

## Chapitre I Généralité sur le transformateur

### Introduction :

Un transformateur électrique est une machine électrique permettant de modifier les valeurs de tension et d'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative, en un système de tension et de courant de valeurs différentes, mais de même fréquence et de même forme. Il effectue cette transformation avec un excellent rendement. Il est analogue à un engrenage en mécanique (le couple sur chacune des roues dentées étant l'analogue du courant et la vitesse de rotation étant l'analogue de la tension).

### I-1-Historique:

En 1820, Hans Christian Oersted, physicien danois a découvert qu'un conducteur véhiculant un courant génère un champ magnétique. Quelques années plus tard, en 1830, Josef Henry donna corps aux notions d'induction et de self-induction. Entre les mois d'août et de novembre 1831 l'anglais Michael Faraday procéda à une série d'expériences avec un appareil constitué d'un anneau de fer et d'enroulements de fil de cuivre isolé.

En 1882 Lucien Gaulard (1850-1888), jeune électricien français, chimiste de formation, présente à la Société Française des Electriciens un "générateur secondaire", dénommé depuis transformateur. Devant le scepticisme de ses compatriotes, il s'adresse à l'anglais Gibbs et démontre le bien-fondé de son invention à Londres

En 1883, Lucien Gaulard et John Dixon Gibbs réussissent à transmettre pour la première fois, sur une distance de 40 km, du courant alternatif sous une tension de 2000 Volts à l'aide de transformateurs avec un noyau en forme de barres.

En 1884 Lucien Gaulard met en service une liaison bouclée de démonstration (133 Hz) alimentée par du courant alternatif sous 2000 Volts et allant de Turin à Lanzo et retour (80km). On finit alors par admettre l'intérêt du transformateur qui permet d'élever la tension délivrée par un alternateur et facilite ainsi le transport de l'énergie électrique par des lignes à haute tension. La reconnaissance de Gaulard interviendra trop tardivement.

Entre-temps, des brevets ont été pris aussi par d'autres. Le premier brevet de Gaulard en 1882 n'a même pas été délivré en son temps, sous prétexte que l'inventeur prétendait pouvoir faire "quelque chose de rien" !

Gaulard attaqué, perd ses procès, est ruiné, et finit ses jours dans un asile d'aliénés. Le transformateur de Gaulard de 1886 n'a pas grand-chose à envier aux transformateurs actuels, son circuit magnétique fermé (le prototype de 1884 comportait un circuit magnétique ouvert, d'où un bien médiocre rendement) est constitué d'une multitude de fils de fer annonçant le circuit feuilleté à tôles isolées.

Ainsi, en 1885, les Hongrois Károly Zipernowsky, Miksa Déry et Otto Titus Bláthy mettent au point un transformateur avec un noyau annulaire commercialisé dans le monde entier par la firme Ganz à Budapest.

Dans le même temps aux USA, W. Stanley développe également des transformateurs. Actuellement les transformateurs sont très développés soit du côté de construction soit de conception (750/400 kV, 400/220 kV, 220/60 kV, 60/10 ou 30 kV, 10 ou 30 kV/380 V). [2]

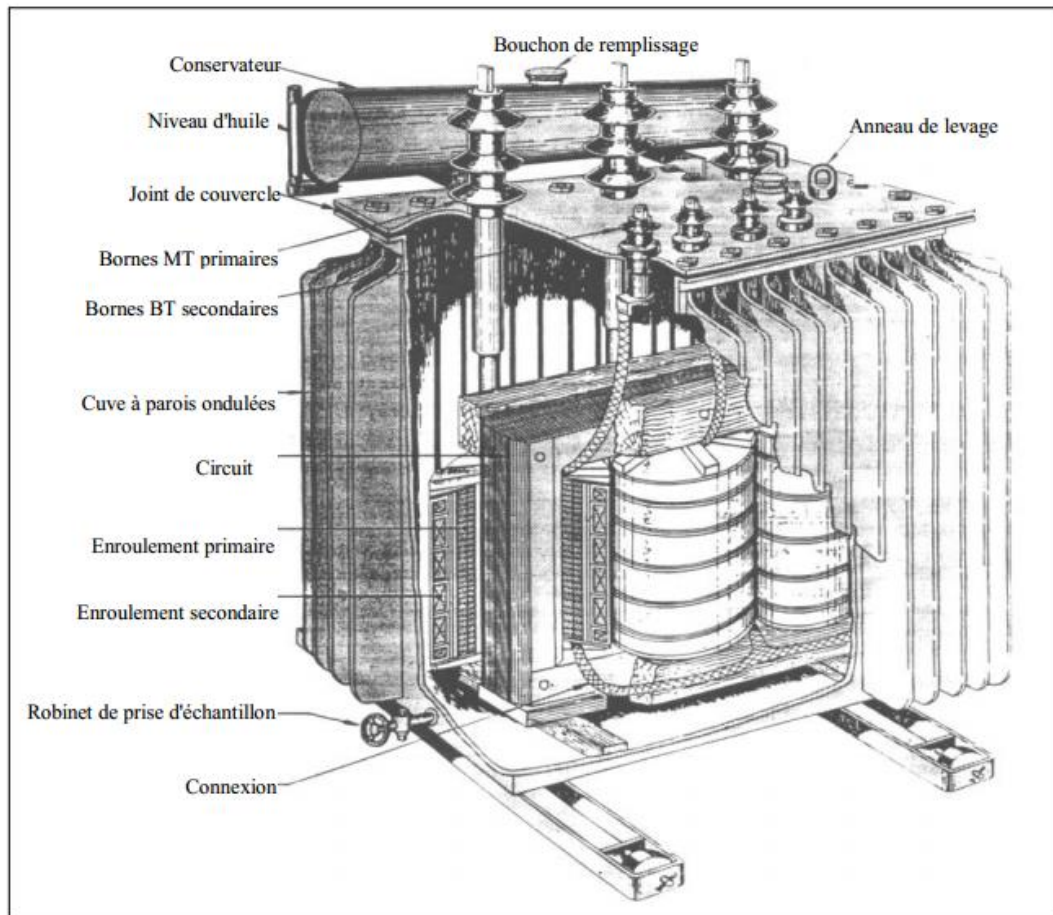
## **I.2. Constitution et principe de fonctionnement :**

### **I.2.1. Constitution :**

Le transformateur est une machine d'induction qui comprend principalement 4 parties :

- un circuit magnétique fermé constitué de colonnes et culasses, supérieures et inférieures
- un circuit électrique comprenant les enroulements primaires et secondaires et leurs isolations
- des organes mécaniques, de support, manutention, refroidissement
- des organes de sécurité contre les défauts internes et externes à l'appareil

Le transformateur, par son principe de fonctionnement, est également appelé « machine statique ».



**Figure I.1: constitution de transformateur**

### **I.2.2.Principe de fonctionnement :**

Le transformateur est constitué de deux enroulements (ou plus) couplés sur un noyau magnétique. Le côté de la source est appelé le primaire. Le côté de la charge est appelé le secondaire. Le flux  $\phi$  est le flux mutuel. Le "•" indique la polarité des tensions. Par convention, un courant qui entre dans un "•" indique un flux positif. Il faut remarquer qu'il n'existe aucune connexion électrique entre le primaire et le secondaire. Tout le couplage entre les deux enroulements est magnétique.

