

L' INVERTER OU VARIATEUR DE FREQUENCE POUR MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE A ROTOR EN COURT-CIRCUIT

DÉFINITION:

L 'inverter ou variateur de fréquence est un convertisseur de tension AC à fréquence fixe (monophasé ou triphasé) vers une tension AC à fréquence variable (triphase).

Le nom INVERTER provient de l'anglais et signifie "inverseur", son origine vient du fait que l'on passe d'un courant alternatif à un courant continu pour, à posteriori, générer un nouveau courant alternatif conforme à nos besoins.

Utilité:

L'inverter ou variateur de fréquence permet de faire varier la vitesse de rotation d'un moteur asynchrone triphasé (la vitesse dépend du nombre de pôles du moteur et de la fréquence secteur qui alimente celui ci) en faisant varier la fréquence de la tension d'alimentation de celui ci on fait varier la vitesse de rotation du moteur.

PROBLEME : **Comment entraîner à vitesse variable le moteur d'un compresseur pour permettre d'avoir une variation débit de fluide frigorigène ?**

I. INTRODUCTION

A) UN PEU DE TECHNOLOGIE

Le stator est la partie fixe (contrairement au rotor) d'un moteur asynchrone triphasé.

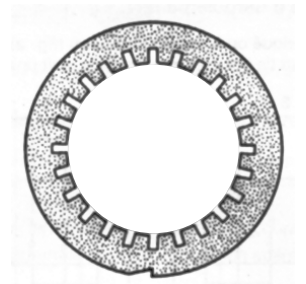
Il est constitué : - **de la carcasse** (*généralement en acier ou en aluminium moulé*)

- **du circuit magnétique** (*constitué d'un empilage de tôles en acier doux au silicium*)

- **des enroulements bobinés** (*générateurs du champ tournant*)

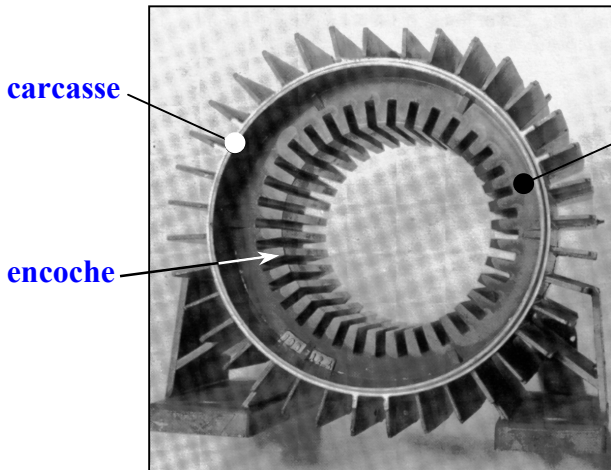
L'empilage de tôles est maintenu dans la carcasse (*voir photo n°1*). Le tube ainsi créé présente des encoches où sont placés les conducteurs des enroulements (*voir photo n°2*).

Les enroulements qui peuvent être couplés, soit en triangle, soit en étoile, présentent une ou plusieurs paires de pôles suivant la manière dont sont bobiné les enroulements.



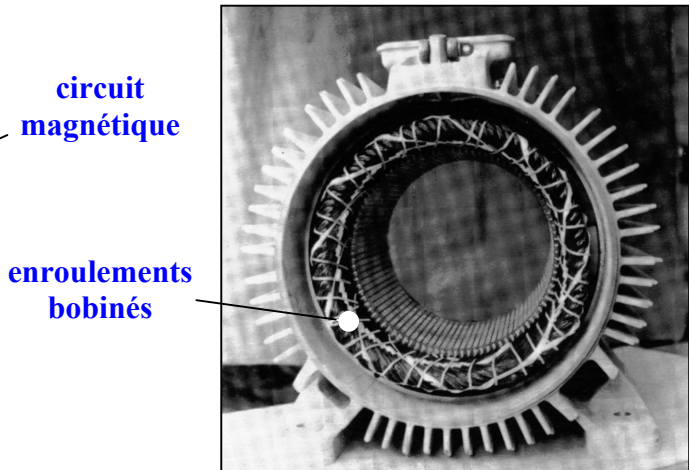
Tôle de stator d'un moteur asynchrone

Photo n°1



Stator en alliage d'aluminium et circuit magnétique

Photo n°2



Stator avec les enroulements bobinés

B) FREQUENCE DE ROTATION DU CHAMP TOURNANT

Les bobinages du stator présentent donc plus ou moins de pôles, ce nombre est fixé à la fabrication du moteur. En fonction du **NOMBRE DE PAIRE DE POLES** la fréquence de rotation du champ tournant sera plus ou moins élevée, Cette fréquence de rotation peut être calculée grâce à la relation suivante :

$$n_{\text{statorique}} = \frac{f}{p}$$

n_s = fréquence de rotation du champ tournant en tr / s

f = fréquence du réseau d'alimentation en Hz

p = nombre de paires de pôles

C) COMMENT AGIR SUR LA VITESSE DE ROTATION DU CHAMP TOURNANT

Pour agir sur la fréquence de rotation du champ tournant (donc celle du rotor) d'un moteur asynchrone triphasé, on peut agir sur les deux paramètres **f** et **p** de la formule précédente.

C-1 Action sur le nombre de paire de pôles : P

On s'aperçoit d'après la formule du chapitre B que la fréquence de rotation d'un moteur asynchrone triphasé est directement lié au nombre de paire de pôles **p** du bobinage.

- Si le nombre de paire de pôles **AUGMENTE**, la fréquence de rotation d'un moteur **DIMINUE**
- Si le nombre de paire de pôles **DIMINUE**, la fréquence de rotation d'un moteur **AUGMENTE**

Remplir le tableau ci-dessous avec les principale fréquence de rotation du champ tournant d'un moteur asynchrone triphasé pour un réseau de 50 Hz (tableau à remplir en tr / min).

Nombre de paire de pôles	1	2	3	4
fréquence de rotation du champ tournant pour un réseau 50 Hz	3000 tr / min	1500 tr / min	1000 tr / min	750 tr / min

CONCLUSION : Une action sur le nombre de paire de pôles d'un moteur asynchrone triphasé permet d'obtenir des fréquences de rotation différentes mais fixes et la plage de vitesse n'est pas variée. (moteurs à couplage de pôles type DAHLANDER et moteurs à enroulements indépendants) + (exemple d'un monte charge).

C-2 Action sur la fréquence d'alimentation du moteur : f

Toujours d'après la formule du chapitre B, on s'aperçoit que la fréquence de rotation d'un moteur asynchrone triphasé est directement liée à la fréquence **f** du réseau l'alimentant.

- Si la fréquence **AUGMENTE** , la fréquence de rotation d'un moteur **AUGMENTE**
- Si la fréquence **DIMINUE** , la fréquence de rotation d'un moteur **DIMINUE**

CONCLUSION : Une variation progressive et régulière de la fréquence de l'alimentation d'un moteur asynchrone triphasé permet une variation de sa fréquence de rotation en toute souplesse et sans à coups (variateur de fréquence).

PROBLEME : La fréquence du réseau EDF est fixe et égale à 50 Hz.

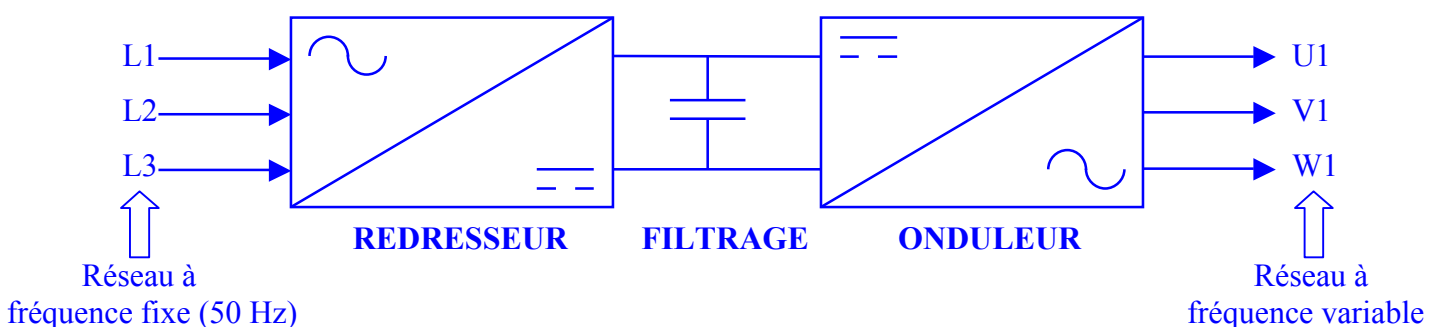
II. LA VARIATION DE LA FREQUENCE

A) COMMENT FAIRE VARIER LA FREQUENCE DE L'ALIMENTATION D'UN MOTEUR

La solution passe par l'utilisation de variateur de fréquence, plus communément appelé variateur de vitesse. L'utilisation d'un tel convertisseur permet d'obtenir une plage de variation de vitesse allant de **0 (f = 0 Hz) à la vitesse nominale du moteur (f = 50 Hz)**. On peut même faire fonctionner le moteur en survitesse si la fréquence dépasse les 50 Hz.

Nous allons découvrir dans la suite du cours comment sont obtenues ces fréquences variables.

A-1 Schéma de principe d'un variateur



A-2 Structure d'un variateur de fréquence industriel

Les variateurs de fréquence industriels comportent principalement comme on vient de le voir sur le schéma précédent :

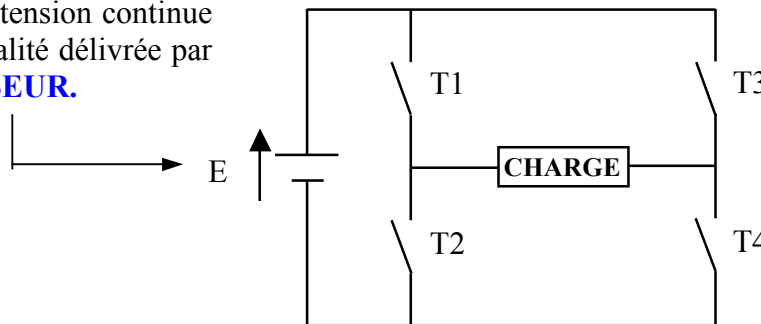
- Un **REDRESSEUR** (monophasé ou triphasé) permettant d'élaborer **UNE SOURCE DE TENSION CONTINUE**.
- Un circuit de **FILTRAGE** (permettant l'obtention d'un signal pratiquement continu).
- Un **ONDULEUR TRIPHASE** autonome qui recrée à partir de la tension continue fixe un réseau de tension alternative triphasé de **FREQUENCE ET DE TENSION VARIABLE**.

III. ETUDE DU FONCTIONNEMENT D'UN ONDULEUR

A) PRINCIPE

Avant de découvrir la structure réelle d'un variateur industriel, nous allons tout d'abord étudier le principe de fonctionnement de l'onduleur représenté sur le schéma ci-dessous.

La source de tension continue est dans la réalité délivrée par le **REDRESSEUR**.

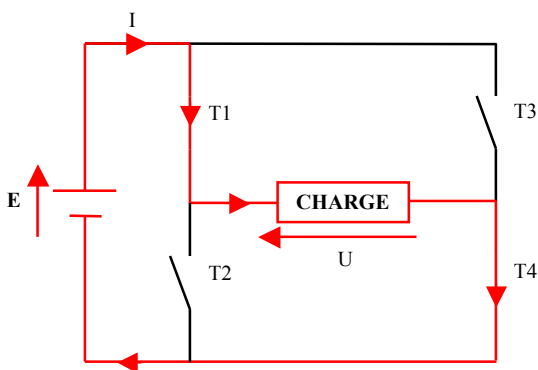


Les interrupteurs T1, T2, T3 et T4 sont dans la réalité des **composant d'électronique de puissance**.

Onduleur monophasé (montage en pont)

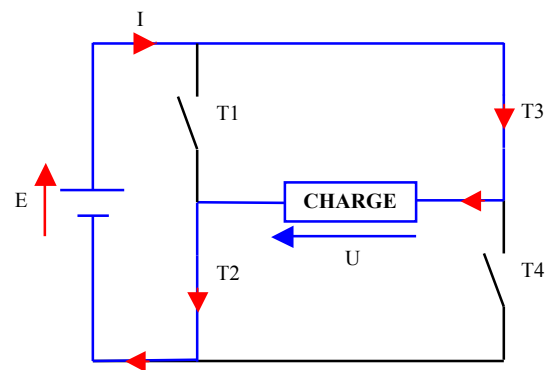
B) PRINCIPE DE L'ONDULEUR MONOPHASE EN PONT

➔ Dans un premier temps nous allons étudier la forme de la tension et du courant aux bornes de la charge si les interrupteurs sont commandés périodiquement par paire (**T1, T4 sur la première demi période et T2, T3 sur la seconde demi période**).



