

Formation sur les réseaux électriques et l'intégration des systèmes solaires photovoltaïques

- Objectif :**
- **S'informer sur les types des réseaux électriques et leur fonctionnement**
 - **S'informer sur le principe et les règles d'interconnexion des systèmes solaires photovoltaïques avec les réseaux électriques**

Contenance du programme :

- 1. Rappel sur les principes physiques à respecter dans l'exploitation électrique**
- 2. Configurations techniques des réseaux électriques**
- 3. Intégration des systèmes solaires dans les réseaux électriques et équilibre de leur fonctionnement**

Notions électriques fondamentales

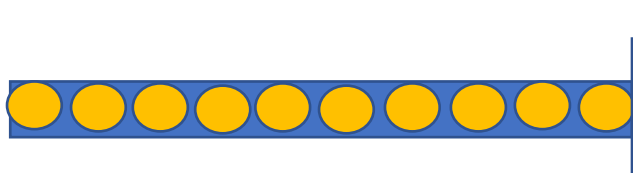
Notions électriques fondamentales

Tension électrique

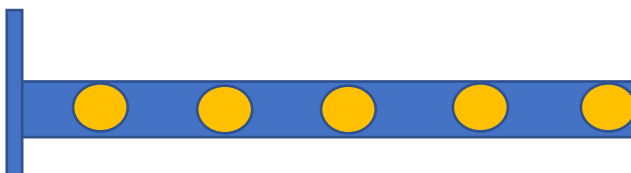
C'est une différence de potentiel entre deux conducteurs électriques exprimée en V



Tension = 0V



Plus de charges



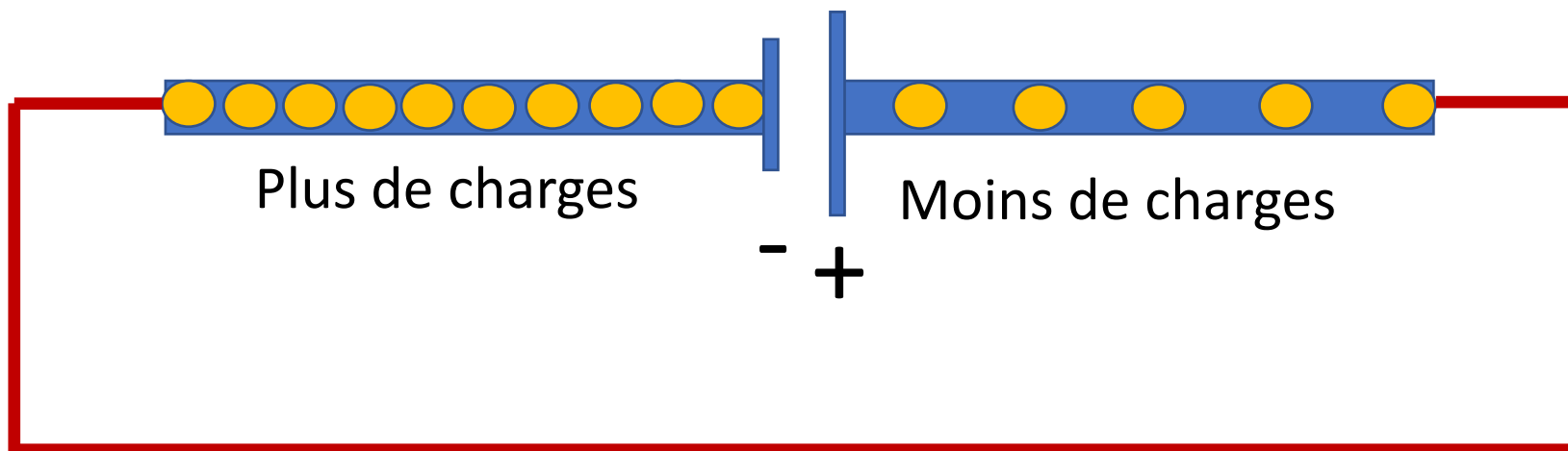
Moins de charges

Tension $\neq$ 0V

Notions électriques fondamentales

Courant électrique

Le courant électrique exprimé en intensité est la quantité des charges en déplacement à l'intérieur d'un conducteur électrique.

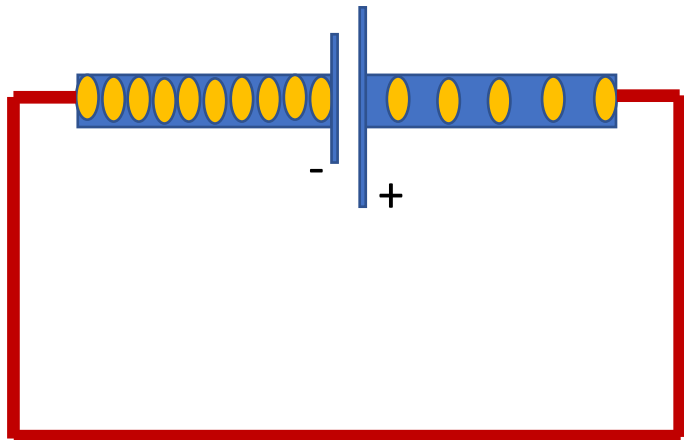


Notions électriques fondamentales

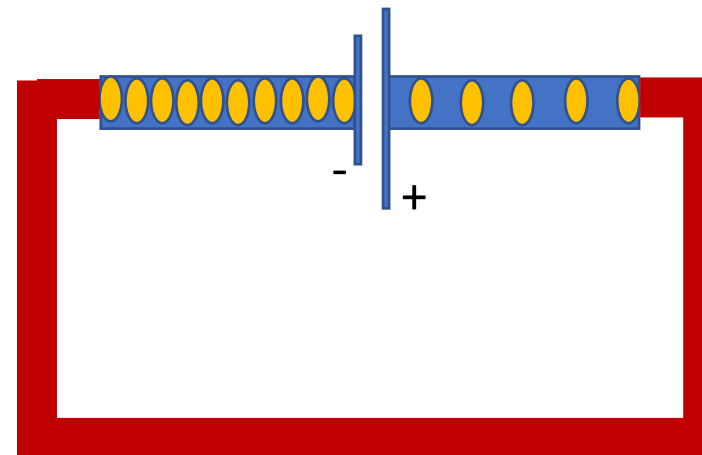
Relation entre courant et tension

La quantité de charges qui circulent du pôle $\ominus$ au pôle $\oplus$ dépend :

- de la tension entre les bornes $\oplus$ et $\ominus$
- du conducteur dans lequel circule la quantité de électrique



Circulation de charges moins intense



Circulation de charges plus intense

Notions électriques fondamentales

Types de tension

En pratique deux types de tension sont utilisés :

- Tension continue

Charges en électrons constantes

- Tension alternative

Charges en électrons variables

Notions électriques fondamentales

Types de courant

Le type de courant dépend du type de la tension :

-Courant continu : charges se déplacent dans un même sens sans interruption

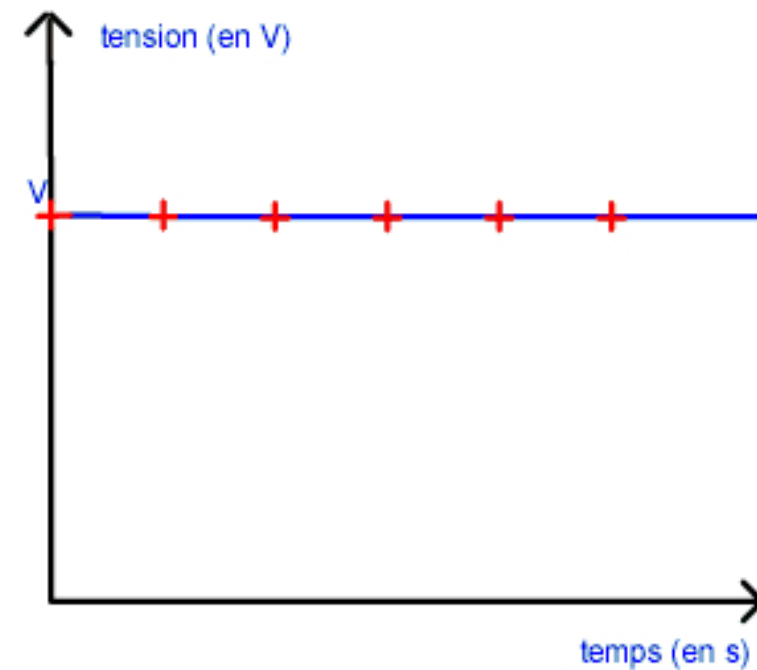
Courant alternatif: charges se déplacent en cycles réguliers dans les deux sens.

Notions électriques fondamentales

Tensions continues

La tension continue est obtenue si la source de charges est un générateur continu :

- Machine électrique continue
- Batterie de stockage
- Solaire PV photovoltaïque

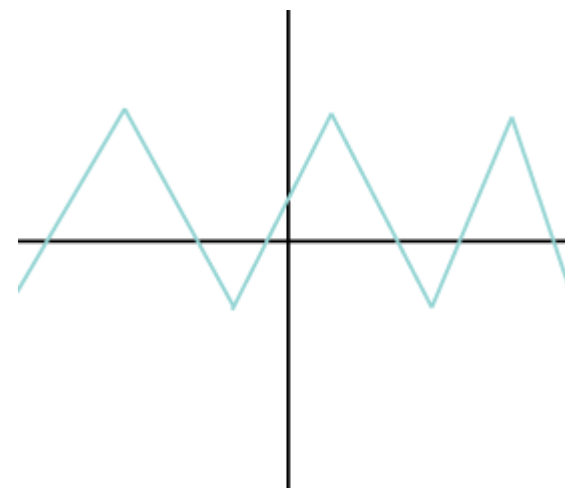
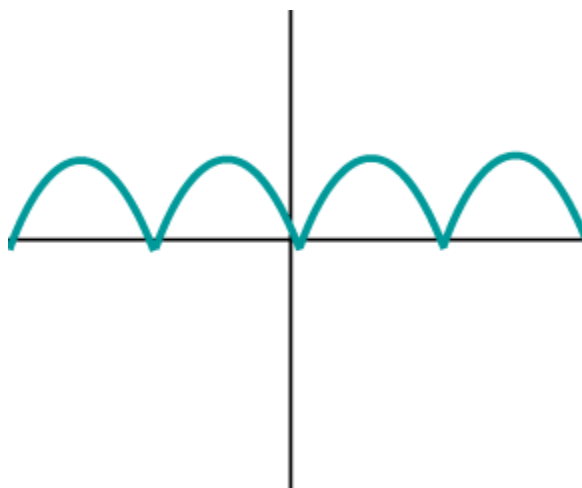
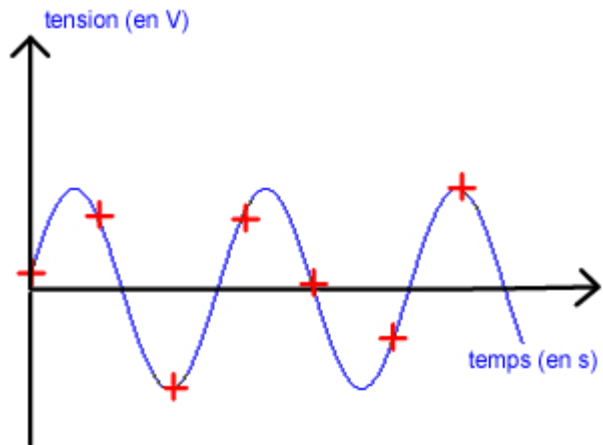


Les tensions continues sont caractérisées par la valeur V

Notions électriques fondamentales

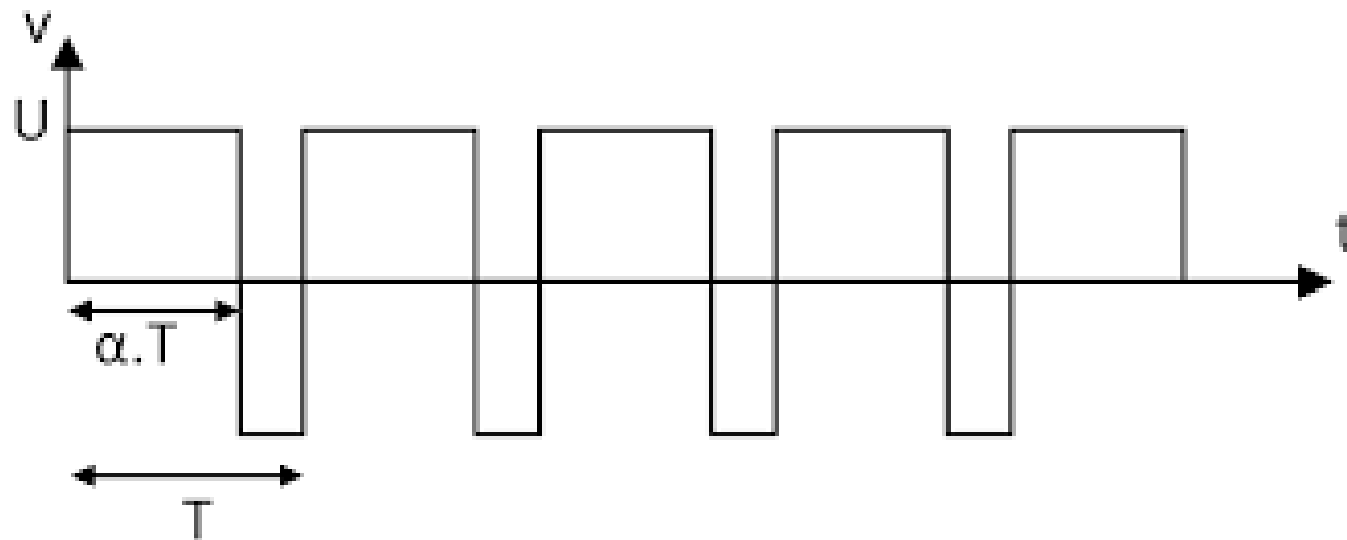
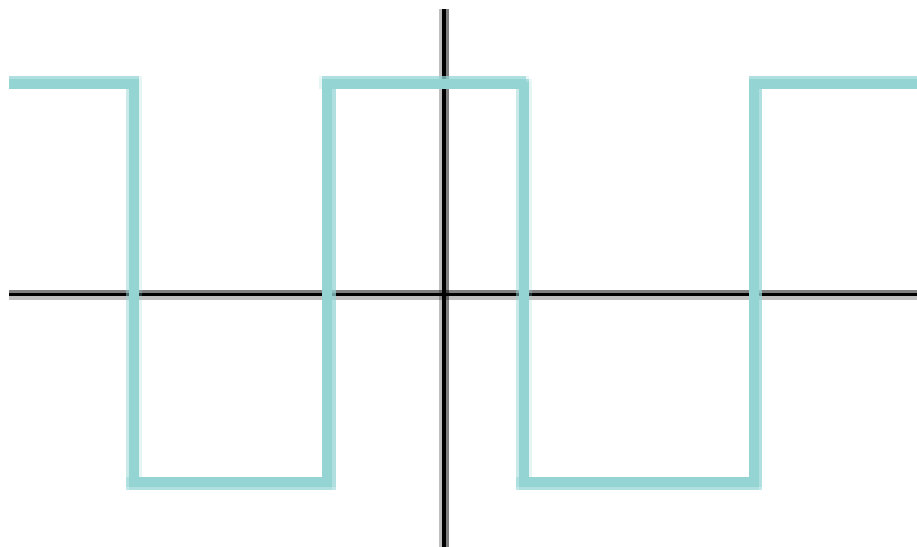
Tensions alternatives

La tension alternative est obtenue quand la source de charges est un générateur alternatif (Machine électrique alternative)



Notions électriques fondamentales

Tensions alternatives

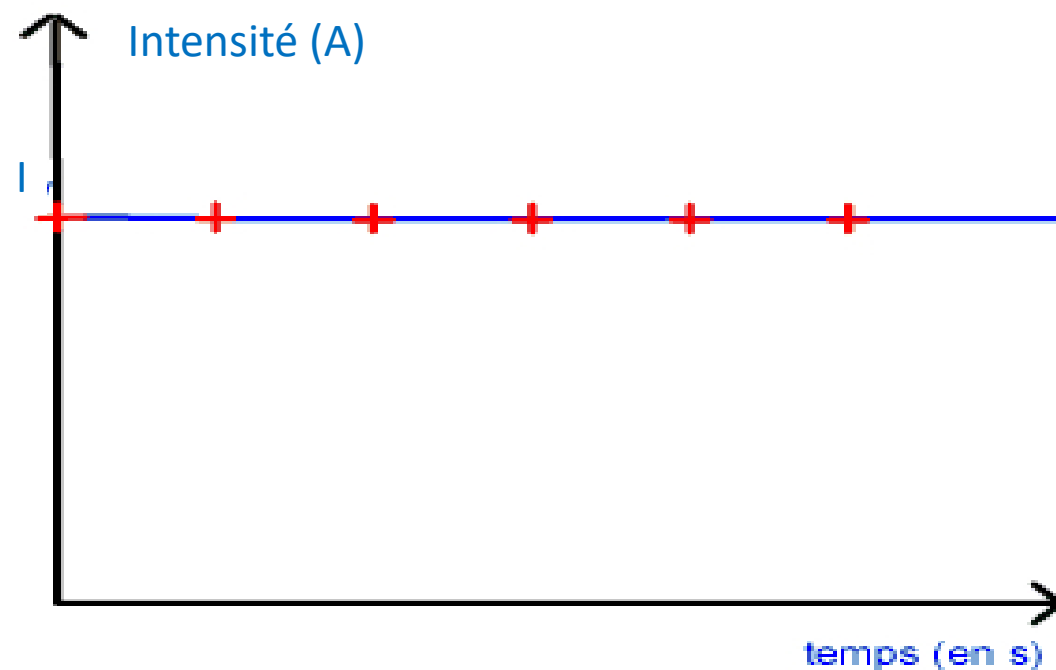


Les tensions alternatives sont caractérisées par la valeur V et la périodicité T

Notions électriques fondamentales

Courants continus

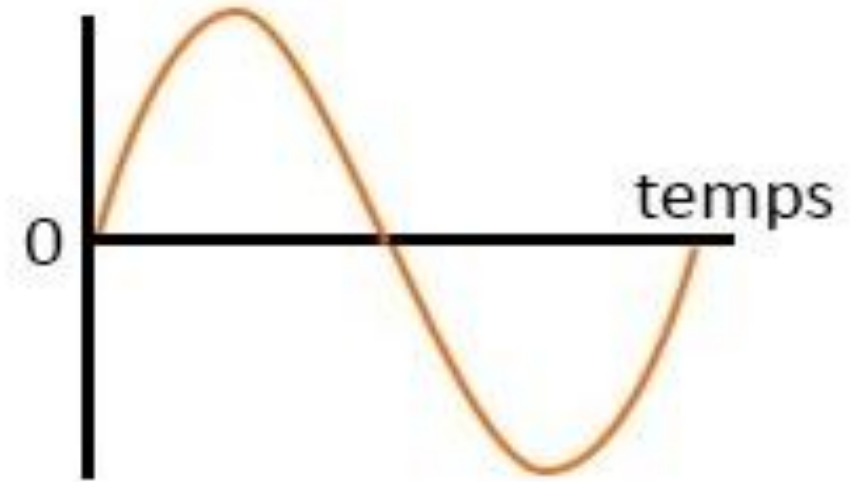
Les courants continus sont les courants générés à partir des sources de tensions continues. Ils sont caractérisés par l'intensité I qui est constante dans le temps



Notions électriques fondamentales

Courants sinusoïdaux

Les courants alternatifs sont les courants générés à partir des sources de tensions alternatives. Ils sont variables dans le temps et se caractérisent par l'amplitude de l'intensité I (A) et par la fréquence f (Hz) du signal qui n'est que le $1/T$ (période)

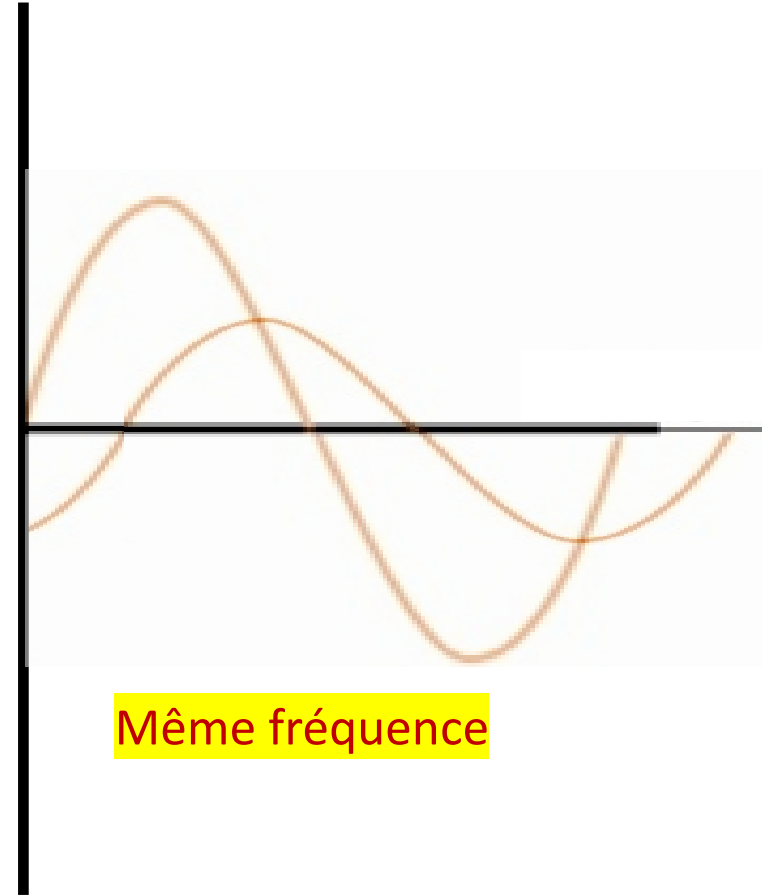


Courant sinusoïdal

Notions électriques fondamentales

Tensions et Courants sinusoïdaux

Les tensions et les courants résultants ont les mêmes allures de signal mais il peut y avoir un décalage de temps entre les deux signaux



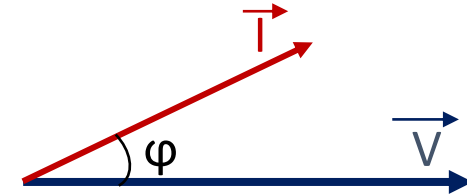
Notions électriques fondamentales

Puissances électriques

Si le récepteur est résistif le courant et la tension sont superposés

Si le récepteur est inductif le courant est en retard de la tension

Si le récepteur est capacitif le courant est en avance sur la tension



Notions électriques fondamentales

Puissances électriques

La Puissance électrique disponible est le produit de la tension et le courant

Dans le cas du régime continu

$$P = V \times I \text{ (exprimée en W)}$$

V exprimée en V

I exprimé en A

Exemple : un conducteur placé sous une tension de 12V et traversé par un courant de 2 A, il consomme

$$12 \times 2 = 24 \text{ W}$$

Notions électriques fondamentales

Puissances électriques

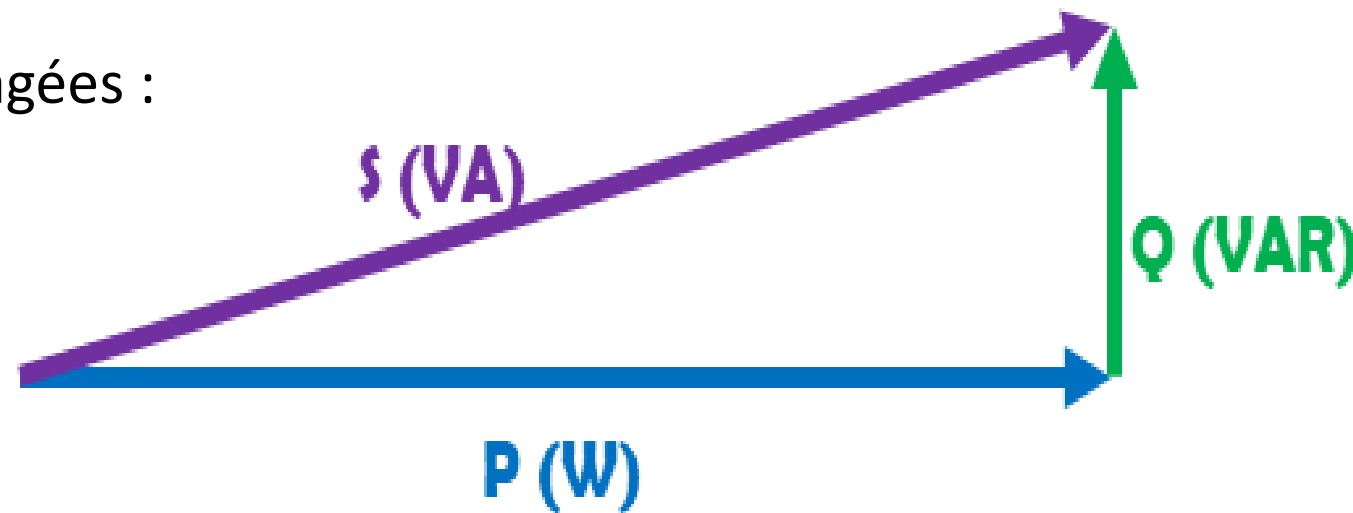
Dans le cas du régime alternatif sinusoïdal, la puissance est le produit vectoriel du vecteur tension et du vecteur intensité.

