

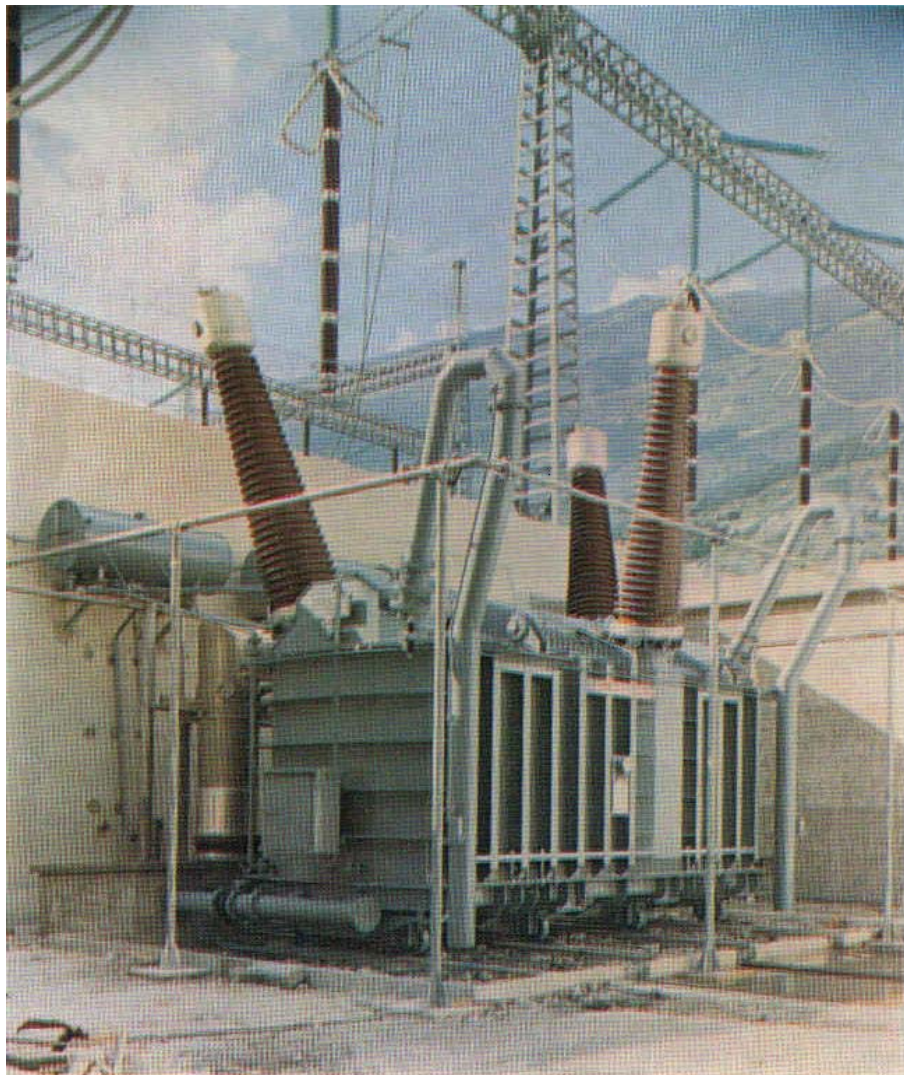
Chapitre

1

PRESENTATION GENERALE D' UN TRANSFORMATEUR DE PUISSANCE

I-1 FONCTION

Le transformateur a pour fonction de modifier la tension ou l'intensité d'une source de courant alternatif. Il est réversible et permet, soit l'abaissement, soit l'élévation de la tension. Donc il est possible de choisir la meilleure tension pour la production, le transport, la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique.