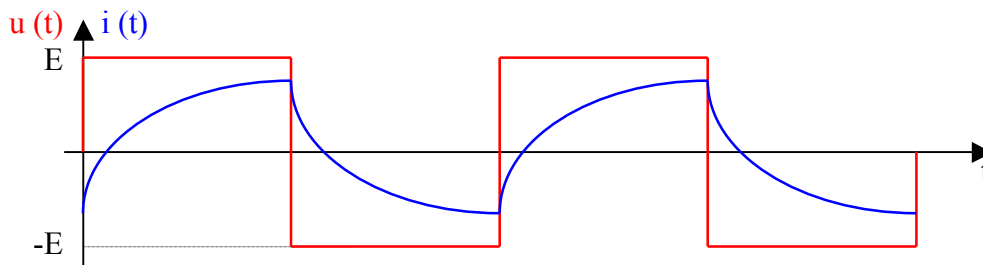
PREMIERE DEMI-PERIODE

- Les commutateurs **T1 et T4** sont **FERMES**
- Les commutateurs **T2 et T3** sont **OUVERTS**
- Dans cette phase du fonctionnement on a :
 $U = E$



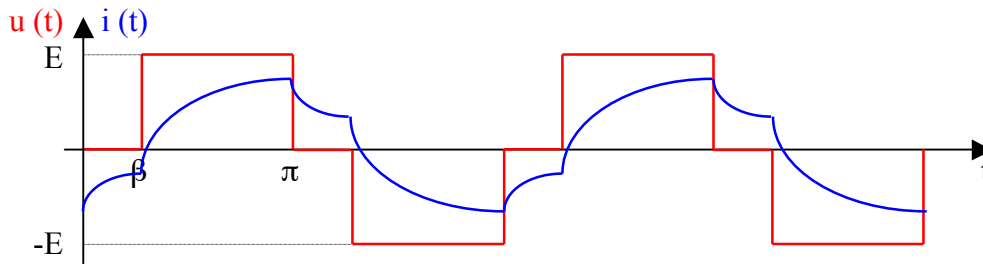
DEUXIEME DEMI-PERIODE

- Les commutateurs **T2 et T3** sont **FERMES**
- Les commutateurs **T1 et T4** sont **OUVERTS**
- Dans cette phase du fonctionnement on a :
 $U = - E$



Forme de la tension et du courant dans le 1^{er} cas

➔ Dans un second temps nous allons étudier la forme de la tension et du courant aux bornes de la charge si les interrupteurs sont commandés périodiquement par paire avec en plus **un temps "d'ouverture" des 4 interrupteurs à intervalle régulier.**



Forme de la tension et du courant dans le 2^{ème} cas

PROBLEME : Ce type de commande est assez utilisé en monophasé, mais le courant obtenu est loin d'être sinusoïdal ce qui génère des harmoniques qui "polluent" le réseau.

On peut faire fonctionner un onduleur triphasé sur le même principe mais la forme de la tension obtenue introduit des harmoniques importants qui perturbent le fonctionnement du récepteur, surtout dans le cas d'un moteur asynchrone.

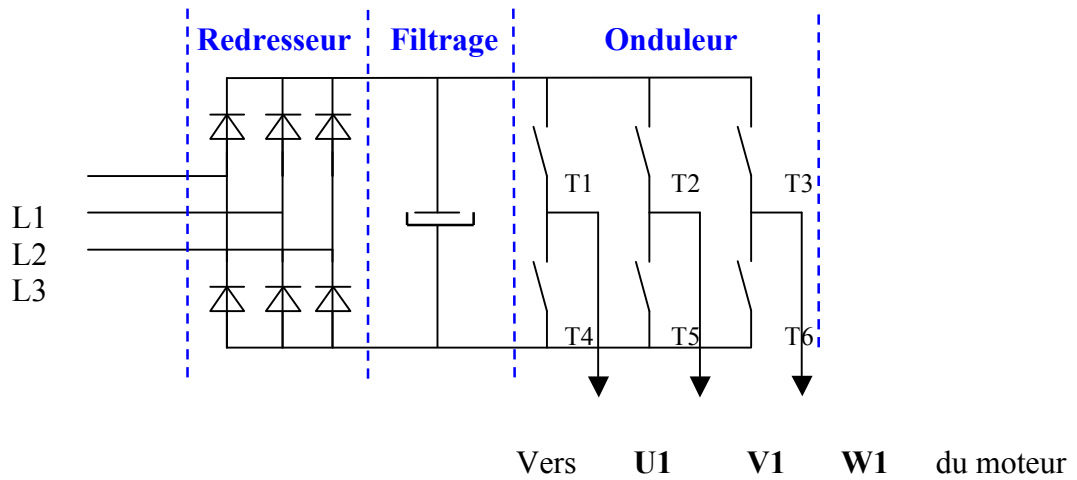
C) SOLUTION AU PROBLEME : FAIRE FONCTIONNER L'ONDULEUR EN M.L.I.

C-1 Solution au problème : faire fonctionner l'onduleur en M.L.I.

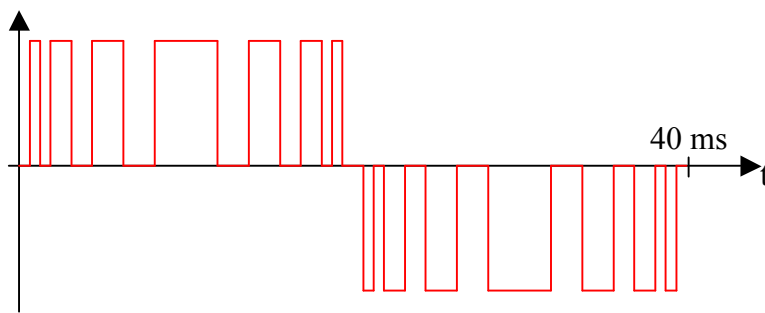
Le terme M.L.I. signifie : **Modulation de Largeur d'Impulsion.** Son principe est le suivant : **La tension continue d'entrée de l'onduleur est hachée de façon à créer une succession de créneaux d'amplitude égale à celle-ci, mais de largeur variable (voir la forme des courbes de tension ci-dessous).**

Il en résulte un courant qui à une forme très proche d'une sinusoïde. La rotation du moteur est donc régulière et sans à coup, y compris à très basse vitesse (voir la forme de la courbe de courant page suivante).

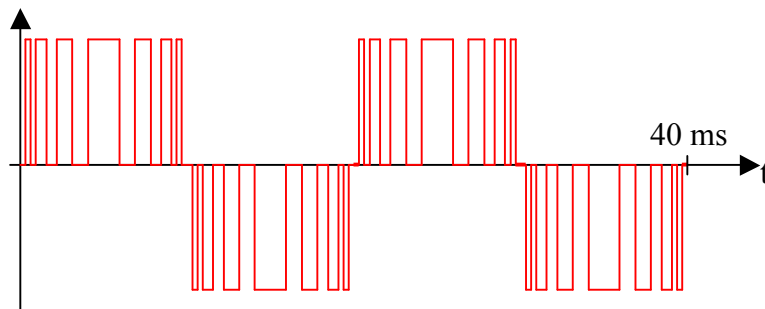
C-2 Schéma structurel d'un onduleur M.L.I. triphasé



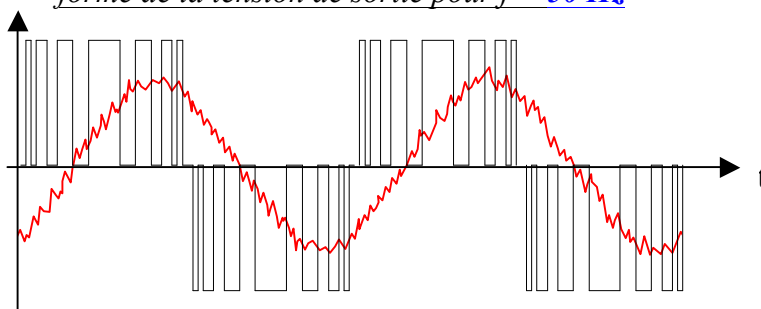
C-3 Courbes de tension et de courant



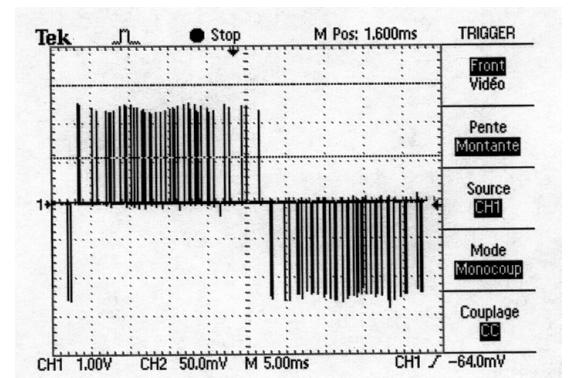
forme de la tension de sortie pour $f = 25 \text{ Hz}$



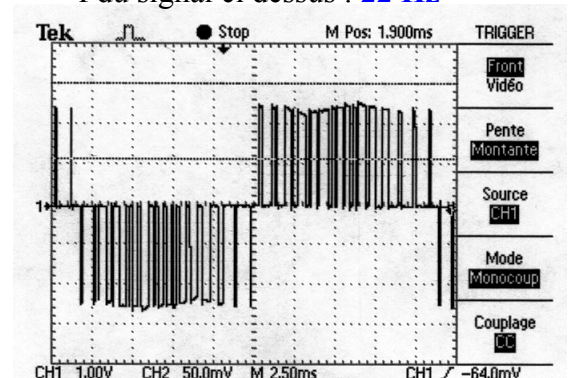
forme de la tension de sortie pour $f = 50 \text{ Hz}$



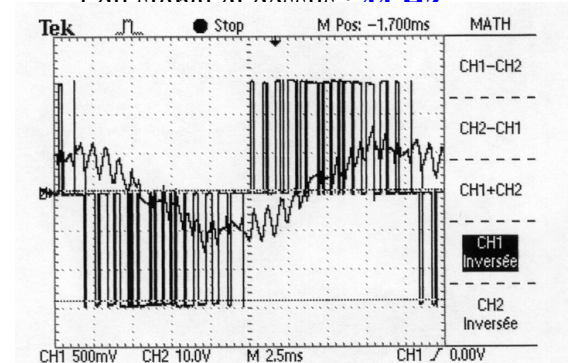
forme du courant de sortie pour $f = 50 \text{ Hz}$





f du signal ci dessus : 22 Hz



f du signal ci dessus : 44 Hz



Ce mode de fonctionnement est aussi désigné par les lettres **PWM (Pulse Wide Modulation)**

Dans la réalité 2 types de composants sont utilisés pour réaliser l'onduleur **LE THYRISTOR** () pour les puissances élevées et **LE TRANSISTOR** () pour les petites et moyennes puissances et pour les fréquences élevées.

IV. ALIMENTATION D'UN M. A. S. TRIPHASE A FREQUENCE VARIABLE

A) ETUDE DU COUPLE DANS LE CAS OU $U_{MOTEUR} = C^{te}$

La f.e.m. aux bornes d'un enroulement est de la forme :

$$U = E = 4.44 \times B_m \times N \times S \times f$$

Avec : **f** : fréquence d'alimentation du moteur (Hz)
B_m : induction dans le moteur (T)
U : tension aux bornes du moteur (V)

S : section du fer (m²)
N : nombre de conducteurs

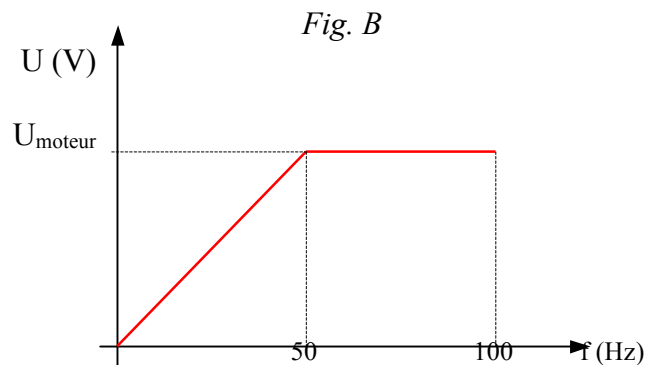
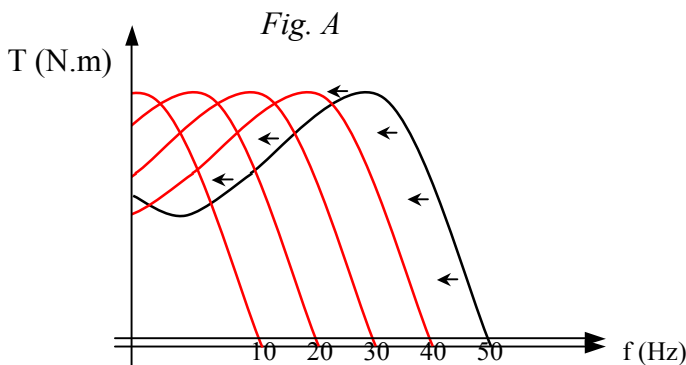
- Si **f** varie, **U** étant constant, **B_m** va varier pour garder l'égalité dans la relation.