Lorsqu'on applique une tension alternative à la source, ceci crée un flux alternatif dans le noyau magnétique. Selon la loi de Faraday, ce flux crée des forces électromotrices dans les bobines. La force électromotrice induite est proportionnelle au nombre de tours dans la bobine et au taux de variation du flux. Selon le rapport du nombre de tours entre le primaire et le secondaire, le secondaire alimente la charge avec une tension différente de celle source.

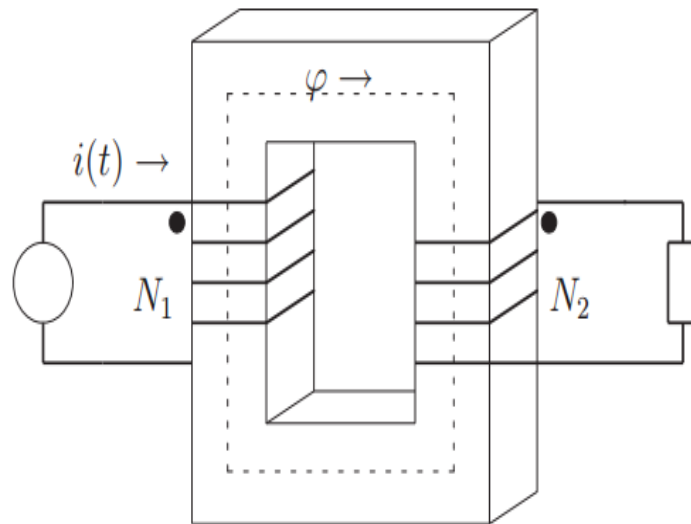


Figure I.2:schéma simplifier du transformateur

### I.2.3.Plaque signalétique d'un transformateur triphasé:

- 3 Phase(s) : Nombre de phase du transformateur
- 50 Hz : Fréquence nominale d'utilisation du transformateur
- Refroidi. AN : Type de refroidissement du transformateur
- ONAN : circulation huile naturelle (ON) + circulation air naturelle (AN)
- ONAF : circulation huile naturelle (ON) + circulation air forcée (AF)
- Classe thermie : classe thermique d'isolation : définit la limite maximale que peuvent supporter l'isolant des enroulements
- N° 753301-01 : Numéro de série
- Année 2002 : Année de construction
- 1000 kVA : Puissance apparente nominale
- $U_{cc}$  : 6 % : Tension de court-circuit
- Couplage Dyn11 : couplage des enroulements du transformateur
- IK : indice de protection contre les chocs
- IP 00 : indice de protection contre l'eau et la poussière
- Haute tension : Valeur des tensions nominales primaires possible
- Basse tension : Valeur de la tension nominale et du courant nominal secondaire
- Niveau d'isolement : tension maximale entre enroulement et masse et entre enroulement [3]

**france transfo**  
Schneider Electric

Transformateur enrobé 3 phase(s) 50 Hz refroid. AN Classe therm. HT F  
N° 753301-01 année 2002 conforme à NBN HD 538-1 S1 et HD 444 S1-1998/A3:1992

1000 kVA Ucc 6.00 % Couplage D yn11 - IK IP 00

suivant le schéma ci-dessous changement de tension

| relier | haute tension | basse tension |
|--------|---------------|---------------|
| 1-2    | 10500 V       | 400 V         |
| 2-3    | 10250 V       | 1443.4 A      |
| 2-5    | 10000 V       |               |
| 3-4    | 9750 V        |               |
| 4-5    | 9500 V        |               |

niveaux d'isolement  
haute tension basse tension  
95-38 10.0 kV

Classes HD 444-S1 : Comportement au feu F1  
Climatique C2  
Environnement E2

masses  
sans enveloppe 2190 kg  
de l'enveloppe kg  
totale avec enveloppe kg

AN 57.7 A

Usine d'Ennery ( Moselle ) France

n° 229277

**Trihal**

Figure I.3 : plaques signalétiques de transformateur

#### I.2.4. Normes de transformateur :

Les transformateurs doivent répondre aux dispositions de la présente Spécification Technique et à toutes les prescriptions prévues dans les normes de référence, à savoir :

- ✚ Norme NFC 11-201 Réseaux de distribution publique d'énergie électrique
- ✚ Norme NFC 52 100 : Transformateurs de puissance
- ✚ Norme NFC 52 112-1 : Transformateur triphasé de distribution publique (U max : 24 kV)
- ✚ Norme NFC 52 112-3 : Transformateur triphasé de distribution publique (U max : 36 kV)
- ✚ Norme NFC 52 112-4 : Transformateur triphasé de distribution publique. Caractéristiques de puissance avec courants de charge non sinusoïdaux.
- ✚ Transformateur de distribution publique selon spécifications HN 52 S 20 et HN 52 S 24
- ✚ Normes de référence européennes et internationales :
- ✚ Norme C EI 60076

- ✚ Norme C EI 60076-2
- ✚ Norme C EI 60076-4
- ✚ Norme C EI 60076-5
- ✚ Norme C EI 76 parties 1, 2, 3, 3-1, 4, 5 et 8;
- ✚ Norme C EI 726 traitant les transformateurs de type sec. [4]

### I.2.5.mode de couplage et groupe de couplage

- a. Couplage au primaire les enroulements peuvent être connectés soit en étoile(Y) soit en triangle(D).

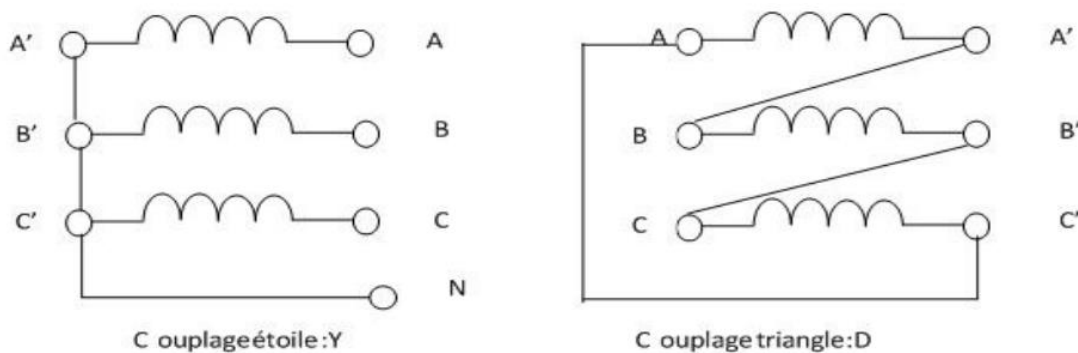


Figure I.4 : couplages les enroulements primaires

Au secondaire les enroulements peuvent être couplés de 3 manières différentes : étoile(y), triangle(d) et zigzag(z)