Trois types de puissances sont alors envisagées :

Puissance active : $P = V \times I \cos\varphi$

Puissance réactive $Q = V \times I \sin\varphi$

Puissance apparente $S = V \times I$



Notions électriques fondamentales

Puissances électriques

Exemple :

On a une tension de 220V et une lampe basse consommation 20W dont la fiche technique précise un $\cos\varphi$ de 0,5;

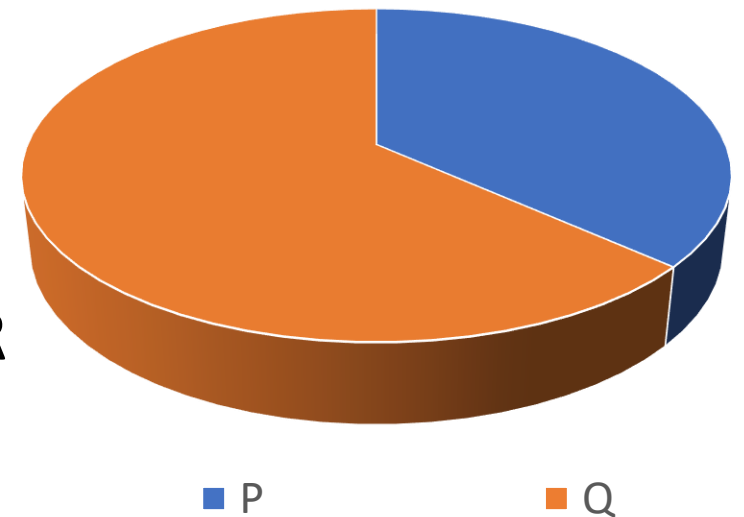
Calculer les puissances réactive (Q) et apparente (S)
et déduire le courant (I)

Réponse :

$$Q = 34,6 \text{ VAR}$$

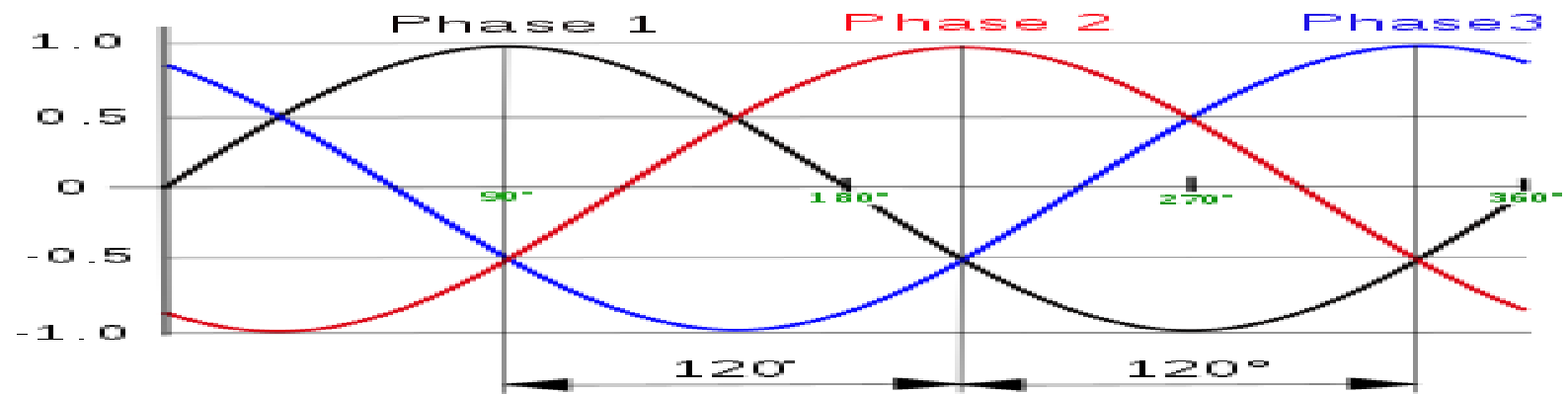
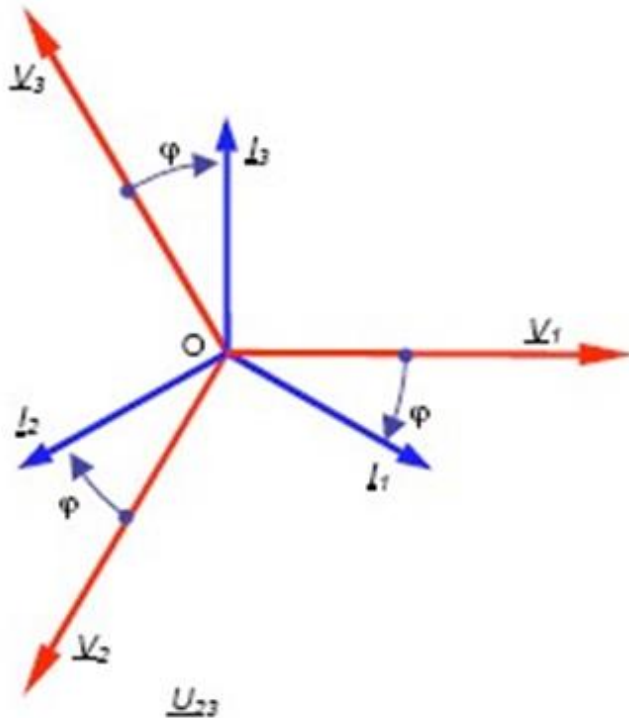
$$S = 40 \text{ VA}$$

$$I = 0,2 \text{ A}$$



Notions électriques fondamentales

Système alternatif triphasé



$$V_1 = V \cdot \sin(\omega t)$$

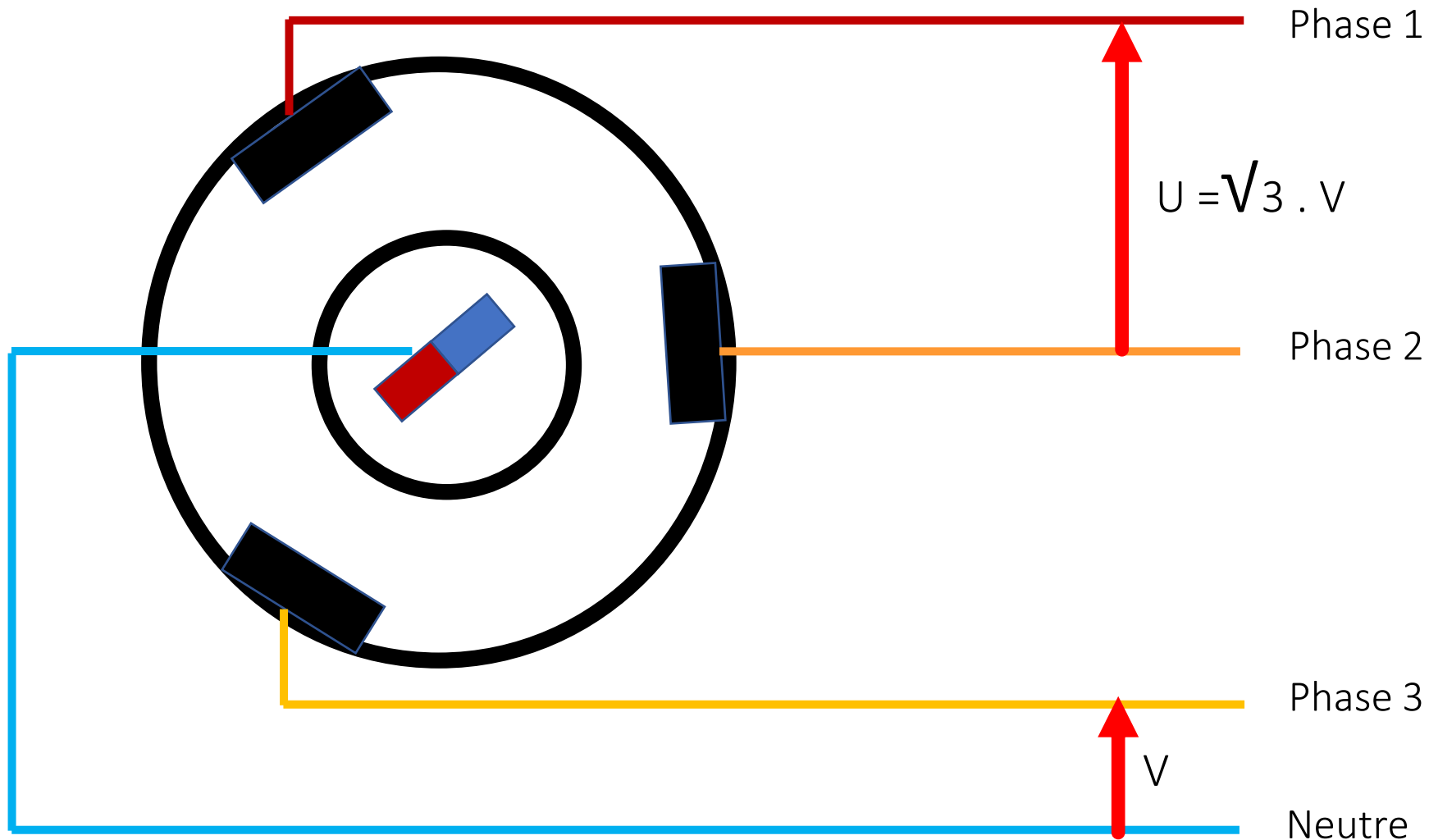
$$V_2 = V \cdot \sin(\omega t - 2/3 \cdot \pi)$$

$$V_3 = V \cdot \sin(\omega t - 4/3 \cdot \pi)$$

avec $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

Notions électriques fondamentales

Tensions simples et tensions composées



Notions électriques fondamentales

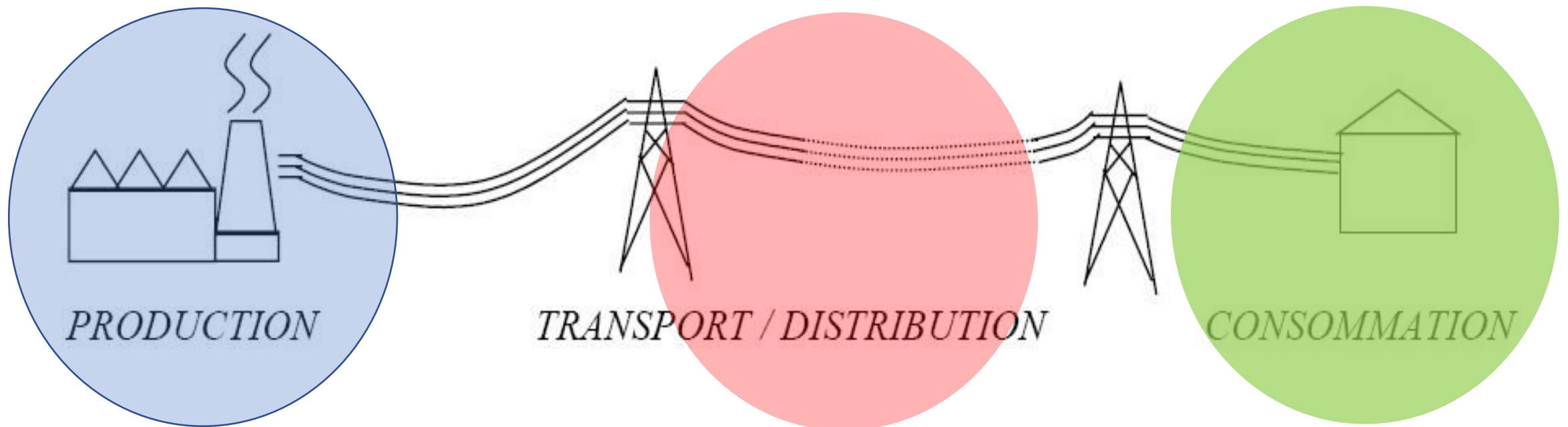
Puissances en système triphasé

	En monophasé	En triphasé
Puissance active	$P = V.I.\cos\varphi$	$P = \sqrt{3}.U.I.\cos\varphi$
Puissance réactive	$Q = V.I.\sin\varphi$	$Q = \sqrt{3}.U.I.\sin\varphi$
	$\tan\phi = \frac{Q}{P}$ (Utilisé par les fournisseurs d'énergie)	
Puissance apparente	$S = V.I$	$S = \sqrt{3}.U.I$
	$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$	

Notions sur les réseaux électriques

DEFINITION DES RESEAUX ELECTRIQUES

On appelle **réseau électrique** l'ensemble des infrastructures permettant d'acheminer **l'énergie électrique** des centrales électriques, vers les consommateurs d'électricité.

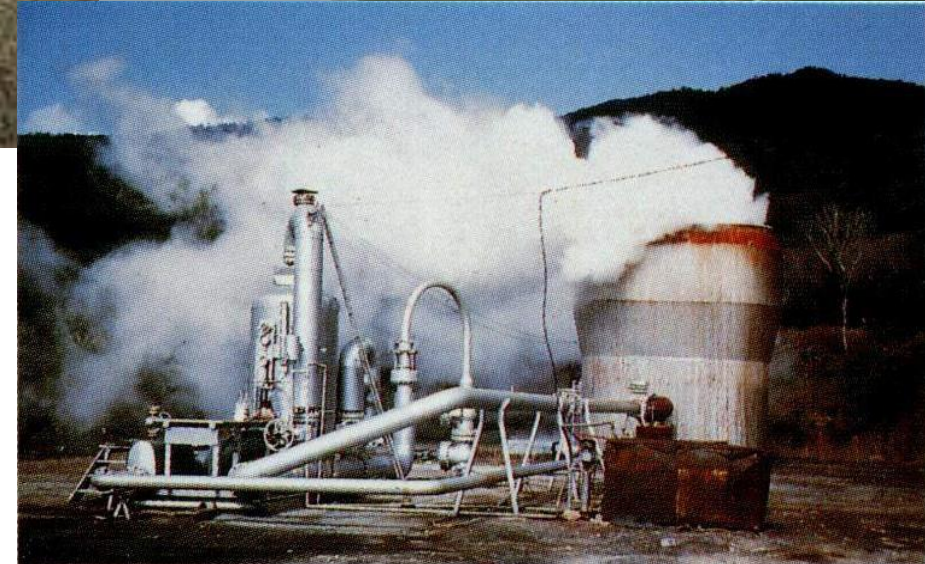


PRODUCTION ELECTRIQUE

- **Centrale hydroélectrique**
- **Centrale thermique**
- **Centrale nucléaire**
- **Centrale solaire thermique**
- **Centrale photovoltaïque**
- **Parc éolien**
- **Centrale géothermique**
- **Centrale traitement bio-organique**
- **Centrale électrique à base d'hydrogène**

L'énergie électrique produite des centrales électriques gérées par le gestionnaire du réseau ou ses partenaires privés, est soumise aux conditions de moyenne et haute tension

PRODUCTION ELECTRIQUE



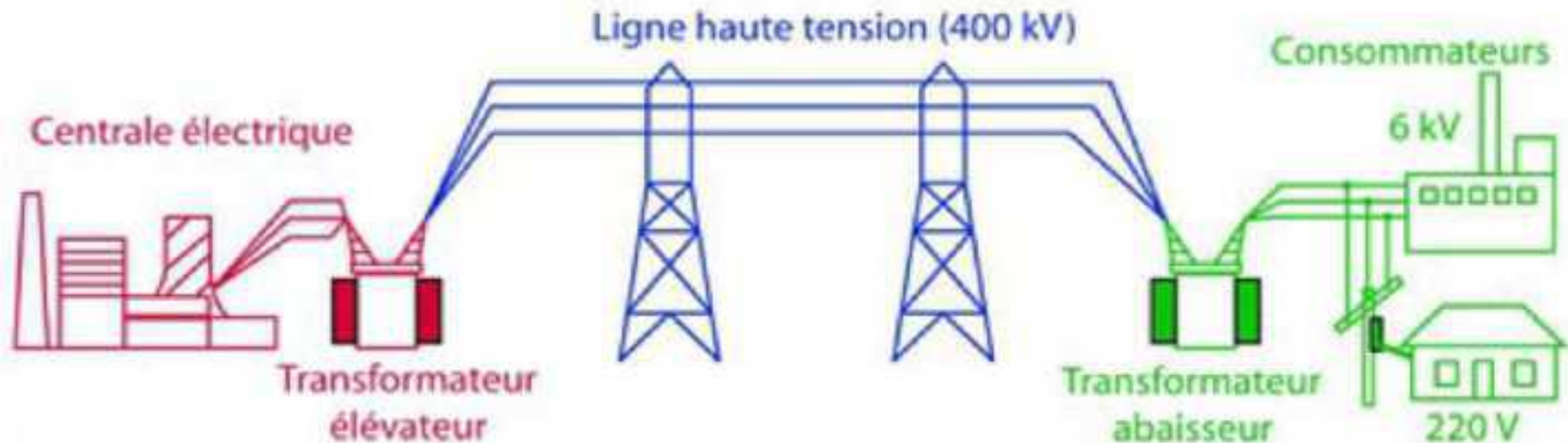
PRODUCTION ELECTRIQUE

Régimes électriques

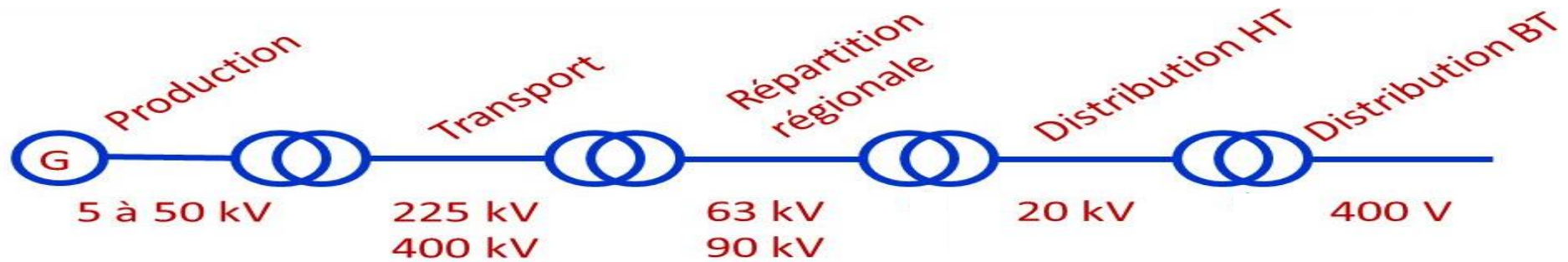
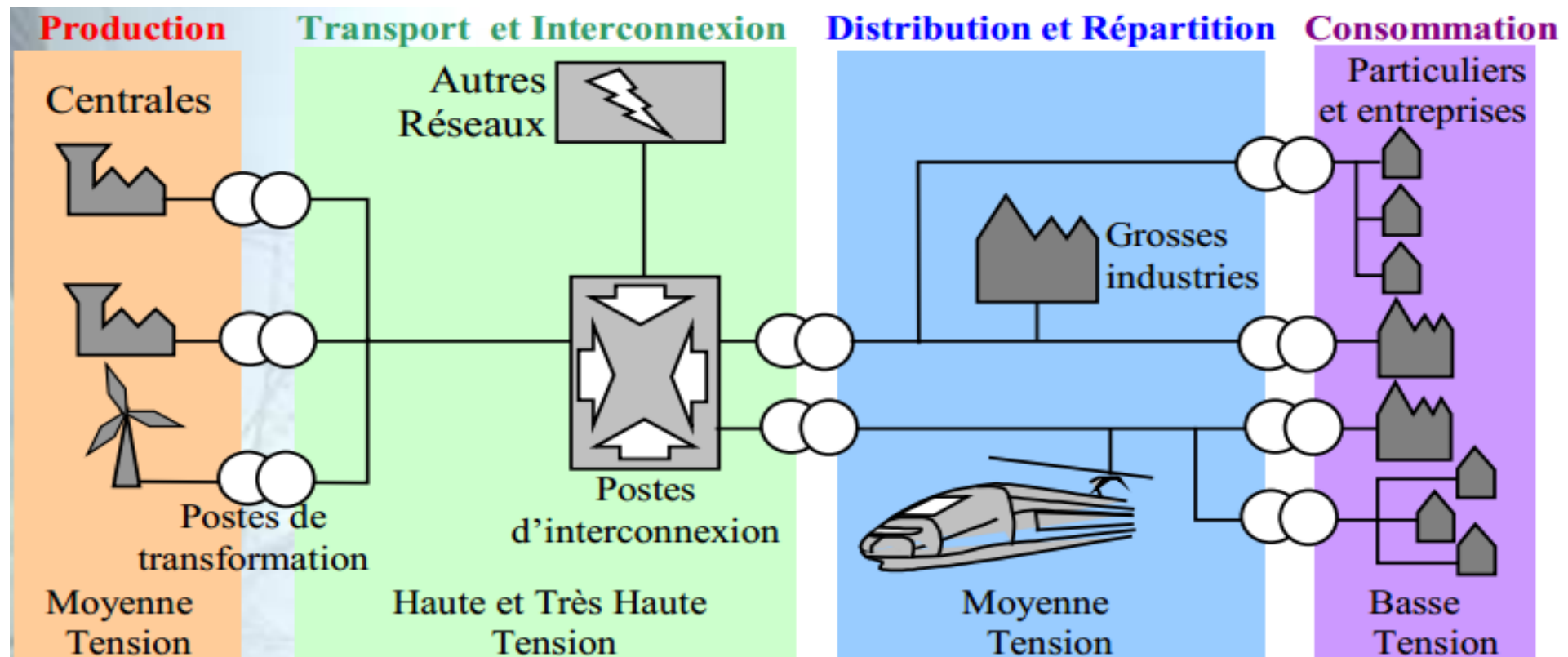
Régime	Avantages	Inconvénients
Continu	• Pas d'effet réactif • Interconnexion entre réseaux est simple	• Difficulté de coupure des courants continus • Impossible de produire ou d'élever les tensions dans le domaine de très hautes tensions

En plus de ses avantages, le régime sinusoïdal est imposé pour transporter l'énergie électrique puisque les transformateurs élévateurs/abaisseurs ne sont disponibles que pour le régime alternatif

INTERRELATION ENTRE LES COMPOSANTES DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE NATIONAL



INTERRELATION ENTRE LES COMPOSANTES DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE NATIONAL



INTERRELATION ENTRE LES COMPOSANTES DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE NATIONAL

	Usage	Tensions Normalisées	Noms (standard Européen)	Aspect visuel des lignes
H T B	Grand transport national et Interconnexion	 225 kV / 400 kV (THT) 90 kV / 63 kV (HT)	 HTB (50 kV à 400 kV) HTB 3 : 400 kV HTB 2 : 225 kV HTB 1 : 90 et 63 kV	 Ligne 225 kV
H T A	Lignes inter-régionales, Répartition régionale	33 kV / 20 kV / 15 kV (MT)	HTA (1 kV à 50 kV)	 Poste de répartition 90 kV
B T	Répartition Locale, Distribution et Consommation	400 V 230 V Mono (BT)	BT < 1 kV	 Pylône 230/400 V 4 fils

Le respect de ces niveaux garantit la sûreté des installations.

INTERRELATION ENTRE LES COMPOSANTES DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE NATIONAL

L'architecture d'un réseau électrique semble complexe puisqu'elle dépend du niveau de tension, la puissance demandée et la sûreté d'alimentation requise

Les réseaux électriques doivent être compatibles pour permettre le développement des stratégies énergétiques nationales au niveau de l'Afrique qui se basent entre autres de l'intégration régionale.

Toutes les normes et les règles d'exploitation électrique doivent être alignées aux normes internationales (dans le cas échéant aux normes européennes)

La France a adopté des guides sous l'appellation de UTE (Union Technique d'Electricité) pour orienter les concepteurs aux règlements d'exploitation des équipements électriques. Le guide UTE C 18-510 définit les niveaux de tension alternative

INTERRELATION ENTRE LES COMPOSANTES DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE NATIONAL

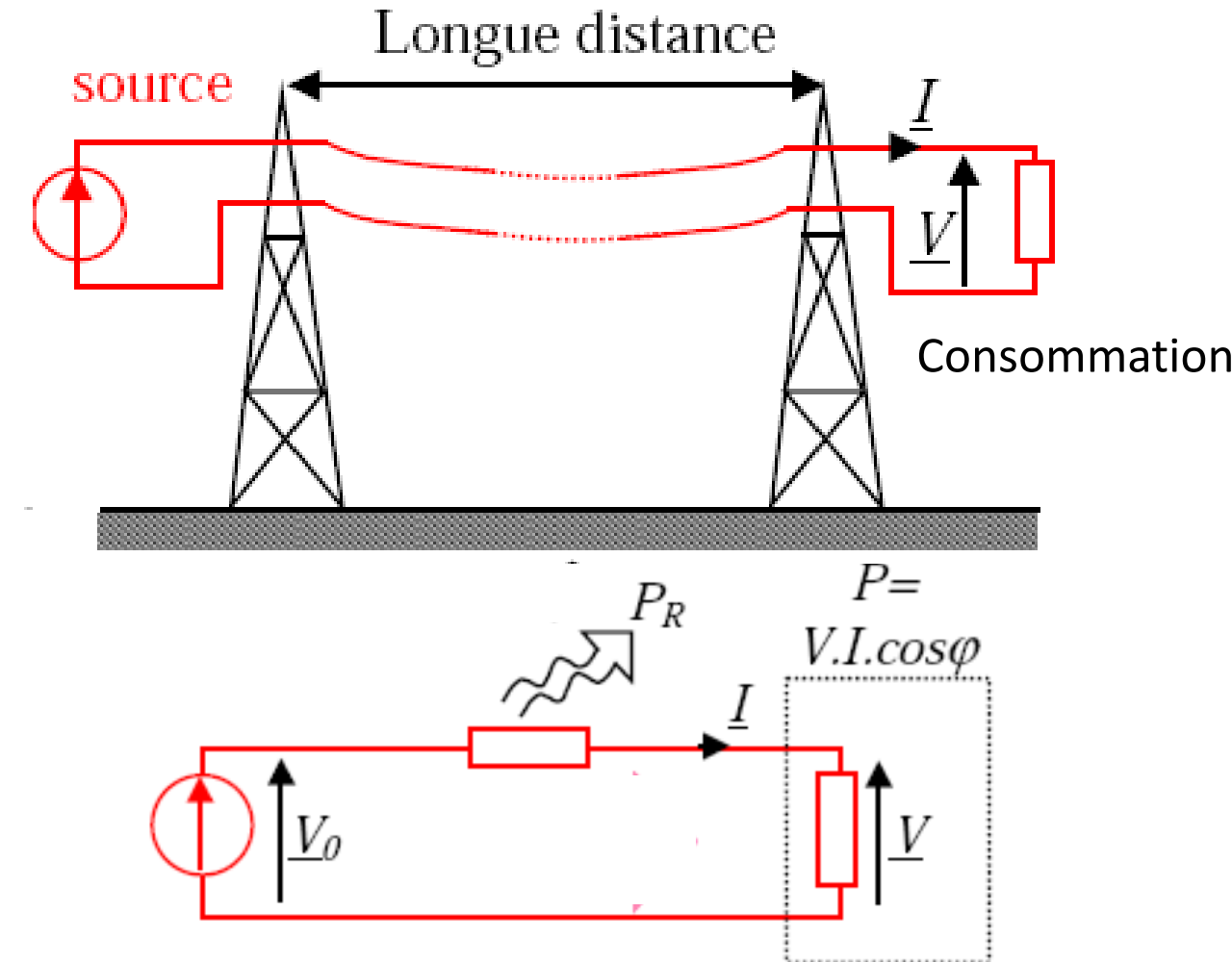
La Haute tension est de deux niveaux A et B, appelés HTA et HTB :

HTB	HTA
Ligne de transport électrique dont la tension composée >50kV	Transport/distribution électrique dont la tension composée est entre 1 kV et 50 kV
Standards : 63 - 90 - 225 kV	Standards : 5,5 – 10 – 15 - 20 - 33 kV

La Basse tension est de Trois niveaux T - A et B, appelés TBT - BTA et BTB :

BTB	BTA	TBT
Ligne de distribution électrique dont la tension composée est entre 500V et 1kV	ligne de distribution électrique dont la tension composée est entre 50V et 500V	Ligne de distribution électrique dont la tension composée est <= 50 V
	Standard : 400 V	

Les raisons pour lesquelles le gestionnaire du réseau électrique élève la tension dans les réseaux de transport sont principalement la minimisation des pertes d'énergie et les chutes de tension :



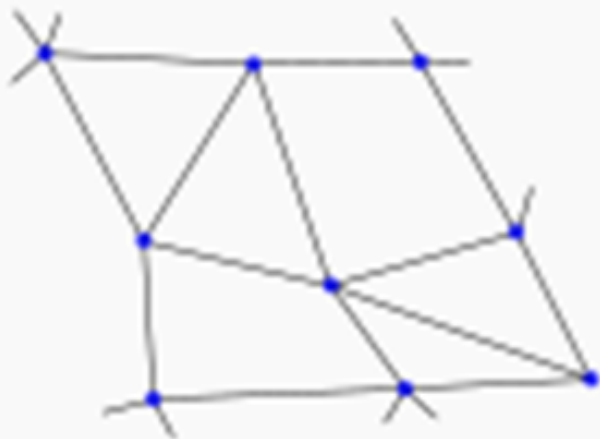
- 1 Le réseau électrique est un conducteur qui présente une impédance dont la partie résistive est notée R
- 2 Le transport électrique n'est que l'acheminement de la puissance active : $P = V.I.\cos\phi$
- 3 La puissance perdue est $P_R = R.I^2 = R.P^2/(V^2.\cos^2\phi)$
- 4 La chute de tension est $\Delta V = R.I = R.P/(V.\cos\phi)$
- 5 Pour acheminer la puissance P avec un minimum de pertes, il faut que P_R soit la plus faible possible.
- 6 Pour fournir la tension aux consommateurs avec un minimum de pertes, il faut que ΔV soit la plus faible possible.
- 7 R étant une caractéristique du câble, donc la puissance P_R et la chute de tension sont minimales quand la tension V est maximale et le $\cos\phi$ est proche de 1.

