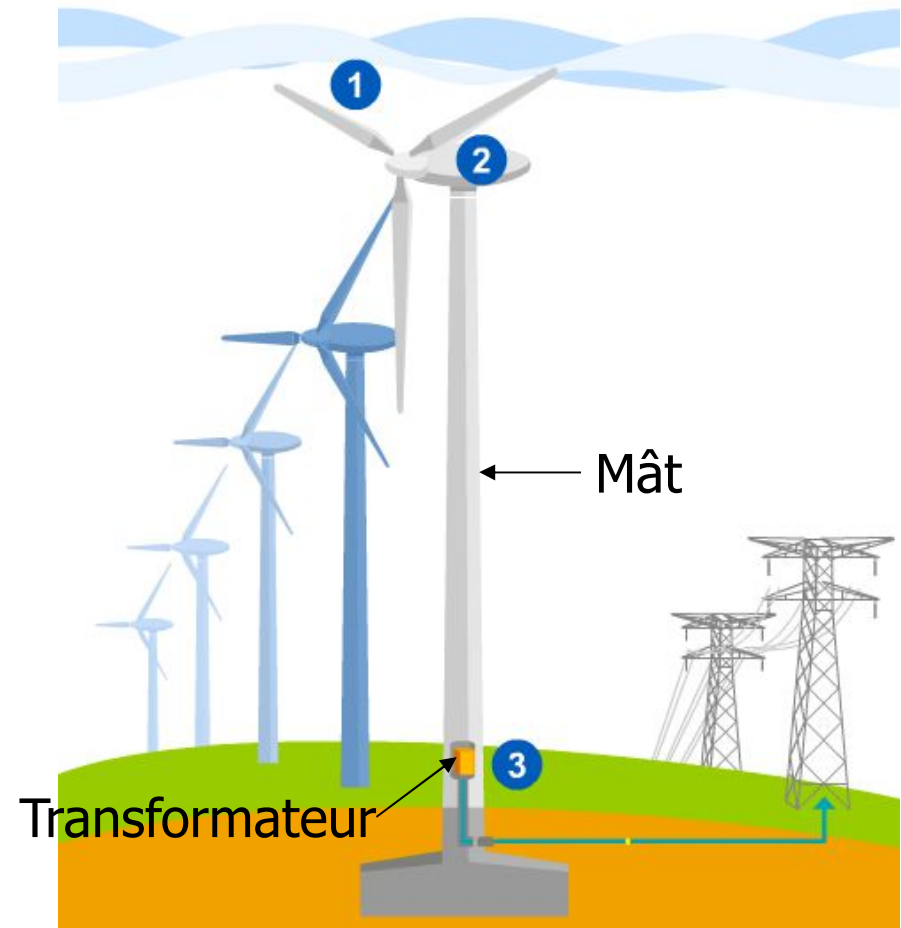


# Systemes triphasés équilibrés

- L'énergie du vent peut être captée à partir d'une vitesse de 3 m/s, pour une performance maximale atteinte à partir de 12 m/s à 15 m/s.
- Les éoliennes sont mises à l'arrêt au-delà d'une vitesse de vent seuil (à partir de 25m/s, variable selon les modèles).

## Fonctionnement d'une centrale éolienne:

1. Rotation des pales sous l'effet du vent.
2. Les pales entraînent le rotor relié à un alternateur qui produit de l'électricité
3. Adaptation de la tension à l'aide d'un transformateur situé à l'intérieur du mât, élève la tension électrique produit par l'alternateur pour faciliter le transport dans les lignes à moyenne tension du réseau.





## Systemes triphasés équilibrés

---

- Les modèles récents d'éoliennes (axe horizontal, 3 pales) ont un rendement entre 35 et 45%.

### **Avantages :**

- Usage de ressources renouvelables, sans émissions de gaz à effet de serre pour la production d'électricité;
- Conception, installation et maintenance aisée;
- Coût marginal de production d'électricité faible (gratuité de la ressource);

### **Inconvénients :**

- Intermittence de la production d'électricité (uniquement quand le vent souffle à la vitesse appropriée: variabilité dans le temps et dans l'espace de la ressource);
- Incertitude dans la prévision de la ressource et dépendante des conditions météorologiques;
- Contraintes géographiques (topographie, obstacles, etc.);
- Dégradation de l'aspect visuel ainsi que le bruit des éoliennes.

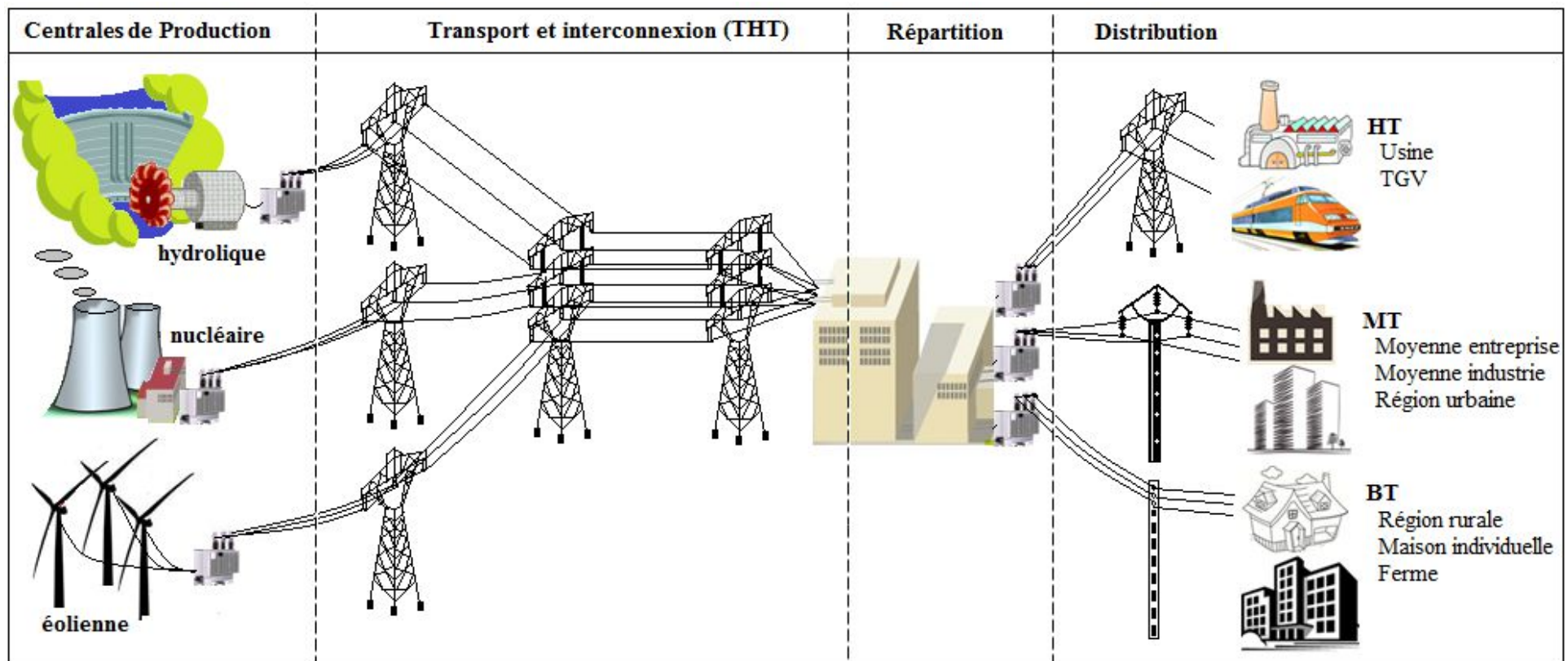
# Systemes triphasés équilibrés

## 2. Transport et distribution de l'énergie électrique

### 2.1 Structure du réseau électrique:

L'énergie électrique n'est pas consommée au lieu de sa production ne se stocke pas en grande quantité; elle est donc:

- Produite;
- Transportée et distribuée aux consommateurs.





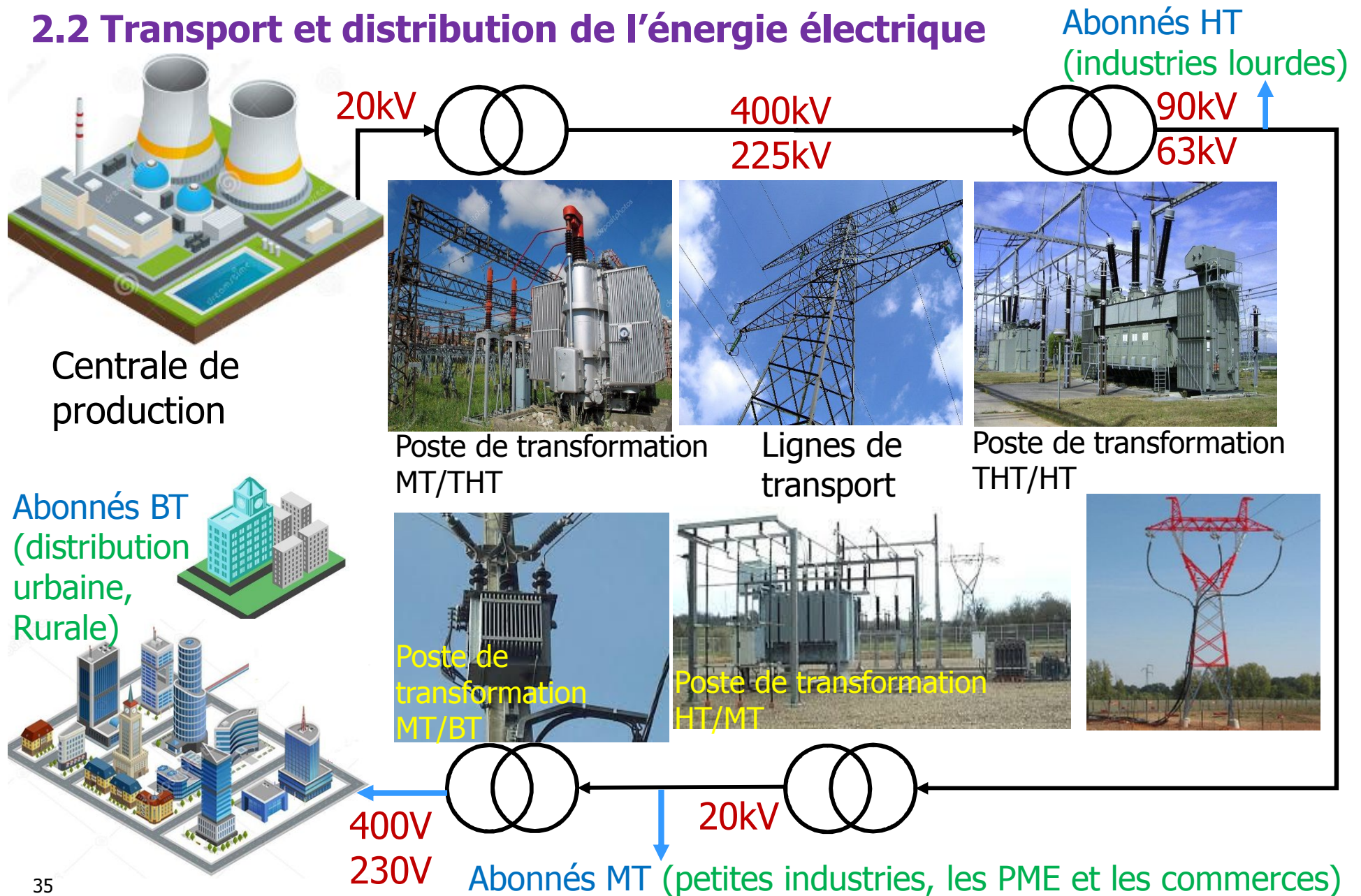
# Systemes triphasés équilibrés

---

- **Les conditions préalables au transport de l'énergie électrique:**
  - ✓ Elle doit être acheminée vers des consommateurs lointains;
  - ✓ Elle doit être transportée sans perte, ou avec le minimum de pertes;
  - ✓ Elle doit être livrée dans tout le territoire national;
  - ✓ Elle doit être adaptée selon l'utilisation;
  - ✓ Elle doit être de qualité;
  - ✓ Elle doit être fournie sans coupure.
- **Le transport de l'énergie électrique se fait en plusieurs étapes:**
  - ✓ Au départ de la centrale de production, la tension délivrée par l'alternateur est de l'ordre de 5 à 20kV de fréquence 50Hz;
  - ✓ Cette tension subit une première transformation dans des postes de transformation, il s'agit d'une élévation vers 400kV ou 225kV, pour assurer un transport longue distance et ainsi de réduire les pertes par effet Joule dans les lignes de transport et réduire la section des câbles;
  - ✓ Ensuite, la tension est progressivement réduite pour arriver aux différents niveaux de tension auxquels sont raccordés les consommateurs (90kV, 63kV, 20kV, 400V ou 230V) suivant leurs besoins en puissance).

# Systemes triphasés équilibrés

## 2.2 Transport et distribution de l'énergie électrique



# Systemes triphasés équilibrés

- L'énergie produite doit être acheminée jusqu'aux consommateurs par l'intermédiaire d'un réseau de lignes électriques aériennes ou souterraines, qui permet de transporter et de distribuer l'énergie électrique.

Trois types de réseaux électriques permettent d'assurer cet acheminement:

## ❖ Réseau de transport et d'interconnexion:

- ✓ Destiné à transporter des quantités importantes d'énergie sur de longues distances;
- ✓ Il permet l'interconnexion des grands centres de production;
- ✓ Ce réseau peut être assimilé au réseau autoroutier. Son niveau de tension est de **400 000 volts** (très haute tension ).

## ❖ Réseaux de répartition régionale ou locale

- ✓ Destinés à répartir l'énergie **en quantité moindre sur des distances plus courtes.**
- ✓ Le transport est assuré en très haute tension (**225 000 volts**) et en haute tension (**90 000 et 63 000 volts**).
- ✓ Ce type de réseau est l'équivalent des routes nationales dans le réseau routier (avec des flux importants, de nombreux carrefours et croisements...).

# Systemes triphasés équilibrés

## ❖ Les réseaux de distribution

- Destinés à acheminer l'électricité à l'échelle locale, c'est-à-dire directement vers les consommateurs de plus faible puissance.
- La distribution est assurée en moyenne tension (**20 000 volts**) et en basse tension (**400 et 230 volts**).
- C'est l'équivalent des routes départementales et des voies communales dans le réseau routier (des flux locaux, des villages...).

## □ Les consommateurs:

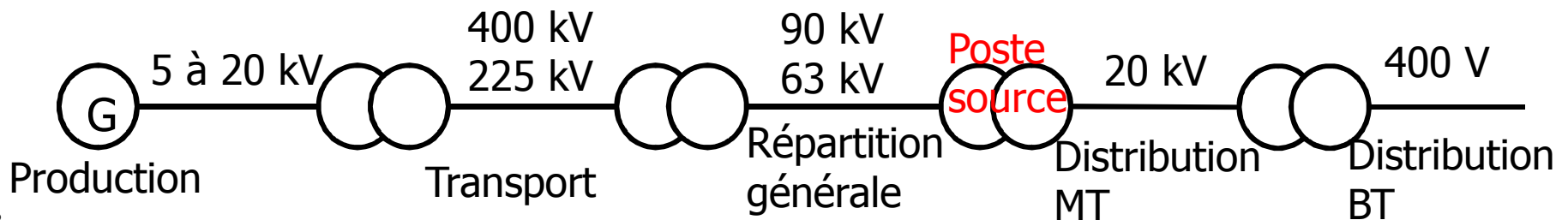
- La majeure partie des consommateurs est alimentée par le réseau basse tension (**230 et 400 volts**) : pavillons, immeubles d'habitation, écoles, artisans, commerçants, professions libérales, exploitations agricoles...
- D'autres sont alimentés en **20 000 volts** : grands hôtels, hôpitaux et cliniques, petites et moyennes entreprises...
- De gros industriels (voies ferrées électrifiées, mines, cimenteries, aciéries électriques, usines d'électrolyse de l'aluminium...) sont alimentés directement par le réseau de transport, avec un niveau de tension adapté à la puissance électrique dont ils ont besoin, à savoir **63 000; 90 000** ou **225 000 volts**, voire **400 000 volts** dans quelques cas.

# Systemes triphasés équilibrés

## □ Niveau de tension:

Tableau de classification des différents niveaux de tension d'un réseau:

Ancienne dénomination		Nouvelle dénomination	
Type de ligne	Tension alternative	Domaine	Tension alternative
Très Haute Tension ( <b>THT</b> )	400kV ou 225kV	Haute Tension B ( <b>HTB</b> )	$U > 50\text{kV}$
Haute Tension ( <b>HT</b> )	90KV ou 63KV	Haute Tension A ( <b>HTA</b> )	$1\text{kV} < U < 50\text{kV}$
Moyenne Tension ( <b>MT</b> )	30KV, 20KV ou 15kV	Basse Tension B ( <b>BTB</b> )	$500\text{V} < U < 1000\text{V}$
Basse Tension ( <b>BT</b> )	400V, 230V	Basse Tension A ( <b>BTA</b> )	$50\text{V} < U < 500\text{V}$



# Systemes triphasés équilibrés

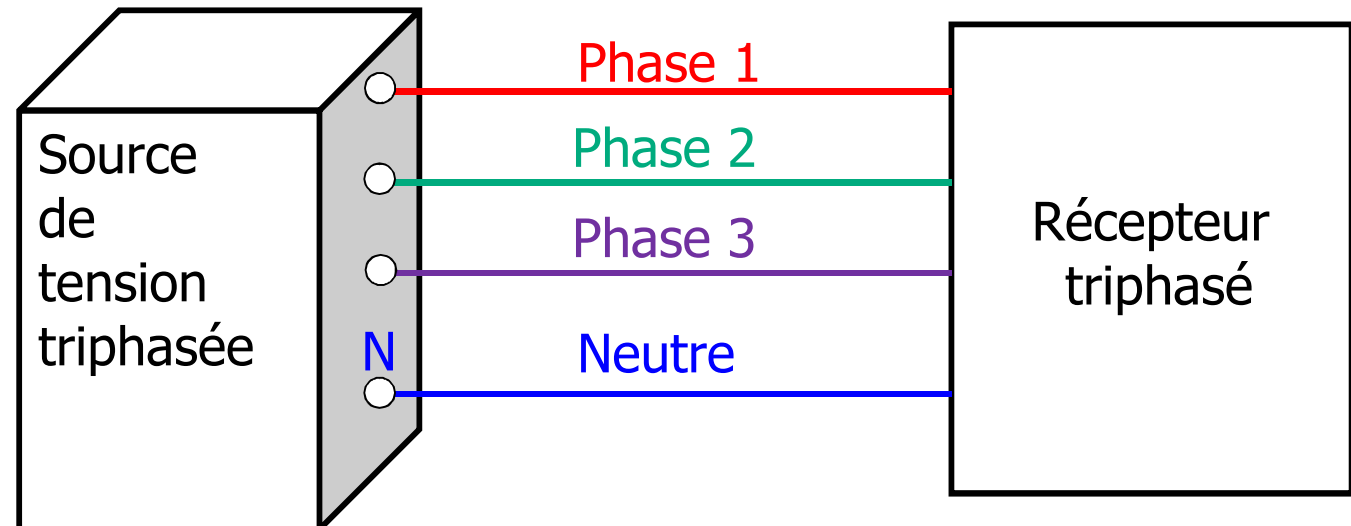
## 3. Systemes triphasés équilibrés

### 3.1 Présentation:

- De la production, en passant par le transport et en se terminant par la distribution, l'énergie électrique est acheminée par un **réseau triphasé** (trois conducteurs qui sont les phases et un neutre).
- Les entreprises et les installations industrielles sont alimentés en **courant triphasé**. L'alimentation monophasée n'utilise que deux fils du réseau triphasé. (soit une phase et le Neutre N, soit deux phases).
- Dans le cas de la distribution électrique, le réseau peut être modélisé par trois sources de tension sinusoïdales d'amplitude identique, par exemple 230V efficaces.

#### Applications industrielles:

- Machines d'usinage;
- Chauffage (fours fonderie,...);
- Moteurs électriques triphasés.





# Systemes triphasés équilibrés

---

## □ Avantages par rapport au monophasé

Le monophasé convient bien pour les puissances relativement faibles, le triphasé s'impose pour les systèmes industriels « puissants ».

On préfère transporter l'énergie à l'aide de réseaux triphasés car:

- Un alternateur triphasé a un meilleur rendement qu'un alternateur monophasé;
- Les appareils fonctionnant en triphasé ont un meilleur rendement que ceux fonctionnant en monophasé;
- Le transport de l'énergie électrique est plus économique en triphasé, qu'en monophasé (moins de pertes en ligne, économie de fil conducteur. Par exemple : Pour une même masse de cuivre, on peut transporter plus d'énergie en triphasé);
- Les machines triphasées ont des puissances de plus de 50% supérieures aux machines monophasées de même masse et donc leurs prix sont moins élevés (le prix est directement proportionnel à la masse de la machine);
- Le moteur asynchrone triphasé est de conception simple, le plus économique et le plus robuste des moteurs.
- D'avoir plusieurs tensions à disposition (par exemple : 230 et 400 V).

# Systemes triphasés équilibrés

## □ Définition d'un système triphasé

- Un système triphasé équilibré de tension (ou de courant) est formé de 3 grandeurs sinusoïdales de même valeur efficace, de même fréquence et déphasées de  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres.
- Le réseau de distribution publique délivre un système triphasé équilibré de tensions.
- Les trois tensions d'un système triphasé équilibré direct, ont pour expressions:

$$v_1(t) = V\sqrt{2}\sin(\omega t)$$

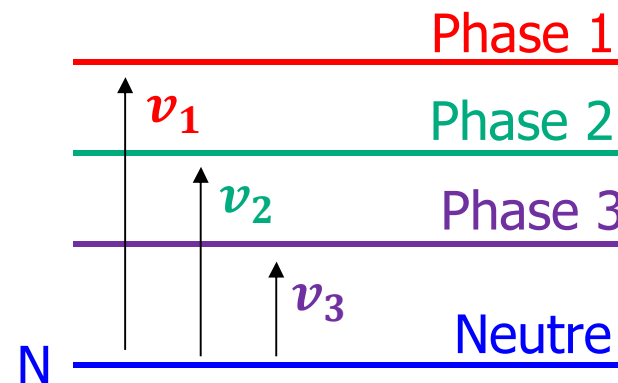
$$v_2(t) = V\sqrt{2}\sin(\omega t - 2\pi/3)$$

$$v_3(t) = V\sqrt{2}\sin(\omega t - 4\pi/3)$$

## Propriété:

- La somme de trois grandeurs sinusoïdales formant un système triphasé équilibré est nulle:

$$v_1(t) + v_2(t) + v_3(t) = 0$$

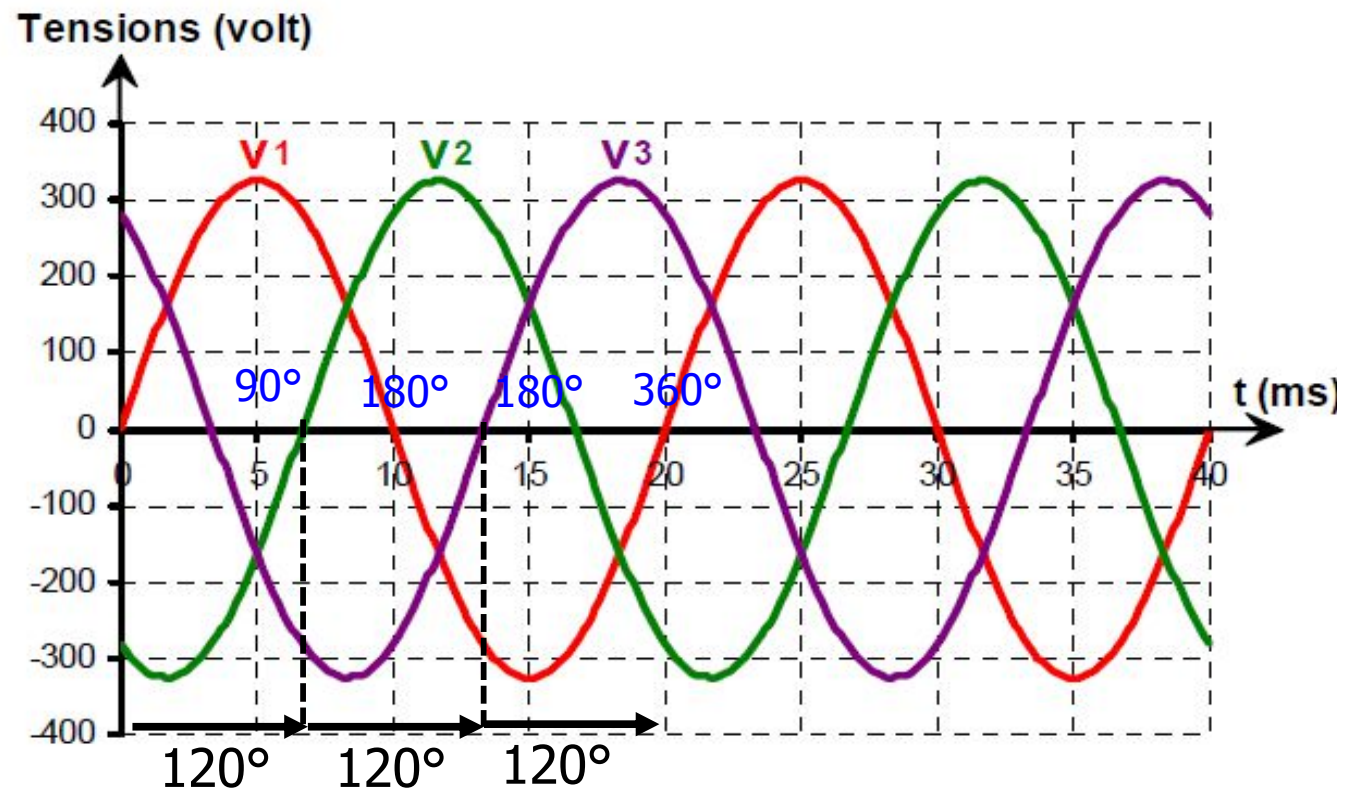


# Systemes triphasés équilibrés

## □ Représentation temporelle

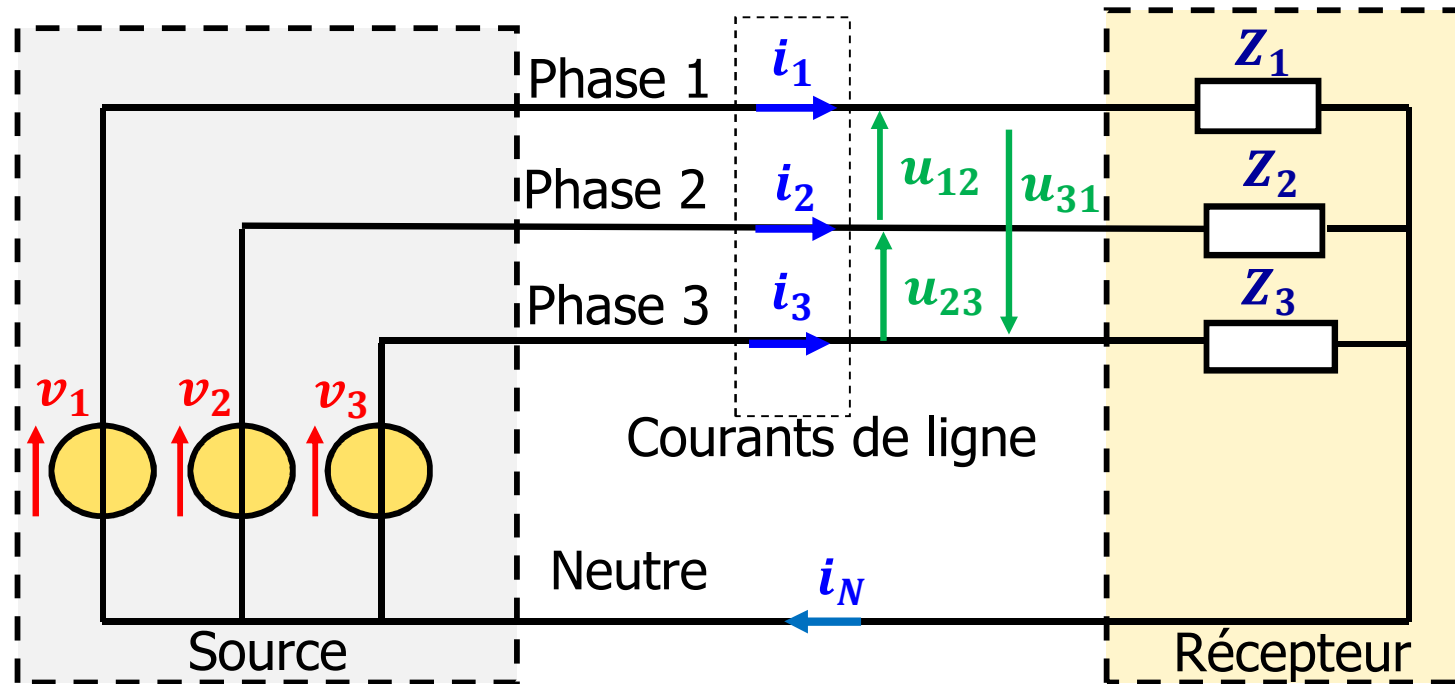
- Idéalement la tension des trois phases est indépendante de la charge, seul le courant de chaque phase dépend de la puissance de sortie.
- Lorsque les trois conducteurs sont parcourus par des courants de même valeur efficace, de même fréquence et déphasés de  $120^\circ$ , le système est dit équilibré.

- Les tensions sont sinusoïdales, elles ont la même valeur efficace (par exemple 230V) et la même fréquence 50Hz;
- Elles sont déphasées l'une par rapport à l'autre de  $120^\circ$ .



# Systemes triphasés équilibrés

## □ Tensions simples et tensions composées



- Les tensions simples présentent les différences de potentiels entre chaque fil de phase et le neutre, elle sont notées  $v_1$ ;  $v_2$ ;  $v_3$  de valeur efficace  $V = 220V$  pour le réseau de distribution publique.
- Les tensions composées sont les différences de potentiels entre deux phases différentes, elle sont notées  $u_{12} = v_1 - v_2$ ;  $u_{23} = v_2 - v_3$ ;  $u_{31} = v_3 - v_1$  de valeur efficace  $U = 380V$  pour le réseau de distribution publique.

# Systemes triphasés équilibrés

## □ Représentation de Fresnel

### Tensions simples:

- **Systeme direct:** les trois tensions apparaissent dans l'ordre 1; 2 et 3 (ordre des phases, les trois tensions passent l'une après l'autre par 0, d'abord  $v_1$  ensuite  $v_2$  et  $v_3$ ):

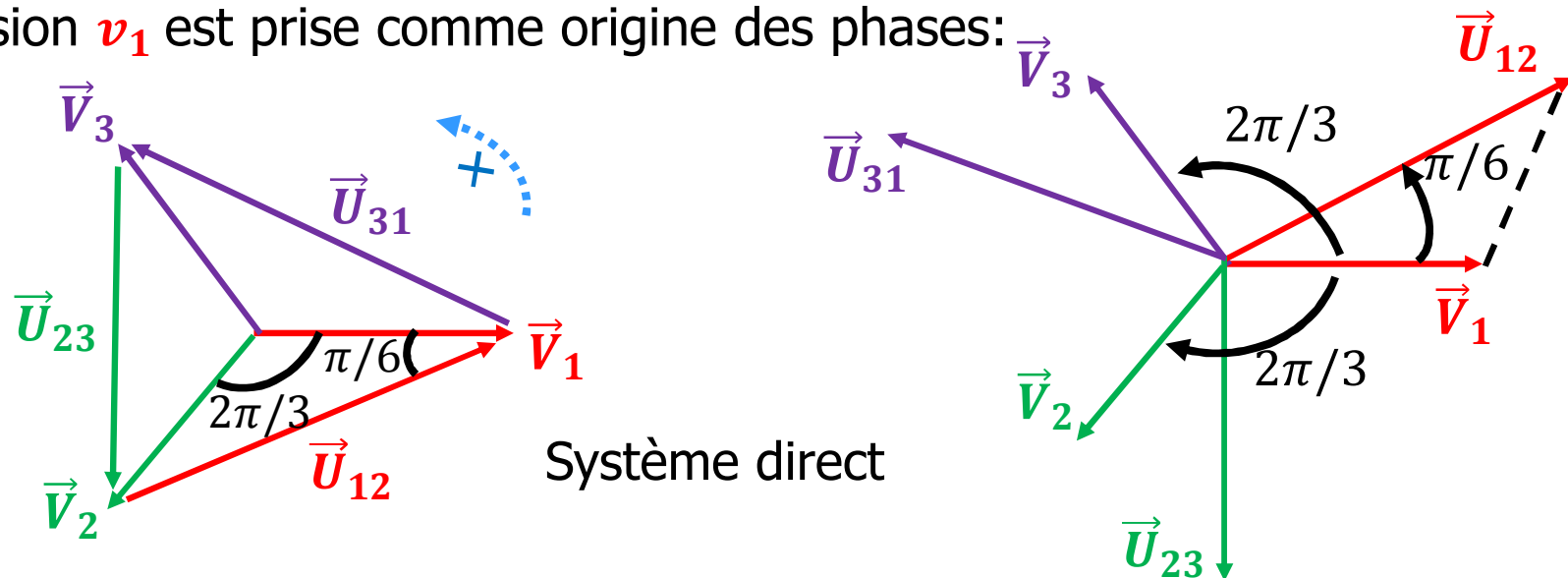
$$\begin{cases} v_1(t) = V\sqrt{2}\sin(\omega t) \\ v_2(t) = V\sqrt{2}\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_3(t) = V\sqrt{2}\sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases}$$

- **Systeme indirect:** les trois tensions apparaissent dans l'ordre 1; 3 et 2 (ordre des phases):

$$\begin{cases} v_1(t) = V\sqrt{2}\sin(\omega t) \\ v_3(t) = V\sqrt{2}\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_2(t) = V\sqrt{2}\sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases}$$

# Systemes triphasés équilibrés

- La tension  $v_1$  est prise comme origine des phases:



- La somme des tensions simples:  $v_1 + v_2 + v_3 = 0 \Leftrightarrow \vec{V}_1 + \vec{V}_2 + \vec{V}_3 = \vec{0}$

**Tensions composées:**

$$\begin{cases} u_{12}(t) = U\sqrt{2}\sin(\omega t + \pi/6) \\ u_{23}(t) = U\sqrt{2}\sin(\omega t - \pi/2) \\ u_{31}(t) = U\sqrt{2}\sin(\omega t - 7\pi/6) \end{cases}$$

- Si le réseau est équilibré direct, les trois tensions composées forment un système équilibré et direct, en avance de 30° sur les tensions simples.

$$u_{12} + u_{23} + u_{31} = 0 \Leftrightarrow \vec{U}_{12} + \vec{U}_{23} + \vec{U}_{31} = \vec{0}$$

- Valeur efficace de la tension composée: puisque  $U = 2V\cos(\pi/6)$ ; donc  $U = \sqrt{3}V$ .

## Systèmes triphasés équilibrés

### □ Expression complexe d'un système triphasé équilibré

- L'opérateur complexe  $\underline{a}$  de rotation est défini par:

$$\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}; \quad \underline{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}; \quad \underline{a}^3 = 1$$

- avec:  $1 + \underline{a}^2 + \underline{a} = 0$

Expression temporelle (système direct)	Expression complexe
$\begin{cases} v_1(t) = V\sqrt{2}\sin(\omega t) \\ v_2(t) = V\sqrt{2}\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_3(t) = V\sqrt{2}\sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases}$	$\begin{cases} \underline{V}_1 = Ve^{j0} = V \\ \underline{V}_2 = Ve^{-j\frac{2\pi}{3}} = Ve^{j\frac{4\pi}{3}} = \underline{a}^2.V \\ \underline{V}_3 = Ve^{-j\frac{4\pi}{3}} = Ve^{j\frac{2\pi}{3}} = \underline{a}.V \end{cases}$
$\begin{cases} u_{12}(t) = U\sqrt{2}\sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) \\ u_{23}(t) = U\sqrt{2}\sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \\ u_{31}(t) = U\sqrt{2}\sin(\omega t - \frac{7\pi}{6}) \end{cases}$	$\begin{cases} \underline{U}_{12} = \underline{V}_1 - \underline{V}_2 = (1 - \underline{a}^2)\underline{V}_1 = \sqrt{3}e^{j\frac{\pi}{6}}\underline{V}_1 = Ue^{j\frac{\pi}{6}} \\ \underline{U}_{23} = Ue^{-j\frac{\pi}{2}} = \underline{a}^2.\underline{U}_{12} = \underline{a}^2(1 - \underline{a}^2)\underline{V}_1 \\ \underline{U}_{31} = Ue^{-j\frac{7\pi}{6}} = \underline{a}.\underline{U}_{12} = \underline{a}(1 - \underline{a}^2)\underline{V}_1 \end{cases}$

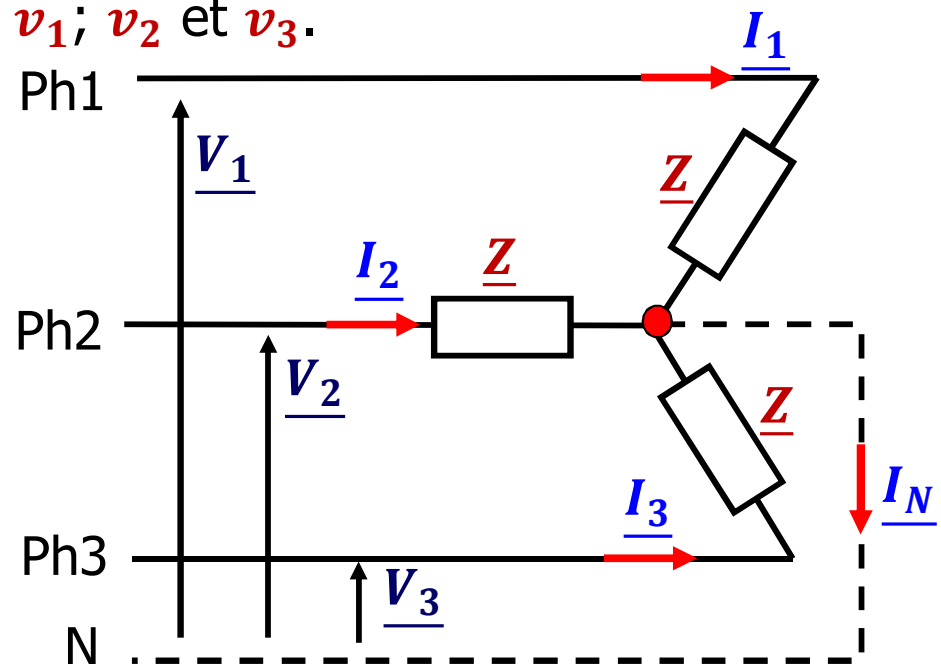
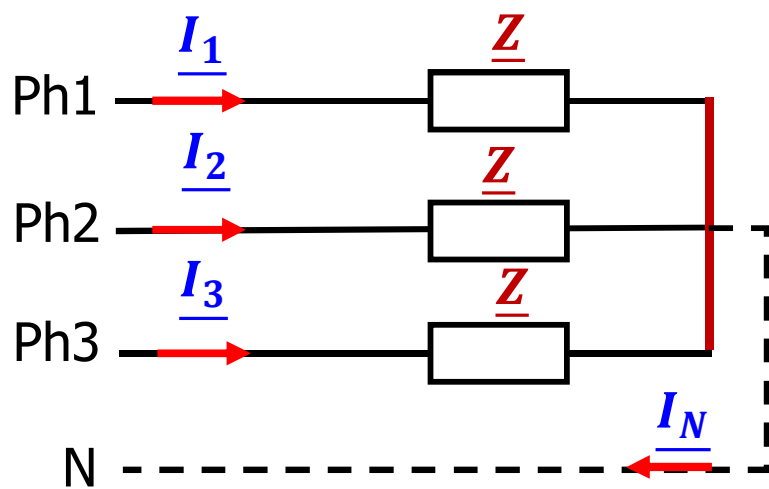
# Systemes triphasés équilibrés

## 3.2 Couplage en étoile et en triangle d'un récepteur triphasé

Le type de couplage des récepteurs permet de l'adapter au réseau disponible:

### □ Couplage en étoile (Y)

- Un récepteur triphasé est équilibré s'il est constitué de trois éléments identiques d'impédance  $\underline{Z}$ .
- La tension aux bornes d'un élément du récepteur est la tension simple.
- Le courant qui traverse chaque élément (ou phase) du récepteur est le **courant en ligne** (courant dans les fils du réseau triphasé).
- Les courants  $i_1$ ;  $i_2$  et  $i_3$  ont même valeur efficace  $I$  et même déphasage  $\varphi$  par rapport aux tensions respectives  $v_1$ ;  $v_2$  et  $v_3$ .



# Systemes triphasés équilibrés

## □ Représentation de Fresnel des courants en ligne

- Expression des courants en ligne:

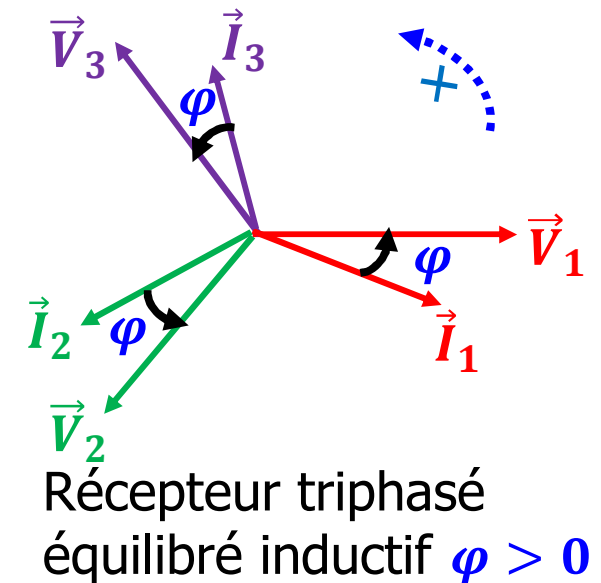
$$\begin{cases} i_1(t) = I\sqrt{2}\sin(\omega t - \varphi) \\ i_2(t) = I\sqrt{2}\sin(\omega t - 2\pi/3 - \varphi) \\ i_3(t) = I\sqrt{2}\sin(\omega t - 4\pi/3 - \varphi) \end{cases}$$

Avec:  $I = \frac{V}{Z}$  ;  $Z = |\underline{Z}|$  ;  $\varphi = \text{arg}(\underline{Z})$

- Dans un couplage en étoile équilibré, on peut écrire:  $i_1 + i_2 + i_3 = i_N = 0$
- Les courants en ligne forment un système triphasé équilibré. Le conducteur de neutre ne joue aucun rôle ( $i_N = 0$ ) et peut être supprimé.

### Remarque:

- Le réseau triphasé industriel comporte des récepteurs triphasés (usagers industriels) et des récepteurs monophasés (usagers domestiques), il ne peut être équilibré en courant ( $i_N \neq 0$ ); l'installation est déséquilibrée.
- En pratique, il ne faut pas supprimer le conducteur de neutre; dans un réseau de distribution d'énergie, le neutre est fréquemment relié à la terre.