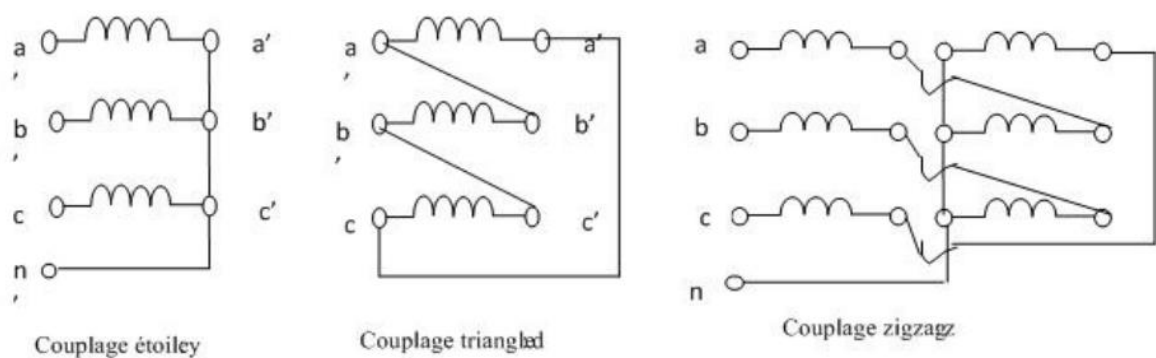
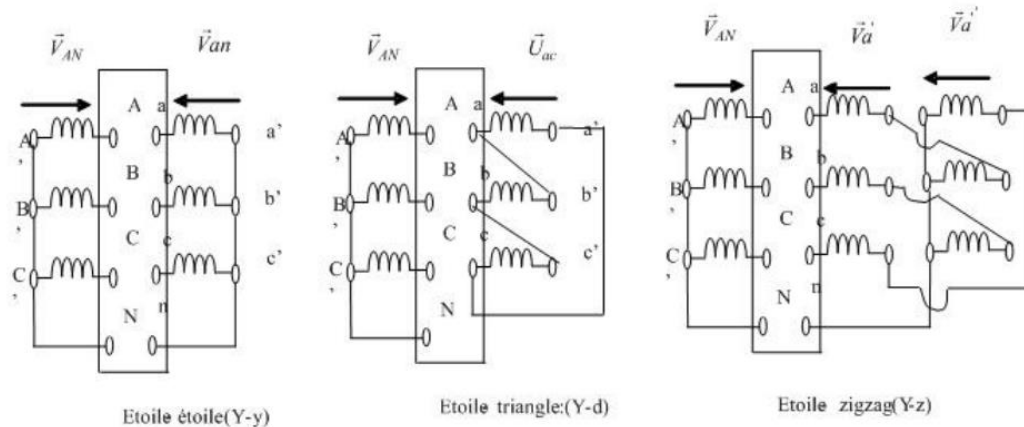


Figure I.5 : couplages les enroulements secondaires

On obtient ainsi 6 couplages possibles entre primaire et secondaire :

- Y-y : étoile -étoile
- Y-d : étoile-triangle

- Y-z : étoile-zigzag
- D-y : triangle- étoile
- D-d : triangle -triangle
- D-z : triangle-zigzag



**Figure I.6 : couplages de transformateur**

- b. L'indice horaire : L'indice horaire représente le déphasage entre la tension simple haute tension  $V_{AN}$  et la tension simple basse tension  $V_{an}$ . Cette indication permet de mettre en parallèle des transformateurs et éviter qu'ils ne se court-circuitent entre eux. Le déphasage étant un multiple de  $30^\circ$ , ce dernier peut être ramené à un cercle que l'on peut séparer en 12 parts, d'où l'utilisation de l'indication "horaire".
- c. Conditions de couplage :
- ❖ Puissance: La puissance totale disponible est la somme des puissances des transformateurs. Si les puissances des transformateurs sont différentes, la puissance du plus gros transformateur ne doit pas dépasser deux fois la puissance du plus petit.
  - ❖ Réseau: Les transformateurs sont alimentés par le même réseau.
  - ❖ Connexions et indices horaires : Mêmes longueurs de connexion surtout côté BT. Même indice horaire de couplage.
  - ❖ Tensions : Les tensions de court-circuit égales à 10 % près ; tensions secondaires très peu différentes selon la charge (0,4 %).
- d. Choix du couplage : Le choix du couplage repose sur plusieurs critères :
- La charge nécessite la présence du neutre Le secondaire doit être connecté soit en étoile soit en zigzag
  - Le fonctionnement est déséquilibré (courant de déséquilibre dans le neutre  $I_n$  est  $V_A$  supérieur à 0.1 le courant nominal), le secondaire doit être couplé en zigzag

- Coté haute tension on a intérêt à choisir le couplage étoile (moins de spire à utiliser)
- Pour les forts courants, on préfère le couplage triangle [5].

### I.2.6. Refroidissement :

Dans les transformateurs de puissance immergés dans l'huile, le refroidissement s'effectue via cette huile circulant en circuit fermé de la partie active, siège des pertes, vers une source froide à laquelle il abandonne des calories. Celle-ci peut être :

- directement la surface de la cuve pour les petites puissances
- des Aéroréfrigérant (Figure I.7) qui sont constitués de nombreux tubes à ailettes ventilés
- des radiateurs (Figure I.8) permettant un échange par convection naturelle avec l'air amb
- des hydro réfrigérants forçant un échange avec un circuit d'eau sép. [6]



Figure I.7 : Aéroréfrigérant et Radiateurs sur transformateur

### I.2.7. Les paramètres de transformateur :

#### a) Rapport de transformation

Le rapport de transformation triphasé dépend de  $N_1$  et  $N_2$  les nombres de spires au primaire et au secondaire et du couplage

Dans le cas idéal le rapport de transformation est donné sous la forme :  $m = \frac{U_{ab}}{U_{AB}} = \frac{i_2}{i_1} = \frac{u_1}{u_2}$   
 $= \frac{N_2}{N_1}$

b) Schéma électrique équivalent :

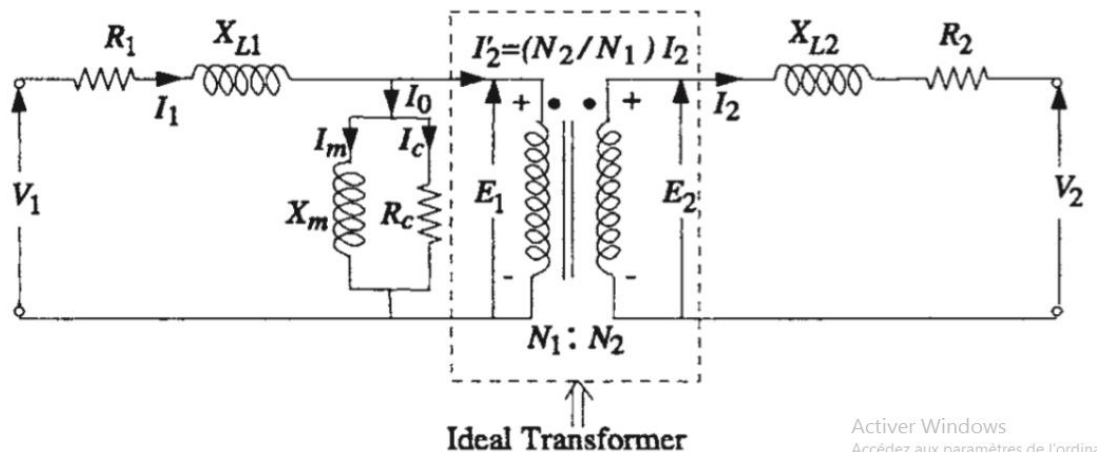


Figure I.8 : Schéma électrique équivalent du transformateur

Avec :