- Si **f** diminue, **B_m** va augmenter et va saturer le circuit magnétique, provoquant un échauffement du moteur **et surtout une baisse du couple moteur.**

CONCLUSION : - Si l'on souhaite garder **B_m** constant, tout en faisant varier la fréquence, on doit faire : **varié U pour maintenir constant le rapport U / f**

B) ETUDE DU COUPLE A $U/f = C^{te}$

Dans ces conditions, les caractéristiques du couple moteur pour différentes fréquences d'alimentation **opèrent une translation sur la gauche (voir Fig. A).**



Couple moteur pour différentes fréquences d'alimentations avec $U / f = C^{te}$

Analyse de la Fig B

Le variateur délivre au moteur une tension et une fréquence proportionnelles jusqu'à la valeur de 50 Hertz

Pour des fréquences supérieures à 50 Hertz, la tension du moteur ne pouvant plus augmenter, (l'enroulement est alimenté sous sa tension nominale) le rapport U / f diminue, le flux décroît, entraînant une diminution du couple maximum.

V. A RETENIR

❶ Un variateur de vitesse est composé principalement :

- d'un redresseur + filtre (qui converti un signal alternatif en un signal continu)
 - un onduleur (qui converti signal continu en un signal alternatif de fréquence variable)
- ② La commande en M.L.I. est utilisée pour l'onduleur car elle permet d'obtenir un courant dont la forme est très proche d'une sinusoïde.
 - ③ Pour conserver un couple suffisant aux faibles vitesses (donc aux faibles fréquences, on doit maintenir le rapport U / f constant.

VI. EXERCICE

① Un moteur asynchrone triphasé 400 V 50 Hz de 3000 tr / min est alimenté à couple constant par un variateur à une fréquence de 33 Hz.

1) Calculer quelle sera la tension à ses bornes?

Le variateur fonctionne à couple constant, d'où le rapport $U / f = \text{constant}$.

$$U / f = 400 / 50 = 8 \text{ d'où } 33 \times 8 = 264 \text{ V} \Rightarrow \underline{U_{\text{moteur}} = 264 \text{ V}}$$

② Un moteur asynchrone triphasé 400 V 50 Hz de 3000 W dont la vitesse de synchronisme est de 3000 tr / min est alimenté à couple constant par un variateur de vitesse type ATV-66 U54 N4.

1) Calculer quelle sera la tension à ses bornes lorsque le rotor tourne à la vitesse de 1100 tr / min ?

$$n_s = f / p \Rightarrow p = f / n_s \Rightarrow p = 50 / 50 \Rightarrow \underline{p = 1 \text{ paire de pôles}}$$

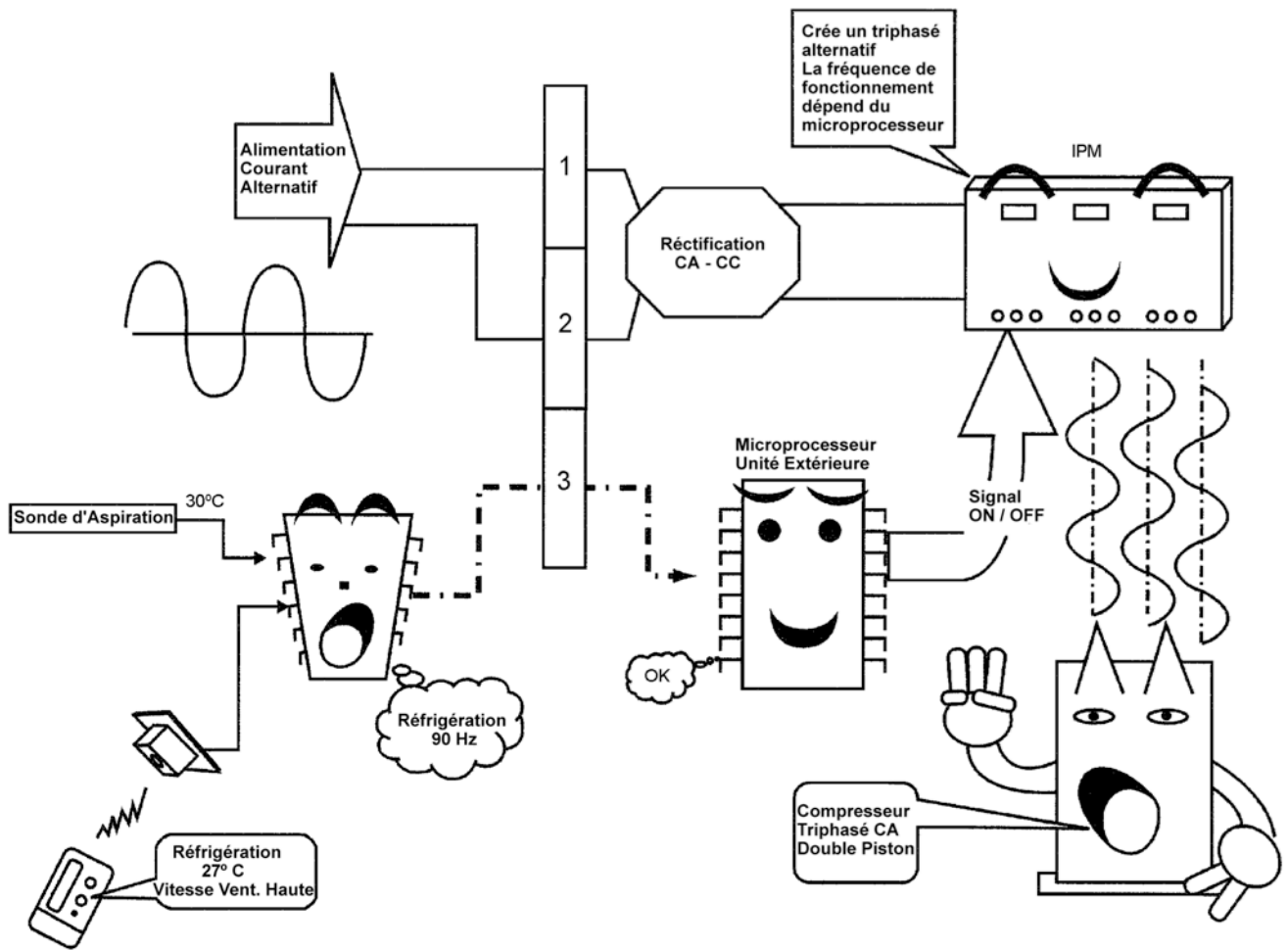
$$f = n_s \times p \Rightarrow 25 \times 1 \Rightarrow \underline{f = 25 \text{ Hz}}$$

Le variateur fonctionne à couple constant, d'où le rapport $U / f = \text{constant}$.

$$U / f = 400 / 50 = 8 \text{ d'où } 25 \times 8 = 200 \text{ V} \Rightarrow \underline{U_{\text{moteur}} = 200 \text{ V}}$$

Les informations de pressions (aspiration et refoulement du compresseur) et T° (entré condenseur, sortie condenseur, T° ambiante, T° refoulement compresseur T° carte inverter), courant absorbé par le moteur tension d'entrée, module le signal de sortie suivant une logique de régulation pour faire varié la fréquence d'entrée du module onduleur ce qui permet d'accélééré ou de ralentir le moteur du compresseur et d'obtenir une variation de débit frigorifique du compresseur.

Les informations de Température et de pressions sont numérisé et le micro contrôleur de régulation fait varier le rapport cyclique du signal MLI en fonctions des besoins de en froid ou en chaud de la pièce.



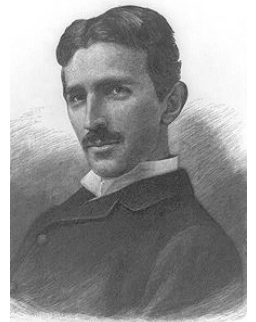
Annexe

Les moteurs électriques à courant alternatif

L'invention du courant alternatif et du moteur asynchrone sont 2 des 700 inventions du physicien serbe naturalisé américain :

Nikola Tesla (1856-1943)

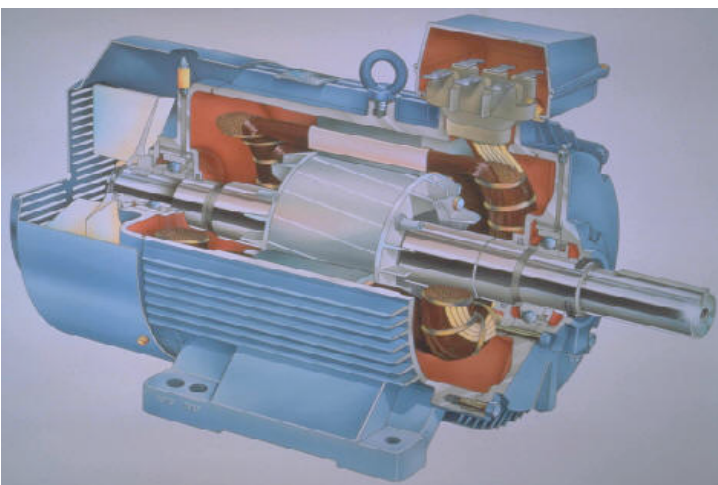
Très en avance sur son temps Nikola Tesla a eu un peu de mal à convaincre ses contemporains. Mais comme le dit si bien B.A. Behrend, président du American Institute of Electrical Engineers : « **Si nous devons saisir et éliminer de notre monde industriel les résultats des travaux de monsieur Tesla, les roues de l'industrie s'arrêteraient, les trains seraient immobilisés, nos villes seraient jetées dans la pénombre et nos usines seraient mortes [...]** Son nom marque une époque dans l'avancement de la science électrique. De ce travail jaillit une révolution... »



Le moteur asynchrone :

Présentation :

C'est un moteur qui se caractérise par le fait qu'il est constitué d'un stator (inducteur) alimenté en courant alternatif et d'un rotor (induit) soit en court-circuit, soit bobiné aboutissant à des bagues dans lesquelles le courant est créé par induction. Ces moteurs ont la particularité de fonctionner grâce à un champ tournant.



On distingue 2 catégories de moteur asynchrones en fonction du type de rotor : - les moteurs asynchrones à rotor en court-circuit, de faible puissance. - les moteurs asynchrones à rotor bobiné à bagues dans lesquelles l'enroulement du rotor aboutit à des bagues par l'intermédiaire desquelles on peut insérer des résistances. Ils sont de grande puissance. Les moteurs asynchrones peuvent démarrer par leurs propres moyens s'ils sont polyphasés. Le couple de démarrage des moteurs asynchrones est faible. C'est un moteur dont la vitesse est proportionnelle à la fréquence du courant :

$$n = f / p$$

Le moteur triphasé Asynchrone :

I. Constitution :

Le moteur asynchrone triphasé, qui est le récepteur de puissance des installations industrielles, est formé d'un :

Stator : la partie fixe du moteur. Il comporte trois bobinages (ou enroulements) qui peuvent être couplés en étoile Y ou en triangle Δ selon le réseau d'alimentation.

Rotor : la partie tournante du moteur. Cylindrique, il porte soit un **bobinage** (d'ordinaire triphasé comme le stator) accessible par trois bagues et trois balais (figure 3), soit une **cage d'écureuil** non accessible, à base de barres conductrices en aluminium (figures 1 et 2).