# Systemes triphasés équilibrés

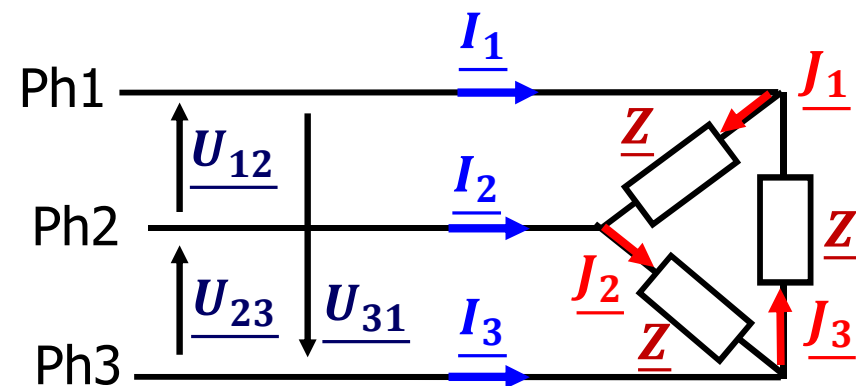
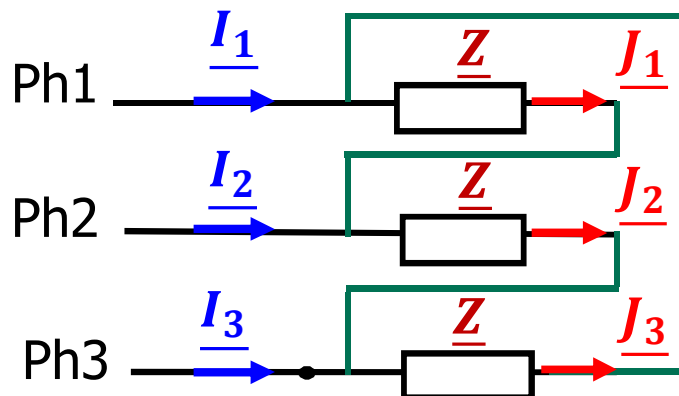
## □ Couplage en triangle ( $\Delta$ )

- La tension aux bornes d'un élément du récepteur est la tension composée;
- Le courant qui traverse chaque élément (phase) du récepteur est appelé courant de phase;
- Le neutre n'est pas utilisé.
- Relation entre les courants en ligne  $i$  et de phase  $j$ :

$$\begin{cases} i_1 = j_1 - j_3 \\ i_2 = j_2 - j_1 \\ i_3 = j_3 - j_2 \end{cases}$$

- Il n'y a pas de fil de neutre:  $i_1 + i_2 + i_3 = 0$

**Remarque:** Dans un couplage étoile, les courants de ligne et de phase sont les mêmes:  $i_1 = j_1$  ;  $i_2 = j_2$  ;  $i_3 = j_3$  ;



# Systemes triphasés équilibrés

## □ Représentation de Fresnel des courants

- Expression des courants de phase:

$$\begin{cases} j_1(t) = J\sqrt{2}\sin(\omega t - \varphi + \pi/6) \\ j_2(t) = J\sqrt{2}\sin(\omega t - \varphi - \pi/2) \\ j_3(t) = J\sqrt{2}\sin(\omega t - \varphi - 7\pi/6) \end{cases}$$

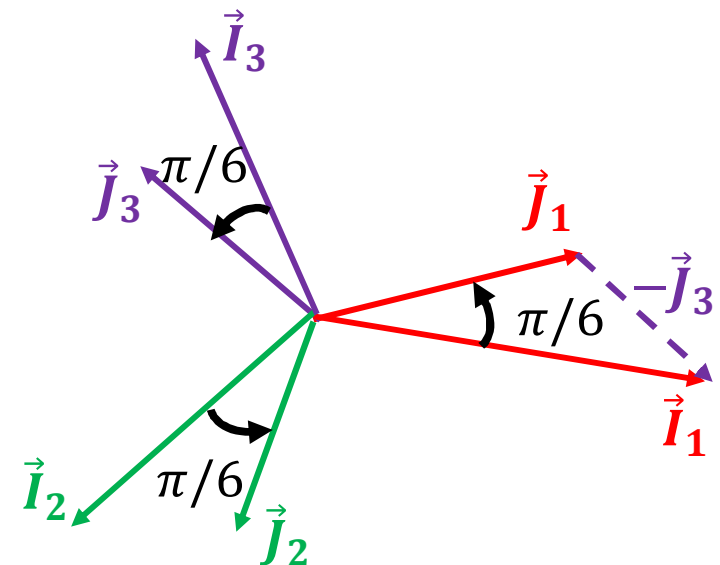
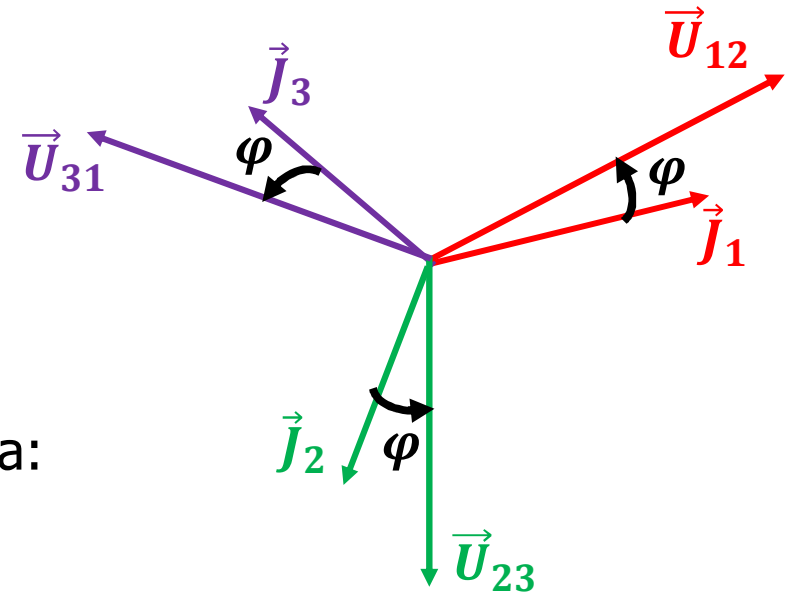
Avec:  $J = \frac{U}{Z}$ ;  $Z = |Z|$ ;  $\varphi = \arg(Z)$

- Dans un couplage en triangle équilibré, on a:

$$j_1 + j_2 + j_3 = 0 \Leftrightarrow \vec{J}_1 + \vec{J}_2 + \vec{J}_3 = \vec{0}$$

- Les courants de phase forment un système triphasé équilibré en avance de  $30^\circ$  (pour un système direct) sur les courants en ligne.
- Les valeurs efficaces des courants de ligne et de phase sont liées par la relation:  $I = \sqrt{3}J$ .

**Remarque:** le déphasage  $\varphi$  de la tension simple par rapport au courant en ligne est aussi le déphasage de la tension composée par rapport au courant de phase.



# Systemes triphasés équilibrés

## □ Schéma monophasé équivalent

- Dans les circuits triphasés, on peut étudier une phase, puisque les deux autres phases sont identiques à  $2\pi/3$  ou  $4\pi/3$  près.
- Une installation triphasée équilibrée en tensions et en courants, peut se ramener à un schéma équivalent monophasé entre phase et neutre, quel que soit le couplage des charges de l'installation.
- Les schémas monophasés équivalents, sont plus simples. Les grandeurs  $\underline{V}$  et  $\underline{I}$  sont toujours accessibles et mesurables (neutre réel ou artificiel).

## Couplage en étoile:

- On a:  $\underline{V}_1 = \underline{Z} \cdot \underline{I}_1$  ;  $\underline{V}_2 = \underline{Z} \cdot \underline{I}_2$  ;  $\underline{V}_3 = \underline{Z} \cdot \underline{I}_3$
- Donc:  $\underline{V} = \underline{Z} \cdot \underline{I}$

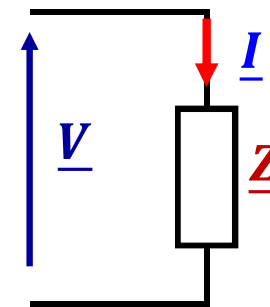
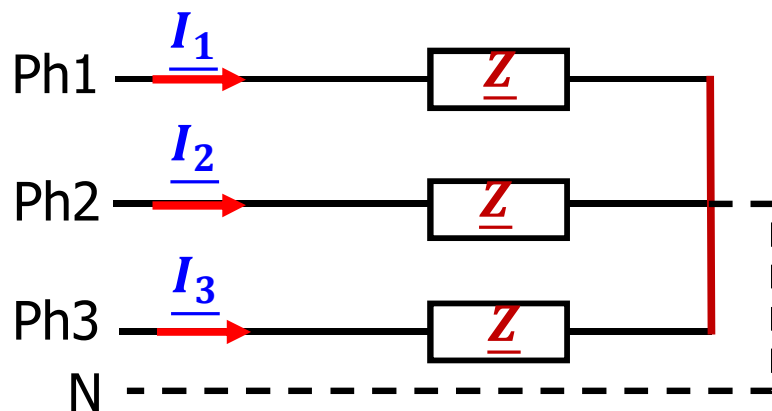


Schéma monophasé équivalent

# Systemes triphasés équilibrés

## Couplage en triangle:

Le schéma d'un récepteur triphasé en triangle, d'impédance  $\underline{Z}$ , entre phases est équivalent au schéma triphasé en étoile d'impédance  $\underline{Z}/3$  entre phase et neutre.

- On a:  $\underline{J}_1 = (\underline{V}_1 - \underline{V}_2)/\underline{Z}$  ;  $\underline{J}_2 = (\underline{V}_2 - \underline{V}_3)/\underline{Z}$  ;  $\underline{J}_3 = (\underline{V}_3 - \underline{V}_1)/\underline{Z}$
- On peut écrire:

$$\underline{I}_1 = \underline{J}_1 - \underline{J}_3 = (\underline{V}_1 - \underline{V}_2 - \underline{V}_3 + \underline{V}_1)/\underline{Z} ;$$

$$\underline{I}_2 = \underline{J}_2 - \underline{J}_1 = (\underline{V}_2 - \underline{V}_3 - \underline{V}_1 + \underline{V}_2)/\underline{Z} ;$$

$$\underline{I}_3 = \underline{J}_3 - \underline{J}_2 = (\underline{V}_3 - \underline{V}_1 - \underline{V}_2 + \underline{V}_3)/\underline{Z} ;$$

- Puisque:  $\underline{V}_1 + \underline{V}_2 + \underline{V}_3 = 0$
- Alors:  $\underline{I}_1 = 3\underline{V}_1/\underline{Z}$  ;  $\underline{I}_2 = 3\underline{V}_2/\underline{Z}$  ;  $\underline{I}_3 = 3\underline{V}_3/\underline{Z}$  ;
- Donc:  $\underline{V} = \underline{Z}_Y \underline{I} \Rightarrow \underline{Z}_Y = \underline{Z}_\Delta/3$

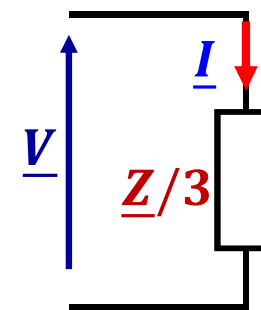
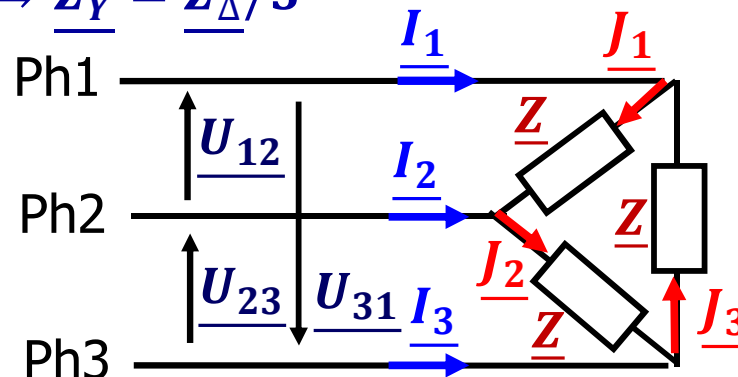


Schéma monophasé équivalent

# Systemes triphasés équilibrés

## 3.3 Puissance en triphasé équilibré

Le système est supposé équilibré, le récepteur comporte trois phases identiques. Les courants  $i_1$ ,  $i_2$  et  $i_3$  ont donc la même valeur efficace  $I$  et le même déphasage  $\varphi$  par rapport aux tensions respectives  $v_1$ ,  $v_2$  et  $v_3$ .

Couplage en étoile	Couplage en triangle
<p>Chaque élément du récepteur est soumis à une tension simple <math>V</math> et parcouru par un courant en ligne <math>I</math>.</p> <p>On a: <math>U = \sqrt{3}V</math></p> <p><b>Puissance active:</b> Théorème de Boucherot</p> $P_Y = 3VI_Y \cos\varphi = \sqrt{3}UI \cos\varphi$ <p><b>Puissance réactive:</b></p> $Q_Y = 3VI_Y \sin\varphi = \sqrt{3}UI \sin\varphi$ <p><b>Puissance apparente:</b></p> $S_Y = 3VI_Y = \sqrt{3}UI$	<p>Chaque élément du récepteur est soumis à une tension composée <math>U</math> et parcouru par un courant de phase <math>J</math>.</p> <p>On a: <math>I_\Delta = \sqrt{3}J</math></p> <p><b>Puissance active:</b></p> $P_\Delta = 3UJ \cos\varphi = \sqrt{3}UI_\Delta \cos\varphi$ <p><b>Puissance réactive:</b></p> $Q_\Delta = 3UJ \sin\varphi = \sqrt{3}UI_\Delta \sin\varphi$ <p><b>Puissance apparente:</b></p> $S_\Delta = 3UJ = \sqrt{3}UI_\Delta$

**Remarque:** Pour les récepteurs équilibrés et quel que soit le couplage, on peut écrire:  $P = \sqrt{3}UI \cos\varphi$  ;  $Q = \sqrt{3}UI \sin\varphi$  ;  $S = \sqrt{3}UI$

# Systemes triphasés équilibrés

## □ Comparaison couplage étoile/triangle

Pour un récepteur triphasé équilibré donné, d'impédance  $Z$  et de facteur de puissance  $\cos\varphi$ .

- En étoile, le courant en ligne est:

$$I_Y = \frac{V}{Z}$$

- En triangle, le courant de phase est:

$$J = \frac{U}{Z} ; I_{\Delta} = \sqrt{3}J = \sqrt{3} \frac{U}{Z} = 3 \frac{V}{Z}$$

- Soit:

$$I_{\Delta} = 3I_Y$$

- La puissance active:

$$P_{\Delta} = \sqrt{3}UI_{\Delta}\cos\varphi = 3(\sqrt{3}UI_Y\cos\varphi) \Rightarrow P_{\Delta} = 3P_Y$$

Le même récepteur, branché en triangle, consomme une puissance 3 fois plus grande qu'en étoile.

## Application:

- Démarrage étoile-triangle des moteurs asynchrones triphasés (changement de couplage pour réduire l'intensité du courant de démarrage).

# Systemes triphasés équilibrés

## 3.4 Mesure de puissances en triphasé

- Un wattmètre permet de mesurer la puissance active consommée par un dipôle. Il est constitué de deux circuits, l'un parcouru par le même courant que le dipôle, l'autre soumis à la même tension que le dipôle.
- L'indication donnée par le wattmètre:  $W = \langle v(t)i(t) \rangle$
- En régime sinusoïdal, il indique une valeur algébrique:

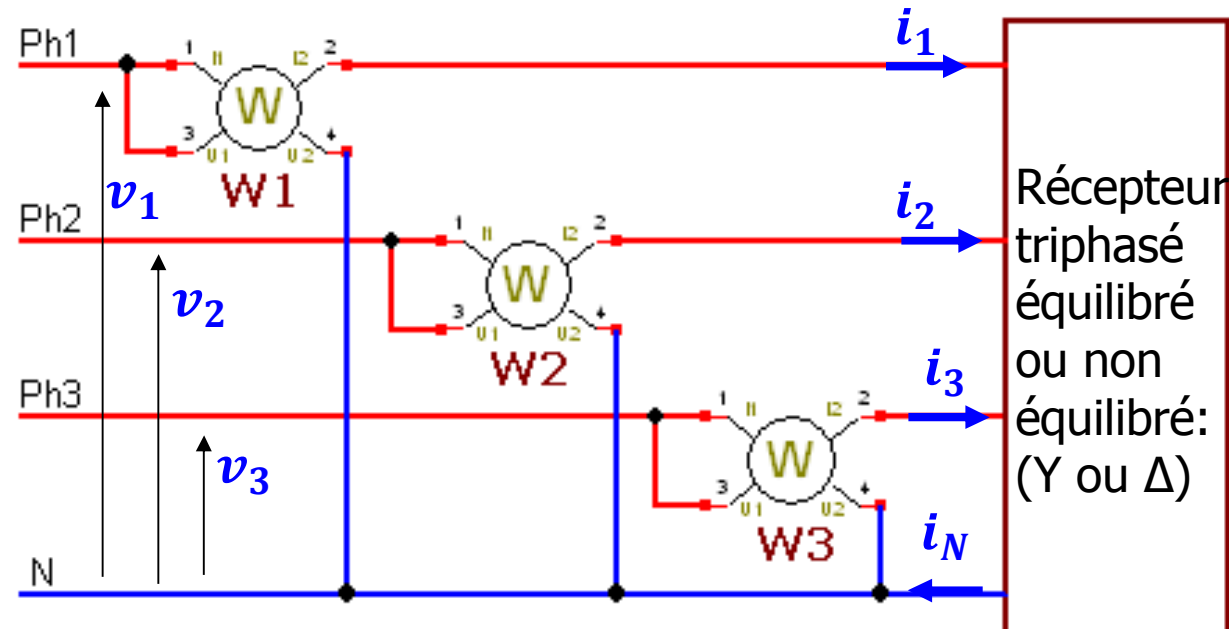
$$W = \langle v(t)i(t) \rangle = VI \cos \varphi = VI \cos(\vec{I}, \vec{V}) = \vec{V} \cdot \vec{I}$$

### □ Méthode générale

Chaque wattmètre indique la puissance d'une phase.

- La puissance triphasée est la somme algébrique des puissances lues sur chaque wattmètre:

$$P = \langle v_1 i_1 + v_2 i_2 + v_3 i_3 \rangle \\ = W_1 + W_2 + W_3$$



# Systemes triphasés équilibrés

## Remarque:

- Si le point neutre n'est pas accessible, il faut relier en étoile les 3 sorties des circuits tension des wattmètres (de même résistance), ou réaliser un neutre artificiel en connectant sur le réseau trois résistances de grande valeur ou trois réactances identiques.

## □ Mesure de P avec un wattmètre

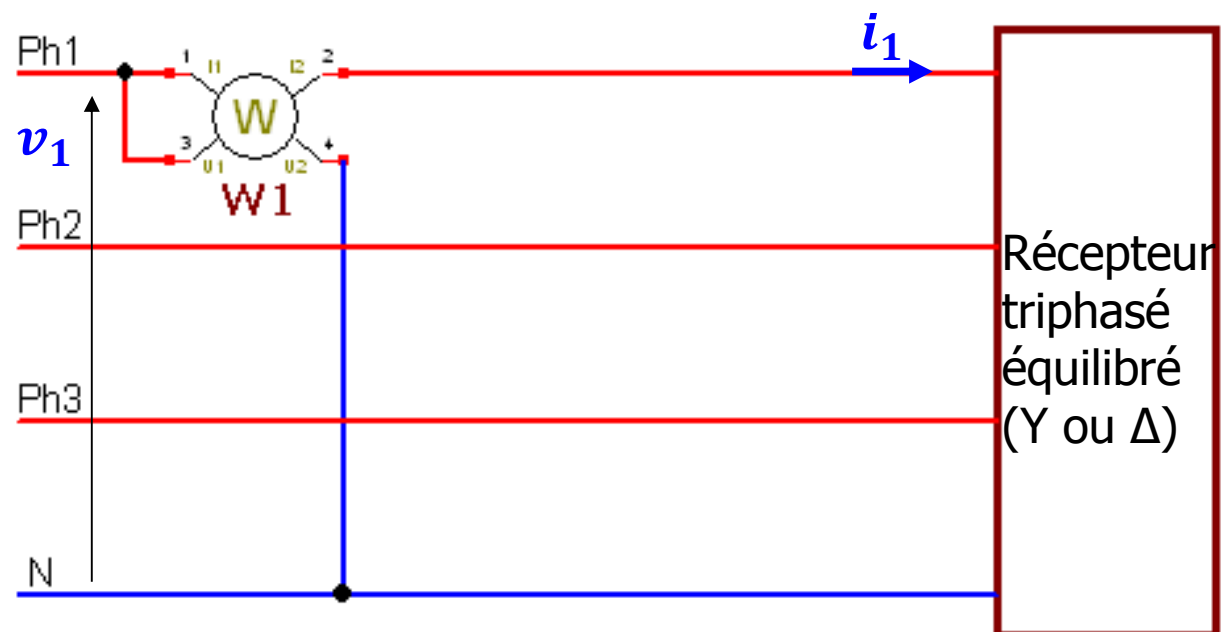
- Pour un circuit équilibré, chaque phase consomme une puissance identique, il faut un wattmètre:
- L'indication fournit par le wattmètre est:  $W_1 = \vec{V}_1 \cdot \vec{I}_1 = VI \cos \varphi$

La puissance active est:

$$P = 3VI \cos \varphi$$

$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi$$

$$P = 3W_1$$



# Systemes triphasés équilibrés

## □ Mesure de Q avec un wattmètre

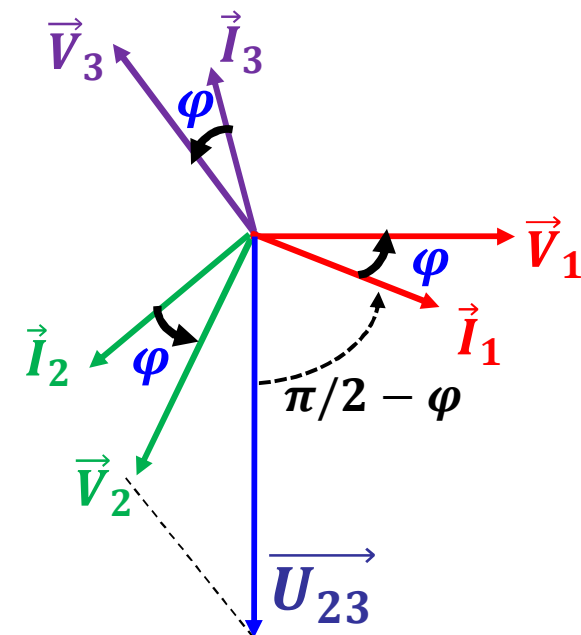
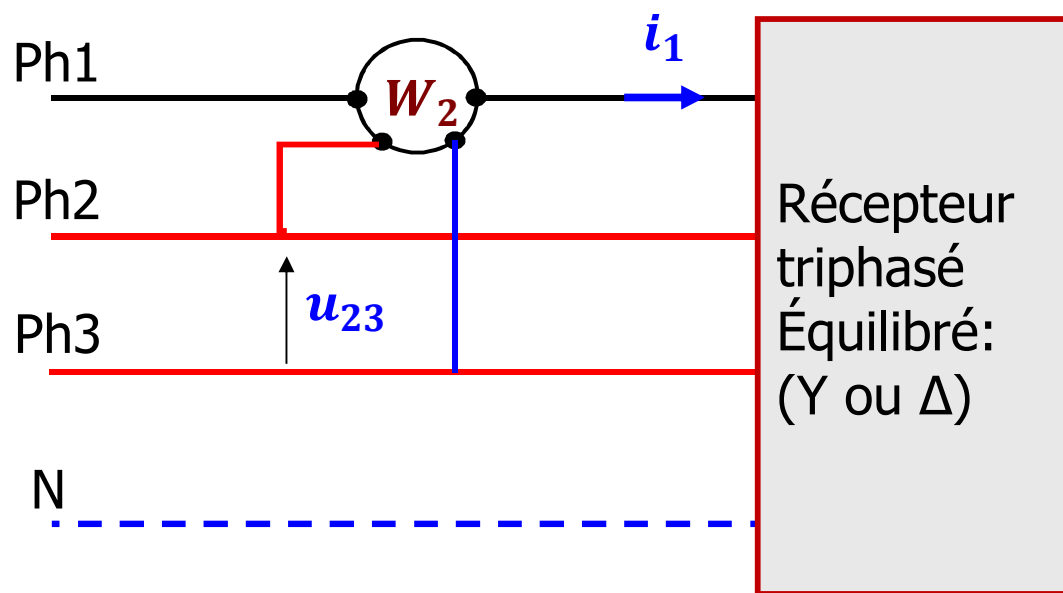
Pour un récepteur équilibré, chaque phase consomme une puissance identique.

- Le wattmètre indique:

$$W_2 = \vec{U}_{23} \cdot \vec{I}_1 = UI \cos(\vec{I}_1, \vec{U}_{23}) = UI \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = UI \sin\varphi$$

- La puissance réactive est:

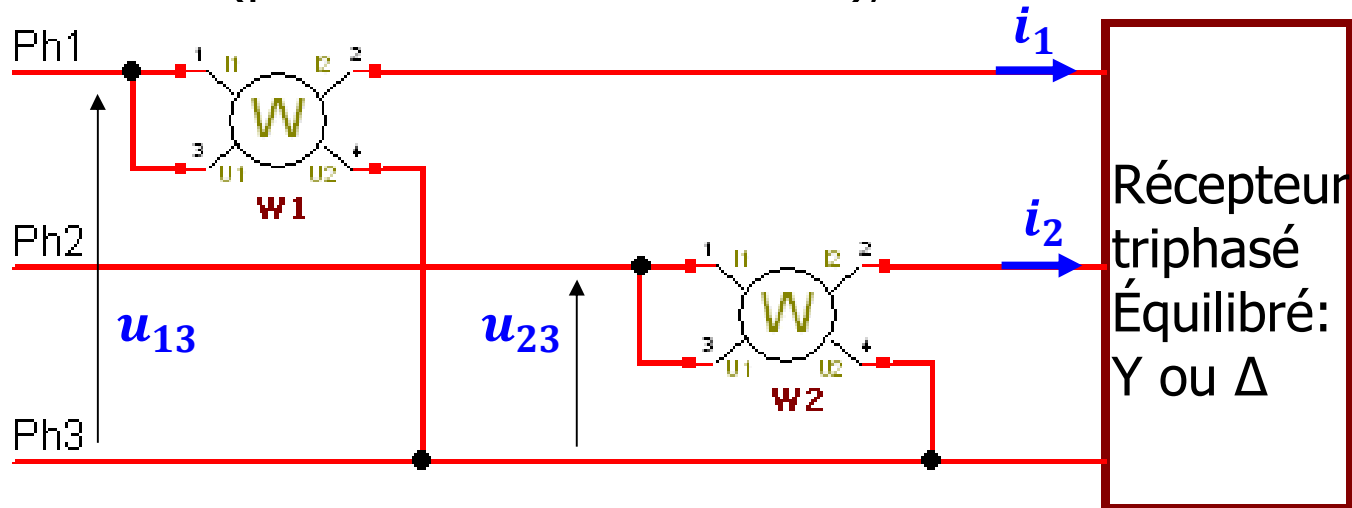
$$Q = \sqrt{3}W_2$$



# Systemes triphasés équilibrés

## □ Mesure avec deux wattmètres

En triphasé 3 fils (pas de conducteur neutre), deux wattmètres sont suffisants.



- La somme des indications des deux wattmètres donne:

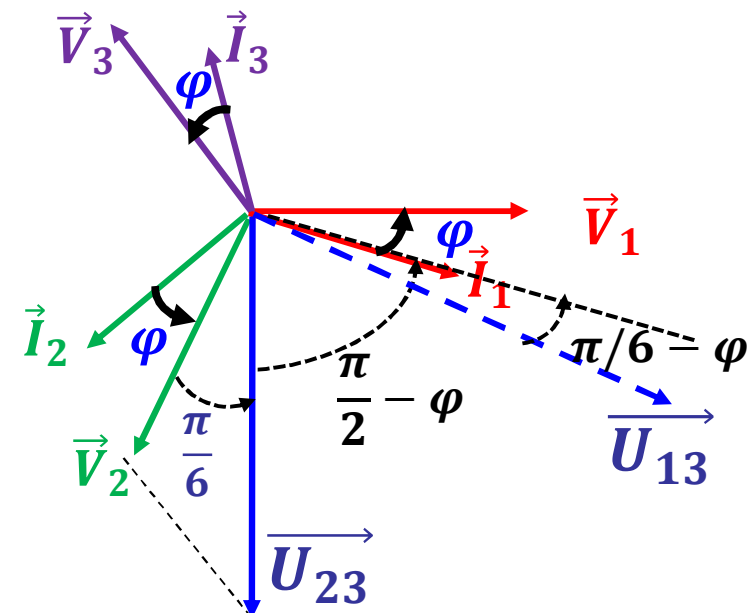
$$\begin{aligned} W_1 + W_2 &= \overrightarrow{U_{13}} \cdot \overrightarrow{I_1} + \overrightarrow{U_{23}} \cdot \overrightarrow{I_2} \\ &= UI \cos(\pi/6 - \varphi) + UI \cos(\pi/6 + \varphi) \\ &= 2UI \cos \pi/6 \cdot \cos \varphi \end{aligned}$$

- On obtient:

$$W_1 + W_2 = \sqrt{3} UI \cos \varphi$$

- La puissance active est:

$$P = W_1 + W_2$$



# Systemes triphasés équilibrés

## □ Mesure avec deux wattmètres

- La différence des indications des deux wattmètres donne:

$$W_1 - W_2 = UI \cos(\pi/6 - \varphi) - UI \cos(\pi/6 + \varphi) = 2UI \sin \pi/6 \cdot \sin \varphi$$

- On obtient:

$$W_1 - W_2 = UI \sin \varphi$$

- La puissance réactive est:

$$Q = \sqrt{3}(W_1 - W_2)$$

# Systemes triphasés équilibrés

## 3.5 Relèvement du facteur de puissance en triphasé

- Le facteur de puissance est  $f_p = P/S$ ;
- En régime sinusoïdal triphasé équilibré  $f_p = \cos\varphi$ ;
- Une charge triphasée appelle un courant en ligne  $I = \frac{P}{\sqrt{3}U\cos\varphi}$ ;
- Si on améliore le facteur de puissance, le courant dans la ligne sera plus petit (les pertes en ligne aussi) (mais, si  $f_p \searrow \Rightarrow I \nearrow \Rightarrow \text{pertes en ligne} \nearrow$ ). Il arrive que les distributeurs facturent l'énergie réactive excédentaire (usine).
- L'amélioration du facteur de puissance ( $f_p$  proche de 1) s'effectue au moyen d'une batterie de condensateurs (batterie de compensation).

Puissances	Avant compensation	Après compensation
Puissance active	$P_1$	$P_1$
Puissance réactive	$Q_1$	$Q_2 < Q_1$
Puissance apparente	$S_1$	$S_2 < S_1$
Facteur de puissance	$\cos\varphi_1$	$\cos\varphi_2 > \cos\varphi_1$
Courant en ligne	$I = S_1/(\sqrt{3}U)$	$I' = S_2/(\sqrt{3}U) < I$

# Systemes triphasés équilibrés

- D'après le théorème de Boucherot, la puissance réactive que doit fournir la batterie de compensation est:  $Q_c = Q_2 - Q_1 = P_1(\tan\varphi_2 - \tan\varphi_1) < 0$

## ❖ Couplage en étoile des condensateurs:

- Tension aux bornes d'un condensateur:  $V$
- Puissance réactive absorbée par les trois condensateurs:

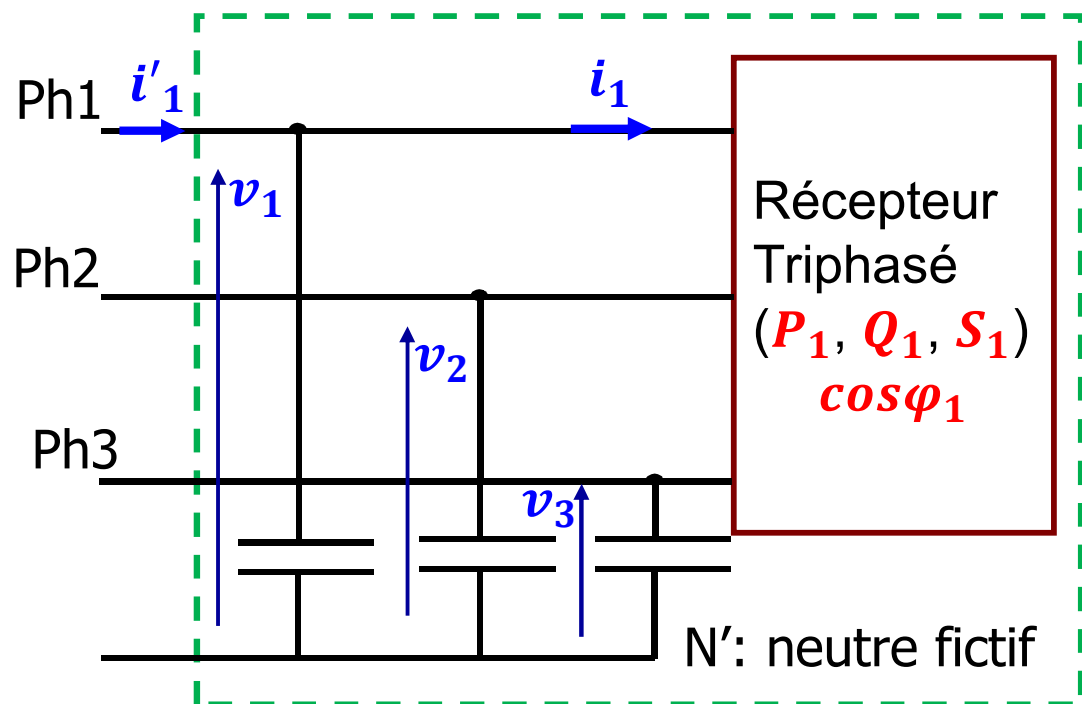
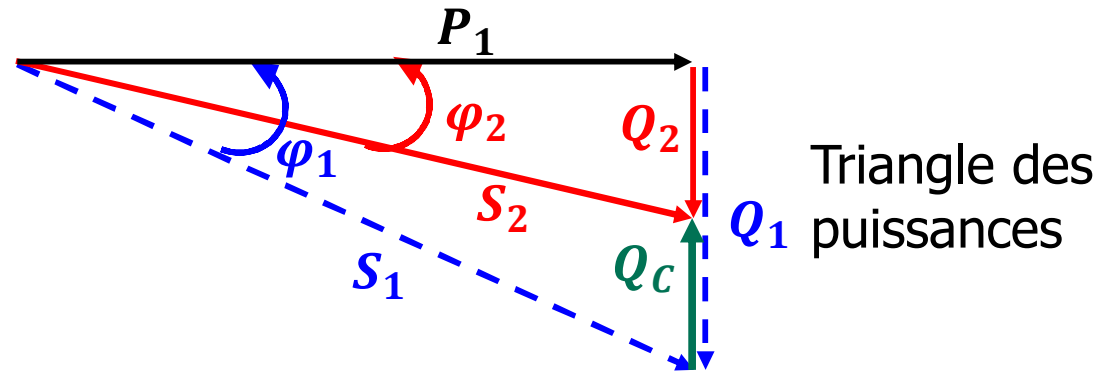
$$Q_c = -3C\omega V^2 = -C\omega U^2$$

- La capacité du condensateur est:

$$C = \frac{P_1(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2)}{\omega U^2}$$

**Remarque:** après compensation:

- Puissances vues par le réseau:  $(P_1, Q_2, S_2)$ ;
- Facteur de puissance:  $f'_p = \cos\varphi_2$



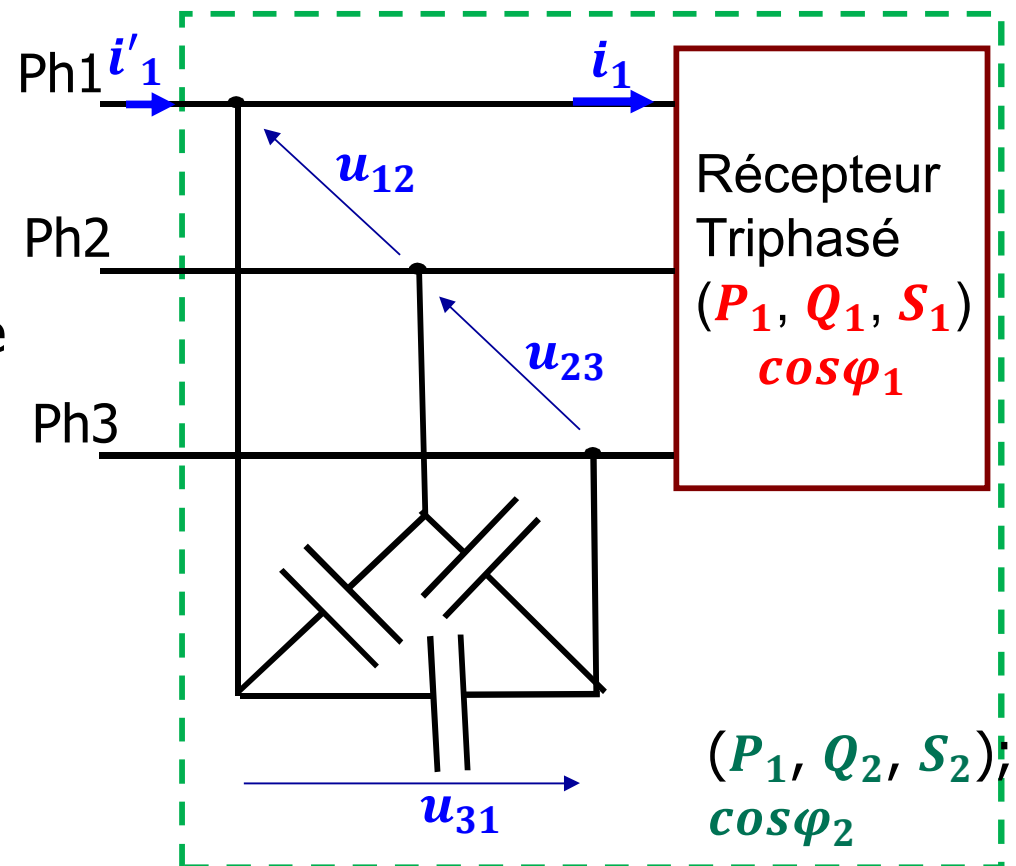
# Systemes triphasés équilibrés

## ❖ Couplage en triangle des condensateurs:

- Tension aux bornes d'un condensateur:  $U$
- Puissance réactive de compensation à installer:  $Q_C = -3C\omega U^2$
- La capacité du condensateur est:  $C = \frac{P_1(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2)}{3\omega U^2}$
- Le couplage en triangle est donc plus intéressant puisque la capacité des condensateurs nécessaires est trois fois plus petite que pour le couplage en étoile  $C_\Delta = C_Y/3$ .
- Plus la capacité est grande, plus le condensateur est volumineux et onéreux.

## Conclusion: après compensation:

- Diminution des pertes en ligne;
- Diminution de la section des câbles;
- Réduction de la chute de tension sur le réseau d'alimentation.



# Systemes triphasés équilibrés

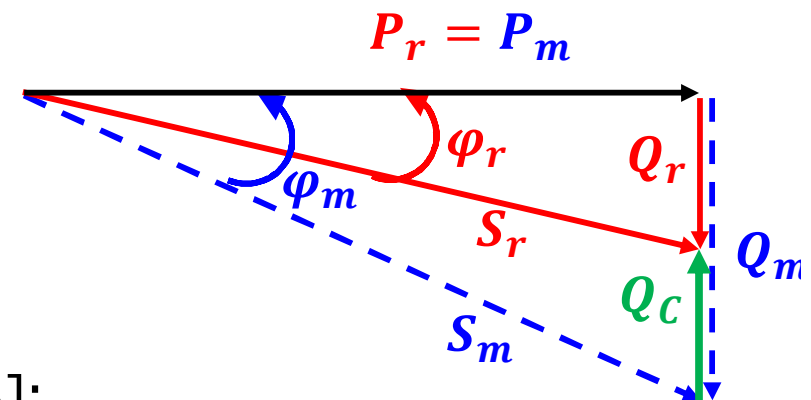
## Exemple:

Un moteur triphasé absorbe un courant de **85A** et crée un déphasage de **50 degrés**.

1. Calculer la valeur de la capacité des condensateurs à brancher en triangle pour avoir un facteur de puissance de **0,9** au réseau (**230V/400V**).
2. Calculer le courant en ligne fournit par le réseau après compensation.

## Grandeurs utilisées:

- $P_m$ : Puissance active du moteur [W];
- $S_m$ : Puissance apparente du moteur [VA];
- $Q_m$ : Puissance réactive du moteur [var];
- $f_m$ : Facteur de puissance du moteur;
- $P_r$ : Puissance active vue du réseau [W];
- $S_r$ : Puissance apparente vue du réseau [VA];
- $Q_r$ : Puissance réactive vue du réseau [var];
- $f_r$ : Facteur de puissance du réseau;
- $Q_c$ : Puissance réactive de la batterie de compensation [var];
- $C$ : Capacité de chaque condensateur;



Triangle des puissances

# Systemes triphasés équilibrés

## Réponse:

1. Capacité des condensateurs de compensation:

- Puissance active du moteur:

$$P_m = \sqrt{3}UI\cos\varphi_m = 400 \times 85 \times 0,6428 \times 1,732 = 37,85 \text{ kW}$$

- Puissance réactive du moteur:

$$Q_m = P_m \tan\varphi_m = 37,85 \times 1,192 = 45,12 \text{ kvar}$$

- Puissance active du réseau:

$$P_r = P_m = 37,85 \text{ kW}$$

- Puissance réactive du réseau:

$$Q_r = P_r \tan\varphi_r = 37,85 \times 0,4843 = 18,33 \text{ kvar}$$

- Puissance réactive de la batterie de compensation:

$$Q_c = Q_r - Q_m = 18,33 - 45,12 = -26,79 \text{ kvar}$$

- Capacité de chaque condensateur:

$$C = -\frac{Q_c}{3\omega U^2} = \frac{26790}{3 \times 314 \times 400^2} = 177,6 \mu\text{F}$$

2. Courant en ligne fourni par le réseau:

$$I_r = \frac{P_r}{\sqrt{3}U\cos\varphi_r} = 60,70 \text{ A}$$

# Systemes triphasés équilibrés

## 4. Transformateur triphasé

### 4.1 Rôle:

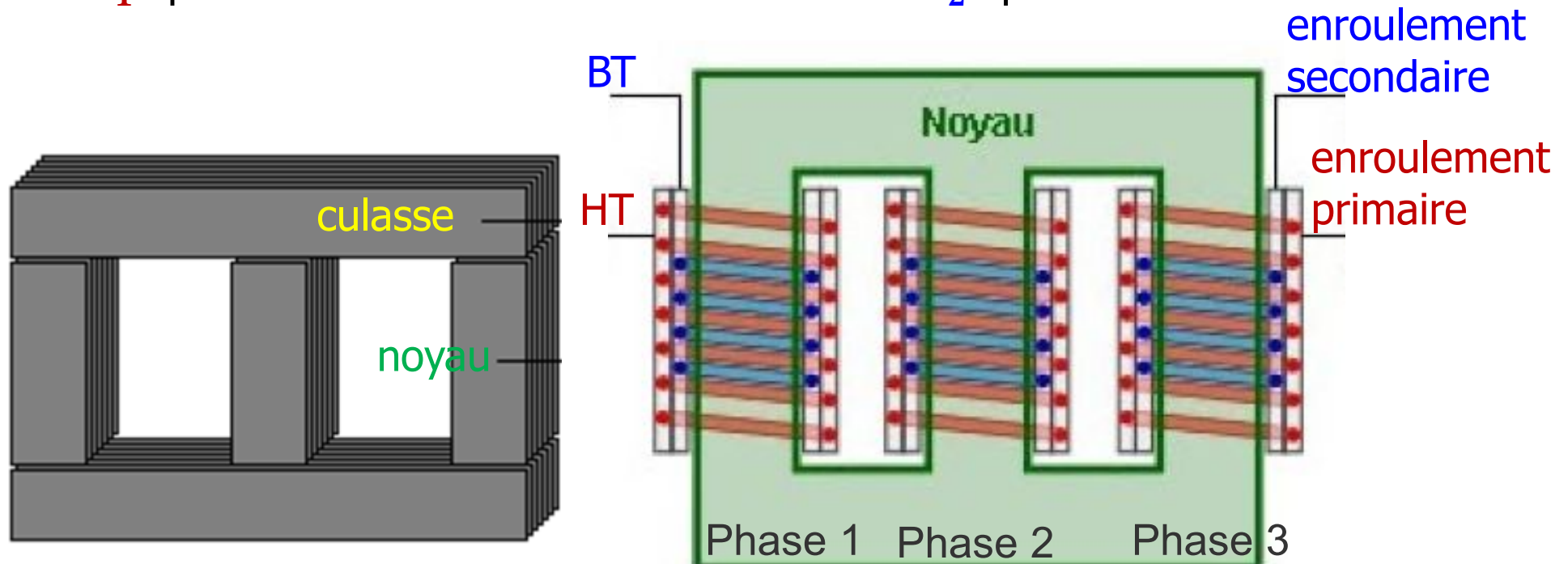
Un transformateur triphasé permet d'élever la tension à la sortie des centrales électriques pour le transport sur de longues distances afin de diminuer les pertes en ligne et de réduire le dimensionnement des conducteurs, et d'abaisser la tension à l'arrivée pour l'adapter aux besoins des consommateurs.



# Systemes triphasés équilibrés

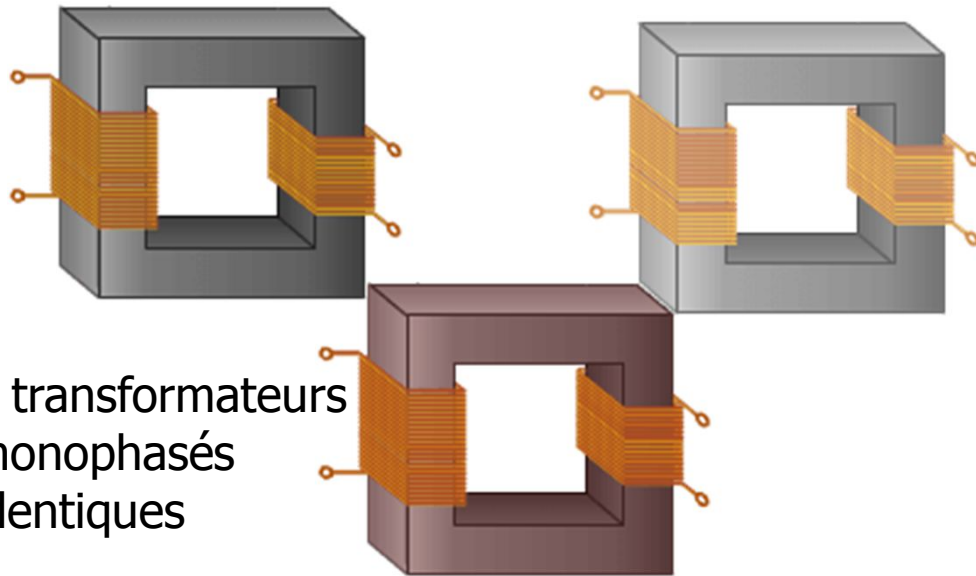
## 4.2 Constitution:

- Circuit magnétique constitué d'un empilage de tôles d'acier au silicium qui canalise le flux magnétique, il est composé de trois noyaux fermés par deux culasses;
- Circuit électrique qui comprend trois enroulements primaires et trois enroulements secondaires;
- Sur chaque noyau on monte concentriquement un enroulement primaire de  $N_1$  spires et un enroulement secondaire de  $N_2$  spires.