En pratique, le gestionnaire du réseau électrique définit la tension de la source d'alimentation par la puissance à fournir

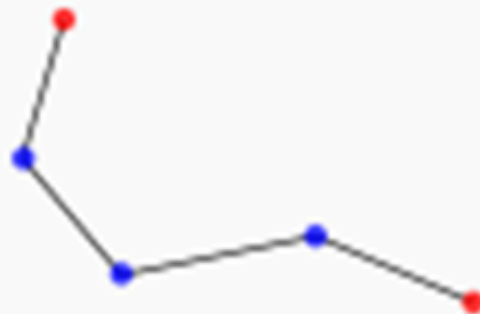
tension d'alimentation	puissance de livraison			
	0	250 kVA	10000 kVA	40000 kVA
BTA				
HTA				
HTB 63 kV ou 90 kV				
HTB 225 kV				



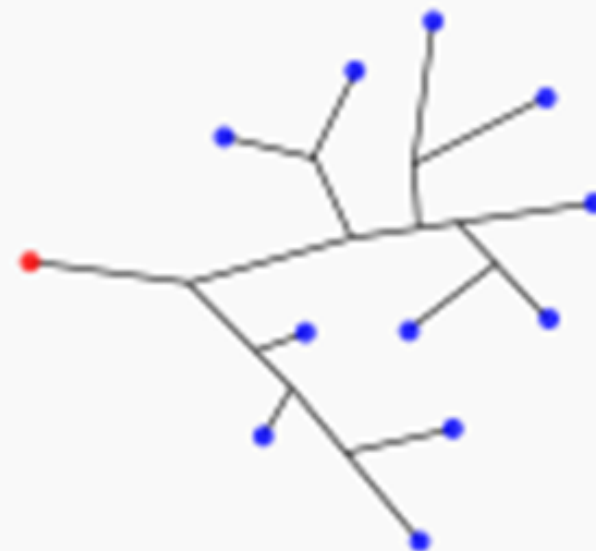
La sûreté du réseau: optimisation des pertes et sûreté d'approvisionnement



Réseau maillé pour le transport



Réseau radial pour la répartition



Réseau arborescent pour la distribution

TRANSPORT EN HTB

L'énergie produite par les différents sites de production doit être acheminée sur tout le territoire. Cet acheminement est réalisé par des lignes aériennes ou souterraines.

Lignes aériennes

A haute et très haute tension, les lignes de transport sont aériennes dans leur grande majorité. Elles sont constituées de conducteurs nus en alliage d'aluminium et de supports (pylônes). Leur diamètre augmente avec la puissance à transporter.

Tension kV	Distance entre phases(m)	Hauteur % Sol	Isolateurs
63	6 à 10	25 à plus de 200 (cela dépend des conditions géographiques)	4 à 6
90			9
225			12 à 14
400			19

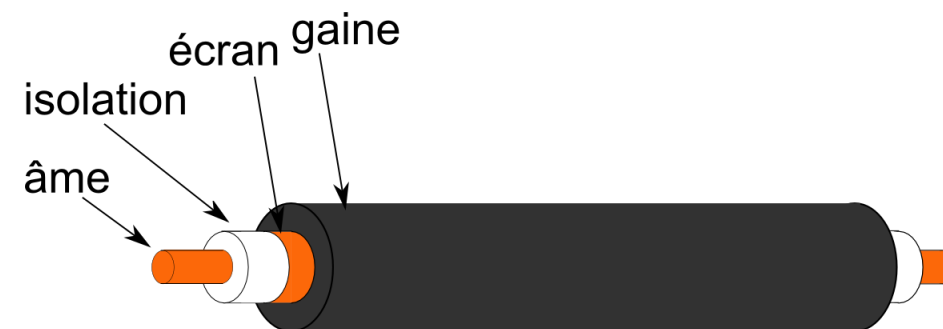


TRANSPORT EN HAUTE TENSION

Lignes souterraines

Les liaisons souterraines nécessitent des câbles de fabrication spéciale, constitués d'une partie conductrice centrale en cuivre ou en aluminium (âme du câble) entourée d'une gaine isolante en matière synthétique.

En HTA, les câbles peuvent être enterrés dans de simples tranchées, mais en HTB leur installation est complexe, et entraîne un coût d'investissement pouvant atteindre 7 fois celui des lignes aérienne.



TRANSPORT ET REPARTITION EN HTA

L'énergie produite par les différents sites de production doit être acheminée surtout le territoire. Cet acheminement est réalisé par des lignes aériennes ou souterraines.

Lignes aériennes

A haute et très haute tension, les lignes de transport sont aériennes dans leur grande majorité. Elles sont constituées de conducteurs nus en alliage d'aluminium et de supports (pylônes). Leur diamètre augmente avec la puissance à transporter.

Tension kV	Distance entre phases(m)	Hauteur % Sol	Isolateurs
10 à 33	4 – 5	10 à 20	2 à 3



Notions sur les réseaux électriques HTA

Les postes de livraison HTB

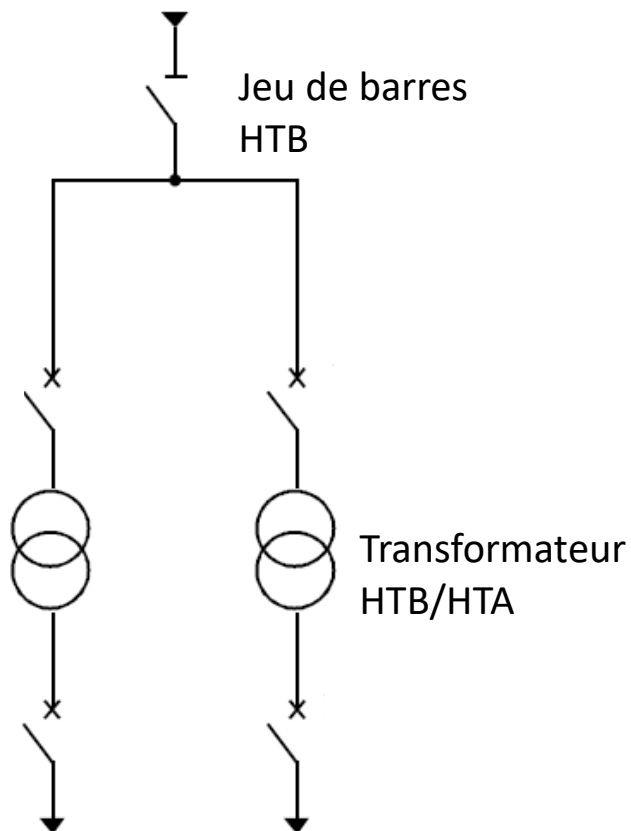
Ils concernent généralement les puissances supérieures à 10 MVA.

L'installation du poste de livraison est comprise entre :

- le point de raccordement au réseau de distribution HTB
- et la borne aval du ou des transformateurs HTB / HTA

Notions sur les postes électriques HTB

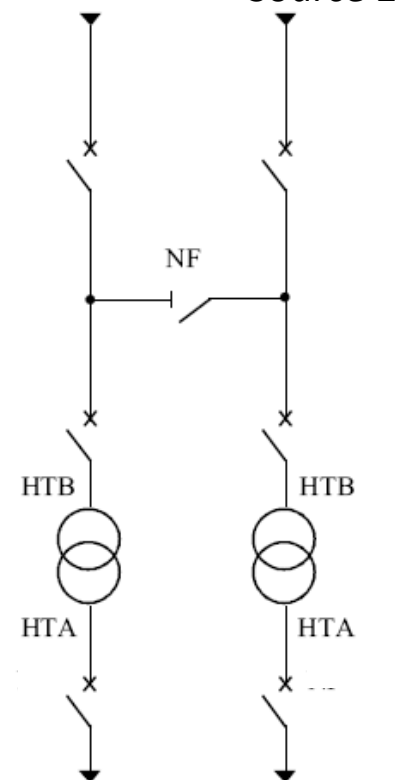
Source d'alimentation



Vers tableau principal HTA

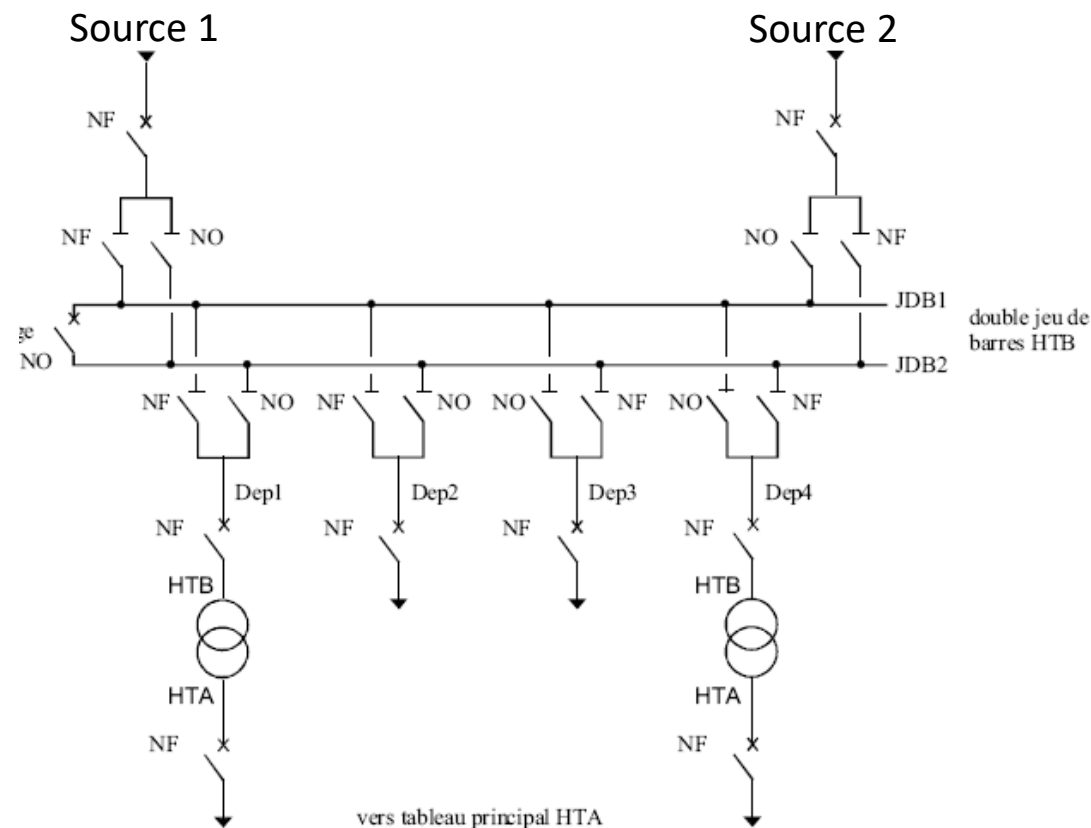
**alimentation simple antenne
d'un poste de livraison HTB**

Source 1 Source 2



Vers tableau principal HTA

**Alimentation double antenne
d'un poste de livraison HTB**



Vers tableau principal HTA

**Alimentation double antenne -double jeu
de barres d'un poste de livraison HTB**

Notions sur les réseaux électriques HTA

Les réseaux de distribution HTA ont comme point de départ les postes sources. Ils comportent des transformateurs HTB/HTA à partir desquels la HTA est distribuée en triphasé sans neutre.

En aval des transformateurs, la partie HTA est constituée de cellules « arrivée », « couplage » et « départ ».

A partir de ces départs, on réalise des schémas en :

- **Antenne ou Simple dérivation ,**
- **Boucle ou Coupure d'Artère ,**
- **Double dérivation.**

selon les besoins de **continuité de service et de contraintes de coût**

Notions sur les postes électriques HTA



Photo d'une rame de distribution: Cellule

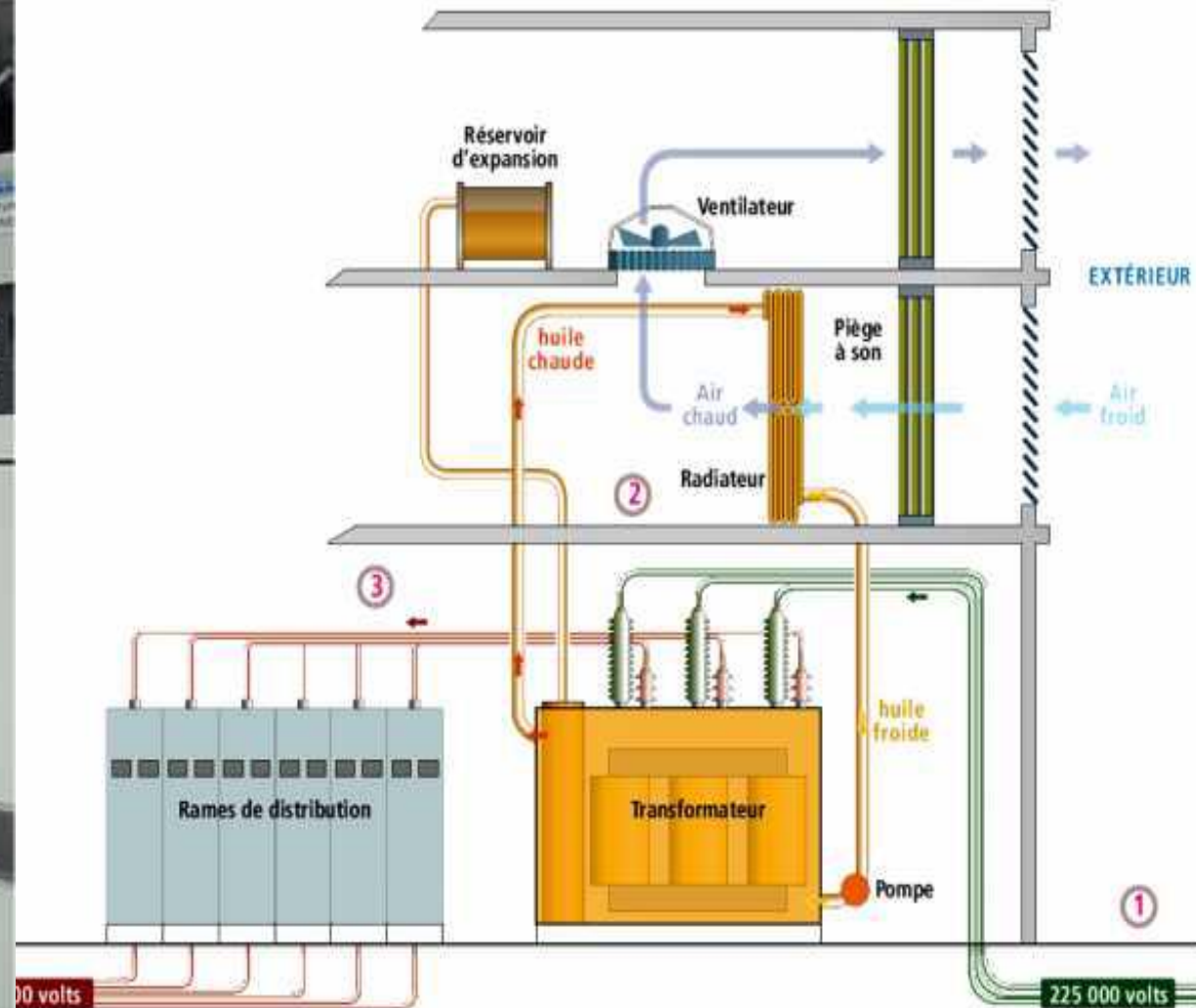


Schéma d'un poste HTA

Notions sur les postes électriques HTA

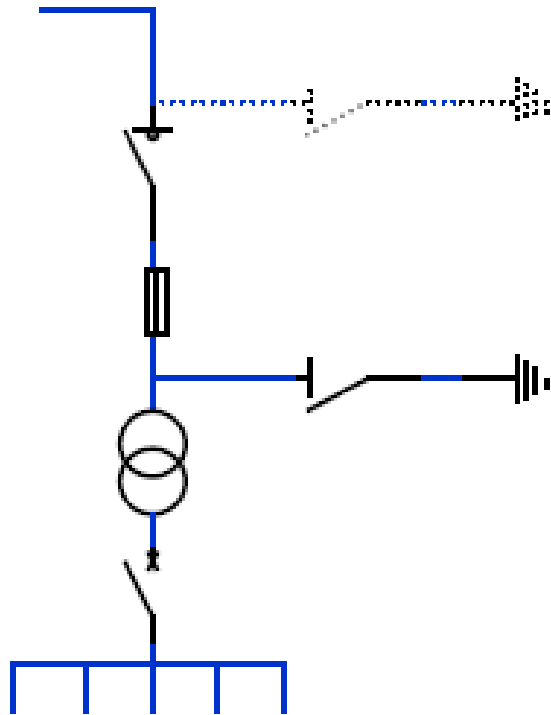
Les cellules sont des armoires métalliques modulaires où sont installés les appareils électriques à haute tension tels que les interrupteurs, les disjoncteurs, jeu de barres, les sectionneurs, parafoudre, etc.

Pouvant être assemblées et reliées entre elles, les cellules sont installées en bâtiment. Elles sont isolées dans l'air ou dans un gaz pour permettre aux disjoncteurs d'utiliser le principe de la coupure dans l'air ou dans l'hexafluorure de soufre.

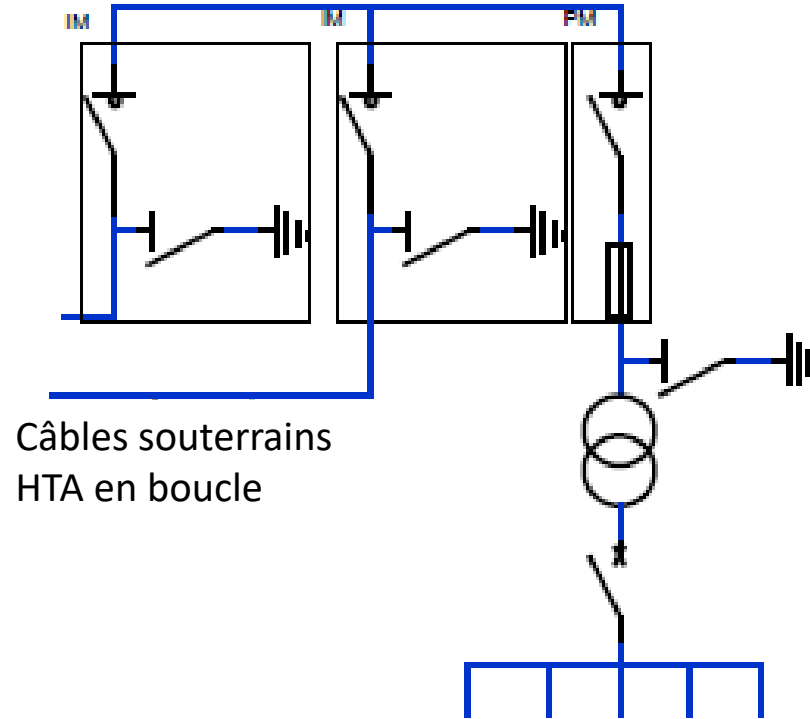


Notions sur les postes électriques HTA

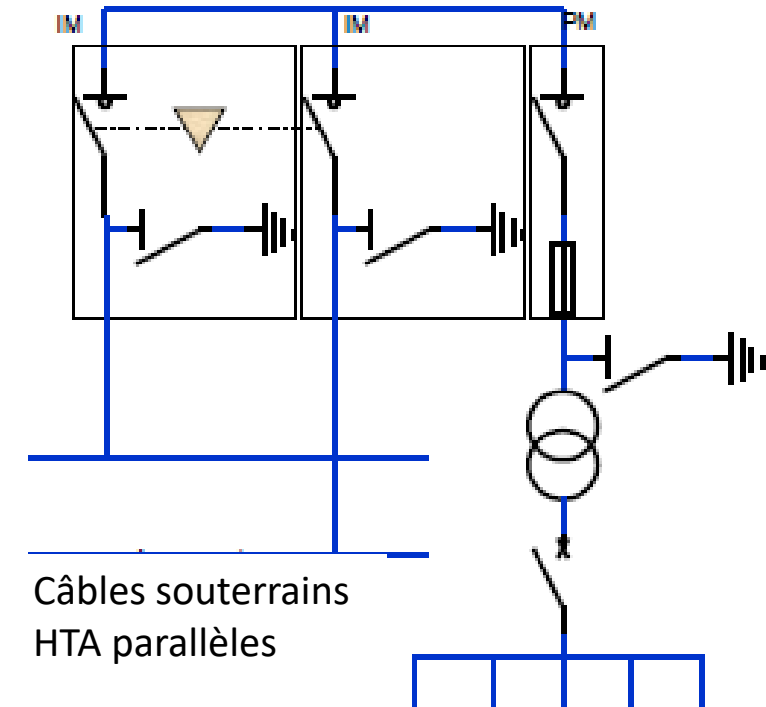
Arrivée HTA



Simple dérivation

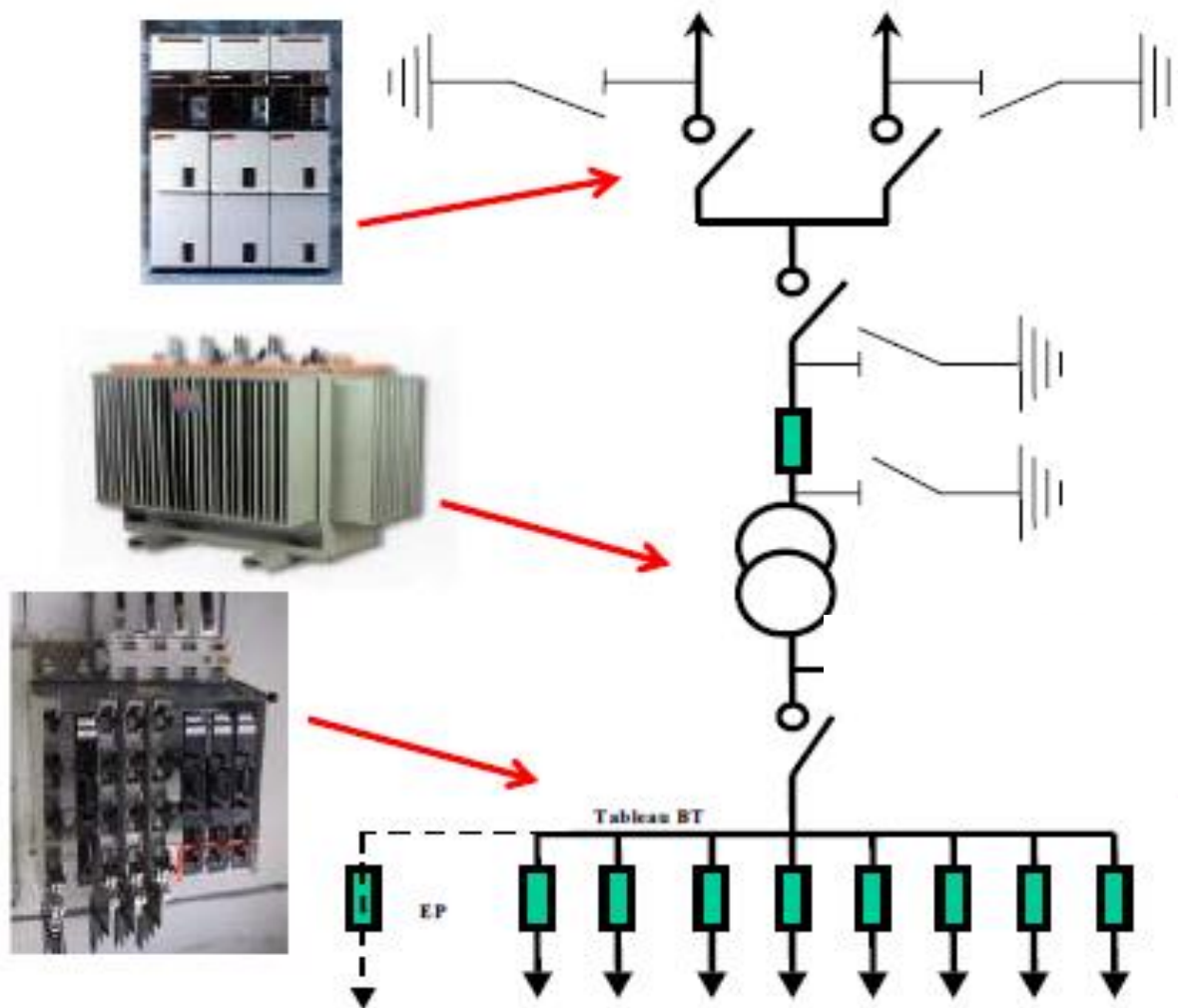


Coupure d'artère

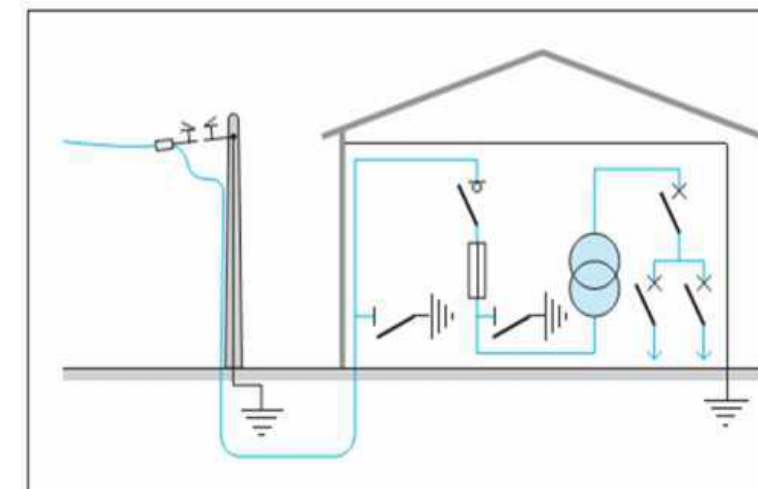
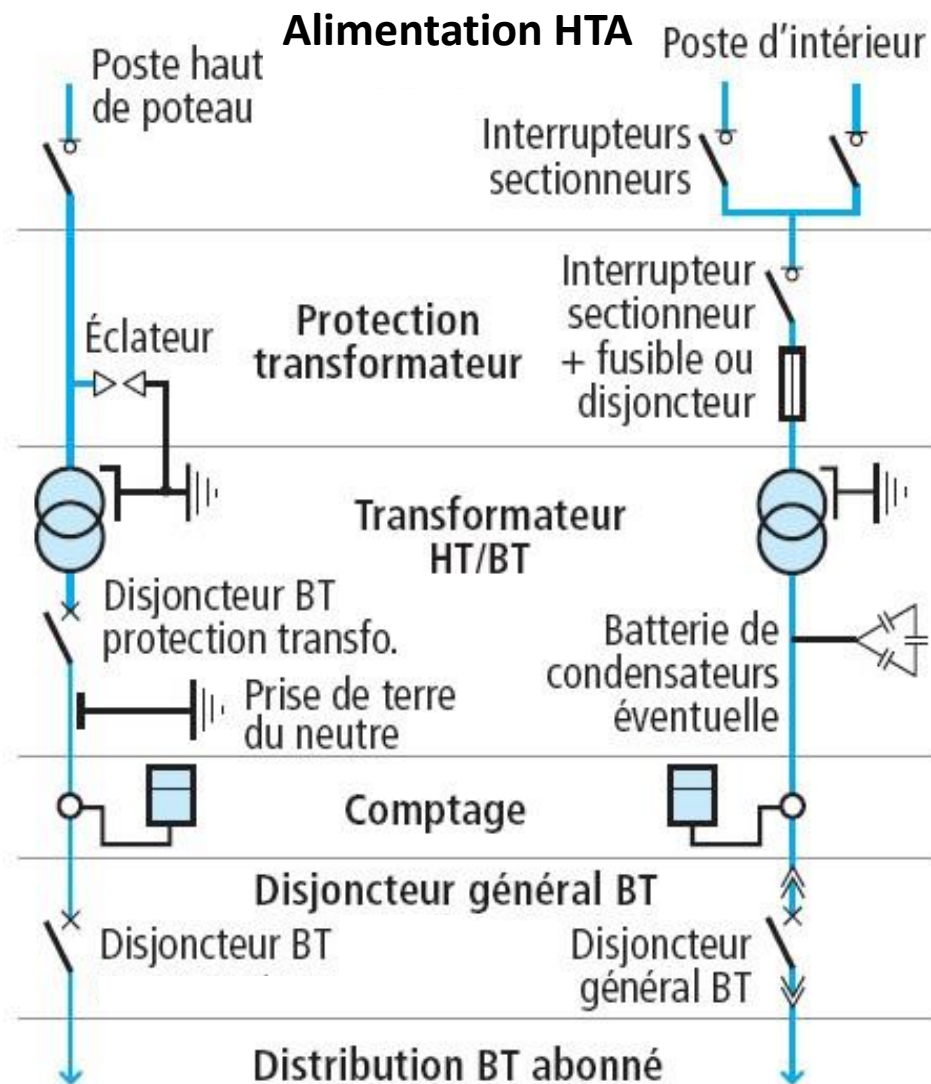


Double dérivation

Notions sur les postes de transformation HTA/BT (poste de livraison)



Notions sur les postes électriques HTA



Notions sur les postes de transformation HTA/BT (poste de livraison)

Un poste de transformation reçoit l'électricité de tension 20kV (en général) et la transforme en 400V, la puissance du transformateur est en fonction de la puissance demandée.