Dans les deux cas, le circuit rotorique est mis en court-circuit (par des anneaux ou un rhéostat)

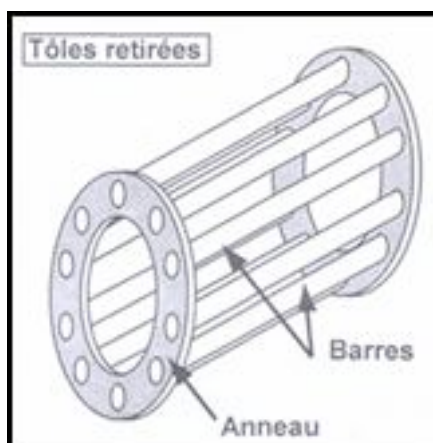


figure 1

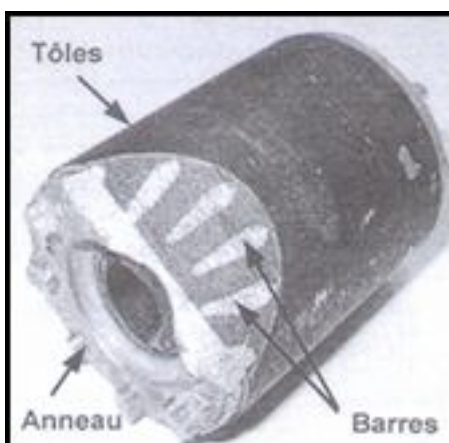


figure 2

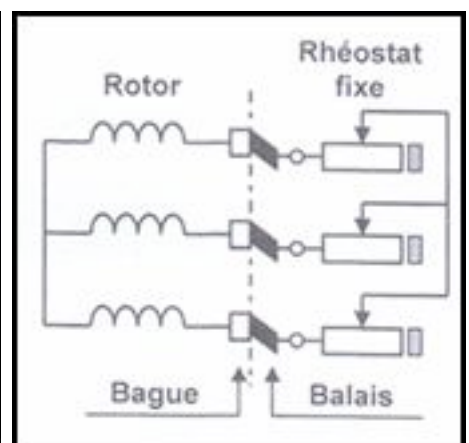


figure 3

Le moteur asynchrone à cage est très répandu dans le domaine industriel, de par sa grande robustesse mécanique, son faible coût et sa très bonne standardisation. La plage des puissances des machines asynchrones s'étend de la centaine de Watts à la dizaine de Mégawatts.

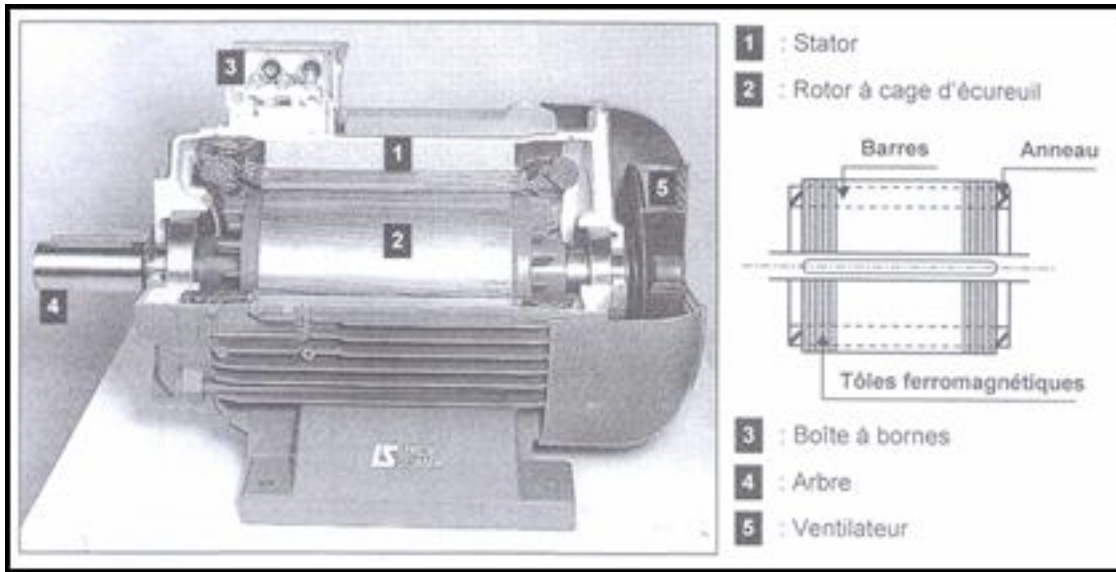
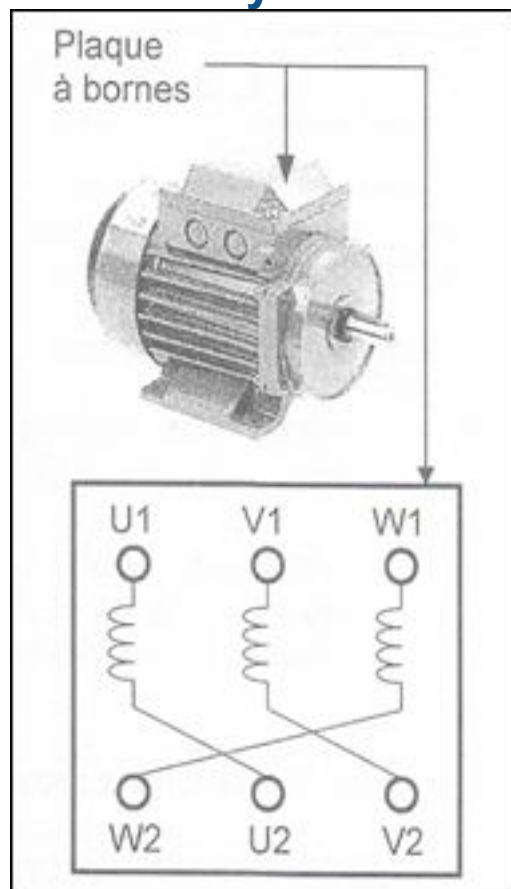


Figure 4 : le moteur asynchrone triphasé

II . Branchement du moteur asynchrone triphasé :



Le stator d'un moteur asynchrone triphasé comporte trois enroulements identiques qui sont couplés :

Soit en étoile (Y)

Soit en triangle (Δ)

Le choix du couplage dépend :

Des tensions du réseau.

Des indications portées sur la plaque signalétique qui donne les conditions normales de fonctionnement (dites aussi nominales).

L'utilisateur choisit le couplage qui convient par l'intermédiaire de la plaque à borne du moteur, qui comporte six bornes auxquelles sont reliées les entrées et les sorties des trois enroulements

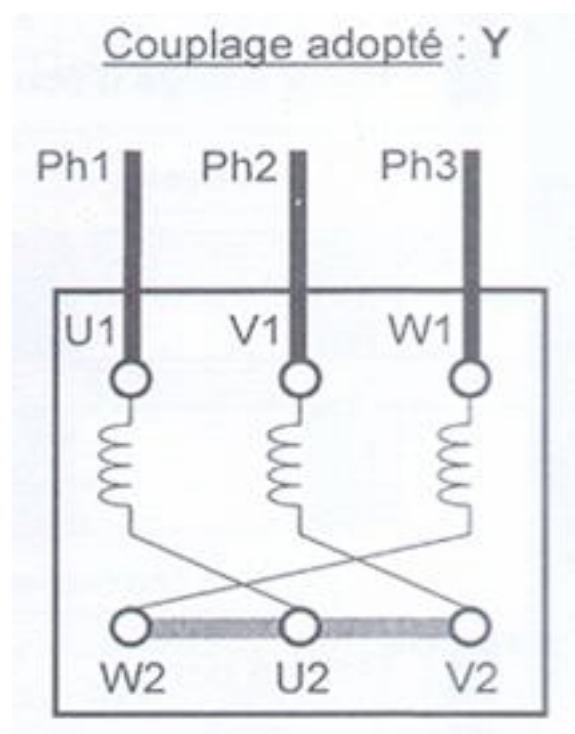
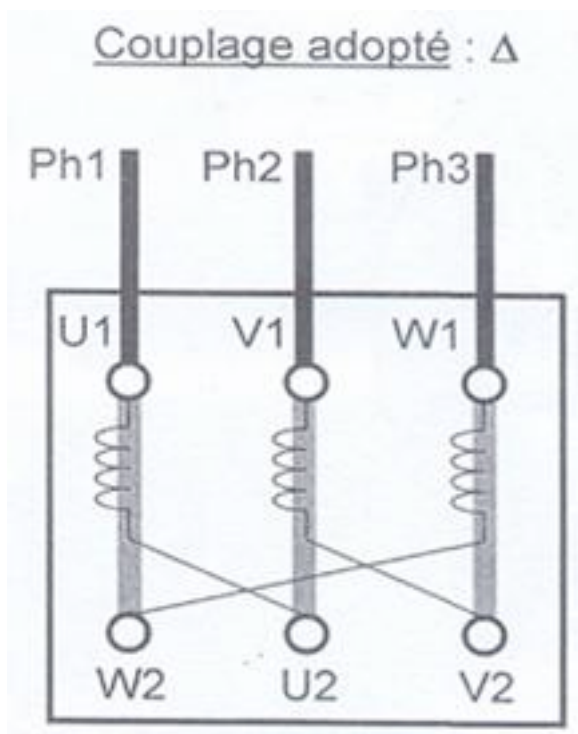
Normalisation des bornes :

Entrées : U1, V1 et W1. Sorties : U2, V2 et W2.

Détermination du couplage :

1. si la plus petite tension de la plaque signalétique du moteur correspond à la tension entre phase du réseau on choisit le couplage triangle Δ .
2. si la plus grande tension de la plaque signalétique du moteur correspond à la tension entre phase du réseau on choisit le couplage étoile Y.

Réseau d'alimentation		Plaque signalétique		Couplage adéquat
220v	380 v	220 v	380 v	ETOILE
220 v	380 v	380 v	660 v	TRIANGLE
Tension simple	Tension composée	Tension d'un enroulement	Tension de deux enroulements	



III . Principe de fonctionnement :

Les bobinages statoriques, alimentés par des courants triphasés de pulsation w , créent un champ magnétique B tournant à la vitesse $W_s = w/p$ où p est le nombre de paire de pôles au stator.

Ce champ (flux) tournant balaie le bobinage rotorique et y induit des forces électromotrices (fèm) d'après la loi de Lenz. Le bobinage rotorique étant en court-circuit, ces fèm y produisent des courants induits.

C'est l'action du champ tournant B sur les courants induits qui crée le couple moteur. Ce dernier tend à réduire la cause qui a donné naissance aux courants, c'est à dire la rotation relative du champ tournant par rapport au rotor. Le rotor va donc avoir tendance à suivre ce champ.

Le rotor tourne forcément à une vitesse $W < W_s$ (d'où le terme asynchrone).

Pour changer le signe de W_s (donc le sens de rotation), il suffit de permuter deux fils de phase.

IV. Problème de démarrage des moteurs asynchrones :

Le branchement du moteur au réseau de distribution peut se réaliser :

1. **Sans perturbation** pour les autres récepteurs et sans détérioration du moteur : l'équipement de démarrage est dit à démarrage direct.

2. **Avec perturbations** à la fois pour le réseau et les autres récepteurs ou avec détérioration du moteur : l'équipement de force motrice doit assurer le démarrage suivant un procédé qui élimine ou qui réduit dans leurs limites réglementaires ces perturbations et qui évite toute détérioration.

D'une façon générale et quel que soit le type de moteur, les différents procédés de démarrage ont pour objectif la réduction de l'intensité de démarrage.

V. Démarrage direct :

V.1 Principe :

Dans ce procédé le stator du moteur est branché directement sur le réseau d'alimentation triphasé. Le démarrage s'effectue en un seul temps.

V.2 Caractéristique technique :

Seuls les moteurs asynchrones triphasés avec rotor en court-circuit ou rotor à cage peuvent être démarrés en direct.

Au démarrage du moteur la pointe d'intensité est de l'ordre de 4 à 8 fois l'intensité nominale.

Le couple au décollage est important, environ 1,5 fois le couple nominal.

La diode

) INTRODUCTION.

Il existe plusieurs types de diodes :

- Diodes de signal
- Diode Zener
- Diode électroluminescente (DEL)
- Diode de redressement ou diode de puissance

II) CONSTITUTION.

1) Semi-conducteur de type P ou N.

Les semi-conducteurs (généralement silicium) présentent des caractéristiques intermédiaires entre isolant et conducteur.

Pour modifier sa conductibilité, on introduit des atomes d'un élément étranger (impuretés) : c'est le dopage.

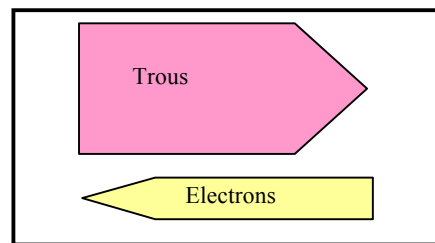
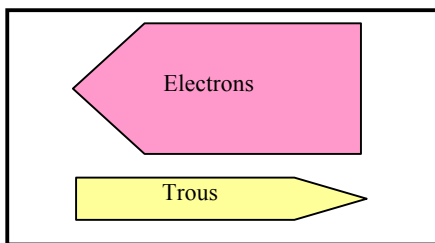
Suivant la nature des impuretés, on obtient un :

Semi-conducteur de type N :

Excédant de charges négatives (électrons)

Semi-conducteur de type P :

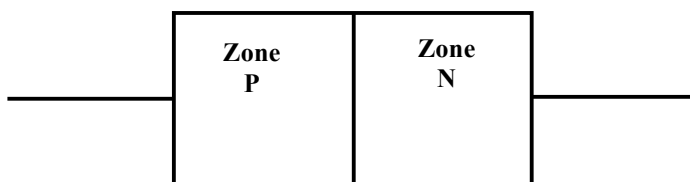
Excédant de charges positives (trous)



LORSQU'ON APPLIQUE UNE TENSION, LES ELECTRONS ET LES TROUS VONT SE DEPLACER DE FAÇON ORDONNEE : UN COURANT ELECTRIQUE CIRCULE.