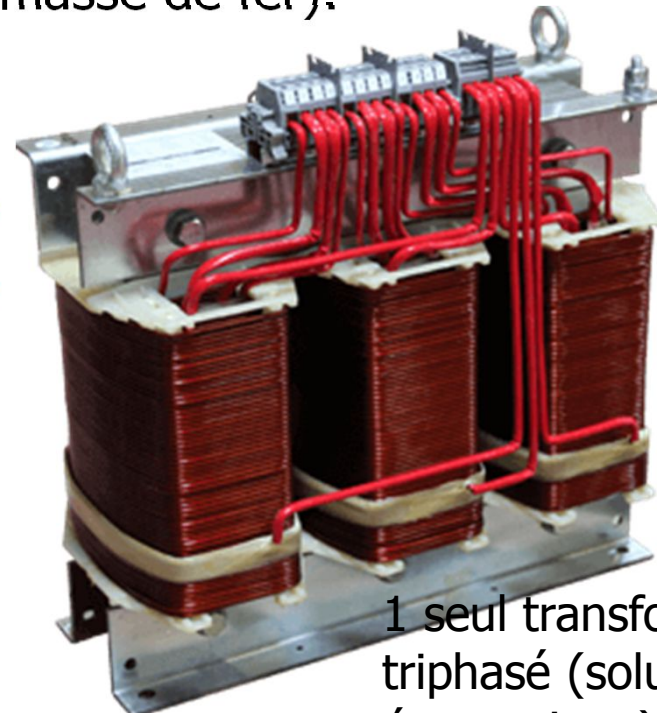


# Systemes triphasés équilibrés

- Il est possible de coupler 3 transformateurs monophasés identiques pour obtenir un transformateur triphasé. Mais cette solution est plus encombrante et complexe (augmente la masse de fer).

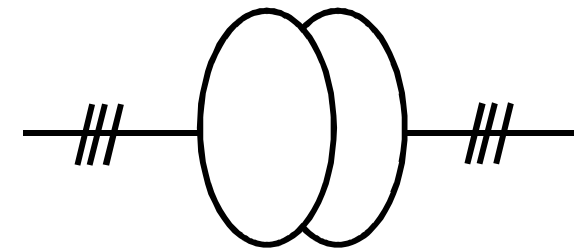
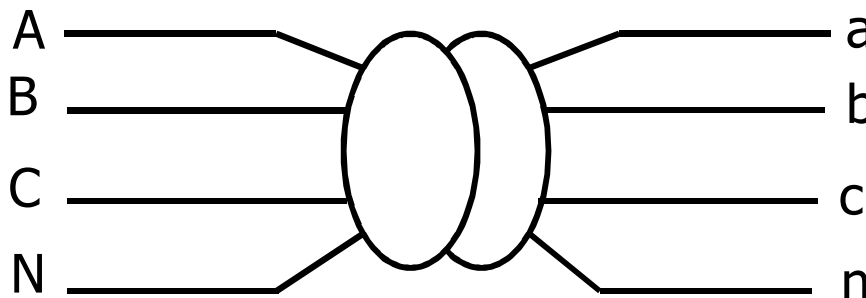


3 transformateurs monophasés identiques



1 seul transformateur triphasé (solution plus économique)

## ❖ Représentation symbolique:

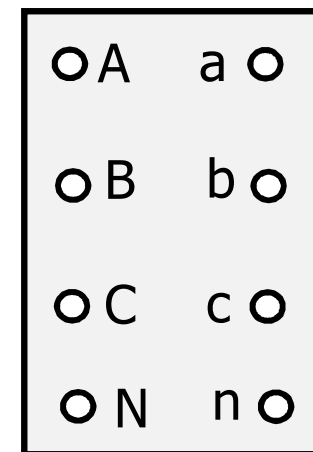
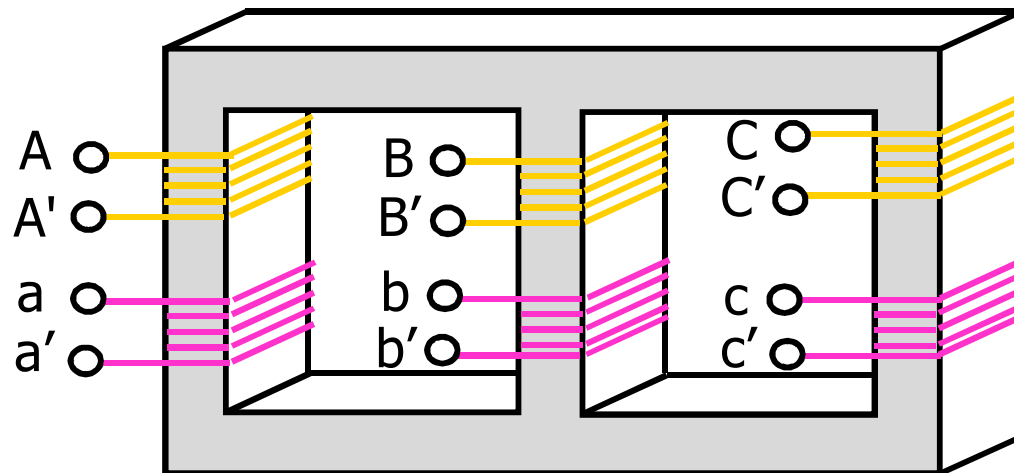


# Systemes triphasés équilibrés

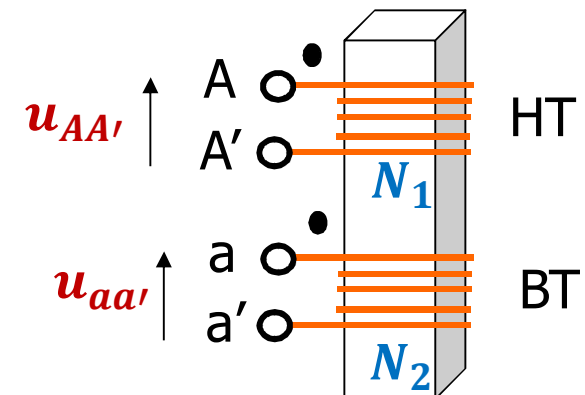
## 4.3 Couplage des enroulements

Repérage de la plaque à bornes des connections du transformateur:

- On indique par des lettres majuscules A, B, C, les bornes haute tension (le plus souvent le primaire) et par des lettres minuscules a, b, c, les bornes basse tension (secondaire).
- Si le neutre est sortie on ajoute une borne N pour la HT et n pour la BT.



- Les enroulements primaire et secondaire sont bobinés dans le même sens et traversés par le même flux. Les tensions homologues primaire et secondaire sur une colonne ( $u_{AA'}$  et  $u_{aa'}$ ) sont en phase; il en est de même pour ( $u_{BB'}$  et  $u_{bb'}$ ) et ( $u_{CC'}$  et  $u_{cc'}$ ) sur les deux autres colonnes.



# Systemes triphasés équilibrés

## □ Couplages usuels:

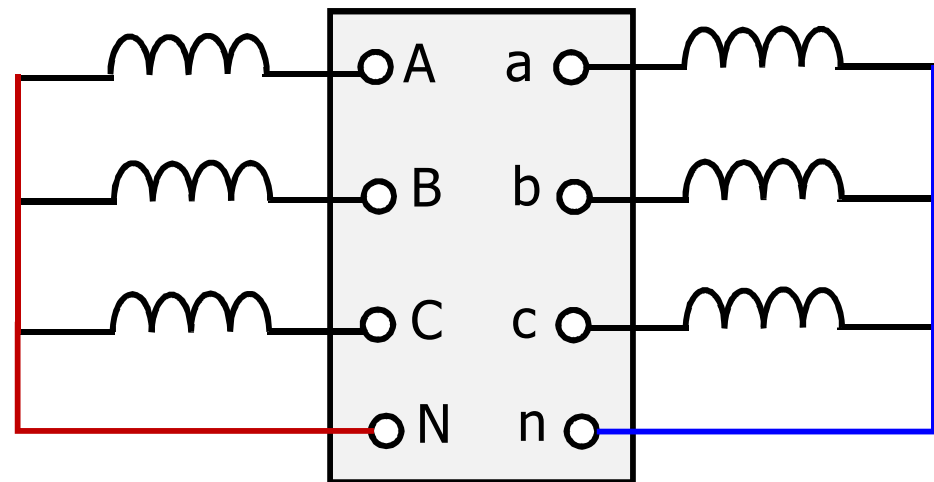
- Au primaire, les enroulements peuvent être connectés soit en étoile (Y) soit en triangle (D);
- Au secondaire, les enroulements peuvent être couplés de 3 manières différentes : étoile (y), triangle (d) et zigzag (z).
- Six couplages entre primaire et secondaire sont possibles: Yy; Yd; Yz; Dy; Dd; Dz;

## ❖ Exemple de couplage: Couplage étoile-étoile Yy:

- Le couplage étoile du secondaire permet la sortie du neutre et de disposer des tensions simples et composées. Il est, très utilisé dans les réseaux de distributions BT.

### Remarque:

Sur une même ligne, sont représentés les enroulements montés sur un même noyau.

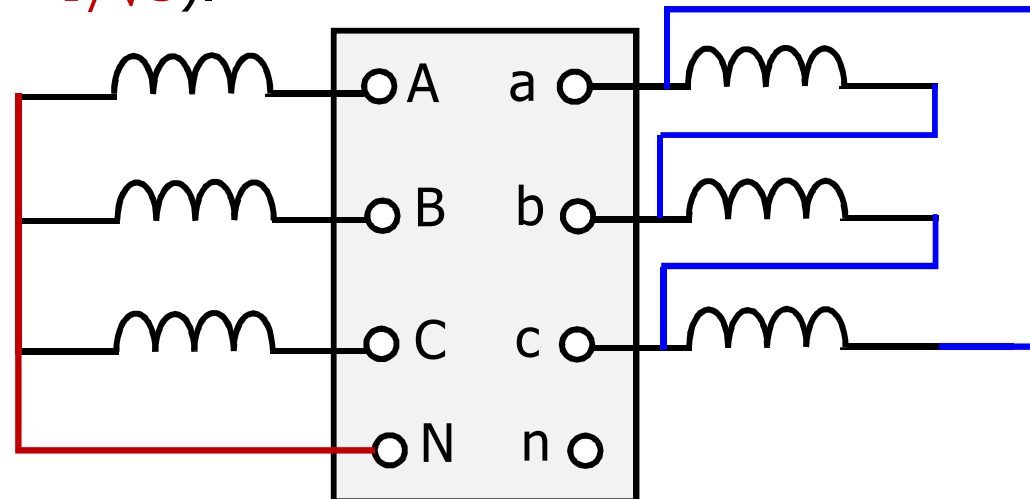


Représentation normalisée

# Systemes triphasés équilibrés

## ❖ Couplage étoile-triangle Yd:

- Le couplage triangle au secondaire ne permet pas la sortie du neutre; les enroulements sont alimentés par la tension composée;
- Ce couplage utilisé pour diminuer la valeur du courant dans les enroulements ( $J = I/\sqrt{3}$ ).

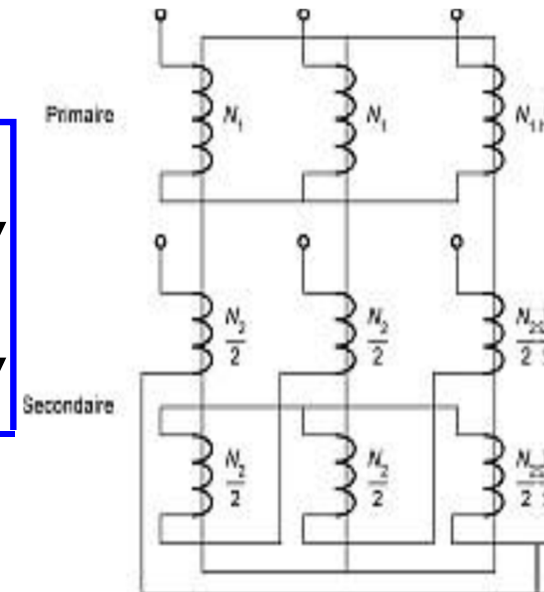
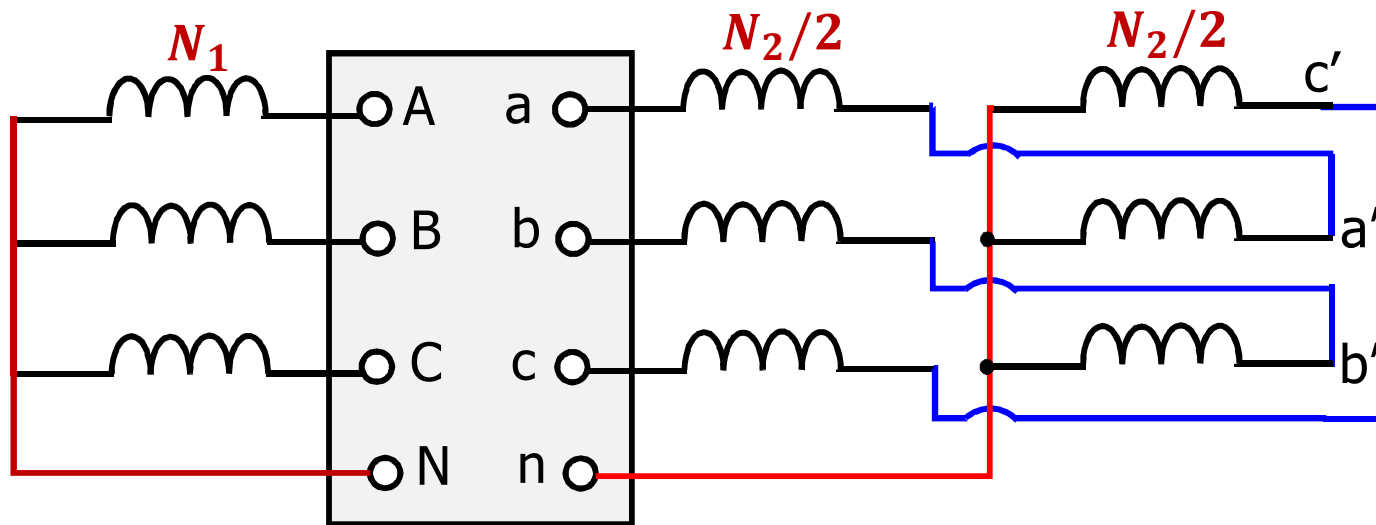


## ❖ Couplage étoile-zigzag Yz:

- Les enroulements du couplage zigzag sont divisés en deux demi-bobines;
- Pour avoir une phase, on met en série deux demi-bobines prises sur des colonnes différentes en sens inverse;
- On obtient avec ce couplage une meilleure répartition des tensions sur un réseau BT déséquilibré (il permet de réduire le déséquilibre sur le réseau BT).

# Systemes triphasés équilibrés

- Ce couplage permet de disposer d'un point neutre;



□ **Choix du couplage:** On a intérêt à choisir:

- Un couplage étoile aux très hautes tensions (chaque enroulement supporte une tension  $V = U/\sqrt{3}$ ;
- Un couplage triangle aux très forts courants (l'intensité par enroulement est  $J = I/\sqrt{3}$ ;
- Un couplage zigzag pour compenser des déséquilibres de phases.
  - ✓ Aux faibles déséquilibres ( $I_{\text{neutre}} \leq 10\% \cdot I_{\text{ligne}}$ ), on utilise le couplage Yy avec neutres;
  - ✓ Si le déséquilibre est plus important on utilise le couplage Yz ;
  - ✓ Si le déséquilibre et la puissance sont importants, on utilise un montage Dz pour économiser du cuivre au secondaire.

# Systemes triphasés équilibrés

- Les couplages usuels des transformateurs triphasés sont:
  - ✓ étoile/triangle abaisseur pour la distribution;
  - ✓ triangle/triangle utilisé en moyenne tension;
  - ✓ triangle/étoile éleveur dans une centrale de production;
  - ✓ étoile/étoile utilisation variée aux faibles déséquilibres ( $I_N < 10\%I$ );
  - ✓ étoile/zigzag utilisé si le déséquilibre est plus important;
  - ✓ triangle/zigzag utilisé si le déséquilibre et la puissance sont importants;
- Dans la plupart des cas le neutre est relié à la terre.

## 4.4 Rapport de transformation

- Le rapport de transformation à vide est donné par le rapport entre la tension composée secondaire à vide et la tension composée primaire:

$$m = \frac{U_{ab0}}{U_{AB}} = \frac{V_{a0}}{V_A}$$

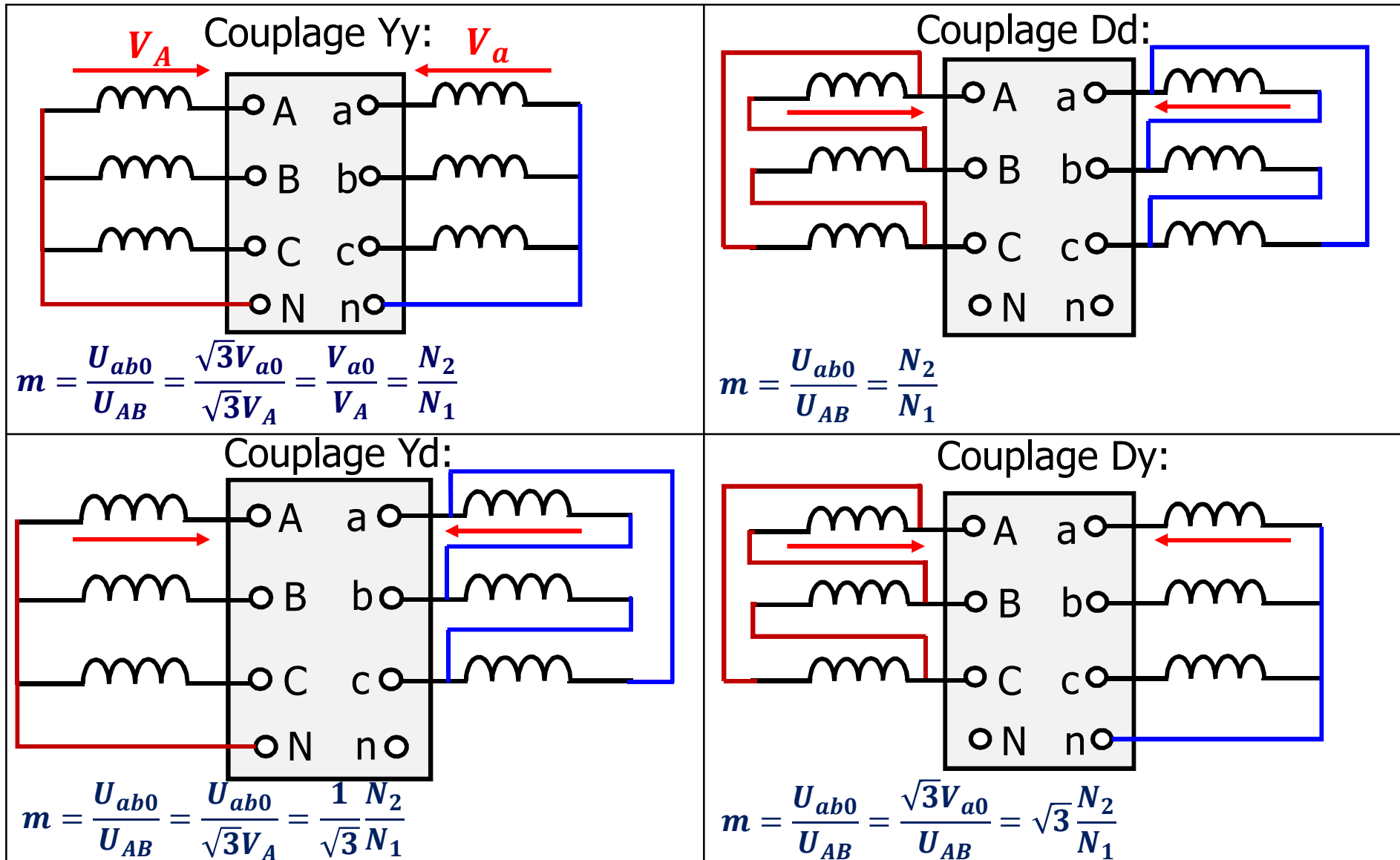
- Le rapport de transformation d'un transformateur triphasé, dépend du rapport du nombre de spires et du mode de couplage.

### Remarque:

Le rapport de transformation par noyau  $N_2/N_1$ . C'est le rapport de la tension efficace à vide aux bornes de l'enroulement secondaire et la tension efficace aux bornes de l'enroulement primaire.

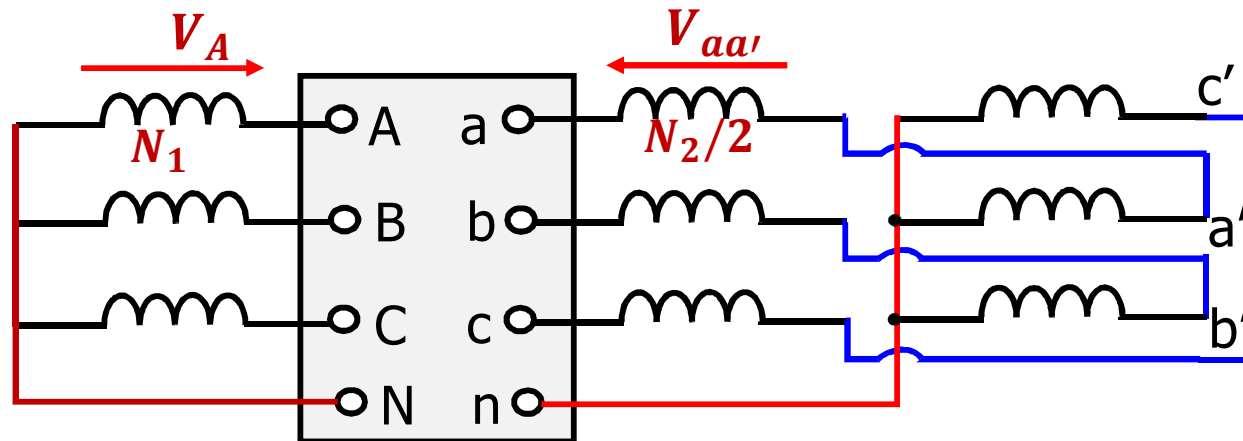
# Systemes triphasés équilibrés

## Exemples:



# Systemes triphasés équilibrés

Couplage Yz:

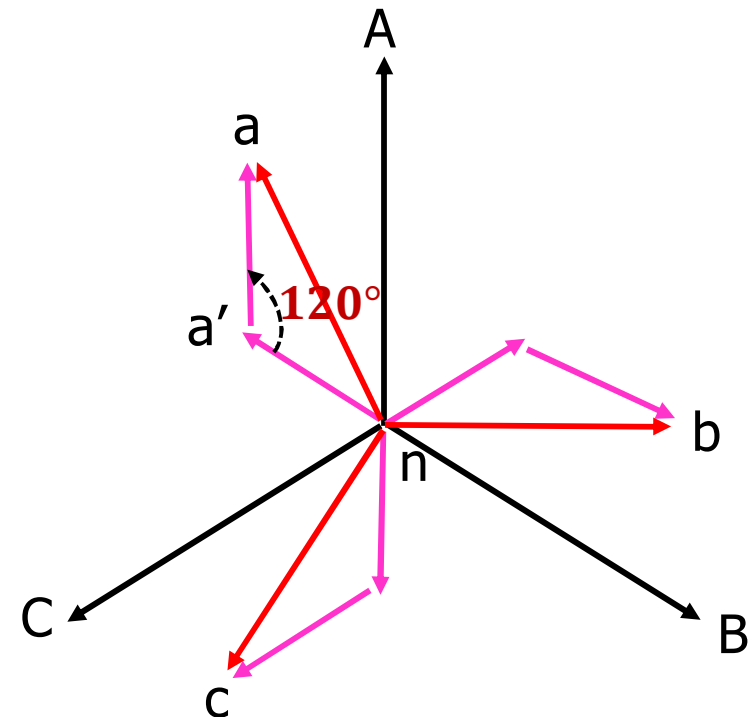


- Rapport de transformation:

$$m = \frac{U_{ab0}}{U_{AB}} = \frac{\sqrt{3}V_a}{\sqrt{3}V_A} = \frac{V_a}{V_A}$$

- Tension  $\vec{V}_a = \vec{V}_{aa'} + \vec{V}_{a'n}$ ;  $V_{aa'} = V_{a'n}$
- La tension  $\vec{V}_{aa'}$  est en phase avec  $\vec{V}_A$ ;
- $\vec{V}_{a'n}$  est en opposition de phase avec  $\vec{V}_B$ ;
- $V_a = \sqrt{3}V_{aa'}$
- Donc:

$$m = \frac{\sqrt{3}V_{aa'}}{V_A} = \sqrt{3} \frac{(N_2/2)}{N_1} = \frac{\sqrt{3} N_2}{2 N_1}$$



# Systemes triphasés équilibrés

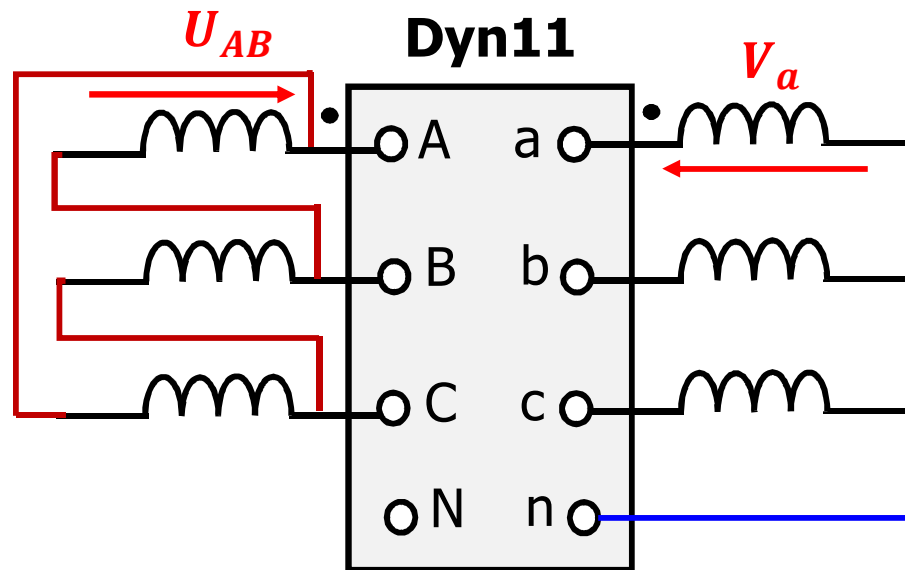
## 4.5 Indice horaire:

- Les conditions de couplage des enroulements primaires et secondaires ont aussi pour effet d'introduire un déphasage entre des tensions primaires et secondaires homologues;
- L'indice horaire indique la valeur du déphasage entre tensions primaires et secondaires homologues d'une même colonne:  $\theta = (\vec{V}_A, \vec{V}_a) = (\vec{U}_{AB}, \vec{U}_{ab})$
- En pratique, le déphasage  $\theta$  qui représente le retard d'une tension BT sur son homologue HT est toujours un multiple entier de **30°**. L'indice horaire  $I_h$  est défini par:  $I_h = \frac{\theta}{30}$ ;
- L'indice horaire se lit comme l'heure est un nombre entier compris entre **0** et **11**;
- On peut déterminer l'indice horaire à partir du schéma de couplage du transformateur;
- Le vecteur tension primaire  $\vec{V}_A$  est placée à **12** heures (origine des phases). L'indice horaire est fourni par l'heure de la tension homologue au secondaire  $\vec{V}_a$ ;
- Les tensions homologues aux bornes des enroulements situés sur le même noyau sont en phases.

# Systemes triphasés équilibrés

## Exemples:

### ❖ Couplage triangle-étoile



$\vec{V}_a$  aiguille des heures placée sur  $I_h$

$\vec{V}_A$

$\vec{V}_A$  aiguille des minutes placée sur 12

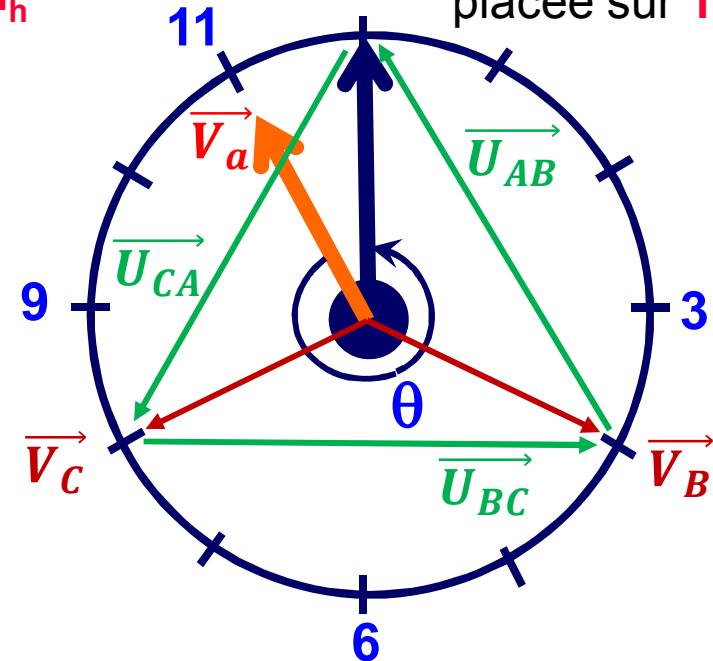
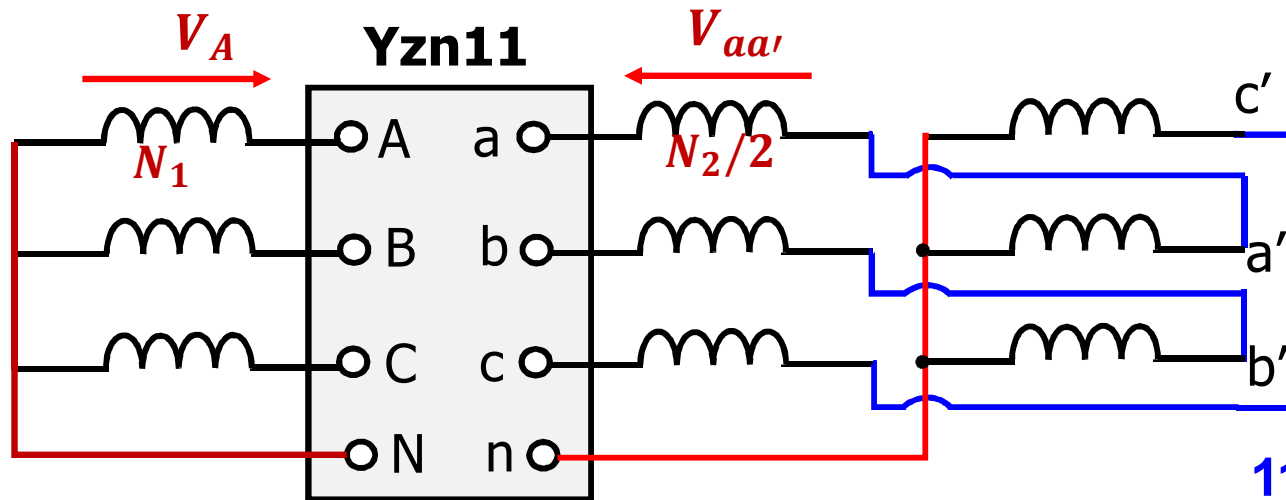


Diagramme de Fresnel

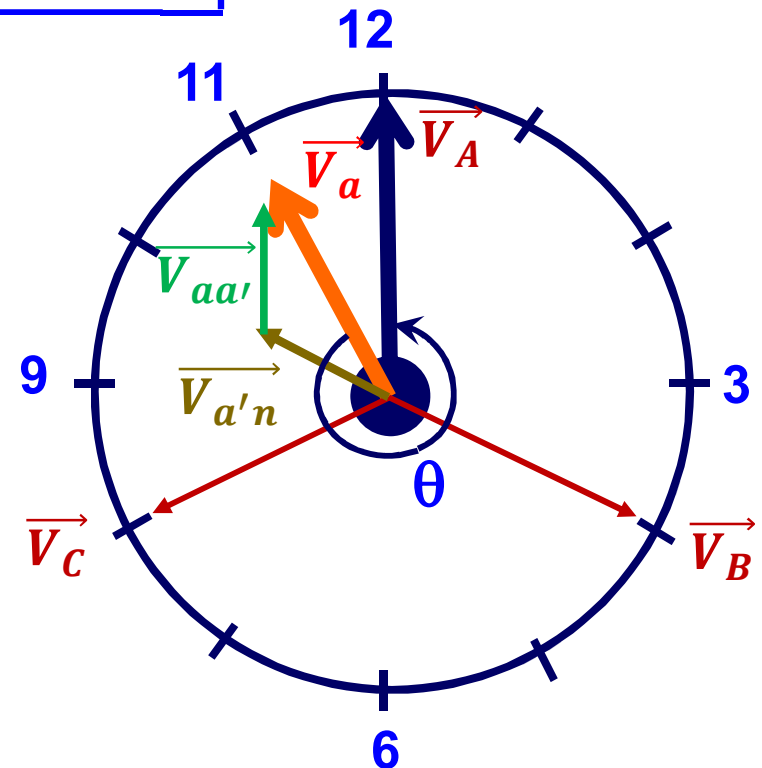
- $\vec{V}_a$  est en phase avec  $\vec{U}_{AB}$  (portées par le même noyau);
- $\vec{V}_a$  indique 11 heures;
- Le déphasage est:  $\theta = 11 \times 30 = 330^\circ$ ;
- L'indice horaire est:  $I_h = 11$ ;
- La désignation du couplage du transformateur est donnée par le symbole normalisé **Dyn11**; avec **n** le neutre secondaire sortie.

# Systemes triphasés équilibrés

## ❖ Couplage étoile-zigzag

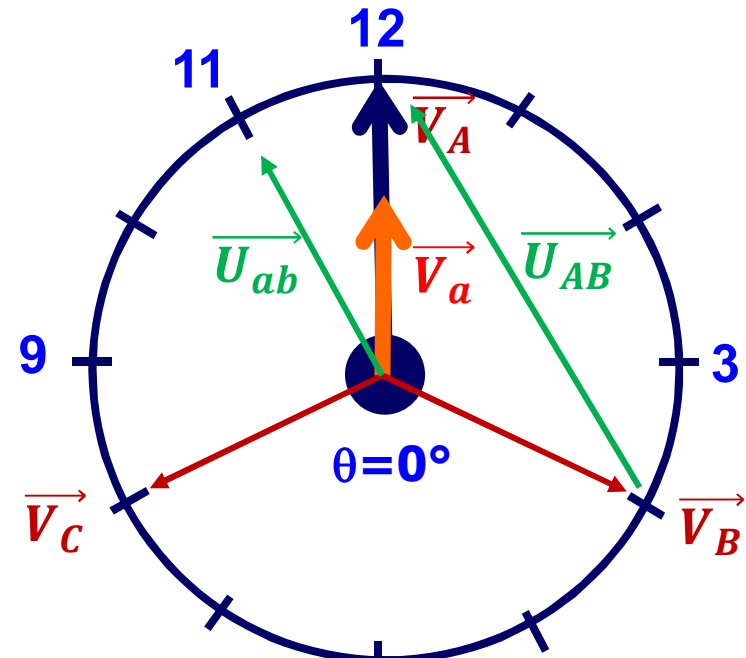
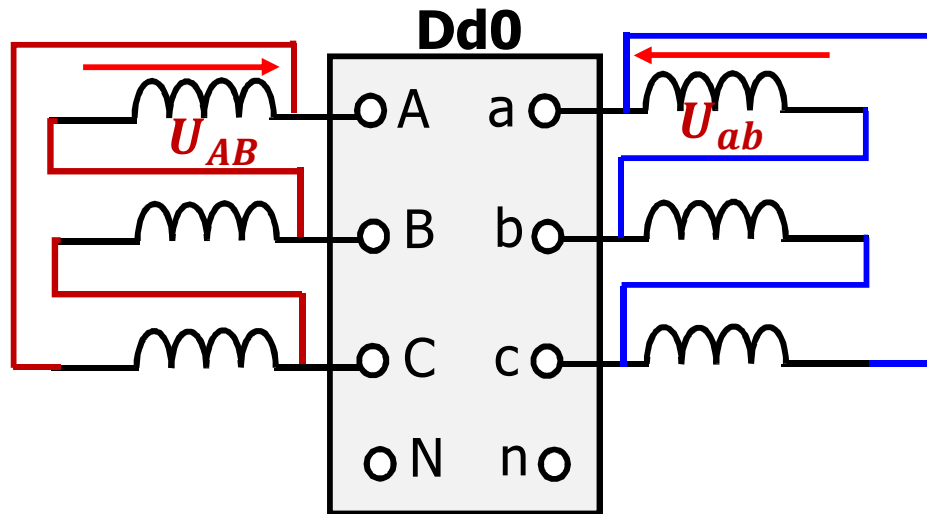


- $\vec{V}_a = \vec{V}_{aa'} + \vec{V}_{a'n}$ ;  $V_{aa'} = V_{a'n}$
- $\vec{V}_{aa'}$  est en phase avec  $\vec{V}_A$ ;
- $\vec{V}_{a'n}$  est en opposition de phase avec  $\vec{V}_B$ ;
- L'indice horaire est:  $I_h = 11$ ;  $\theta = 330^\circ$ ;
- Ce couplage est désigné par **Yzn11**

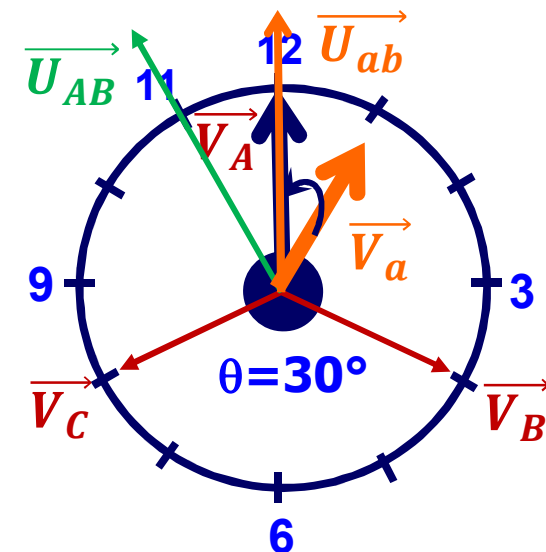
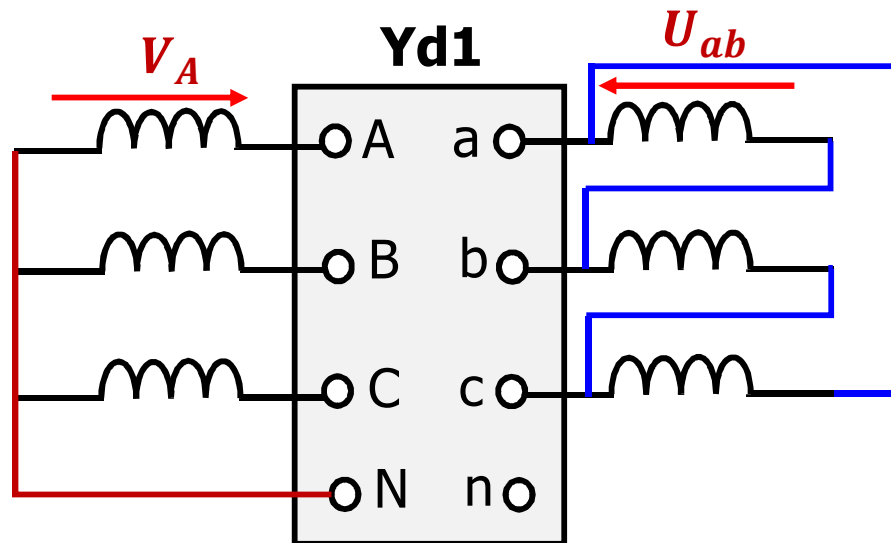


# Systemes triphasés équilibrés

## ❖ Couplage triangle-triangle



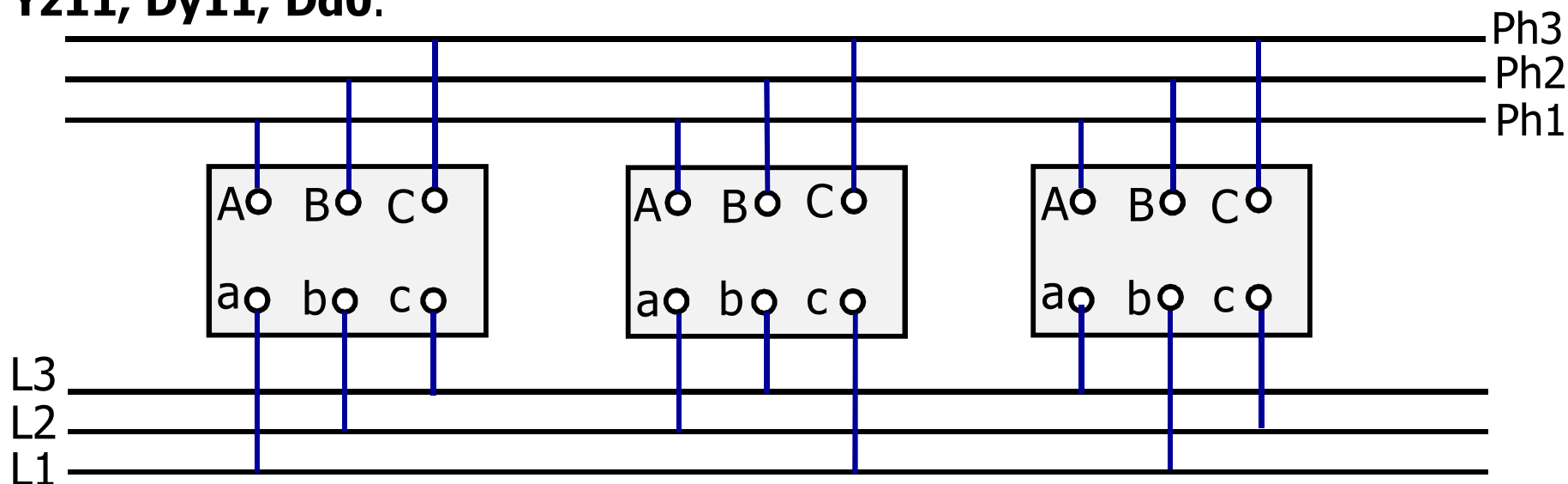
## ❖ Couplage étoile-triangle



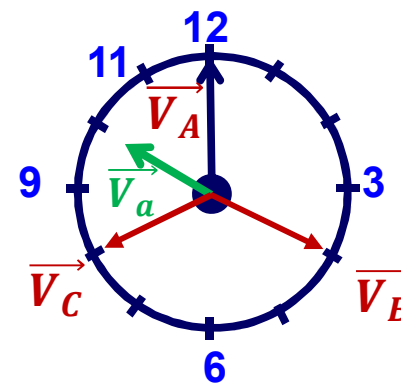
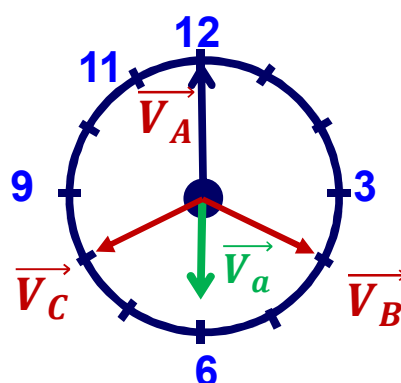
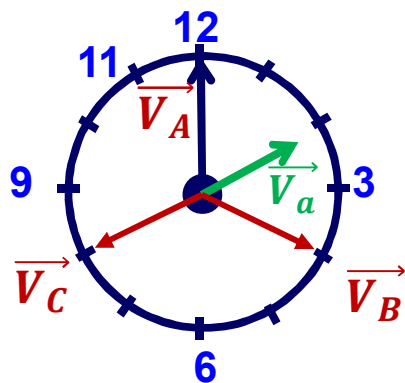
# Systemes triphasés équilibrés

## Remarque:

- Toute permutation circulaire des liaisons aux bornes primaires ou aux secondaires correspond à une augmentation de 4 de la valeur de l'indice horaire;
- Les couplages les plus fréquemment rencontrés sont les suivants: **Yy0**, **Yd1**, **Yz11**, **Dy11**, **Dd0**.

