

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

En vue de l'obtention du diplôme

Master Professionnel en Génie Mécanique

Option: Énergétique

Spécialité : Froid Chauffage et Climatisation

Thème

**Etude d'un échangeur tubulaire installé sur un
alternateur de 176 MW de la Centrale
Thermique de Cap-Djinet**

Proposé par :

Mr. ADJOUTI Mohamed

Dirigé par:

Mr. MOHELLEBI Hakim

Réalisé par :

Mr .ZERROUKHI Abdel kader

Mr .SMAILI Lounes

PROMOTION
2013/ 2014

Remerciements

Au terme de ce travail nous tenons à remercier en premier lieu Dieu qui nous a donné la force pour mener à bien l'étude de ce projet.

Nous exprimons nos vifs remerciements à notre promoteur M H,MOHELLEBI, enseignant à l'institut de Génie Mécanique de Tizi-Ouzou d'avoir dirigé notre travail.

J'ai à cœur également de remercier M ADJOUTI MOHAMED De nous avoir aidés au sein de la centrale.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants de l'institut de Génie Mécanique de nous avoir suivis le long de notre cursus universitaire en particulier M MEKHOUF et M FAROUK pour leur aide et leur disponibilité à notre égard.

Nous remercions également le président et les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en jugeant notre travail.

En guise de reconnaissance, nous tenons à exprimer notre gratitude et notre respect le plus sincère à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mon très cher père qui m'a vraiment beaucoup aidé et soutenu pendant mes études ;

A ma très chère mère ;

A mes frères, Ghani et Mayas ;

A mes sœurs : Lydia Alisya;

A toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin.

A Mes meilleurs et très chers amis

SMAILI LOUNES

Je dédie ce travail à:

A ma très chère mère qui m'a vraiment beaucoup aidé et soutenu pendant mes études ;

A mon très cher père;

A mes frères, Salah et Yacine ;

A mes sœurs : Nacima et Fairouz;

A toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin.

A Mes meilleurs et très chers amis

Zerroukhi Abdélkader



Sommaire

Chapitre I

| | |
|---|----------|
| I-1- Présentation de la centrale : | 3 |
| I-2- Description technique de la centrale : | 4 |
| I-2-1- Station de filtrage et de pompage d'eau de mer : | 4 |
| I-2-2- Déminéralisation : | 4 |
| I-2-3- Electro-chloration : | 5 |
| I-2-4- Dessalement de l'eau de mer : | 5 |
| I-2-5- Générateur de vapeur : | 5 |
| I-2-6- Turbine à vapeur et condenseur : | 5 |
| I-2-7- Alternateur : | 6 |
| I-2-8- Auxiliaires électriques : | 6 |
| I-2-9- Salle de commande centralisée : | 6 |
| I-2-10- Transformateur principal d'évacuation de l'énergie : | 7 |

Chapitre II

| | |
|--|-----------|
| I-1- Introduction : | 12 |
| II-2- Constitution : | 12 |
| II-2-1- Principe : | 12 |
| II-2-2- Rotor ou inducteur : | 12 |
| II-2-2-1- Arbre rotor : | 13 |
| II-2-2-2- Enroulement rotor : | 14 |
| II-2-3- Stator : | 15 |
| II-2-3-1- Partie active : | 15 |
| II-2-3-2- Carcasse : | 15 |
| II-2-3-3- Paliers : | 16 |
| II-2-4- Fonctionnement : | 16 |
| II-3- Excitation : | 17 |
| II-3-1- Excitation statique : | 17 |
| II-3-2- Excitation à diodes tournantes : | 17 |
| II-4- Bilan des puissances d'un alternateur : | 18 |
| II-4-1- Puissance mécanique : | 18 |

| | |
|--|----|
| II-4-2- Puissance absorbée par le rotor :..... | 18 |
| II-4-3- Puissance absorbée totale :..... | 18 |
| II-4-4- Puissance utile : | 19 |
| II-4-5- Les pertes : | 19 |
| II-4-6- Le rendement : | 19 |
| II-4- Différents types d'alternateurs :..... | 19 |
| II-4-1- Alternateurs industriels :..... | 19 |
| II-4-2- Alternateurs domestiques :..... | 20 |
| II-4-3- Alternateurs embarqués :..... | 20 |

Chapitre III

| | |
|---|----|
| III-1- Introduction : | 22 |
| III-2- quelques définitions de base : | 22 |
| III-3- Transfert de chaleur :..... | 23 |
| III-3-1- Conduction :..... | 24 |
| III-3-2- Convection :..... | 25 |
| III-3-2-1- Types de convection : | 25 |
| III-3-2-2- Notion de résistance : | 26 |
| III-3-3- Rayonnement : | 27 |
| III-4- Echangeur de chaleur :..... | 29 |
| III-4-1- Définitions générales : | 29 |
| III-4-1-1- Les récupérateurs :..... | 29 |
| III-4-1-2- Les régénérateurs :..... | 29 |
| III-4-1-3- Les échangeurs à contact direct :..... | 29 |
| III-4-1-4- Échangeurs-réacteurs : | 29 |
| III-4-2- Echangeur élémentaire : | 30 |
| III-4-2-1- Aspect externe : | 30 |
| III-4-2-2- Aspect interne :..... | 31 |
| III-4-2-2-1- Coefficient d'échange global :..... | 31 |
| III-5- Principales configurations d'écoulement :..... | 35 |
| III-5-1- Ecoulement co-courant : | 35 |
| III-5-2- Ecoulement contre-courant : | 36 |
| III-5-3- Ecoulement à courants croisés : | 36 |

| | |
|---|-----------|
| III-6- Méthodes de calcul des échangeurs : | 37 |
| III-6-1- méthode de ΔT_{LM} : | 37 |
| III-6-2- méthode des NUT : | 38 |
| III-7- Types et classifications des échangeurs de chaleur : | 39 |
| III-7-1- Types des échangeurs de chaleur : | 39 |
| III-7-1-1- Les échangeurs tubulaires : | 39 |
| III-7-1-2- Echangeur monotube : | 39 |
| III-7-1-3- Échangeur coaxial : | 40 |
| III-7-1-4-Échangeur multitubulaire : | 40 |
| III-7-1-4-1- Échangeur à tubes séparés : | 40 |
| III-7-1-4-2- Échangeur à tubes rapprochés : | 41 |
| III-7-1-4-3- Échangeur à tubes ailettes : | 41 |
| III-7-1-4-4- Echangeur à tube et calandre : | 43 |
| III-7-1-4-4-1- Echangeur à tête flottante : | 43 |
| III.7.1.4.4.2- Echangeur à plaque tubulaires fixes : | 44 |
| III-7-1-4-4-3- Echangeur à plaque tubulaires fixes : | 44 |
| III-7-1-4-4-4- Echangeur à tubes en U : | 44 |
| III-7-1-4-5- Echangeur à plaque : | 44 |
| III-7-1-4-5-1- Échangeurs à surface primaire : | 44 |
| III-7-1-4-5-2- Échangeurs à plaques et joints : | 45 |
| III-7-1-5- Échangeurs avec un fluide changeant de phase : | 46 |
| III-7-1-5-1- Évaporateurs tubulaires : | 46 |
| III-7-1-5-1-1- Évaporateurs à l'intérieur de tubes : | 46 |
| III.7.1.5.1.2- Évaporation à l'extérieur de tubes : | 47 |
| III-7-1-5-1-3- Condenseurs tubulaires : | 48 |
| III-7-2- Classification des échangeurs : | 49 |
| III-7-2-1- Classement technologique : | 49 |
| III-7-2-2- Classement suivant le mode de transfert de chaleur : | 49 |
| III-7-2-3- Classement suivant le procédé de transfert de chaleur : | 49 |

Chapitre IV

| | |
|--|-----------|
| IV-1- Introduction : | 52 |
| IV-2- Description de l'alternateur : | 52 |
| IV-2-1- Le stator : | 52 |
| IV-2-2- Le rotor : | 53 |
| IV-2-3- Caractéristiques générales de l'alternateur : | 54 |
| IV-3- Refroidissement de l'alternateur : | 56 |
| IV-3-1- Le circuit de refroidissement par hydrogène : | 56 |
| IV-4- Spécification des gaz : | 59 |
| IV-5- Description des réfrigérants d'hydrogène : | 59 |
| IV- 6- Calcul de la limite de colmatage : | 61 |
| IV- 6-1- Evaluation de la surface d'échange totale : | 63 |
| IV-6-2- Evaluation du coefficient d'échange global : | 63 |
| IV-6-3- Calcul de la puissance thermique échangée : | 68 |
| IV-6-4- Calcul de la différence moyenne logarithmique de température : | 68 |
| IV-6-5- Détermination du facteur de correction : | 67 |
| IV-6-6- Calcul de la puissance thermique maximale dégagée par l'alternateur : | 70 |

Notations principales

| Symboles | Désignations | Unités |
|-----------------|---|-----------------------|
| P | Puissance | [W] |
| Ω | Pulsation de rotation | [rad /s] |
| n_s | Vitesse de rotation du rotor | [trs/s] |
| T_M | Couple utile | [N.m] |
| U | Différence de potentielle | [V] |
| I | Intensité de courant | [A] |
| P_j | Perte par effet joule | [W] |
| P_c | Perte collective | [W] |
| Φ | Flux de chaleur | [W] |
| λ | Conductivité thermique | [W/m°C] |
| ρ | Masse volumique | [Kg/m ³] |
| C_p | Capacité calorifique | [J/Kg°C] |
| h | Coefficient d'échange par convection | [W/m ² °C] |
| S | Surface | [m ²] |
| T | Température | [°C] |
| σ | Constante de Stefan Boltzmann | [-] |
| K | Coefficient d'échange global | [W/m ² °C] |
| ΔT_{LM} | Différence de température logarithmique moyenne | [°C] |
| \dot{m} | Débit massique | [Kg/m ³] |
| q_v | Débit volumique | [m ³ /s] |
| P | Pression | [Bars] |
| NUT | Nombre d'Unité de transfert | [-] |
| F | Facteur de correction | [-] |
| G | Vitesse massique | [Kg/m ² s] |

| | | |
|---------------|---|----------|
| Re | Nombre de Reynolds | [-] |
| Nu | Nombre de Nusselt | [-] |
| μ | Viscosité dynamique | [Kg/m.s] |
| D | Diamètre | [m] |
| L | Longueur | [m] |
| l | Largeur | [m] |
| H | Hauteur | [m] |
| p | Le pas | [m] |
| N_T | Nombre de tube | [-] |
| e | Epaisseur de l'ailette | [m] |
| a | Espace entre ailettes | [m] |
| h | Hauteur de l'ailette | [m] |
| r | Rayon de l'ailette | [m] |
| S_p | Section de passage | [m] |
| P_m | Périmètre mouillé | [m] |
| St | Nombre de Stanton | [-] |
| Pr | Nombre de Prandtl | [-] |
| ε | Coefficient d'efficacité d'une ailette | [-] |
| η | Coefficient d'efficacité de la surface ailettee | [-] |

| | | |
|--|--|--|
| | | |
|--|--|--|

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau III-1 : Valeurs usuelles de résistances d'encrassement | 43 |
| Tableau III-2 : Valeurs usuelles du coefficient d'échange convectif h | 44 |
| Tableau III-3 : Valeurs de conductivité et de conductance des principaux matériaux | 44 |
| Tableau III-4 : Coefficient d'échange global pour divers types d'échangeurs | 44 |
| Tableau IV-1 : Caractéristiques de l'alternateur | 54 |
| Tableau IV-2 : Caractéristiques de l'échangeur | 62 |
| Tableau IV-3 : Tableau récapitulatif des résultats obtenus | 75 |

Liste des figures

| | | |
|-----------------|--|----|
| Figure I.1 : | Schéma synoptique d'un groupe thermique | 9 |
| Figure I-2 : | Plan de masse de la centrale thermique de CAP-DJINET | 10 |
| Figure II-1 : | Rotor monobloc | 14 |
| Figure II-2 : | rotor bipolaire ($P = 1$) à pôles lisse | 15 |
| Figure II-3 : | rotor tétra polaire ($P = 2$) à pôles saillant | 15 |
| Figure II-4 : | Frettes | 16 |
| Figure II-5 : | Enroulement | 17 |
| Figure II-6 : | Carcasse | 18 |
| Figure II-7 : | Schéma des puissances | 19 |
| Figure III-1 : | Échangeur monotube en serpentif | 22 |
| Figure III-2 : | Échangeur coaxial | 23 |
| Figure III-3 : | Échangeur à tubes séparés | 23 |
| Figure III-4 : | Échangeur à tubes rapprochés | 24 |
| Figure III-5 : | Échangeur à tube ailette | 24 |
| Figures III-6 : | Différents types d'ailettes | 26 |
| Figure III-7 : | Echangeur à tête flottante | 27 |
| Figure III-8 : | Échangeur à plaque tubulaire fixe | 27 |
| Figure III-9 : | Echangeurs à tubes en U | 28 |
| Figure III-10 : | Différentes géométries de plaques d'échangeurs à surface primaire | 28 |
| Figure III-11 : | Échangeur à plaque et joint | 29 |
| Figure III-12 : | Évaporateur à tubes courts et à panier | 30 |
| Figure III-13 : | Évaporateur à longs tubes verticaux et à grimpage | 30 |
| Figure III-14 : | Évaporateur à tube tombant | 31 |
| Figure III-15 : | Évaporateur noyés et arrosés | 31 |
| Figure III-16 : | Condensation extérieur aux tubes | 32 |

| | | |
|-----------------|--|----|
| Figure III-17 : | Condensation intérieur aux tubes | 33 |
| Figure III-18 : | Transfert de chaleur | 35 |
| Figure III-19 : | Convection libre | 37 |
| Figure III-20 : | Convection forcée | 37 |
| Figure III-21: | Aspect externe d'un échangeur | 41 |
| Figure III-22: | Représentation schématique du transfert thermique au travers des différents milieux composant un échangeur de chaleur | 42 |
| Figure III-23 : | Représentation analogique du transfert de chaleur au travers des différentes résistances thermiques | 43 |
| Figure III-24 : | Echangeur à tubes coaxiaux | 45 |
| Figure III-25 : | Profil longitudinal de températures dans un échangeur co-courant | 46 |
| Figure III-26 : | Profil longitudinal des températures dans un échangeur contre-courant | 47 |
| Figure III-27 : | Profil longitudinal des températures dans un échangeur à courants croisés. | 47 |
| Figure III-28 : | Evolution des températures le long des échangeurs co-courant et contre-courant | 49 |
| Figure IV-1 : | Coupe longitudinale de l'alternateur | 55 |
| Figure IV-2 : | Schéma de circulation de l'hydrogène dans l'alternateur | 58 |
| Figure IV-3 : | Disposition des réfrigérants le long de l'enveloppe du stator | 60 |
| Figure IV- 4 : | Le réfrigérant d'hydrogène | 60 |
| Figure IV-5 : | Abaque de corrélation pour un échangeur compact normalisé de 11 à 23 ailettes par pouce | 60 |
| FigureIV-6 : | efficacité des ailettes d'épaisseur constante, circulaire et rectilignes | 67 |
| Figure IV-7 : | facteur de correction pour un échangeur à courants croisés avec une seule passe du fluide primaire, et un fluide non brassé | 71 |

Introduction Générale

Introduction générale

Le monde connaît ce dernier siècle des développements technologiques et industriels importantes, la vie quotidienne devient de plus en plus exigeante autant sur le plan socioéconomique qu'environnementale, ce qui incite les pays à mettre en œuvre des technologies qui répondent à ces exigences.