**fig(1-1) Transformateur triphasé
(départ d'une centrale)**

I-2 CONSTITUTION

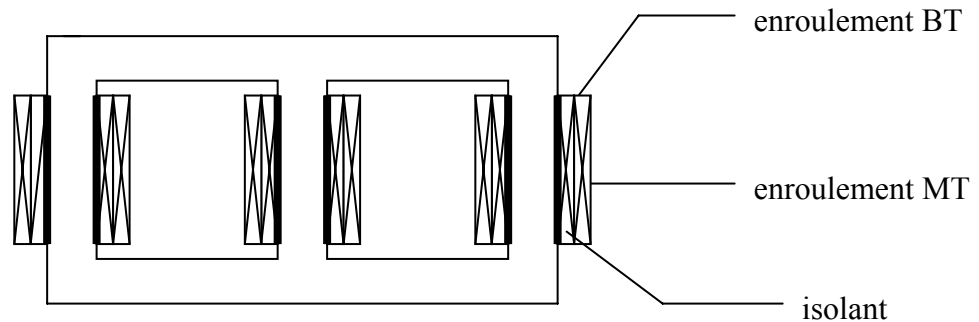
Un transformateur triphasé est constitué par :

I.2.1 une carcasse magnétique servant de circuit magnétique.

Il existe 3 types de carcasses magnétiques

♦ type à colonnes :

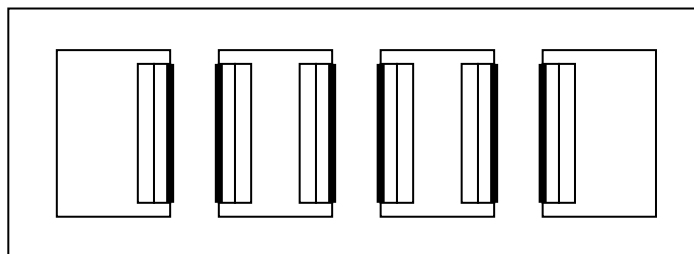
C'est le circuit magnétique le plus utilisé. Il est formé de 3 noyaux réunis par 2 culasses. Chaque noyau porte un enroulement primaire et un enroulement secondaire correspondant à chaque phase. L'avantage de la carcasse à colonnes est sa légèreté mais il admet une perte de flux



fig(1-2) circuit magnétique à trois colonnes

♦ type cuirassé :

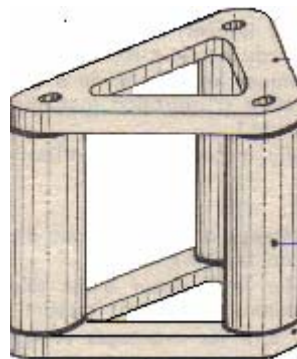
Le circuit magnétique est formé de 5 colonnes ou 5 noyaux réunis par deux culasses. Seuls les trois noyaux centraux portent les enroulements du transformateur. Le type cuirassé favorise la bonne circulation du flux mais il est lourd.



fig(1-3) circuit magnétique à cinq colonnes

♦ type isocem :

Le type isocem est très rare. Il est formé de 3 noyaux réunis par 2 culasses triangulaires.