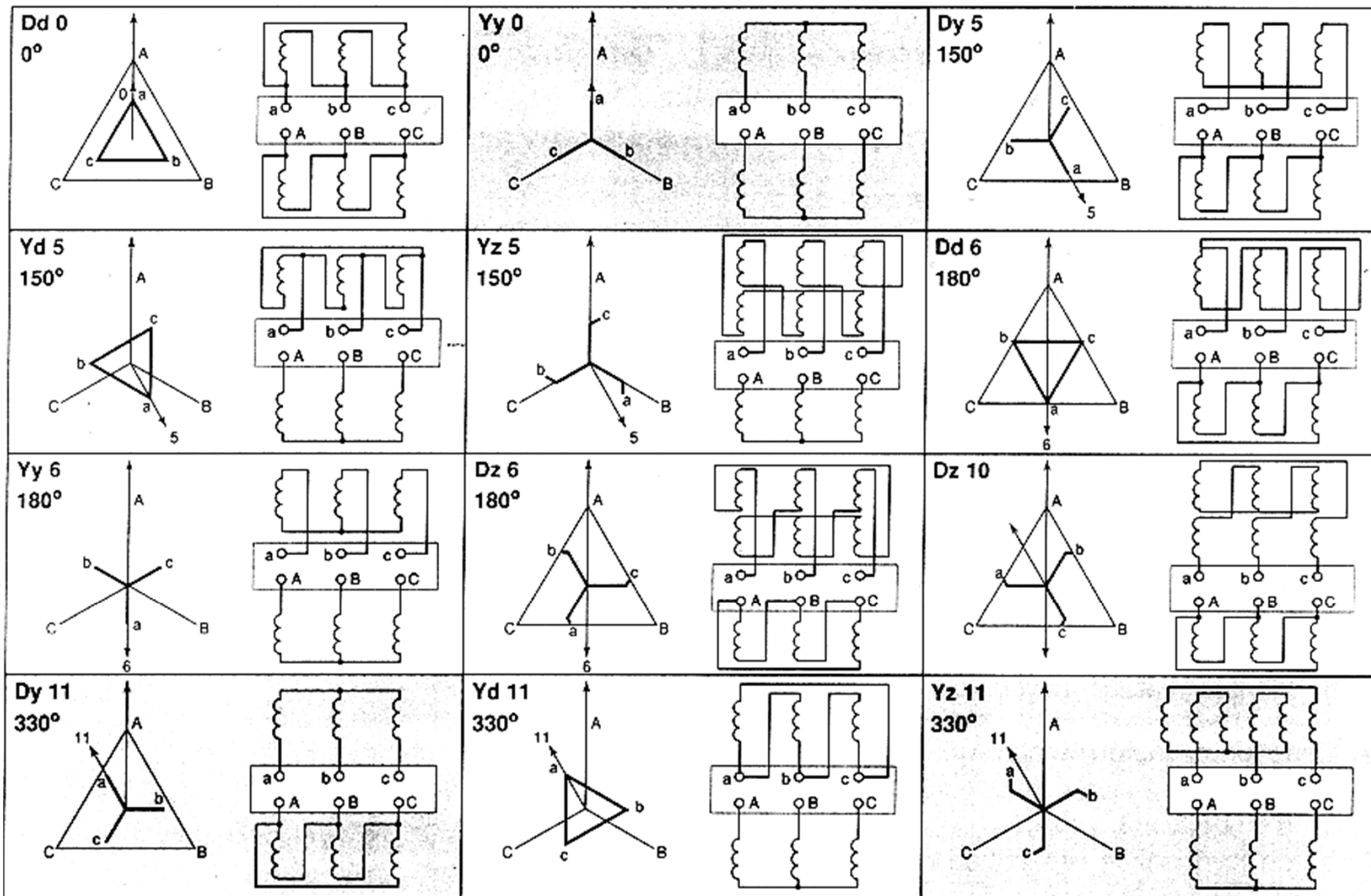


Groupe d'indices horaires: 2, 6, 10



# Systemes triphasés équilibrés

## □ Couplages usuels et schémas correspondants



# Systemes triphasés équilibrés

## □ Plaque signalétique:

La plaque signalétique d'un transformateur triphasé donne les principales caractéristiques électriques et de branchement:

- La puissance apparente ou assignée ( $S_n = \sqrt{3}UI$  en KVA).
- Les tensions primaire et secondaire assignées (en V ou KV).
- Les courants primaire et secondaire assignés (en A ou KA).
- La fréquence d'emploi;
- Les couplages côtés HT et BT.
- L'indice horaire.
- La tension de court-circuit exprimée en pourcentage de la tension primaire assignée pour obtenir le courant nominal au secondaire, lorsque le secondaire est en court-circuit  $U_{CC}\% = 100U_{1CC}/U_{1n}$  (environ 5% pour les transformateurs de distribution).
- Le mode de refroidissement:
  - ✓ ONAN (Oil Natural Air Natural): circulation huile naturelle (ON) dans le transformateur + circulation air naturelle (AN) sur ses surfaces extérieures;
  - ✓ ONAF (Oil Natural Air Forced): circulation huile naturelle (ON) + circulation air forcée (AF).

# Systemes triphasés équilibrés

## ❖ Exemple de plaque signalétique

**france transfo**  
Schneider Electric

TRANSFORMATEUR TRIPHASE    50 Hz    Réf. de conformité

Conforme à    Année 2003

400 kVA    Nr 53727 JF-2    Isolement HT KV 125-50

Tension de c/c 4,00 %    Couplage Dyn11

		Haute tension		Basse tension			
Tensions	pos 1	20500	V			Nature enroul.	ALU
	pos 2	20000	V	410	V	Refroidissement	ONAN
	pos 3	19500	V			Diélectrique	HUILE
Courants		11.5	A	563.3	A	Masse diél.	240 kg
						Masse à découper	675 kg
						Masse totale	1150 kg
						Ambiante	40 °C

# Systemes triphasés équilibrés

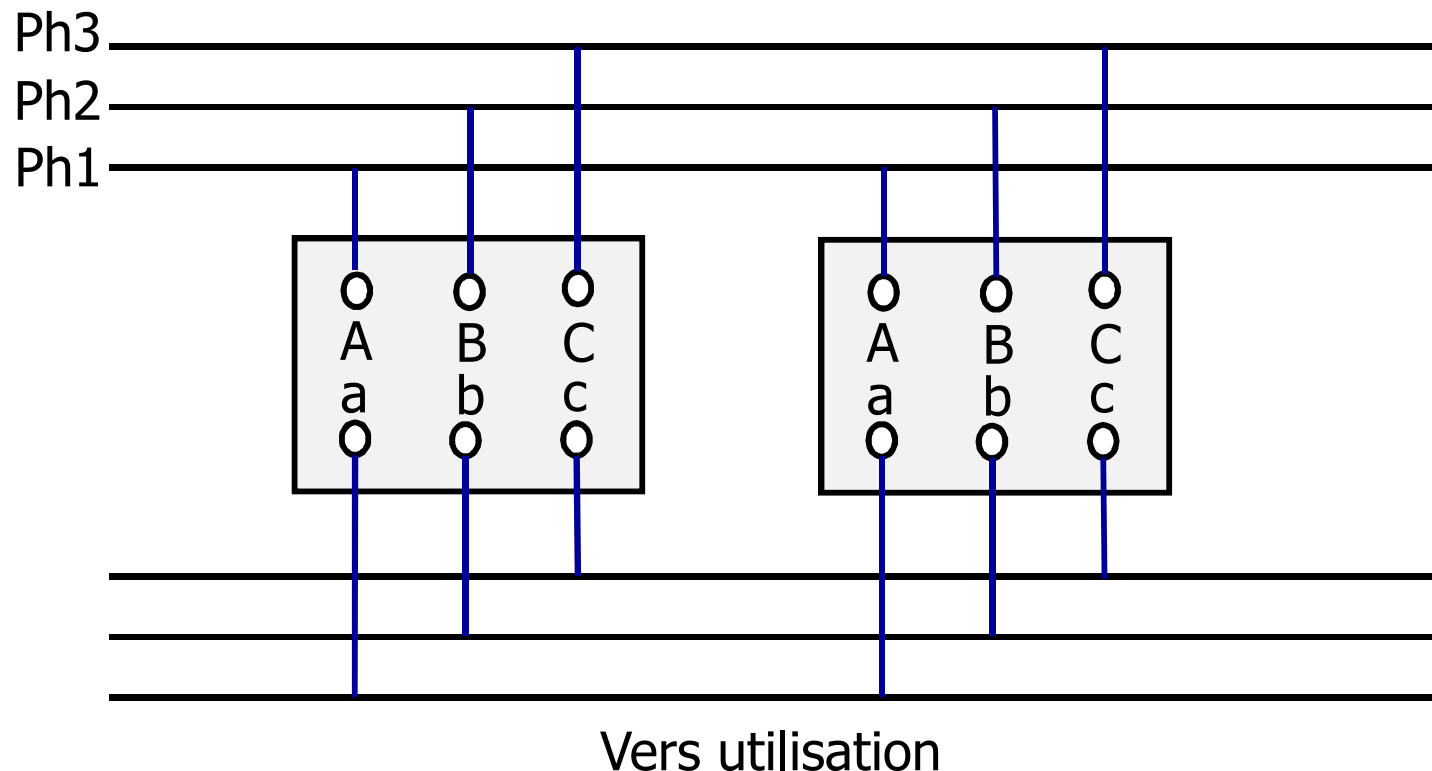
## ❖ Principaux paramètres de la plaque signalétique

- Puissance apparente nominale ( $S_n = 400kVA$ );
- Haute tension: Valeur des tensions nominales primaires possibles ( $20,5kV$ ;  $20kV$ ;  $19,5kV$  entre phases);
- Basse tension : Valeur de la tension nominale secondaire ( $410V$  entre phases);
- Courants nominaux primaire et secondaire ( $11,5A$  et  $563,3A$  de ligne).
- La fréquence d'emploi ( $50Hz$  );
- Couplage des enroulements du transformateur (**Dyn11**).
- Indice horaire (**11**);
- Tension de court-circuit  $U_{CC}\% = 4,00\%$ ;
- Mode de refroidissement: (ONAN : circulation huile naturelle (ON) + circulation air naturelle (AN)).

# Systemes triphasés équilibrés

## 4.6 Marche en parallèle des transformateurs triphasés

- Pour répondre à une demande croissante en énergie électrique, On préfère disposer de plusieurs transformateurs fonctionnant en parallèle;
- Des transformateurs sont en parallèle lorsque leurs primaires sont alimentés par un même réseau et leurs secondaires connectés à une même ligne ou débitent dans une même charge.



# Systemes triphasés équilibrés

## □ Conditions du couplage en parallèle

- Les transformateurs sont alimentés sous la même tension.
- Les rapports de transformations à vide sont identiques.
- Si les puissances des transformateurs sont différentes, la puissance du plus gros transformateur ne doit pas dépasser deux fois la puissance du plus petit. (pour que la répartition des charges soit acceptable);
- Les tensions de court-circuit égales à 10 % près.
- Mêmes indice horaire de couplage ou indices compatibles (même groupe).

## □ Groupes d'indices horaires

- En pratique, on peut modifier l'indice horaire d'un transformateur en effectuant une permutation circulaire des lettres affectées aux bornes;
- On peut coupler en parallèle des transformateurs dont les indices horaires diffèrent de 4. On définit quatre groupes de transformateurs:

Groupe	Indices horaire	Couplages
I	0, 4, 8	Yy, Dd, Dz
II	2, 6, 10	Yy, Dd, Dz
III	1, 5,	Dy, Yz, Yd
IV	7, 11	Dy, Yy, Yd

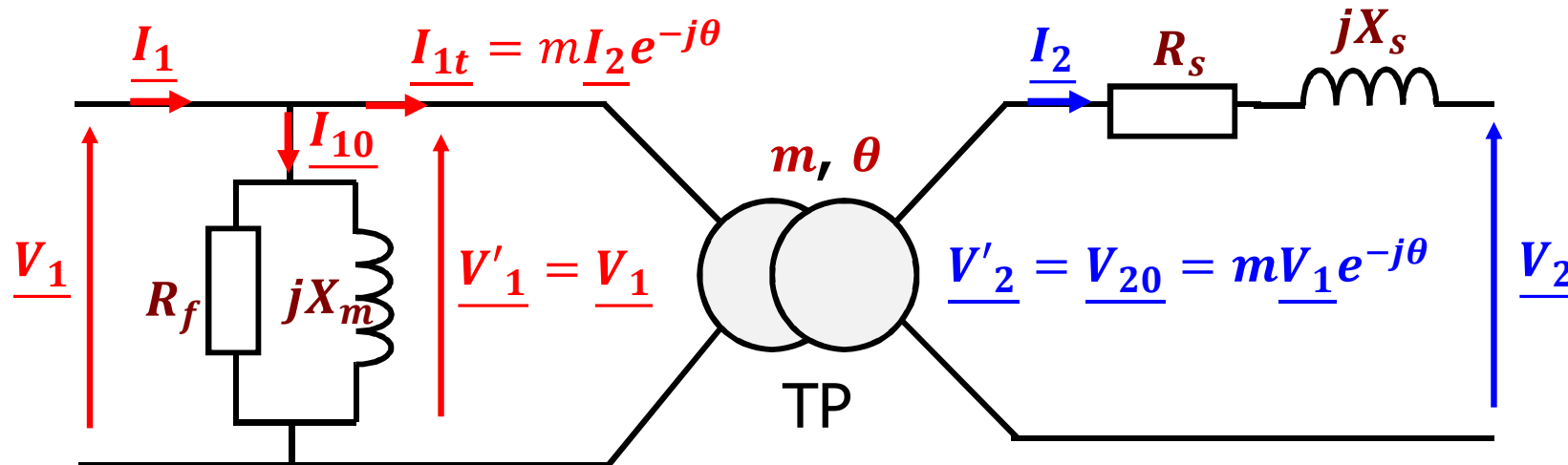
# Systemes triphasés équilibrés

## 4.7 Modèle électrique d'un transformateur triphasé

- Le transformateur triphasé débitant sur une charge équilibrée est équivalent à 3 transformateurs monophasés;
- L'étude d'un transformateur triphasé peut être ramenée à l'étude d'un transformateur monophasé équivalent par la méthode de Kapp.

### □ Schéma monophasé équivalent:

- On considère les données par phase (tension simple, courant de ligne, puissance et pertes par phase).



## Systemes triphasés équilibrés

- Le transformateur monophasé parfait de chaque noyau et les enroulements qu'il porte à un rapport de transformation:  $m = \frac{V_{20}}{V_1}$ ; qui dépend du rapport des nombres de tours des enroulements et du mode de couplage;
- Le mode de couplage des enroulements introduit un déphasage  $\theta$  de la tension au secondaire  $V_{20}$  par rapport à la tension au primaire  $V_1$ ; il introduit le même déphasage entre les courants d'entrée et de sortie du **TP**;
- La relation entre les tensions et les courants primaires et secondaires du **TP** est:

$$\underline{V_{20}} = m \underline{V_1} e^{-j\theta}$$
$$\underline{I_{1t}} = m \underline{I_2} e^{-j\theta}$$

### □ Détermination des éléments du schéma équivalent

#### Essai à vide:

- On alimente le transformateur en triphasé sous sa tension nominale; on mesure:  $U_{1n}$  ;  $I_{10}$  ;  $P_{10}$  ;  $U_{20}$  ;
- On en déduit:

$$m = \frac{V_{20}}{V_{1n}} = \frac{U_{20}}{U_{1n}}$$

## Systemes triphasés équilibrés

$$P_{10} = P_{fer} = 3R_f I_{10a}^2 = 3 \frac{V_{1n}^2}{R_f} = \frac{U_{1n}^2}{R_f} \Rightarrow R_f = \frac{U_{1n}^2}{P_{10}}$$

$$Q_{10} = 3X_m I_{10r}^2 = 3 \frac{V_{1n}^2}{X_m} = \frac{U_{1n}^2}{X_m} \Rightarrow X_m = L_m \omega = \frac{U_{1n}^2}{Q_{10}}$$

$$Q_{10} = \sqrt{(\sqrt{3}U_{1n}I_{10})^2 - (P_{10})^2}$$

### Essai en court-circuit:

- On alimente le transformateur en triphasé sous une tension réduite; on mesure:  $U_{1cc}$  ;  $I_{1cc}$  ;  $P_{1cc}$  ;  $I_{2cc} = I_{2n}$ ;
- On en déduit:

$$P_{1cc} = P_j = 3R_s I_{2cc}^2 \Rightarrow R_s = \frac{P_{10}}{3I_{2cc}^2}$$

$$Q_{1cc} = 3X_s I_{2cc}^2 \Rightarrow X_s = l_s \omega = \frac{Q_{1cc}}{3I_{2cc}^2}$$

$$Q_{1cc} = \sqrt{(\sqrt{3}U_{1cc}I_{1cc})^2 - (P_{1cc})^2}$$

$$mV_{1cc} = m \frac{U_{1cc}}{\sqrt{3}} = Z_s I_{2cc} = \sqrt{X_s^2 + R_s^2} \cdot I_{2cc} \Rightarrow X_s$$

# Systemes triphasés équilibrés

## □ Chute de tension au secondaire en charge:

- La chute de tension simple  $\Delta V_2 = V_{20} - V_2$ ;
- La loi des mailles appliquée au secondaire donne:

$$\underline{V_{20}} = \underline{V_2} + (R_s + jX_s)\underline{I_2}$$

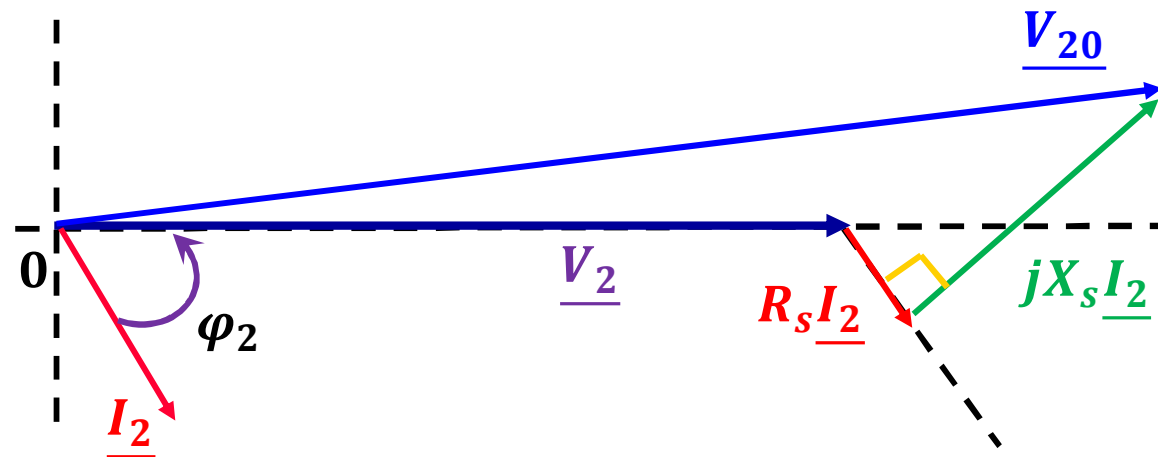
- La chute de tension dépend du facteur de puissance  $\cos\varphi_2$  de la charge:

$$\Delta V_2 \approx R_s I_2 \cos\varphi_2 + X_s I_2 \sin\varphi_2$$

- La chute de tension composée  $\Delta U_2$  est:

$$\Delta U_2 = \sqrt{3} \Delta V_2$$

- Diagramme vectoriel des tensions:



# Systemes triphasés équilibrés

## □ Rendement du transformateur triphasé:

- Le rendement  $\eta$  est:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{fer} + P_j} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi_2)}{\sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi_2) + P_{fer} + 3R_s I_2^2}$$

- Le rendement est maximum pour la valeur de  $I_2 = I_{2M}$  qui rend les pertes Joule égales aux pertes fer:  $P_j = P_{fer}$ .

## 5. Schémas de Liaison à la Terre (SLT)

### 5.1 Présentation:

- Les schémas de liaisons à la terre ont pour objectif d'assurer la protection des biens (équipements électriques) et des personnes et aussi la continuité de service contre les défauts d'isolement.
- Les SLT (**ou régimes de neutre**) caractérisent le mode de raccordement à la terre du **neutre du secondaire du transformateur** de distribution (MT/BT) et les moyens de mise à la terre des **masses métalliques** de l'installation (carcasses,...).
- Ils constituent une boucle appelée « boucle de défaut » permettant l'écoulement des courants de défaut et ainsi solliciter les dispositifs de protection par coupure automatique. Tout cela, en vue d'éviter les risques d'électrisation, voire d'électrocution.
- Le choix d'un SLT conditionne les mesures de protection des personnes contre les contacts indirects.
- Les SLT offrent la même efficacité en ce qui concerne la sécurité des personnes mais diffèrent en terme de disponibilité d'énergie et de maintenance.

# Systemes triphasés équilibrés

## 5.2 Risques du courant électrique:

- Un courant électrique traversant le corps humain peut éventuellement mettre en danger une personne.
- Le danger est d'autant plus grand si l'intensité du courant passant dans le corps est grande et si la durée de passage est grande.

Les chiffres significatifs du risque électrique (en courant alternatif)	
5mA	Seuil de sensibilité
10mA	Seuil de réaction réflexe Seuil de non lâcher
30mA	Seuil de téτανisation du diaphragme: arrêt respiratoire
50mA pendant une seconde	Seuil de fibrillation cardiaque: arrêt circulatoire

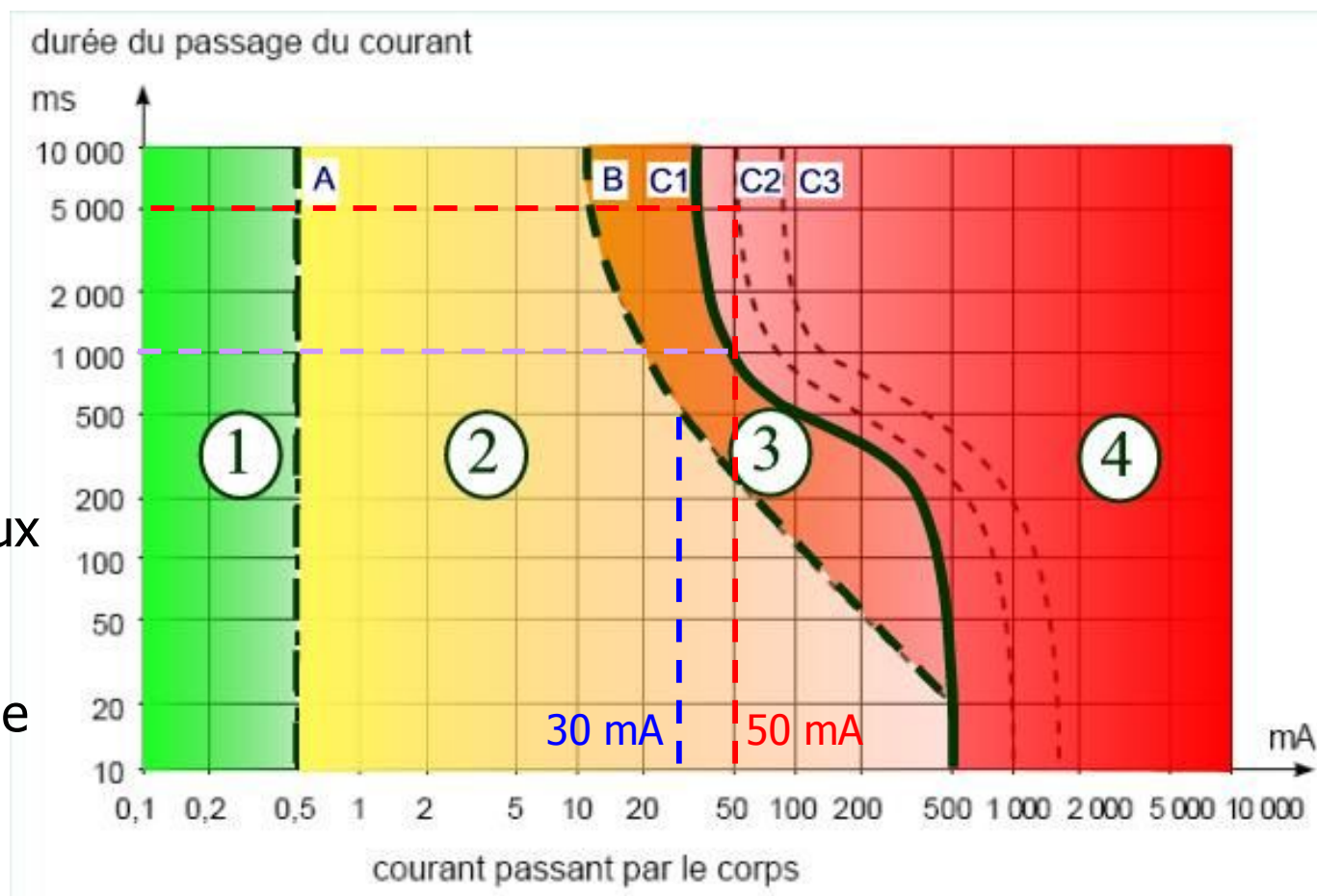
# Systemes triphasés équilibrés

Zone 1: aucune réaction	Zone 3: aucun dommage organique, mais probabilité de contractions musculaires et difficulté respiratoire jusqu'à la courbe C1. possibilité de risques cardiaques jusqu'à C3
Zone 2: aucun effet physiologique dangereux	Zone 4: mortelle (risque d'arrêt du cœur, de la respiration et de brulures graves)

## Zones temps/courant des effets

physiologiques du courant alternatif (50Hz) sur des personnes.

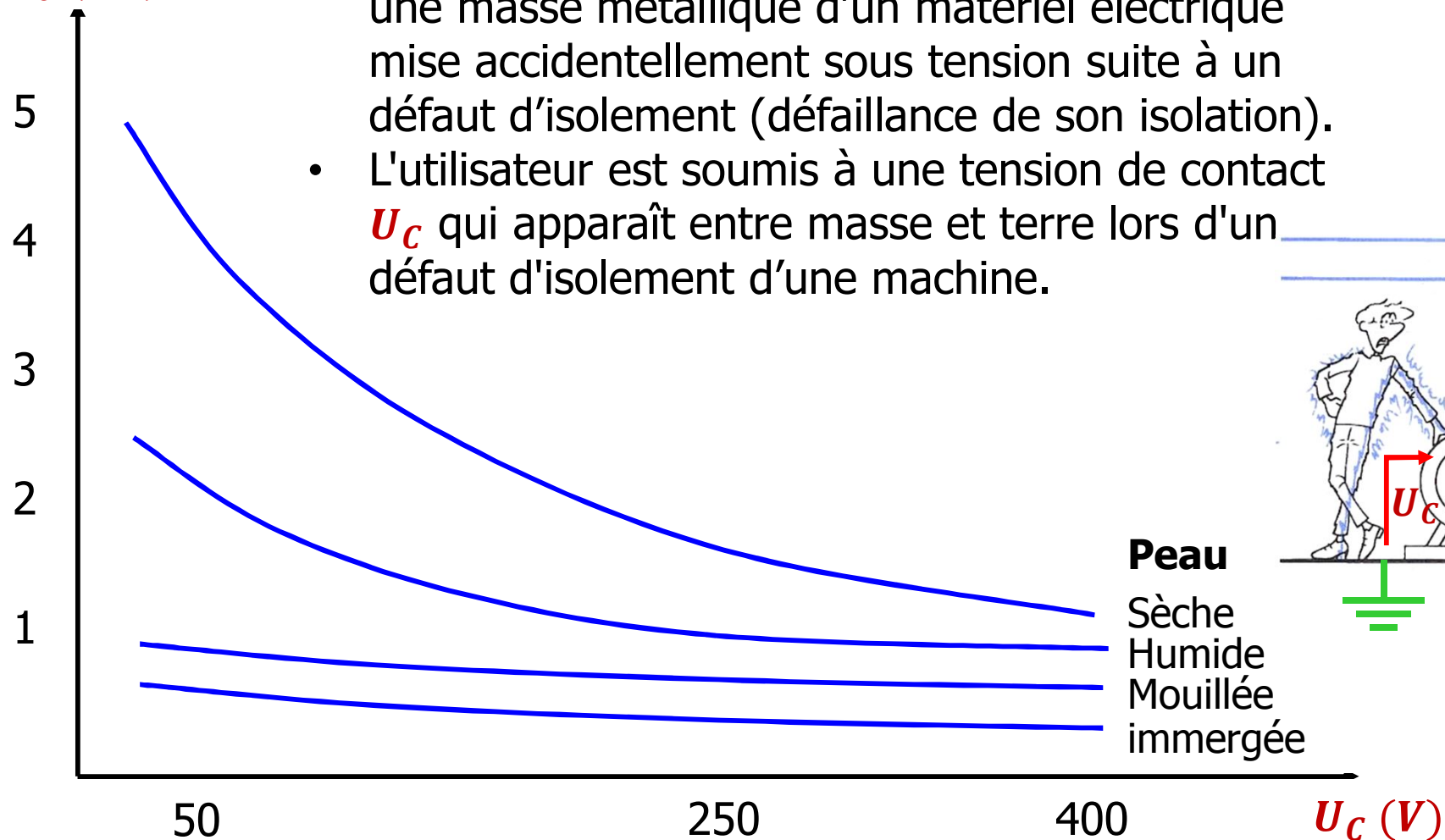
Le courant électrique alternatif est dangereux à partir de 10 mA, et mortel à partir de 30 mA (pour une durée de plus de 5s).



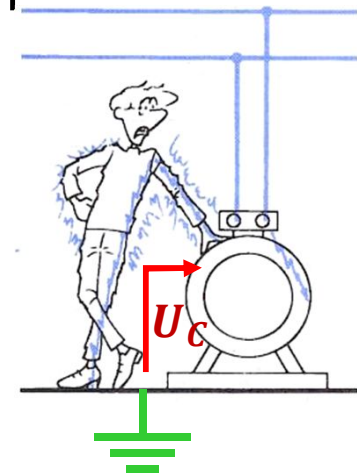
# Systemes triphasés équilibrés

- Résistance du corps humain en fonction de la tension de contact et du degré d'humidité de la peau,

$R_c$  (k $\Omega$ )



- Contact indirect: contact d'une personne avec une masse métallique d'un matériel électrique mise accidentellement sous tension suite à un défaut d'isolement (défaillance de son isolation).
- L'utilisateur est soumis à une tension de contact  $U_c$  qui apparaît entre masse et terre lors d'un défaut d'isolement d'une machine.



**Peau**

Sèche  
Humide  
Mouillée  
immergée

# Systemes triphasés équilibrés

## □ Tension limite:

- La norme CEI 60364 (NF C 15-100) définit une valeur limite de la tension de contact à ne pas dépasser en cas de défaut d'isolement dans l'installation.
- Cette valeur a été déterminée de façon à ce que la sécurité des personnes soit vérifiée dans tous les cas.
- La tension limite de sécurité  $U_L$  est la tension de contact la plus élevée qui peut être maintenue indéfiniment sans danger pour les personnes.
- Lorsque cette tension de contact est dépassée, ces mêmes normes exigent l'ouverture automatique du circuit.

	Locaux secs	Locaux humides	Locaux immergés
Tension limite en AC	$U_L = 50V$	$U_L = 25V$	$U_L = 12V$

## Systemes triphasés équilibrés

### □ Temps maximal de fonctionnement de la protection:

- Le temps de coupure maximal du dispositif de protection à respecter en courant alternatif (50Hz) en fonction de la tension de contact  $U_C$  et de la tension limite de sécurité  $U_L$ .

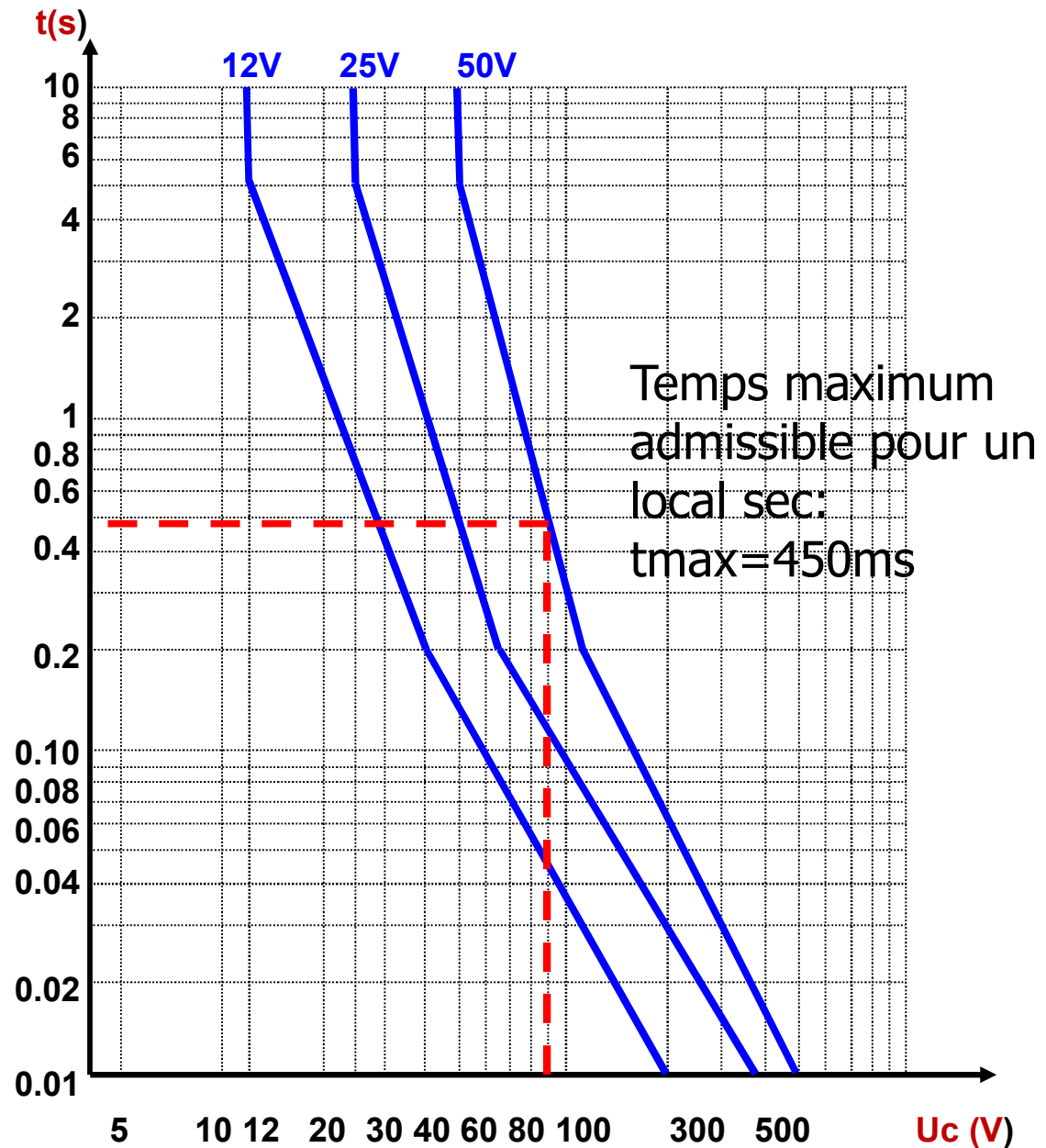
Tension de contact (V)	Conditions mouillées $U_L = 25V$
	Temps maximal de coupure en du dispositif de protection (s)
<25	5
25	5
50	0,48
75	0,30
90	0,25
120	0,18
150	0,12
220	0,05
280	0,02

Tension de contact (V)	Conditions normales $U_L = 50V$
	Temps maximal de coupure en du dispositif de protection (s)
<50	5
50	5
75	0,60
90	0,45
120	0,34
150	0,27
220	0,17
280	0,12
350	0,08
500	0,04

# Systemes triphasés équilibrés

## □ Courbes de sécurité:

Temps maximum de déclenchement des appareils de protection, en fonction de la tension de contact, et de la tension limite de sécurité:



## 5.3 Détermination des risques physiologiques

### □ Méthode générale:

#### Étude d'un défaut d'isolement:

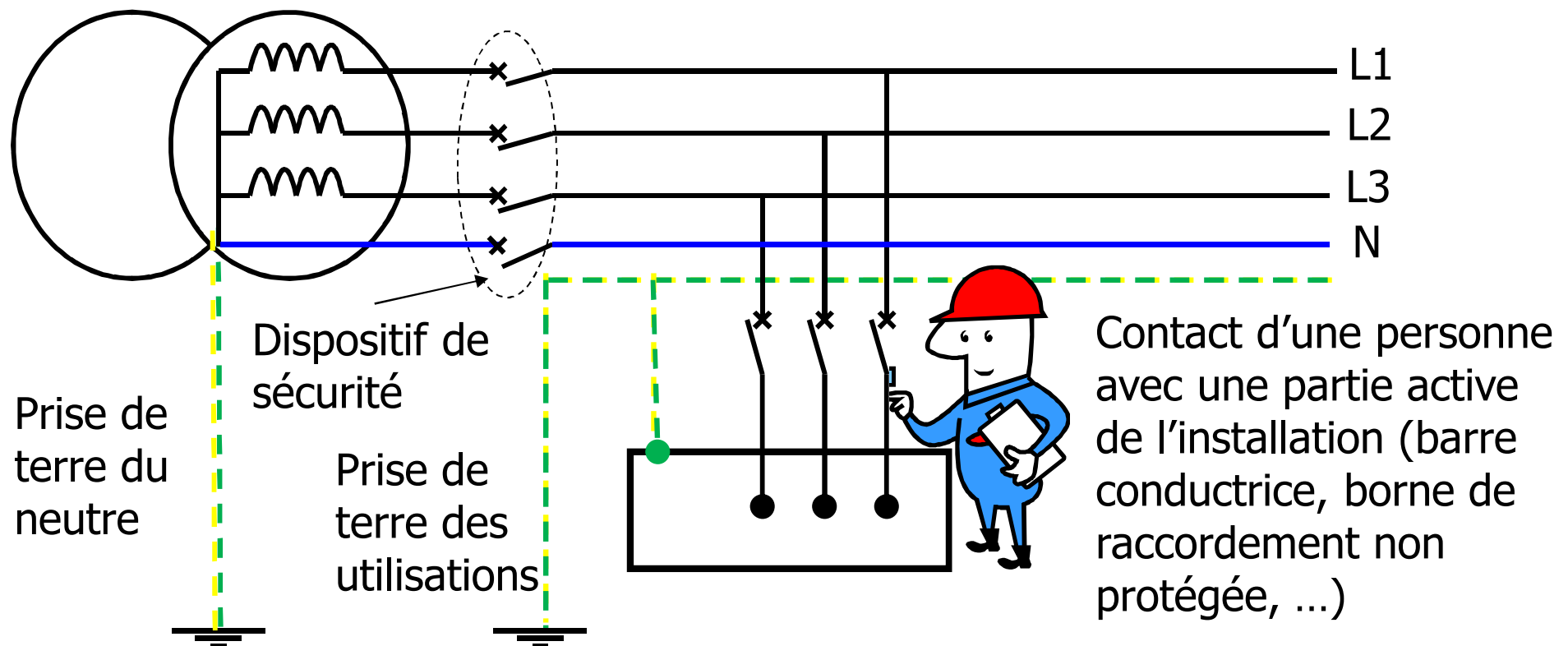
- Tracé de la circulation du courant de défaut;
- Schéma électrique équivalent;
- Détermination de la tension de contact (corporelle);
- Comparaison de cette tension  $U_C$  à la tension limite de sécurité  $U_L \Rightarrow$  danger?
- Calcul de l'intensité du courant corporel  $I_C \Rightarrow$  effets physiologiques;
- Calcul de l'intensité du courant de défaut  $I_d \Rightarrow$  temps de réaction des protections  $I_d$ ;
- Comparaison au temps maximal de réaction des protections (courbes de sécurité)  $\Rightarrow$  danger ?

# Systemes triphasés équilibrés

## □ Cas d'un contact direct:

- Contact accidentel avec un conducteur actif affecté à la transmission de l'énergie, tel que les conducteurs de phase et le conducteur neutre.
- Contact direct sans résistance de contact.

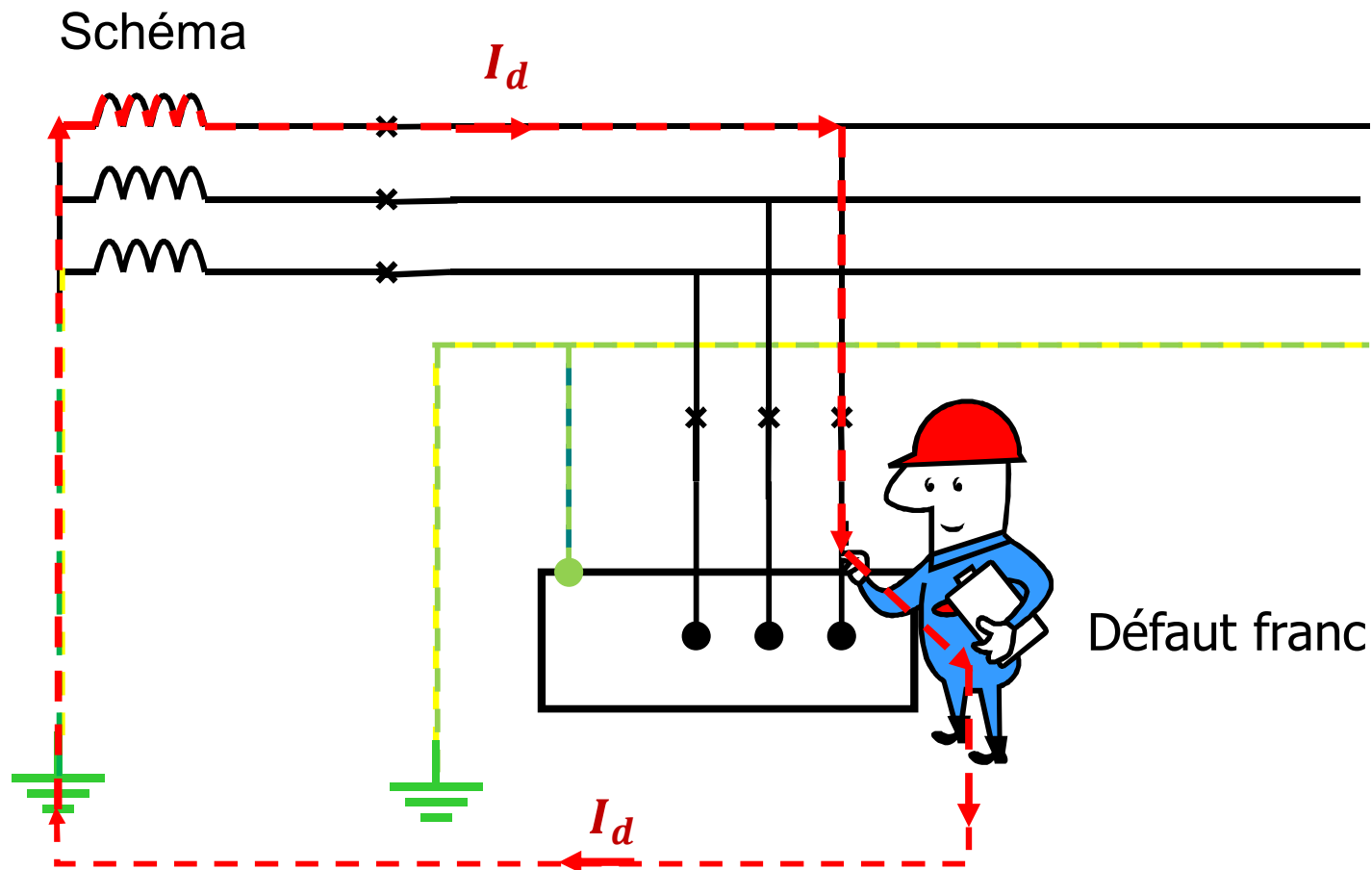
Schéma de distribution du réseau BT à partir du secondaire d'un transformateur MT/BT avec neutre distribué



# Systemes triphasés équilibrés

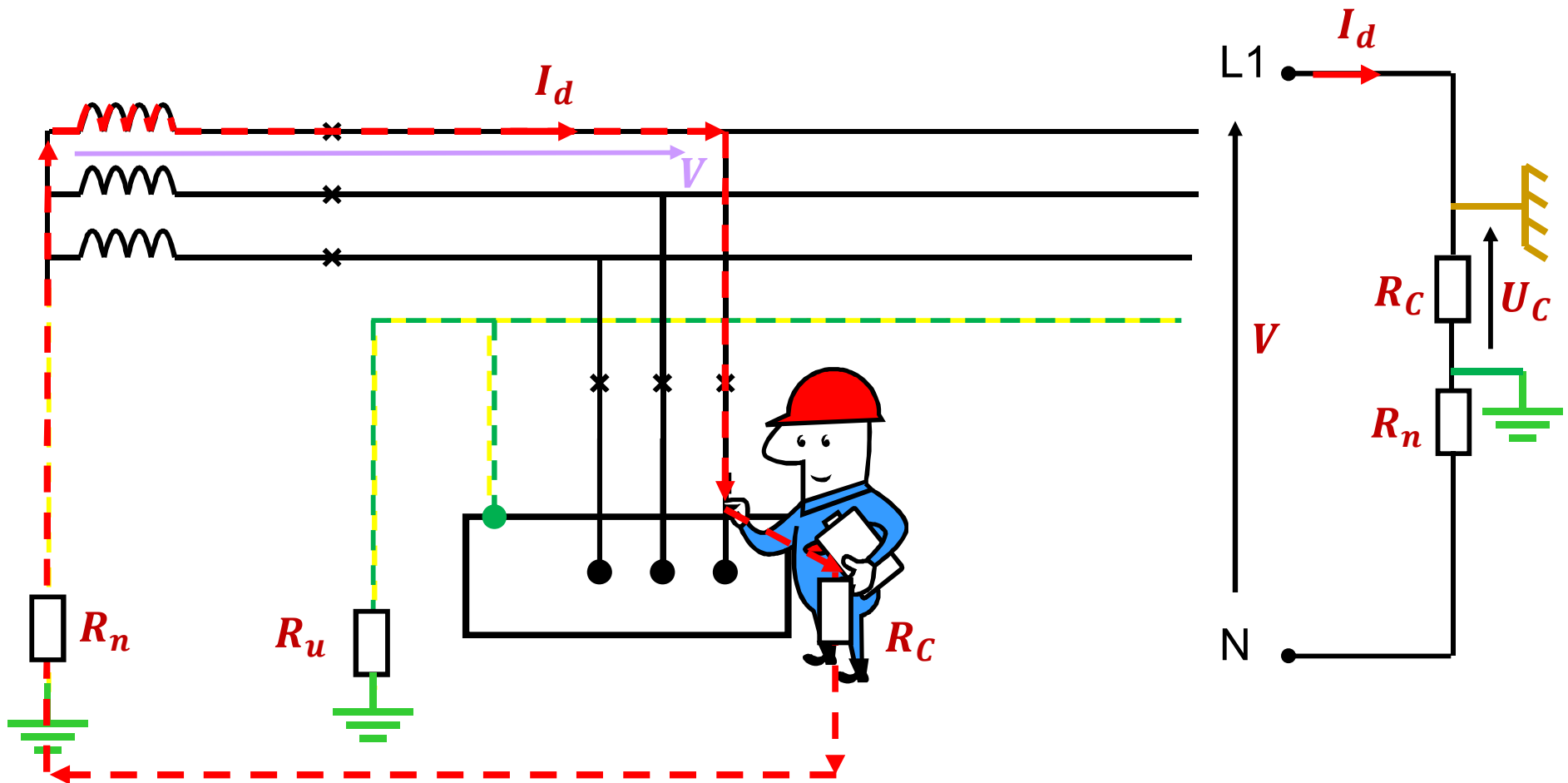
## ➤ Circulation du courant de défaut:

- Le neutre du transformateur de distribution est mis à la terre à travers une prise de terre de résistance  $R_n$ .
- Les masses sont mises à la terre à travers une prise de terre de résistance  $R_u$ .