Afin d'assurer l'accès à l'électricité pour tous, l'alternateur est l'une des technologies les plus utilisées dans le monde pour la production de l'électricité ; un système de refroidissement est de rigueur pour assurer le bon fonctionnement de ce dernier et cela consiste à éviter tout échauffements excessif en cas de surcharge tout en assurant le maintien des différents paramètres du système, ceux du milieu environnant, et sans être obligé d'atténuer sa puissance. Pour satisfaire ce refroidissement on fait appel à des échangeurs de chaleur.

Un échangeur thermique est un appareil destiné à refroidir ou réchauffer un fluide au moyen d'un autre. Les contraintes du marché relatives au développement de ces échangeurs s'expriment en termes de réduction des coûts d'investissements, de fabrication, de gain d'espace et d'amélioration de l'efficacité énergétique. Elles conduisent inévitablement à fabriquer des échangeurs thermiques de plus en plus compacts et à explorer diverses techniques d'intensification des échanges thermiques.

En effet, les échangeurs compacts sont caractérisés par une surface d'échange importante par unité de volume, ce qui justifie leur large utilisation dans le domaine de l'industrie pétrolière, chimique, la distillation, réfrigération, conditionnement d'air, chauffage, installation frigorifique, centrale thermiques, ...etc.

Ce travail est réalisé au sein de la centrale thermique de cap-djinet dans le cadre d'un stage pratique. Le travail est consacré à l'étude d'un échangeur de chaleur hydrogène-eau, installé sur l'alternateur.

Ce travail s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier comprend une présentation générale de la centrale thermique de cap-djinet.

Le second est consacré aux descriptions et généralités sur les alternateurs.

Introduction Générale

Le troisième englobe des généralités, des descriptions et des définitions relatives aux échangeurs de chaleur.

Quant au quatrième chapitre il est réservé pour l'étude du système de refroidissement, qui tient compte du circuit de refroidissement suivi d'un calcul de limite de colmatage.

I-1- Présentation de la centrale : [1]

La centrale thermoélectrique de CAP-DJINET dont la construction à été décidée en vue de renforcer l'alimentation en énergie électrique du pays. Elle est composée de quatre (04) groupes, d'une puissance unitaire de 176 MW aux bornes de l'alternateur, comprenant des installations communes :

- Station de pompage d'eau de mer.
- Poste de détente gaz naturel.
- Poste fuel.
- Station de dessalement et de déminéralisation d'eau de mer.
- Station d'électro-chloration.
- Salle de compresseurs d'air comprimé de travail et de régulation

Et pour chaque groupe :

- Générateur de vapeur.
- Turbine à vapeur.
- Condenseur.
- Alternateur.
- Auxiliaires électriques.
- Salle de commande centralisée.
- Transformateur principal d'évacuation de l'énergie.
- Dessalement de l'eau de mer.

L'ensemble de ces édifices est répartie sur une superficie de 35 hectares, Située au bord de la mer à l'Est d'Alger près de la ville de CAP-DJINET, dans la Wilaya de Boumèrdès. L'entrée en production et le couplage des quatre groupes, sur le réseau électrique national, s'est déroulé comme suite :

- ✓ GROUPE 1.....Décembre 1985.
- ✓ GROUPE 2.....Avril 1986.
- ✓ GROUPE 3.....Septembre 1986.
- ✓ GROUPE 4.....Décembre 1986.

Totalisant une capacité installée de 704 MW, la puissance fournie au réseau est de 672MW. La consommation totale des auxiliaires des (04) groupes et des auxiliaires communs est d'environ 32MW.

I-2- Description technique de la centrale [1] :

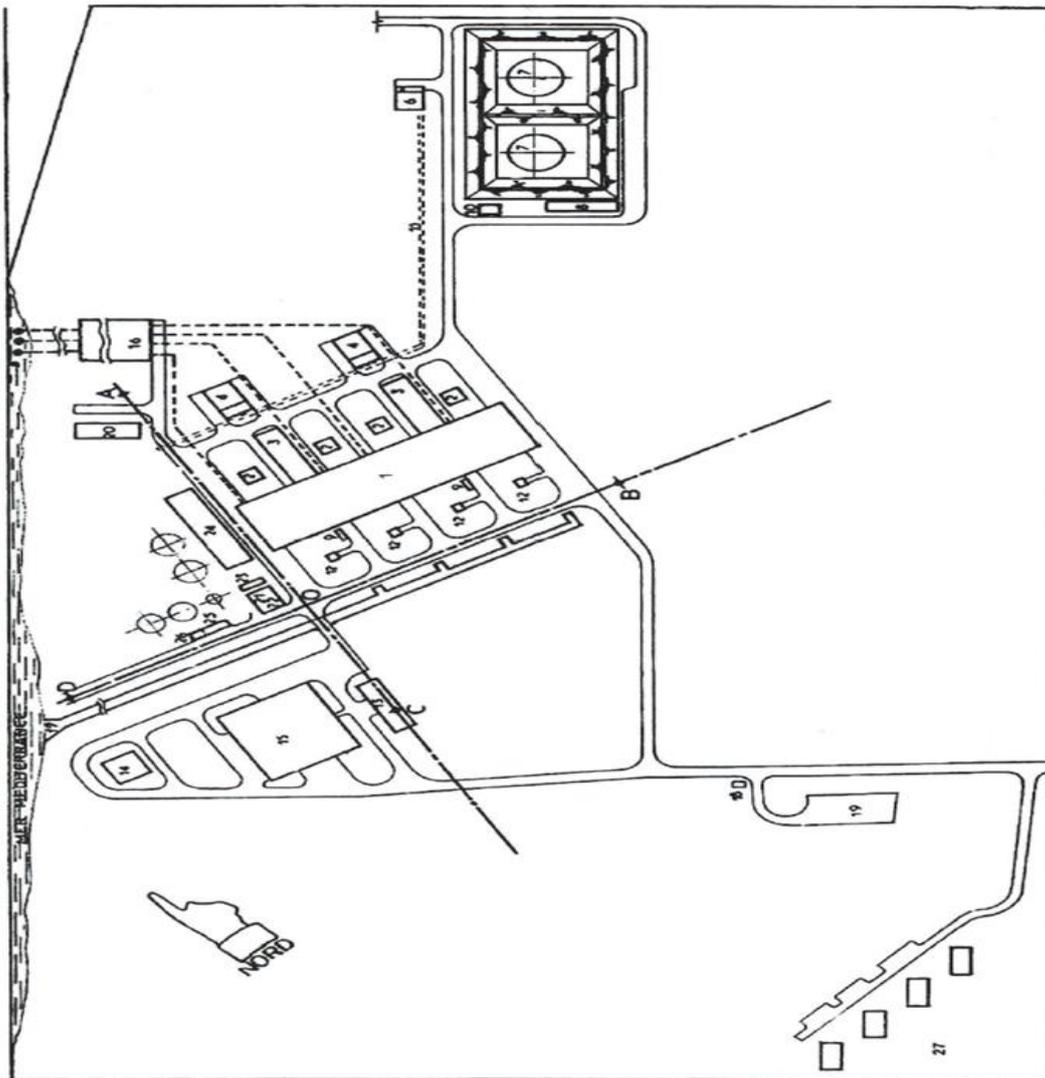


Figure I-2 : Plan de masse de la centrale thermique de CAP-DJINET. [1]

- | | |
|--|----------------------------------|
| 1. Salle des machines. | 15. Atelier magazine. |
| 2. Chaudière. | 16. Station de pompage. |
| 3. Locaux des auxiliaires électriques. | 17. Canal et rejet d'eau de mer. |
| 4. locaux des auxiliaires mécaniques. | 18. Potier (poste d'entrée). |
| 5. Tour de prise d'eau de mer. | 19. Parc véhicules. |

- | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 6. Station de détente de gaz. | 20. Station de chloration. |
| 7. Réservoir stockage fuel. | 21. Préparation d'eau potable. |
| 8. Station pompage et dépotage fuel. | 22. Déminéralisation. |
| 9. Station de production H2 | 23. Fosse de neutralisation. |
| 10. Poste d'incendie à mousse. | 24. Dessalement d'eau de mer. |
| 11. Rack à tuyauterie. | 25. Station des pompages d'incendie. |
| 12. Air des transformateurs. | 26. Pompe d'eau déminéralisée. |
| 13. Bâtiment administratif. | 27. Logement d'exploitation. |
| 14. Cantine | |

I-2-1- Station de filtrage et de pompage d'eau de mer :

a) L'apport de l'eau de mer :

L'apport de l'eau de mer s'effectue grâce à trois (03) canalisations indépendantes de 3 m de diamètre chacune, dont la prise est située à 900 m au large.

b) Filtration de l'eau de mer :

La filtration d'eau de mer s'effectue en deux étapes :

- **La première filtration** : s'effectue au niveau des grilles à grappins pour stopper et récupérer les gros déchets et organismes arrivant avec l'eau de mer, tels que : Moules, oursins, ...etc.

- **La deuxième filtration** : s'effectue au niveau des tambours filtrants pour la récupération des organismes des petites tailles, qui n'ont pas pu être stoppés par les grilles à grappins

c) Pompage d'eau de mer :

Le pompage s'effectue dans des réservoirs situés après la station de filtrage, par trois groupes de pompes différents, pour les besoins de la centrale :

- Pompes d'alimentation en eau de mer de refroidissement.
- Pompes d'alimentation en eau de mer pour les unités de dessalement.
- Pompes d'alimentation en eau de mer pour la station d'électro-chloration.

I-2-2- Déminéralisation :

Deux chaînes de déminéralisation de 40 m³/h chacune parachèvent le traitement d'eau avant son utilisation dans le cycle. Le stockage d'eau déminéralisée se fait dans deux réservoirs de 1500 m³ chacun.

I-2-3- Electro-chloration :

La chloration de l'eau de mer permet de préserver l'équipement traversé par l'eau de mer contre la prolifération d'organismes marins. Elle se fait par l'injection de l'hypochlorite de sodium, la production est assurée par une station d'électro-chloration (par électrolyse de l'eau de mer d'une capacité de 150kg/h de colore actif).

I-2-4- Dessalement de l'eau de mer :

Il y a quatre (04) unités de dessalement de 500 m³/jour, chacune, assurant la production d'eau pour le générateur à vapeur des groupes turbo-alternateur de la centrale. Le procédé utilisé et qui est le plus répandu, est la distillation multi flash ou l'eau se vaporise brutalement (FLASH).

Après plusieurs flashs successifs la vapeur condensée (eau pure) est récupérée et stockée dans deux (02) réservoirs de 2700 m³ chacun.

I-2-5- Générateur de vapeur :

Ce générateur de vapeur est du type à circulation naturelle avec chambre de combustion pressurisée et avec resurchauffe a pour rôle de transformer l'eau en vapeur à haute pression pour alimenter les turbines.

- Consommation gaz naturel : 40 Nm³ /h
- Consommation gas-oil (fuel) :42 Nm³ /h
- Capacité de vaporisation : 530 t/h
- Pression sortie surchauffeurs : 154 bars.
- Température vapeur surchauffée : 540°C
- Pression sortie resurchauffeurs : 34 à 37 bars.
- Température vapeur resurchauffée : 540°C.
- Température eau d'alimentation : 246°C.

I-2-6- Turbine à vapeur et condenseur :

Les turbines sont à condensation et à soutirage, elles sont composées de trois corps : Haute pression(**HP**), moyenne pression(**MP**) et base pression(**BP**).

Chaque turbine entraîne un alternateur d'une puissance de 220 M VA, après détente dans la turbine, la vapeur vient se refroidir dans le condenseur.

Le condenseur a simple parcours, est exploitable moitié par moitié. Le débit d'eau de mer nécessaire à la réfrigération de chaque condenseur est de 25.000 m³/h.

I-2-7- Alternateur :

- Tension nominale : 15,5 KV.
- Puissance apparente : 220 MVA.
- Puissance active : 176 MW.
- Régulation de tension automatique.
- Poids du stator complet : 198 tonnes
- Poids du rotor seul : 36,7 tonnes.

Ces alternateurs sont à refroidissement à l'hydrogène en circuit fermé, l'hydrogène étant lui-même refroidis à l'eau déminéralisée.

I-2-8- Auxiliaires électriques :

Les auxiliaires électriques se situent à l'intérieur de deux bâtiments à cinq (5) niveaux situés entre deux chaudières, on trouve :

- Niveau 5,15M : Salle de câble.
- Niveau 8,35M : Tableaux MT BT.
- Niveau 11,65M : Salle de câble.
- Niveau 14.75M : Batteries, redresseurs et salle électrique.
- Niveau 18,65M : Salle de commande.

I-2-9- Salle de commande centralisée :

Les quatre groupes de production d'électricité sont contrôlés et réglés, chacun à partir d'un pupitre dans une salle de commande climatisée et insonorisée. Il existe deux salles de commande et chacune comprend :

- Deux pupitres de conduite et de signalisation des alarmes électroniques.
- Deux tableaux verticaux ou sont rassemblés, les organes de commande et les appareils d'enregistrement.
- Un tableau synoptique, qui schématise les auxiliaires électriques et les tableaux relatifs aux services communs.
- Un équipement de supervision d'analyse d'incidents.

I-2-10- Transformateur principal d'évacuation de l'énergie :

Chaque tranche évacue par l'intermédiaire d'un transformateur et d'un avant-poste l'énergie à la tension de 120 KV vers Boudouaou située à 45Km de la centrale.

Chaque alternateur est raccordé, par des gaines à barre à un transformateur élévateur (15,5KV– 22KV) d'une puissance de 220 MVA à travers un disjoncteur compteur. Les transformateurs élévateurs ont un poids de 140 tonnes (sans les radiateurs) et leur réfrigération est assurée par une circulation forcée d'huile, laquelle est elle-même refroidie par l'air.

I-3- Principe de fonctionnement de la centrale [1] :

Dans une centrale thermique à vapeur la production de l'énergie électrique comporte trois phases :

-La transformation de l'énergie chimique du combustible en énergie calorifique de la vapeur dans la chaudière.