Le poste de livraison comporte essentiellement de l'appareillage et un ou plusieurs transformateurs afin d'assurer les fonctions suivantes :

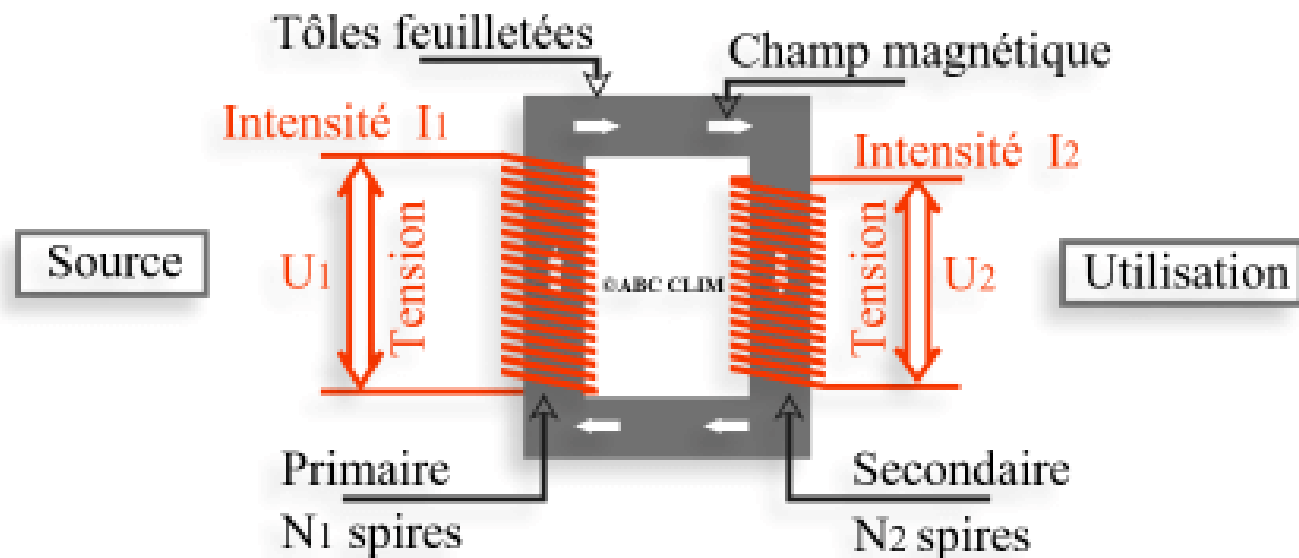
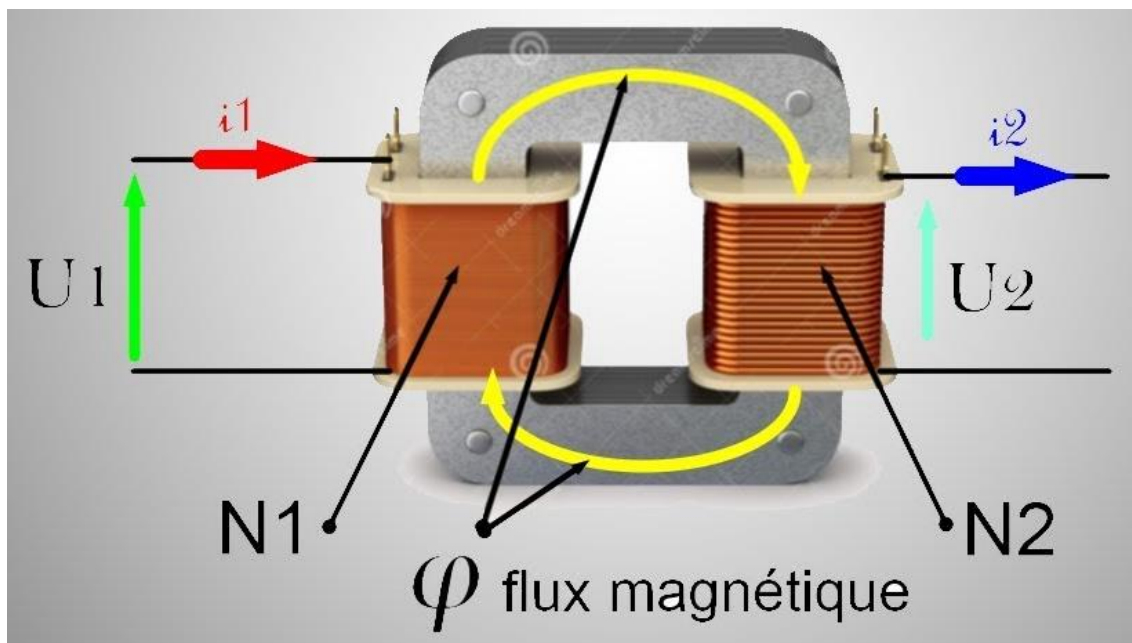
- Protection du transformateur cote HTA;
- Transformation HTA/BT;
- Protection du transformateur cote BT;
- Comptage d'énergie.



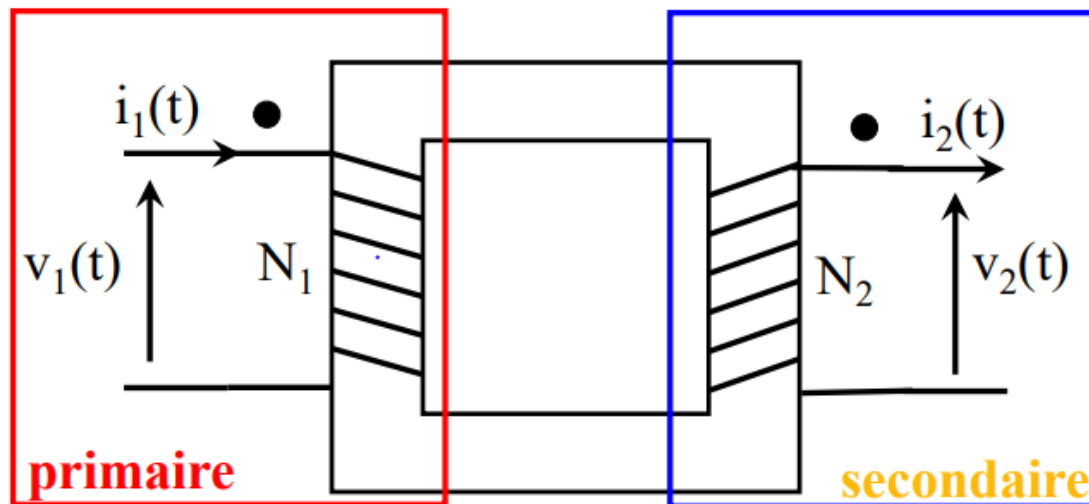
Notions sur les postes de transformation HTA/BT (poste de livraison)

Un transformateur est un équipement électrique qui permet de transformer une tension sinusoïdal en une autre tension de même forme mais d'amplitudes différente ou égale.

Les transformateurs sont généralement constitués d'empilements de tôles d'alliage (fer-silicium) sur les lesquels sont placées des bobines en fil de cuivre.



Notions sur les postes de transformation HTA/BT (poste de livraison)



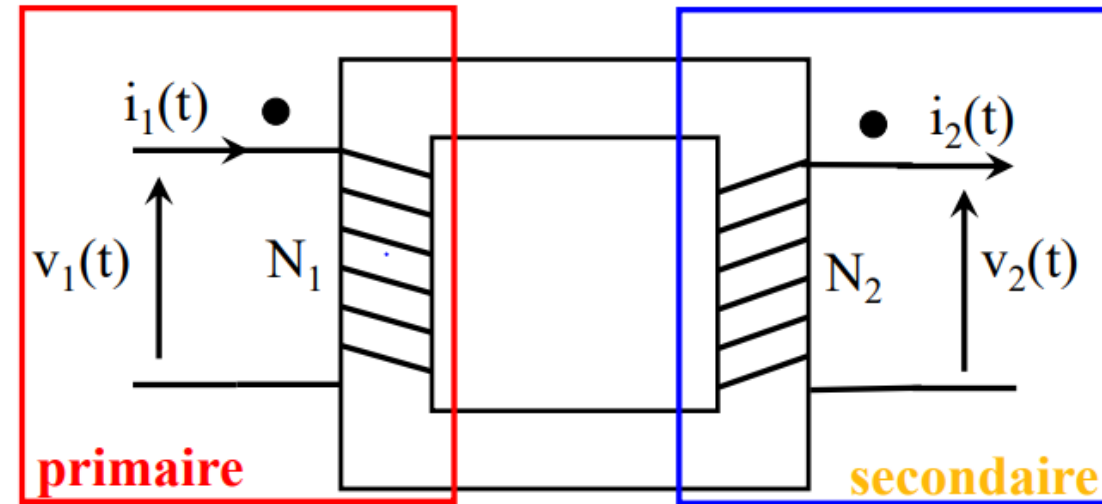
Le premier enroulement, appelé circuit primaire, est l'entrée du transformateur. Le primaire est fléché récepteur par convention.

Le deuxième enroulement, appelé circuit secondaire, est la sortie du transformateur. Le secondaire est fléché générateur par convention.

Notions sur les postes de transformation HTA/BT (poste de livraison)

Lorsque l'on alimente le primaire par une tension V_1 variable on génère un flux Φ variable suivant la formule classique $V_1 = N_1 \cdot d\Phi/dt$

La variation du flux Φ génère alors une tension variable V_2 suivant la formule classique $V_2 = N_2 \cdot d\Phi/dt$



Si on néglige les pertes dans les transformateurs, le rapport de transformation est :

$$R = V_2/V_1 = N_2/N_1$$

donc

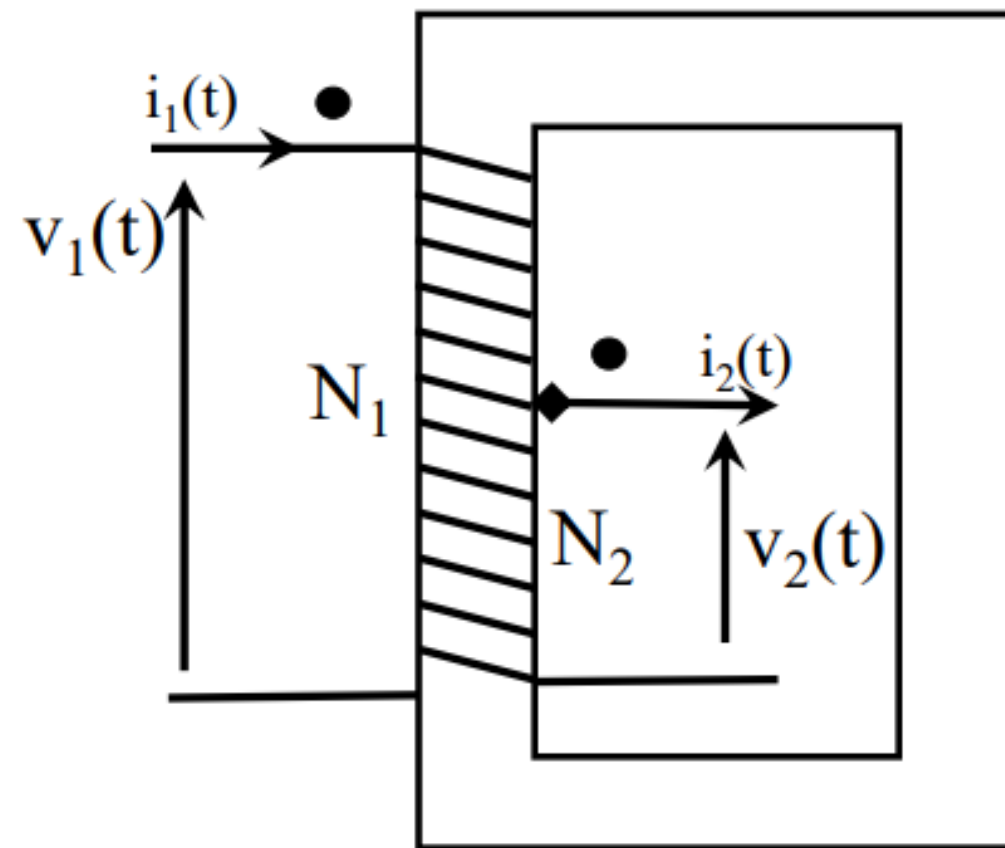
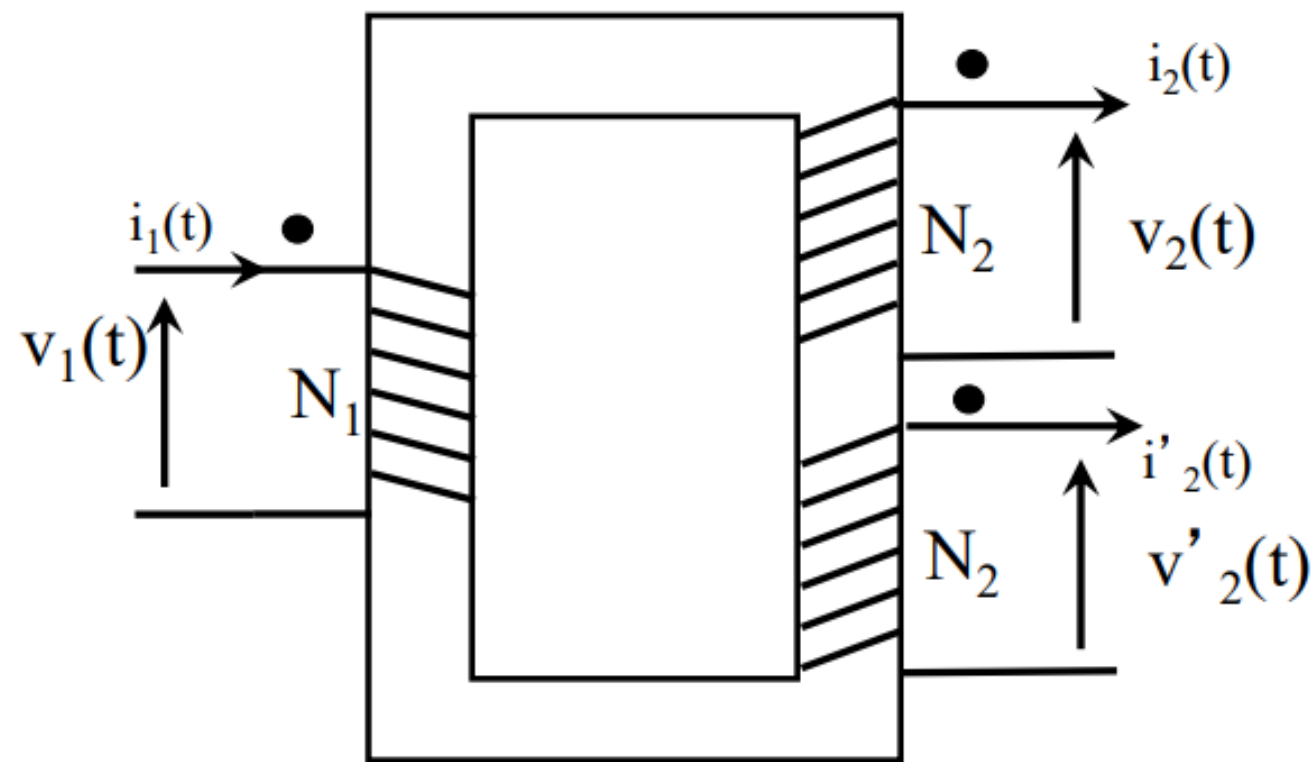
$$V_2 = V_1 \cdot N_2/N_1$$

Si $R < 1$ le transformateur est un abaisseur de tension

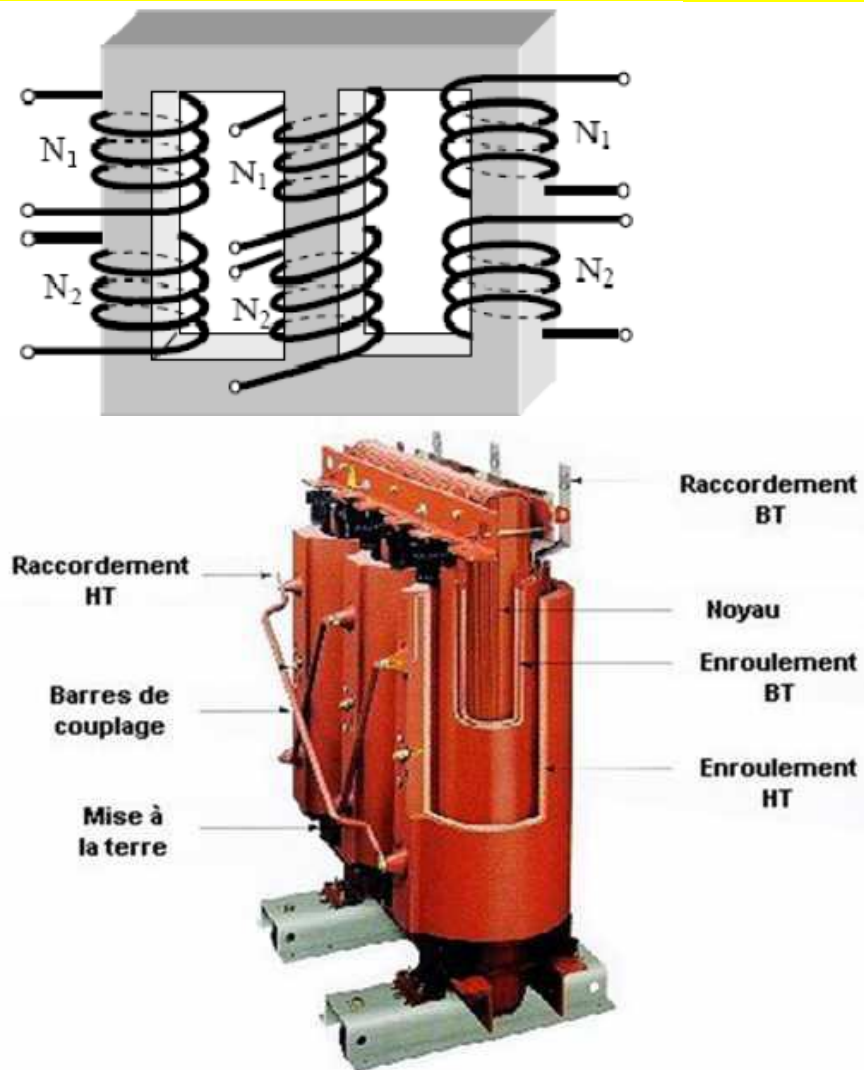
Si $R > 1$ le transformateur est un élévateur de tension

Si $R = 1$ le transformateur est un transformateur d'isolement, pas de liaison électrique entre l'entrée et la sortie

Notions sur les postes de transformation HTA/BT (poste de livraison)

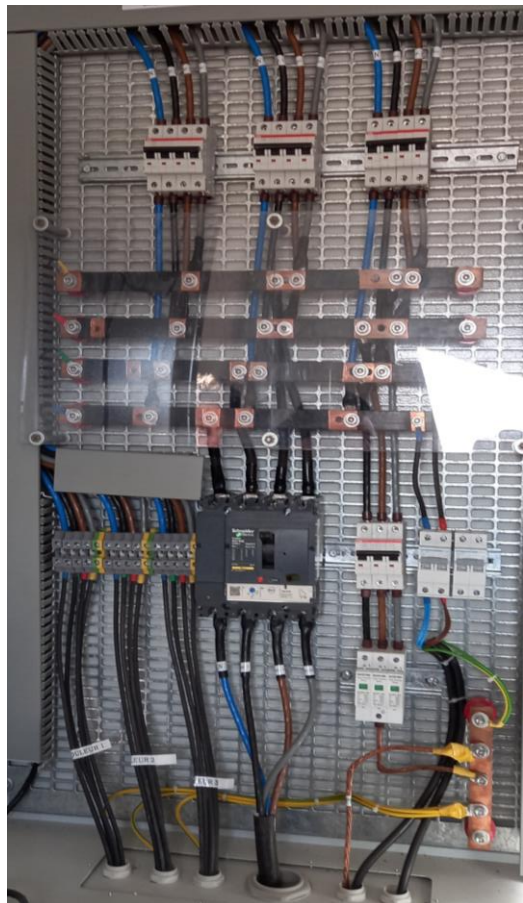


Notions sur les postes de transformation HTA/BT (poste de livraison)

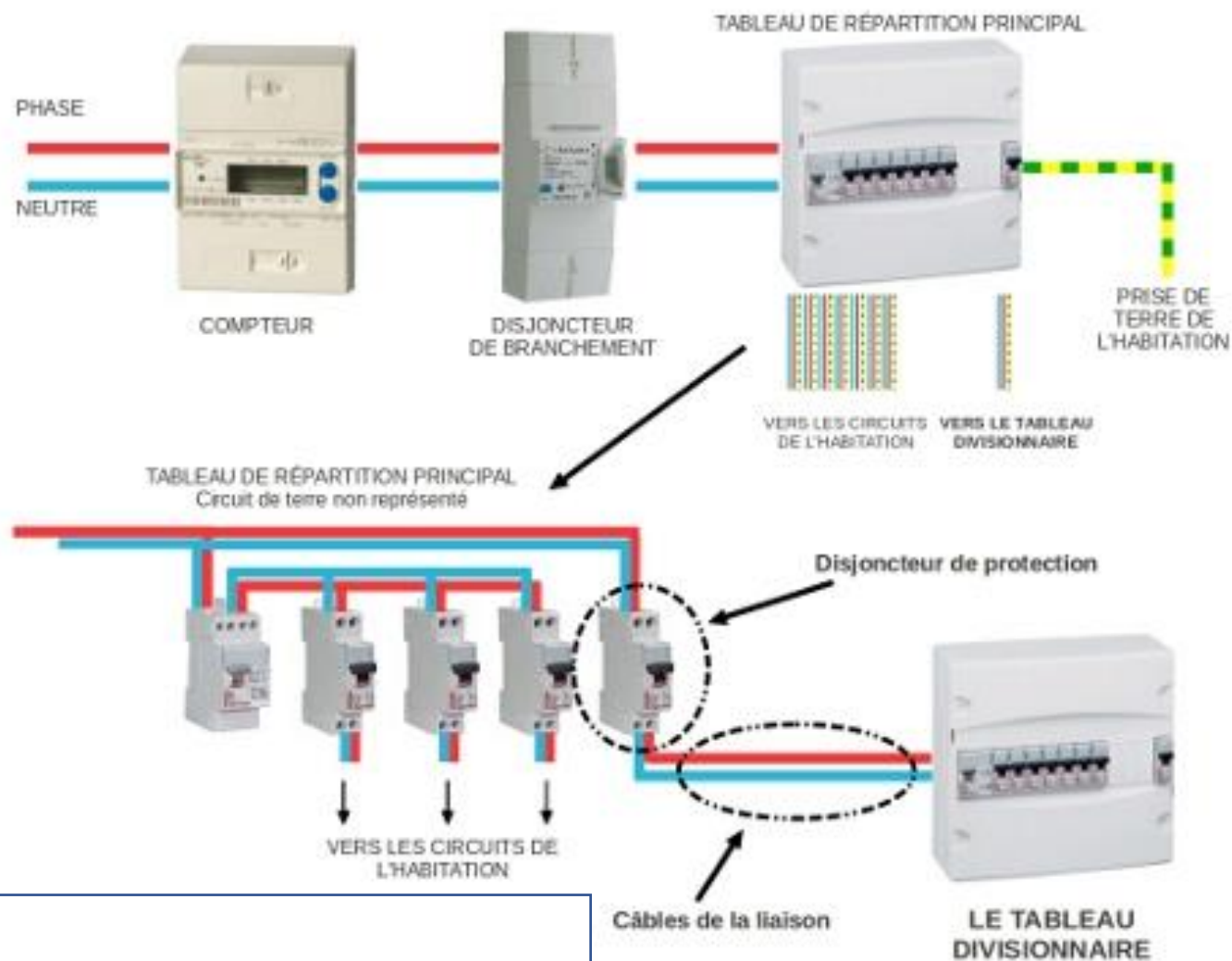
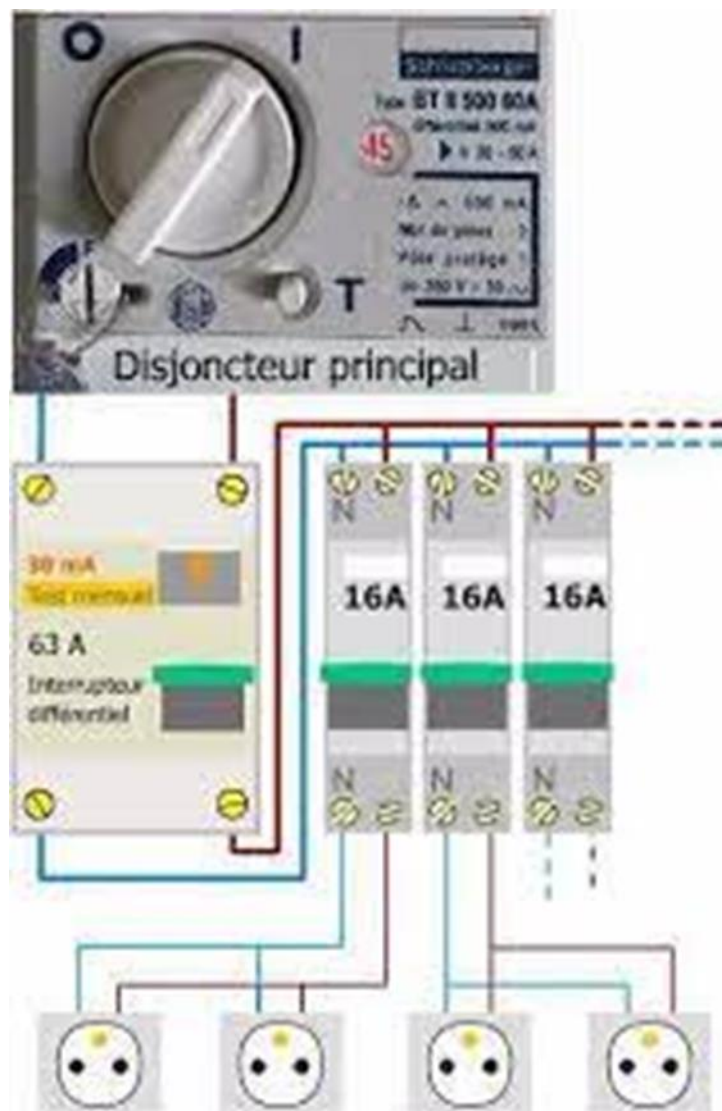