- $V_1$  et  $V_2$  tensions primaire et secondaire
- $I_1$  et  $I_2$  courants primaire et secondaire
- $I_0$  courant à vide
- $E_1$  et  $E_2$  tensions à vide idéales primaire et secondaire
- $N_1$  et  $N_2$  nombre de spires des enroulements primaire et secondaire
- $R_1$  et  $R_2$  résistance des enroulements primaire et secondaire
- $X_{L1}$  et  $X_{L2}$  inductance de fuites des enroulements primaire et secondaire
- $R_C$  pertes fer
- $X_m$  réactance magnétisante

Les éléments  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $N_1$  et  $N_2$  fixent les tensions nominales et le rapport de transformation à vide.

Les éléments  $R_1$  et  $R_2$  sont les résistances électriques des enroulements, et les pertes Joule seront principalement dues au passage des courants  $I_1$  et  $I_2$  de charge dans ces résistances.

Les réactances  $X_{L1}$  et  $X_{L2}$  correspondent aux flux de fuites de chacun des enroulements. L'impédance équivalente  $(X_{L1} + (N_2/N_1)^2 * X_{L2})$  ramené au primaire par exemple représente le

flux de fuites de l'ensemble des deux enroulements. Elle induit une chute de tension, fonction de la charge, représentative de l'impédance de court-circuit du transformateur. Elle est fortement influencée par la configuration géométrique des enroulements entre eux.

c) Diagramme de Kapp :

Les tensions, courants et flux magnétiques du transformateur peuvent être représentés selon des diagrammes vectoriels appelés diagrammes de Kapp. Il y a le diagramme du côté primaire (a) et du côté secondaire (b).

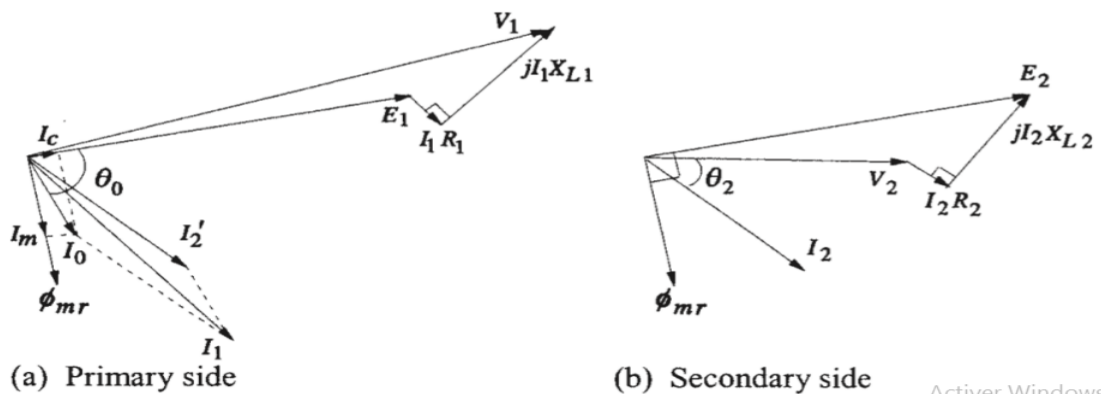


Fig.I.9 : diagramme de Kapp

d) Bilan des puissances:

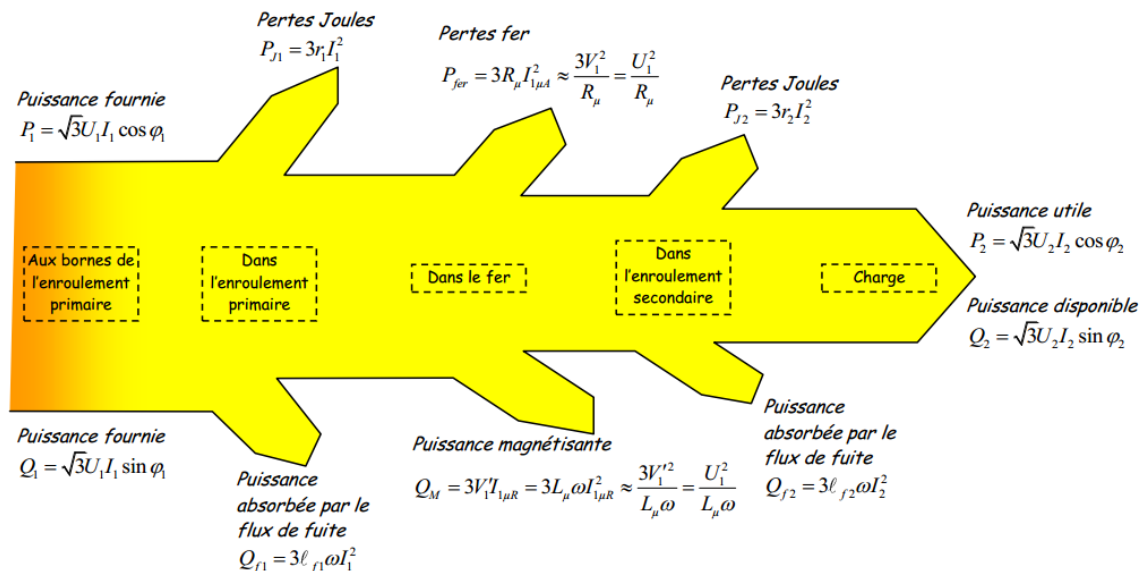


Fig.I.10 : Bilan de puissance

## e) Rendement d'un transformateur :

Le rendement ( $\eta$ ) d'un transformateur est défini comme le rapport de la puissance active au secondaire sur la puissance active au primaire.[3]