- La transformation de l'énergie calorifique en énergie mécanique par la turbine.
- Transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique par l'alternateur.

La centrale thermique de CAP-DJINET fonctionne avec circuit fermé de circulation d'eau et de vapeur (Figure I.1). Ce circuit commence dans le condenseur où la pompe d'extraction assure le transfert de l'eau jusqu'à la bêche alimentaire en passant par les trois (03) réchauffeurs basses pression (débit nominal d'une pompe 414 m³/h). Les pompes d'alimentations servent à alimenter la chaudière en eau à partir de la bêche (débit de 3 x 261,6 m³/h), passant par les réchauffeurs de moyenne et de haute pression ainsi que l'économiseur. L'eau arrive d'abord à son ballon de chaudière, par gravité il descend dans les tubes des écrans où il sera chauffé par des huit brûleurs à température plus élevée, l'eau chaude monte dans les tubes jusqu'à l'évaporation, la vapeur est surchauffée par les trois surchauffeurs et attaque le premier corps haute pression de la turbine à la température 540°C

et une pression de 160 bar, la vapeur est récupérée à la sortie (après la détente à 200°C et 47 bar de pression), ensuite la chaudière élève la température de la vapeur avec les resurchauffeurs jusqu'à 540°C et attaque les deux corps moyenne et basses pression.

Le condenseur récupère la vapeur à la sortie du corps basse pression de la turbine et le refroidit jusqu'à la température ambiante.

Un autre circuit est présent pour le refroidissement du condenseur c'est le circuit d'eau de mer, il est composé d'une pompe d'extraction qui aspire l'eau filtrée en grande quantité et la refoule dans le condenseur pour refroidir ce dernier et termine sa course en retournant vers la mer.

Pour assurer le fonctionnement normal du circuit de vapeur il faut que la quantité d'eau dessalée dans le circuit soit suffisante, mais à cause des pertes pendant chaque intervention de maintenance au niveau des pompes, il faut que la pompe d'alimentation de la station de dessalement soit toujours disponible, pour palier à ces pertes.

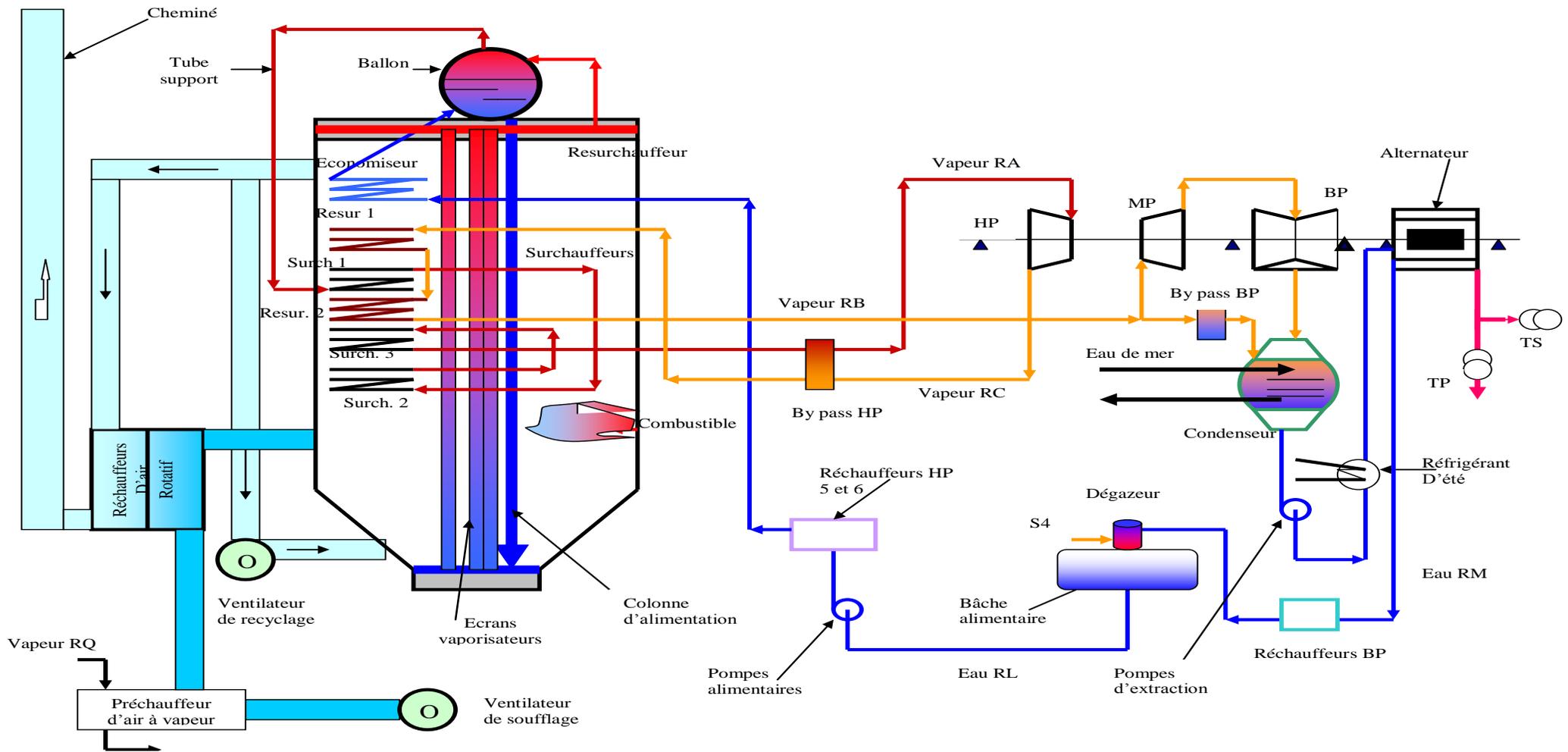


Figure I.1 : Schéma synoptique d'un groupe thermique [1].

II-1- Introduction :

Un alternateur est une machine synchrone rotative qui convertit l'énergie mécanique fournie au rotor en énergie électrique à courant alternatif.

Plus de 95 % de l'énergie électrique dans le monde est produite par des alternateurs, ce sont des machines électromécaniques fournissant des tensions alternatives de fréquence proportionnelle à leur vitesse de rotation. Ces machines sont moins coûteuses et ont un meilleur rendement que les machines qui délivrent des tensions continues (rendement de l'ordre de 95 % au lieu de 85 %).

II-2- Principe [2] :

Tout circuit électrique soumis à une variation de flux est le siège d'une f.é.m. (force électro motrice) induite. Qui selon la loi de Lenz s'écrit :

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{II.1})$$

e : f.é.m. en V [volt].

$d\Phi$: Variation de flux en W (watt).

dt : intervalle de temps en s.

II-2-1- Différents types d'alternateurs :**II-2-1-1- Alternateurs industriels :**

Dans les alternateurs industriels, l'induit est constitué de trois enroulements disposés à $360^\circ/3p$ (p : nombre de paires de pôles) soit $120^\circ/1p$ pour 1 paire de pôles et trois enroulements, qui fournissent un système de courants alternatifs triphasés.

➤ Dans les centrales électriques thermiques (nucléaires ou classiques) :

Une turbine à vapeur ou une turbine à gaz tournant à grande vitesse est couplée à un alternateur. Ce type de générateur tourne généralement à 1 500 tours par minute (rotor à 4 pôles) ou à 3 000 tours par minute (rotor à 2 pôles), pour les réseaux de distribution à 50 Hz. La puissance électrique fournie par un des turboalternateurs d'une centrale nucléaire peut atteindre 1 600 mégawatts.

➤ Les centrales hydrauliques :

Les turbines tournent plus lentement, ont des rotors comportant un nombre important de pôles (14, 16 pôles). L'axe de rotation de l'arbre peut être vertical ou horizontal et le diamètre de cet arbre est grand.

➤ Les gros groupes électrogènes :

Utilisent généralement un moteur Diesel lent. Dans ce cas, le rotor de l'alternateur ressemble beaucoup à celui d'un alternateur hydraulique, avec un nombre élevé de pôles, un grand diamètre et un grand moment d'inertie absorbant les variations de vitesse de rotation de l'arbre du moteur Diesel.

II-2-1-2- Alternateurs domestiques :

Dans les alternateurs domestiques (groupe électrogène monophasé), l'induit est constitué d'un seul enroulement.

II-2-1-3- Alternateurs embarqués :

Les alternateurs embarqués, entre autres sur les véhicules automobiles, sont des alternateurs triphasés munis d'un système de redressement (à diodes), qui délivre un courant continu sous une tension d'environ 14 V pour les voitures et 28 V pour les camions, fournissant l'énergie électrique du véhicule et rechargeant sa batterie visant à fournir l'énergie lorsque le moteur sera à l'arrêt. Il doit être associé à un régulateur de tension protégeant la batterie d'une surcharge. Les mal nommées "dynamos" de bicyclettes sont elles aussi des alternateurs, dont l'inducteur est constitué d'un ou plusieurs aimants permanents.

II-2-1-4- Éolienne :

Il faut noter que dans certains cas, par exemple sur certaines éoliennes, le rotor est externe et le stator est disposé au centre de la génératrice. Les pales de l'éolienne sont directement reliées au rotor. L'éolienne est un alternateur.

II-3- Constitution [3] :**II-3-1- Rotor ou inducteur :**

Le champ magnétique est créé par un aimant permanent ou par un électroaimant alimenté par un courant continu I_e , appelé courant d'excitation. Le rotor tourne à la fréquence f , et crée un nombre p de paires de pôles.



Figure II-1 : rotor monobloc [3]

Le rotor est dimensionné en fonction du flux de la machine et aussi de la force centrifuge qui dépend fortement du diamètre.

Dans les alternateurs, il existe deux types de rotor :

- Les rotors à pôles lisses (centrales thermiques, nucléaires, TGV) :

C'est un électroaimant dont les pôles sont alternativement nord et sud. Les enroulements sont alimentés en courant continu, ils sont placés autour des noyaux polaires. Le nombre de pôles est toujours pair, il varie suivant la machine.

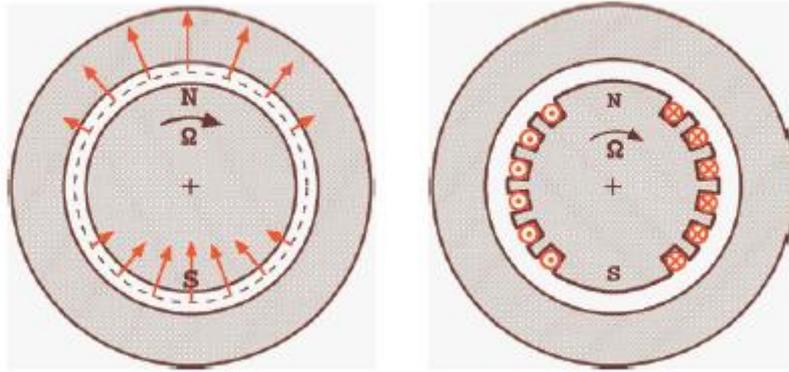


Figure II-2 : rotor bipolaire ($P = 1$) à pôles lisses

- Les rotors à pôles saillants (ou roues polaires) centrales hydrauliques moins puissantes et moins rapides que précédemment :

Le rotor à pôle saillant est un cylindre plein dans lequel on a usiné des encoches. Il possède le plus souvent deux pôles.

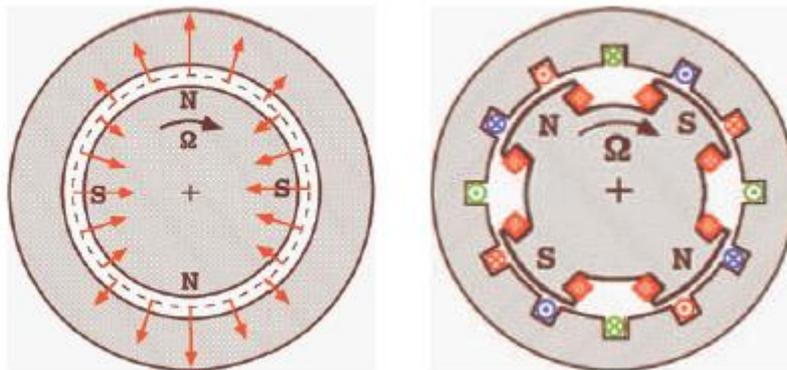


Figure II-3 : rotor tétra polaire ($P = 2$) à pôles

II-3-1-1- Arbre rotor :

L'arbre est en acier forgé monobloc. Des encoches longitudinales permettent de loger les bobines. Une extrémité comporte le plateau d'accouplement côté turbine, et l'autre partie comporte la fixation de la partie mobile de l'excitateur à diodes tournantes.

II-3-1-2- Enroulement rotor :

Il se compose de :

a- Partie droite :

Elle est formée par les conducteurs logés dans les encoches longitudinales de l'arbre rotor. Le rotor possède aussi un enroulement amortisseur constitué par des conducteurs en cuivre, Cet enroulement amortisseur canalise les courants induits à la périphérie du rotor pendant le service de l'alternateur.

b- Têtes de bobines:

Elles sont situées hors de la partie droite, les parties droites axiales d'une bobine sont reliées entre elles par des conducteurs en arc appelés têtes de bobines assurant la continuité des spires.

c- Frettes :

Deux pièces cylindriques en acier, amagnétique placées aux extrémités du rotor de part et d'autre pour protéger les têtes de bobine contre les effets des forces centrifuges.



Figure II-4 : frettes [3]

d- Ventilateurs :

Un ventilateur axial à ailettes est monté à chaque extrémité du rotor, ils aspirent et refoule le gaz des réfrigérants.

II-3-2- Stator :

C'est la partie fixe de l'alternateur, Il est soumis à un flux tournant, il se compose de :

II-3-2-1- Partie active :

Elle est composée de :

a- Circuit magnétique :

Le circuit magnétique est constitué par un empilage de tôles magnétiques isolées entre elles. L'empilage est fractionné en de nombreux paquets de plusieurs centimètres d'épaisseur, séparés par des événements radiaux formant des canaux de ventilation pour le refroidissement du circuit magnétique.

b- Enroulement stator :

Constitué par un ensemble de conducteurs immobilisés dans le circuit magnétique. Les conducteurs sont composés d'un ensemble de brins élémentaires en cuivre isolés du circuit magnétique. Des développantes permettent de raccorder les extrémités des bobines.



Figure II-5 : enroulement [3]

II-3-2-2- Carcasse :

C'est l'enveloppe extérieure de l'alternateur (figure). Elle Protège l'alternateur contre toute introduction de corps étrangers et en même temps elle supporte le rotor alternateur.



Figure II-6 : carcasse [3]

II-3-2-3- Paliers :

Les paliers sont de type palier à flasque, ils assurent la fermeture de la carcasse alternateur, et supportent) le rotor de l'alternateur.