Notions sur la livraison électrique BT

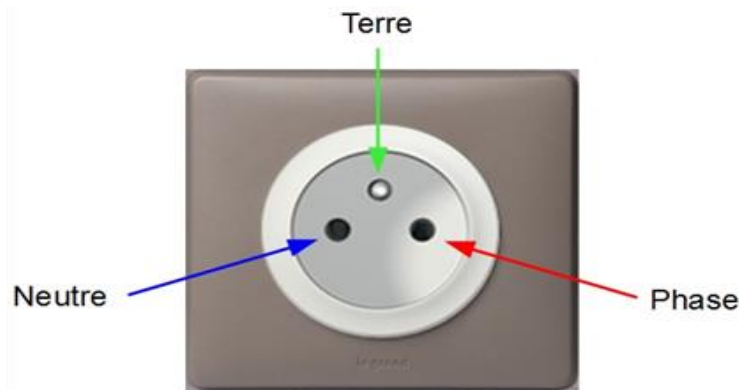
Exemples de TGBT (tableau général de basse tension)



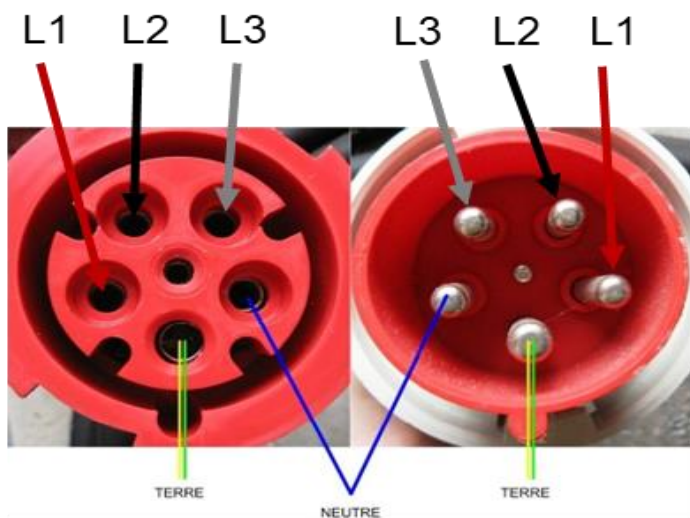
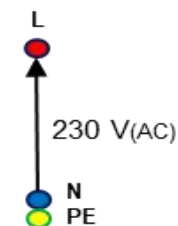
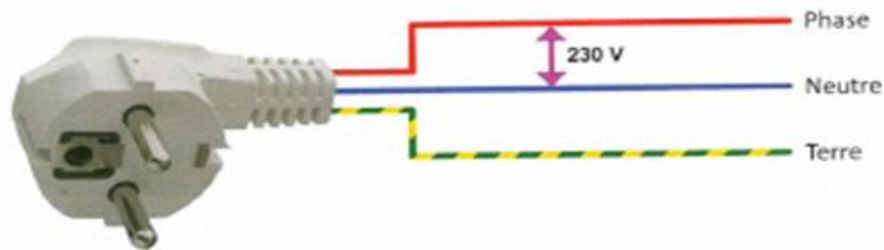
Distribution électrique BT



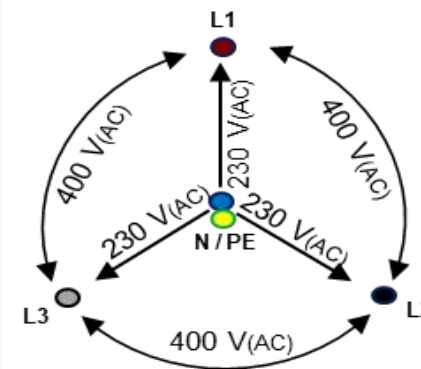
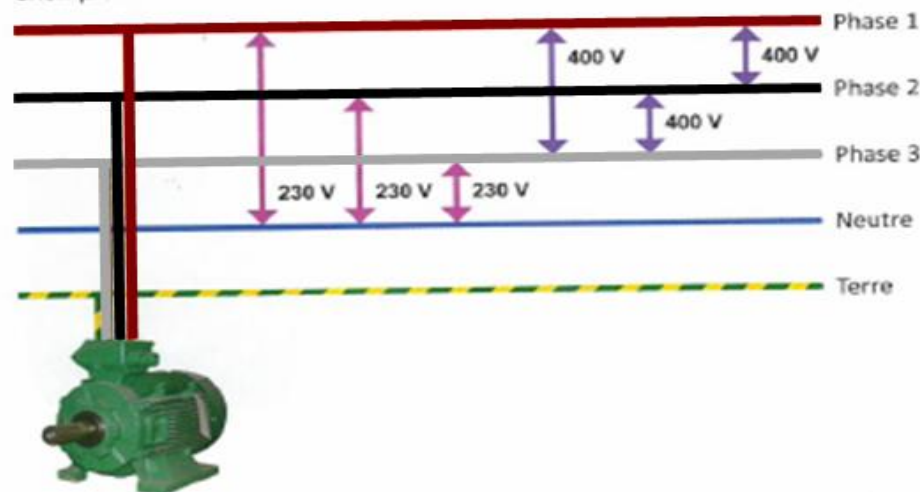
Distribution électrique BT



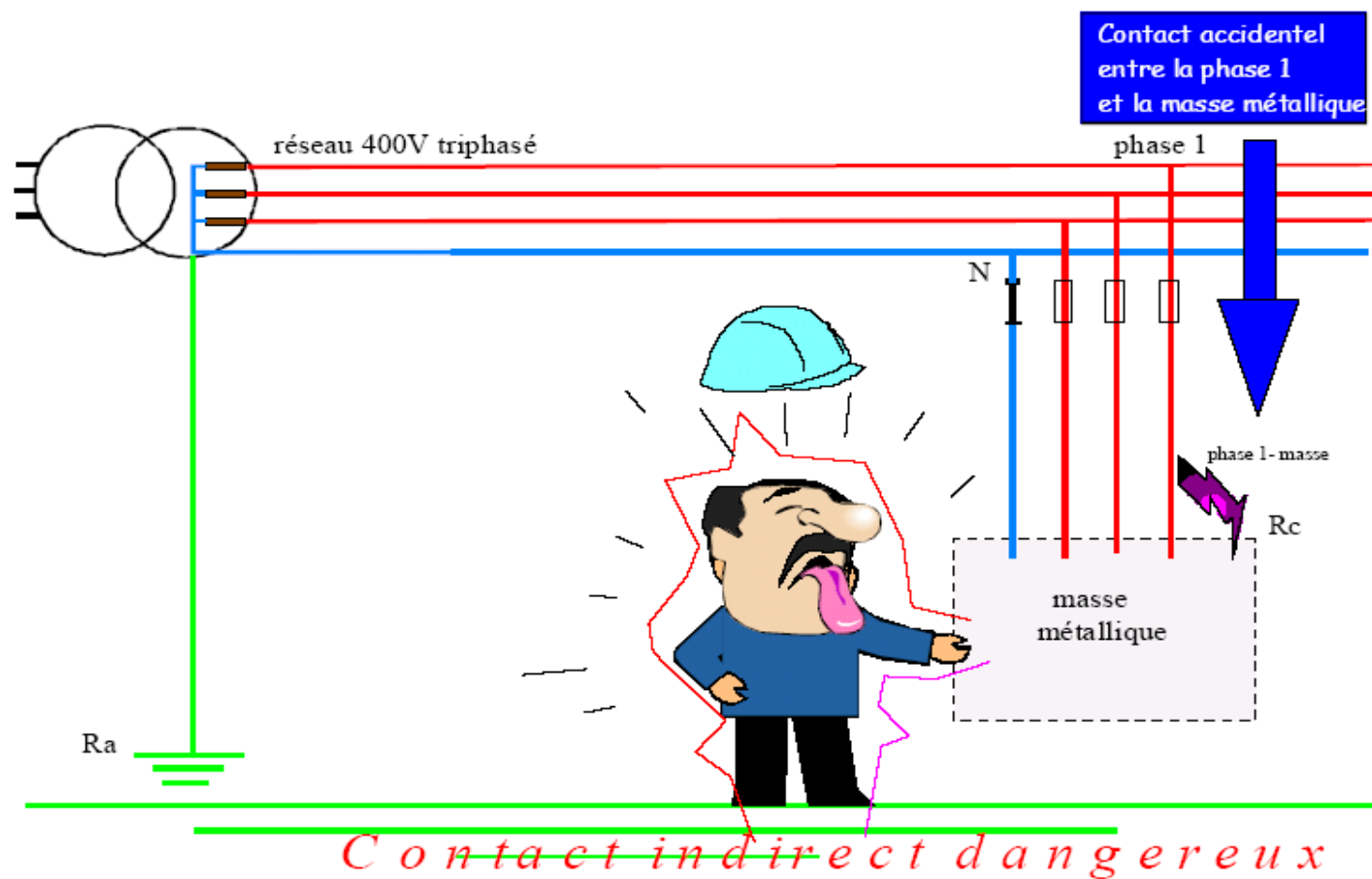
Courant monophasé : tension de 230 V entre la phase et le neutre.
Il est utilisé dans la plupart des applications courantes.



Courant triphasé : tension de 400 V entre chacune des phases et de 230 V entre chaque phase et le neutre.
Il est utilisé pour des installations nécessitant de fortes puissances, comme par exemple des moteurs industriels, ...



Notions sur la livraison électrique BT

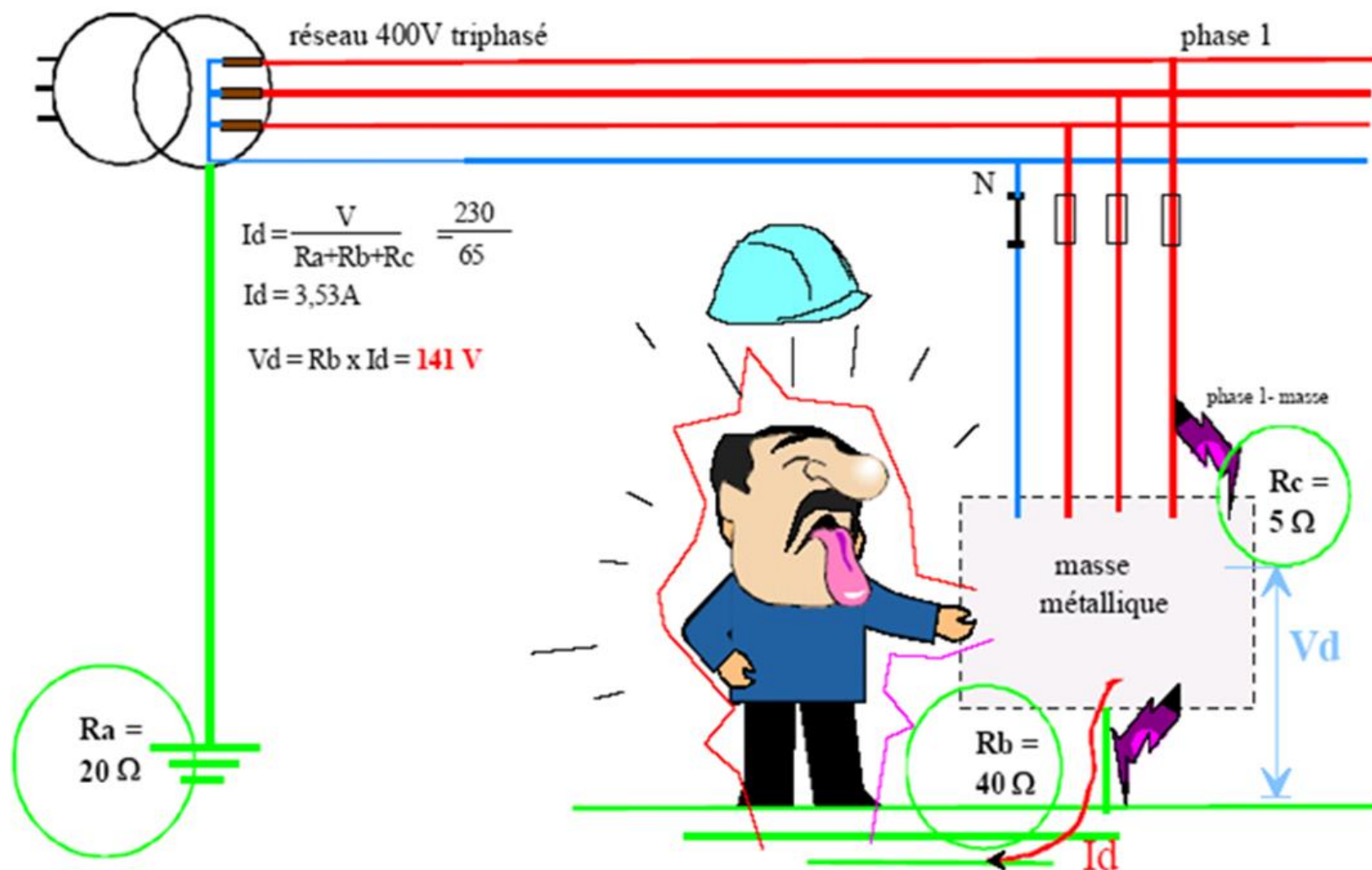


Pour sécuriser le réseau de distribution, il faut adopter la mise à la terre

1 ^{ère} lettre : neutre du transfo		2 ^{ème} lettre : masses des appareils (côté utilisateur)	
raccordé à la terre	T	T	raccordées à la terre
isolé de la terre	I	T	raccordées à la terre
raccordé à la terre	T	N	raccordées au neutre

Notions sur la livraison électrique BT

Schéma TT

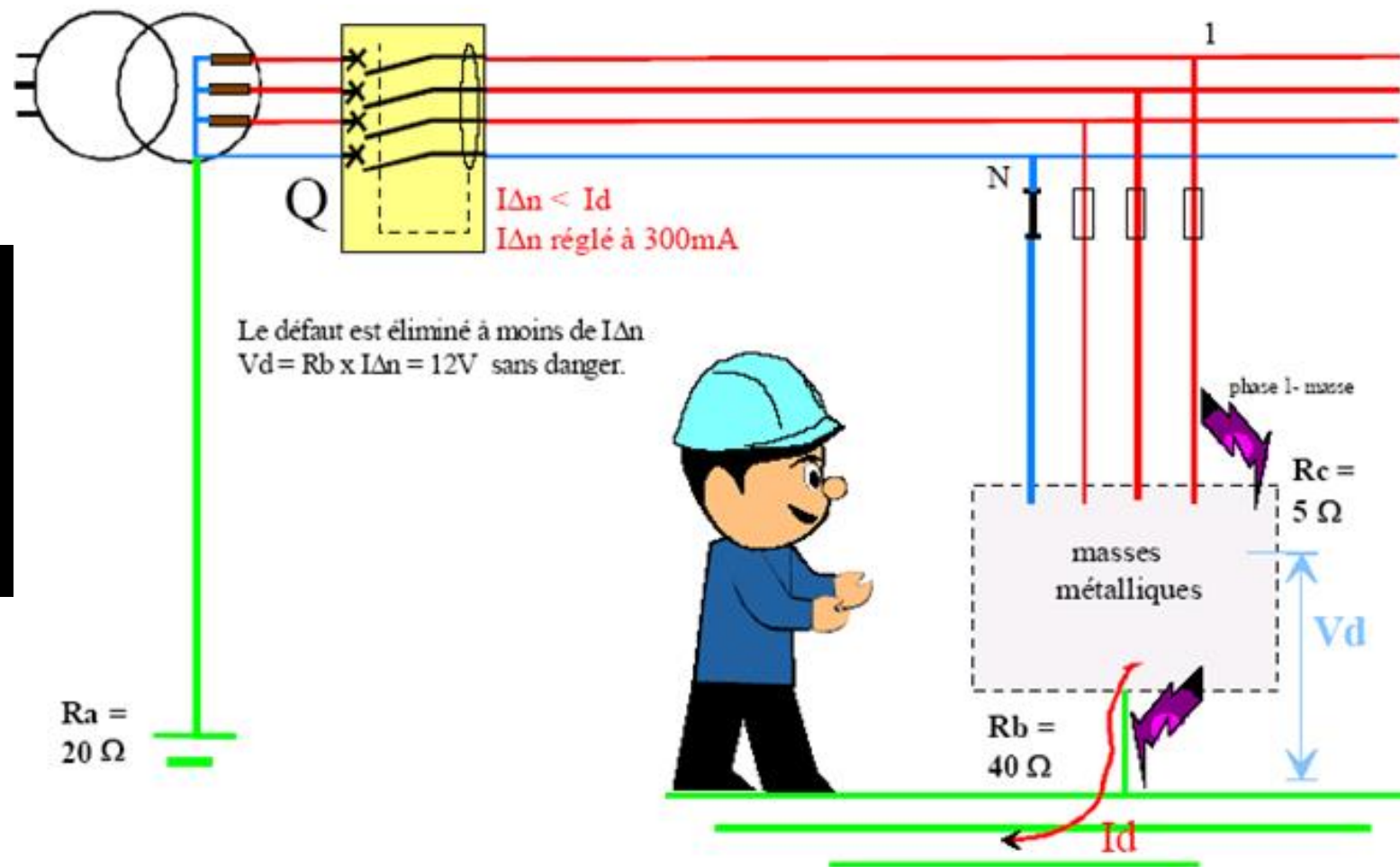


Notions sur la livraison électrique BT

Schéma TT

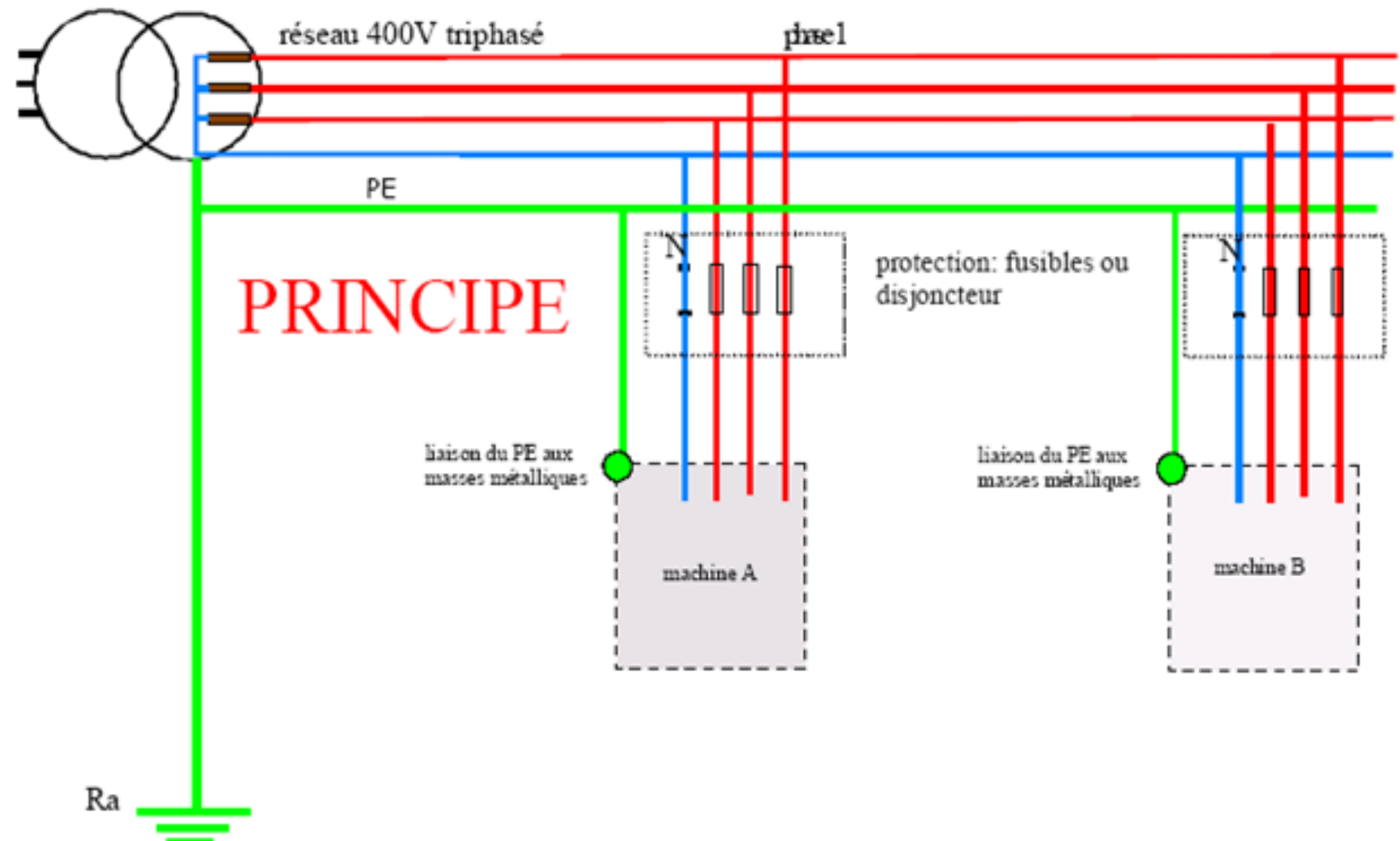
Mise en place d'un
disjoncteur différentiel

**Schéma le plus utilisé
pour l'alimentation
des bâtiments
résidentiels et
tertiaires**



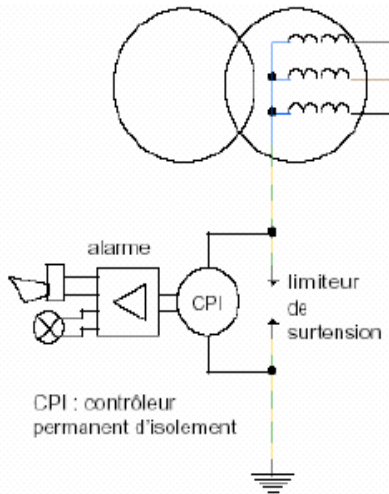
Notions sur la livraison électrique BT

- Le schéma TN

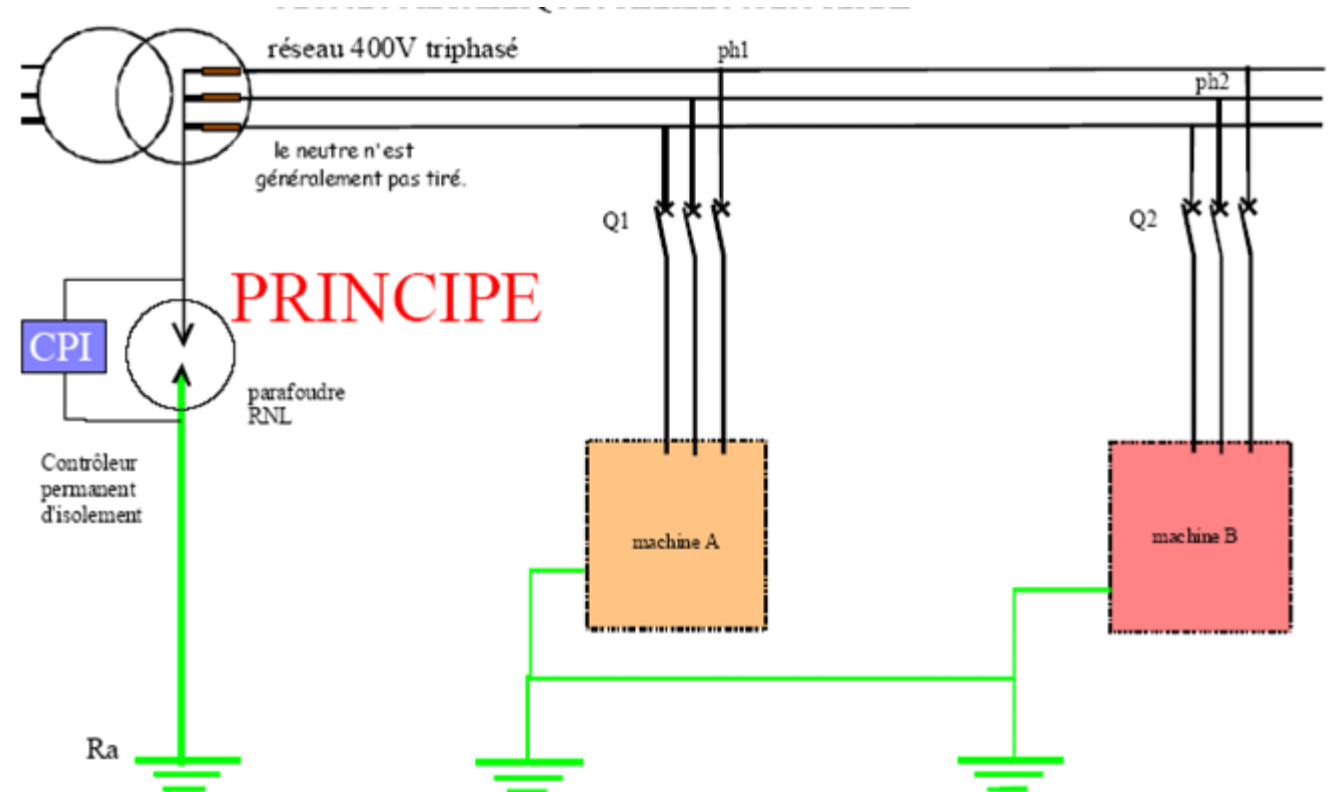


Notions sur la livraison électrique BT

• Le schéma IT



CPI

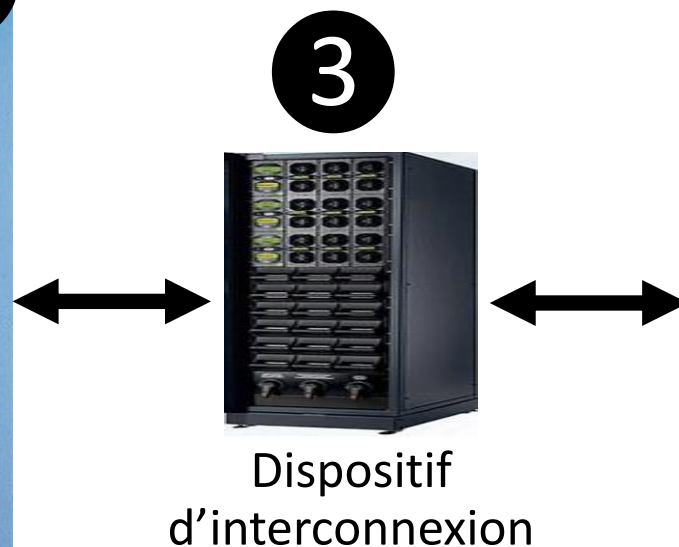
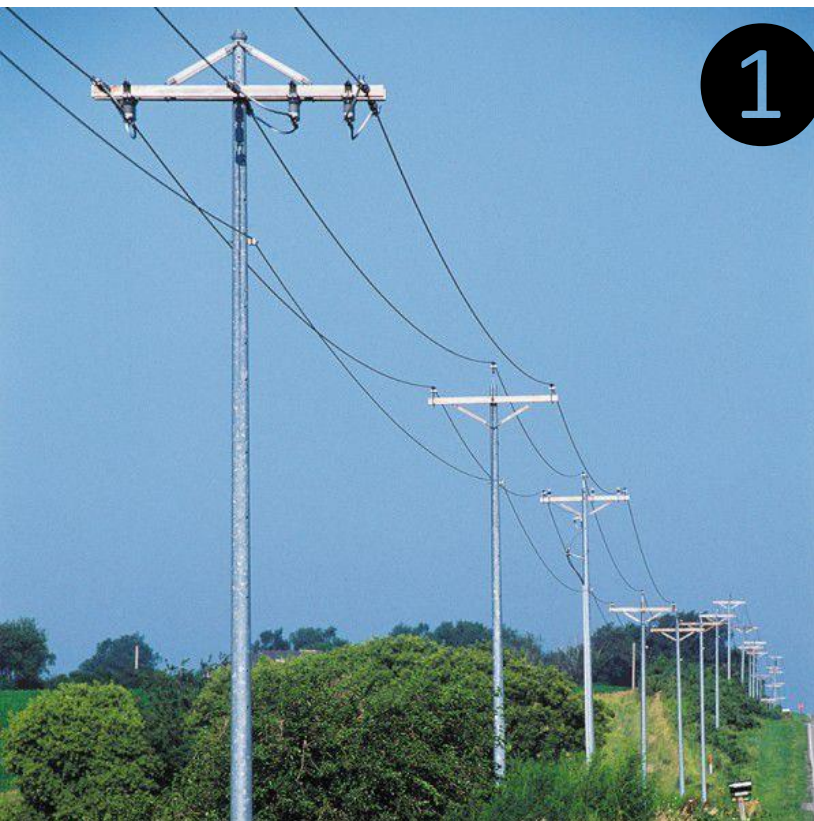


Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique

Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – conditions techniques

L'interconnexion des systèmes solaires au réseau électrique est un processus d'accouplement de deux réseaux électriques moyennement des équipements et des technologies spécifiques

L'interconnexion nécessite trois composantes :



Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – conditions techniques

Sur le plan technique, une interconnexion de réseaux électriques ne peut se réaliser que si les conditions suivantes sont respectées :

1

Condition sur les tensions
des réseaux électriques à
interconnecter



Amplitudes égales pour
les tensions correspondes

2

Condition sur les fréquences
des réseaux électriques à
interconnecter



Fréquences égales pour les
réseaux à interconnecter

3

Condition de synchronisation
entre des tensions des
réseaux

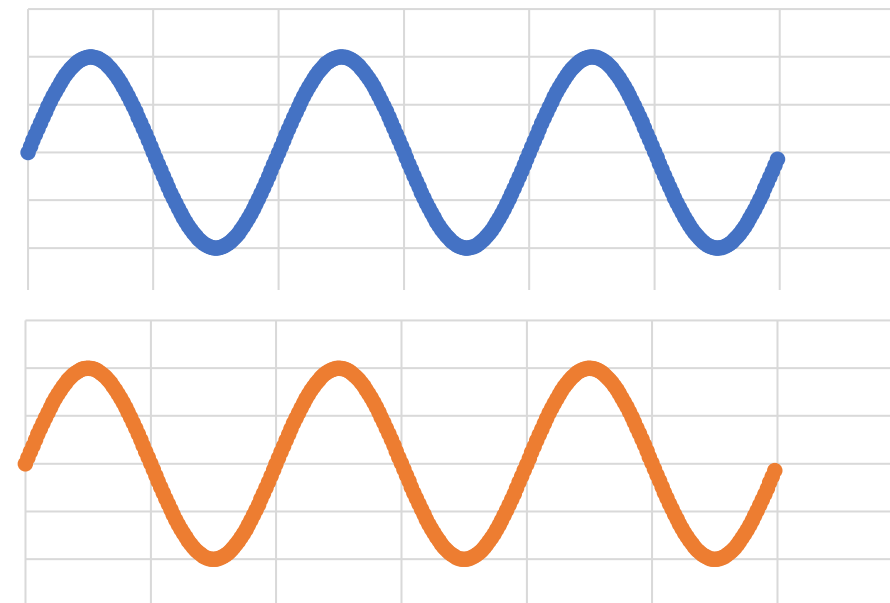
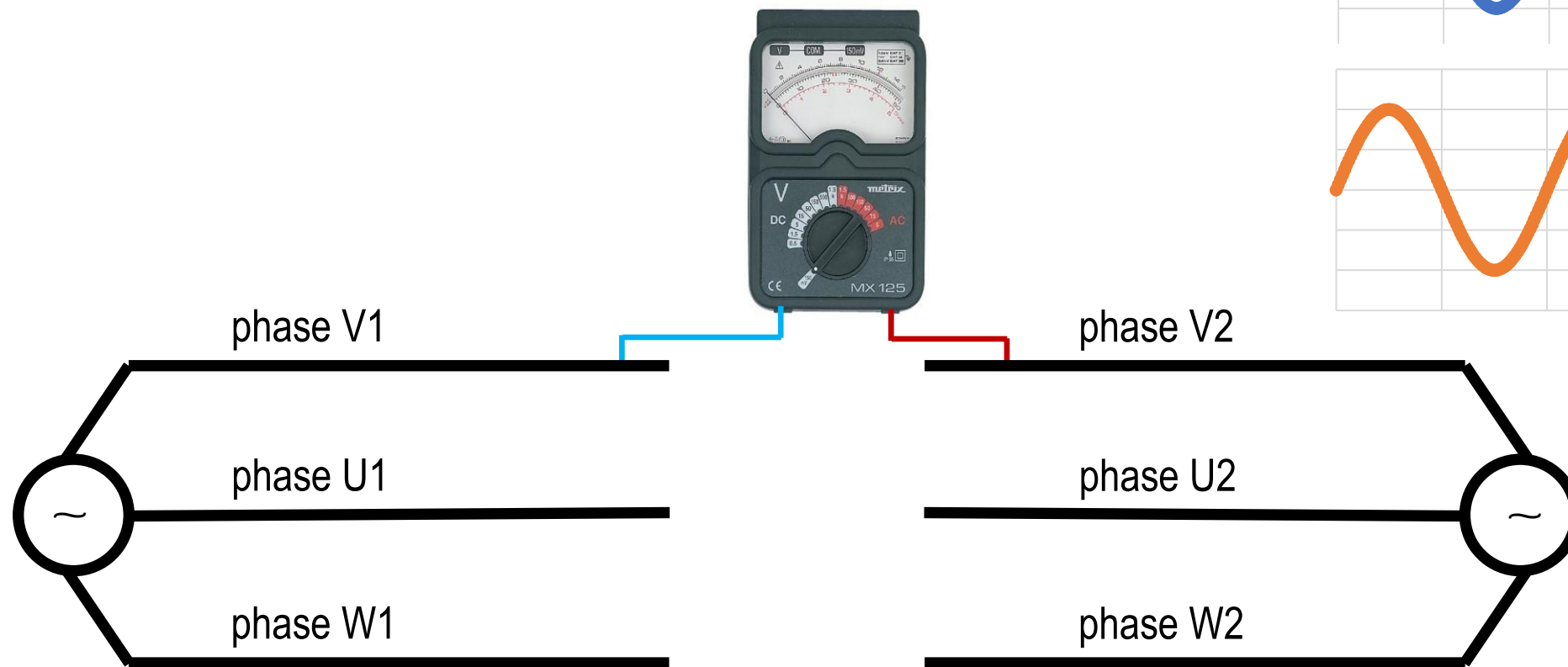


Tensions correspondantes
sont superposées

Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – conditions techniques

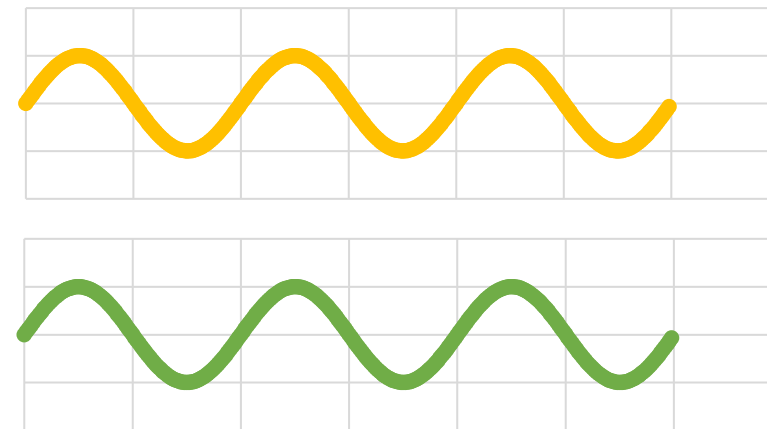
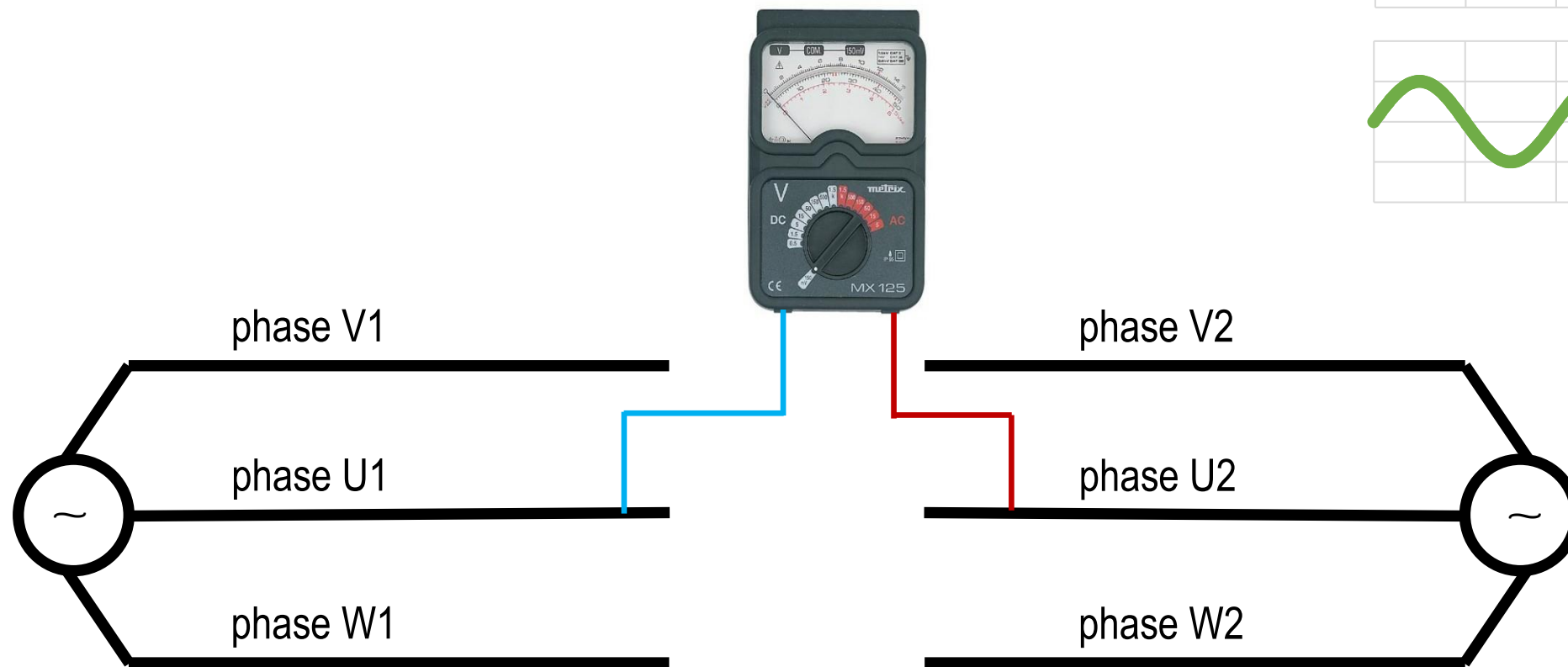
CAS DES TENSIONS SINUSOIDALES

La réunion des trois conditions assure $\Delta V = V_1 - V_2 = 0$



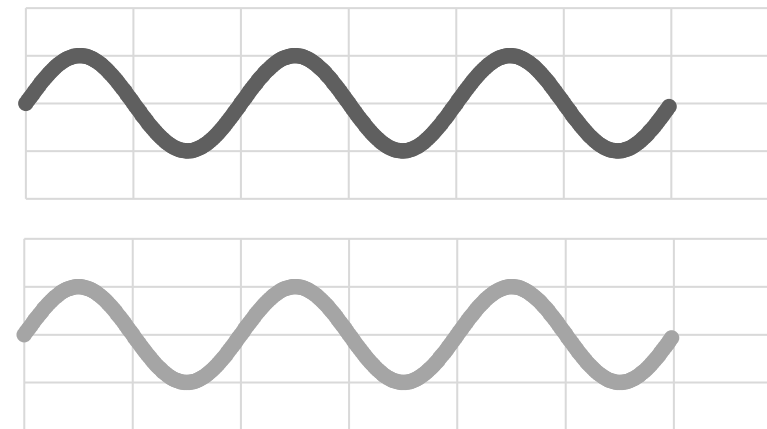
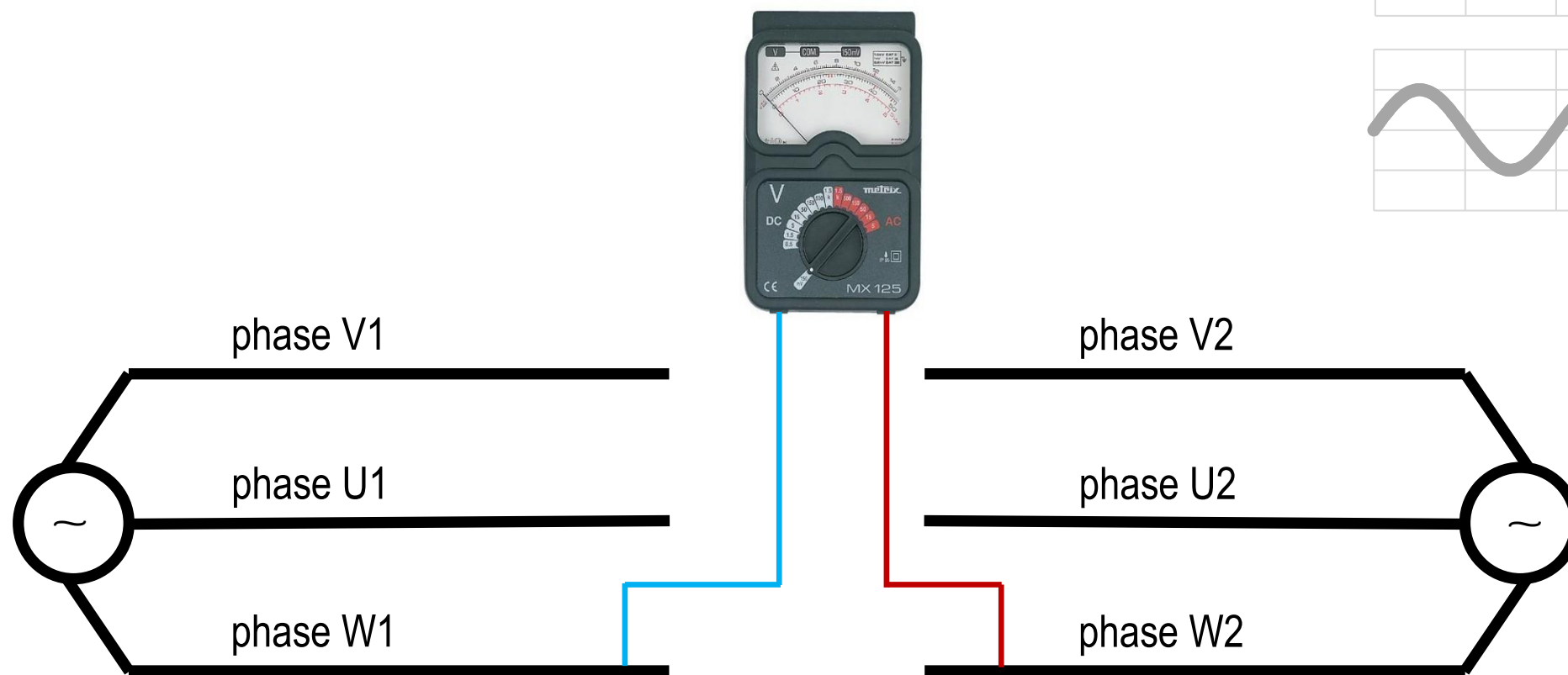
Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – conditions techniques

La réunion des trois conditions assure $\Delta U = U_1 - U_2 = 0$



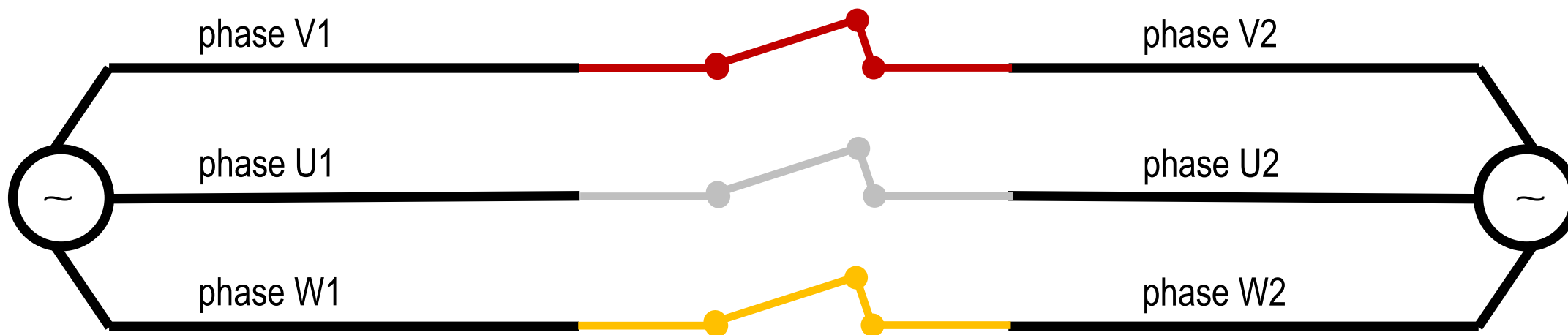
Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – conditions techniques

La réunion des trois conditions assure $\Delta W = W_1 - W_2 = 0$



Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – conditions techniques

Quand les conditions d'interconnexion sont réunies on connecte les phases correspondantes des deux réseaux électriques



Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – conditions techniques

Les conditions techniques d'interconnexion précédemment étudiées permettent de répondre aux questions sur les possibilités existantes pour interconnecter les différents réseaux électriques :

I - réseaux électriques DC

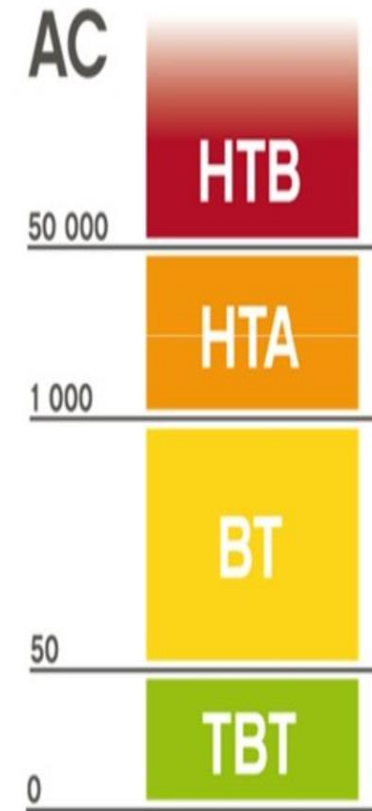
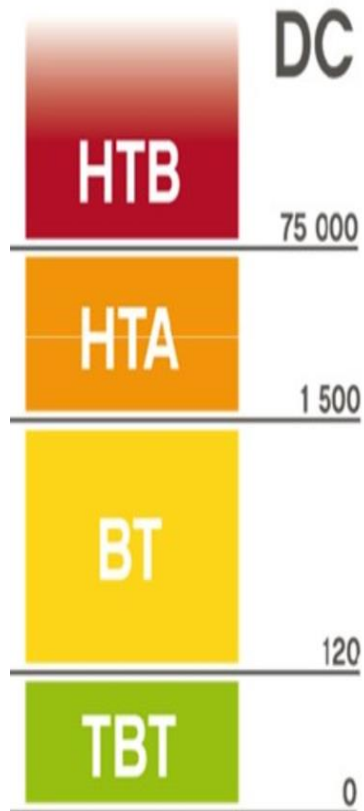
II - réseaux électriques AC

II.1- réseaux HTA (ex. Moyenne Tension 20 kV entre phases)

II.2- réseaux BTA (ex. Basse Tension 400 V entre phases)
+ Triphasé (tension composée 400 V)
+ Monophasé (tension simple 230 V)

Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – conditions techniques

Cas d'interconnexion d'un réseau DC et d'un réseau AC



Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – conditions techniques

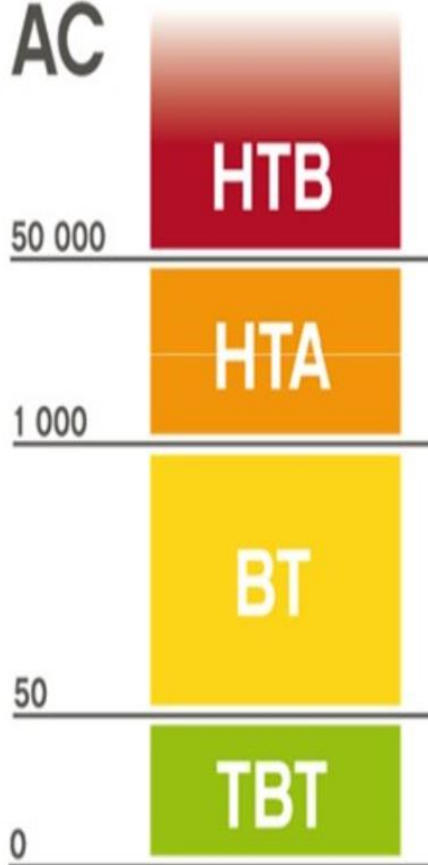
Cas d'interconnexion d'un réseau AC et d'un réseau AC

phase V
phase U
phase W

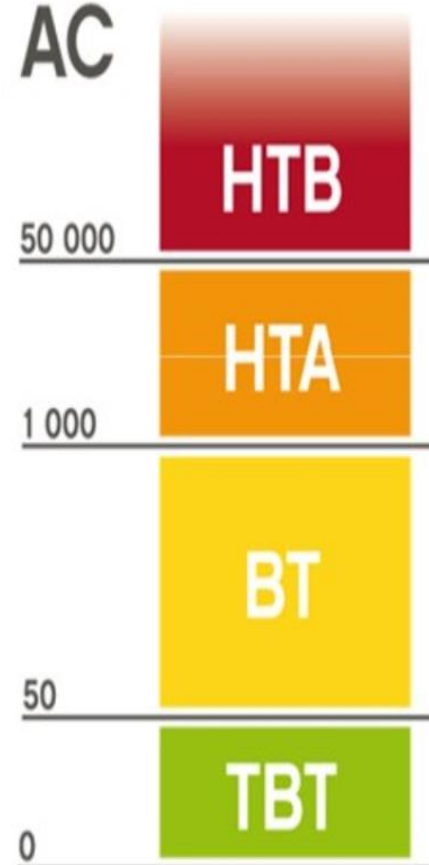


phase V
phase U
phase W

AC

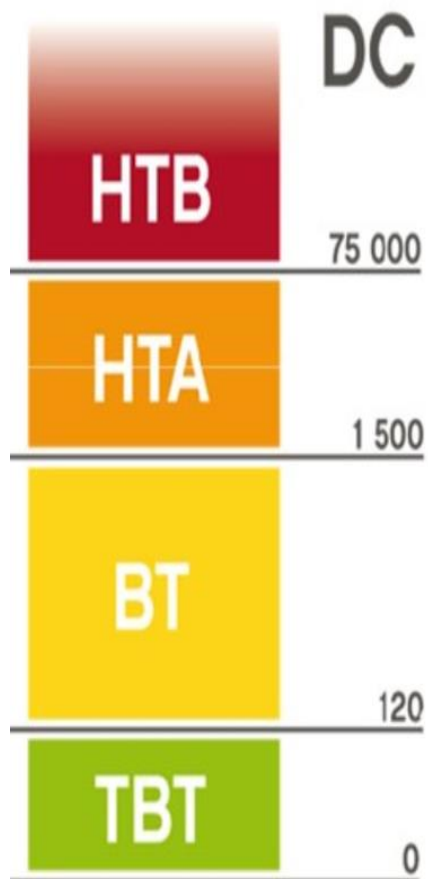


AC



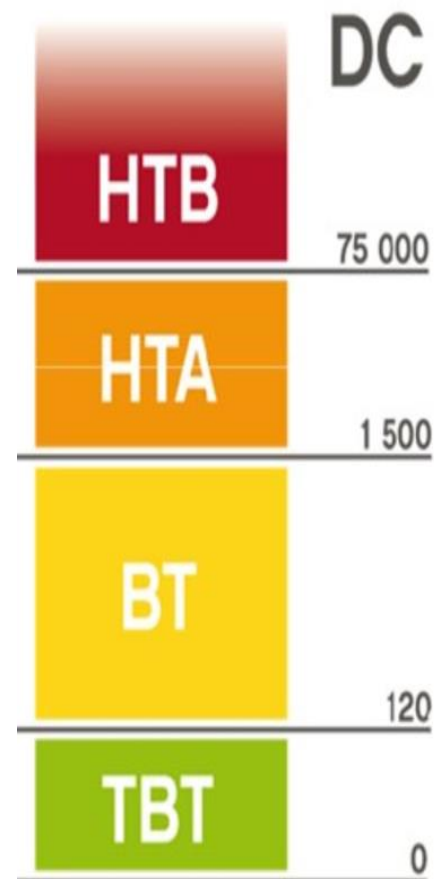
Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – conditions techniques

Cas d'interconnexion d'un réseau DC et d'un réseau DC



Sans dispositif
si $V1 = V2$

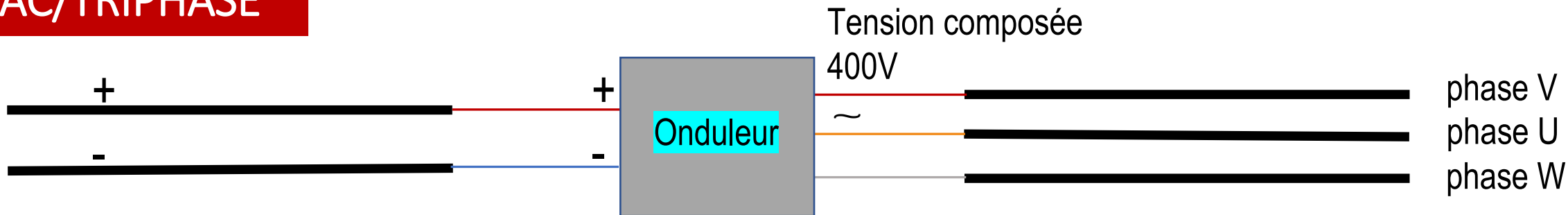
Si $V1 \neq V2$
dispositif
complexe



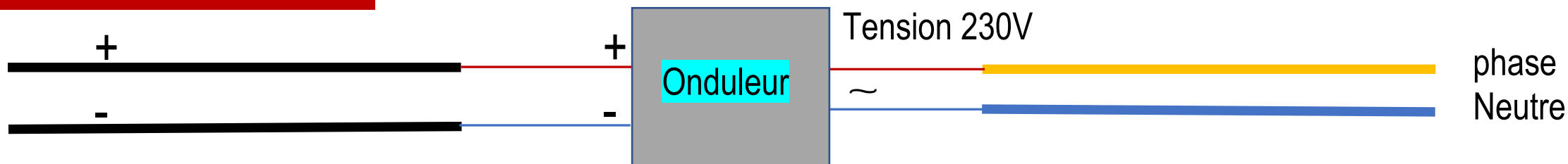
Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – conditions techniques