# Systemes triphasés équilibrés

➤ Schéma électrique équivalent:



# Systemes triphasés équilibrés

## ➤ Détermination de la tension de contact (corporelle) $U_C$ :

On considère :

- Un réseau électrique 230/400V;
- Une résistance de mise à la terre du neutre de  $R_n = 1\Omega$ ;
- Une résistance corporelle de  $R_C = 2000\Omega$ ;
- Un local sec.
- Tension de contact:

$$U_C = \frac{R_C}{R_C + R_n} V \approx 230V$$

## ➤ Comparaison de $U_C$ (tension corporelle) à $U_L$ (tension limite de sécurité)

- Conditions normales, local sec:  $U_L = 50V$
- Tension de contact:  $U_C = 230V$
- On constate que  $U_C > U_L \Rightarrow$  tension dangereuse

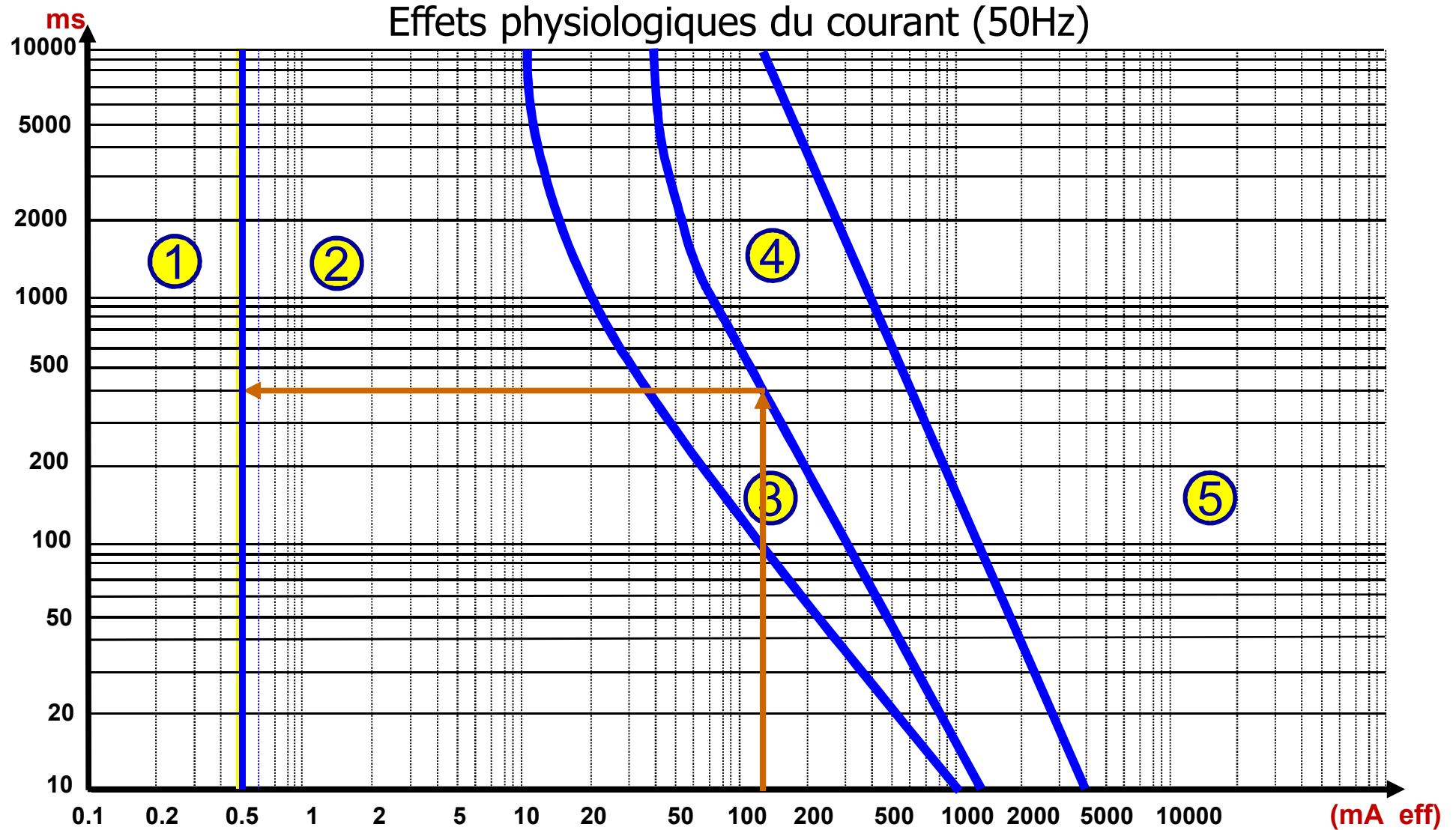
## ➤ Calcul de l'intensité du courant corporel $I_C$ (effets physiologiques):

- Loi d'Ohm:

$$U_C = R_C I_C \Rightarrow I_C = \frac{U_C}{R_C} = \frac{230}{2000} = 0,115A = 115mA$$

- Effets physiologiques ? Risque de fibrillation cardiaque après 400 ms

# Systemes triphasés équilibrés



Zone 1 : Habituellement aucune réaction  
Zone 2 : Aucun effet physiopathologique dangereux  
Zone 3 : Aucun risque de fibrillation cardiaque

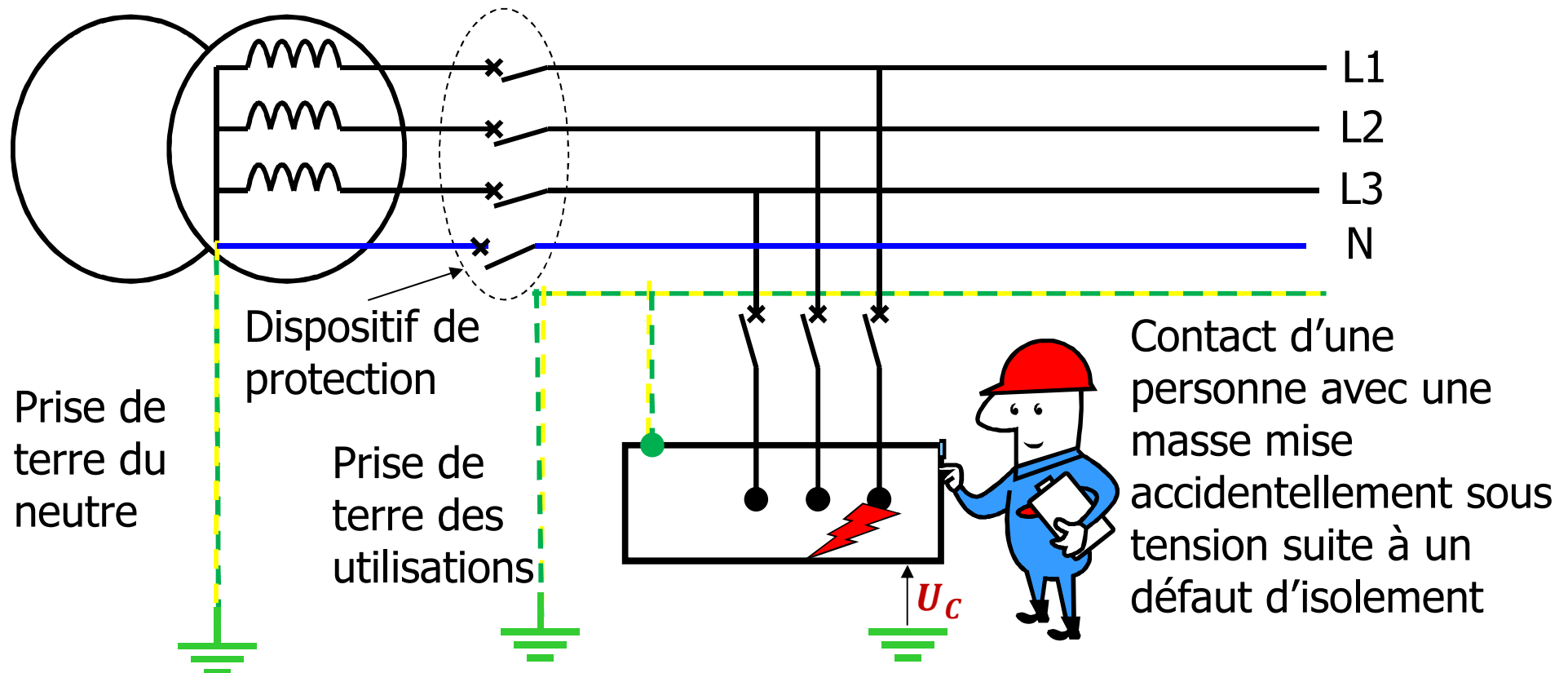
Zone 4 : Fibrillation cardiaque possible (prob <50%)  
Zone 5 : Fibrillation cardiaque (prob >50%)

# Systemes triphasés équilibrés

## □ Cas d'un contact indirect:

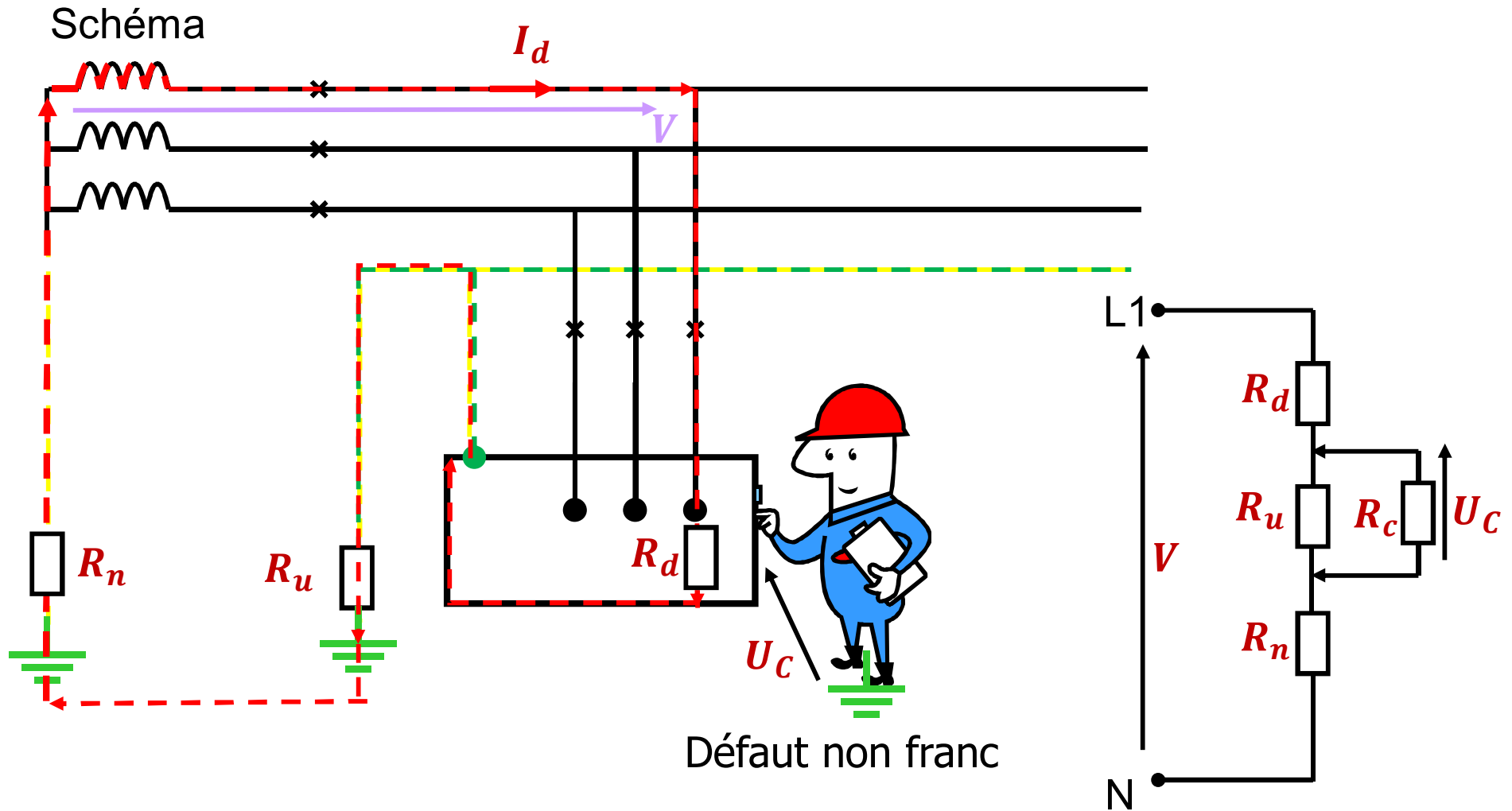
- Contact avec une masse métallique mise accidentellement sous tension;
- Conducteur actif mis accidentellement en contact indirect, avec résistance de contact avec la masse de l'appareil.

Schéma de distribution du réseau BT à partir du secondaire d'un transformateur MT/BT avec neutre distribué



# Systemes triphasés équilibrés

➤ Circulation du courant de défaut:



## Systemes triphasés équilibrés

### ➤ Détermination de la tension de contact (corporelle) $U_C$ :

On considère :

- Un réseau électrique 230/400V;
- Une résistance de mise à la terre du neutre de  $R_n = 1\Omega$ ;
- Une résistance de mise à la terre des masses de  $R_u = 20\Omega$ ;
- Une résistance corporelle de  $R_C = 2000\Omega$ ;
- Une résistance de défaut de  $R_d = 30\Omega$
- Un local sec.
- Tension de contact:

$$U_C = \frac{R_a \parallel R_C}{R_d + (R_a \parallel R_C) + R_n} V = 89,64V$$

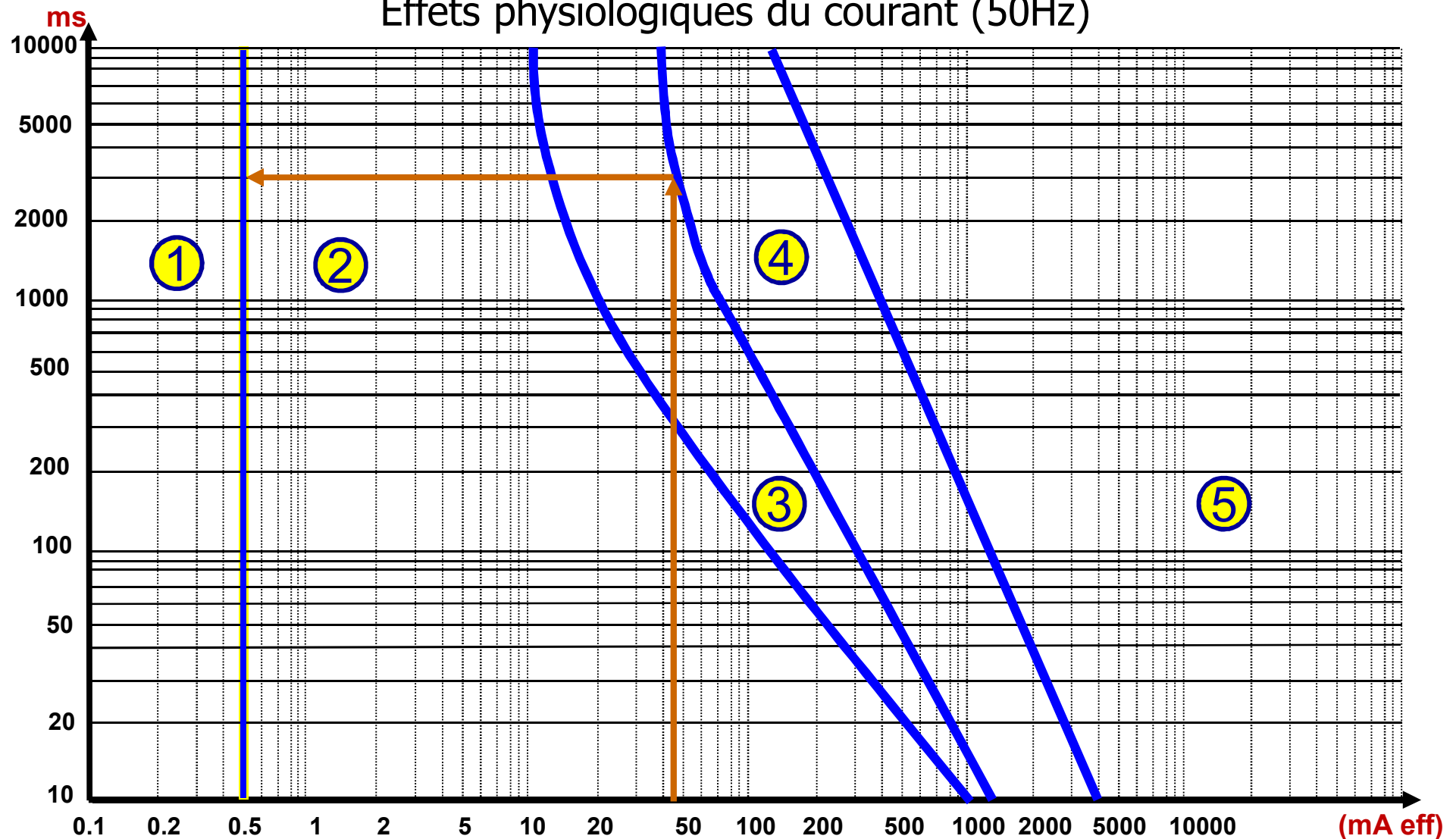
- Comparaison de  $U_C$  (tension corporelle) à  $U_L$  (tension limite de sécurité)
  - Conditions normales, local sec:  $U_L = 50V$
  - Tension de contact:  $U_C = 89,64V$ ; On constate que  $U_C > U_L \Rightarrow$  Danger

### ➤ Calcul de l'intensité du courant corporel $I_C$ (effets physiologiques):

- Loi d'Ohm:  $U_C = R_C I_C \Rightarrow I_C = \frac{U_C}{R_C} = \frac{89,64}{2000} = 0,045A = 45mA$
- Effets physiologiques ? Risque de fibrillation cardiaque après 3 s.

# Systemes triphasés équilibrés

## Effets physiologiques du courant (50Hz)



Zone 1 : Habituellement aucune réaction  
Zone 2 : Aucun effet physiopathologique dangereux  
Zone 3 : Aucun risque de fibrillation cardiaque

Zone 4 : Fibrillation cardiaque possible (prob <50%)  
Zone 5 : Fibrillation cardiaque (prob >50%)



# Systemes triphasés équilibrés

---

## 5.4 Différents schémas de liaison à la terre:

- Chaque schéma se différencie par le mode de connexion du **neutre** de la source d'alimentation par rapport **à la terre**, ainsi que la manière de connexion à la terre des **masses métalliques de l'installation**.
- Chaque régime de neutre est identifié grâce à deux lettres:
  - ✓ La **1<sup>ère</sup> lettre** indique le mode de connexion du neutre du transformateur par rapport à la terre;
  - ✓ La **2<sup>ème</sup> lettre** indique le mode de connexion des masses métalliques de l'utilisation par rapport à la terre.
- Tous les SLT assurent la sécurité des personnes contre les contacts indirects avec chacun des avantages et des inconvénients en fonction des besoins de l'utilisateur.
- On distingue **3 schémas de liaison à la terre**:
  - ✓ Le schéma **TT**
  - ✓ Le schéma **TN** (et ses variantes)
  - ✓ Le schéma **IT**

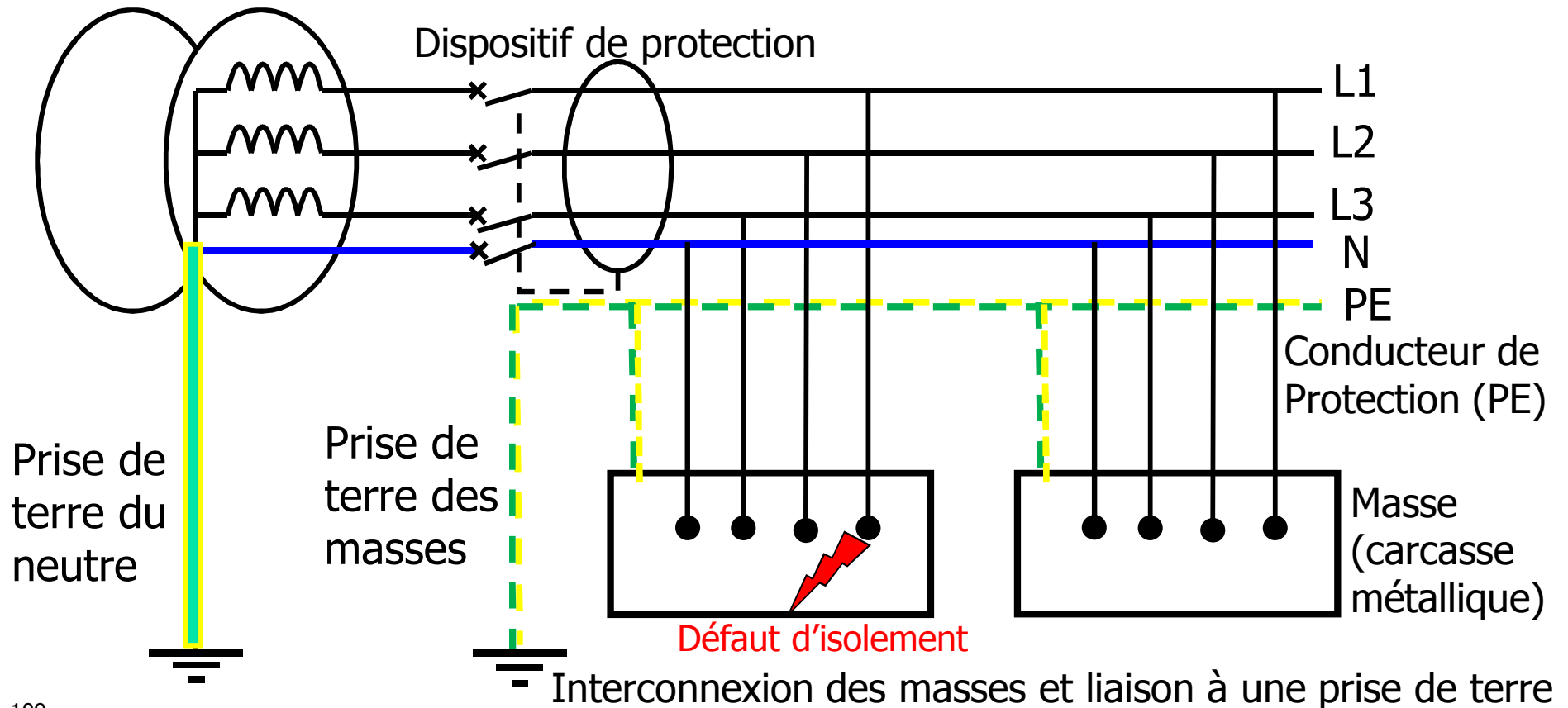
# Systemes triphasés équilibrés

## 5.3.1 Schéma TT:

**T:** liaison du neutre du transformateur de distribution à la terre.

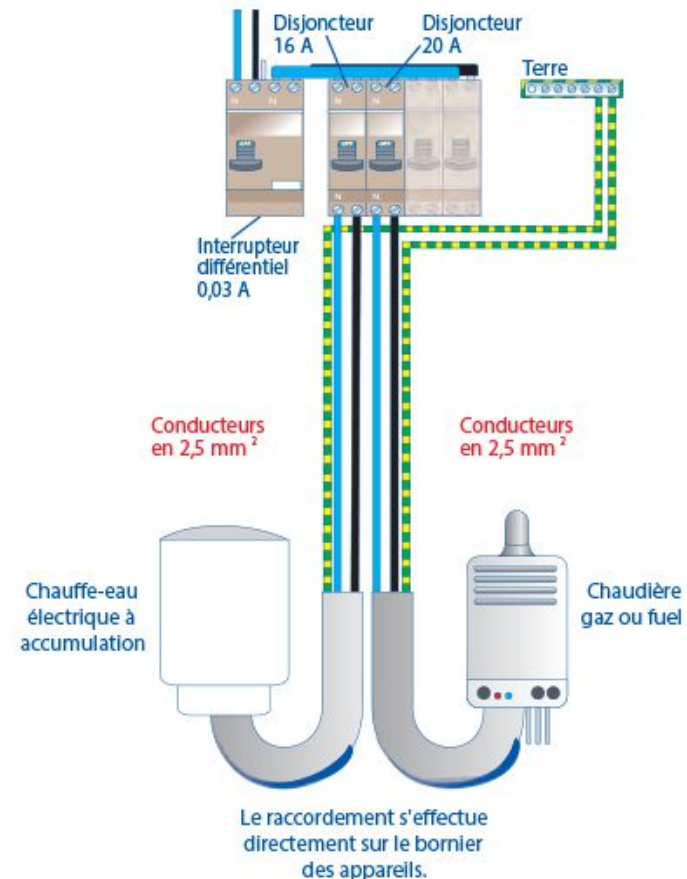
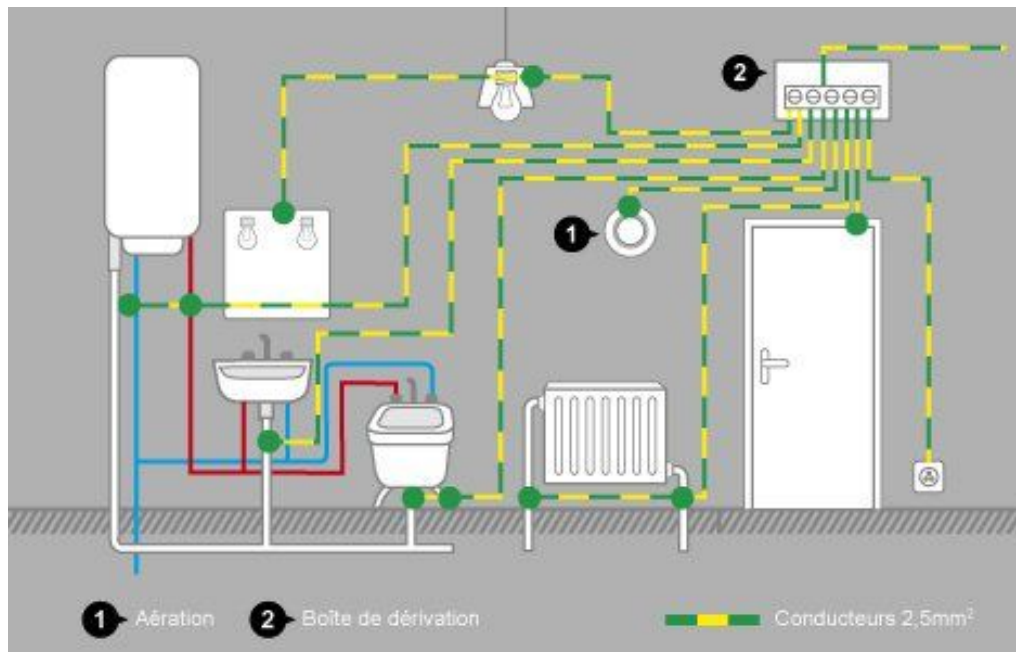
**T:** liaison des masses de l'installation à la terre.

- Le neutre du transformateur de distribution est mis à la terre à travers une prise de terre de résistance  $R_n$ . Les masses sont mises à la terre à travers une prise de terre de résistance  $R_u$ .



# Systemes triphasés équilibrés

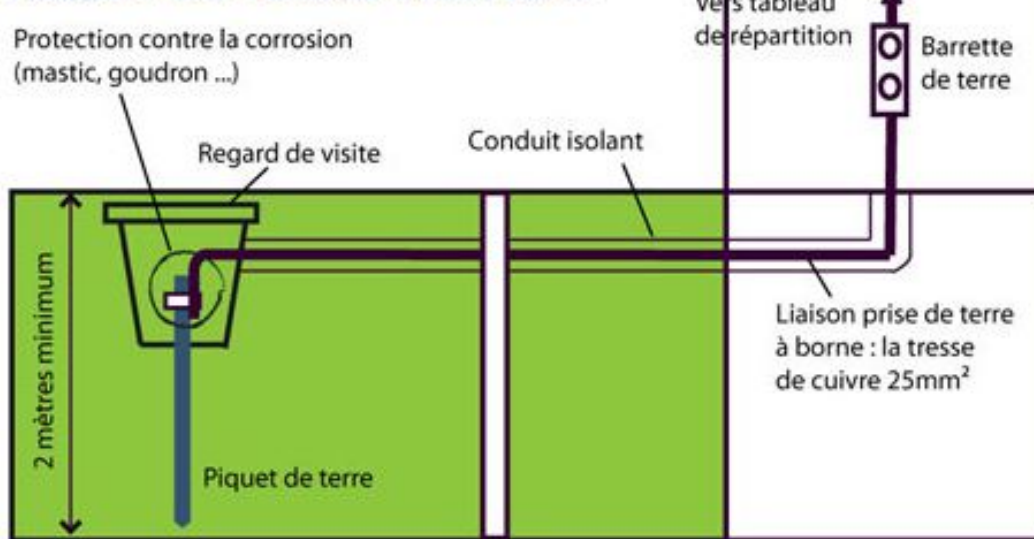
- **Le conducteur de protection** (PE: Protection Equipotentiel) de couleur vert/jaune dont la fonction est de relier toutes les masses métalliques des appareils à la terre.
- En cas de défaut, il permet de canaliser le courant électrique de défaut.
- Il est recommandé d'interconnecter toutes les masses d'utilisation d'une même installation et de les relier à la même prise de terre.
- Le conducteur de protection n'est pas distribué par le fournisseur d'énergie.



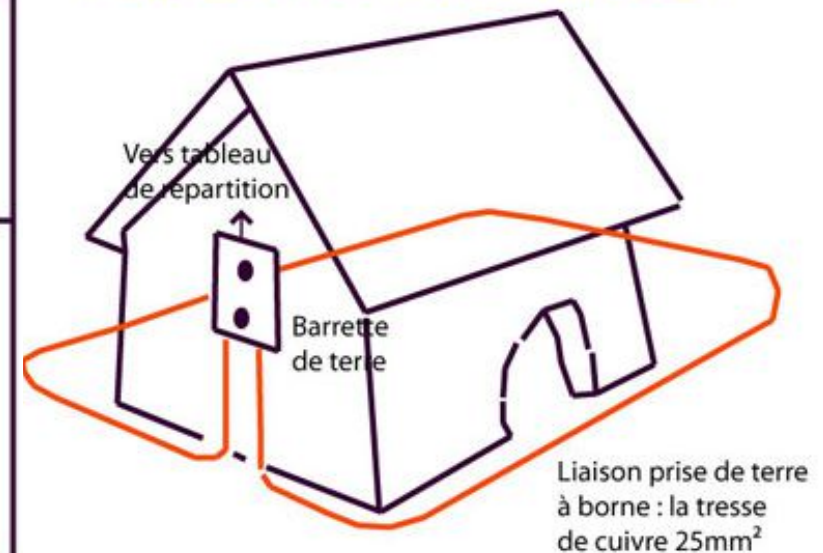
# Systemes triphasés équilibrés

- Une prise de terre peut être réalisée en boucle à fond de fouille (câble ceinturant les fondations d'un bâtiment) ou de type piquet enfoncé dans le sol.

## PIQUET DE TERRE VERTICAL



## BOUCLE À FOND DE FOUILLES



Technique de prise de terre par boucle



# Systemes triphasés équilibrés

## □ Mesure de la résistance de la prise de terre

- Permet au courant de défaut de s'écouler dans la terre et que la tension de défaut ne dépasse pas 50V ou 25V.

Le principe consiste à utiliser deux prises de terre auxiliaires :

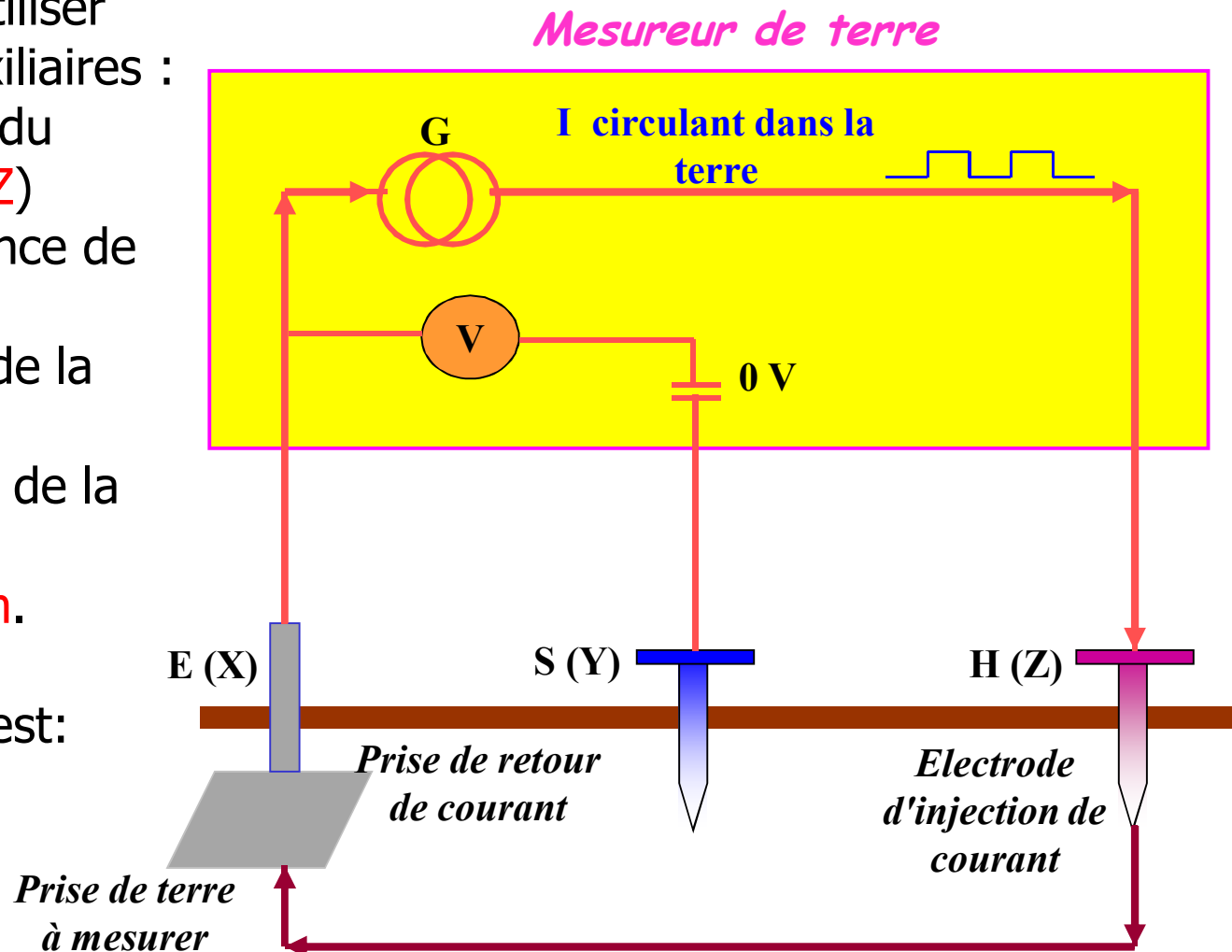
- l'une pour l'injection du courant de mesure (Z)
- l'autre pour la référence de potentiel 0V (Y).

Règles à respecter lors de la mesure :

- La distance  $ES=62\%$  de la distance  $EH$
- La distance  $EH > 25$  m.

La résistance cherchée est:

$$R_E = \frac{U_{ES}}{I_{EH}}$$

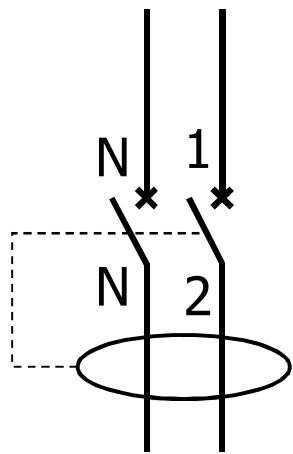


# Systemes triphasés équilibrés

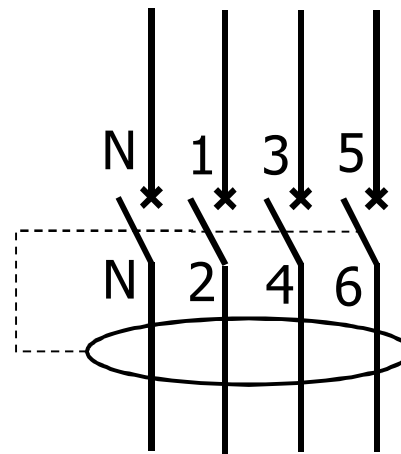
## ❑ Dispositif Différentiel à courant Résiduel

- L'emploi d'un Dispositif Différentiel à courant Résiduel (DDR) est obligatoire en tête de l'installation pour la protection des personnes.
- Le DDR permet de détecter et d'éliminer les défauts d'isollements en cas de fuite à la terre du courant de défaut par le PE (appelé courant résiduel).
- Le DDR peut être un **disjoncteur** ou un **interrupteur**:

### ❖ Interrupteur différentiel:



Bipolaire: (1 phase et un neutre)



Tétrapolaire: (3 phases et un neutre)

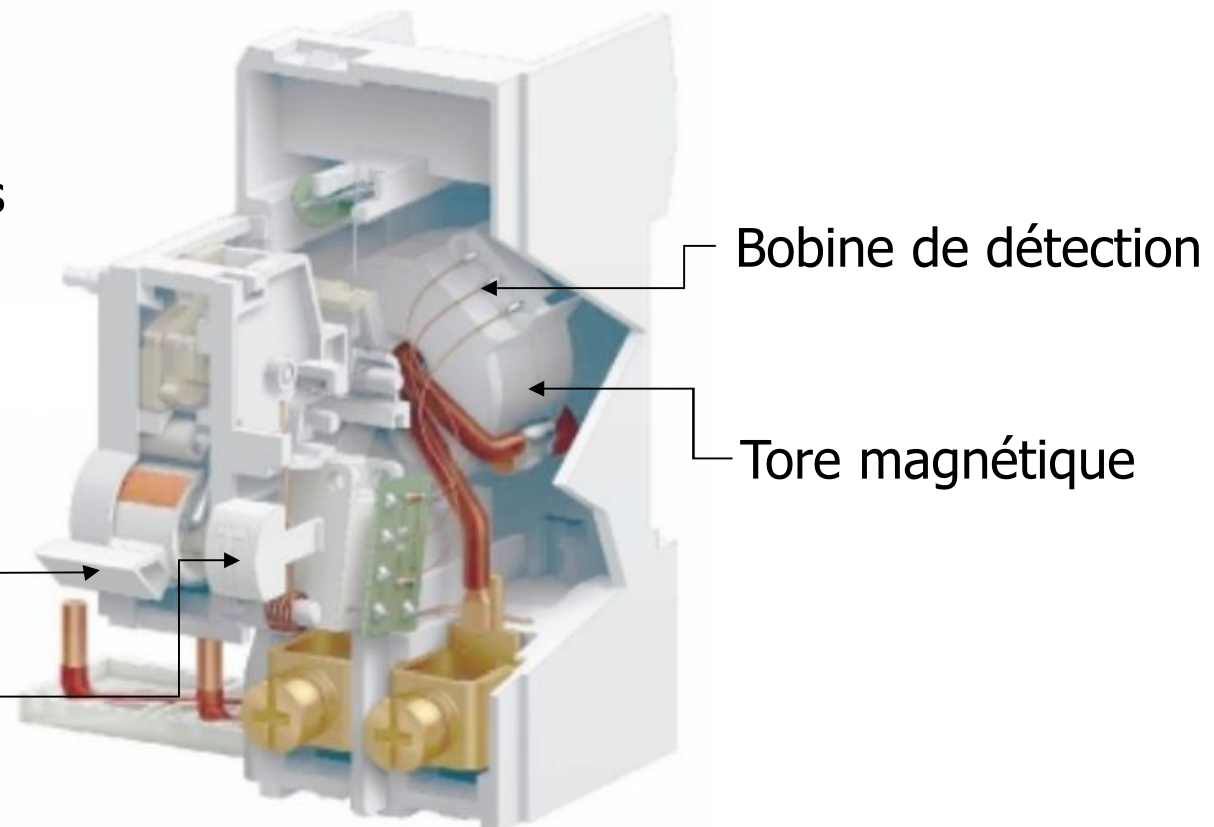


## Systemes triphasés équilibrés

- **Interrupteur différentiel** assure la protection des personnes et capable d'interrompre automatiquement un défaut d'isolement.
- **Principe de fonctionnement d'un DDR:**
- Le DDR comporte un circuit magnétique en forme de tore sur lequel sont bobinés le ou les circuits de Phase(s) et celui du Neutre.