Un palier comporte deux demi-coussinet, la chaise palière, le chapeau palier et quatre (04) joints labyrinthes.

L'extrémité de l'arbre côté turbine est mise à la masse par l'intermédiaire d'un balai de masse.

Le palier côté excitation est isolé de la masse.

Ces deux derniers points permettent de protéger les paliers, en empêchant le passage de courant à travers l'arbre de l'alternateur, et les paliers et la carcasse.

De l'huile à fort débit alimente les paliers et forme un film d'huile entre l'arbre et le coussinet. De l'air est introduit dans les paliers pour faire barrage aux fuites d'huile.

II-4- Excitation [3] :

On a deux modes d'excitation :

II-4-1- Excitation statique :

Dans les systèmes d'excitation statique, la puissance électrique est prélevée aux bornes de l'alternateur par un ou plusieurs transformateurs.

Chaque transformateur alimente un pont de thyristors lui-même piloté par un régulateur de tension. Un système de bagues et balais se charge alors de transmettre au rotor le courant redressé par les thyristors.

II-4-2- Excitation à diodes tournantes :

Dans les systèmes d'excitation à diodes tournantes, la puissance d'excitation du rotor de l'alternateur est fournie par un exciteur accouplé en bout de la ligne d'arbre. L'exciteur prélève directement la puissance d'excitation de l'alternateur sur l'arbre. La puissance d'excitation de l'inducteur statique de l'exciteur est fournie par un transformateur d'excitation alimenté par un pont de thyristors également piloté par un régulateur de tension. Cette puissance d'excitation, prélevée aux bornes de l'alternateur, est très faible par rapport à celle nécessaire pour une excitation statique.

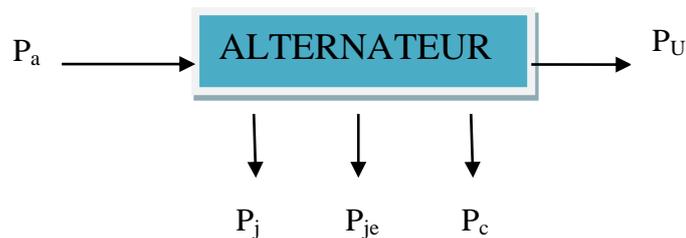
II-5- Bilan des puissances d'un alternateur [2] :

Figure II-7 : Schéma des puissances [2]

II-5-1- Puissance mécanique :

La turbine, ou le moteur à essence pour un groupe électrogène, entraîne l'arbre de l'alternateur avec un couple T_M . La puissance absorbée est mécanique.

$$P_{Mec} = \Omega_S \cdot T_M = 2\pi \cdot n_S \cdot T_M \quad (\text{II.2})$$

Avec :

Ω : Pulsation de rotation [rad /s]

n_S : Vitesse [trs/s]

T_M : Couple utile sur l'arbre [N.m].

II-5-2- Puissance absorbée par le rotor :

- Si l'alternateur est à excitation indépendante, il faut encore tenir compte de l'énergie électrique absorbée par l'excitation (rotor), on a alors :

$$P_e = U_e \cdot I_e \quad (\text{II.3})$$

- Si l'alternateur est auto-excité, la puissance reçue par l'inducteur (excitation) est fournie par le système d'entraînement et se trouve donc incluse dans le terme :

$$P_{Mec} = \Omega_S \cdot T_M \quad (\text{II.4})$$

II-5-3- Puissance absorbée totale :

- Si l'alternateur est à excitation indépendante :

$$P_a = \Omega_S \cdot T_M + U_e \cdot I_e \quad (\text{II.5})$$

- Si l'alternateur est auto-excité :

$$P_a = \Omega_S \cdot T_M \quad (\text{II.6})$$

- Si l'alternateur est à aimants permanent :

$$P_a = \Omega_S \cdot T_M \quad (\text{II.7})$$

II-5-4- Puissance utile :

La charge reliée à l'alternateur absorbe un courant de valeur efficace I et présente un facteur de puissance $\cos \varphi$:

$$P_u = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (\text{II.8})$$

II-5-5- Les pertes :

- Pertes par effet joule dans l'inducteur :

$$P_{je} = U_e \cdot I_e = R_e \cdot I_e^2 \quad (\text{II.9})$$

- Pertes par effet joule dans l'induit :

$$P_{ji} = \frac{3}{2} \cdot R \cdot I^2 \quad (\text{II.10})$$

Où : R est la résistance entre les deux bornes de l'alternateur.

- Pertes collectives P:

Ce sont des pertes mécaniques (P_m), qui ne dépendent que de la fréquence de rotation et les pertes dans le fer (P_f), qui ne dépendent que de la fréquence et de la valeur maximale du flux. Ces pertes seront mesurées au cours d'un essai à vide dans lequel la machine tourne à la fréquence de rotation nominale, sous une tension égale à la tension qu'elle aurait en charge. En effet, l'égalité des tensions efficaces entraîne celle des flux.

II-5-6- Le rendement [2] :

Le rendement dans un alternateur est le rapport entre la puissance utile et la puissance absorbée :

$$\eta = P_u / P_a \quad (\text{II.11})$$

II-6- Conclusion :

Ce chapitre a porté sur des définitions sur l'alternateur et ses parties constitutives ainsi les différents types.

Nous avons mis en évidence les différents paramètres tels que les puissances et les pertes ainsi les principales relations entre ces paramètres pour pouvoir effectuer les calculs permettant de relier une grandeur à une autre.

III-1- Introduction :

L'échangeur de chaleur, permet de contrôler la température d'un système ou d'un produit en échangeant de la chaleur entre deux milieux. Il est indispensable dans de nombreuses applications courantes, chauffage, climatisation réfrigération, refroidissement électronique, en génie des procédés, pour le stockage d'énergie ou la production d'énergie mécanique (ou électrique) à partir d'énergie thermique. Dans l'échangeur classique, un fluide chaud transfère une partie de son enthalpie à un fluide froid. Ce type d'échangeur sert de base pour donner les définitions et les paramètres nécessaires à son dimensionnement ainsi qu'à la compréhension des phénomènes. D'autres types d'échangeurs existent qui sont également évoqués.

On distingue différents modes d'échange thermique qui interviennent dans un échangeur de chaleur.

III-2- Types et classifications des échangeurs de chaleur :**III-2-1- Types des échangeurs de chaleur :****III-2-1-1- Les échangeurs tubulaires :**

Pour des raisons historiques et économiques, les échangeurs utilisant les tubes comme constituant principal de la paroi d'échange sont les plus répandus. On peut distinguer trois catégories suivant le nombre de tubes et leur arrangement, toujours réalisés pour avoir la meilleure efficacité possible pour une utilisation donnée [4].

III-2-1-2- Echangeur monotube :

Dans lequel le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir et a généralement la forme d'un serpentin comme montré à la figure au-dessous.

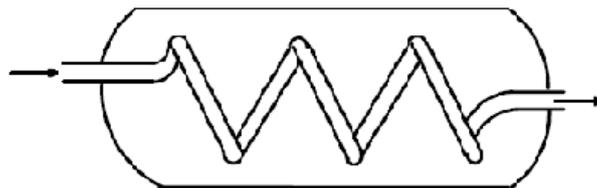


Figure III-1 : Échangeur monotube en serpentin [4].

III-2-1-3- Échangeur coaxial :

Dans lequel les tubes sont le plus souvent cintrés ; en général, le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur comme montré à la figure au-dessous.

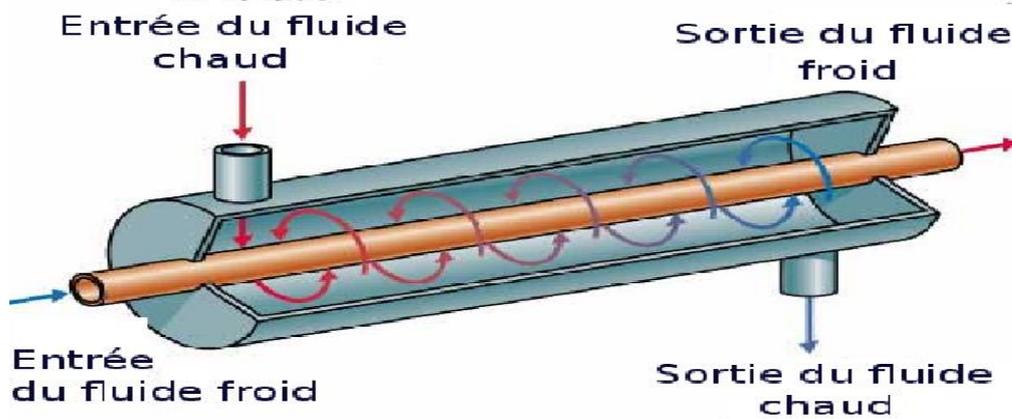


Figure III-2 : Échangeur coaxial [4]

III-2-1-4-Échangeur multitubulaire :

Existant sous quatre formes

III-2-1-4-1- Échangeur à tubes séparés :

À l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant (de l'ordre de 100 mm) se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre (8 à 20 mm) maintenus écartés par des entretoises. L'échangeur peut être soit rectiligne, soit enroulé [4]

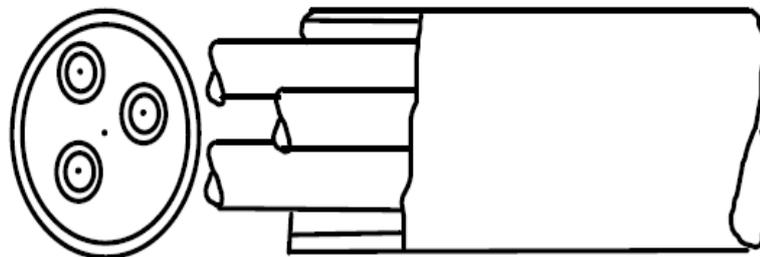


Figure III-3 : Échangeur à tubes séparés [4].

III-2-1-4-2- Échangeur à tubes rapprochés :

Pour maintenir les tubes et obtenir un passage suffisant pour le fluide extérieur au tube, on place un ruban enroulé en spirale autour de certains d'entre eux. Les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire des rubans [4].

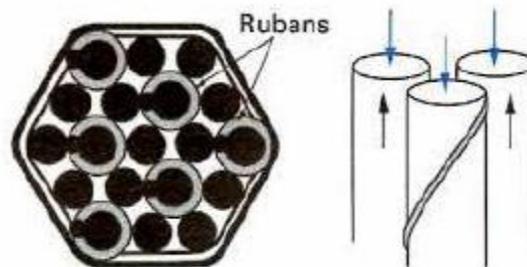


Figure III-4 : Échangeur à tubes rapprochés [4].

III-2-1-4-3- Échangeur à tubes ailettés (compact) :

Les échangeurs de chaleur compacts sont principalement utilisés dans les applications où le fluide secondaire est un gaz (systèmes gaz/gaz ou liquide/gaz) et pour de faibles coefficients d'échange convectif h . Ils permettent une grande surface d'échange dans un volume très réduit. Ces échangeurs ont généralement une superficie de 500 m^2 pour un mètre cube de volume.

La compacité étant définie par le rapport entre la surface d'échange S_e et le volume externe V . Donc l'encombrement d'un échangeur sera principalement fonction de sa surface externe, car le fluide externe est plus mauvais convecteur que le fluide interne

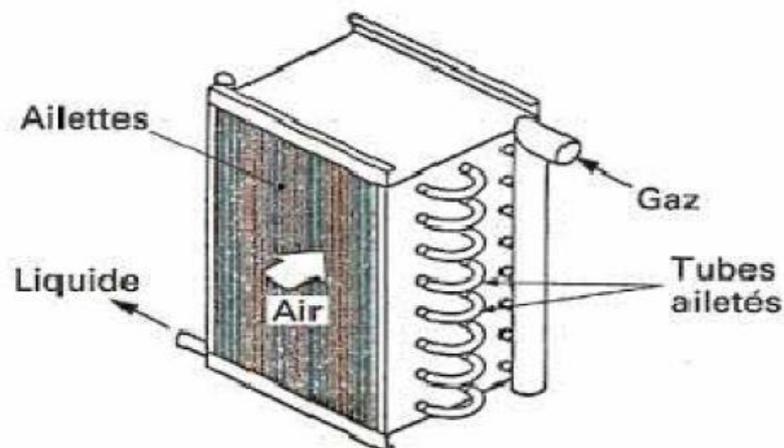
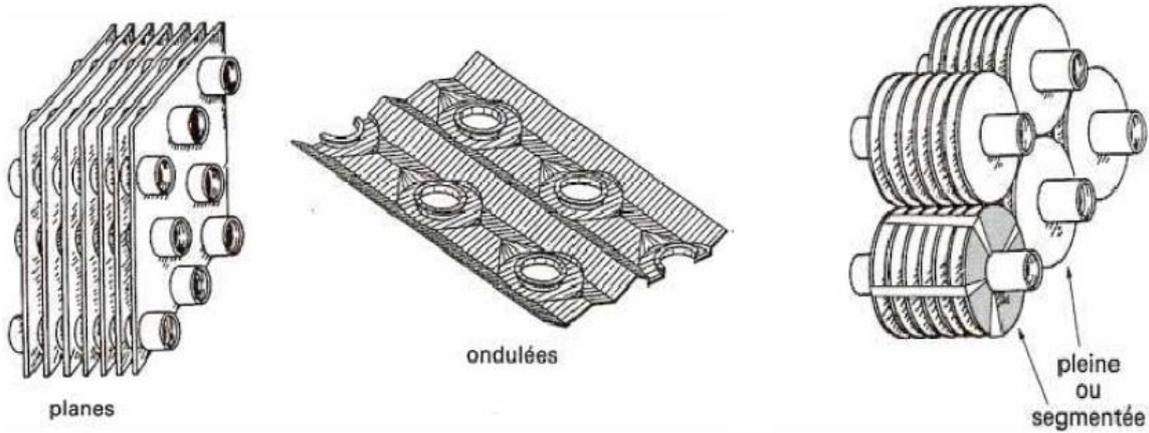


Figure III-5 : Échangeur à tube ailette [4].