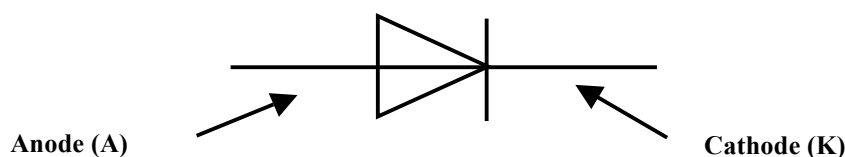
2) La jonction PN.

La jonction PN est la réalisation de deux types de dopages sur une même pastille de semi-conducteur.



La diode est un composant réalisé à partir d'une jonction PN.

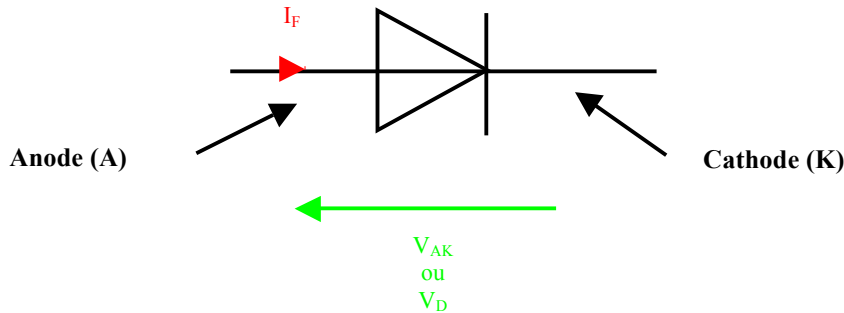
PAR CONVENTION, LA ZONE DE TYPE P EST NOMMEE ANODE (A) ET LA ZONE DE TYPE N EST NOMMEE CATHODE (K)



III) Fonctionnement.

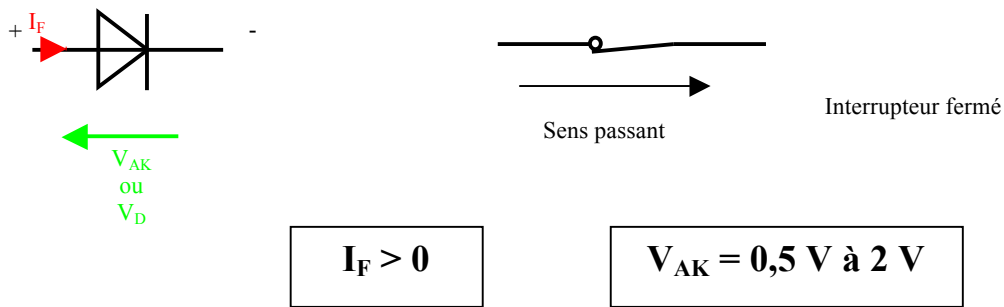
1) Rappels théoriques.

Une diode est un semi-conducteur non contrôlable, permettant la circulation d'un courant dans un seul sens (fonctionnement unidirectionnel).



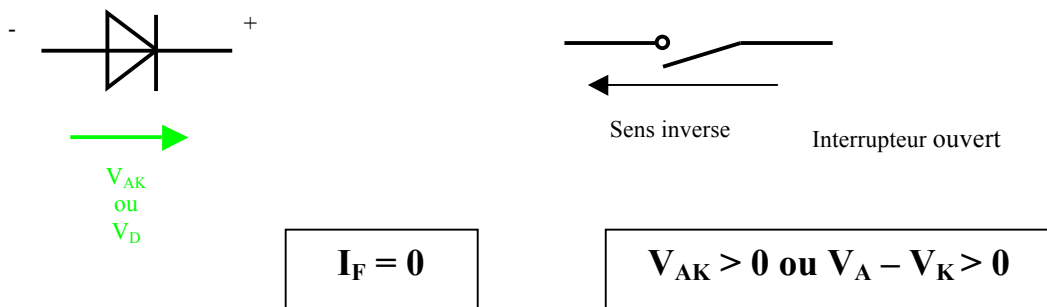
a) Sens direct (ou sens passant).

La diode est parfaitement conductrice, elle présente une faible chute de tension (tension de seuil V_0 : 0,5 à 2 V), elle est analogue à un interrupteur fermé.



b) Sens inverse (ou sens bloqué).

La diode est parfaitement isolante, un très faible courant résiduel la traverse (quelques micro-ampères) ; elle est analogue à un interrupteur ouvert.



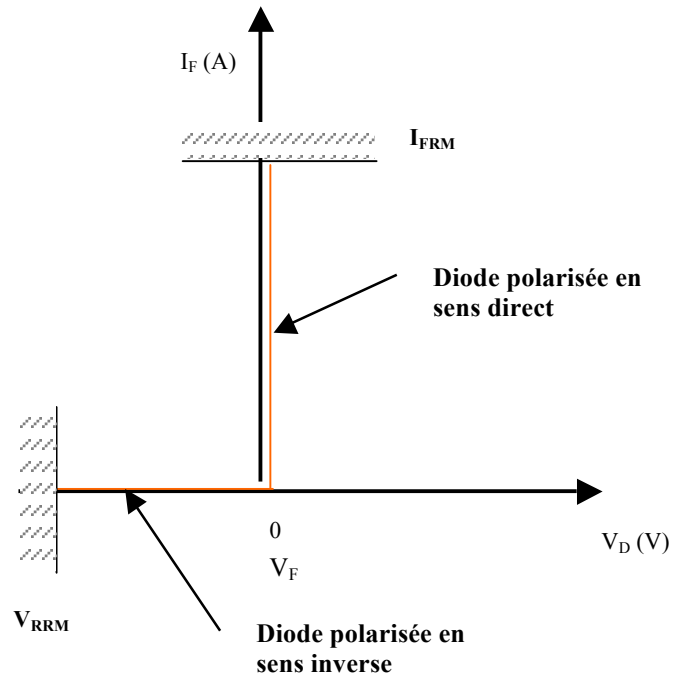
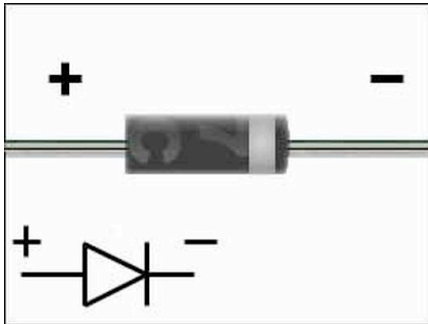
2) Caractéristiques courant / tension.

a) Diode réelle.

(voir document 1)

b) Diode idéale.

La tension de seuil est négligée : $V_0 = 0$



III) Caractéristiques constructeurs.

(voir document 1).

Elles sont données par le constructeur sous forme d'abréviations en lettres :

1) Les courants.

I_F : courant direct continu

I_0 : courant moyen à l'état passant

I_{FRM} : courant de pointe répétitif

I_{FSM} : courant de pointe de surcharge accidentelle

I_R : courant inverse continu

I_{RM} : courant inverse de crête

2) Les tensions.

V_F : tension directe continue

V_{FM} : tension directe de crête

V_R : tension inverse continue

V_{RM} : tension inverse de crête

V_{RRM} : tension inverse de pointe répétitive

IV) CHOIX D'UNE DIODE.

Il dépend principalement :

- de la configuration du montage incluant la diode
- du courant moyen dans la diode I_F
- du courant de pointe répétitif I_{FRM}
- de la tension inverse répétitive V_{RRM}

Si ces valeurs sont dépassées, cela entraîne la destruction par échauffement (claquage) de la jonction.

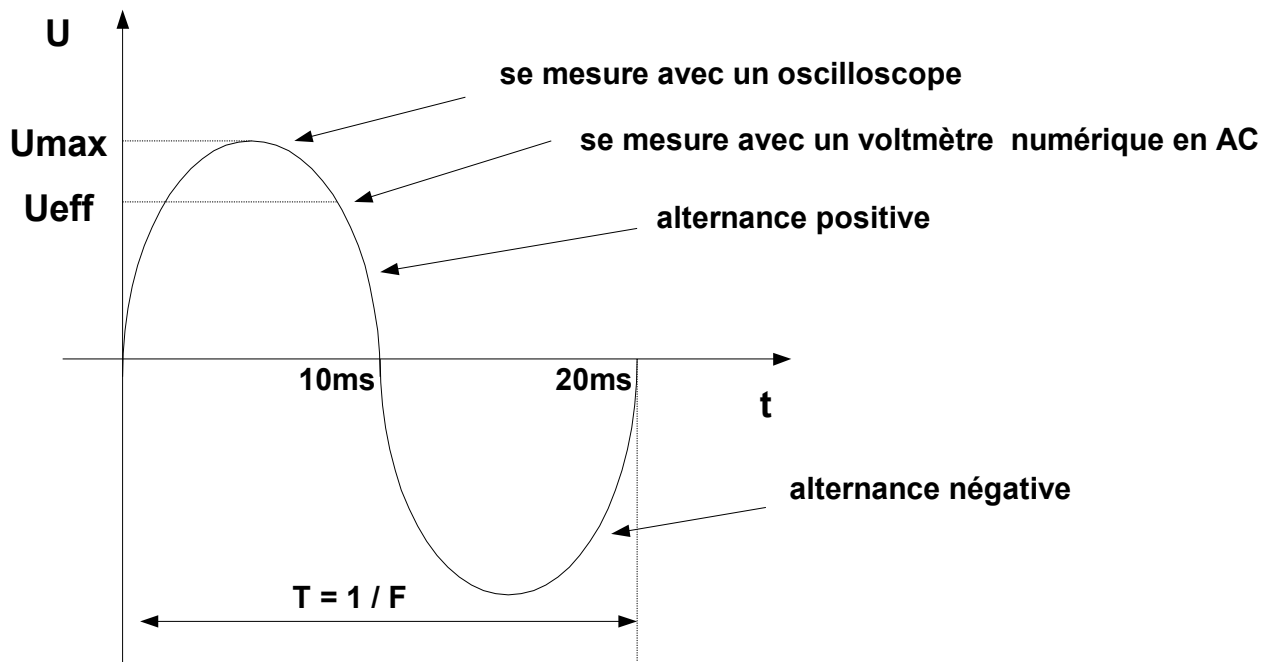
Redressement monophasé

D) BUT.

A partir d'une source de tension alternative, fournie par exemple par un transformateur, il s'agit de pouvoir alimenter un recepneur polarisé.

c'est à dire : transformer une tension alternative en une tension redressée.

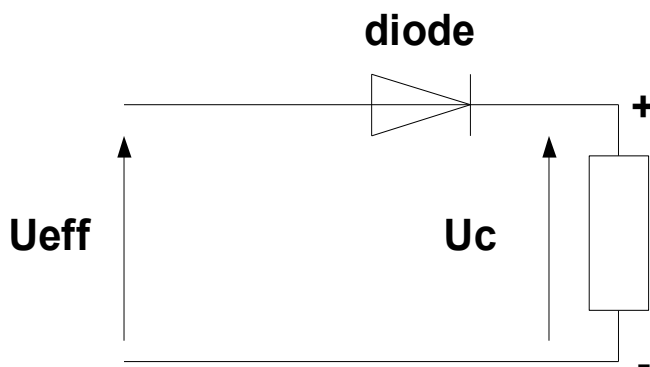
II) RAPPEL : Tension sinusoïdale



III) MONTAGES REDRESSEURS.

1) Redressement mono alternance.

a) Montage.



b) Oscillogramme de U_c .

U_{\max} : Tension sinusoïdale maximale de 16 V.

Ce mesure avec : Un oscilloscope.

Ueff : Tension sinusoïdale efficace

$$U_{\text{eff}} = (U_{\text{max}} / \sqrt{2}) = 11,3 \text{ V}$$

Rc : résistance de charge

$\overline{U_c \text{ moy}} = \overline{U_c} = \text{Tension continue moyenne}$

Ce mesure avec : Un voltmètre numérique TRMS en position AC/DC

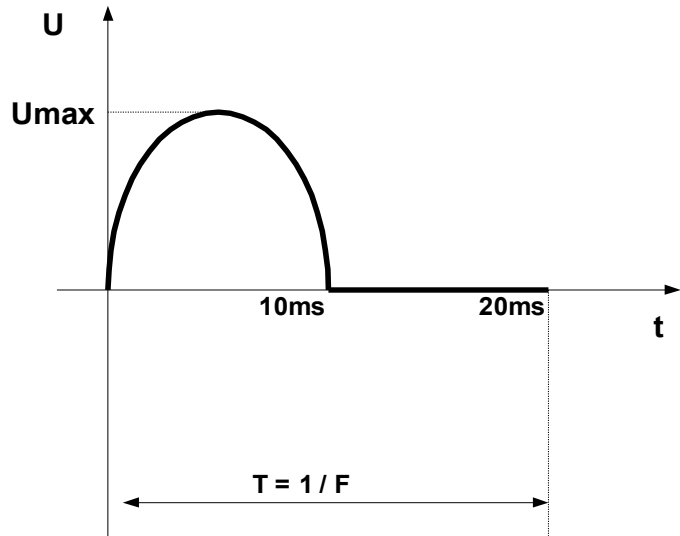
Observations :

De 0 à 10 ms, on a :

Alternance positive, diode passante

De 10 à 20 ms, on a :

Alternance négative, diode bloquée



c) Relation.