Manette de manœuvre,  
change la position en cas  
de déclenchement.  
Remettre en position ON  
pour la remise en service

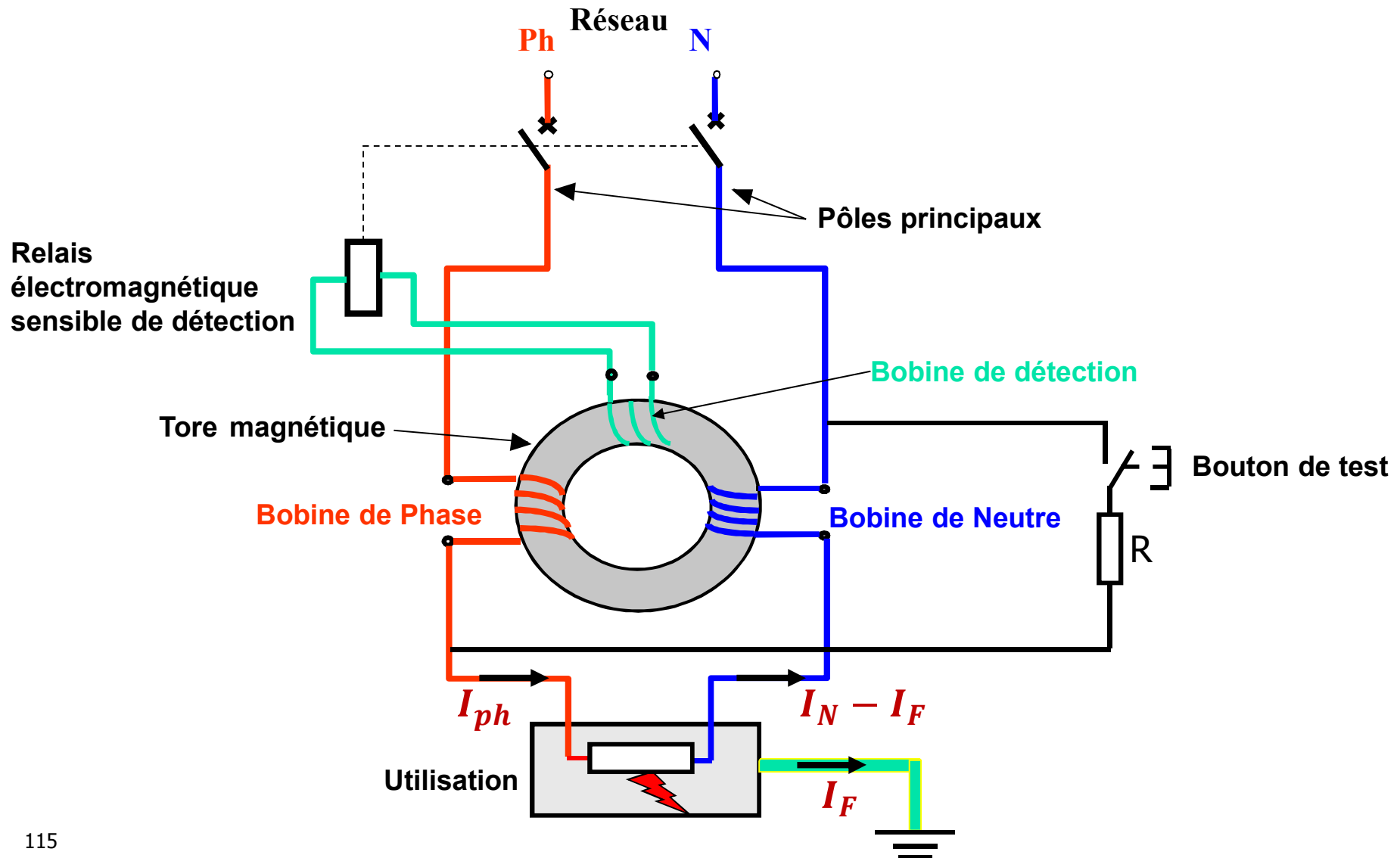
Bouton de test



Vue de l'intérieur d'un interrupteur différentiel

# Systemes triphasés équilibrés

- En l'absence de courant de fuite ou courant résiduel de défaut les flux produits par les bobines s'annulent, il ne se passe rien.



## Systemes triphasés équilibrés

- Si un défaut d'isolement survient, un déséquilibre apparaît générant un flux magnétique dans le tore.
- La bobine de mesure est le siège d'une force électromotrice (f.e.m.) qui alimente un petit relais et entraîne le déclenchement (ouverture) du DDR. L'installation est mis automatiquement hors tension.

### ❖ Disjoncteur différentiel:



## Systemes triphasés équilibrés

- Assure la protection du matériel contre les défauts de **surintensités** (surcharge ou court-circuit) (**fonction disjoncteur**), mais aussi la protection des personnes contre les défauts d'isolement (**fonction différentielle**).
- les disjoncteurs sont pratiquement tous magnétothermiques, c'est-à-dire composé d'un relais de **protection thermique** (protection contre les surcharges moyennes et de longues durées) et d'un relais de **protection magnétique** (protection contre les surcharges importantes et de courtes durées).

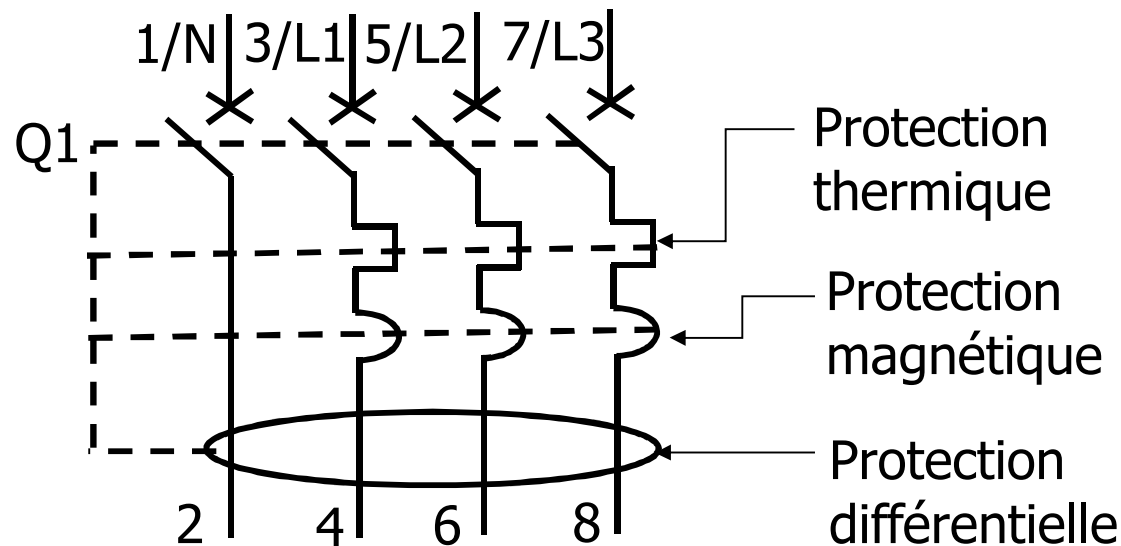
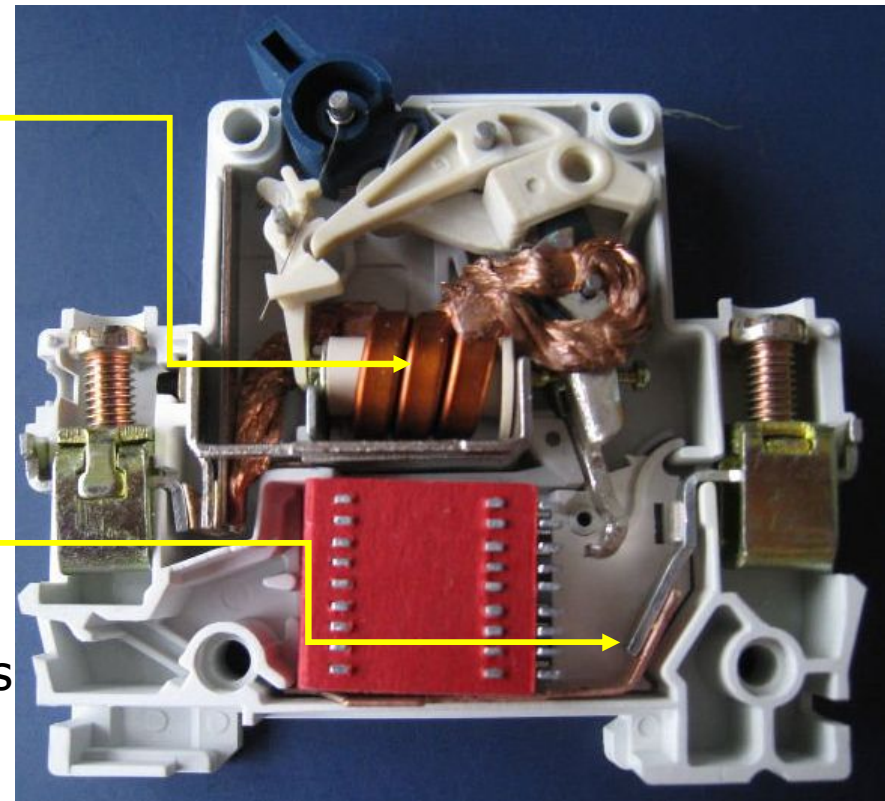
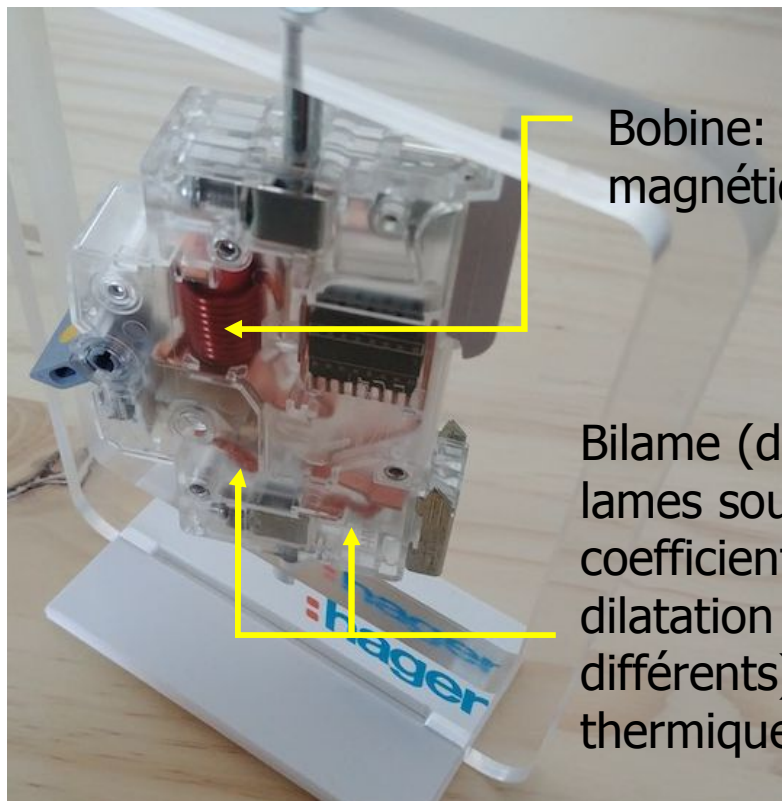


Schéma d'un disjoncteur (différentiel) magnétothermique

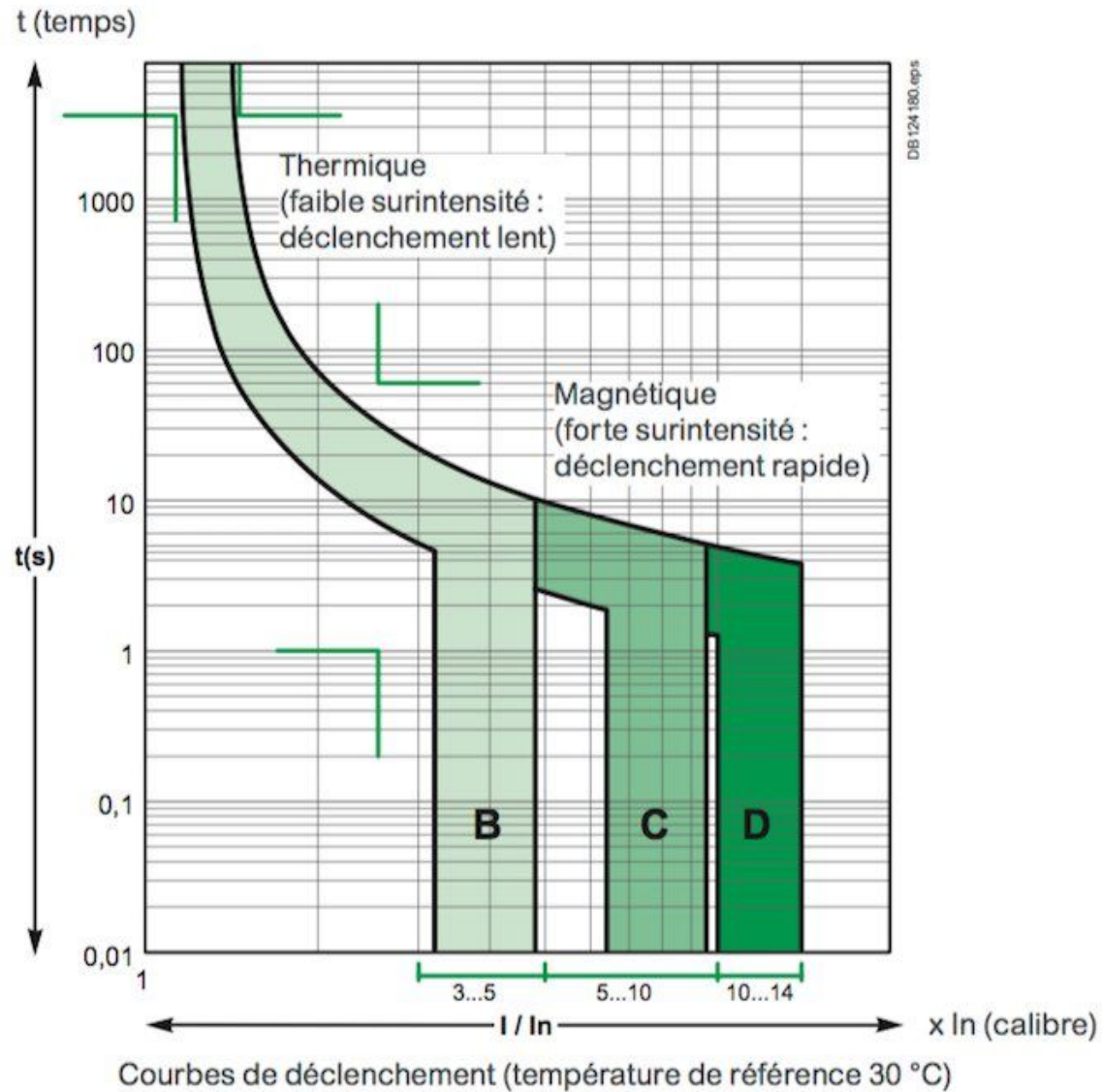
# Systemes triphasés équilibrés

- **Surintensité:** Si le courant dans les conducteurs et les appareils dépasse la valeur nominale fixée.
- **Surcharge:** Par exemple : trop d'appareils branchés sur un même circuit. Il y a échauffement des conducteurs et des appareils de commande, d'où risque d'incendie.
- **Court-circuit :** C'est un défaut correspondant à un contact direct entre phase et neutre. Le courant peut atteindre quelques milliers d'ampères, d'où destruction très rapide des conducteurs et risque d'incendie.



# Systemes triphasés équilibrés

- Courbe de déclenchement d'un disjoncteur



## Systemes triphasés équilibrés

- Les normes définissent 5 types de courbes de déclenchement d'un disjoncteur magnétothermique:

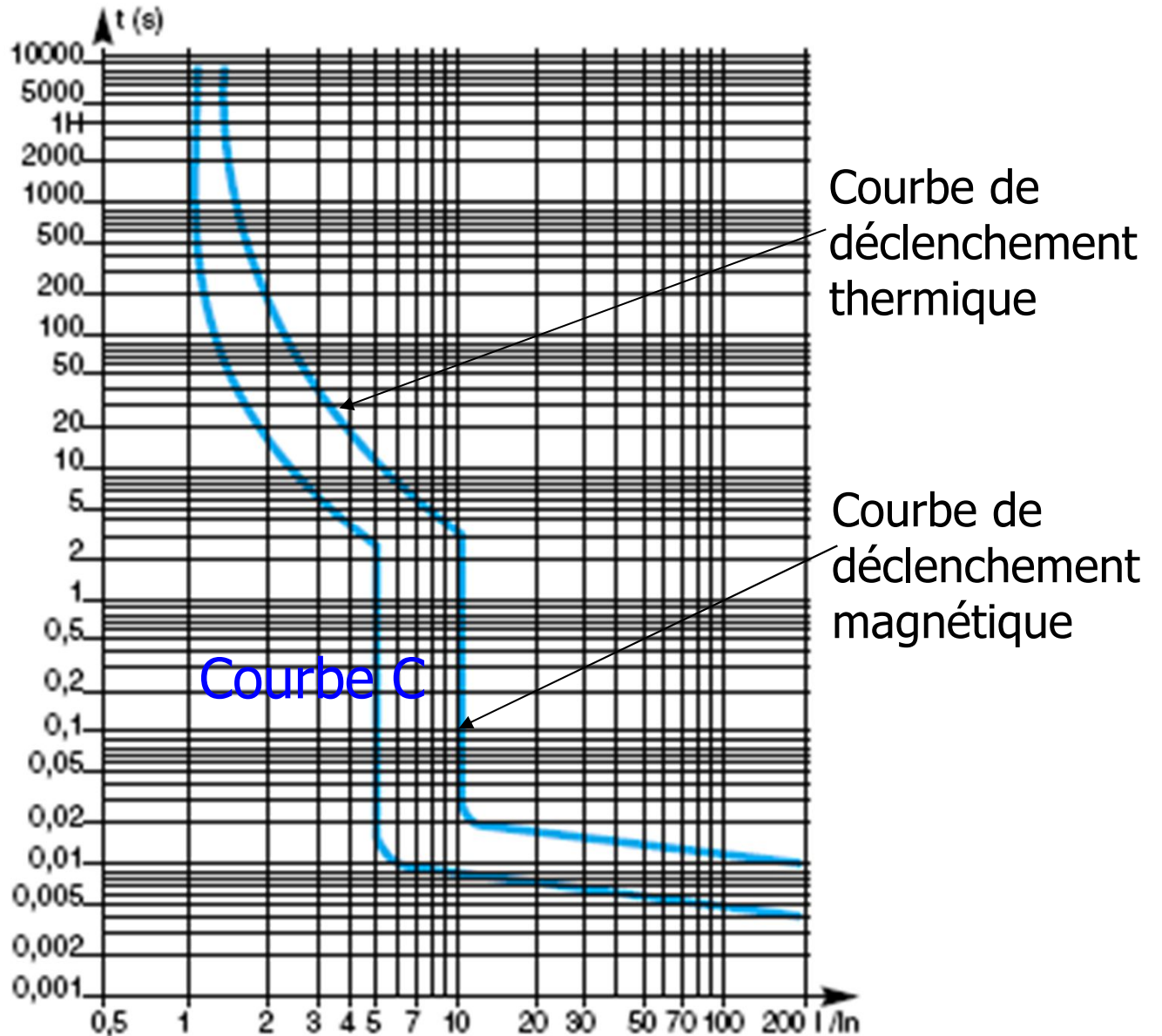
	Courbe B	Courbe C	Courbe D	Courbe Z	Courbe MA
Seuil de déclenchement magnétique	3 à 5 In	5 à 10 In	10 à 14 In	2,4 à 3,6 In	12 à 14 In
Utilisation	protection des générateurs, des câbles de grande longueur et des personnes dans les régimes IT et TN	applications Courantes (installations électriques domestiques )	protection des circuits à fort appel de Courant (autorise les pics de courant transitoires et temporaires )	protection des circuits électroniques très sensibles au court circuit	protection des départs moteurs (forte intensité au démarrage)

**Remarque:** La courbe d'un disjoncteur est indiquée juste avant son calibre.

# Systemes triphasés équilibrés

Temps de déclenchement d'un disjoncteur réglé pour un courant nominal  $I_n$  :

- Les deux courbes bleues sont la moyenne basse et la moyenne haute du temps de déclenchement.
- Pour une surcharge de  $4I_n$  le temps maximum de coupure entre 3 et 20s (déclenchement du relais thermique).
- Pour une surcharge de  $20I_n$  le temps maximum de coupure entre 7 et 20ms (déclenchement du relais magnétique).






# Systemes triphasés équilibrés

## □ Caracteristiques électriques d'un DDR

Tension d'emploi - tension nominale:	Courant nominal ( $I_n$ ) - Courant assigné :	Nombre de pôles:
<ul style="list-style-type: none"><li>• Monophasé: 230 V<math>\sim</math></li><li>• Triphasé: 400 V<math>\sim</math></li></ul>	Le courant assigné ou calibre des circuits à protéger, correspond à l'intensité nominale ( $I_n$ ) circulant dans le circuit. Pour un disjoncteur différentiel, le courant nominal va de 2 à 63 A.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Unipolaire + Neutre: 1 pôle + N (1 Phase et 1 Neutre).</li><li>• Bipolaire : 2 pôles (1 Phases et un Neutre).</li><li>• Tripolaire : 3 pôles (3 Phases).</li><li>• Tétrapolaire : 3 pôles + N (3 Phases et 1 Neutre)</li></ul>

# Systemes triphasés équilibrés

Types de DDR			
Type AC 	Type A 	Type HI ou Hpi ou Si	Type B 
ne détecte que les courants résiduels alternatifs sinusoïdaux 50 Hz (Utilisé pour les applications courantes)	en plus des caractéristiques du AC, il détecte aussi les courants résiduels à composante continue (circuit cuisinière ou plaque de cuisson, lave linge, machines à variateurs de vitesse...)	détecte les courants résiduels à composante alternative et continue (type A), utilisé dans les cas spéciaux (alimentation de matériels informatique, machines automatisées, instrumentation médicale, circuit congélateur...)	détecte les courants résiduels à composante alternative et continue (type A) et les défauts à courant continu lisse (Installation photovoltaïques, variateurs de vitesse, centres d'appel, installations alimentant du matériel médial...)

- Sensibilité en mA :  $I_{\Delta n}$ 
  - ✓ La sensibilité c'est la valeur à partir de laquelle un courant de fuite (courant de défaut ou courant résiduel) à la terre sera détecté (détection du défaut d'isolement):  $I_{\Delta n} \leq I_F$
  - ✓ D'après les normes de construction à 20°C les dispositifs différentiels en Basse Tension ne se déclenchent pas réellement à  $I_{\Delta n}$  mais à partir de:  $I_{\Delta n}/2 \leq I_F \leq I_{\Delta n}$

# Systemes triphasés équilibrés

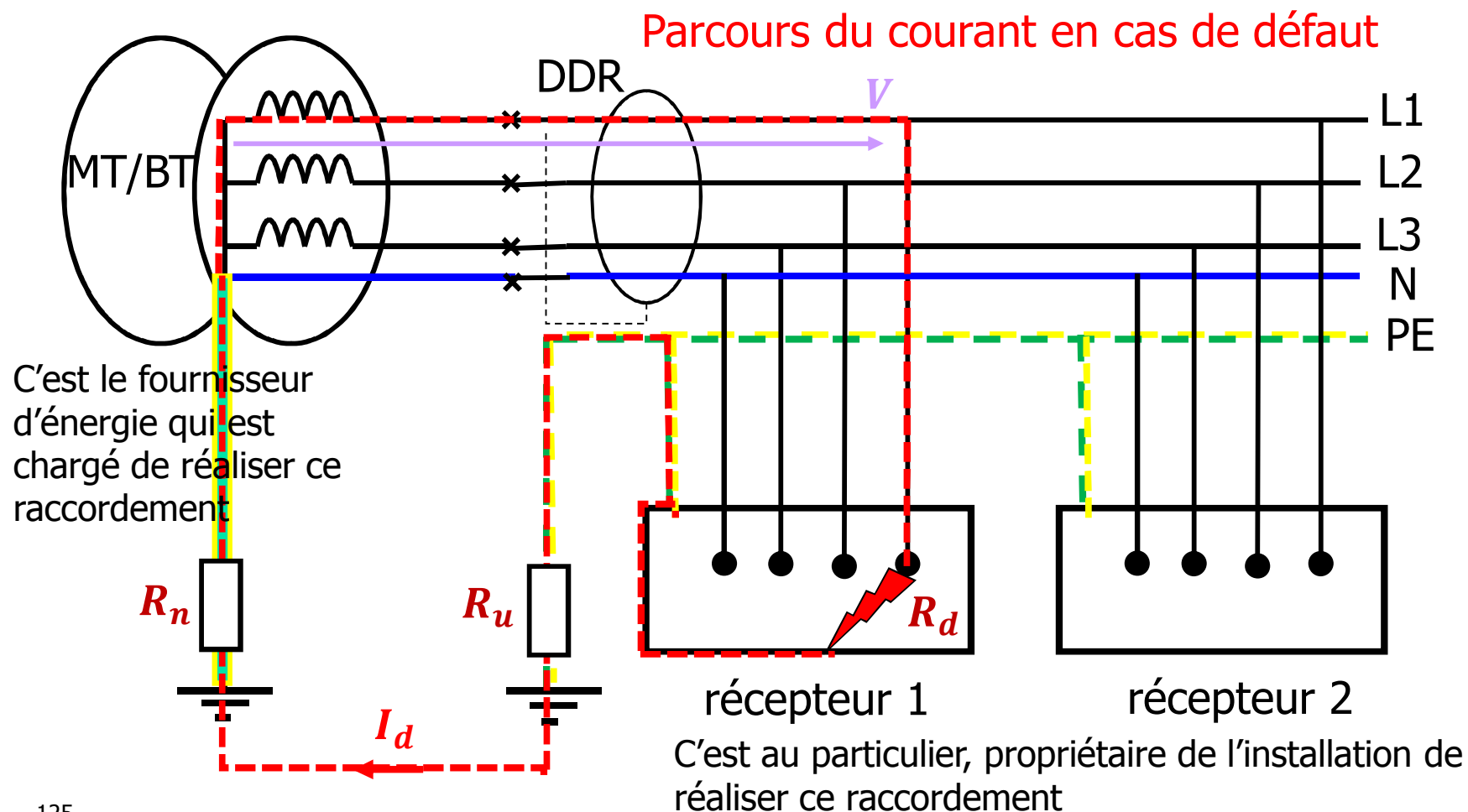
- Temps maximal de déclenchement:

DDR haute sensibilité $I_{\Delta n} = 30mA$		
Courant de défaut $I_F$		Temps maximal de déclenchement
$I_{\Delta n}$	30 mA	300 ms
$2 \times I_{\Delta n}$	60 mA	150 ms
$5 \times I_{\Delta n}$	150 mA	40 ms

# Systemes triphasés équilibrés

## □ Analyse de la boucle de défaut du Schéma TT:

- Défaut entre le phase 1 et la carcasse métallique du récepteur 1,
- Le courant de défaut est faible car il est limité par les résistances des prises de terre.



# Systemes triphasés équilibrés

## □ Schéma équivalent:

- Courant de défaut (ou courant de fuite):

$$I_d = \frac{V}{R_{ph} + R_d + R_u + R_n}$$

- Tension de contact (ou tension de défaut) entre la masse et la terre:

$$U_C = R_u I_d; R_u \searrow \Rightarrow U_C \searrow$$

## Exemple:

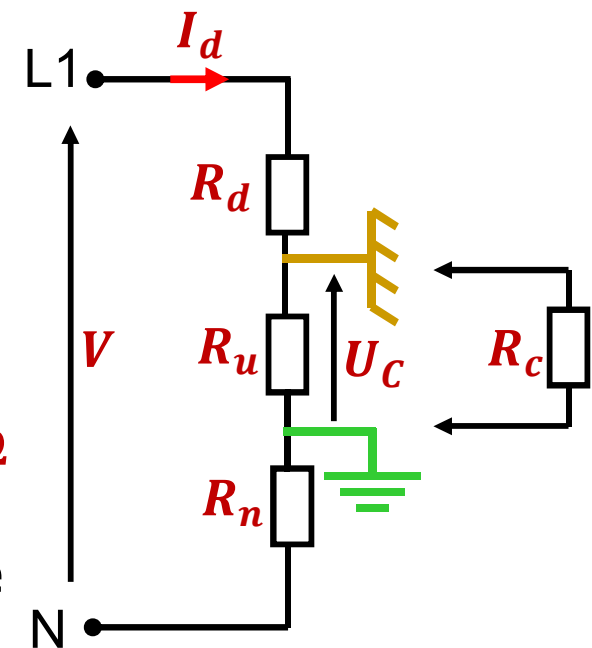
Avec des valeurs courantes pour les différentes variables:

- Tension d'utilisation:  $V = 230V$
- Résistance de mise à la terre des masses  $R_u = 10\Omega$
- Résistance de la prise de terre du neutre  $R_n = 10\Omega$
- Résistance de défaut très faible et souvent négligée  
 $R_d = 0,1\Omega$

On trouve:

- Courant de défaut:

$$I_d = \frac{V}{R_d + R_u + R_n} = \frac{230}{0,1 + 10 + 10} = 11,4A$$



## Systemes triphasés équilibrés

- Valeur qui s'ajoute au courant d'emploi, trop faible pour provoquer le déclenchement d'une protection classique (court-circuit ou surcharge), un récepteur domestique ou industriel absorbe couramment plus d'une dizaine d'Ampères.
- Tension de contact:  
$$U_C = R_u I_d = 10 \times 11,4 = 114V > U_L \Rightarrow \text{tension mortelle}$$
- Il est nécessaire de mettre hors tension l'installation à l'aide d'un DDR capable d'isoler et de ne mesurer que le courant de défaut.

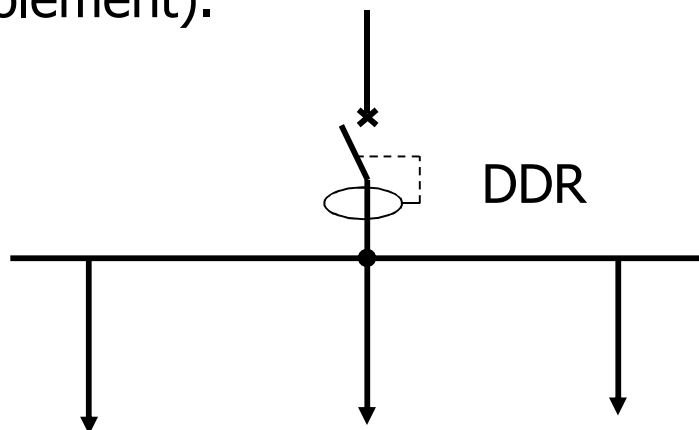
### Remarque:

- ✓ D'après la norme tous les circuits de l'installation doivent être protégés par des Dispositifs Différentiels à courant Résiduel assigné au plus égal à 30mA ( $I\Delta n \leq 30mA$ ).
- ✓ Il convient de choisir un courant différentiel résiduel assigné du DDR en fonction de la valeur de la résistance de la prise de terre qui doit être la plus faible possible, compte tenu de la nature du terrain.

# Systemes triphasés équilibrés

## Protection:

- La coupure a lieu lors d'un défaut d'isolement lorsque le courant de défaut est supérieur à la sensibilité  $I\Delta n$  du DDR. La condition de protection doit satisfaire à la relation suivante:  $R_u \cdot I\Delta n \leq U_L \Rightarrow I\Delta n \leq \frac{U_L}{R_u}$
- Valeur maximale de la prise de terre en fonction du courant assigné du DDR; pour  $U_L = 50V$ :  $R_u \leq U_L / I\Delta n$
- Toute installation TT doit être protégée par un DDR placé à l'origine de l'installation.
- Cette solution présente l'inconvénient de couper toute l'installation en cas de défaut (Pas de continuité de service lors d'un défaut d'isolement).



Sensibilité du DDR: $I\Delta n$		$R_u$
Basse sensibilité	20A	2,5Ω
	10A	5Ω
	5A	10Ω
	3A	17Ω
Moyenne sensibilité	1A	50Ω
	500mA	100Ω
	300mA	167Ω
	100mA	500Ω
Haute sensibilité	≤30mA	≥1667Ω

# Systemes triphasés équilibrés

## □ Protection sélective:

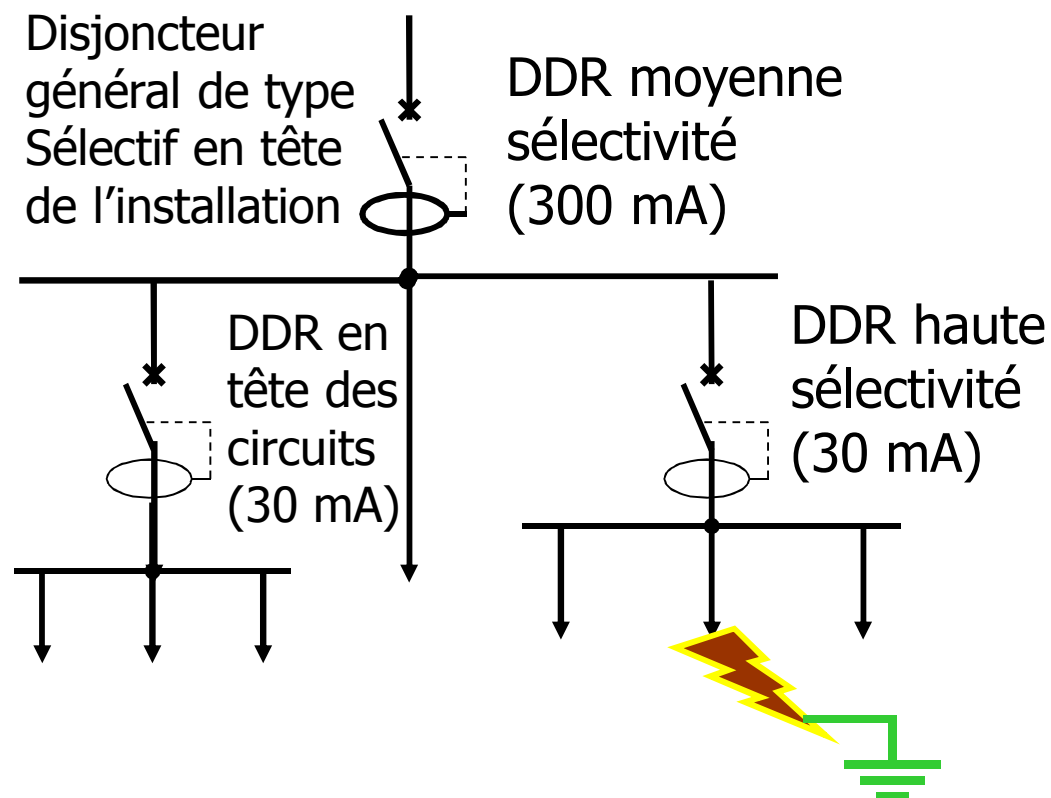
- Lorsque plusieurs protections différentielles sont en cascade, il faut que le DDR qui se trouve juste en amont du défaut réagisse.

- Pour obtenir une sélectivité totale, il suffit de respecter les deux règles suivantes:

✓  $I\Delta n$  sensibilité du dispositif amont  $\geq 2 \times I\Delta n$  sensibilité du dispositif aval

✓ Temps de déclenchement du dispositif amont  $>$  temps de déclenchement du dispositif aval

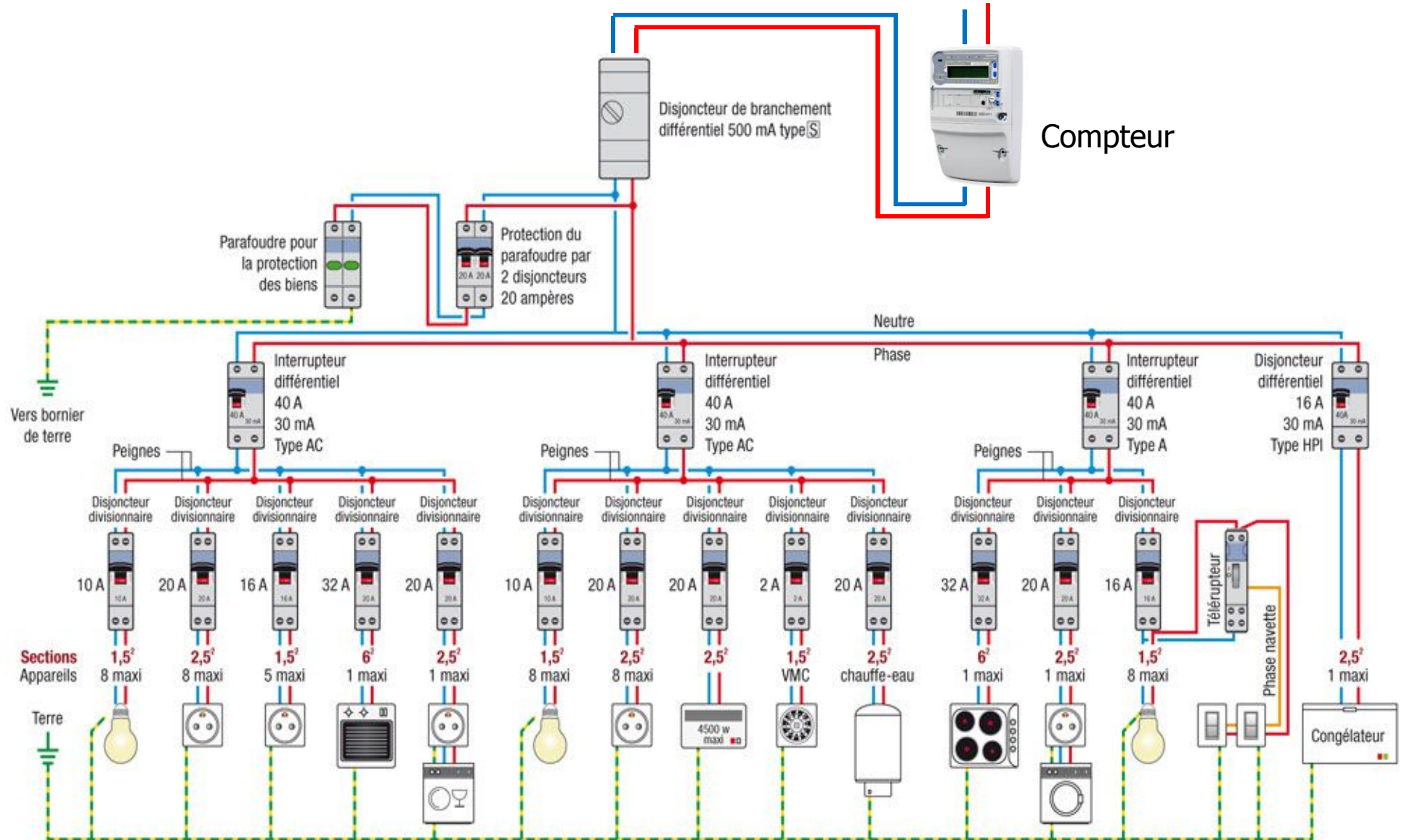
- Dans la pratique, le DDR amont est de " type S " (sélectif ), c'est-à-dire qu'il est légèrement retardé à l'ouverture.



Seul le dispositif aval se déclenche, il y a sélectivité: on évite une coupure générale de l'installation

# Systemes triphasés équilibrés

## Exemple de schéma général d'une installation type:





# Systemes triphasés équilibrés

---

## □ **Caractéristiques du schéma TT:**

### • **Avantages :**

- ✓ Assure parfaitement la sécurité des biens et des personnes;
- ✓ Ne nécessite pas de personnel qualifié pour entretenir les installations (sauf tests des DDR), Protection par dispositif différentiel à courant résiduel;
- ✓ Idéal pour les mauvaises valeurs de prises de terre;
- ✓ Extension d'installation simple à réaliser.

### • **Inconvénients:**

- ✓ Sa mise en œuvre est coûteuse (à cause des disjoncteurs différentiels);
- ✓ Coupure de l'installation dès le premier défaut d'isolement;
- ✓ Limité aux installations ayant peu de courant de fuites;
- ✓ Pas de continuité de service lors d'un défaut d'isolement.

### • **Utilisations:**

- ✓ Il est utilisé par le fournisseur d'énergie électrique pour toute la distribution BT publique (l'utilisateur n'est pas propriétaire du transformateur);
- ✓ Elle convient aux installations faites pour des particuliers non qualifiés en électricité.