➤ Différents types d'ailettes :

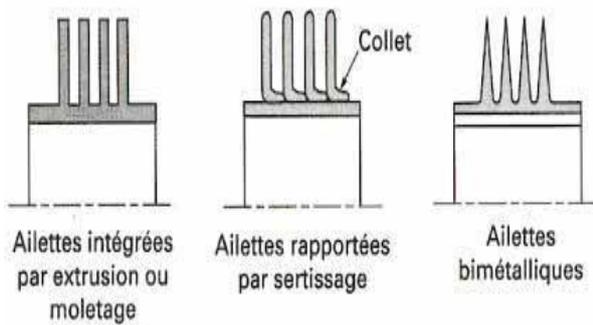


(a)

Ailettes continue

(b)

Ailettes indépendantes



Ailettes intégrées par extrusion ou moletage

Ailettes rapportées par sertissage

Ailettes bimétalliques

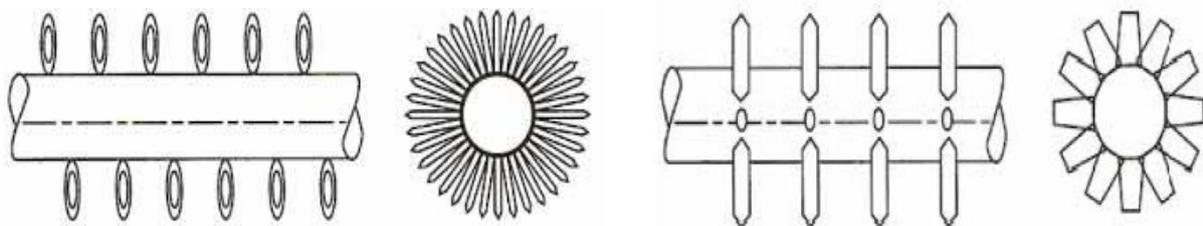
(c)

Ailettes annulaire



(d)

Ailettes spirale

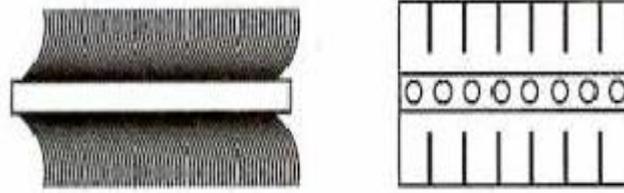


(e)

Ailettes à fils préformés

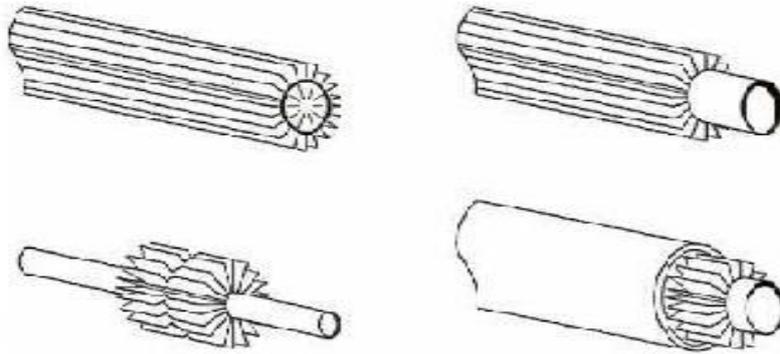
(f)

Ailettes poinçonnées



(g)

Ailettes en brosse



(h)

Type d'ailettes longitudinal

Figures III-6 : Différents types d'ailettes [4]**III-2-1-4-4- Echangeur à tube et calandre :****III-2-1-4-4-1- Echangeur à tête flottante :**

L'une des plaques tubulaires est fixe, bloquée entre les brides de la calandre et de la boîte de distribution. La seconde plaque, d'un diamètre inférieur, porte la boîte de retour et peut coulisser librement à l'intérieur du capot qui ferme la calandre [5].

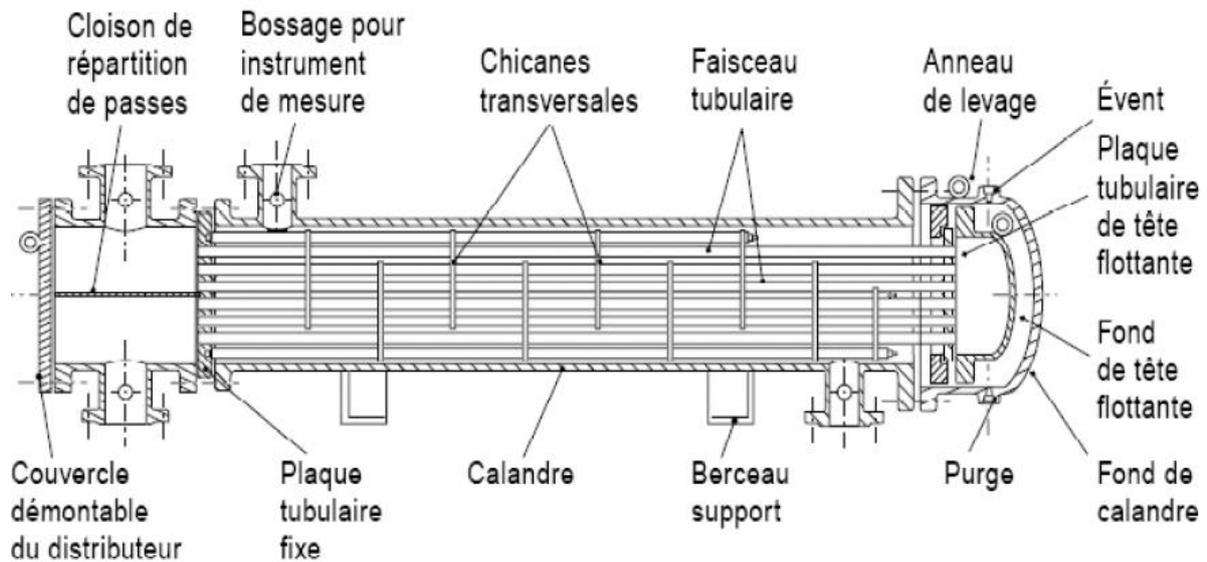


Figure III-7 : Echangeur à tête flottante [5]

III-2-1-4-4-2- Echangeur à plaques tubulaires fixes :

Dans ce cas, les plaques tubulaires peuvent être directement soudées sur la calandre [5].

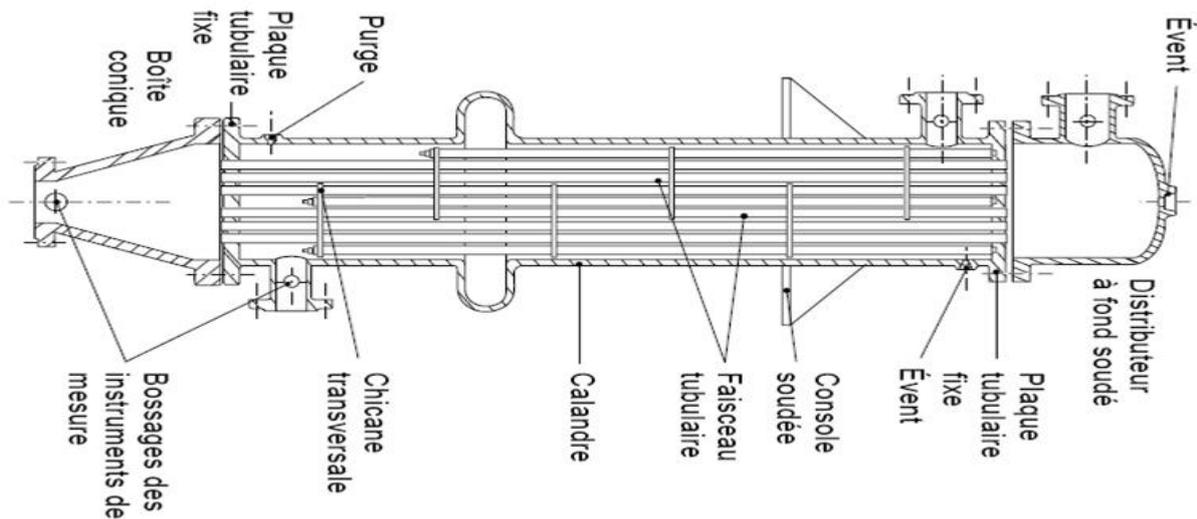


Figure III-8 : Échangeur à plaque tubulaire fixe [5]

III-2-1-4-4-3- Echangeur à plaques tubulaires fixes :

Dans ce cas, les plaques tubulaires peuvent être directement soudées sur la calandre

III-2-1-4-4-4- Echangeur à tubes en U :

Le faisceau est constitué de tubes coudés en forme d'épingle, il n'est donc porté que par une seule plaque tubulaire. Ce système permet la libre dilatation du faisceau. En revanche, le nettoyage des tubes est difficilement réalisable autrement que par voie chimique [5].

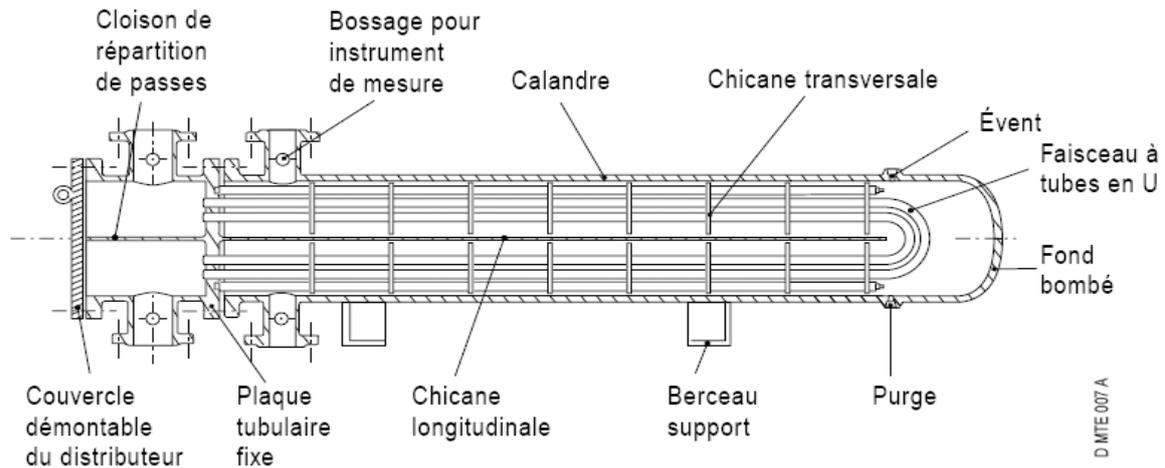


Figure III-9 : Echangeurs à tubes en U [5].

III-2-1-4-5- Echangeur à plaque :**III-2-1-4-5-1- Échangeurs à surface primaire :**

Les échangeurs à surface primaire sont constitués de plaques corruguées, nervurées ou picotées. Le dessin du profil de plaques peut être assez varié mais il a toujours un double rôle d'intensification du transfert de chaleur et de tenue à la pression par multiplication des points de contact [4].

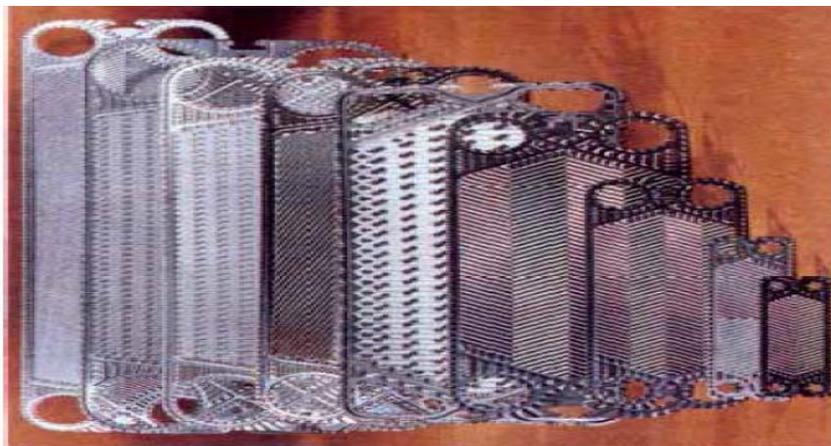


Figure III-10 : Différentes géométries de plaques d'échangeurs à surface primaire [4].

III-2-1-4-5-2- Échangeurs à plaques et joints :

La surface d'échange est alors composée de plaques métalliques, équipées de joints, serrées les unes contre les autres à l'aide de tirants entre deux flasques, l'un fixe, l'autre mobile [4].



Figure III-11 : Échangeur à plaque et joint [4].

III-2-1-5- Échangeurs avec un fluide changeant de phase :

L'un des deux fluides peut subir un changement de phase à l'intérieur de l'échangeur. C'est le cas des évaporateurs si le fluide froid passe de l'état liquide à l'état gazeux, ou de condenseurs si le fluide chaud se condense de l'état de vapeur à l'état liquide.

III-2-1-5-1- Évaporateurs tubulaires :

Ces appareils sont généralement utilisés pour concentrer une solution, refroidir un fluide, ou produire de la vapeur. Le fluide chauffant peut être une phase liquide qui transmet sa chaleur sensible ou de la vapeur cédant sa chaleur latente de condensation sur la paroi.

Il existe deux types d'évaporateurs, qui sont :

III-2-1-5-1-1- Évaporation à l'intérieur des tubes :

On distingue les évaporateurs à tubes verticaux et ceux à tubes horizontaux.

a) Évaporations à tubes verticaux :

Ces appareils sont utilisés pour concentrer une solution, fournir de la vapeur nécessaire au réchauffement d'un fluide à distiller ou comme évaporateurs cristallisateurs. Les tubes sont généralement chauffés extérieurement par de la vapeur qui se condense [4].

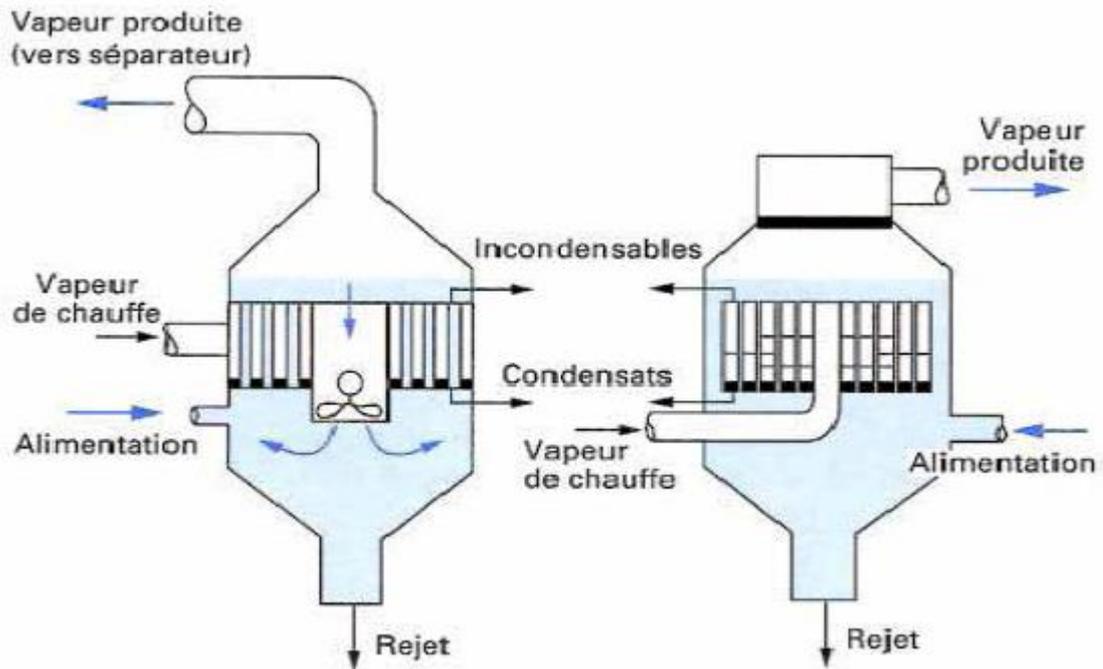


Figure III-12 : Évaporateur à tubes courts et à panier [4].