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (I.1)$$

**I.4. Les différents types de transformateurs :**

- ❖ Transformateur de mesure : Transformateur utilisé pour adapter la gamme et assurer l'isolation par rapport au dispositif mesuré d'un voltmètre ou d'un ampèremètre.
- ❖ Transformateur de courant : Transformateur de mesure abaisseur de courant (donc élévateur de tension), soit :  $m > 1$ . On l'utilise notamment pour mesurer l'intensité d'un courant fort. Le primaire peut alors se réduire à une seule spire ! Ce type de transformateur s'utilise avec secondaire en court-circuit (dans le cas contraire, la tension apparaissant au secondaire pourrait être très élevée).
- ❖ Transformateur d'impédance : Transformateur utilisé pour adapter l'impédance de deux circuits. Exemples : en audio, sortie d'un ampli BF dont la charge est un haut-parleur d'impédance normalisée ( $8\Omega$  à  $1000\text{Hz}$ ) ; en réseaux, adaptation d'impédance entre lignes de normes différentes.
- ❖ Transformateur d'impulsions : Transformateur utilisé pour la commande (isolée) de gâchette des thyristors et des triacs. Il est important de respecter le sens de branchement des bobinages, puisque l'impulsion de courant que le transformateur transmet est orientée dans le sens de conduction des semi-conducteurs.
- ❖ Transformateur d'isolement : Transformateur tel que  $m = 1$ . Utilisé pour assurer une isolation galvanique entre circuits, ou encore adapter le régime de neutre (schéma de mise à la terre) aux besoins de l'installation.
- ❖ Transformateur à écran : Transformateur d'isolement incluant un écran électrostatique (utilisation : CEM)
- ❖ Transformateur de sécurité : Transformateur à écran à isolation renforcée (utilisation : CEM et sécurité électrique)
- ❖ Transformateur à point milieu : Transformateur dont le primaire ou le secondaire possède une borne de connexion supplémentaire au milieu de l'enroulement. Permet un schéma symétrique

- ❖ Autotransformateur : Transformateur simplifié à un seul enroulement. Ne permet pas l'isolation galvanique, mais autorise un réglage fin de la tension secondaire par déplacement du curseur servant de connexion de sortie sur l'enroulement.

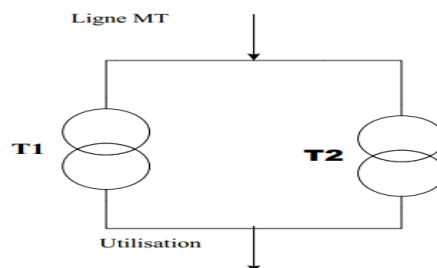
### I.5.Mises en parallèle :

But de marche en parallèle est : Répondre à une demande croissante en énergie électrique la figure est un exemple, généralement T1 et T2 sont de même ordre de puissance pour garantir un bon rendement de l'ensemble. Le courant qui s'établit entre les transformateurs mis en parallèle ne perturbe pas anormalement la répartition des charges sous réserve que :

- les différents appareils soient alimentés par le même réseau
- l'on s'efforce d'avoir entre les bornes secondaires des différents appareils et le disjoncteur de couplage, des connexions de même longueur et de mêmes caractéristiques
- le constructeur soit prévenu dès l'offre. Il prendra alors toutes dispositions pour que les différents transformateurs aient :
  - des couplages (triangle étoile, étoile zigzag, etc.) avec indices horaires compatibles
  - des tensions de court-circuit égales à 10 % près
  - une différence des tensions au secondaire des divers appareils, entre phases correspondantes ou entre ces phases et le neutre, inférieure à 0,4 %.

Pour ces différentes raisons, il est très important qu'il y ait une compatibilité parfaite entre les appareils montés en parallèle.

Toutes précisions devront être données au constructeur lors de la consultation concernant les conditions d'utilisation afin d'optimiser le rendement de l'unité de transformation et d'éviter échauffements anormaux, pertes cuivre inutile [2]



**Figure 1.11 : marches en parallèle des transformateurs**

**I.6.Transformateur de puissance:****I.6.1. Généralité:**

On distingue essentiellement deux technologies : Les transformateurs à diélectrique liquide (ou immergés) et les transformateurs dits "secs".

- ✓ Les transformateurs à diélectrique liquide :

Le circuit magnétique et les enroulements sont immergés dans un diélectrique liquide qui assure isolation et évacuation des pertes calorifiques du transformateur. Ils sont utilisés pour :

- Les postes non surveillés car ils ne nécessitent pas d'entretien
- Les ambiances sévères si le revêtement de la cuve est adapté

Par contre, l'emploi de ces transformateurs pose le problème d'éventuelles pollutions à la suite de fuites de diélectrique (on utilise donc un bac de rétention) et sont dangereux en cas d'incendie (fumées toxiques).

- ✓ Les transformateurs secs :

Le circuit magnétique est isolé dans une matière isolante sèche. Le refroidissement est assuré par l'air ambiant. Ils sont utilisés dans des locaux où les conditions de poussière, d'humidité et de température sont maîtrisées. Ils sont notamment utilisés pour les grands bâtiments car ils présentent peu de risque en cas d'incendie.

**I.6.2. Rôle importante :**

- ❖ Le rôle du transformateur est d'adapter le niveau de tension aux nœuds de connexion. Il adapte aussi les indices horaires. En effet, si les réseaux 400kV et 225kV ont les mêmes indices horaires, ce n'est absolument pas le cas des autres réseaux. En prenant les réseaux THT comme référence tandis que le réseau 63 kV des régions sud-est et sud-ouest a pour indice horaire 11.

Cette diversité est encore plus grande si on s'intéresse aux réseaux HTA et BT.

- ❖ Un autre rôle important des transformateurs insérés dans les réseaux d'énergie est leur contribution au réglage du niveau de tension en fonction des conditions de charge du réseau. Ceci est réalisé par modification de leur rapport de transformation au moyen de changeurs de prises

- ❖ Un transformateur participe aussi à l'adaptation (limitation) des courants de défauts du réseau dans les cas équilibrés (court-circuit triphasés) ou déséquilibrés (court-circuit monophasés ou biphasés). Il permet aussi d'isoler deux parties d'un réseau afin, par exemple, de changer de régime de neutre entre l'amont et l'aval du transformateur. Enfin, il peut participer à l'atténuation ou à l'élimination de certaines perturbations harmoniques.[7]

### **I.6.3. Méthode de choix de nombre et du la puissance :**

#### **A - Diagramme de charges :**

On appelle diagramme de charges, le graphe qui représente la variation de la charge électrique en fonction temps. La charge électrique peut être, l'intensité du courant ou la puissance active ou réactive absorbée. Elle est variable et aléatoire.

On distingue diverses sortes de diagramme :

- Journalier
- Mensuel
- Semestriel
- Annuel

#### **B – Puissances :**

- Les différentes puissances en triphasé : Pour le triphasé, les grandeurs  $U$ , tension composée et  $I$ , courant en ligne, peuvent toujours être mesurées. C'est pourquoi, toutes les formules donnant les différents types de puissances utilisent ces grandeurs.
  - La puissance active  $P$  :  $P = \sqrt{3} U I \cos \phi$  en [W].
  - La puissance réactive  $Q$  :  $Q = \sqrt{3} U I \sin \phi$  en [var].
  - Si  $P$  et  $f_p$  connus :  $Q = P \tan \phi$
  - La puissance apparente  $S$  :  $S = \sqrt{3} U I$  en [VA]
  - Le facteur de puissance  $f_p$  ( $\cos \phi$ ) :  $f_p = \frac{P}{S}$
- Puissance calculée : On appelle puissance calculée, une certaine puissance constante qui provoque le même effet thermique dans les éléments du système que la charge variable. Elle est utilisée pour le choix et le dimensionnement des équipements électriques.