La valeur de la tension continue moyenne $\overline{U_c}$ est de :

$$\overline{U_c} = U_{\text{max}} / \pi = 16 / \pi = 5,1 \text{ V}$$

d) Avantages et inconvénients.

d.1) Avantages.

- Emploi d'une seule diode.
- Prix de revient peu élevé.

d.2) Inconvénients.

- Tension continue faible par rapport à la tension efficace appliquée.
- La diode est coupée, ce qui correspond à un circuit ouvert (plus aucun courant ne passe .)

e) Application.

Rechercher la valeur de la tension de sortie du transformateur, pour un montage où la tension redressée mono-alternance doit être de 9 V.

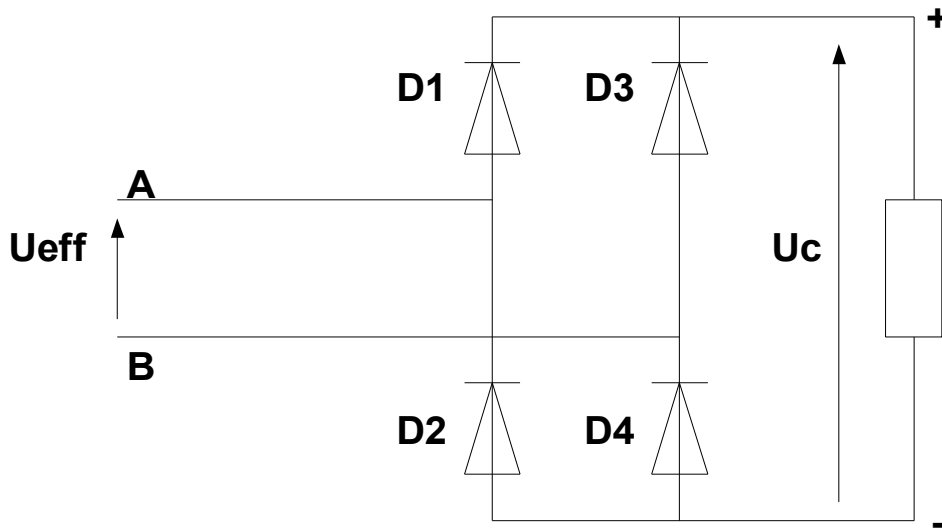
$$U_c = U_{\text{eff}} \sqrt{2} / \pi \text{ donc } U_{\text{eff}} = (U_c \cdot \pi) / \sqrt{2}$$

Donc :

$$U_{\text{eff}} = (9 \cdot \pi) / \sqrt{2} = 20 \text{ V}$$

2) Redressement double alternance (montage en pont de GRAETZ).

a) Montage.



b) Oscillogramme de U_c .

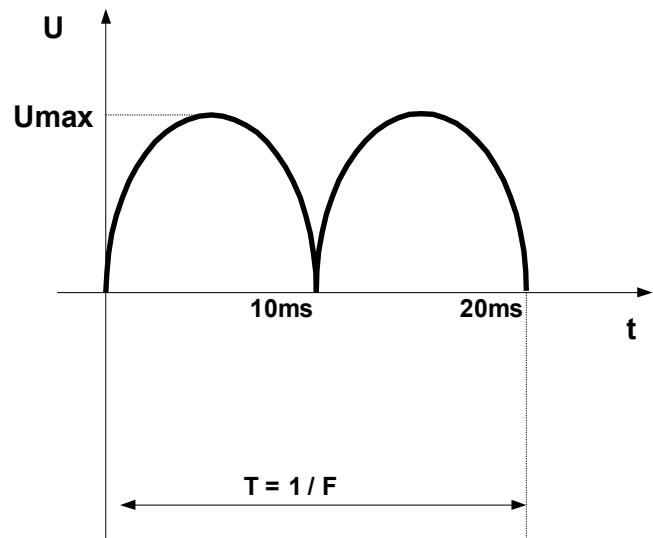
U_{max} : Tension sinusoïdale maximale de 14 V.
Ce mesure avec : Un oscilloscope.

U_{eff} : Tension sinusoïdale efficace

$$U_{eff} = (U_{max} / \sqrt{2}) = 9,9 \text{ V}$$

R_c : résistance de charge

$\overline{U_c}$
 $U_c \text{ moy} = \overline{U_c} =$ Tension continue moyenne
Ce mesure avec : Un voltmètre numérique TRMS en position AC/DC



Observations :

De 0 à 10 ms, on a : Alternance positive est passante
De 10 à 20 ms, on a : Alternance négative est redressée positivement

Fonctionnement du pont de diodes :

Lorsque A est positif et B négatif, le chemin du courant est : A, D1, R_c , D4, B
Lorsque A est négatif et B positif, le chemin du courant est : B, D3, R_c , D2, A

c) Relation.

La valeur de la tension continue moyenne $\overline{U_c}$ est de :

$$U_c = 2 U_{max} / \pi = 2 \cdot 14 / \pi = 8,9 \text{ V}$$

d) Avantage et inconvénients.

d.1) Avantage.

- Transformateur utilisable au maximum de sa puissance

d.2) Inconvénients.

- Si l'une des diodes se coupe : le montage devient l'équivalent d'un redressement mono-alternance
- Si l'une des diodes devient passante dans les 2 sens : le secondaire du transformateur entre en court-circuit

e) Application.

Sachant que la tension U_{max} en sortie du transformateur alimentant un montage redresseur en pont de Graëtz est de 33,9 V, quelle sera la tension moyenne du montage ?

$$U_c = 2 U_{max} / \pi$$

Donc :

$$U_{eff} = (2 \cdot 33,9) / \pi = 21,6 \text{ V}$$

IV) MESURES DE VALEURS MOYENNES ET EFFICACES.

1) Signal continu.

La mesure de la valeur moyenne s'effectue avec un appareil analogique magnéto-électrique ou un appareil numérique sur la position DC.

2) Signal sinusoïdal.

La mesure de la valeur moyenne s'effectue avec un appareil analogique magnéto-électrique ou un appareil numérique sur la position DC.

La mesure de la valeur efficace s'effectue avec un appareil analogique magnéto-électrique à redresseur ou ferromagnétique, ou avec un appareil numérique sur la position AC.

3) Signal quelconque.

La mesure de la valeur moyenne s'effectue avec un appareil analogique magnéto-électrique ou un appareil numérique sur la position DC.

La mesure de la valeur efficace s'effectue avec un appareil analogique à thermocouple ou un appareil numérique TRMS (true root mean square) sur la position AC/DC.

Les transformateurs

Introduction

A) Définition

Quelles sont les deux fonctions principales réalisées par les transformateurs

Modifier la tension électrique et assurer l'isolement galvanique.

Quelle différence faites-vous entre un transformateur et un auto-transformateur ?

Un autotransformateur ne comprend qu'un seul enroulement dont un point intermédiaire est sorti. La totalité de l'enroulement peut jouer le rôle de primaire et la partie de l'enroulement jusqu'au point intermédiaire le rôle de secondaire.

Le courant circulant dans le secondaire (enroulement commun) est alors la différence entre les deux courants I_1 et I_2 .

B) Principales caractéristiques

Donner la définition des principales caractéristiques

Grandeurs	Définition
U1	Tension primaire
U2	Tension secondaire
Tension de court circuit (%)	Pourcentage de la tension assignée à appliquer au primaire pour avoir I_1 au primaire quand le secondaire est en court circuit.
Couplage	
Dielectrique	Matériaux refroidissant

Choix du diélectrique et de la technologie

- Comment choisit-on la technologie de refroidissement ? Donner les deux types de technologie

Sécurité des personnes et contraintes économiques. Type sec et type immergé.

- Combien de lettres définissent le mode de refroidissement d'un transformateur ?

4 lettres

- Compléter le tableau suivant

Désignation	Signification
Première lettre	Fluide de refroidissement interne en contact avec les enroulements
O	Huile minérale ou liquide isolant de synthèse de point de feu ≤ 300 °C
K	Liquide isolant avec point de feu > 300 °C
L	Liquide isolant à point de feu non mesurable
Deuxième lettre	Mode de circulation du fluide de refroidissement interne
N	Circulation naturelle par thermosiphon à travers le système de refroidissement et les enroulements
F	Circulation forcée à travers le système de refroidissement, F circulation par thermosiphon dans les enroulements
D	Circulation forcée à travers le système de refroidissement et dirigée du système de refroidissement jusqu'aux enroulements principaux au moins
Troisième lettre	Fluide de refroidissement externe
A	Air
W	Eau
Quatrième lettre	Mode de circulation du fluide de refroidissement externe
N	Convection naturelle
F	Circulation forcée (moteurs et pompes)

Protections des transformateurs

- Quels sont les trois types de défauts que l'on retrouve sur les transformateurs ?

Surcharge
Court-circuit
Défaut à la masse

- Indiquer dans quel type de défaut de transformateur sont utilisés ces dispositifs de protection et dans quel transformateur sont-ils utilisés.

Dispositifs de protection	Type de défaut	Transformateurs	
		Secs	Immergés
Masse cuve	Défaut de masse	U	U
Parafoudres HTA	Foudre	U	U
Cellules de protection	Court circuit surcharge	U	U
Relais DGPT2 ou DMCR	Dégagement gazeux Pression Température		U
Sondes PTC	Température	U	

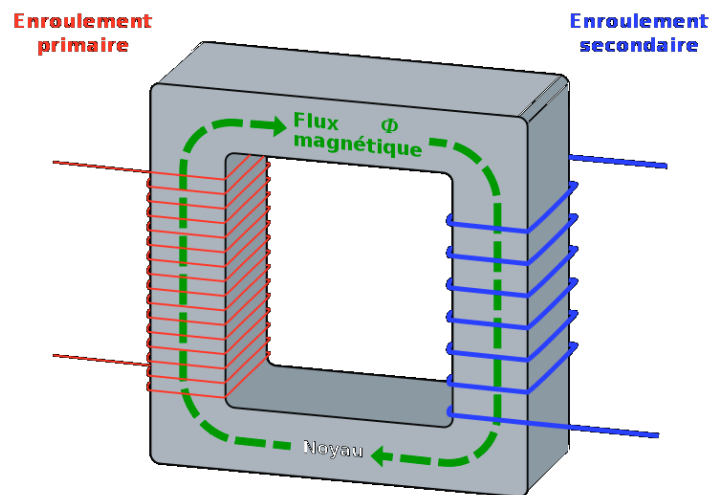
- Est-il possible de se passer de la protection amont. Si oui dans quel cas ?