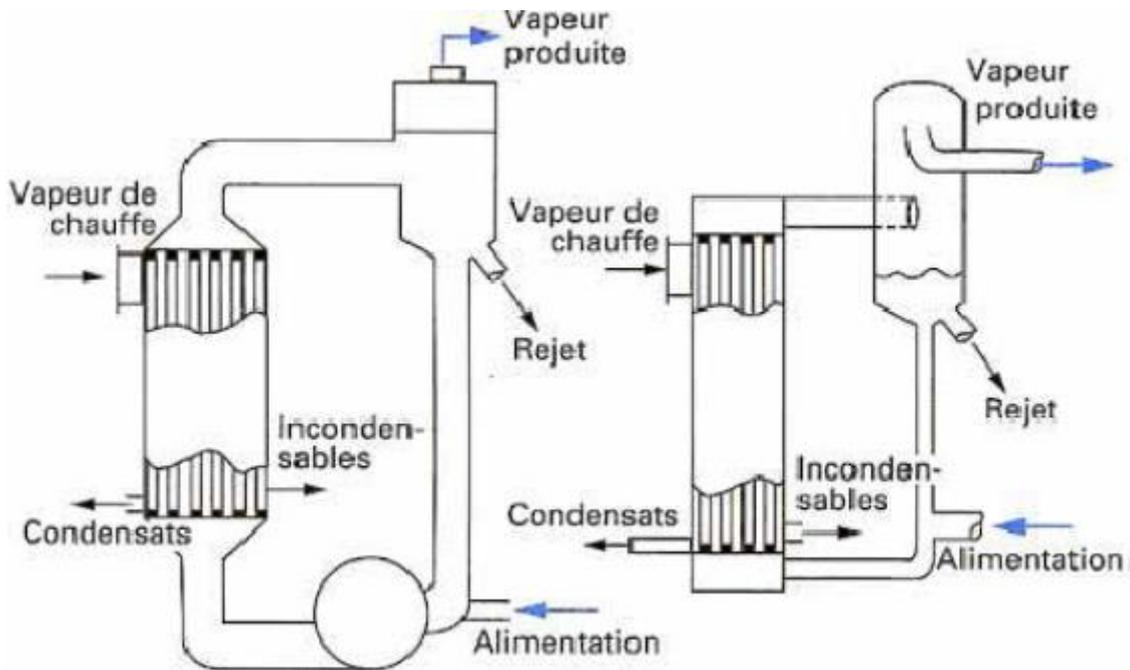


Figure III-13 : Évaporateur à longs tubes verticaux et à grimpage [4].

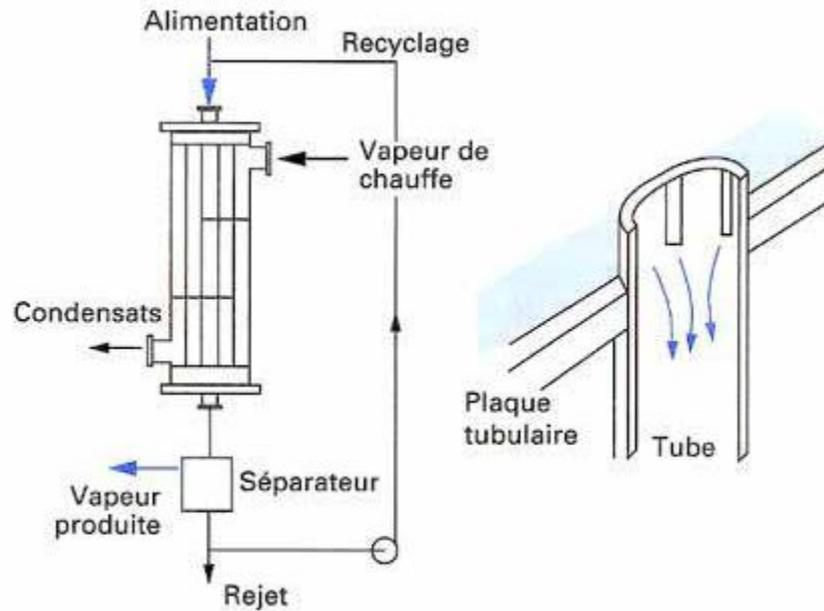


Figure III-14 : Évaporateur à tube tombant [4].

b) Évaporateurs à tubes horizontaux :

Ces appareils sont généralement utilisés comme refroidisseurs de liquide (eau, saumure, eau glycolée, etc.). Le liquide à évaporer qui circule dans les tubes est un fluide frigorigène, alors que le fluide à refroidir circule à l'extérieur des tubes [4].

III-2-1-5-1-2- Évaporation à l'extérieur des tubes :

Ces évaporateurs utilisent généralement des tubes horizontaux. On distingue deux types : les évaporateurs noyés (ou submergés) et les évaporateurs arrosés (ou aspergés) [4].

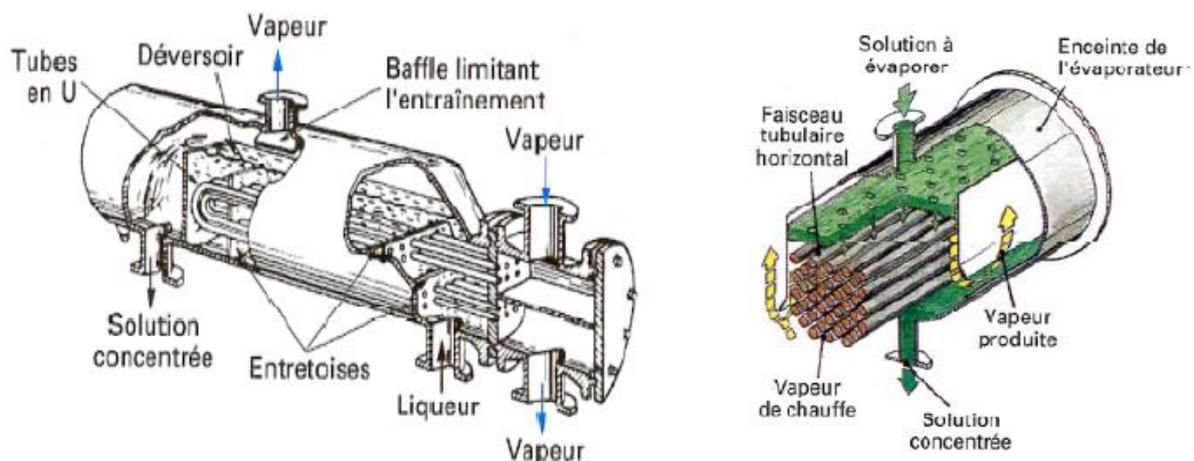


Figure III-15 : Évaporateur noyés et arrosés [4].

III-2-1-5-1-3- Condenseurs tubulaires :

Le but de ces échangeurs est de condenser une vapeur à l'aide d'un fluide réfrigérant. Ils concernent des secteurs d'activité très variés comme la production d'énergie (centrale thermique), les industries chimiques (colonnes à distillation), les industries du génie climatique, de l'agro-alimentaire, du séchage, etc [4].

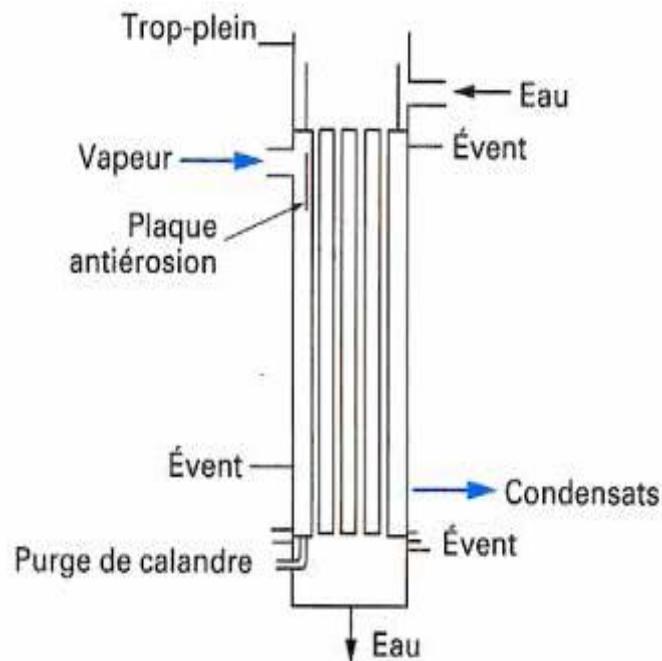


Figure III-16 : Condensation extérieure aux tubes [4].

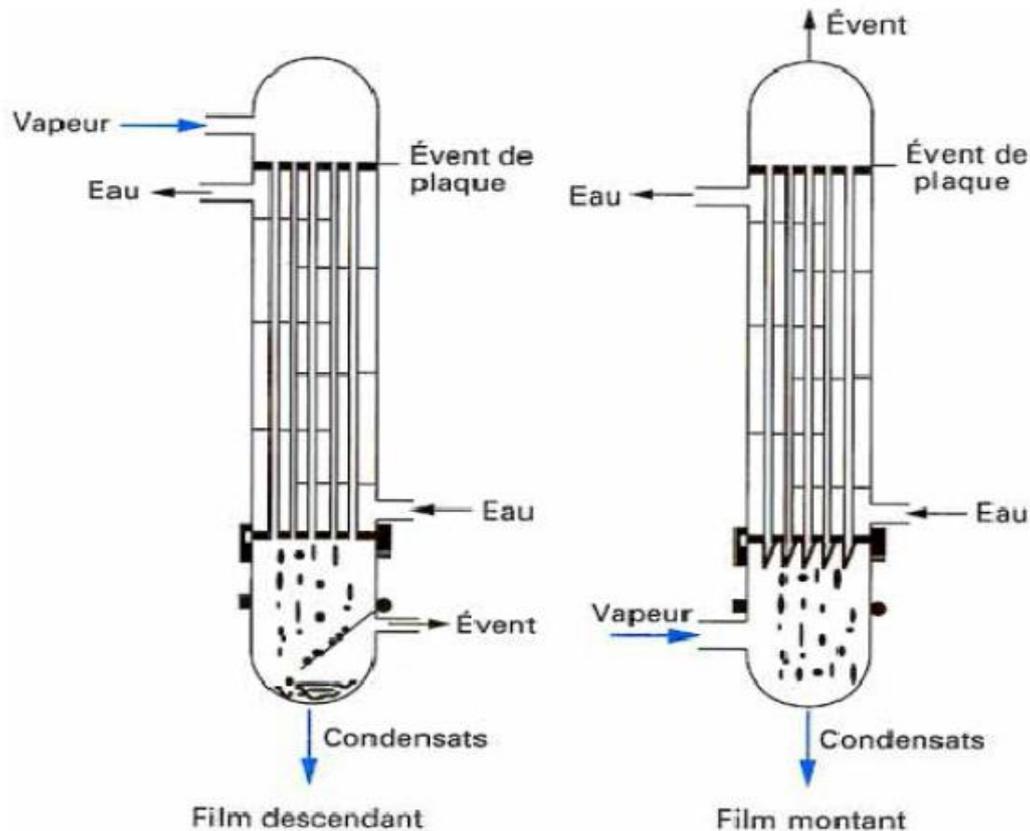


Figure III-17 : Condensation intérieure aux tubes [4].

III-2-2- Classification des échangeurs :

Il existe plusieurs critères de classement des différents types d'échangeurs.

On cite les plus importants.

III-2-2-1- Classement technologique :

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants :

- ✓ à tubes : monotubes, coaxiaux ou multitubulaires ;
- ✓ à plaques : à surface primaire ou à surface secondaire ;
- ✓ autres types : contact direct, à caloducs ou à lit fluidisé.

III-2-2-2- Classement suivant le mode de transfert de chaleur :

Les trois modes de transfert de chaleur (conduction, convection, rayonnement) sont couplés dans la plupart des applications (chambre de combustion, récupération sur les fumées, etc.) ; il y a souvent un mode de transfert prédominant. Pour tout échangeur avec transfert de chaleur à travers une paroi, la conduction intervient [4].

III-2-2-3- Classement suivant le procédé de transfert de chaleur :

Suivant qu'il y a ou non stockage de chaleur, on définit un fonctionnement en récupérateur ou en régénérateur de chaleur :

- ✓ transfert sans stockage, donc en récupérateur, avec 2 ou n passages et un écoulement en général continu ;
- ✓ transfert avec stockage, donc en régénérateur, avec un seul passage et un écoulement intermittent, la matrice de stockage étant statique ou dynamique [4].

III-2-2-4- Classement fonctionnel :

Le passage des fluides dans l'échangeur peut s'effectuer avec ou sans changement de phase ; suivant le cas, on dit que l'on a un écoulement monophasique ou diphasique. On rencontre alors les différents cas suivants :

- ✓ les deux fluides ont un écoulement monophasique ;
- ✓ un seul fluide à un écoulement avec changement de phase, cas des évaporateurs ou des condenseurs ;
- ✓ les deux fluides ont un écoulement avec changement de phase, cas des évapo-condenseur [4].

III-3- Transfert de chaleur [6] :

Les multiples procédés utilisés dans l'industrie sont très souvent le siège d'échanges de chaleur, soit parce que c'est le but recherché (fours, coulée, échangeurs, thermoformage, induction, lits fluidisés, trempe, refroidissement), soit parce que ceux-ci interviennent d'une manière inévitable (chocs thermiques, pertes de chaleurs, rayonnement). Des connaissances de base en ce domaine sont donc nécessaires à l'ingénieur de production ou de développement pour

- comprendre les phénomènes physiques qu'il observe;
- maîtriser les procédés et donc la qualité des produits.

Le deuxième principe de la thermodynamique admet que la chaleur (ou énergie thermique) ne peut passer que d'un corps chaud vers un corps froid, c'est-à-dire d'un corps à température donnée vers un autre à température plus basse.

Le transfert de chaleur se produit suivant deux modes semblables:

- soit par contact: c'est la conduction thermique;
- soit à distance: c'est le rayonnement thermique.