# Systemes triphasés équilibrés

## 5.3.2 Schéma TN:

**T:** liaison du neutre du transformateur de distribution à la terre.

**N:** liaison des masses de l'installation au neutre par le PE.

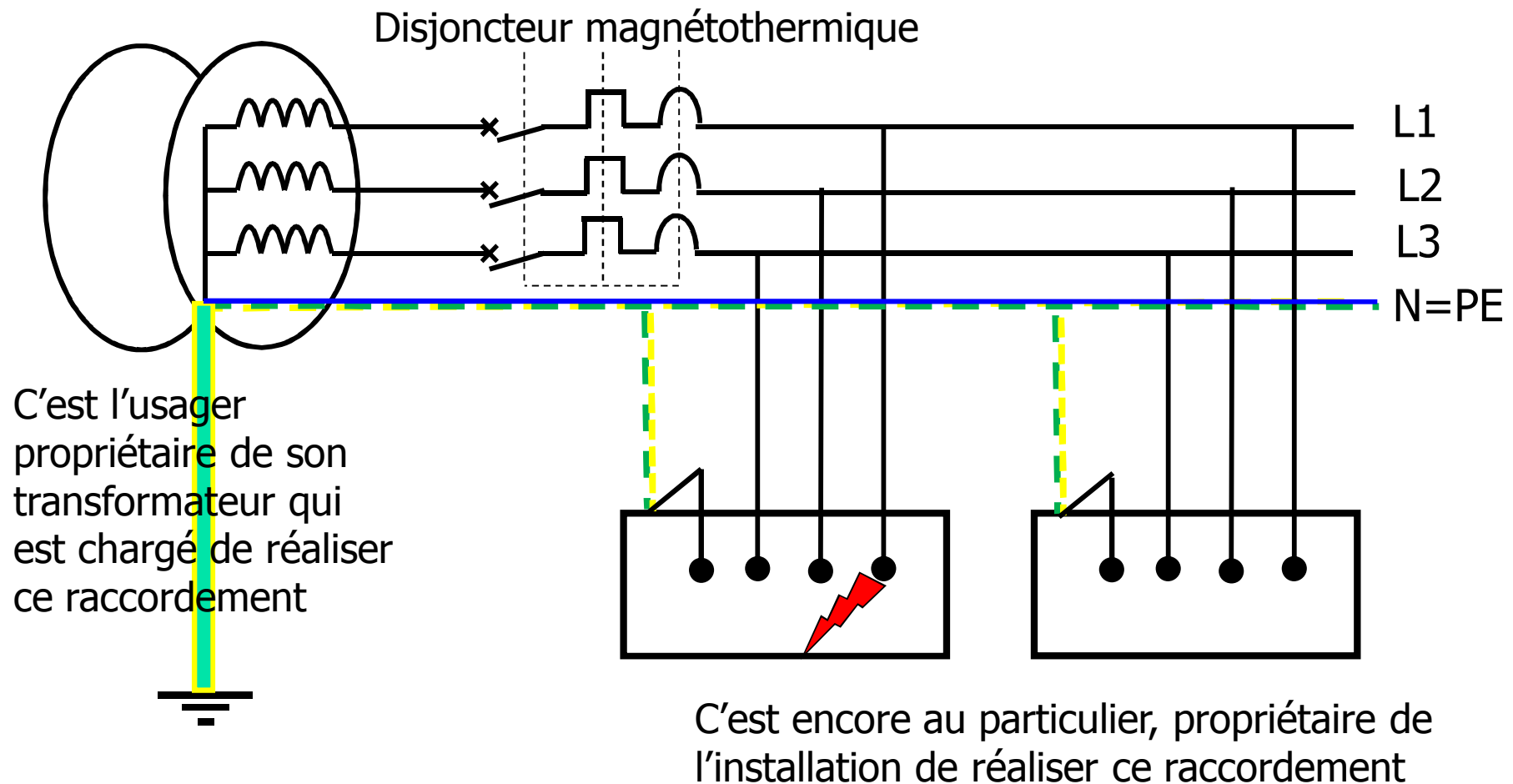
- Ce type de schéma transforme tout défaut d'isolement en court-circuit monophasé Phase/Neutre, le défaut déclenche un disjoncteur magnétothermique ou fusible.
- Une 3ème lettre représente la disposition du conducteur de neutre et du conducteur de protection PE:

<b>TNC</b> (Commun): Le neutre et le conducteur PE sont combinés en un seul conducteur (PEN)	<b>TNS</b> (Séparé): Le neutre est séparé de la terre
<ul style="list-style-type: none"><li>• Permet une économie lors de l'installation, d'un conducteur ainsi que d'un pôle au niveau de l'appareillage de protection par disjoncteurs;</li><li>• N'utilise qu'un dispositif de protection tripolaire</li><li>• N'est autorisé que sur les conducteurs de section supérieure à 10 mm<sup>2</sup> pour les conducteurs en cuivre et 16 mm<sup>2</sup> en aluminium;</li><li>• Le conducteur PE ne doit pas être coupé afin d'assurer la protection des personnes;</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Utilise un dispositif de protection tétrapolaire pour la prise en compte du neutre;</li><li>• Obligatoire pour les sections &lt; 10 mm<sup>2</sup> (Cu) et &lt; 16 mm<sup>2</sup> (Al);</li><li>• Obligatoire dans les locaux présentant des risques d'incendie.</li></ul>

# Systemes triphasés équilibrés

## □ Schémas TNC:

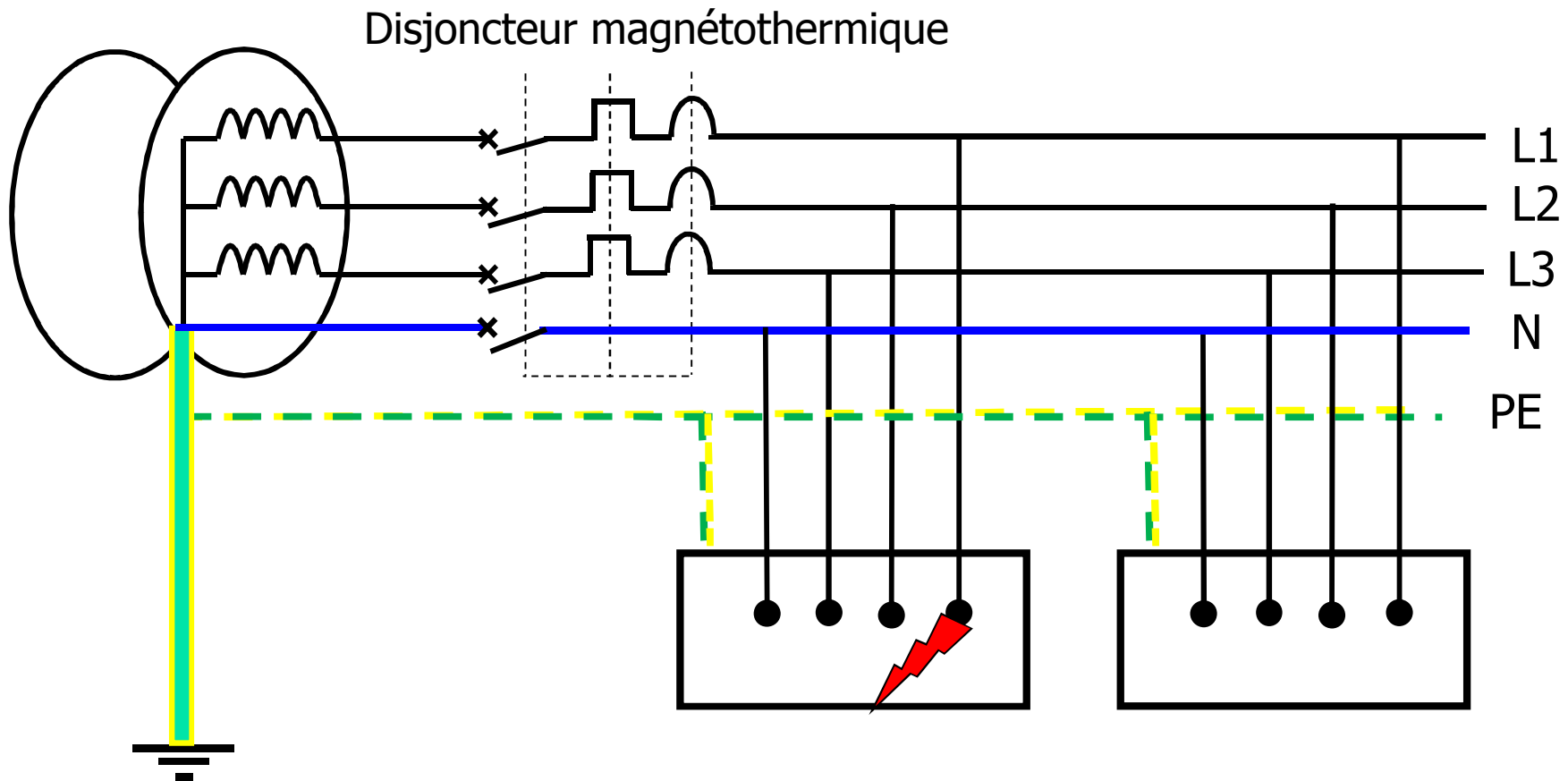
Le conducteur de protection et le conducteur neutre sont confondus en un seul conducteur appelé PEN



# Systemes triphasés équilibrés

## □ Schémas TNS:

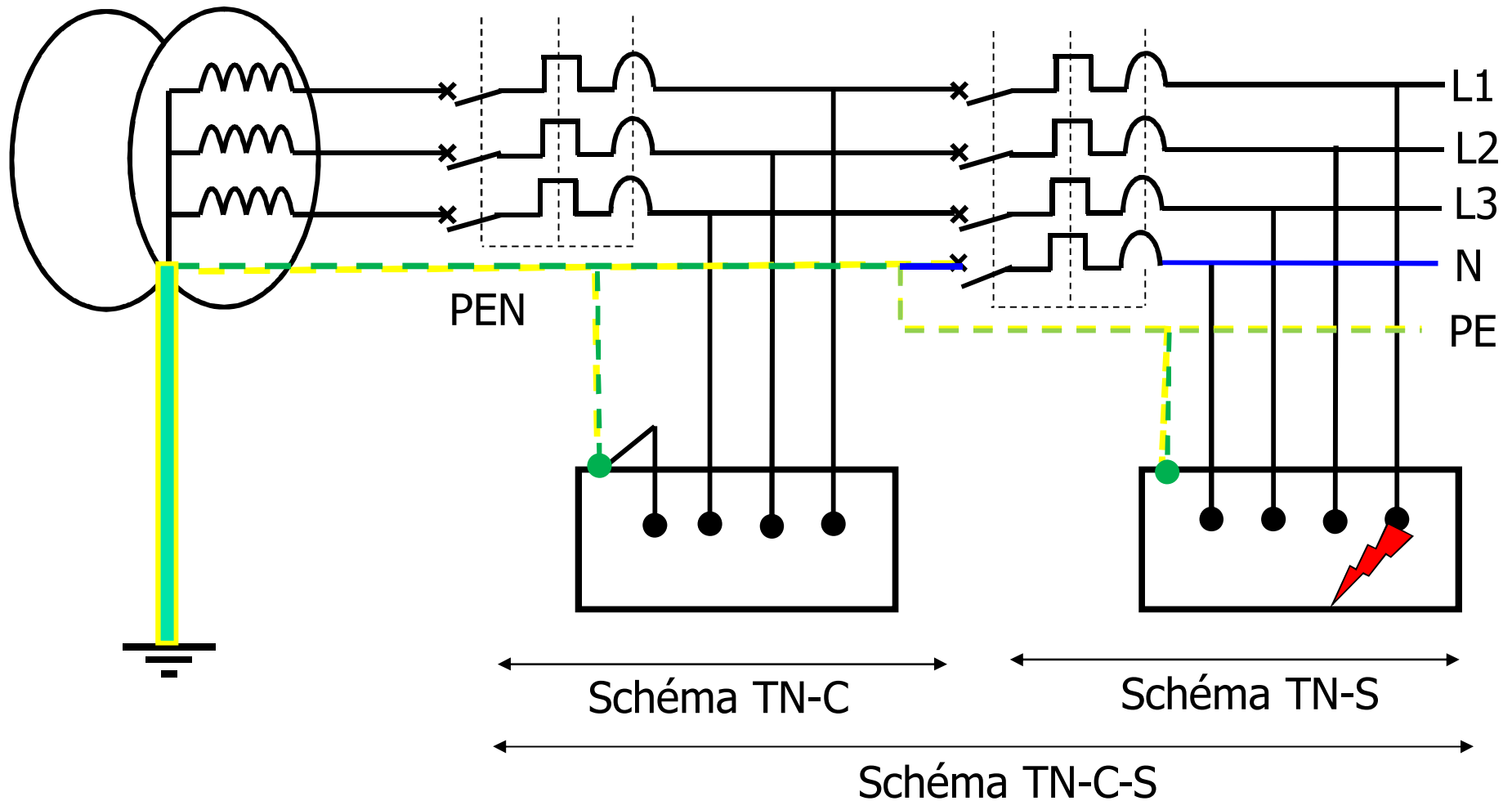
Le conducteur de protection et le conducteur neutre sont distincts. Les masses sont reliées au conducteur de protection (PE).



# Systemes triphasés équilibrés

## Remarque:

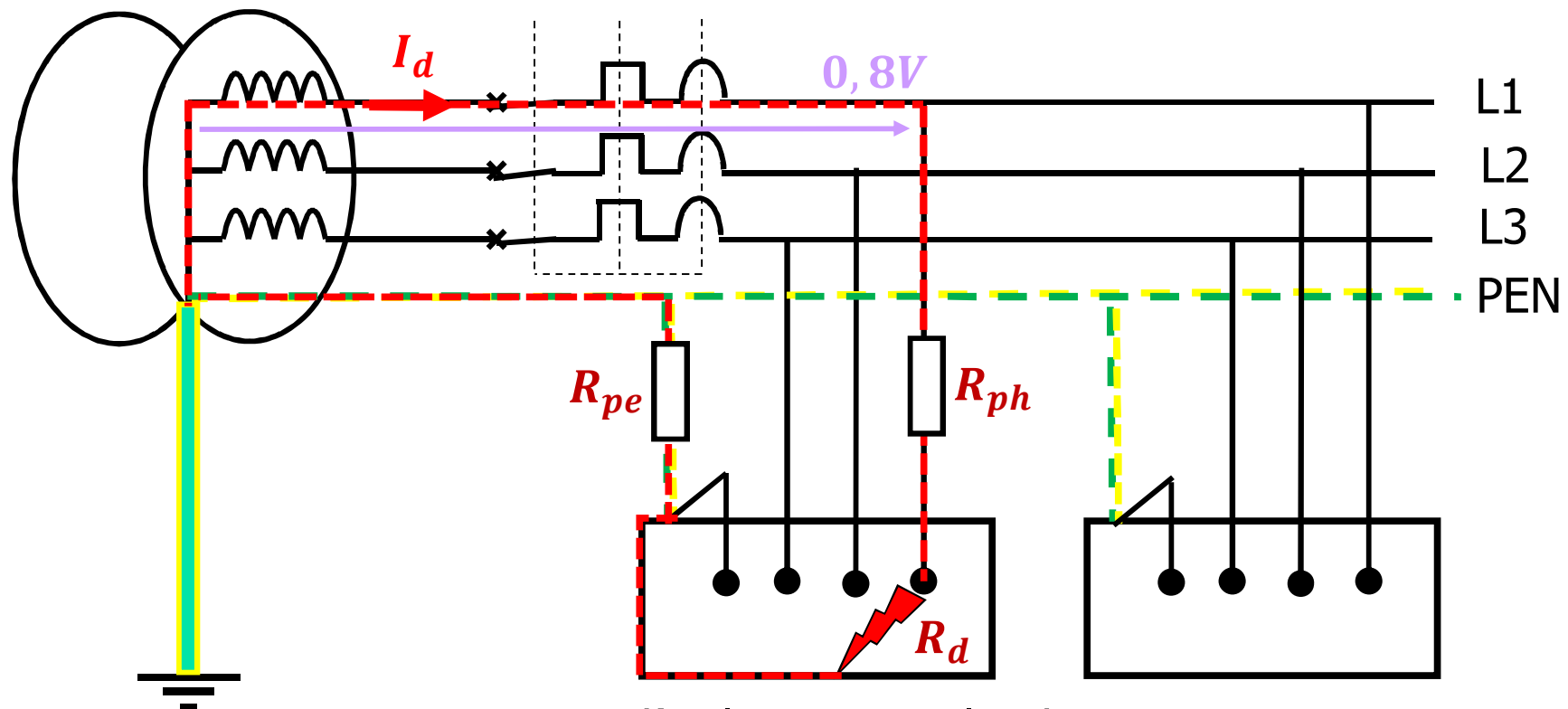
On peut avoir un TN-S à la suite d'un TN-C appelé TN-C-S (mais pas l'inverse).



# Systemes triphasés équilibrés

## □ Analyse de la boucle de défaut du schéma TN:

- Le défaut d'isolement est transformé en un défaut entre phase et neutre. Ce qui se traduit par un court-circuit phase/neutre.
- Le courant de défaut n'est limité que par l'impédance: des câbles, du défaut et du transformateur. Cette impédance est très faible, l'intensité du courant de défaut est très importante.



Rupture d'isolement sur la phase 1

# Systemes triphasés équilibrés

## □ Schéma équivalent:

- Le courant de défaut est un courant de court-circuit entre phase et neutre;
- Afin de tenir compte des impédances en amont de l'installation. La norme attribue une chute de tension de 20% au distributeur d'énergie:

$$I_d = \frac{0,8V}{R_{ph} + R_d + R_{pe}}$$

- Tension de contact:

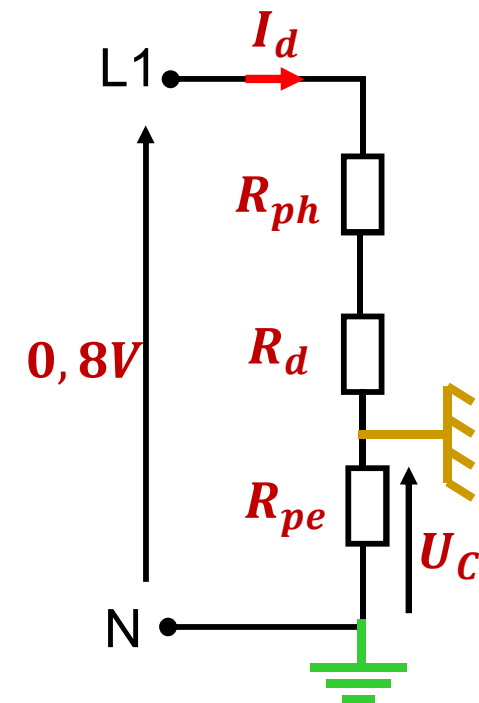
$$U_C = R_{pe} I_d$$

## Exemple:

- Tension d'utilisation:  $V = 230V$
- Résistance du conducteur de phase  $R_{ph} = 40m\Omega$
- Résistance du conducteur PE  $R_{pe} = 40m\Omega$
- Résistance de défaut  $R_d = 0\Omega$

On trouve:

- Courant de défaut:  $I_d = \frac{0,8 \times 230}{0,04 + 0,04} = 2300A$
- Tension de contact:  $U_C = 0,04 \times 2300 = 92V > U_L \Rightarrow$  dangereuse; il est nécessaire de mettre hors tension automatique et immédiate l'installation.



# Systemes triphasés équilibrés

## □ Protection:

- La protection des personnes est assurée par un disjoncteur magnétothermique beaucoup moins coûteux qu'un DDR.
- Le déclenchement du disjoncteur doit intervenir au **premier défaut**
- La valeur du courant de défaut dépend principalement de la longueur de ligne et de la section des câbles:

$$I_d = \frac{0,8VS_{ph}}{\rho L \left(1 + \frac{S_{ph}}{S_{pe}}\right)} = \frac{0,8VS_{ph}}{\rho L(1 + m)}$$

- Tension de contact:  $U_c = \frac{0,8.V.m}{(1+m)}$

Avec:

- $L$ : Longueur de la canalisation (m)
- $S_{ph}$ : Section des conducteurs de phase (mm<sup>2</sup>)
- $S_{pe}$ : Section du conducteur de protection (mm<sup>2</sup>)
- $\rho$ : Résistivité des conducteurs (Ωmm<sup>2</sup>/m)
- $m$ : Rapport entre section des conducteurs de phases et protection;  $m = \frac{S_{ph}}{S_{pe}}$

## Systemes triphasés équilibrés

- En cas de défaut, c'est la partie magnétique de la protection qui déclenche la coupure de l'alimentation électrique contre les court-circuit.
- Pour que la protection assure bien sa fonction, il faut que:

$$I_{mag} < I_d$$

avec:  $I_{mag}$  est le courant de fonctionnement du déclencheur magnétique du disjoncteur.

- L'expression de la longueur maximale autorisée par la protection ayant pour seuil de déclenchement du dispositif magnétique  $I_{mag}$ :

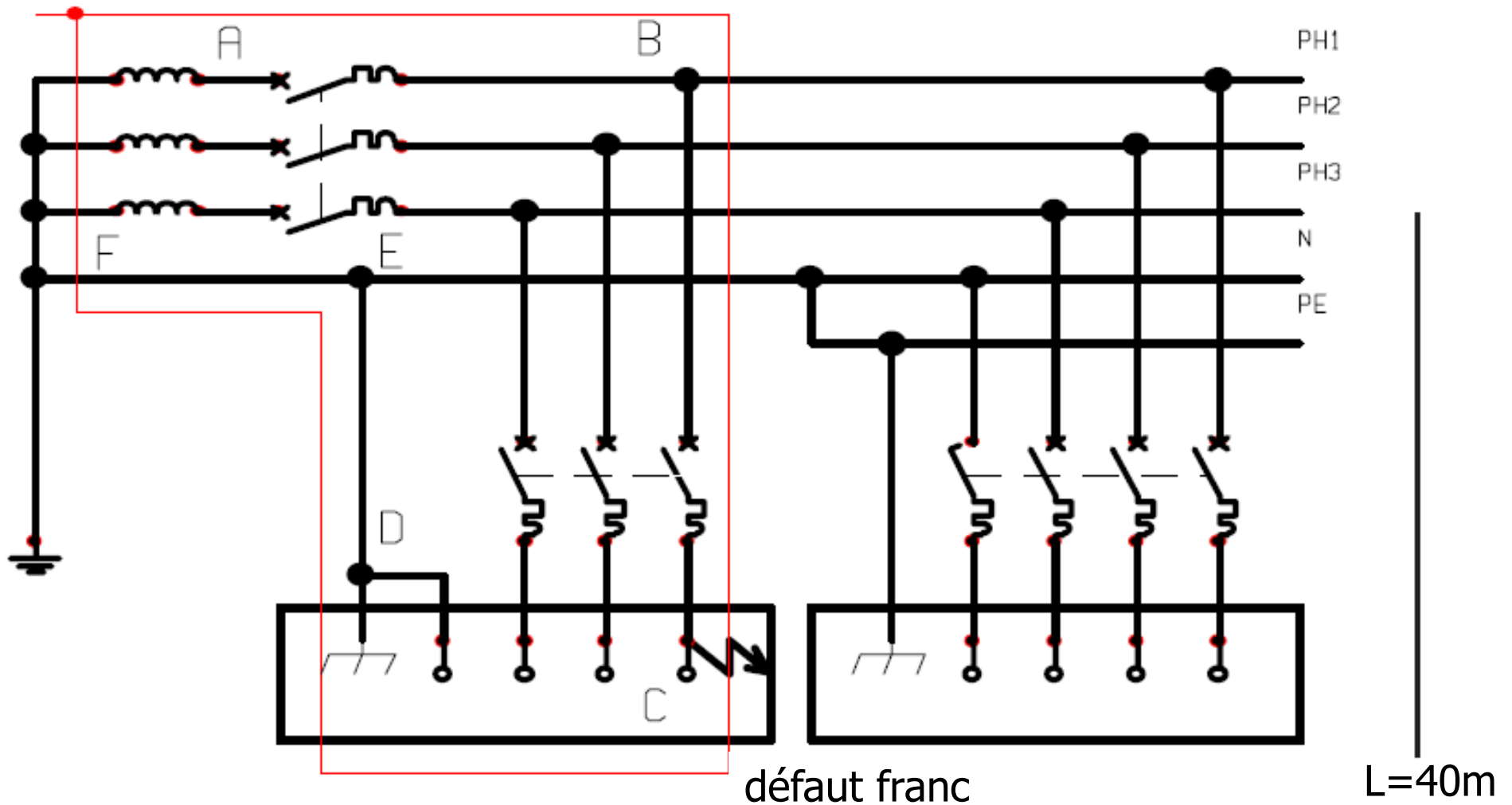
$$L_{max} = \frac{0,8VS_{ph}}{\rho(1+m)I_{mag}}$$

- Si la ligne est d'une longueur supérieure à  $L_{max}$ , il faut soit:
  - ✓ Utiliser des déclencheurs à faible seuil (agir sur le réglage du calibre du relais magnétique pour diminuer  $I_{mag}$ );
  - ✓ Augmenter la section des conducteurs  $S_{ph}$  ( $R_{cables} \searrow \Rightarrow I_d \nearrow$ , plus cher, mais  $I_d$  augmente);
  - ✓ Mettre en œuvre un DDR (solution simple ne nécessitant pas de calculs).

# Systemes triphasés équilibrés

## Exemple:

Soit le schéma de liaison TN-C-S d'une installation électrique alimentée par le réseau (220/380 V):



# Systemes triphasés équilibrés

## Hypothèse de calcul:

- Les longueurs et impédances des canalisations AB et EF sont négligeables;
- On considère que le PEN suit le même parcours que le conducteur de phase BC, donc  $BC = DE$ , soit une longueur de 40 m;
- L'impédance de la boucle de défaut dans un calcul approché est ramenée à la valeur de la résistance des câbles;
- La section des conducteurs est de  $50 \text{ mm}^2$
- La résistivité du cuivre est  $0,0225 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ .

Le courant de défaut:

$$I_d = \frac{V_{BE}}{R_{BC} + R_{DE}} = \frac{0,8V}{2R_{BC}} = \frac{0,8VS}{2\rho L} = 4890A$$

La tension de contact:

$$U_C = R_{DE}I_d = \frac{0,8V}{2} = 88V$$

Si la protection du circuit est assurée par un disjoncteur de calibre 160 A avec un relais magnétique qui déclenche à 7 fois l'intensité nominale:

$$I_{mag} = 7 \times 160 = 1120A$$

$I_{mag} < I_d \Rightarrow$  provoque le déclenchement du disjoncteur.

# Systemes triphasés équilibrés

## Condition de protection:

Il faut aussi s'assurer que le temps de déclenchement du disjoncteur  $t_d$  est inférieur au temps maximal (supportable par le corps humain) donné par la courbe de sécurité  $t_1$ :

- Temps de déclenchement du disjoncteur 160 A donné par le constructeur: 0,025s soit 25 ms;
- Temps donné par la courbe de sécurité pour une tension de contact de 88 V, courbe UL = 25 V est 0.12s soit 120 ms  $\Rightarrow t_d < t_1$
- Les deux conditions (courant de défaut suffisant pour faire déclencher le disjoncteur et temps de déclenchement du disjoncteur suffisamment court) sont réalisées dans ce cas de calcul approché.



# Systemes triphasés équilibrés

---

## □ Caractéristique du schéma TN:

### **Avantages:**

- Assure parfaitement la sécurité des biens et des personnes;
- Economie de matériels (conducteurs, nombre de pôles des appareils,...);
- Ne nécessite pas une permanence de surveillance en exploitation (sauf vérifications des conditions de déclenchement).

### **Inconvénients:**

- Une installation TN, nécessite beaucoup de calcul et d'étude par rapport à la section des câbles (donc un personnel qualifié), c'est pourquoi ce schéma est réservé aux installations industrielles;
- Peut présenter, dans des locaux à risque d'incendie, un danger plus élevé du fait des courants de défaut plus importants;
- Coupure au premier défaut par protection de surintensité (disjoncteurs ou fusibles);
- La longueur des câbles d'alimentation est limitée, en cas d'extension il faut reprendre les calculs des longueurs de canalisation.

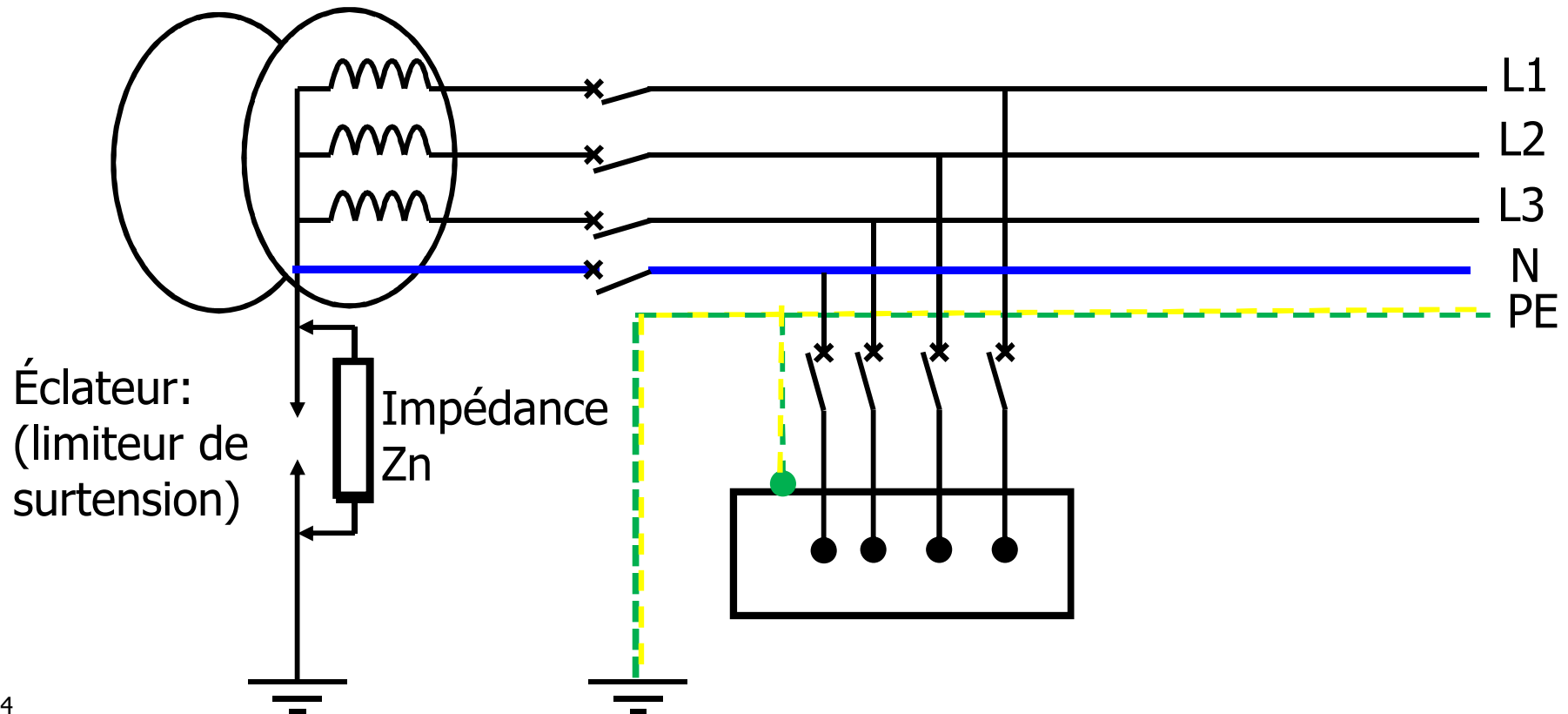
# Systemes triphasés équilibrés

## 5.3.3 Schéma IT:

**I:** neutre isolé de la terre (ou impédant).

**T:** liaison des masses de l'installation à la terre.

- Le neutre du transformateur est: soit isolé de la terre (neutre isolé) soit relié à la terre par une impédance élevée (de  $1\text{ k}\Omega$  à  $2\text{ k}\Omega$ ) (neutre impédant). Cette impédance permet de fixer le potentiel d'un réseau court par rapport à la terre
- Les masses sont interconnectées soit totalement, soit par groupe.



# Systemes triphasés équilibrés

## □ Éclateur: Protection Contre les surtensions

- **Fonctionnement** : Dès que la tension appliquée à cet élément dépasse un seuil calibré, il y a amorçage d'un arc électrique entre les deux électrodes et évacuation de la surtension à la terre (le Neutre est donc relié à la Terre).
- **Origines des surtensions** : Atmosphériques (foudre sur le réseau MT) ou rupture d'isolement entre primaire et secondaire du transformateur HT/BT.

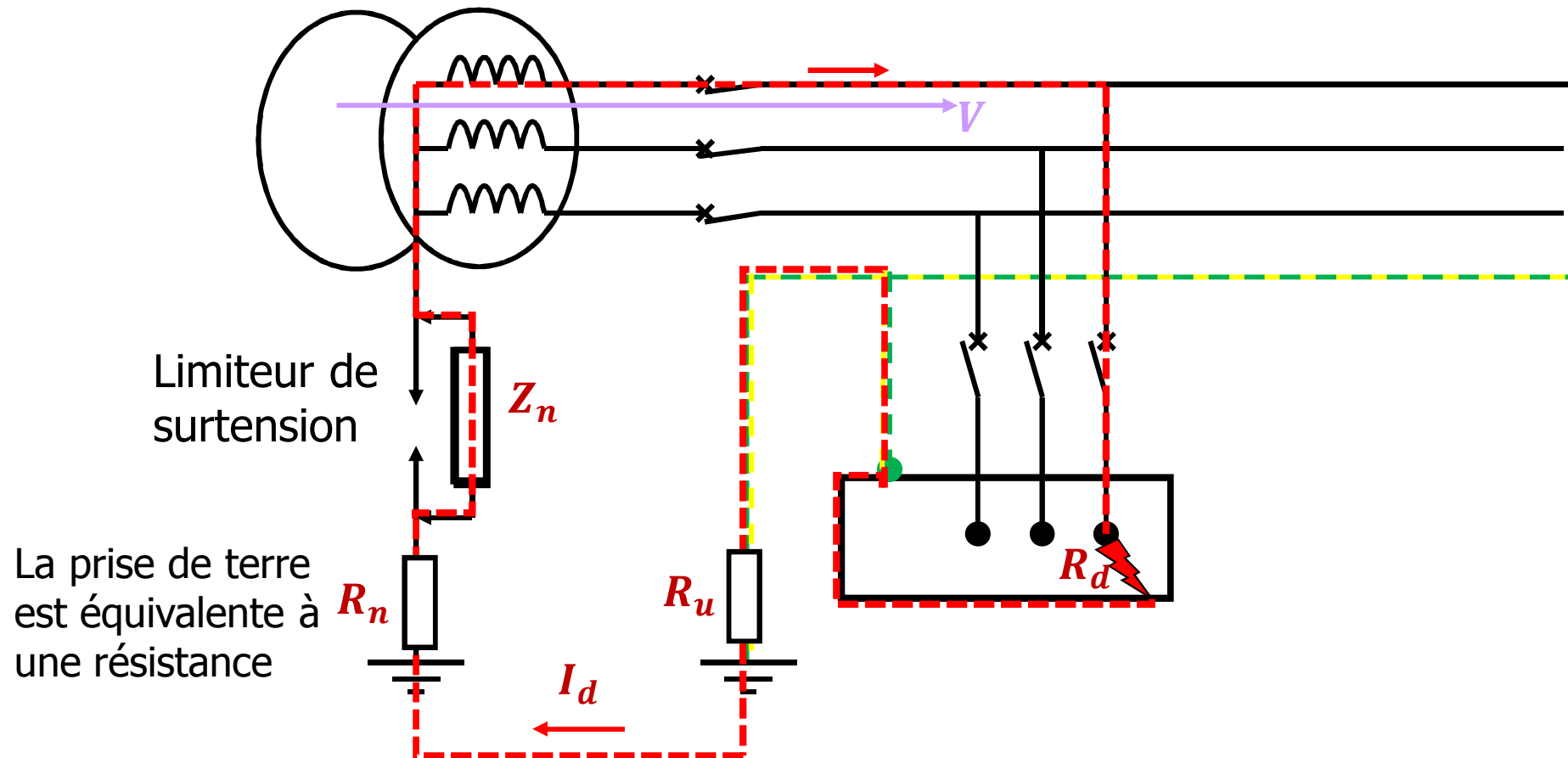


# Systemes triphasés équilibrés

## □ Analyse de la boucle de défaut:

### ○ Cas du premier défaut:

- Courant de premier défaut:  $I_d = \frac{V}{R_d + R_u + R_n + Z_n}$
- Tension de contact:  $U_C = R_u I_d$



# Systemes triphasés équilibrés

## Exemple de calcul:

- $V = 220V$ ;  $R_u = 10\Omega$ ;  $R_n = 10\Omega$ ;  $R_d = 0\Omega$ ;  $Z_n = 2200\Omega$
- Courant de défaut:

$$I_d = \frac{230}{2200+10+10} = 0,1A$$

- Tension de contact:

$$U_C = 10 \times 0,1 = 1V < U_L$$

- Le courant est faible du fait de l'impédance de liaison à la terre.
- La tension de contact reste faible et non dangereuse;
- Le premier défaut n'est pas dangereux;
- La coupure n'est pas impérative;
- L'installation peut être maintenue en service;
- mais il faut signaler le premier défaut qui doit être éliminé avant l'apparition d'un second défaut;
- Ce régime de neutre est à mettre en œuvre à condition que:
  - ✓ Le poste de livraison soit privé;
  - ✓ La continuité de service soit primordiale comme dans les hôpitaux;
  - ✓ L'exploitant dispose d'un service de maintenance compétant.

# Systemes triphasés équilibrés

## □ Contrôleur Permanent d'Isolément (CPI) :

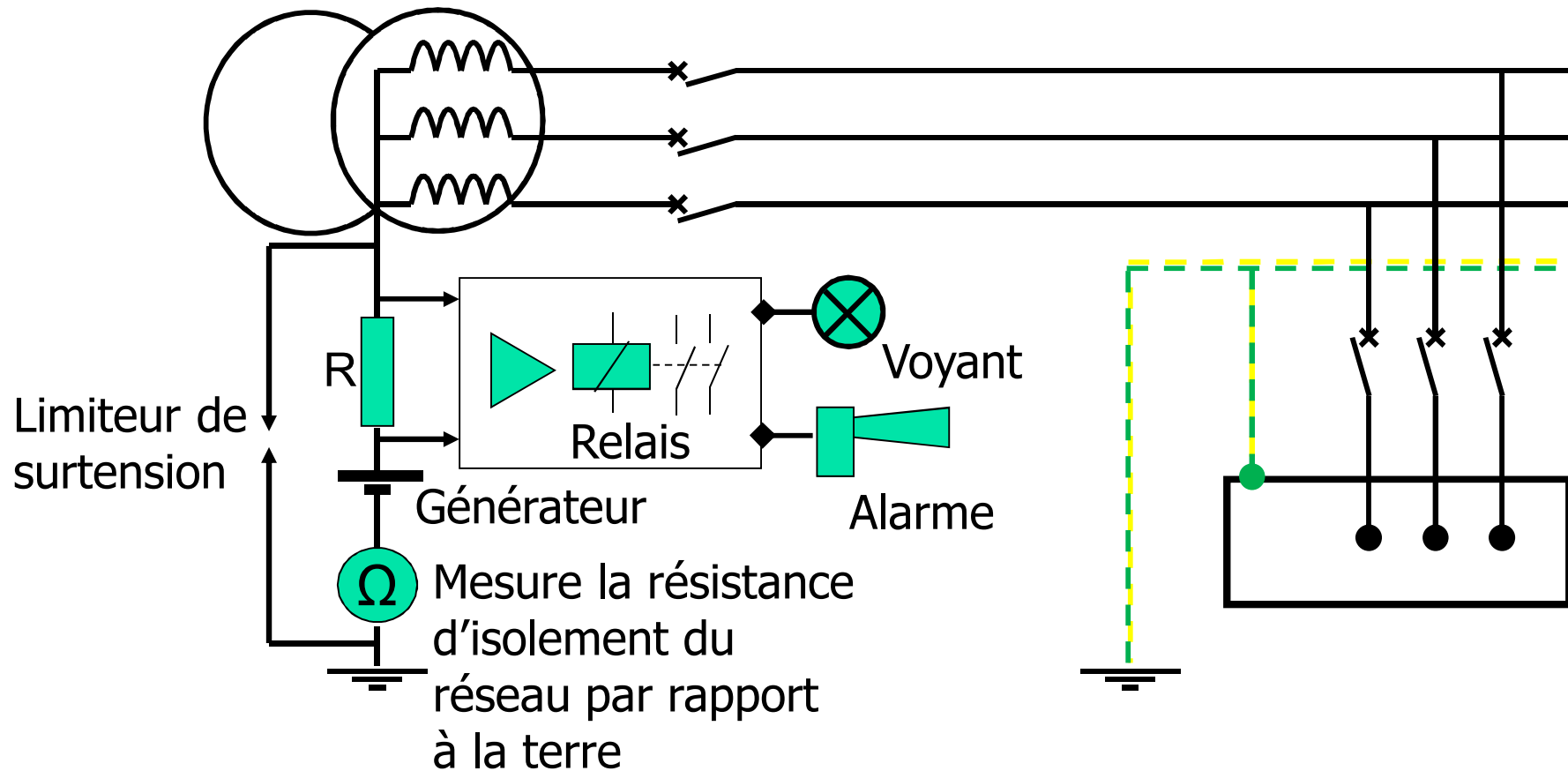
- La norme impose l'utilisation d'un Contrôleur Permanent d'Isolément (CPI) sur tout réseau IT pour prévenir l'utilisateur d'un premier défaut par un signal sonore et un voyant.



# Systemes triphasés équilibrés

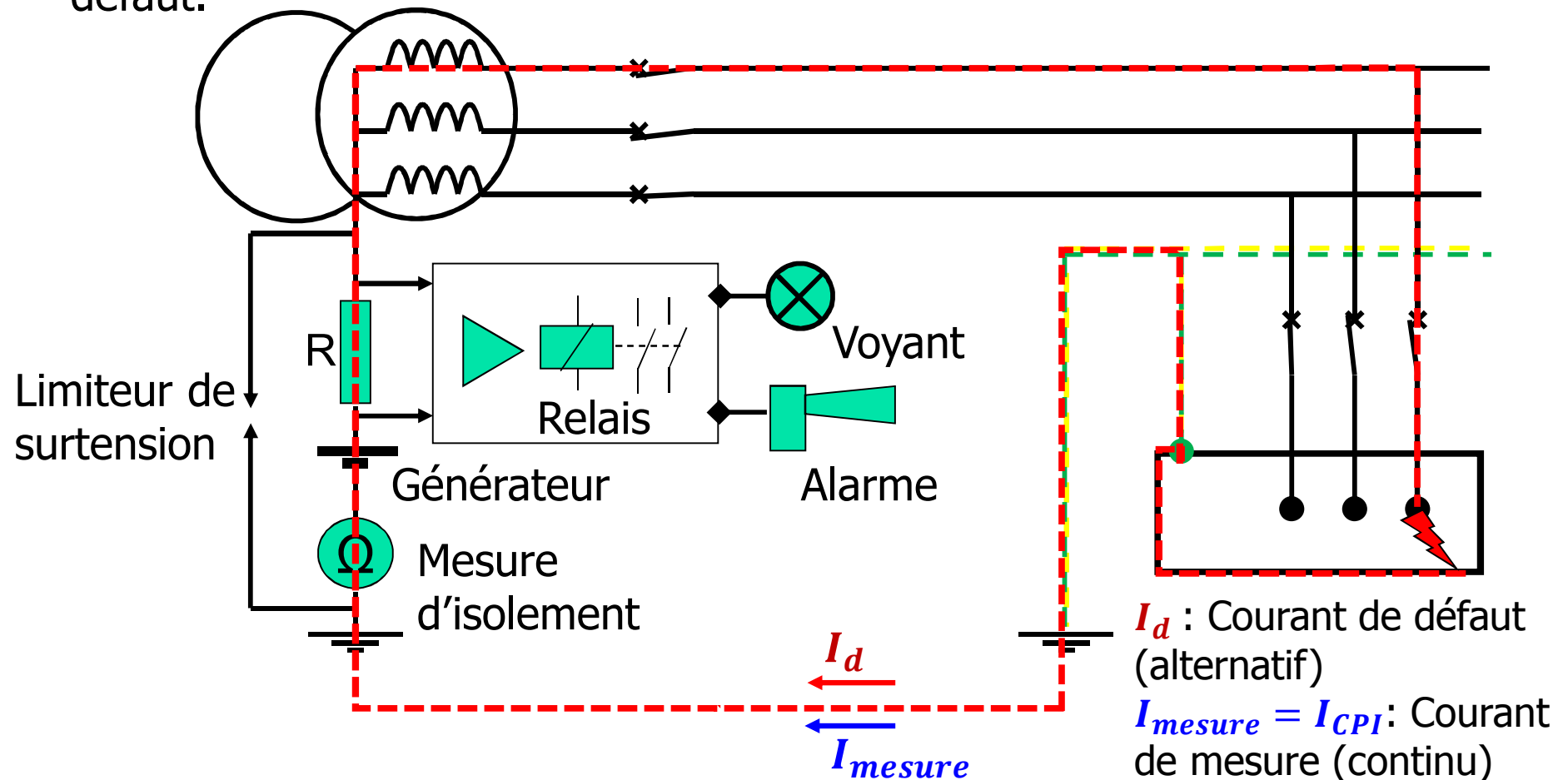
## □ Fonctionnement du CPI

- Le CPI est nécessaire pour signaler tout défaut d'isolement et peut offrir une aide à sa localisation.



# Systemes triphasés équilibrés

- Absence de défaut: le courant continu ne circule pas entre le réseau et la terre.
- Présence de défaut: un faible courant est débité sur le réseau et le relais indique, par une signalisation visuelle et sonore, la présence d'un premier défaut.

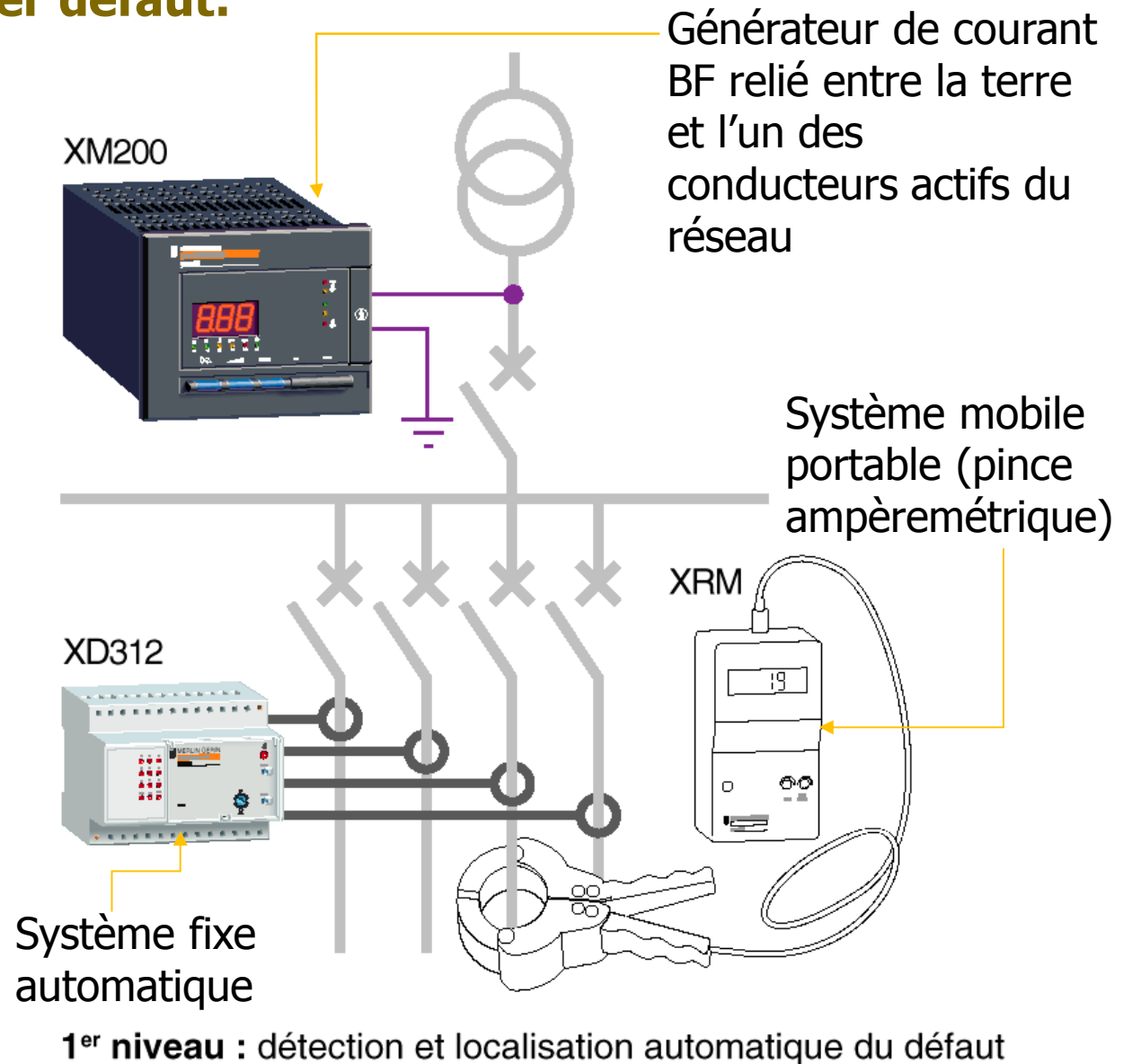


# Systemes triphasés équilibrés

## □ Localisation du premier défaut:

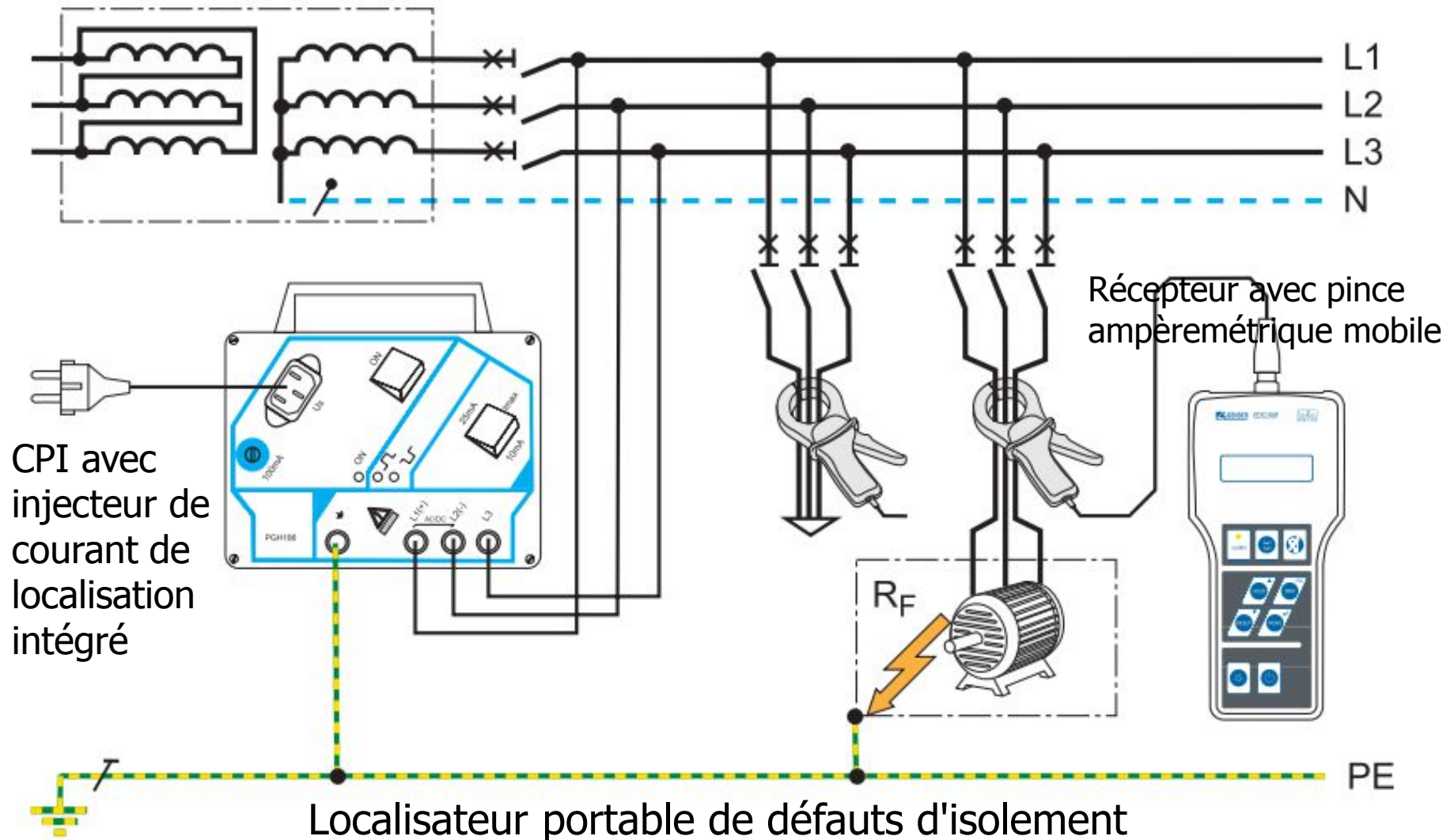
Pour localiser un premier défaut on peut:

- Ouvrir et refermer successivement les départs du réseau en partant de l'amont vers l'aval. Dès que la partie en défaut est mise hors tension la signalisation donnée par le CPI disparaît (on perd ainsi la continuité de service)
- Injecter un courant basse fréquence (10Hz) dans l'installation puis détecter l'endroit du défaut où il passe le courant BF.