L'effet thermique agit sur les isolants en accélérant le vieillissement. Une augmentation de la température de 10° C diminue la durée de vie de moitié. L'équipement électrique en service atteint sa température maximale à un temps égal trois fois la constante de temps. Le temps de référence donc, sera égal à 30 min.  $P_{\text{cal}} = P_{\text{moy max}}^{30}$  est la puissance moyenne maximale pendant une durée de 30 min.

$$P_{\text{cal}} = P_{\text{moy max}}^{30} \quad (\text{I.2})$$

- Puissance active moyenne : On appelle puissance moyenne, la puissance constante consommée et déduite à partir de la relation mathématique suivante:

$$P_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (\text{I.3})$$

$$P_{\text{moy}} = \frac{w}{T} \quad (\text{I.4})$$

Où  $p(t)$  est puissance instantanée,  $T$  la période et  $w$  l'énergie électrique.

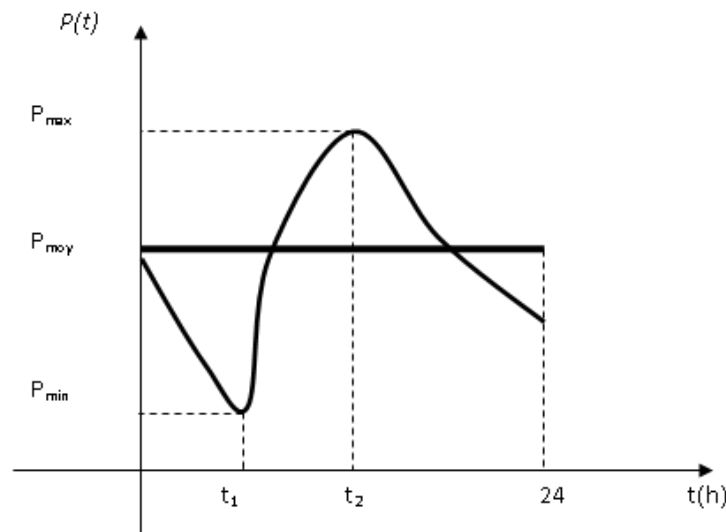
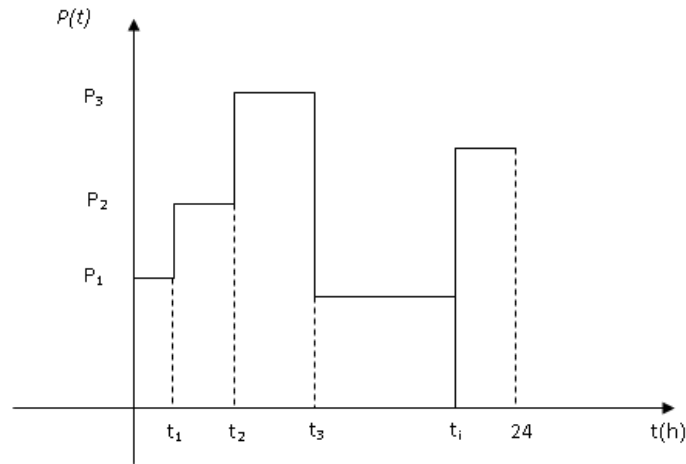


Figure I.12 : diagramme en charge

Construction du diagramme annuel de charges L'énergie électrique consommée annuellement est donnée par la relation suivante

$$w = p_1 t_1 + p_2 t_2 + p_3 t_3 + \dots + p_n t_n = \sum_{i=1}^n p_i t_i \quad (\text{I.5})$$

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (I.6)$$



**Figure I.13 : diagramme en charge journalier**

$T_{max}$  est le temps d'utilisation de la puissance maximale.

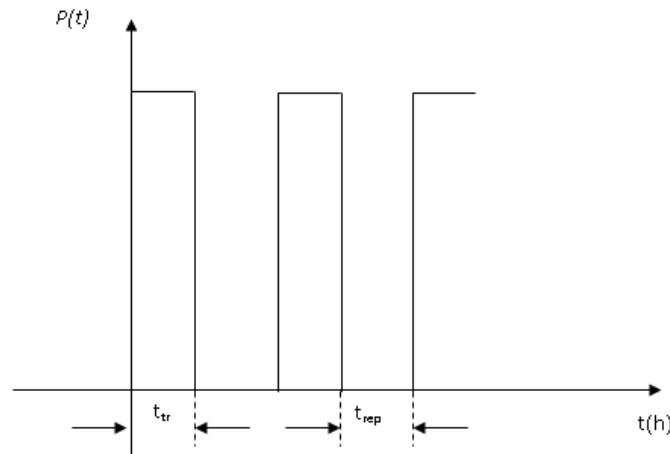
### C - Facteurs caractérisant le diagramme de charges

- Facteur de marche : Est le facteur qui représente le temps de fonctionnement de l'équipement électrique.

$$f_m = \frac{t_{tr}}{t_{tr} + t_{rep}} = \frac{t_{tr}}{t_c} \quad (I.7)$$

Avec:

- $T_{tr}$  : Temps de travail
- $T_{rep}$  : Temps de repos
- $T_c$  : Temps de cycle



**Figure I.14 : diagramme en charge annuel**

- Facteur de demande : Est le facteur qui représente le rapport entre la puissance calculée et la puissance nominale.

$$f_d = \frac{P_{cal}}{P_n} \quad (I.8)$$

Avec

$$P_n = \sum_{i=1}^n P_{ni} \quad (I.9)$$

Le facteur de demande est toujours égal ou inférieur à l'unité. Elle nous donne la possibilité de déterminer la puissance calculée. Généralement, on le détermine à partir des statistiques.

- Facteur d'utilisation : Est le rapport entre la puissance moyenne et la puissance nominale.

$$f_u = \frac{P_{moy}}{P_n} \quad (I.10)$$

$$f_u = \frac{\sum_{i=1}^n f_{ui} P_{ni}}{\sum_{i=1}^n P_{ni}} \quad (I.11)$$

$$f_u = \frac{\sum_{i=1}^n P_{moyi}}{\sum_{i=1}^n P_{ni}} \quad (I.12)$$

L'indice i représente le caractère individuel des équipements électriques.

$$f_u = \frac{W_r}{W_t} \quad (I.13)$$

Ce rapport nous donne une définition optimale du facteur d'utilisation.

Avec:

- $W_r$ : L'énergie électrique consommée réellement.
- $W_t$ : L'énergie électrique consommée théoriquement.

$$W_r = P_{moy} T \quad (I.14)$$

$$W_t = P_n T \quad (I.15)$$

À condition que chaque consommateur consomme la puissance nominale.

- Facteur de maximum : On appelle facteur de maximum, le rapport entre la puissance moyenne maximal à température de 30°C et la puissance moyenne.

$$f_{max} = \frac{P_{moy}^{30}}{P_{moy}} \quad (I.16)$$

$$f_{max} = \frac{P_{cal}}{P_{moy}} \quad (I.17)$$

$$f_{max} = \frac{P_{cal}}{P_{moy}} \frac{P_n}{P_n} = \frac{f_d}{f_u} \quad (I.18)$$

Le facteur d'utilisation  $f_u$  est indiqué dans la documentation par exemple :

- Moteur électrique à charge nominale (Ventilateur, pompe, compresseur,...) en régime continu  $f_u = 0.65$ ;  $\cos\varphi = 0.8$

- Moteur électrique des machines-outils (Tour, perceuse, fraiseuse, raboteuse,...)  $f_u = 0.15 \div 0.35$ ;  $\cos\varphi = 0.6 \div 0.65$

Le facteur de maximum  $f_{\max}$  est calculé à partir du facteur d'utilisation et le nombre efficace  $n_{\text{eff}}$ .