On considère un troisième mode de transfert d'énergie calorifique qui est la convection. (Échange de chaleur entre un fluide et un solide). Dans ce cas le phénomène thermique est compliqué par des déplacements de matière et au transfert de chaleur se superpose le transfert de masse.

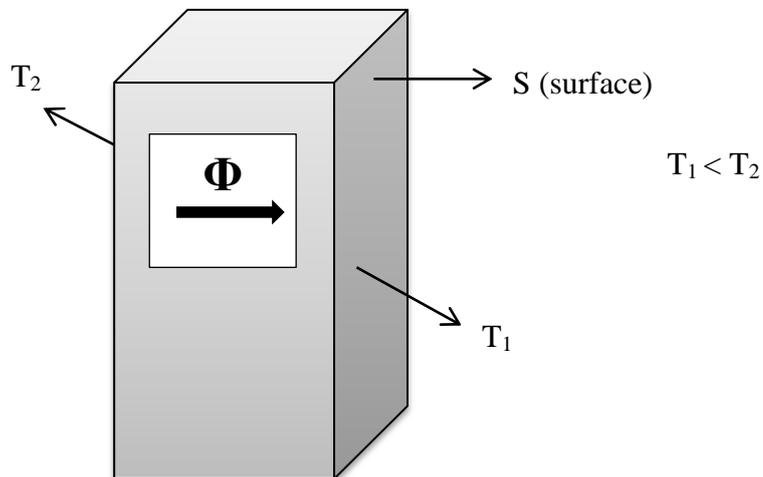


Figure III-18 : Transfert de chaleur

III-3-1- Conduction [6] :

Définie comme étant le mode de transmission de chaleur provoquée par la différence de température entre deux régions d'un milieu solide, liquide ou gazeux ou encore entre deux milieux en contact physique sans déplacement de matière.

➤ **Loi de Fourier :**

Fourier a supposé qu'il existe une relation linéaire entre la densité de flux et le gradient de température, dans le cas d'un milieu isotrope la densité de flux est proportionnel au gradient de la température :

$$\Phi = -\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (\text{III. 1})$$

➤ **Equation générale :**

Le bilan énergétique d'un volume élémentaire dv et de surface ds s'écrit comme suit :

$$\text{Div} \left(\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T) \right) + p = \rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{III. 2})$$

III-3-2- Convection [6] :

C'est un mode de transfert d'énergie dans un milieu matériel avec mouvement de matière entre la surface d'un solide et un fluide en mouvement. Ce mode de transfert fait intervenir deux effets combinés, la conduction de la chaleur entre le solide et le fluide à l'interface solide-fluide et le mouvement macroscopique du fluide. En absence de tout mouvement du fluide, le transfert de chaleur est dû uniquement à la conduction.

➤ **Le mouvement du fluide peut être un mouvement spontané :**

Les parties du fluide les plus chaudes sont moins denses, donc elles ont tendance à monter. Il s'ensuit des mouvements de convection dans le fluide appelé convection libre ou naturelle. Par contre, si le fluide est animé d'un mouvement forcé, on est en présence d'une convection forcé

Le flux de chaleur Φ transmis à travers une surface S par convection est proportionnel à la différence entre la température de la surface du solide et la température du fluide au loin $\Delta T = T_s - T_\infty$, ce qui permet d'écrire la deuxième loi de Newton :

$$\Phi = h \cdot S \cdot (T_s - T_\infty) \quad (\text{III. 3})$$

III-2-2-1- Types de convection :

➤ **Convection libre :**

C'est la forme d'échange de chaleur la plus couramment observée. Cependant due à la complexité des phénomènes, une description avec des lois simples est pratiquement impossible. Pour estimer les coefficients de transfert convectif libre ou forcé h_{CN} ou h_{CF} il faut tenir compte des paramètres spécifiques qui décrivent l'écoulement laminaire ou turbulent. Les données qui permettent de calculer les flux thermiques dans les échanges thermiques sont présentées sous forme de relation entre nombres sans dimension tels que les nombres de Prandtl P_r , de Reynolds R_e , de Raleigh R_a , de Nusselt N_u , de Grashof G_r , ainsi que les paramètres physiques du fluide tel que la masse volumique, et les paramètres de l'écoulement tel que la vitesse.

En absence d'un écoulement forcé, le mouvement du fluide en contact avec un corps solide est produit de manière naturelle par une force de poussée (poussée d'Archimède) due à une différence de densité $\Delta \rho$ entre un certain volume chauffé V par rapport au reste du fluide.

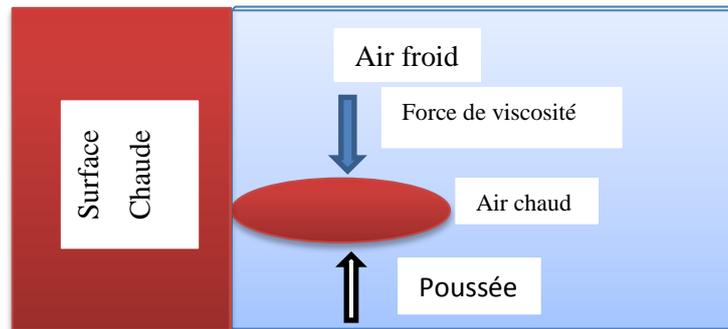


Figure III-19 : Convection libre

➤ **Convection forcée :**

Lorsqu'un fluide s'écoule le long d'une surface solide, on observe qu'une couche fine, en contact avec la surface du solide, reste immobile. La couche figée assure un échange thermique entre la surface du solide et le fluide par pure conduction thermique.

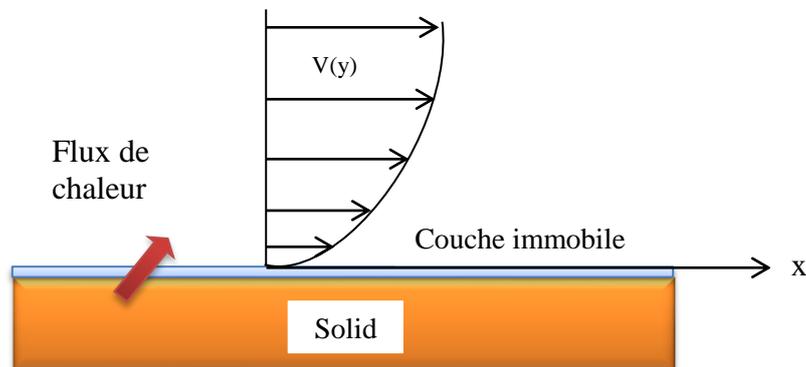


Figure III-20 : Convection forcée

III-3-2-2- Notion de résistance :

Dans le cas d'une paroi plane infinie séparant deux milieux 1 et 2 de température constante (T_1, T_2), avec flux de chaleur spécifique (on appelle flux de chaleur spécifique la quantité de chaleur transportée en une seconde par unité de surface à température constante dans la direction de la normale à cette surface à travers la paroi est :

$$\Phi = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{h_1 \cdot S} + \frac{e}{\lambda \cdot S} + \frac{1}{h_2 \cdot S}} \quad (\text{III. 4})$$

$$R = \frac{1}{h_1 \cdot S} + \frac{e}{\lambda \cdot S} + \frac{1}{h_2 \cdot S} \quad (\text{III. 5})$$

- Dans le cas d'une paroi de plusieurs couches, la résistance équivalente est égale à :

$$R = \frac{1}{h_1 \cdot S} + \sum \frac{e}{\lambda \cdot S} + \frac{1}{h_2 \cdot S} \quad (\text{III. 6})$$

- Dans le cas d'une surface cylindrique, la résistance de la paroi est égale à :

$$R = \frac{\ln \frac{R_1}{R_2}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L} \quad (\text{III. 7})$$

III-3-3- Rayonnement [6] :

Le rayonnement thermique capable de provoquer un effet purement thermique au moment de son absorption ou émission par une matière quelconque, est une très petite portion d'un spectre infiniment large qui est le spectre du rayonnement électromagnétique. Un rayonnement est caractérisée par sa fréquence ν (ou longueur d'onde λ). Il existe pour le rayonnement électromagnétique une relation simple liant ces deux paramètres qu'est $\nu = c \cdot \lambda$

Avec «c » la célérité de l'onde dans le milieu considéré. Le rayonnement thermique se situe entre 0.2 μm (soit le domaine de la lumière ultraviolette) et 100 μm (qui est le domaine des infrarouges) en passant par le rayonnement visible (soit environ 0.35 μm à 0.8 μm).

Tous les corps jouent en même temps le rôle d'émetteurs et de récepteurs. Les surfaces noires sont des surfaces idéales pour lesquelles le flux émis ne dépend que de la température et de l'étendue géométrique de celui-ci.

Le flux émis par le corps noir est donné par la loi de Stefan Boltzmann :

$$\Phi = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (\text{III. 8})$$

On peut écrire que le flux échangé entre deux surfaces idéales de couleurs uniformes et dont le rayonnement est isotrope à températures T_1 et T_2 comme suit :

$$\Phi = F \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{III. 9})$$

F : un paramètre dépendant de la nature de la surface et des positions relatives des deux surfaces

Pour deux plans parallèles d'émissivités ε_1 et ε_2 , le flux échangé est :

$$\Phi = \frac{\sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + 1 + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2}} \quad (\text{III. 10})$$

Pour deux surfaces de géométries quelconques, le flux échangé est :

$$\Phi = \frac{\sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + 1 + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2}} \quad (\text{III. 11})$$

Pour deux surfaces de géométries quelconques, le flux échangé est :

$$\Phi = \frac{\sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{S_1 \cdot \varepsilon_1} + \frac{1}{S_1 \cdot f_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{S_2 \cdot \varepsilon_2}} \quad (\text{III. 12})$$

f_{12} : caractérise la position de la surface 1 par rapport à la surface 2

III-4- Echangeur de chaleur :

III-4-1- Définitions générales [7] :

La définition la plus générale que nous puissions donner d'un échangeur thermique est celle d'un appareil permettant de transférer la chaleur d'une source à un puits. La source et le puits peuvent être constitués d'un écoulement fluide (cas le plus fréquent) ou d'un fluide et d'un solide (cas fréquent en refroidissement électronique). Dans chacun des cas, le ou les fluides échangent de la chaleur avec une paroi d'échange qui peut être la paroi séparant les fluides ou la surface du solide en contact avec le fluide. Il existe aussi des échangeurs à contact direct entre les fluides.

Deux grandes classes peuvent être distinguées :

III-4-1-1- Les récupérateurs :

Par ce terme, nous désignons les échangeurs dans lesquels la chaleur est instantanément transmise d'un fluide chaud à un fluide froid. On néglige donc l'inertie thermique des parois d'échanges.

III-4-1-2- Les régénérateurs :

Ce sont les échangeurs dans lesquels on utilise l'inertie thermique pour stocker la chaleur avant qu'elle soit transférée au milieu froid. Ce stockage peut être réalisé en utilisant la chaleur sensible d'un milieu, sa chaleur latente ou encore une réaction thermochimique réversible.

III-4-1-3- Les échangeurs à contact direct :

N'entrent dans aucune des catégories ci-dessus. Ce sont des échangeurs qui n'utilisent pas de paroi d'échange pour séparer deux fluides. Les fluides sont donc non miscibles. Une nouvelle classe d'échangeurs est devenue un sujet d'étude important : il s'agit des échangeurs-réacteurs

III-4-1-4- Échangeurs-réacteurs :

Qui combinent à la fois les avantages d'un échangeur de chaleur classique et celles d'un réacteur chimique.

Le régime de fonctionnement des récupérateurs est essentiellement stationnaire, bien qu'il puisse fonctionner en instationnaire en particulier lors des démarrages-arrêts.

Dans ce qui suit, nous étudions, dans le détail, l'échangeur-récupérateur en régime stationnaire

III-4-2- Echangeur élémentaire [7] :**III-4-2-1- Aspect externe :**

Vu de l'extérieur, un échangeur se présente comme une boîte noire pourvue, comme un quadripôle électrique, de deux entrées et de deux sorties de fluides en écoulement.

Il est bien commode de mesurer les caractéristiques essentielles de fonctionnement de l'échangeur à l'un de ces quatre pôles, plutôt que de faire des mesures, forcément plus délicates, à l'intérieur.

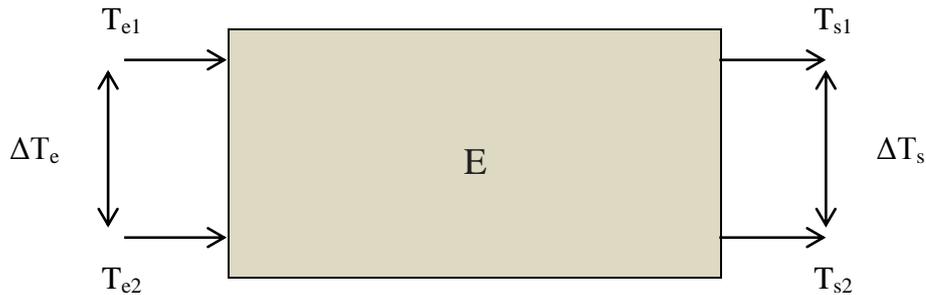


Figure III-21: Aspect externe d'un échangeur.

C'est ainsi que nous établissons pour chacun des fluides 1 ou 2 des paramètres mesurables et mesurés à l'entrée et à la sortie de chacun des deux :

- l'état : liquide, gazeux ;
- le débit massique \dot{m} , constant de l'entrée à la sortie ;
- la température T , variable dans l'échangeur ;
- la pression p , peu variable.

Il est entendu que l'on connaît par ailleurs les caractéristiques thermo-physiques de chacun des deux fluides ainsi que les lois de variation avec la pression, et surtout avec la température, de ces différents paramètres.

Le mouvement des fluides 1 et 2 à l'intérieur de l'échangeur génère une différence de pression entre les deux entrées et sorties égale à la perte de pression visqueuse à l'intérieur de l'échangeur.

Cette perte de pression (perte de charge) dépend pour chacun des fluides :

- de la nature du fluide ;
- de sa température : le coefficient de viscosité qui gouverne cette perte de pression y est très sensible ;
- de son débit et de la géométrie interne de l'échangeur.

III-4-2-2- Aspect interne :

III-4-2-2-1- Coefficient d'échange global [8] :

Le transfert thermique qui a lieu au sein d'un échangeur fait intervenir le mode conductif au travers de la paroi séparant les deux fluides et le mode convectif dans chacun de ces derniers. Généralement, le rayonnement intervient peu et sera, de toute façon, négligé dans ce qui suit.