Oui, pour de petites puissances, on utilise des disjoncteurs et des fusibles côté BT

Caractéristiques électriques

A) Le transformateur monophasé

- Compléter le schéma suivant

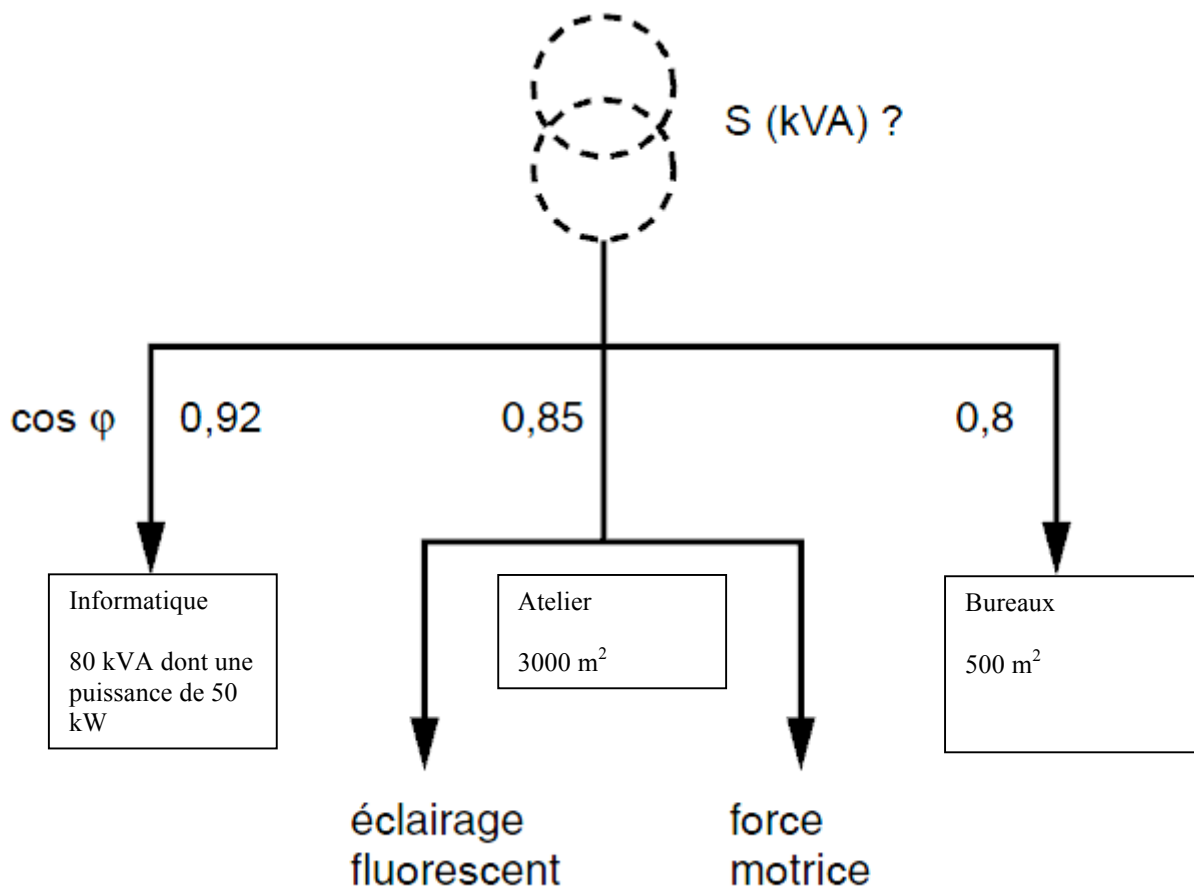


- Donner la définition du rapport de transformation :

$$m = \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1}$$

- Dimensionnement du transformateur

D'après l'exemple qui vous est proposé, dimensionner le transformateur de l'installation suivante. (On ne calculera pas la puissance maximale P_c)



Départ	Pi (kW)	Pu (kw)	$\varphi(^{\circ})$	Qu(kVAR)	Stotal (KVA)
Informatique	50	37.5	37	28.26	
Atelier	45+900	36+630	31.8	413	
Bureaux	12.5	7.5	23.1	3.2	
Total		711	32.1	445	839

Choisir le transformateur correspondant :

$$S_{\text{transfo}} = 1000 \text{ kVA}$$

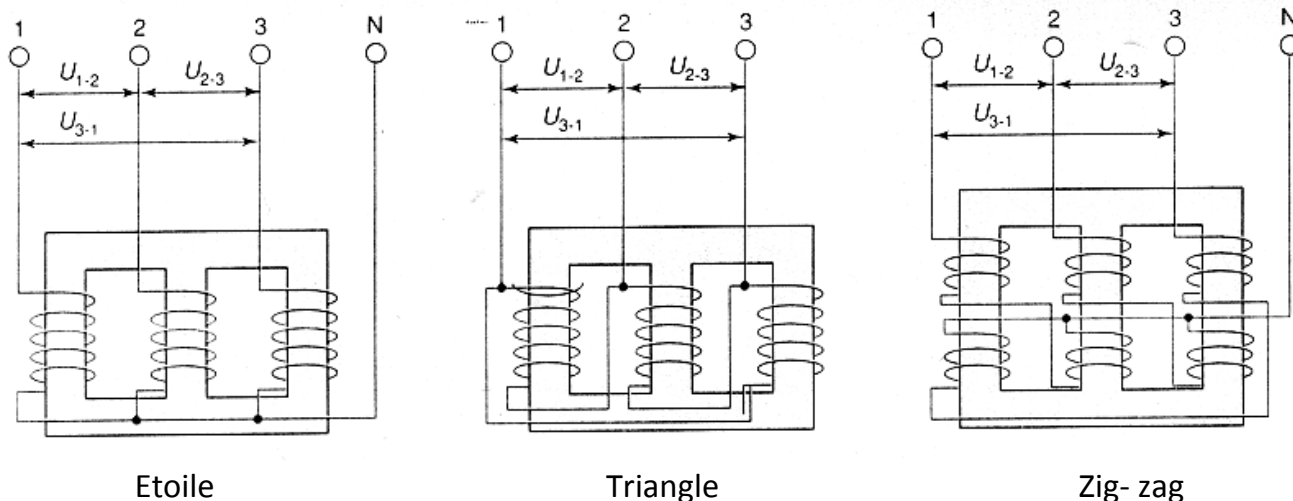
Couplage

A) Couplage des enroulements

Comme tous les récepteurs triphasés, le primaire d'un transformateur peut avoir ses enroulements couplés en étoile ou en triangle.

De la même façon, les bobines secondaires pourront être connectées en étoile, en triangle ou en zig-zag.

- Identifier sur les schémas suivants les couplages



Remarque :

Le couplage zig-zag est obtenu en divisant les trois bobines d'un enroulement en six bobines. Pour avoir une phase, on met en série deux demi-bobines prises sur des colonnes différentes en sens inverse.

- Pourquoi a-t-on intérêt à choisir un couplage étoile aux primaires des transformateurs aux très hautes tensions ?

Car la tension supportée par la bobine est divisée par $\sqrt{3}$ et de plus le couplage étoile possède un neutre donc possibilité de relier le primaire à la terre.

La désignation des couplages s'effectue par un groupe de deux lettres et un nombre.

- la première lettre en majuscule indique le côté HT.
- la deuxième lettre en minuscule indique le côté BT.
- le chiffre indique l'indice du couplage.

- Soit un transformateur Exemple : Dy 5, Donner la signification de chacune des lettres

Couplage HT en triangle, BT en étoile, déphasage $5 \times 30 = 150^\circ$

- Donner la définition de l'indice de couplage horaire

L'indice de couplage est complété par un « indice horaire » qui donne, par pas de 30° , le déphasage horaire en 12^{es} de tour (comme sur une montre) entre la tension primaire et la tension secondaire du transformateur (ex. : 11 = $11 \times 30^\circ = 330^\circ$ en sens horaire ou 30° en sens anti-horaire)

On identifie le vecteur tension entre phase et neutre (réel ou fictif) à la grande aiguille pour le primaire et à la petite aiguille pour le secondaire.

- Compléter le tableau suivant (vous vous aiderez de l'annexe permettant de déterminer l'indice horaire).

Dd 0 0° 	Yy 0 0° 	Dy 5 150°
Yd 5 150° 	Yz 5 150° 	Dd 6 180°
Yy 6 180° 	Dz 6 180° 	Dz 10 300°
Dy 11 330° 	Yd 11 330° 	Yz 11 330°

TABLEAU DES PRINCIPAUX COUPLAGES

B) Couplage de plusieurs transformateurs.

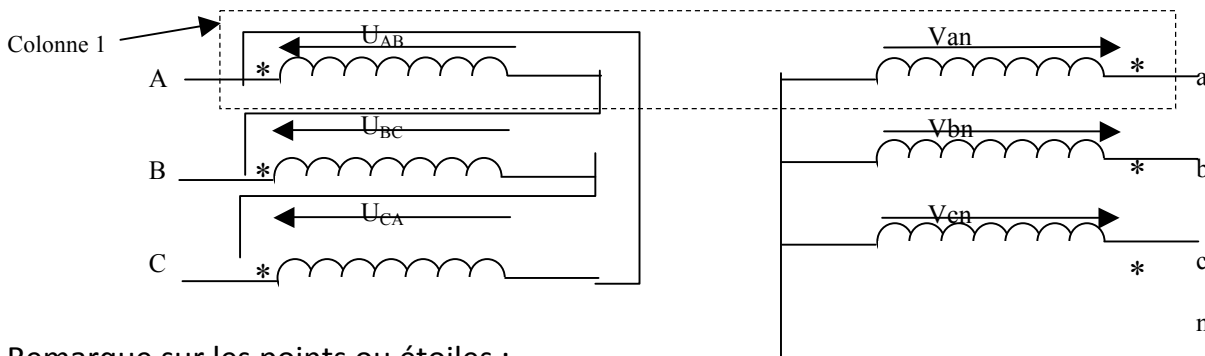
Pour assurer une continuité de service, ou pour des variations journalières ou saisonnières de la consommation d'énergie, le poste de distribution peut comporter deux ou trois transformateurs.

Indiquer les conditions pour la mise en parallèle de transformateurs

- Des couplages avec des indices horaires compatibles (notion de groupe)
- Des tensions de court circuit égales à 10% près
- Une différence des tensions secondaires inférieure à 0.4 %.

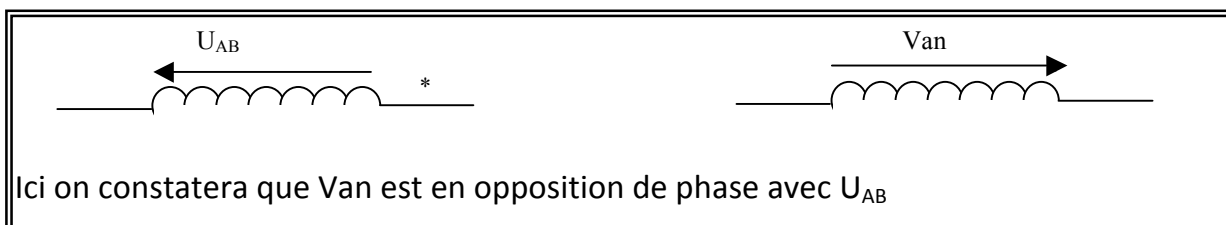
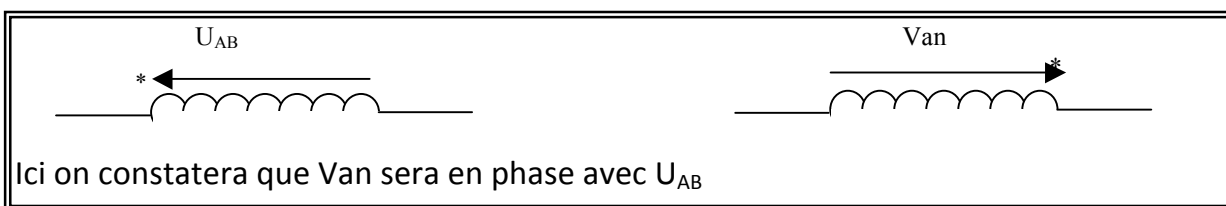
Annexe n°1 Pour déterminer l'indice horaire

Exemple appliqué : Retrouvez l'indice horaire d'un transformateur couplé comme suit :



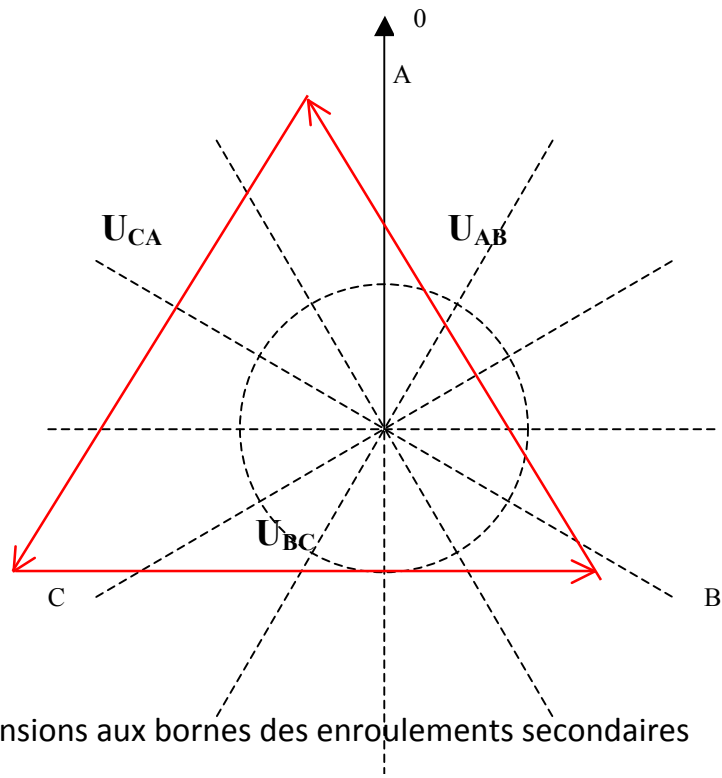
Remarque sur les points ou étoiles :

Elles représentent les entrées des enroulements. On connaît grâce à ces points ou étoiles le sens de l'enroulement dans une colonne. On peut alors établir une règle au niveau des déphasages entre le primaire et le secondaire sur une colonne