L'intégration du solaire PV au bâtiment n'est concernée que par l'interconnexion du réseau DC au réseau AC BTA

CAS DC-AC/TRIPHASE



CAS DC-AC/MONOPHASE



Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – conditions techniques

L'onduleur doit jouer les fonctions suivantes :

FONCTION 1 :

Transformation de la
Tension DC en la Tension
AC

Onduleur

```
graph TD; Onduleur --> F1[FONCTION 1 : Transformation de la Tension DC en la Tension AC]; Onduleur --> F2[FONCTION 2 : Adaptation de la fréquence de la tension transformée à la fréquence du réseau]; Onduleur --> F3[FONCTION 3 : Synchronisation de la tension transformée sur la tension du réseau];
```

FONCTION 2 :

Adaptation de la fréquence de
la tension transformée à la
fréquence du réseau

FONCTION 3 :

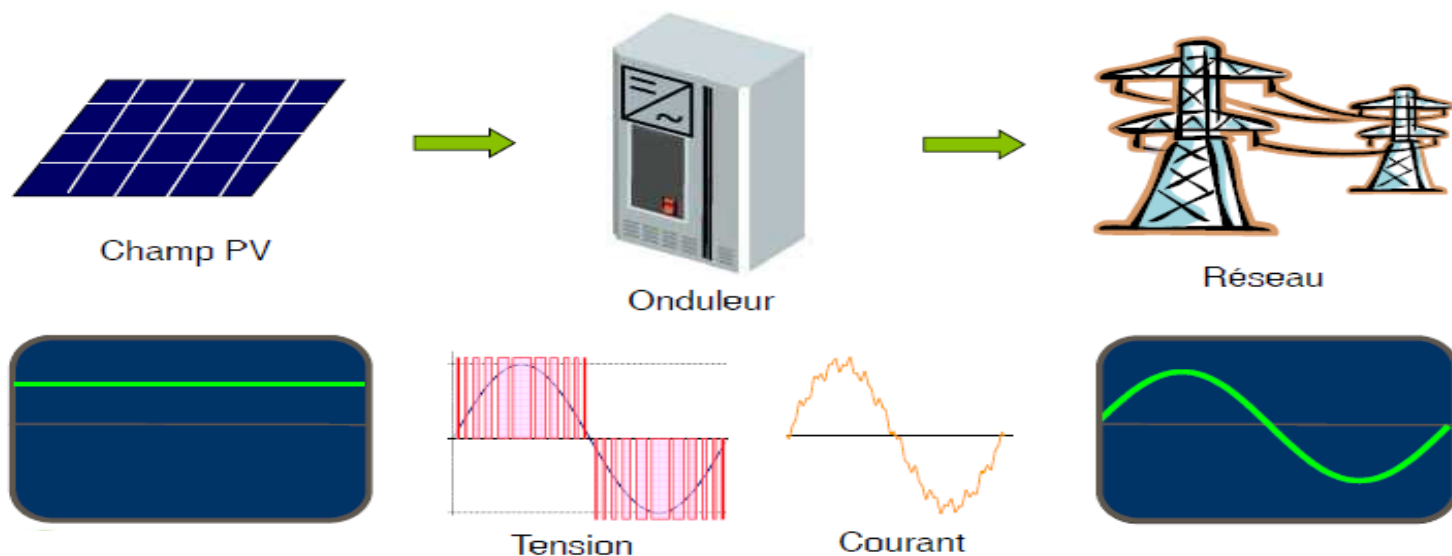
Synchronisation de la
tension transformée sur
la tension du réseau

Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – conditions techniques

Un générateur solaire PV est un champ composé des modules photovoltaïques qui alimentent un réseau électrique DC à la tension définie par le type d'assemblage des modules

Principe de fonctionnement des onduleurs:

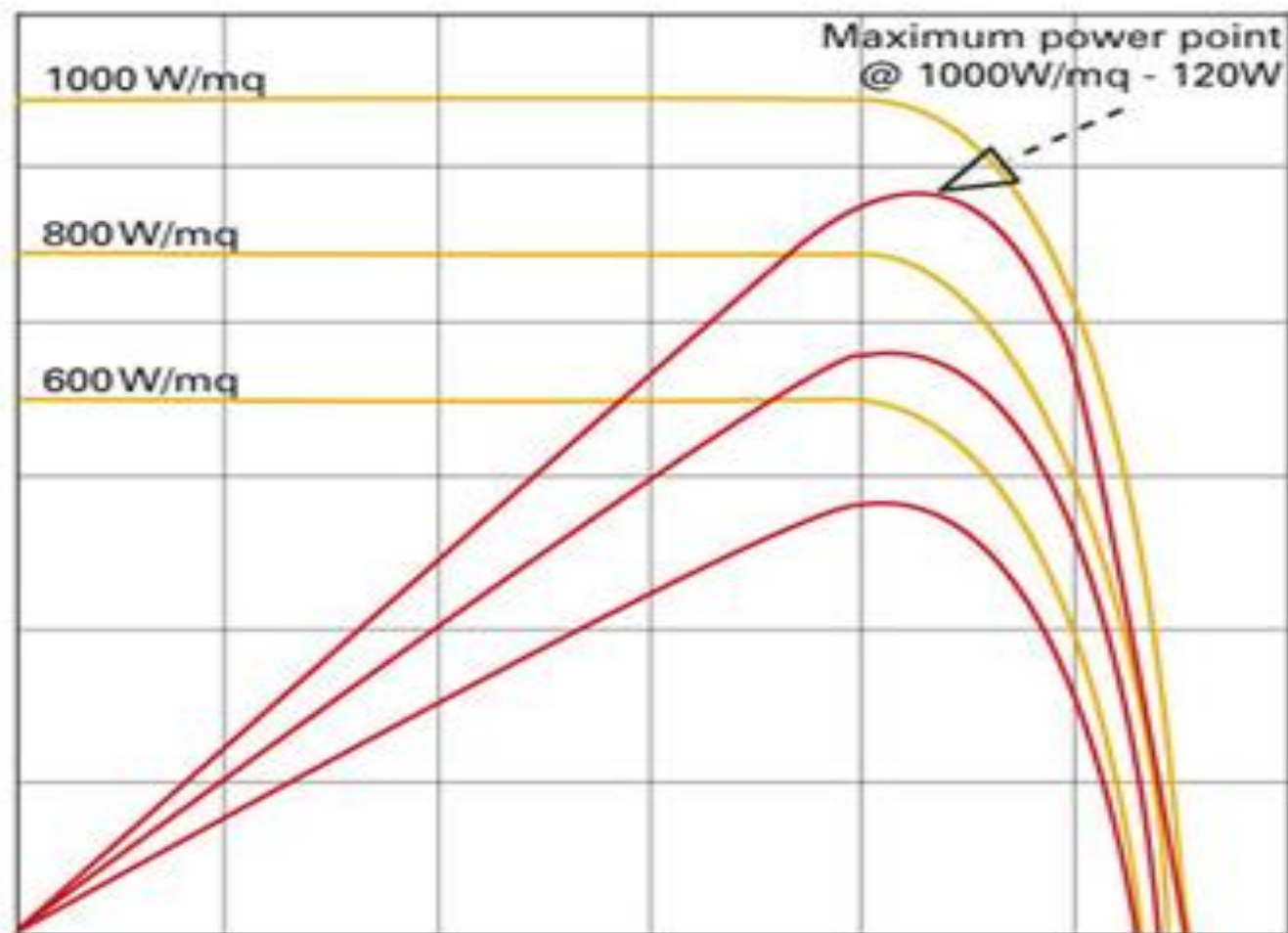
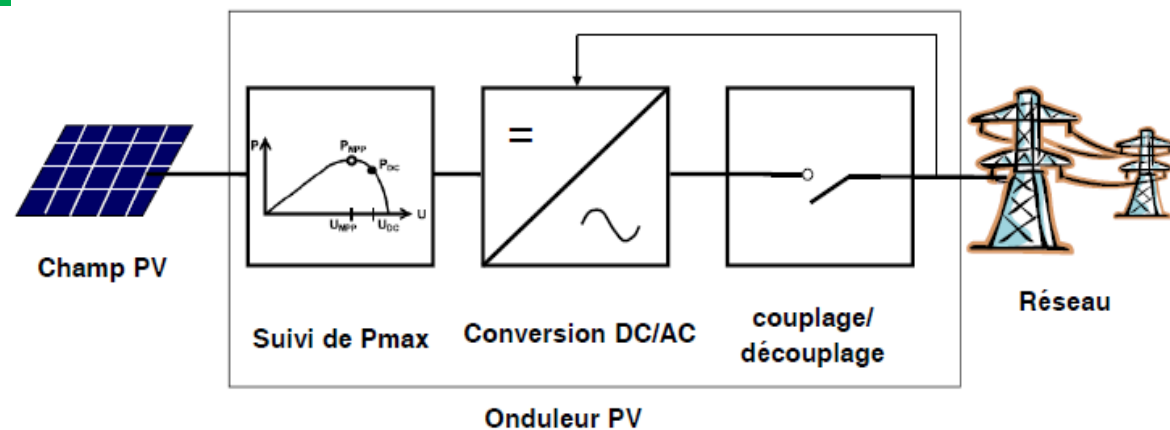
Ils convertissent le courant continu du champ PV en un courant alternatif compatible avec le réseau électrique. Le courant produit est injecté sur le réseau au fil de soleil



Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – conditions techniques

Pour le cas du solaire, l'onduleur a une autre fonction primordiale complémentaire aux fonctions générales présentées pour le cas de l'interconnexion DC/AC

Les onduleurs destinés aux systèmes solaires PV sont dotés des algorithmes pour fonctionner en mode MPPT (Maximum Power Point tracker). Cela signifie que l'onduleur est capable de suivre le point de puissance maximal d'un générateur électrique non linéaire comme le module PV.



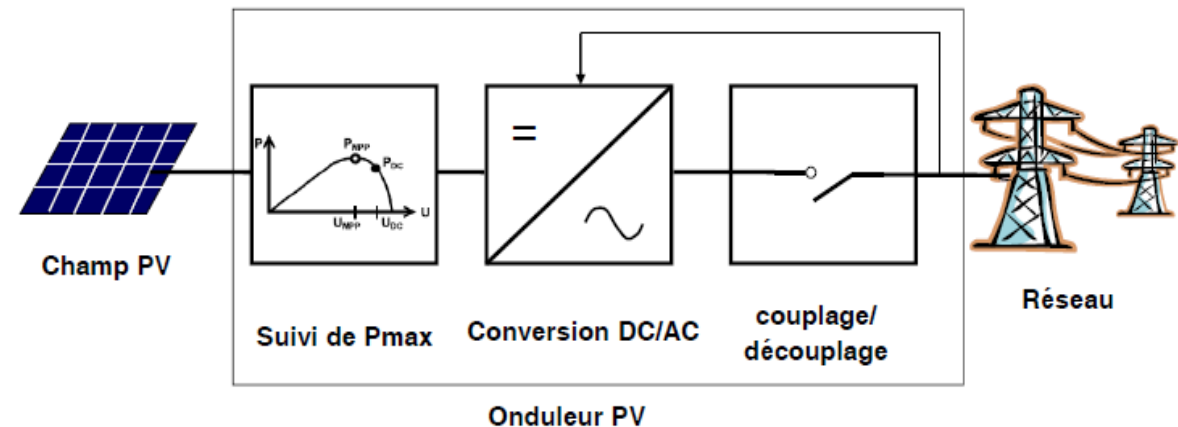
Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – conditions techniques

Quand le point MPPT est atteint, l'onduleur se stabilise et fournit le courant produit au réseau électrique.

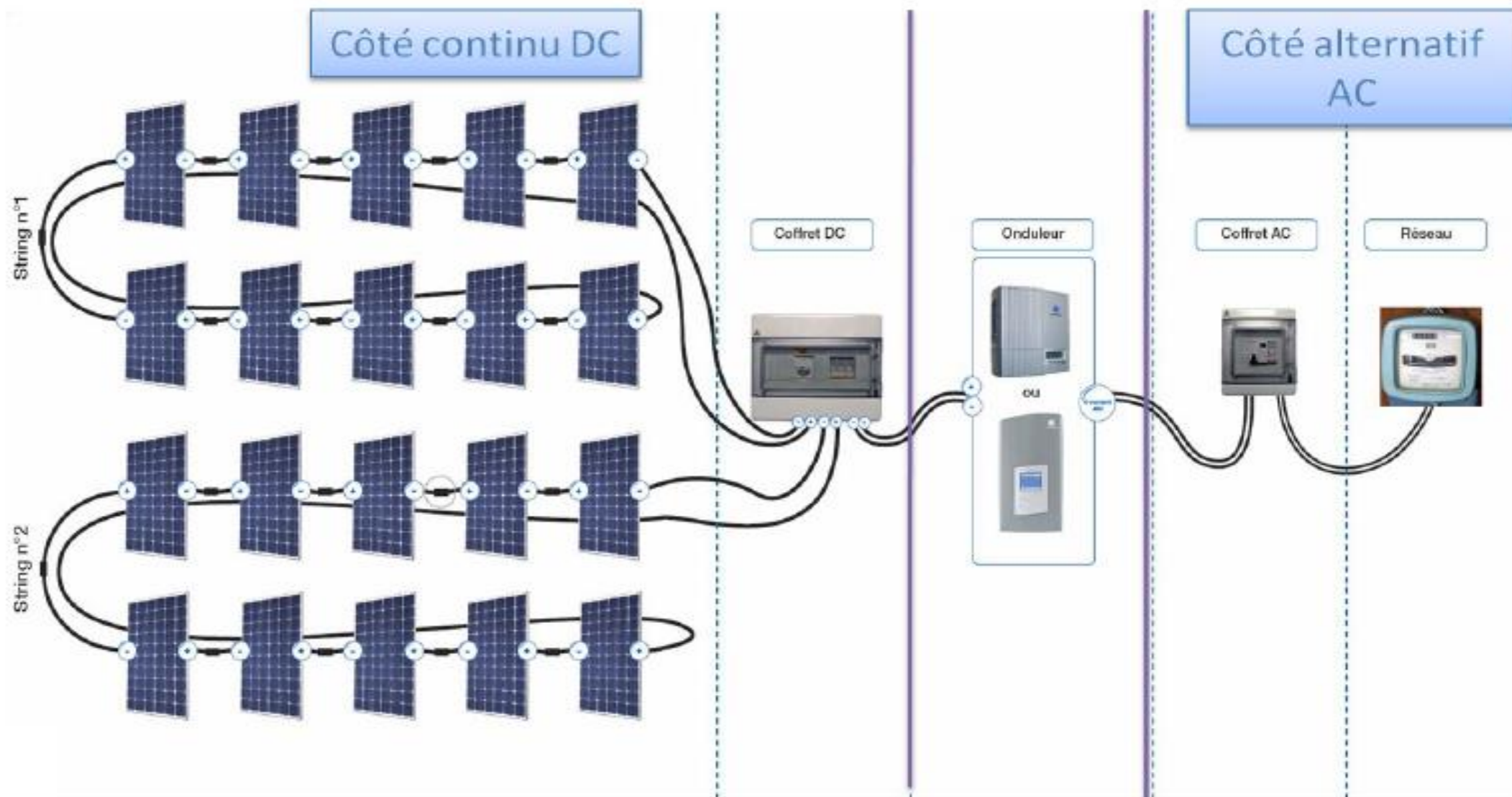
La stabilité de l'onduleur continue sauf en cas de perturbation engendrant un déplacement du point MPPT

Trois causes sont à l'origine des perturbations de MPPT :

- Variation de l'ensoleillement
- Variation de la charge
- Variation de la température

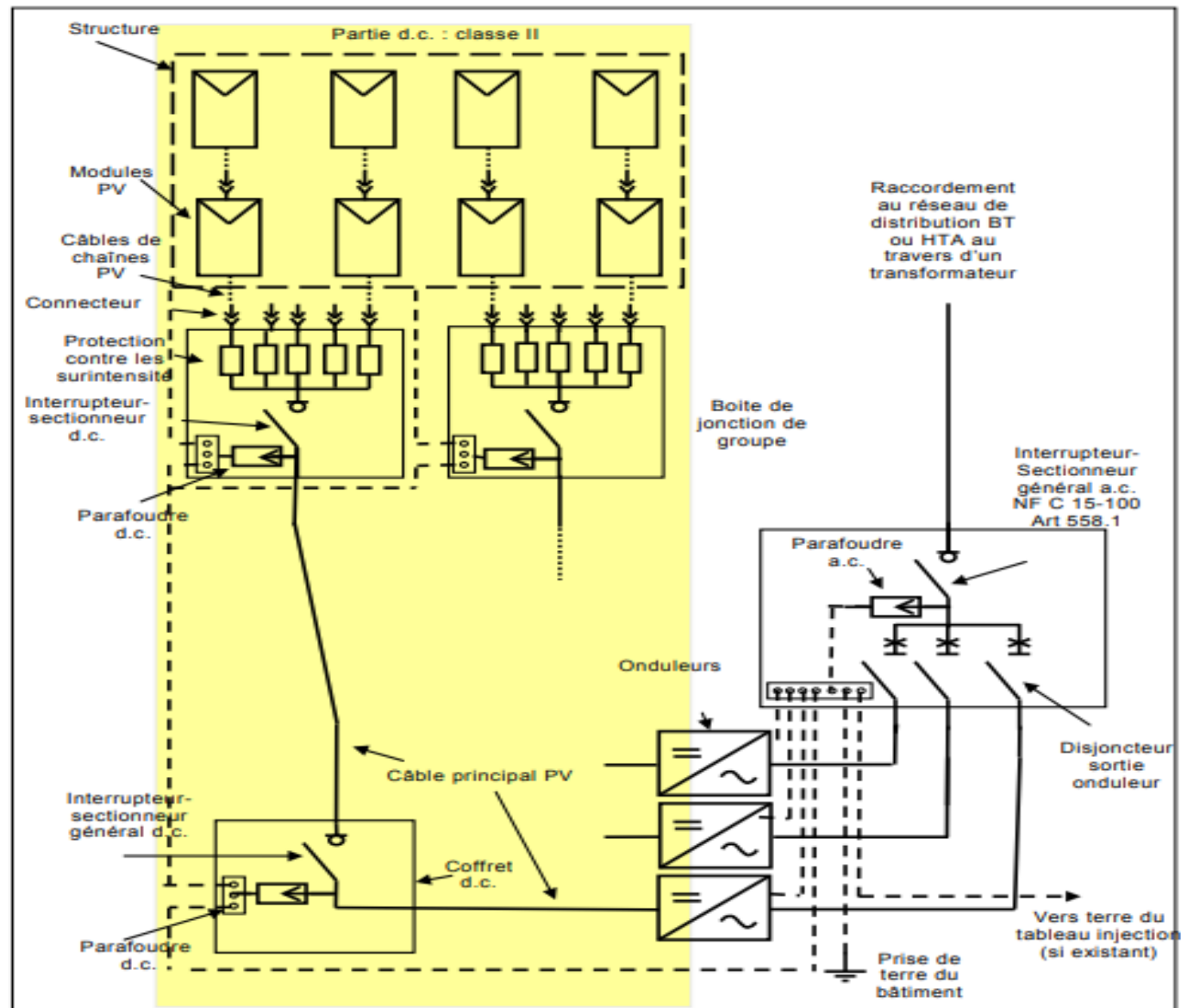


Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – conditions techniques



Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – conditions techniques

Schéma installation PV connectée au réseau



Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – conditions techniques

Il existe deux types d'onduleurs pour les applications solaires raccordées au réseau électrique :

- Les onduleurs assistés par le réseau électrique : Ils utilisent le passage du signal du réseau à la valeur 0 pour produire un signal alternatif. Ces onduleurs sont basés sur la technologie de thyristors et produisent beaucoup d'harmoniques à filtrer.
- Les onduleurs autonomes sont des onduleurs commandés par des signaux de référence internes. Ils sont basés sur les nouvelles technologies d'électronique de puissance. Ils sont fiables et performants. Aujourd'hui, ils sont largement utilisés dans le marché notamment pour les installations de petite puissance.

Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – conditions techniques

Etapas de réalisation de raccordement d'une installation PV au réseau électrique

- Assemblage des modules et préparation du coffret DC
- Préparation du coffret AC
- Connection de l'onduleur aux coffrets DC et AC
- Mise en marche la partie DC
- Mise en marche la partie AC
- Mise en service de l'installation
- Suivi des paramètres de fonctionnement

Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – conditions techniques

L'onduleur à installer pour raccorder les installations PV au réseau doit être mis en service dans les conditions qui lui sont prescrites par son fabricant

Ces conditions de fonctionnement se répartissent en :

Côté courant continu

1. La compatibilité en puissance : chaque onduleur a un maximum de puissance à accepter, il faut vérifier la compatibilité de la puissance fournie par le générateur et celle de l'onduleur.
2. La compatibilité en tension : chaque onduleur est conçu pour fonctionner sous une marge de tensions DC admissibles. La tension générée par le générateur PV doit être compatible avec celles préconisées par le fabricant de l'onduleur
3. La compatibilité en courant : les fabricants des onduleurs fixent le courant maximum admissible par l'onduleur. Les marges de courants que peut fournir le générateur PV doivent être compatibles avec le courant maximum supporté par l'onduleur

Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – conditions techniques

Côté courant alternatif

1. La compatibilité en fréquence : l'onduleur doit fournir un courant électrique dont la fréquence est compatible avec celle du réseau d'injection.
2. Compatibilité en harmoniques : Les onduleurs sont des sources d'injection des harmoniques. Celles-ci doivent être compatibles avec celles admises par le réseau électrique
3. Compatibilité en nombre de phases : les onduleurs doivent être en compatibilité avec le type du réseau électrique sur lequel il est raccordé (monophasé et triphasé)

Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – conditions techniques

Entrée (DC)	
Puissance DC max	5 250 W
Tension DC max	750 V
Plage de tension photovoltaïque, MPPT	175 V – 500 V
Courant d'entrée max, Entrée A / Entrée B	15 A / 15 A
Nombre de MPP trackers	2

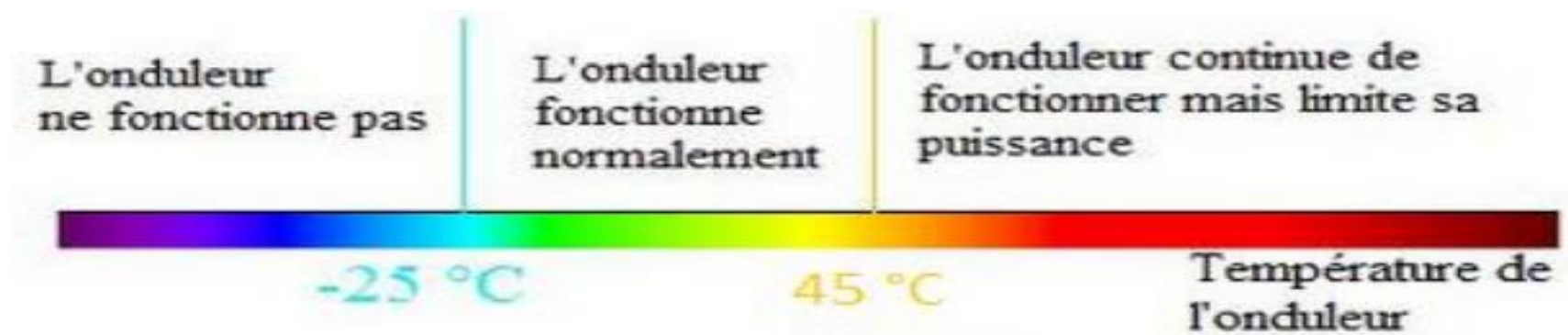
Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – conditions techniques

Pour les puissances moins de 5 kWc le marché des onduleurs peut servir des modèles monophasés.

Par ailleurs, pour des puissances supérieures à 5 kWc les onduleurs disponibles sont triphasés.

Des fois, on peut utiliser plusieurs onduleurs pour injecter des puissances plus que 5 kWc

Effet de la température sur l'onduleur



Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – conditions techniques



Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – conditions techniques

SYNTHÈSE

- 1. Conditions d'interconnexion des réseaux électriques (tension, fréquence , synchronisation)**
- 2. Types de connexion possibles (DC/DC, AC/AC et DC/AC)**
- 3. Application de la connexion DC/AC aux cas des installations solaires**
- 4. Fonctions des onduleurs destinés au raccordement des installations solaires**
- 5. Les critères de choix des onduleurs (Puissance, tension, courant, fréquence, mono ou triphasé et harmoniques)**
- 6. Etapes de réalisation d'une interconnexion du solaire PV au réseau électrique**

Impact de l'interconnexion du solaire PV sur la stabilité du réseau électrique

Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – Stabilité du réseau électrique

Stabilité des réseaux électriques – Influence de l'injection décentralisée

Un réseau électrique est stable dans les conditions suivantes :

1. Les tensions simples et composées ne changent pas ;
2. La fréquence est fixe à 50Hz

En réalité, le réseau électrique est soumis à des appels de consommation électrique variables et non maîtrisés. Il faut se poser la question sur la stabilité du réseau dans ces conditions réelles.

Pour comprendre ce qui se passe quand la consommation électrique change, il y a lieu d'analyser le fondement scientifique ci-après.