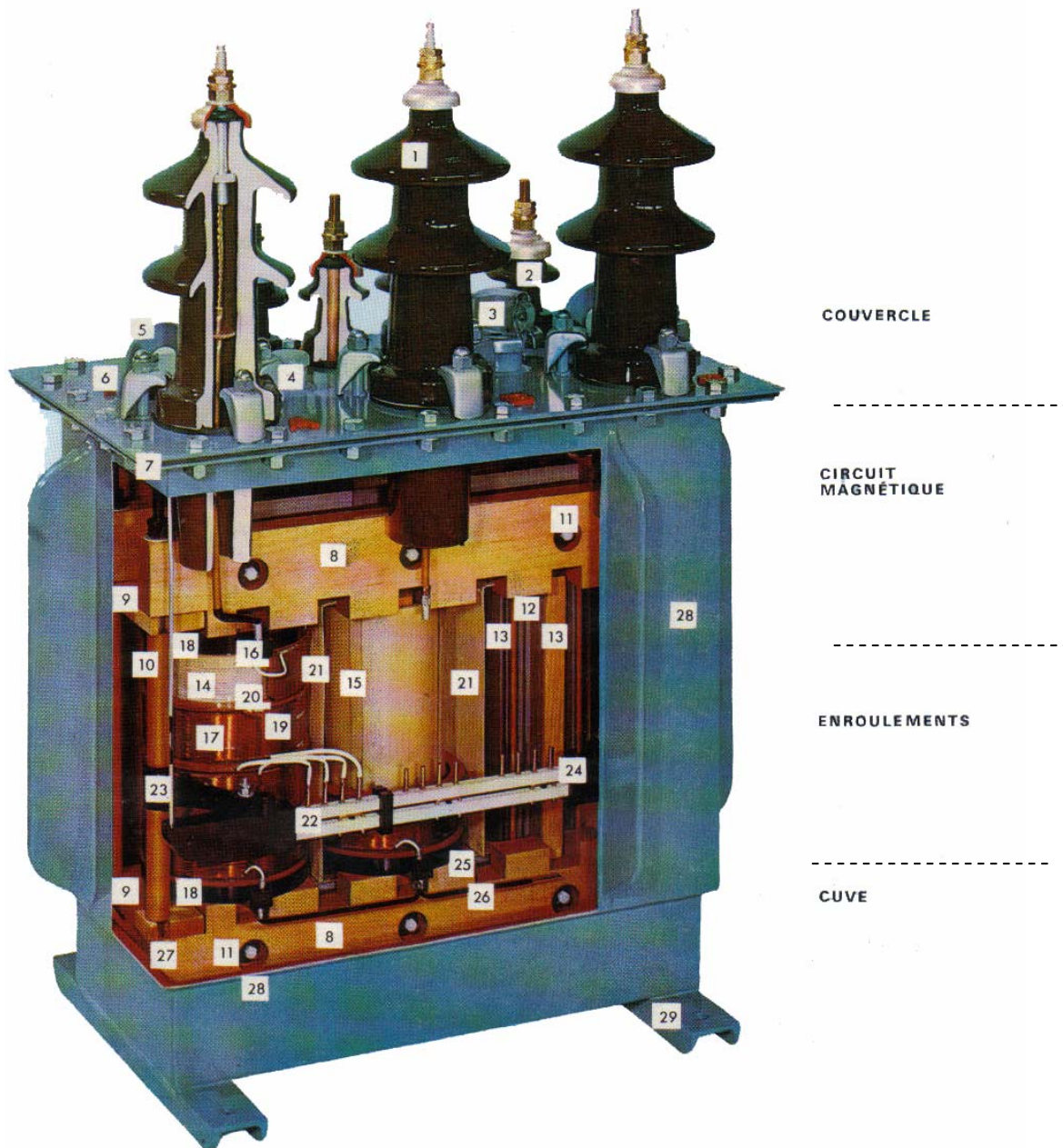
fig(1-4) circuit magnétique de type isocem

Le circuit magnétique est feuilleté et isolé entre eux pour réduire les pertes par courant de Foucault et par Hystérésis.

I.2.2 un enroulement primaire et un enroulement secondaire

L'enroulement primaire est bobiné sur l'enroulement secondaire.

I.2.4 des bornes d'entrée et de sortie et des traversées isolantes constituées par un conducteur en cuivre monté à l'intérieur d'une porcelaine.



fig(1-5) Coupe d'un transformateur de puissance

1-2- traversées isolantes 3- tête de commande du commutateur 4- bouchon de remplissage 5- anneaux de levage et de décuvage 6- trous dans les panneaux pour mise à la terre 7- joint de cuve 8-joues de serrage des carcasses magnétiques 9- cales d'appui 10-tiges d'assemblage 11- tiges de serrage des carcasses magnétiques 12- noyaux magnétiques 13- cales de guidage

et centrage 14- enroulements BT en cuivre 15-16- cales radiales entre cylindre BT et enroulements HT 17-18- enroulements HT en cuivre 19- bobine HT 20- colliers isolants entre bobines 21- écran de protection entre colonnes 22- commutateur à translation 23- gaine et câbles de commande du commutateur 24 support 25- isolants 26- connexions du neutre HT 27- bois de calage 28- cuve à plis 29- emplacement des galets orientables

I-3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

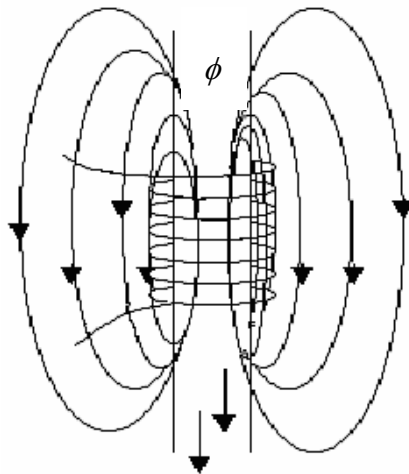
Lorsqu'on applique une tension aux bornes de l'enroulement primaire, un courant magnétisant va s'y créer. Il se produit alors autour de cet enroulement un champ magnétique alternatif. Le flux produit par ce champ à travers la surface du circuit est donné par