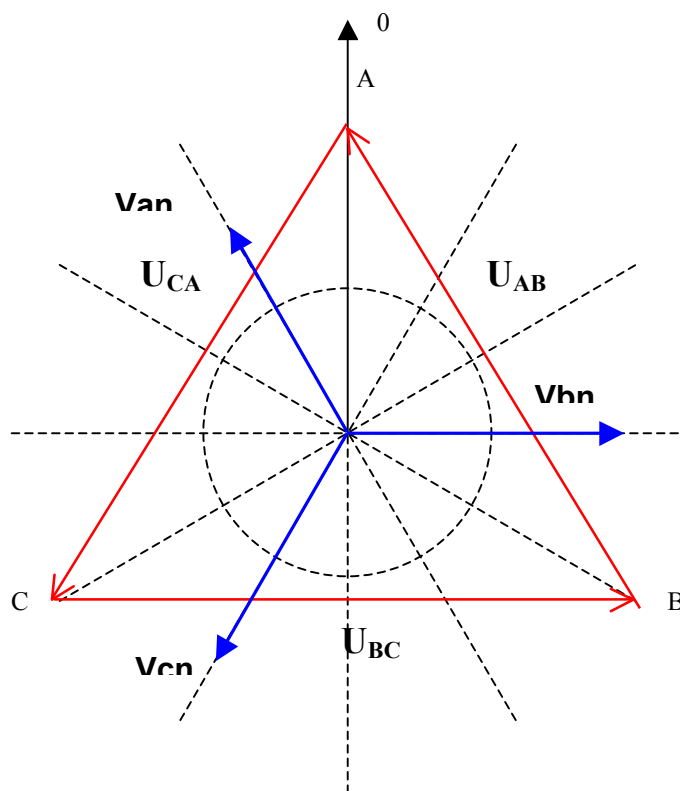


Vous constatez que si les deux pointes des flèches représentant les tensions sont sur l'étoile alors on considérera que les tensions sont en phases l'une par rapport à l'autre à condition bien sûr que les deux enroulements soient sur la même colonne (ici colonne 1)

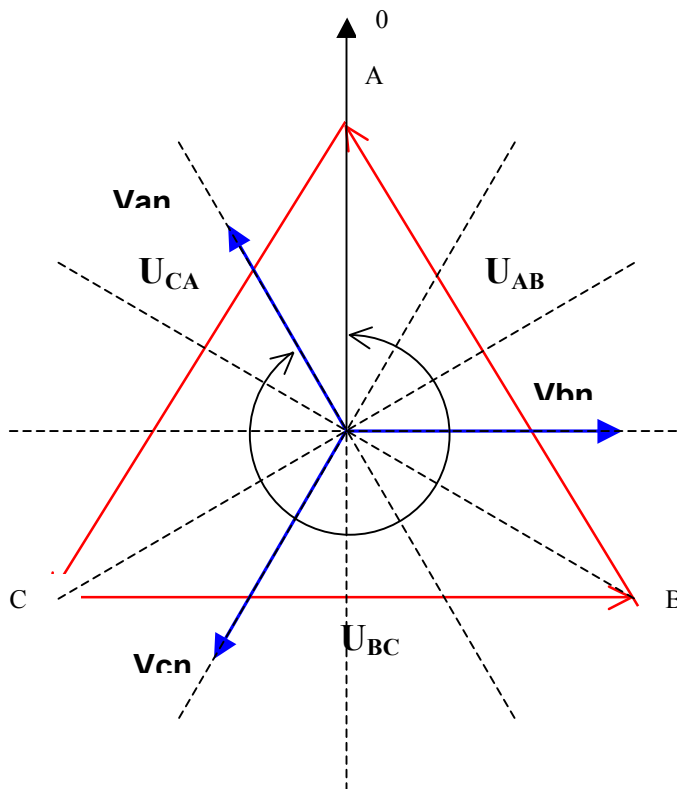
A) Tracer les tensions aux bornes des enroulements primaires



B) Tracer les tensions aux bornes des enroulements secondaires



C) Mesure le déphasage entre la tension simple du primaire et la tension simple du secondaire

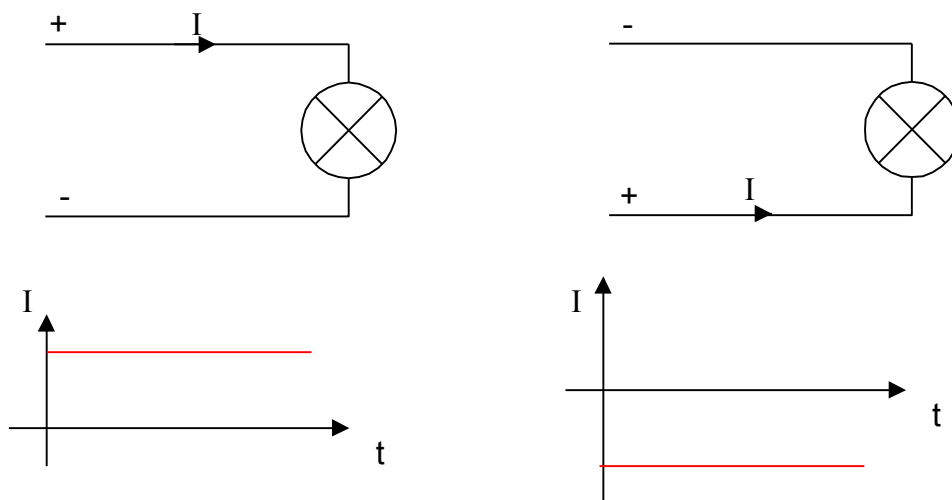


On trouve donc un indice horaire 11, soit un transformateur Dyn11.

Rappelle sur les courants périodiques

I) RAPPEL.

Un courant continu est un courant qui parcourt les conducteurs toujours dans le même sens et qui ne varie pas dans le temps.



Le sens du courant peut être inversé en permutant les 2 conducteurs.

Les générateurs tels que les piles, les accumulateurs, les dynamos produisent un courant continu

Dans la pratique, le courant dont nous nous servons, celui qui est distribué par EDF est un courant variable périodique appelé courant alternatif.

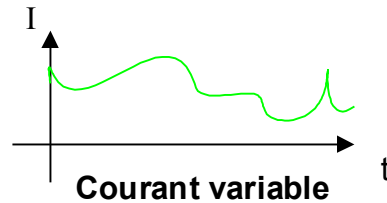
Ce courant est produit par des générateurs appelés alternateurs.

Les alternateurs produisent une tension qui varie en fonction du temps selon une courbe appelée sinusoïde.

On dit aussi que le courant produit est sinusoïdal.

II) COURANTS / TENSIONS VARIABLES.

En régime variable, les courants et les tensions sont des grandeurs variant avec le temps



III) CLASSIFICATION DES COURANTS.

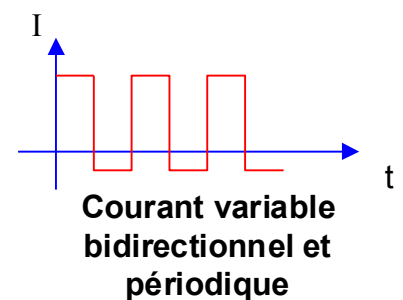
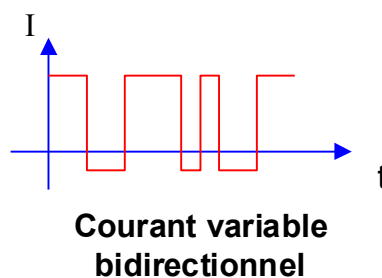
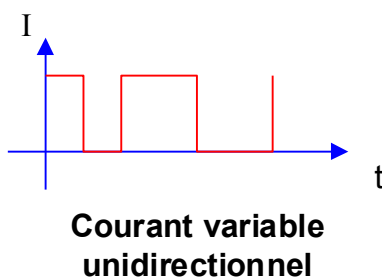
Les courants variables peuvent être classés selon leur sens de direction :

Les courants unidirectionnels circulent toujours dans le même sens. Les intensités et les tensions qui leur correspondent sont toujours du même signe.

Les courants bidirectionnels ne circulent pas toujours dans le même sens. Les intensités et les tensions qui leur correspondent sont des nombres relatifs, tantôt positifs, tantôt négatifs.

Un courant unidirectionnel ou bidirectionnel peut être périodique ou non périodique :

Un courant périodique est un courant ayant un signal variable avec des portions où le courant se reproduit identiquement à lui-même.



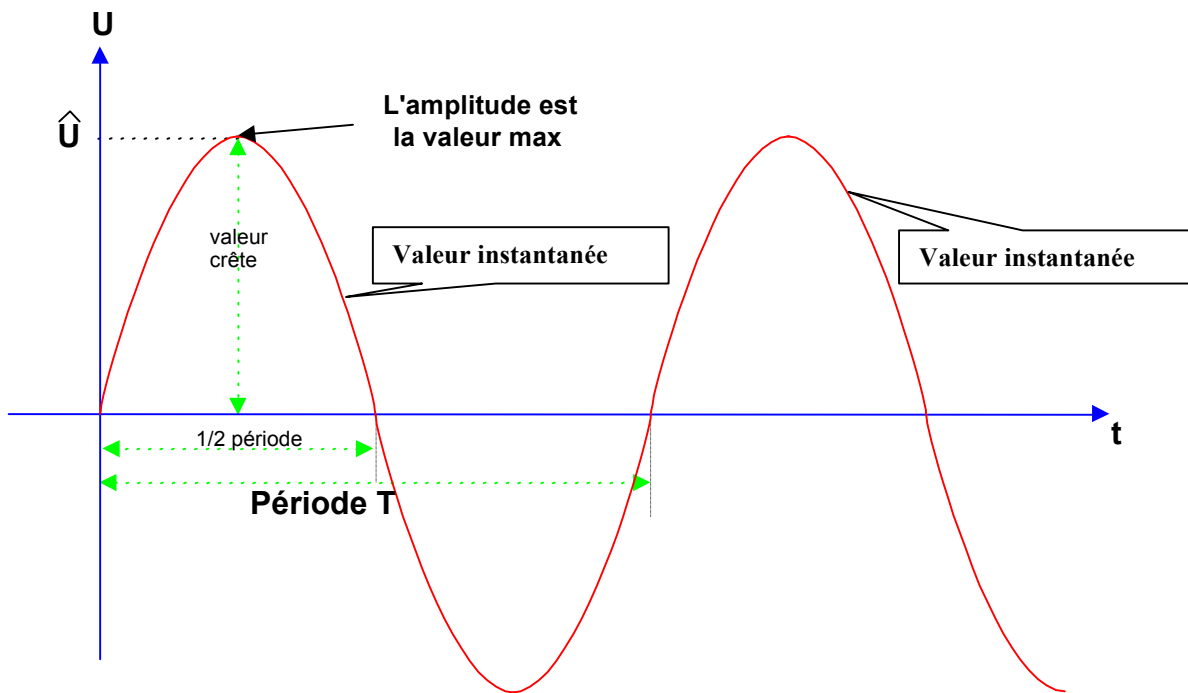
IV) COURANT / TENSION ALTERNATIF.

Un courant alternatif est un courant variant périodiquement en s'inversant avec une valeur moyenne nulle.

EDF distribue une tension alternative sinusoïdale

REPRESENTATION D'UNE SINUSOÏDE (voir document 1)

Tension alternative sinusoïdale : $u(t) = \hat{U} \sin(\omega t)$



Valeur instantanée : La valeur instantanée est la valeur de la grandeur variable à un instant donné, notée $u(t)$

Période T : La période T (en s) est l'intervalle de temps constant au bout duquel la tension reprend la même valeur et le même sens.

La fréquence : La fréquence f est le nombre de période par seconde en Hz $f = \frac{1}{T}$

Valeur maximale : La valeur maximale ou amplitude d'une tension ou intensité, est la plus grande valeur atteinte par cette tension ou intensité, notée \hat{U} ou \hat{I} $\hat{U} = U\sqrt{2}$

Valeur efficace : L'intensité efficace d'un courant variable est égale à l'intensité d'un courant continu qui produirait dans une résistance le même dégagement de chaleur, notée U ou I

$$U = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$$

La valeur efficace est très importante ; c'est toujours elle qui est précisée sur les récepteurs ou les générateurs

Valeur moyenne : Par définition la valeur moyenne d'une tension alternative est nulle, notée \bar{U} .

Pulsation : La pulsation est le nombre de radians par seconde qu'effectue un vecteur tournant.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

En résumé : Signal alternatif sinusoïdal

Valeur instantanée en V	$u(t) = \hat{U} \sin(\omega t)$
Période T en s	$T = \frac{1}{f}$
La fréquence en Hz	$f = \frac{1}{T}$
Valeur moyenne en V	0
Valeur maximale en V	$\hat{U} = U\sqrt{2}$
Valeur efficace en V	$U = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$
Pulsation en rad/s	$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$