Pour cela, il est à rappeler que la tension et la fréquence d'un réseau électrique dépendent de la vitesse de rotation des machines des centrales électriques qui alimentent le réseau

Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – Stabilité du réseau électrique

L'équation de mouvement d'un groupe tournant est :

$$I \cdot d\omega/dt = C_m - C_r$$

Avec

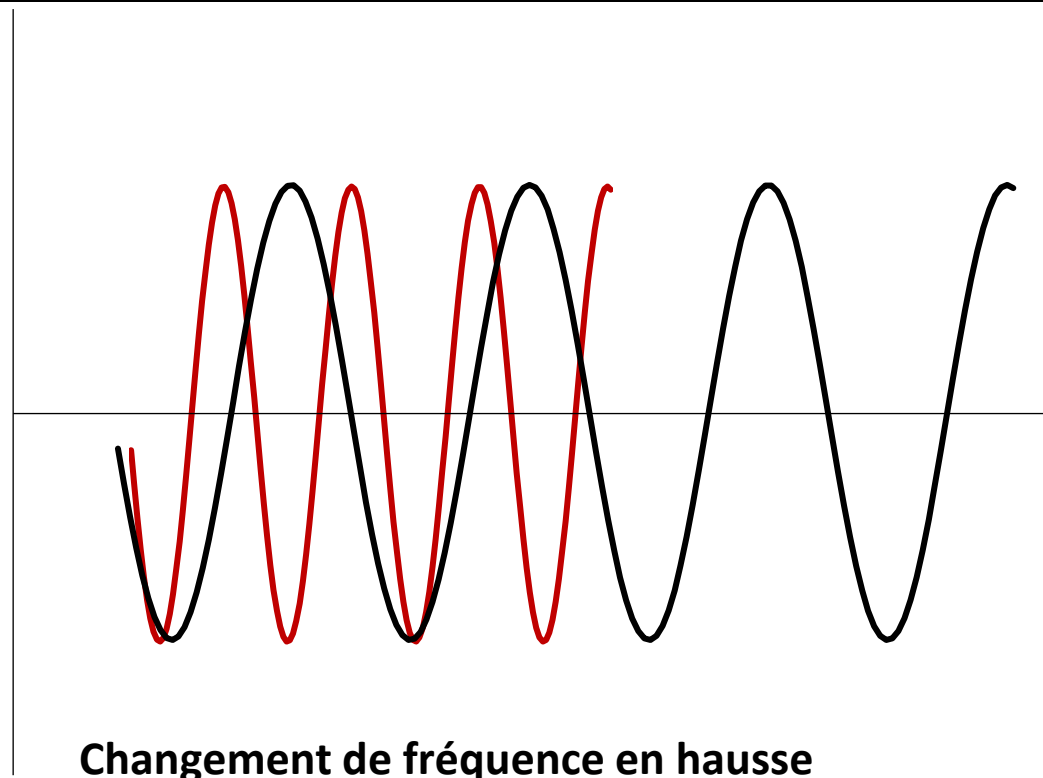
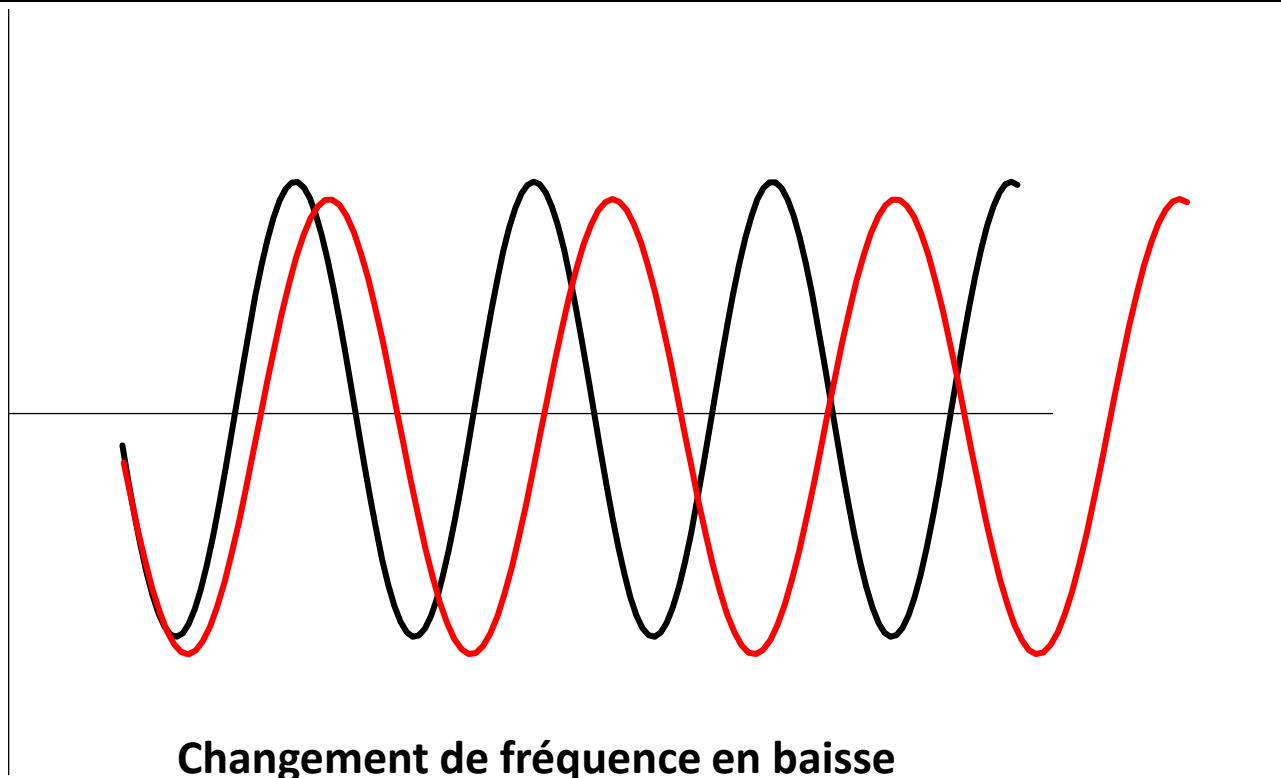
I :	inertie des masses tournantes,
ω :	vitesse de rotation,
C_m :	couple moteur,
C_r :	couple résistant.

FOURNIR UNE TENSION ET UNE FREQUENCE FIXES SE TRADUIT PAR : Le mouvement rotatif des centrales de production électrique est régulier. Or, ce phénomène ne peut avoir lieu que si **la production électrique de la machine est égale à la charge appliquée**

Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – Stabilité du réseau électrique

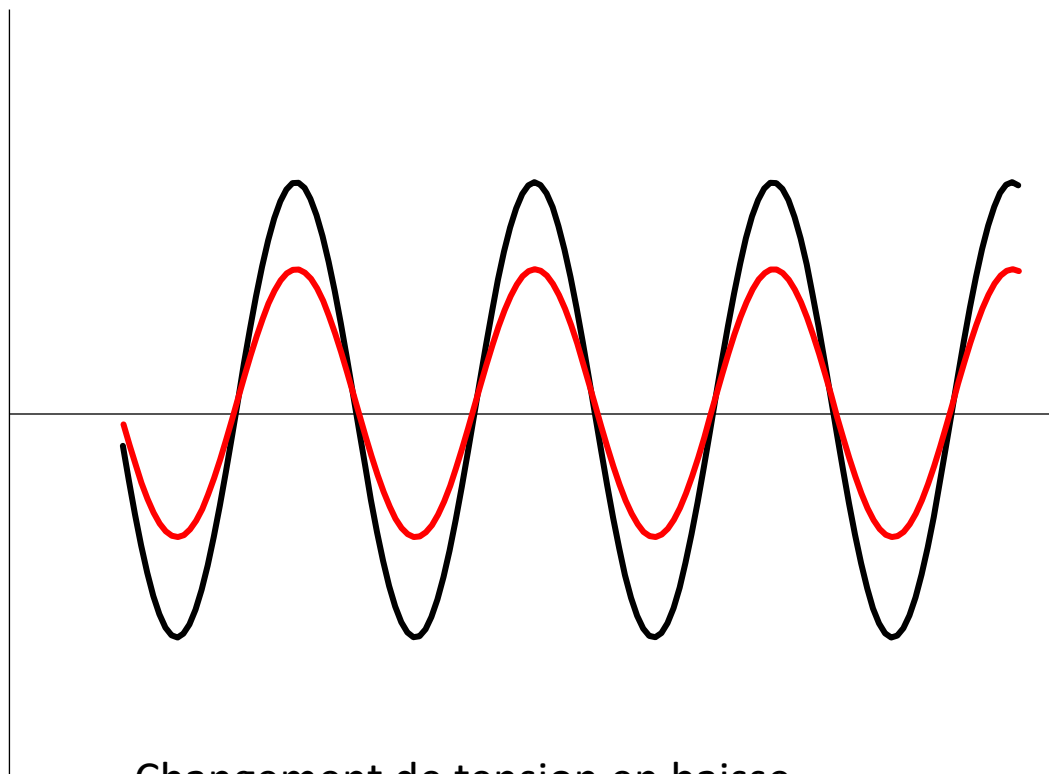
Dans le cas contraire « production $\neq$ consommation » un déséquilibre apparaît et se traduit par : la fréquence et la tension ne sont plus conformes aux normes

Analyse de la fréquence en cas de déséquilibré du réseau électrique

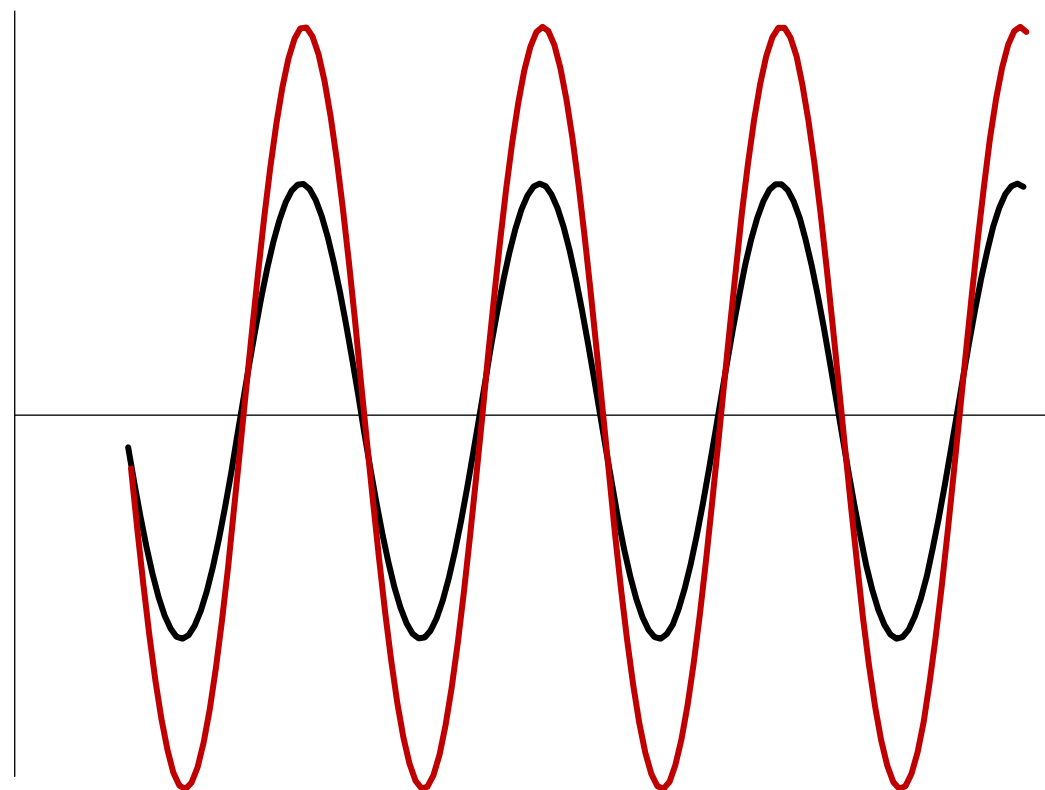


Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – Stabilité du réseau électrique

Analyse de la tension en cas de déstabilisé du réseau électrique



Changement de tension en baisse



Changement de tension en hausse

Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – Stabilité du réseau électrique

Pour avoir une qualité d'énergie au niveau du consommateur, les générateurs électriques doivent satisfaire la condition suivante :

- La tension fournie doit être constante en intensité et en fréquence, quelles que soient les conditions de charge et les vibrations momentanées que celle-ci peut subir,

Celle-ci est considérée respectée pour les réseaux BT si :

- La tension nominale est 230/400V avec une marge de moins de 10%,
- La fréquence nominale est de 50 Hz avec une marge de moins de 2%,

Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – Stabilité du réseau électrique

Quelles influences aura lieu si on connecte des systèmes décentralisés comme le solaire PV au réseau électrique?

La connexion d'un système décentralisé au réseau électrique BT se traduit par la réduction du couple résistant au niveau des génératrices des centrales électriques :

Alors vu que l'équation de mouvement des génératrices est $J \cdot d\omega/dt = C_m - C_r$

Si C_r diminue le C_m doit obligatoirement diminuer.

Aujourd'hui, le réseau électrique national est alimenté par des centrales publiques et des centrales privées contractuelles.

Le gestionnaire du réseau électrique doit respecter les engagements de ses conventions avec les sociétés privées. Et il n'a pas toujours la possibilité de réduire le couple moteur au niveau des génératrices privées.

En plus, les centrales solaires sont prioritaires

Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – Stabilité du réseau électrique

Contraintes d'interconnexion

- Pour le cas du solaire, l'approvisionnement est conditionnel
- Le gestionnaire du réseau doit avoir le besoin de recevoir la production décentralisée et la capacité de la récompenser au moment de son absence
- Les réseaux électriques doivent être en mesure d'une part, d'accueillir la production décentralisée quand elle est active et d'autre part, d'acheminer la puissance de substitution quand la production décentralisée est inactive.
- La production décentralisée a donc inévitablement des impacts directs sur la topologie/conception, le dimensionnement, la gestion prévisionnelle, l'exploitation en temps réel...
- Les centrales solaires produisent du courant continu, et ne peuvent être raccordées au réseau que par l'intermédiaire d'interfaces d'électronique de puissance. Ceci entraîne l'injection non pas seulement de l'énergie utile mais également des harmoniques nuisibles à la qualité de la tension délivrée.

Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – Stabilité du réseau électrique

Influence de l'injection à travers des dispositifs d'électronique de puissance :

Les harmoniques sont une déformation de l'onde de tension ou de courant. Les centrales ont des interfaces d'électronique de puissance qui sont les dispositifs responsables de la création d'harmoniques.

L'amplitude de ces harmoniques dépend de la technologie du convertisseur de puissance.

Les onduleurs introduisent des harmoniques dans le réseau. Les anciens à base de thyristors produisent des niveaux de courants harmoniques plus élevés par rapport aux nouveaux onduleurs.

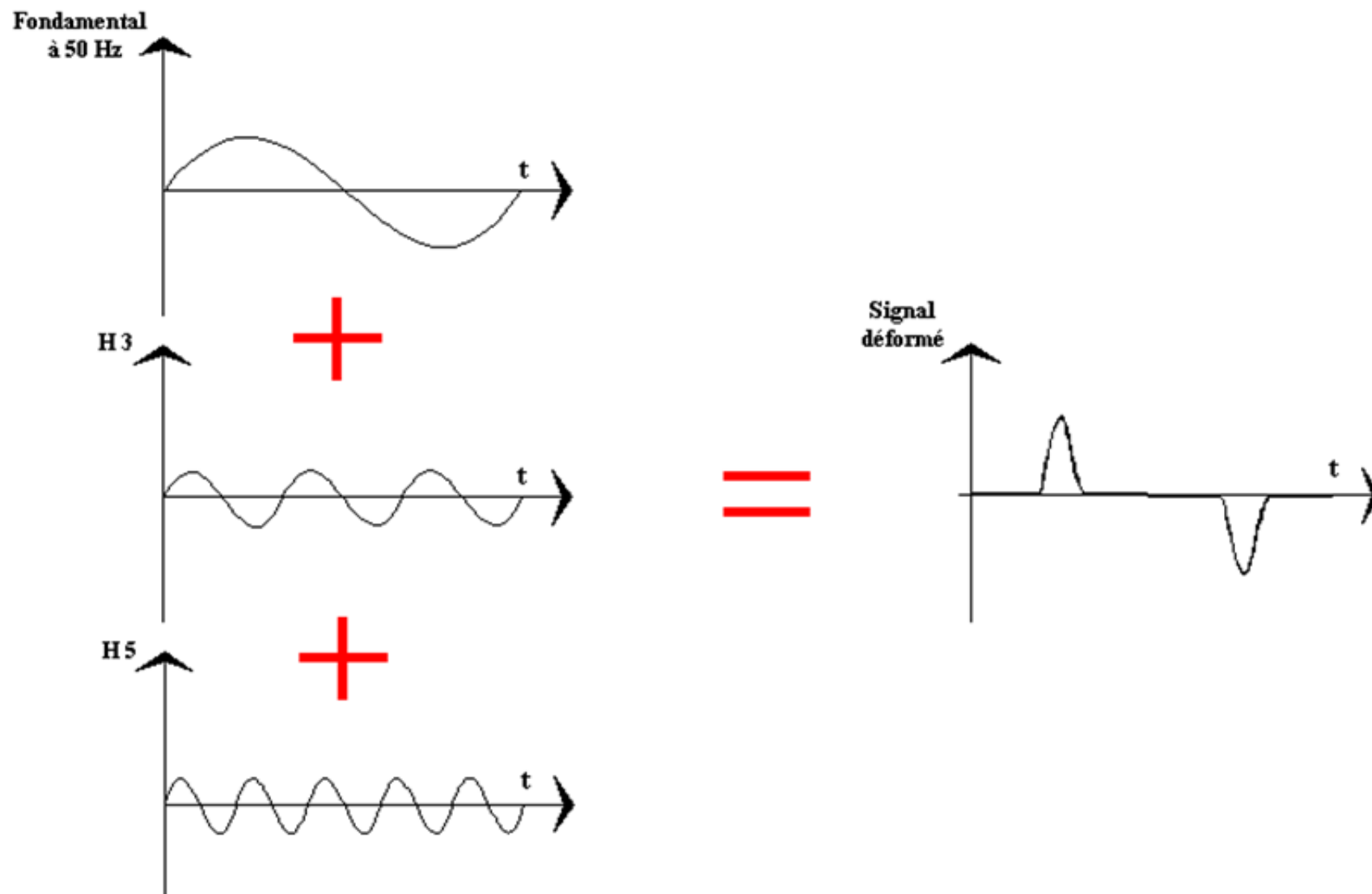
Ces derniers onduleurs sont capables de générer une sortie avec des niveaux d'harmoniques en conformité avec les normes de qualité dont les exigences sont fixées par l'arrêté du 23 avril 2008 telles qu'elles sont présentées par le tableau suivant :

Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – Stabilité du réseau électrique

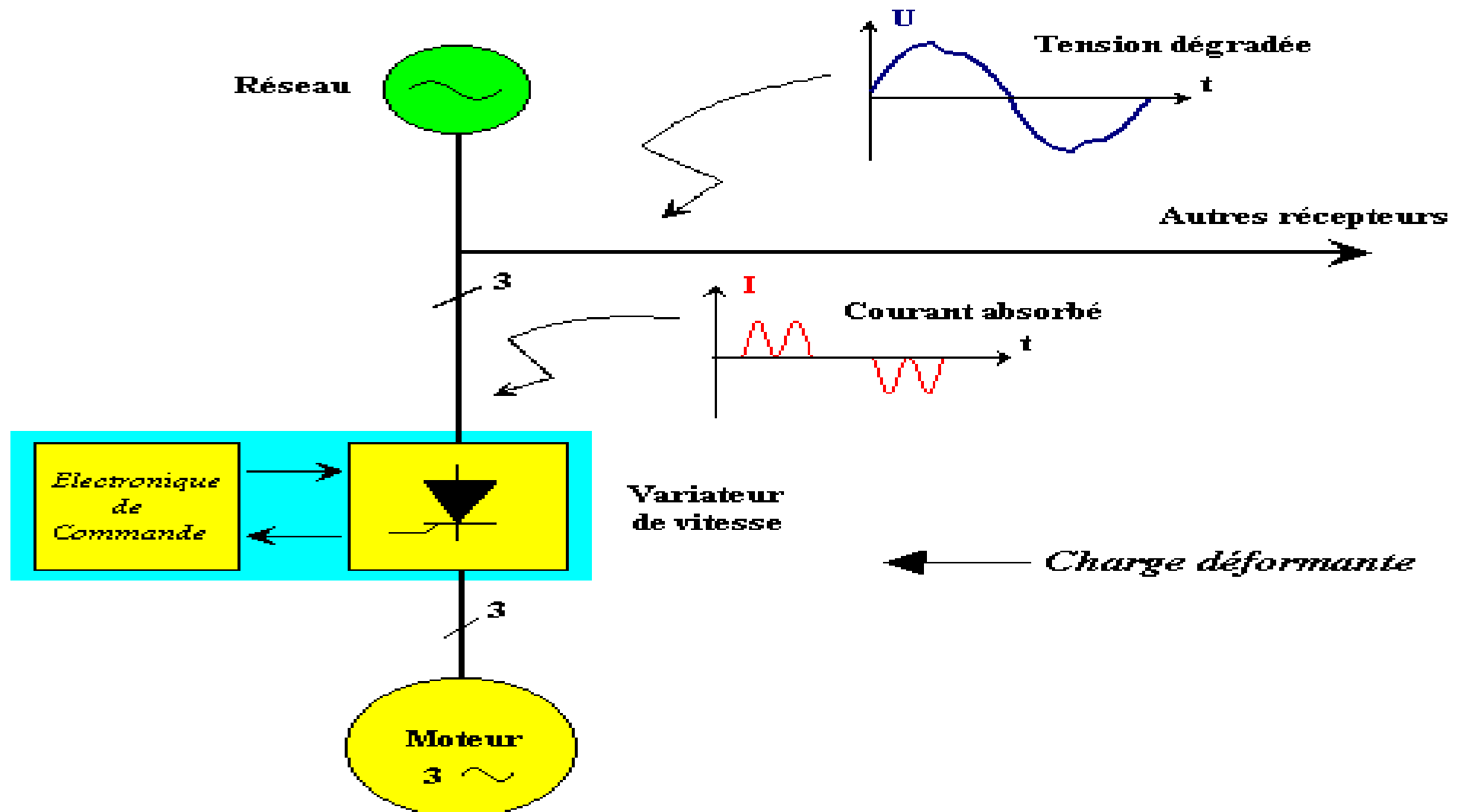
Harmonique	2 ^{ème}	3 ^{ème}	4 ^{ème}	5 ^{ème} et 7 ^{ème}	9 ^{ème}	11 ^{ème} et 13 ^{ème}	>14 ^{ème} pairs	>13 ^{ème} impairs
Distorsion permise	2%	4%	1%	5%	2%	3%	0,5%	2%

Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – Stabilité du réseau électrique

Les harmoniques



Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – Stabilité du réseau électrique



Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – Stabilité du réseau électrique

SYNTHÈSE DU COURS SUR LA STABILITÉ DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES ET INFLUENCE DE L'INJECTION ÉLECTRIQUE

- 1- A quel niveau du réseau électrique se réalise une production décentralisée**
- 2- Les conditions de stabilité des réseaux (U et f sont aux valeurs nominales)**
- 3- Injection sur le réseau BTA et son influence sur le changement de U et de f .**
- 4- Contraintes d'interconnexion pour le gestionnaire du réseau**
- 5- les problèmes de l'injection des harmoniques nuisibles sur le réseau**

Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – Conditions réglementaires

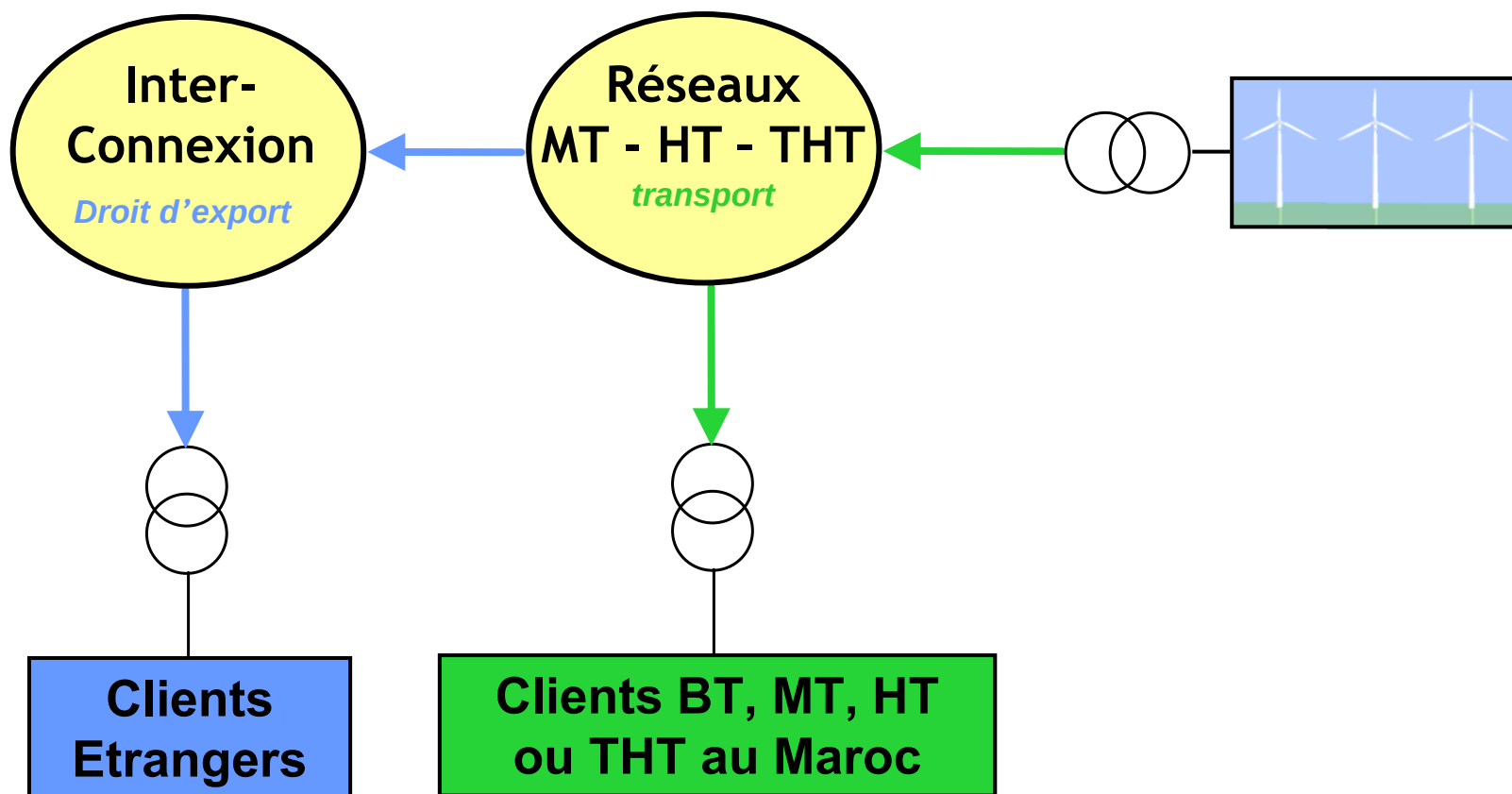
CADRES DE DEVELOPPEMENT DES ER AU MAROC

- ❖ La loi 13-09 est entrée en vigueur en mars 2010 puis modifiée en 2016 pour inclure la basse tension.
- ❖ Objectifs :
 - Promotion de la production d'énergie électrique à partir de sources renouvelables
 - Commercialisation et exportation de l'énergie électrique à base des EnR
 - Droit d'accès réglementé au réseau public pour produire de l'électricité à partir de sources d'énergies renouvelables pour le compte d'un consommateur raccordés au réseau MT, HT et THT

NB: le décret relatif à la BT est en cours

Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – Conditions réglementaires

CADRES DE DEVELOPPEMENT DES ER AU MAROC



Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – Conditions réglementaires

CADRES DE DEVELOPPEMENT DES ER AU MAROC

- La production d'énergie électrique à partir de sources renouvelables est ouverte aux personnes morales ou physiques de droit public ou privé.
- Sont soumises à autorisation, la réalisation, l'exploitation, l'extension de la capacité ou la modification des installations dont la puissance installée ≥ 2 MW.
- Sont soumises à déclaration préalable la réalisation, l'exploitation, l'extension de la capacité ou la modification des installations de production électrique à partir de sources renouvelables lorsque : $20 \text{ kW} < \text{puissance} < 2 \text{ MW}$

Interconnexion de systèmes solaires au réseau électrique – Conditions réglementaires

CADRES DE DEVELOPPEMENT DES ER AU MAROC

- Aujourd'hui, les centrales pour injection ne peuvent être raccordées qu'aux réseaux HT.
- Les projets EnR > 2 MW doivent être réalisés dans les zones définies dans un arrêté dédié à cette fin.
- L'accès au réseau HTA et HTB est contrôlé et géré par le gestionnaire public du réseau électrique.
- Les installations EnR < 20kW sont librement construites. Elles sont aujourd'hui utilisées pour l'autoproduction et l'autoconsommation.

Réseaux électriques et leur interconnexion avec les systèmes solaires photovoltaïques

SYNTHÈSE GLOBALE

1- Notions fondamentales électriques

2- Production, transport et distribution électrique

3- Conditions techniques à remplir pour l'Interconnexion du solaire PV avec le réseau

4- Stabilité du réseau électrique et contraintes d'interconnexion du solaire PV

4- Conditions réglementaires de l'interconnexion du solaire PV

5- Impact de l'injection des harmoniques sur le réseau