$$\phi = B.S \quad (1-1)$$

En considérant le nombre de spires N de la bobine d'enroulement primaire, l'expression du flux devient :

$$\phi = N.B.S \quad (1-2)$$

où S étant la section du circuit magnétique
B est le champ d'induction magnétique



fig(1-6) propagation du flux dans une branche du circuit

Quand ce flux traverse la section délimitée par l'enroulement secondaire, il donne naissance à une force électromotrice induite e de même période et de même forme que le courant primaire donnée par la loi de **LENZ** :

$$e = -N \left(\frac{d\phi}{dt} \right) = - \left(\frac{d\psi}{dt} \right) \quad (1-3)$$

Les forces électromotrices de chaque enroulement sont données par :

$$E = 4.44.n_i.f.\phi \quad (1-4)$$

f : étant la fréquence du réseau

ϕ : le flux magnétisant

n_i : nombre d'enroulement

Les 3 flux triphasés circulant dans les noyaux induisent dans les 3 enroulements secondaires des tensions triphasées. Le primaire constitue, vis à vis de la source, un récepteur.

Le secondaire se comporte comme un générateur à l'égard de la charge, il est le siège d'une force électromotrice.

En somme, un transformateur doit assurer les fonctions suivantes :

♦ fonctions magnétiques

création du champ magnétique alternatif par l'enroulement primaire.
canalisation du flux par le circuit magnétique.

♦ fonctions électriques

production du courant induit par l'enroulement secondaire.
réception du courant primaire et envoi du courant secondaire par les bornes et les traversées isolantes.

♦ fonctions mécaniques

fixation et manutention par chariot muni de galets et anneaux de levage
refroidissement par des dispositions diverses
support et protection de l'ensemble à l'aide d'une cuve muni de couvercle
Surveillance et entretien par niveau d'huile, thermomètre, et dispositif de vidange.

I-3-1 Fonctionnement en régime équilibré

Les enroulements primaires constituent, pour le réseau primaire, une charge équilibrée même si le transformateur est chargé. Les tensions aux bornes de chacun des enroulements primaires sont, respectivement, les tensions triphasées du réseau primaire quel que soit le couplage des bobinages.

On définit le rapport de transformation m par

$$m = \frac{U_2}{U_1} \quad (1-5)$$

U_1 : tension appliquée aux bornes de l'enroulement primaire

U_2 : tension de sortie du transformateur

La constance du flux dans le transfo exige l'égalité des ampère-tours. Ceci se traduit par :

$$N_1 \bar{I}_1 + N_2 \bar{I}_2 = N_1 \bar{I}_0$$

D'après l'hypothèse de Kapp, le court magnétisant à vide est négligeable devant le courant primaire I_1 d'où on obtient la relation :

$$N_1 \cdot I_1 + N_2 \cdot I_2 = 0 \quad (1-6)$$

Par suite, on a:

$$N_1 \cdot I_1 = - N_2 \cdot I_2$$

et

$$\frac{N_2}{N_1} = - \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} \quad \text{d'où}$$

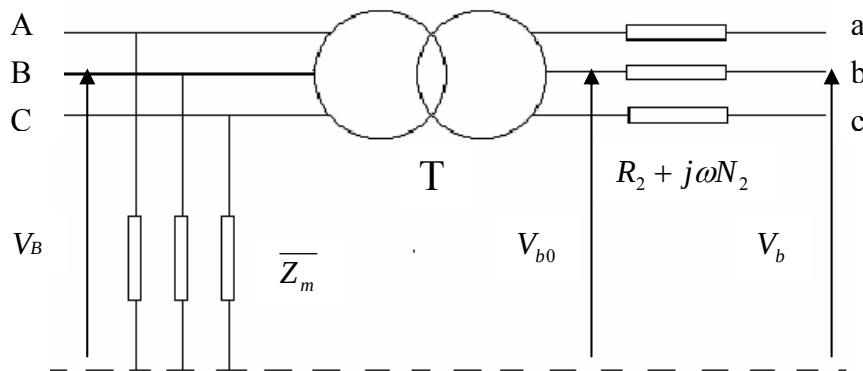
$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (1-7)$$

Chaque noyau fonctionne, avec ses 2 enroulements indépendamment des autres, comme un transfo monophasé. La chute de tension se produit de la même façon que dans un transfo monophasé.