- Nombre efficace : Le nombre efficace des consommateurs c'est le nombre de consommateurs à puissance identique qui représente les consommateurs réels à puissance variable.

$$n_{\text{eff}} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n P_{ni}\right)^2}{\sum_{i=1}^n P_{ni}^2} \quad (\text{I.20})$$

La figure suivant donne la valeur du facteur de maximum en fonction du facteur d'utilisation et le nombre efficace.

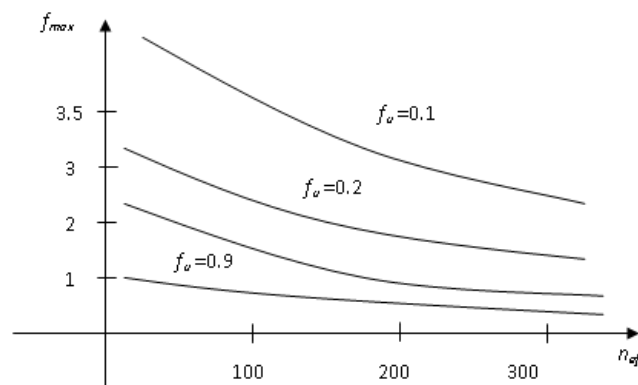


Figure I.15: diagramme de charge

#### D - Méthode de calcul de charges électriques :

- Calcul de charges électriques d'après  $f_d$  :

$$P_{\text{cal}} = f_d P_n \quad Q_{\text{cal}} = P_{\text{cal}} \tan(\varphi) \quad S_{\text{cal}} = \sqrt{P_{\text{cal}}^2 + Q_{\text{cal}}^2} \quad (\text{I.21})$$

Cette méthode n'est pas caractérisée par une bonne précision. Elle est appliquée pour un groupe de consommateurs. Elle est conseillée pour l'estimation approximative des charges électriques des ateliers et des entreprises

- Méthode de consommation spécifique : En sachant le volume de la production annuelle  $V$  [ $m^3$ ] et la consommation spécifique  $W_0$  [KWh/ $m^3$ ].

$$W = W_0 V \quad (I.22)$$

$$P_{cal} = \frac{V W_0}{T_{max}} \quad (I.23)$$

Cette méthode est adaptée aux entreprises qui travaillent en régime continu. Elle est précise. La consommation spécifique est citée dans les catalogues des entreprises.

- Méthode de facteur de maximum :

$$P_{cal} = f_{max} P_{moy} = f_{max} f_u P_n \quad (I.24)$$

$$Q_{cal} = f_{max}^Q Q_{moy} \quad (I.25)$$

Si le nombre de consommateur est très grand, il sera difficile de déterminer directement le nombre efficace, pour cela il est conseillé de les diviser en sous-groupes selon le facteur d'utilisation :

- 1er sous-groupe
- 2ème sous-groupe
- 3ème sous-groupe
- 1er sous-groupe

L'organigramme suivant présente comment peut-on calculer le nombre efficace selon le nombre de consommateurs

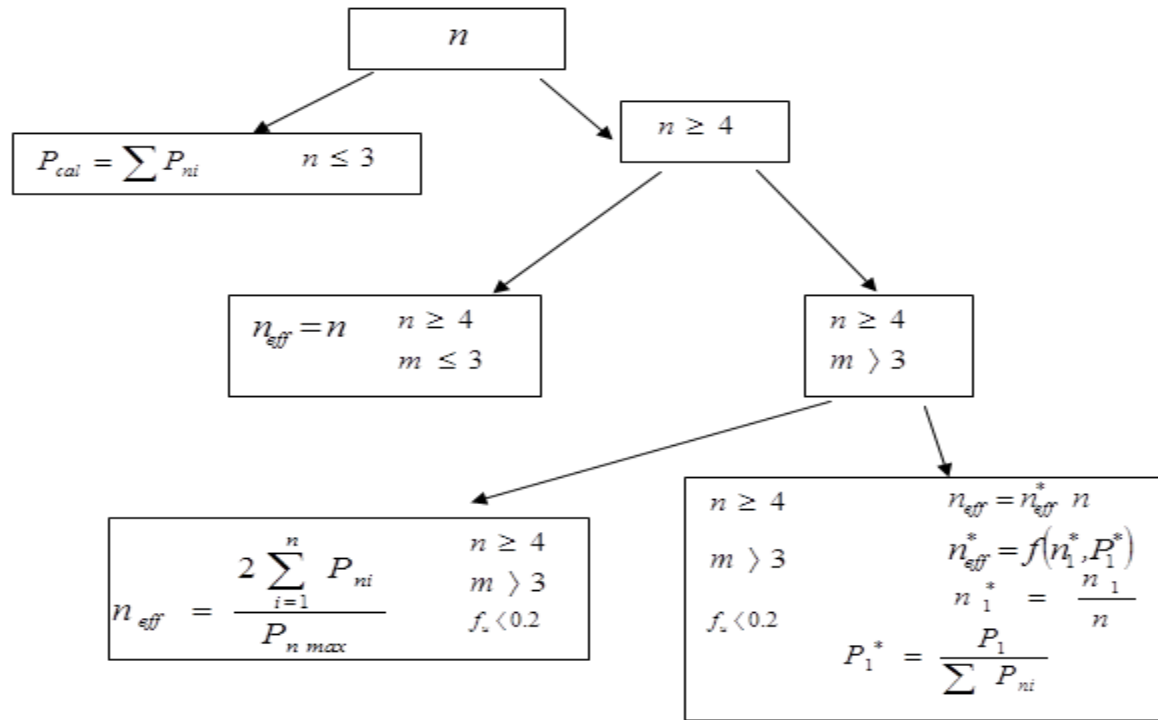


Fig.I.16 : le nombre efficace

$$m = \frac{P_{n \max}}{P_{n \min}} \quad (I.26)$$

**Remarque :** Si  $n_{eff} > n$  dans ce cas, on prend la valeur de  $n$ .

$$n_{eff} = n_{eff}^* n \quad ; \quad n_{eff}^* = f(n_1^*, P_1^*) \quad ; \quad n_1^* = \frac{n_1}{n} \quad ; \quad P_1^* = \frac{P_1}{\sum P_{ni}}$$

$N_1$  est le nombre des consommateurs dont la puissance est supérieure ou égale à la moitié de la puissance nominale du consommateur le plus puissant.