# Systemes triphasés équilibrés

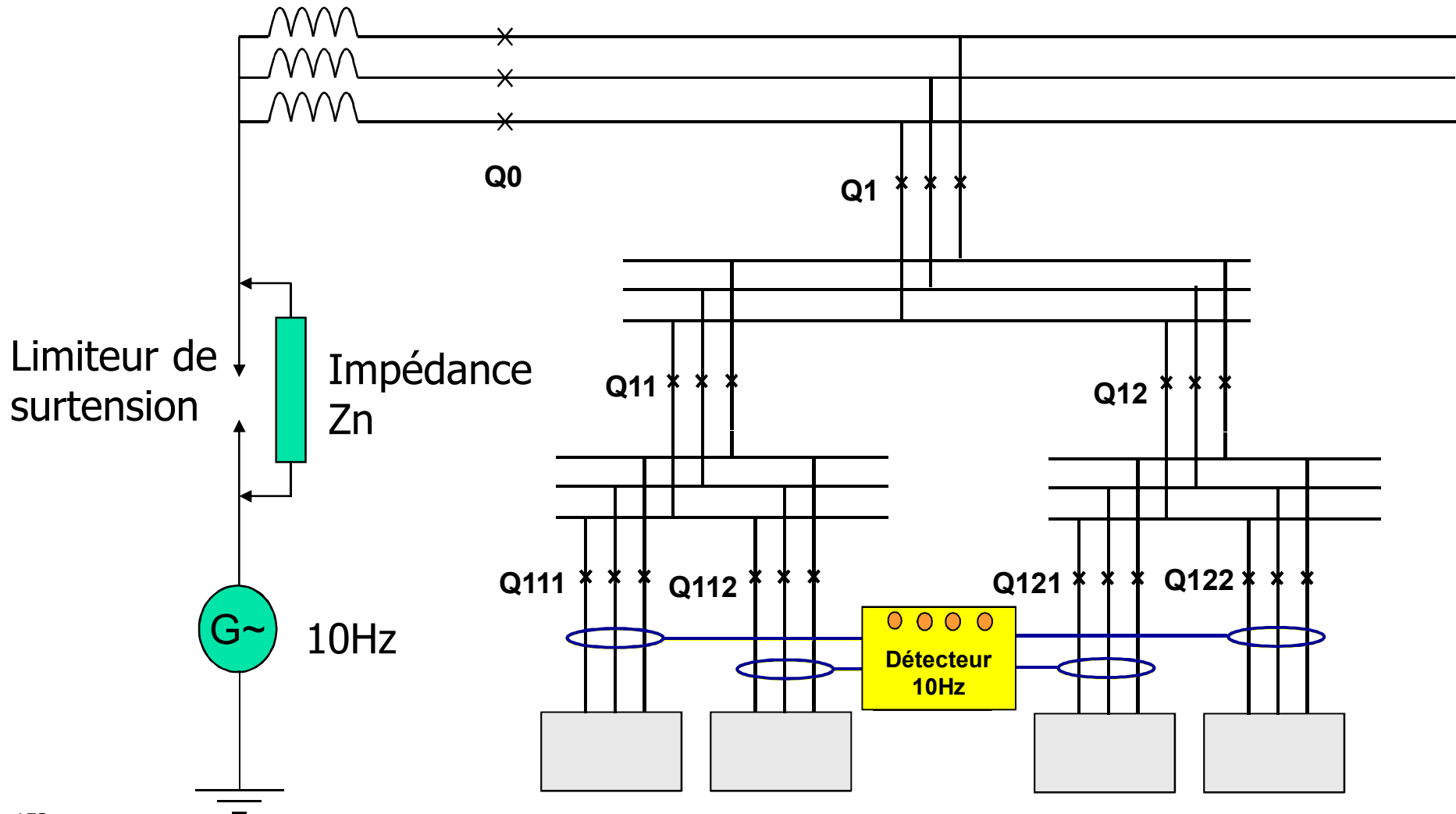
- La recherche peut s'effectuer avec des dispositifs sensibles au signal injecté qui sont soit portables (recherche manuelle), soit fixes (recherche automatique).



# Systemes triphasés équilibrés

## □ Localisation par injection de courant BF:

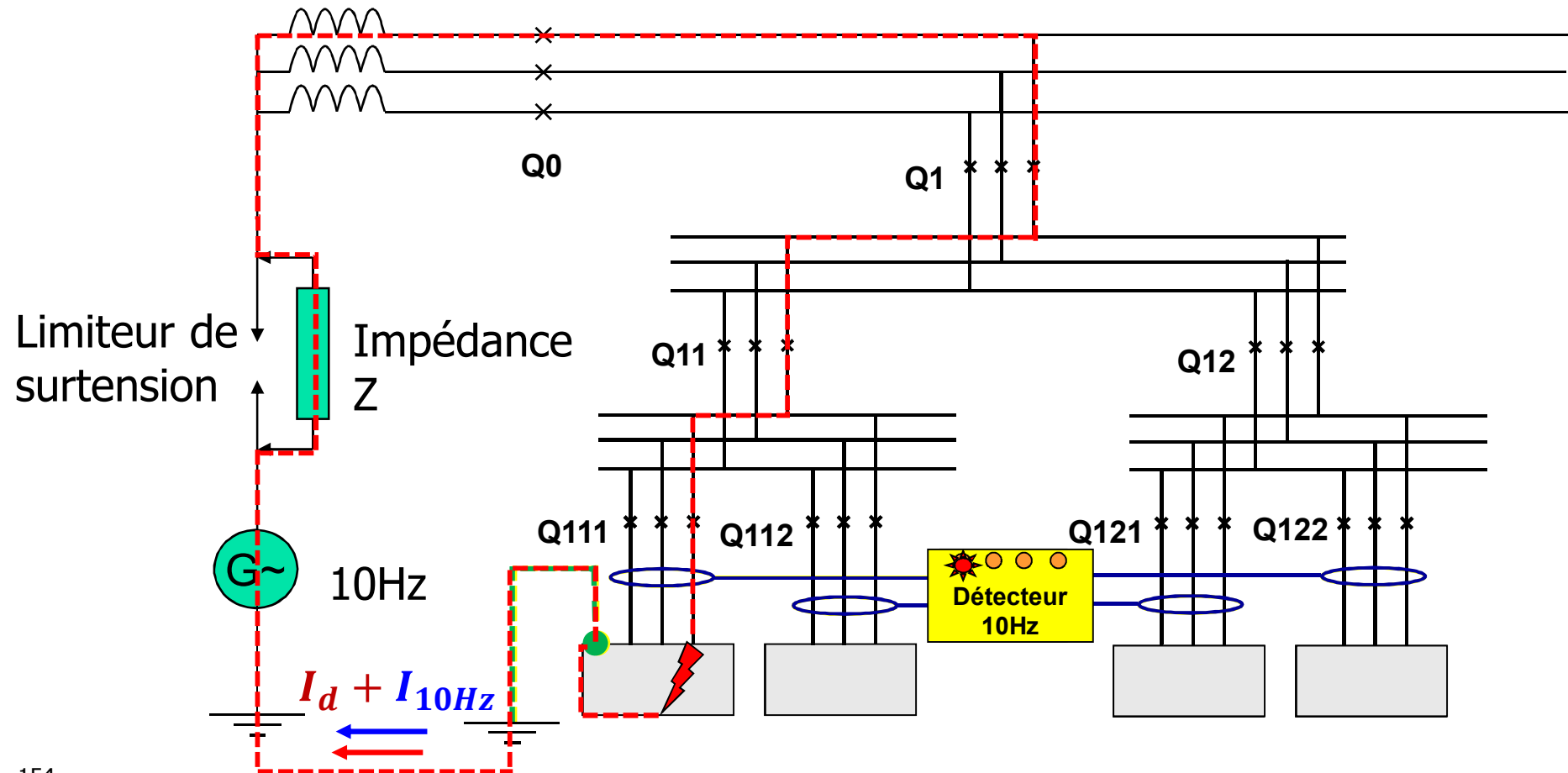
- Lorsque les dispositifs (générateur, tore magnétique de détection du courant injecté) sont fixes, la recherche du défaut peut être rendue automatique.



# Systemes triphasés équilibrés

**Principe:** On injecte dans l'installation un courant basse fréquence (environ 10Hz) généralement intégré au CPI. La présence de ce courant est repérée par un détecteur associé à un système de tores magnétiques fixes placés sur tous les départs ou mobiles avec une pince ampèremétrique.

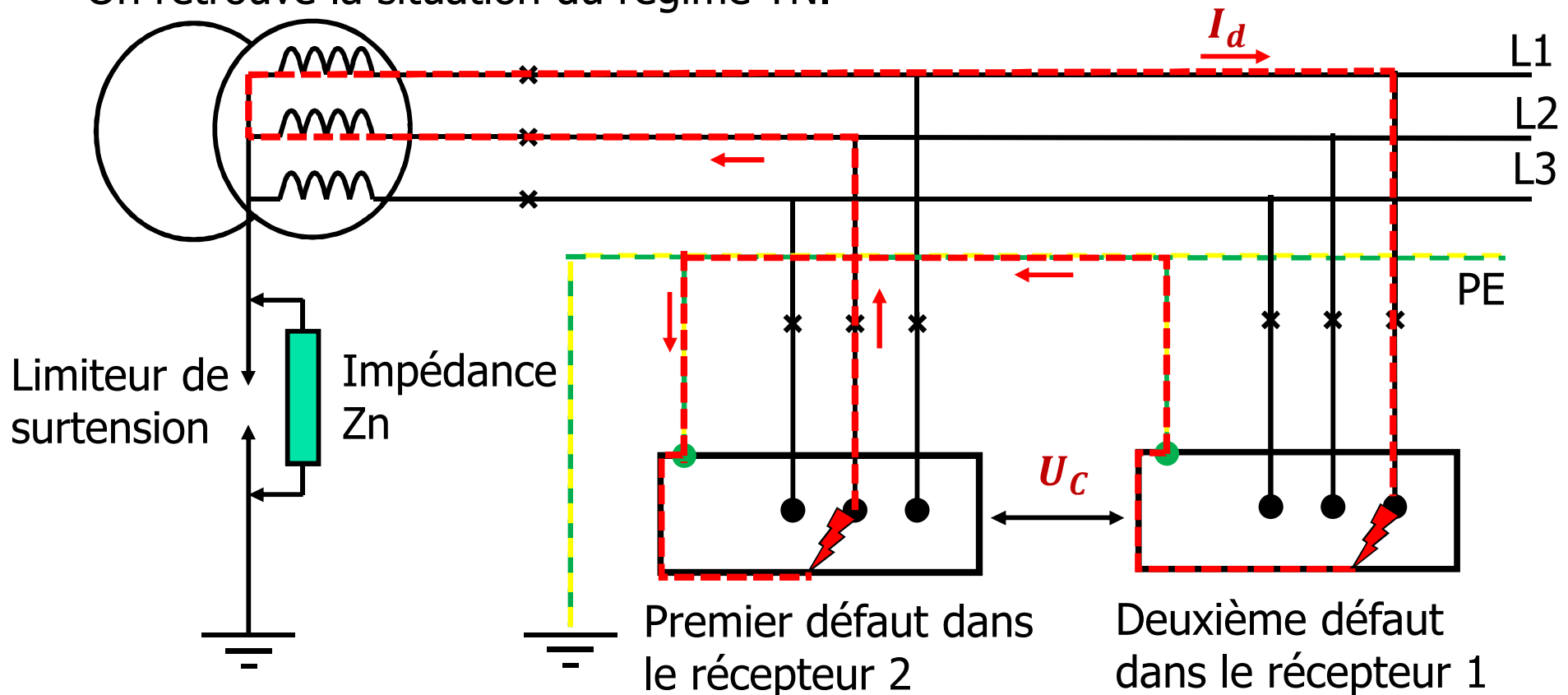
**Avantage:** Localisation sous tension, sans coupure.



# Systemes triphasés équilibrés

## ○ Cas d'un deuxième de défaut:

- ❖ **Masses communes:** Toutes les masses de l'installation sont interconnectées à la même prise de terre par le conducteur PE;
- Un défaut double affectant des conducteurs actifs différents se transforme en court-circuit phase/phase ou phase/Neutre;
- On retrouve la situation du régime TN.



# Systemes triphasés équilibrés

## □ Analyse du double défaut d'isolement:

- Courant de défaut:

$$I_d = \frac{0,8U}{R_{ph1} + R_{d1} + R_{pe1} + R_{pe2} + R_{d2} + R_{ph21}}$$

- Tension de contact entre la masse d'un récepteur en défaut et une autre masse :

$$U_C = (R_{pe1} + R_{pe2})I_d$$

Exemple:

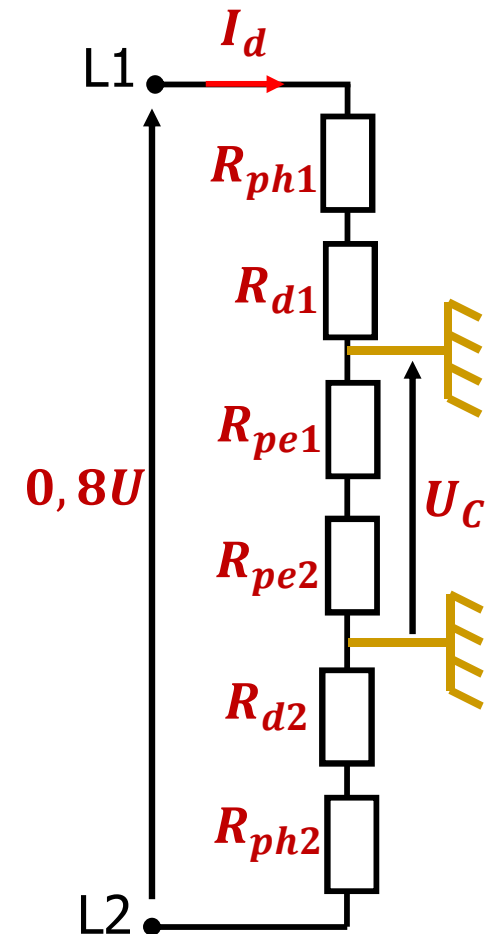
$$R_{ph1} = R_{ph2} = 40m\Omega; R_{pe1} = R_{pe2} = 40m\Omega; R_{d1} = R_{d2} = 0\Omega$$

On trouve:

$$I_d = \frac{0,8 \times 400}{0,04 + 0,04 + 0,03 + 0,03} = 2285,71A$$

$$U_C = (0,04 + 0,04) \times 2285,71 = 182,86V$$

- Dans le cas de deux défauts d'isolement simultanés, la protection des personnes est assurée par des dispositifs de protection contre les surintensités (disjoncteurs ou fusibles), ou par des DDR si les longueurs de câble sont plus grandes que celles autorisées.



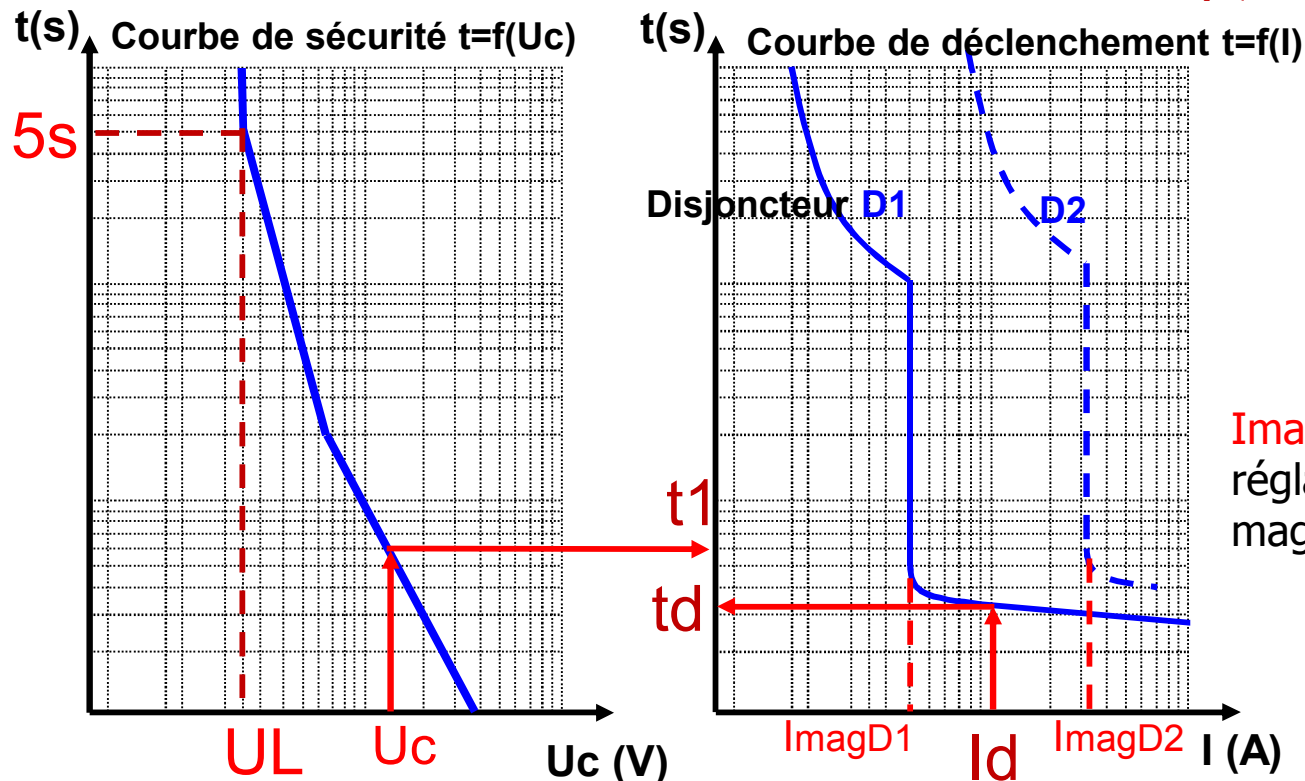
# Systemes triphasés équilibrés

## □ Condition nécessaire de protection:

- $t_1$ : temps limite à partir duquel il y a danger (autorisé par les normes);
- $t_d$ : temps de déclenchement du disjoncteur le plus rapide;
- Pour obtenir une protection totale; il faut respecter:  $t_d < t_1$ ;  $I_{mag} < I_d$

✓ Défaut Phase/Neutre (neutre distribué):  $L_{max} = \frac{0,8VS_{ph}}{2\rho(1+m)I_{mag}}$

✓ Défaut Phase/Phase (neutre non distribué):  $L_{max} = \frac{0,8\sqrt{3}VS_{ph}}{2\rho(1+m)I_{mag}}$



# Systemes triphasés équilibrés

## Exemple:

- Vérifier par calcul la longueur maximale protégée (réseau 400 V – 50 Hz sans distribution du neutre) dans le cas d'un double défaut avec des câbles en cuivre

$$\rho_{\text{cuivre}} = 0,0225 \Omega \text{mm}^2 / \text{m}.$$

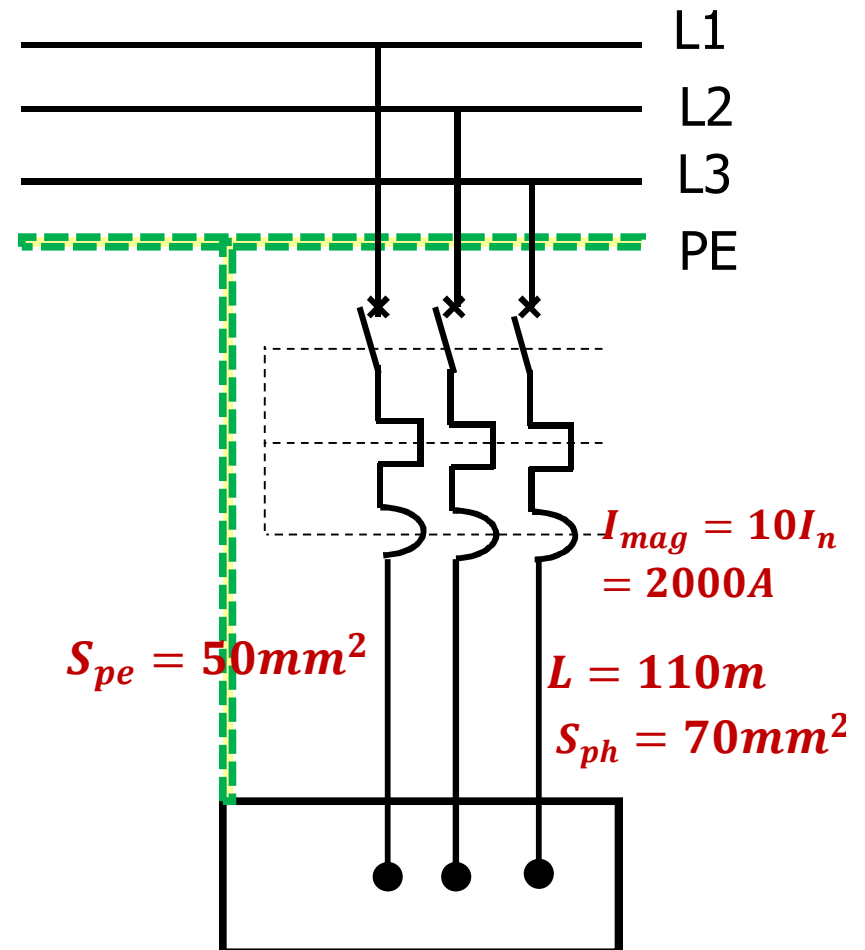
- La protection contre les contacts indirect n'est pas assurée car la longueur de la canalisation 110 m dépasse la longueur maximale de sécurité

$$L_{\text{max}} = \frac{0,8\sqrt{3}VS_{ph}}{2\rho(1+m)I_{\text{mag}}} = 103,7\text{m}$$

- Proposer une solution dans le cas où la protection n'est pas assurée.

- Il faut régler le relais magnétique du disjoncteur pour que la protection soit assurée.  $I_{\text{mag}} < \frac{0,8\sqrt{3}VS_{ph}}{2\rho(1+m)L} = 1885,52\text{A} \Rightarrow$

$$I_{\text{mag}} = 9I_n$$



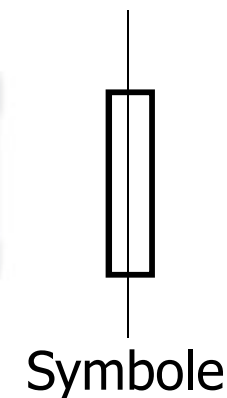
# Systemes triphasés équilibrés

## □ Protection par fusible:

- Le fusible sert à protéger contre les surintensités
- L'élément fusible est constitué d'un fil métallique dans une enveloppe fermé.
- Le fusible fond si le courant qui le traverse dépasse la valeur assignée.

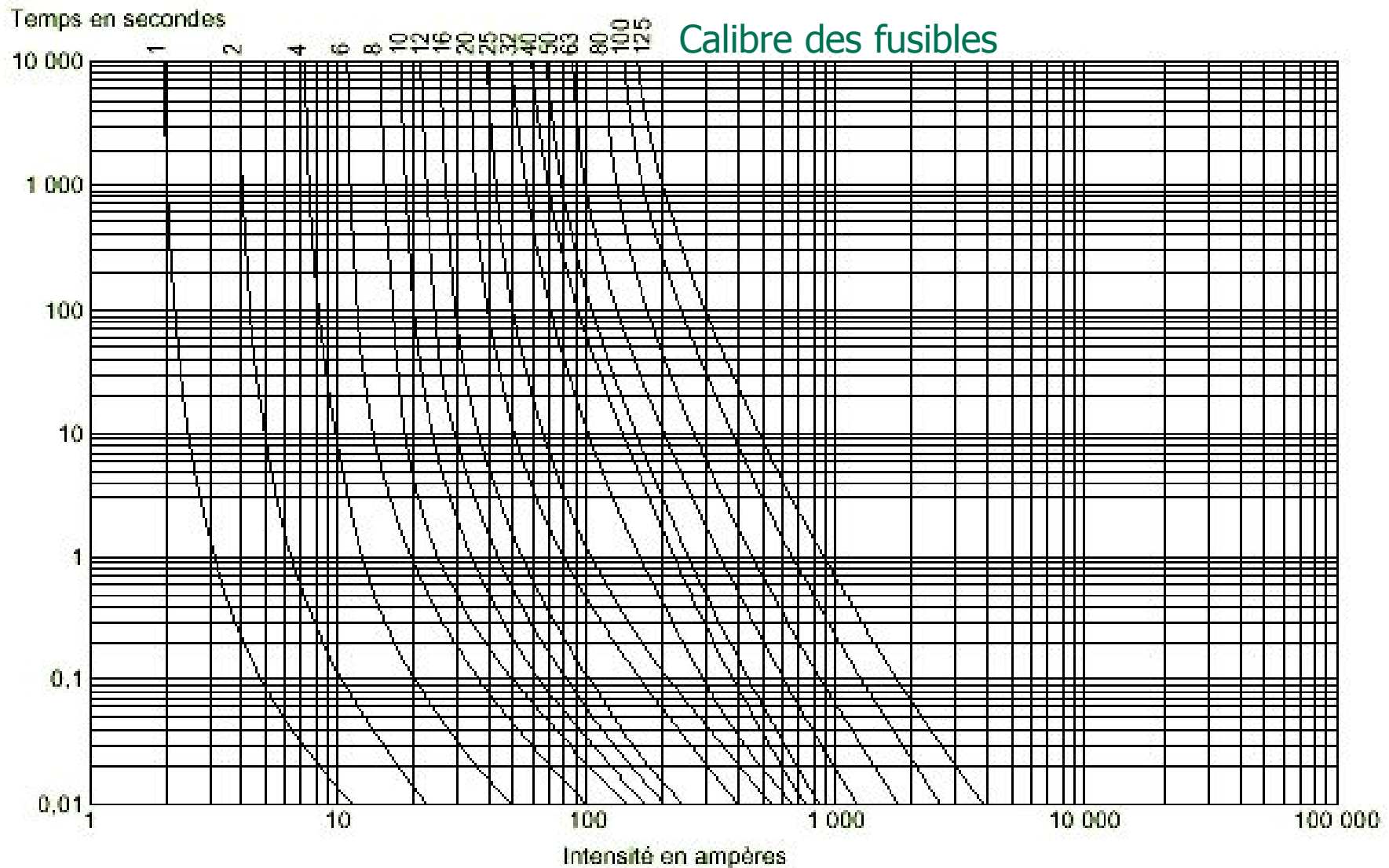
Il existe plusieurs types de fusibles :

- ✓ standard (type gG): usage général, protection câbles et tout type de récepteurs (protection contre les surcharges et les courts-circuits),
- ✓ lent (type aM accompagnement Moteur): démarrage des moteurs, accepte un fort courant de démarrage durant quelques secondes (protection contre les courts-circuits).



# Systemes triphasés équilibrés

## □ Courbe de fusion:



Courbe de fusion des cartouches type gG

# Systemes triphasés équilibrés

## □ Courbe de fusion:

- Permet de déterminer la durée de fonctionnement du fusible en fonction du courant qui le traverse avant sa fusion.

**Exemple:** sur une cartouche gG 8A :

le temps de fonctionnement pour un courant de:

- ✓ 16A (infini);
- ✓ 20A (3s);
- ✓ 40A (0,2s)

## □ Condition nécessaire de protection par fusible:

Un fusible assure la protection des personnes, à condition que:

- Le courant de défaut soit supérieur au courant assurant la fusion ( $I_f$ ) du fusible dans le temps  $t_1$  prescrit par la courbe de sécurité.
- Il faut aussi s'assurer que le temps total de fusion  $t_d$  est inférieur au temps maximal donné par la courbe de sécurité  $t_1$ .

## ❖ Dimensionnement de l'installation:

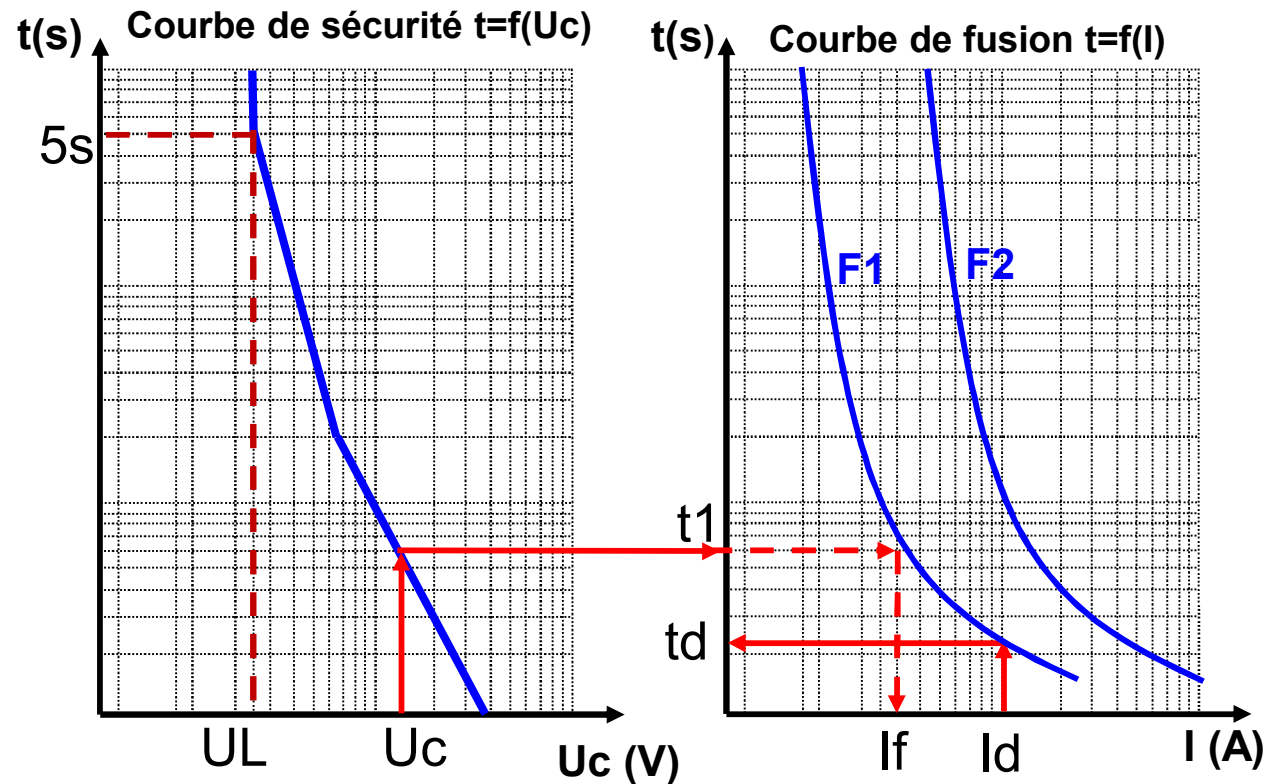
Longueur maximale de la canalisation (défaut Phase/Phase; neutre non distribué):

$$L_{max} = \frac{0,8\sqrt{3}VS_{ph}}{2\rho(1+m)I_f}$$

# Systemes triphasés équilibrés

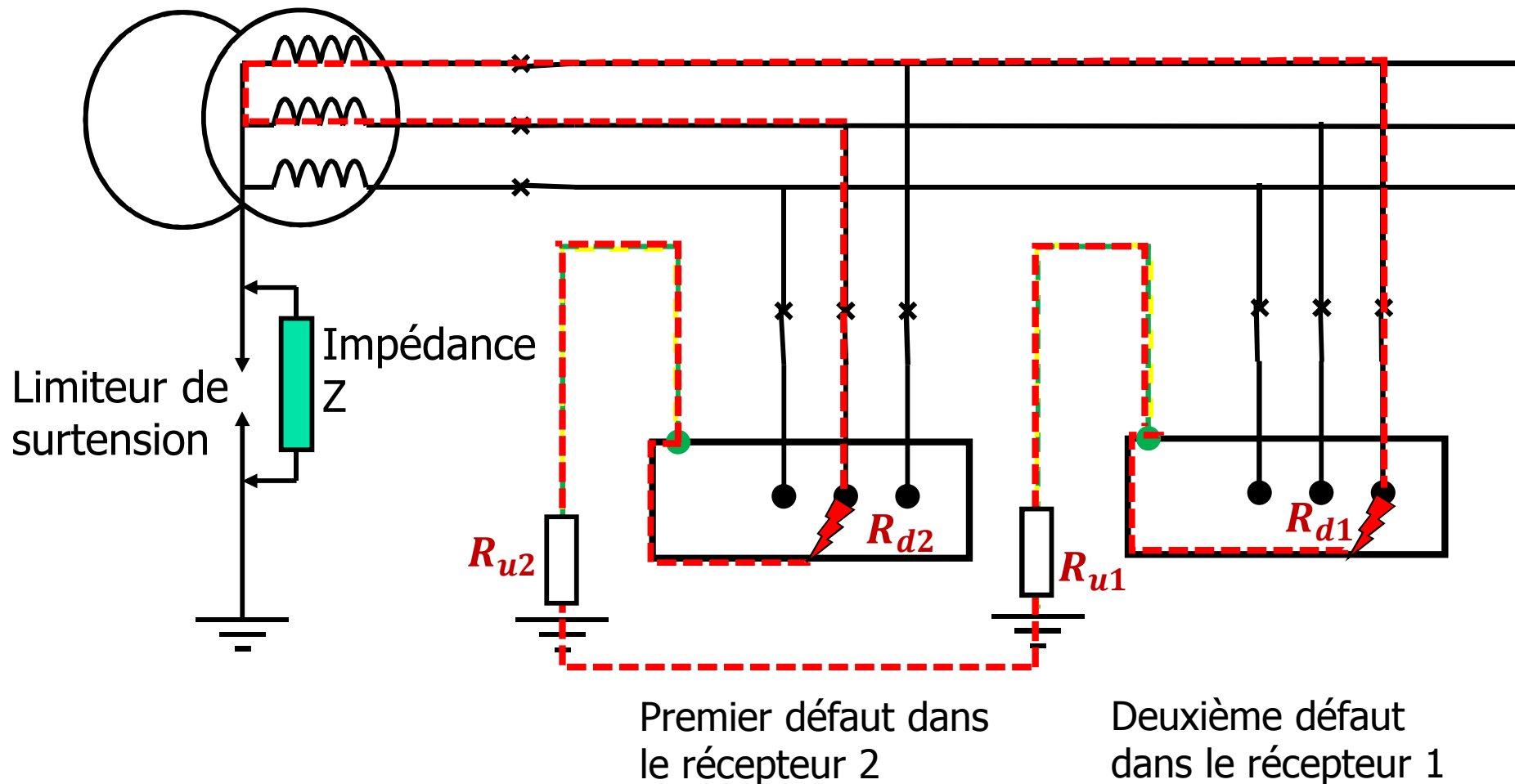
## □ Condition nécessaire de protection par fusible:

- $t_1$ : temps limite à partir duquel il y a danger;
- $t_d$ : temps total de fonte du fusible le plus rapide;
- Pour obtenir une protection totale. Il faut respecter:  $t_d < t_1$ ;  $I_f < I_d$



# Systemes triphasés équilibrés

- ❖ **Masses séparées:** Les masses ne sont pas interconnectées et sont reliées à des prises de terre distinctes.
- Dans le cas d'un défaut double, si les masses sont séparées, On retrouve la situation du régime TT.



# Systemes triphasés équilibrés

## □ Analyse du double défaut d'isolement:

- Courant de défaut:

$$I_d = \frac{U}{R_{d1} + R_{u1} + R_{u2} + R_{d2}}$$

- Tension de contact:

$$U_{C1} = R_{u1}I_d ; U_{C2} = R_{u2}I_d$$

Exemple:

$$R_{u1} = R_{u2} = 10\Omega ; R_{d1} = R_{d2} = 0\Omega$$

On trouve:

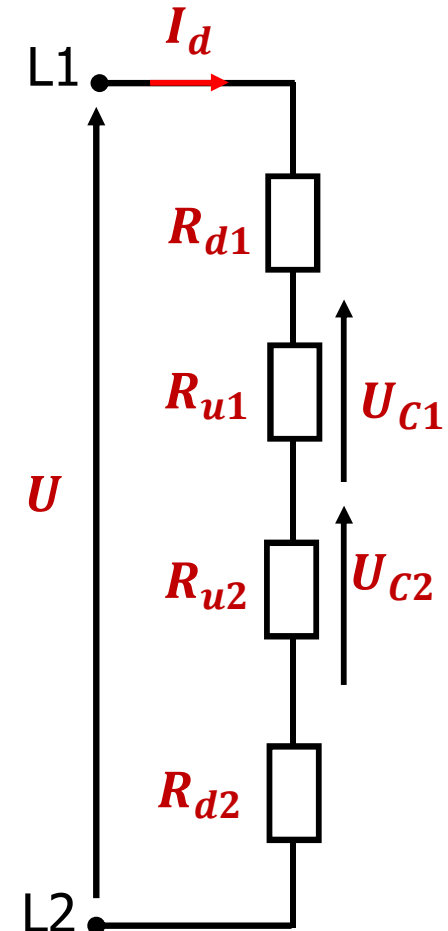
- Courant de défaut:

$$I_d = \frac{400}{10 + 10} = 20A$$

- Tension de contact:

$$U_{C1} = 200V ; U_{C2} = 200V$$

- Tension de contact dangereuse;  $\Rightarrow$  Coupure automatique obligatoire.

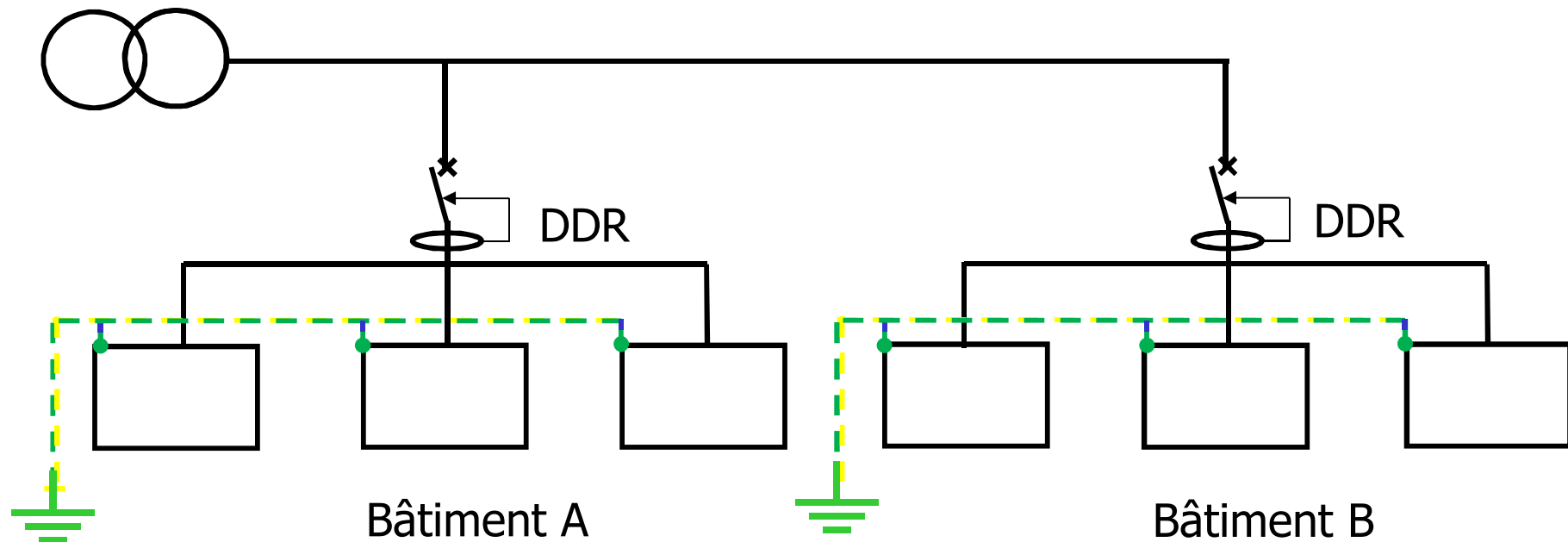


# Systemes triphasés équilibrés

- La protection des personnes est assurée par des dispositifs différentiels à courant résiduel en tête de chaque groupe de masses interconnectées à la même prise de terre.

## Remarque:

Les DDR utilisés dans ce cas ont des seuils  $I\Delta n$  généralement compris entre 3 et 30 A ( $I\Delta n < UL/R_u$ ); pour éviter le déclenchement des DDR au premier défaut.





## Systemes triphasés équilibrés

---

### □ Caractéristiques du schéma IT

- Assure la meilleure continuité de service en exploitation, lors d'un premier défaut (dans toutes industries où un arrêt de fonctionnement est couteux ou dangereux: bloc opératoire des hôpitaux, éclairage de secours, piste d'aéroport, fonderies,...);
- Utilisé uniquement dans les installations industriels;
- Signalisation du premier défaut par contrôleur permanent d'isolement;
- Nécessite un personnel spécialiste d'entretien pour la surveillance et l'exploitation, capable de réparer le premier défaut;
- Coupure obligatoire en présence du deuxième défaut d'isolement;
- Sécurité accrue contre les risques d'incendie et d'explosion (puisque le courant de premier défaut est faible);
- En cas d'extension il faut reprendre les calculs des longueurs de canalisation.
- Le schéma IT est utilisé, lorsque le réseau est peu étendu: <10km.

### **Remarque:**

Le schéma IT est inadapté lorsque il est employé dans les réseaux étendus, en raison des capacités parasites de fuite des conducteurs du réseau et la terre.

# Systemes triphasés équilibrés

## □ Résumé:

### Synthèse des qualités et inconvénients des différents SLT:

	TT	TNC	TNS	IT
Sécurité des personnes (installation parfaite)	Bon	Bon	Bon	Bon
Sécurité des biens <ul style="list-style-type: none"> <li>• contre les risques d'incendie</li> <li>• en protection des machines sur défaut d'isolement</li> </ul>	Bon Bon	Mouvais Mouvais	Moyen Moyen	Bon Bon
Disponibilité de l'énergie	Moyen	Moyen	Moyen	Excellent
Pour réaliser l'installation et l'entretien <ul style="list-style-type: none"> <li>• compétence</li> <li>• disponibilité</li> </ul>	moyen Mouvais	Excellent Moyen	Excellent Moyen	Bon Bon