En somme, en régime équilibré, tous les couplages fonctionnent correctement au primaire qu'au secondaire, chaque phase étant indépendante.

A partir de l'hypothèse de Kapp, le schéma équivalent d'un transformateur triphasé devient simple. Si l'on ramène le transfo au secondaire, le schéma se compose d'un transfo triphasé parfait avec le même rapport de transformation et le même indice horaire en série avec un dipôle $\overline{Z_2}$ dans chaque phase. Les dipôles représentent les chutes de tension Δv dans chaque phase lors du fonctionnement en charge. Et on place sous chaque tension simple primaire une impédance magnétisante Z_m absorbant les pertes à vide.

Rappelons qu'un transformateur parfait est un transfo qui n'admet aucune perte.



fig(1-7) schéma équivalent d'un transformateur en régime équilibré

$\overline{Z_2} = R_2 + j\omega N_2$: charge appliquée au transformateur

$V = V_{b0} - V_b$: chute de tension

$\overline{Z_m} = R_m + j X_m$: impédance magnétisante

T : (m, θ) : transformateur parfait de rapport de transformation m et d'indice horaire θ

I-3-2 Fonctionnement en régime déséquilibré

Le système triphasé se décompose en trois systèmes : système direct, système inverse et système homopolaire

Les déséquilibres dans les circuits triphasés sont causés, soit par un défaut dissymétrique en un point quelconque du réseau, soit par des charges déséquilibrées au niveau du secondaire.

Le déséquilibre le plus grave survient lorsqu'une seule phase du secondaire est chargée.

I-4 COUPLAGE ET INDICE HORAIRE

I-4-1 Couplage

Un transformateur de puissance se distingue par le couplage de ses bobinages. Il existe 3 types de couplage pour les enroulements :

- en étoile (Y)
- en triangle (Δ)
- en zig-zag (Z)

Par convention, les bornes des enroulements moyenne tension (MT) sont représentées par A, B, C couplées à celles du réseau par X, Y, Z. Pareillement, les enroulements secondaires par a, b, c couplées aux bornes de la charge x, y, z.

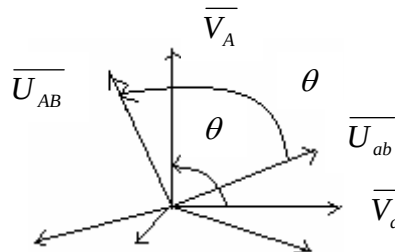
I-4-2 Indice horaire

L'indice horaire est l'heure indiquée par une horloge dont la grande aiguille est superposée à la force électromotrice de l'enroulement MT et placée sur la division 12, la petite aiguille superposée à la fem de l'enroulement BT. L'angle indiqué est multiple de $\frac{\pi}{6}$ ou 30° . Le

déphasage θ est obtenu par le produit de l'indice horaire par $\frac{\pi}{6}$.

$$\theta = i \cdot \frac{\pi}{6} \quad (1-10)$$

Ceci est équivalent au déphasage par phase de la tension au primaire et de la tension de sortie. En réalité, chaque type de transformateur possède plusieurs indices. En permutant les tensions au primaire tout en respectant l'ordre de succession des phases, on modifie l'indice horaire de 4 ou 8. En inversant le sens des enroulements du primaire ou du secondaire, l'indice horaire est modifié de 6.



fig(1-8) déphasage des tensions de phase par rapport aux tensions composées

I-5 CARACTERISTIQUES DES TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE

Ces caractéristiques sont indiquées sur la plaque signalétique.