$P_1$  est la puissance totale de  $n_1$  consommateurs.

$$Q_{cal} = f_{max}^Q Q_{moy} \quad ; \quad f_{max}^Q = 1 \quad n_{eff} > 10 \quad ; \quad f_{max}^Q = 1.1 \quad n_{eff} \leq 10$$

➤ Méthode de la densité spécifique :

$$P_n = F p_o \quad (I.26)$$

$P_0$  est la puissance spécifique installée par unité de surface (Densité spécifique).  $F$  est la surface

$$P_{cal} = f_d P_n \quad Q_{cal} = P_{cal} \operatorname{tg}(\varphi) \quad (I.27)$$

Remarque : Cette méthode est valable uniquement pour les charges électriques à répartition uniforme [8].

### I.8. Les applications industrielles :

Les réseaux ferroviaires fonctionnant à l'électricité sont d'importants utilisateurs d'énergie électrique et disposent en général d'une infrastructure propre importante. Ils exploitent principalement deux types de transformateurs de puissance.

- ✚ Transformateurs de sous-station ferroviaires : ces appareils monophasés servent à l'alimentation des caténaires en 25 kV d'un côté et sont connectés sur le réseau 220 kV de l'autre.
- ✚ Transformateurs embarqués : ils sont présents dans les locomotives des trains ou métros et adaptent l'énergie transmise par les caténaires aux moteurs et auxiliaires électriques du train. Ce sont des appareils monophasés qui ont un encombrement mécanique extrêmement optimisé par rapport à la puissance qu'ils transmettent. Ils comportent aussi plusieurs jeux d'inductances indépendantes pour filtrer et lisser la tension dans les rames.

Certains industriels sont particulièrement électro intensifs comme les aciéries ou les industries électrochimiques qui ont des procédés par électrolyse. Ces industries possèdent la plupart du temps des transformateurs qui peuvent être utilisés à des charges importantes.

- ✚ Transformateurs de sous station électrique : certaines de ces industries sont alimentées directement par le réseau de transport haute tension 220 kV ou 90 kV et possèdent leur propre poste de transformation.
- ✚ Transformateurs de four : ces transformateurs situés juste avant les fours ou les bassins d'électrolyse peuvent alimenter des redresseurs de puissance (comme sur l'exemple de la Figure suivante, issue de (POSTIGLIONE, 2006)). Leur spécificité est de délivrer de forts courants, jusqu'à plusieurs dizaines, voire centaines, de kA, pour les processus industriels. La puissance de ces appareils est typiquement de plusieurs dizaines de MVA. De plus ces appareils sont très chargés et contraints en exploitation, ils vieillissent donc généralement plus vite que des transformateurs de réseau. Il arrive souvent que des

connexions internes ou des réglages très techniques soient mis en œuvre sur ces appareils pour différents besoins de régulation ou de redressement du courant (comme un transformateur avec 107 positions électriques de réglage de tension).

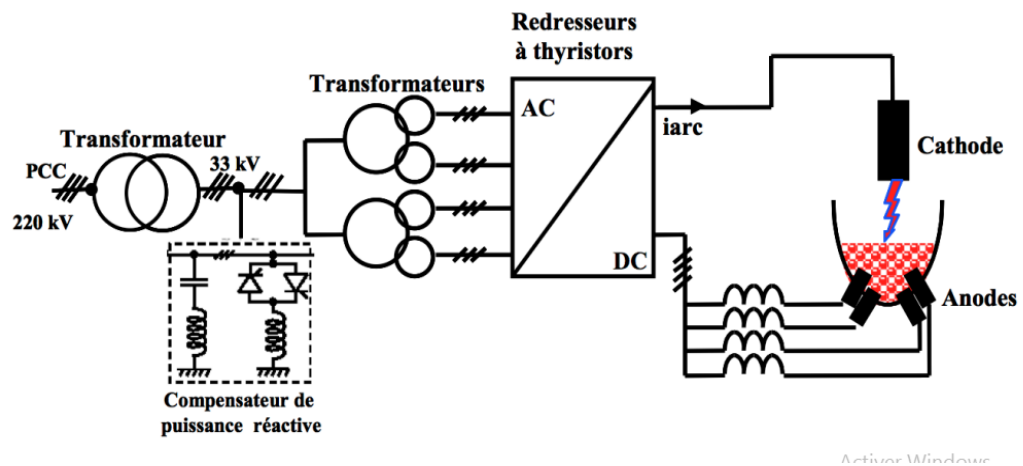


Figure I.17 : Exemple d'installation d'électrometallurgie four alimenté en courant continu

## I.9. Branchement et protection :

### I.9.1. Branchement :

Pour les besoins de branchement à la moyenne tension, le transformateur de type haut de poteau est équipé de traversées en porcelaine et celui de type cabine est équipé selon les cas, soit de traversées en porcelaine, soit de prises de courants.

Les traversées en porcelaines doivent avoir une ligne de fuite spécifique d'au moins :

- ✓ 16mm/kV pour le transformateur à isolement normal
- ✓ 25mm/kV pour le transformateur sur isolé
- ✓ 31mm/kV pour le transformateur spécial

Pour les besoins de branchement BT, les transformateurs type cabine ou haut de poteau de puissance 50 à 160kVA sont équipés de traversées en porcelaine de 250 A et les transformateurs type cabine de puissance 250 à 1250kVA sont équipés selon les cas, soit de traversées en porcelaine, soit de traversées de type passe-barre suivant spécification HN 52 S62 de courant assigné égal à :

- ✓ 1250 A pour les transformateurs de 250 à 800kVA;

- ✓ 2000 A pour les transformateurs de 1 000 et 1250 KVA.

Les transformateurs (et leurs lignes) doivent être protégés contre les surcharges et les courts-circuits qui peuvent survenir pendant leur utilisation et qui peuvent provoquer leur détérioration et mettre en danger les personnes et les installations.

### **I.9.2. Protection:**

Comme règle générale les protections sont les suivants :

- Protection de la sortie (charge):

De ce côté, existe la possibilité d'avoir des surcharges (puissance demandée plus importante que celle assignée) et des court-circuits.

- Protection de l'entrée (alimentation):

Aussi nous devons protéger seulement la ligne qui alimente le transformateur contre d'éventuels court-circuits qui pourraient se produire sur sa ligne, sur ses bornes ou à l'intérieur de celui-ci en cas de défaut des isolants.

Au moment de connecter le transformateur sur le réseau, celui-ci peut absorber une pointe de courant très élevé (pouvant être jusqu'à 25 fois la valeur nominale) qui ne dure que quelques millisecondes pour décroître rapidement jusqu'à stabilisation à la valeur assignée. [6]

### **Conclusion :**

Un transformateur électrique est un convertisseur qui permet de modifier les valeurs de la tension et de l'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique en un système de tension et de courant de valeurs différentes mais de même fréquence et de même forme avec un excellent rendement.

Qui étudie dans ce chapitre on a donné quelques généralités et notions de base sur un transformateur et les différents paramètres (rapport, puissance, tension primaire et secondaire, couplage des enroulements, rendement) et les différents types et le marché en parallèle

D'autre part en étude le transformateur de puissance est de transformateur de distribution pour sa fonction d'adapter la tension du réseau (HT) à la tension d'utilisation (BT). Et les méthodes de choix du nombre et de la puissance, les applications industrielles et sa branchement, sa protection