1. la puissance apparente nominale S_n

$$S_n = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 \quad (1-11)$$

2. les tensions primaire et secondaire composées ou entre phases U_{1n} et U_{2n}
3. les intensités des courants secondaires en ligne I_{2n}
4. le facteur de puissance secondaire $\cos \varphi$: c'est la valeur du facteur de puissance de la charge pour un fonctionnement nominal
 - . la tension de court-circuit (en %)

5. Le rapport de transformation m

$$m = \frac{U_{20}}{U_{10}} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2} \quad (1-12)$$

6. L'indice horaire i .

7. le type de refroidissement du transformateur

I-6 REFROIDISSEMENT D'UN TRANSFORMATEUR

Lors de son fonctionnement, le transformateur de puissance s'échauffe considérablement. Il est alors nécessaire d'avoir un bon système de refroidissement du transformateur pour pouvoir délivrer le maximum de puissance

I-6-1 Causes de l'échauffement

L'échauffement des transformateurs est dû essentiellement par :

- les pertes dues à l'effet Joule dans les enroulements
- les pertes par Hystérésis et par courants de Foucault dans le circuit magnétique.

Ceux-ci entraînent une perte d'énergie au niveau du transfo d'où baisse du rendement. Il y a aussi une diminution des qualités diélectriques des éléments du transformateur et vieillissement prématuré des isolants qui constitue un risque dangereux.

Alors, il existe un échauffement limite $\theta_{\max}$ pour une durée de vie prolongée des isolants :

- ♦ pour les enroulements sans circulation d'huile $T_{\max} = 60^\circ$
- ♦ pour les enroulements avec circulation d'huile $T_{\max} = 65^\circ$
- ♦ pour les circuits magnétiques $70^\circ < T_{\max} < 75^\circ$

I-6-2 Refroidissement du transformateur

Pour refroidir un transformateur de puissance, on a les solutions suivantes :

- choisir des tôles à très faibles pertes avec circuit magnétique à joints appropriés
- employer un refroidisseur adéquat à l'intérieur du transformateur

♦ facteur de refroidissement

Les facteurs favorisant le refroidissement sont :

- augmentation de la surface avec le fluide de refroidissement : à ailettes ou par radiateur.
- diminution de la température du fluide : refroidissement par hydro ou aéroréfrigérant.
- Augmentation de la vitesse de circulation du fluide par l'intermédiaire d'une pompe de circulation

♦ mode de refroidissement

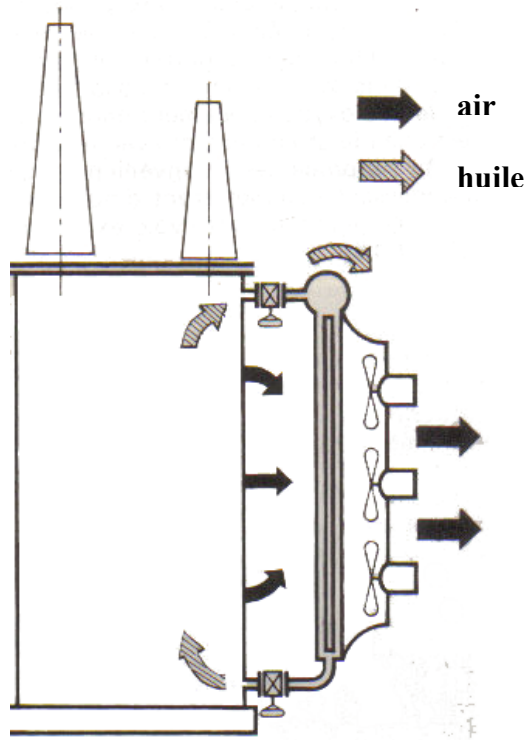
Le refroidissement se fait soit directement par air, soit au moyen d'un fluide intermédiaire comme de l'huile ou du pyralène dans lequel est plongé le transformateur.

– refroidissement à air : la partie active du transformateur (le circuit magnétique et les enroulements) est en contact direct avec l'air. L'air circule en circuit ouvert et la circulation s'effectue soit par tirage naturel, soit par ventilation forcée.

– refroidissement à huile ou à pyralène : le fluide sert de diélectrique et d'échangeur de chaleur entre la partie active du transfo et la partie froide servant de radiateur. Le choix du fluide dépend des conditions de sécurité et du milieu où se trouve le transformateur. C'est

l'huile qui est le plus souvent utilisée à cause de sa masse volumique plus grande et résiste mieux à la chaleur.

La figure suivante décrit la circulation du fluide dans un système de refroidissement avec aéroréfrigérant.



fig(1-9) circulation de liquide de refroidissement dans un transformateur