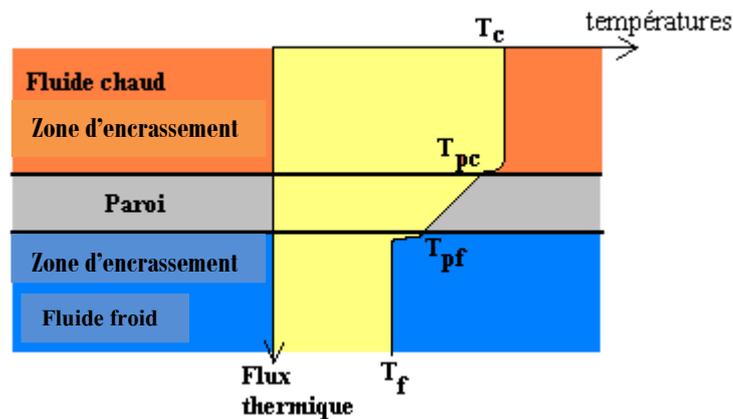


Figure III-22 : représentation schématique du transfert thermique au travers des différents milieux composant un échangeur de chaleur.

La représentation du transfert thermique dans le cas d'une paroi plane séparant deux fluides est effectuée dans la figure 22. Le fluide chaud à T_c subit une première diminution de température due à la convection avec la paroi par le biais d'un coefficient h_c . vient ensuite une inévitable zone d'encrassement due, soit à l'accumulation de particules apportées par le fluide en circulation, soit par dépôt de tartre ou bien de micro-organismes d'origine biologique, soit encore par apparition de corrosion sur la surface d'échange. Ce phénomène se caractérise alors par une résistance thermique supplémentaire due à cet encrassement et que l'on notera re_c . La température diminue ensuite par conduction (conductivité λ) au travers de la paroi d'échange d'épaisseur e . Au-delà et en direction du fluide froid à T_f , on retrouve à nouveau une résistance thermique d'encrassement notée re_f et un transfert convectif caractérisé par h_f .

L'expression du flux de chaleur qui est transféré entre les deux fluides est alors de la forme :

$$\Phi = \frac{T_c - T_f}{\frac{1}{h_c \cdot S} + \frac{re_c}{S} + \frac{e}{\lambda \cdot S} + \frac{re_f}{S} + \frac{1}{h_f \cdot S}} \quad (\text{III. 13})$$

On peut faire la représentation analogique équivalente de cinq résistances thermique en séries

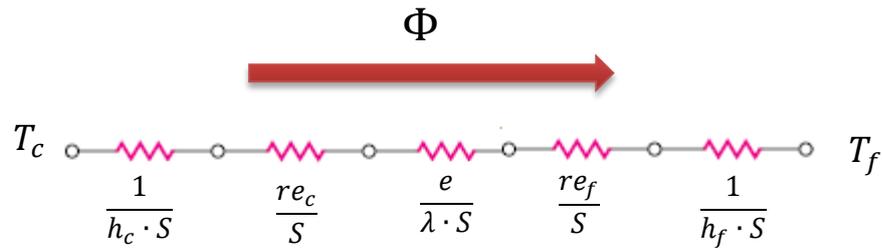


Figure III-23 : représentation analogique du transfert de chaleur au travers des différentes résistances thermiques

Le flux thermique s'écrit alors :

$$\Phi = K \cdot S \cdot (T_c - T_f) \quad (\text{III. 14})$$

Par identification, on extrait des deux équations précédentes (1) et (2) l'expression de U, appelé coefficient d'échange globale. Par commodité il est souvent donné sous sa forme inverse par :

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{h_c} + r_{e_c} + \frac{e}{\lambda} + r_{e_f} + \frac{1}{h_f} \quad (\text{III. 15})$$

Quelques exemples de grandeurs de résistances d'encrassement sont donnés dans le tableau qui suit :

| Fluides et conditions | Résistances d'encrassement (m ² .K.W ⁻¹) |
|------------------------------------|--|
| Eau de mer (T<50 °C) | 1×10 ⁻⁴ |
| Eau de mer (T>50 °C) | 2×10 ⁻⁴ |
| Eau de ville (T<50 °C) | 2×10 ⁻⁴ |
| Eau de ville (T>50 °C) | 3,5×10 ⁻⁴ |
| Eau d'alimentation pour chaudières | 1×10 ⁻⁴ |
| Eau de refroidissement moteur | 1 à 2×10 ⁻⁴ |
| Air industriel | 4×10 ⁻⁴ |
| Liquides réfrigérants | 2×10 ⁻⁴ |
| Huiles de lubrification de moteur | 2×10 ⁻⁴ |
| Fumées de combustibles gazeux | 2 à 5×10 ⁻⁴ |
| Fumées de combustibles lourds | 5 à 40×10 ⁻⁴ |

Tableau III-1 : Valeurs usuelles des résistances [8].

Concernant les coefficients d'échange convectif (h_c et h_f), on peut noter quelques valeurs usuelles dans le tableau suivant :

| Fluides et conditions | Coefficient d'échange convectif h ($W.m^{-2}.K^{-1}$) |
|-----------------------------|--|
| Gaz en convection forcée | $30 < h < 300$ |
| Gaz en convection naturelle | $10 < h < 30$ |
| Eau en convection forcée | $300 < h < 10000$ |
| Eau en convection naturelle | $100 < h < 900$ |
| Condensation | $50000 < h < 110000$ |
| Ebullition | $3000 < h < 50000$ |

Tableau III-2 : Valeurs usuelles du coefficient d'échange convectif h [8].

Concernant la part conductive au travers de la paroi, on donne les résistances thermiques et les conductances des principaux matériaux utilisés dans le tableau qui suit :

| Matériau | Conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$) | Conductance λ/e ($W.m^{-2}.K^{-1}$) | | |
|------------|---|--|--------|--------|
| | | Epaisseurs | | |
| | | 0,5mm | 1mm | 2mm |
| Acier | 40-50 | 80000 | 40000 | 20000 |
| Acier Inox | 15-20 | 40000 | 20000 | 10000 |
| Aluminium | 200 | 400000 | 200000 | 100000 |
| Cuivre | 385 | 760000 | 380000 | 190000 |

Tableau III-3 : Valeurs de conductivité et de conductance des principaux matériaux [8].

On note quelques grandeurs du coefficient d'échange global pour divers types d'échangeur.

| Type de l'échangeur | Coefficient d'échange global ($W/m^2.^{\circ}C$) |
|---------------------|--|
| Liquide-liquide | 100 à 2000 |
| Liquide-gaz | 30 à 300 |
| Condenseur | 500 à 5000 |

Tableau III-4 : Coefficient d'échange global pour divers types d'échangeurs [8].

Dans l'expression $\Phi = K \cdot S \cdot (T_c - T_f)$, le coefficient d'échange global K est rapporté à la surface d'échange S . Dans le cas d'une plaque plane, cette surface est identique de chaque côté de la paroi. Or si tel n'est le cas, lorsque cette paroi est cylindrique, K doit être rapporté à l'une des deux surfaces. Ainsi, si on suppose un écoulement de deux fluides (chaud au centre et froid dans l'espace annulaire), alors le flux échangé prend la forme suivante :

$$\Phi = \frac{T_c - T_f}{\frac{1}{h_c \cdot S_c} + \frac{re_c}{S_c} + \frac{1}{2\pi\lambda L} \ln \frac{D_f}{D_c} + \frac{re_f}{S_f} + \frac{1}{h_f \cdot S_f}} \quad (\text{III.16})$$

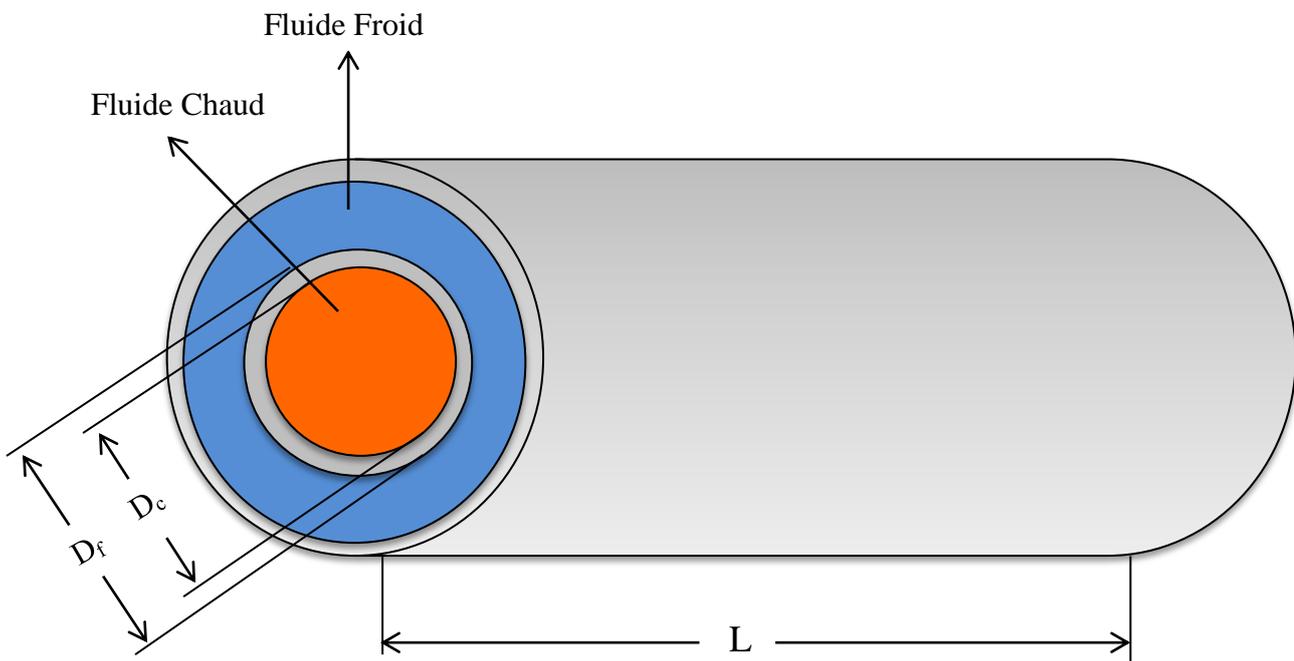


Figure III-24 : Echangeur à tubes coaxiaux.

Selon le choix des surfaces choisies comme référence, le flux s'écrit alors :

$$\Phi = U_c \cdot S_c \cdot (T_c - T_f) = \frac{S_c \cdot (T_c - T_f)}{\frac{1}{h_c} + re_c + \frac{D_c}{2K} \cdot \ln \frac{D_f}{D_c} + re_f \cdot \frac{D_c}{D_f} + \frac{1}{h_f} \cdot \frac{D_c}{D_f}} \quad (\text{III} - 18)$$

Avec : $S_c = \pi \cdot D_c \cdot L$

$$\Phi = U_f \cdot S_f \cdot (T_c - T_f) = \frac{S_f \cdot (T_c - T_f)}{\frac{1}{h_c} \cdot \frac{D_f}{D_c} + re_c \cdot \frac{D_f}{D_c} + \frac{D_f}{2K} \cdot \ln \frac{D_f}{D_c} + re_f + \frac{1}{h_f}} \quad (\text{III} - 19)$$

Avec : $S_f = \pi \cdot D_f \cdot L$

Quel que soit le choix, K_c ou K_f , on a $K_c S_c = K_f S_f$ et le flux de chaleur est indifféremment donné par :

$$\Phi = K_c \cdot S_c \cdot (T_c - T_f) = K_f \cdot S_f \cdot (T_c - T_f) \quad (\text{III.20})$$

III-5- Principales configurations d'écoulement [7] :

À l'intérieur du quadripôle précédemment défini, les fluides peuvent suivre des trajectoires complexes. Néanmoins, on peut distinguer trois types de configurations d'écoulement.

III-5-1- Ecoulement co-courant :

Dans cette configuration, les écoulements des fluides chaud et froid sont parallèles et de même sens. Une telle configuration peut être trouvée dans un échangeur coaxial ou dans certains échangeurs à plaques

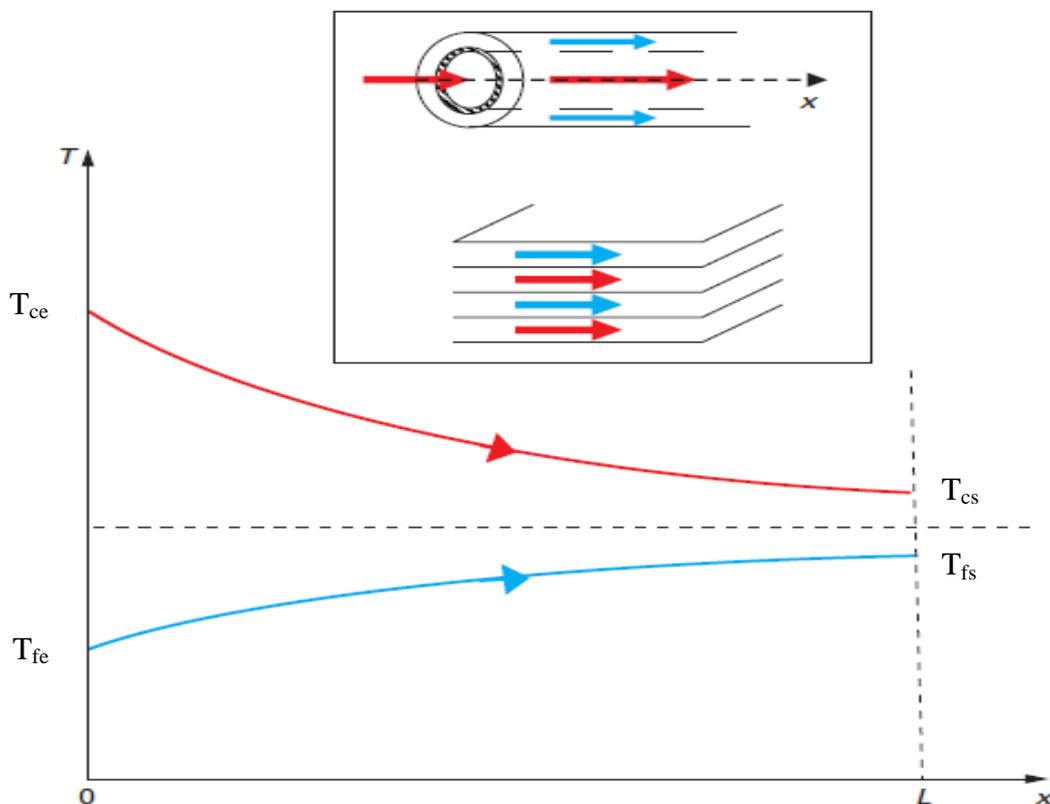


Figure III-25 : Profil longitudinal de températures dans un échangeur co-courant [7]..

III-5-2- Ecoulement contre-courant :

Dans cette configuration, les écoulements des fluides chaud et froid sont toujours parallèles mais de sens opposés.

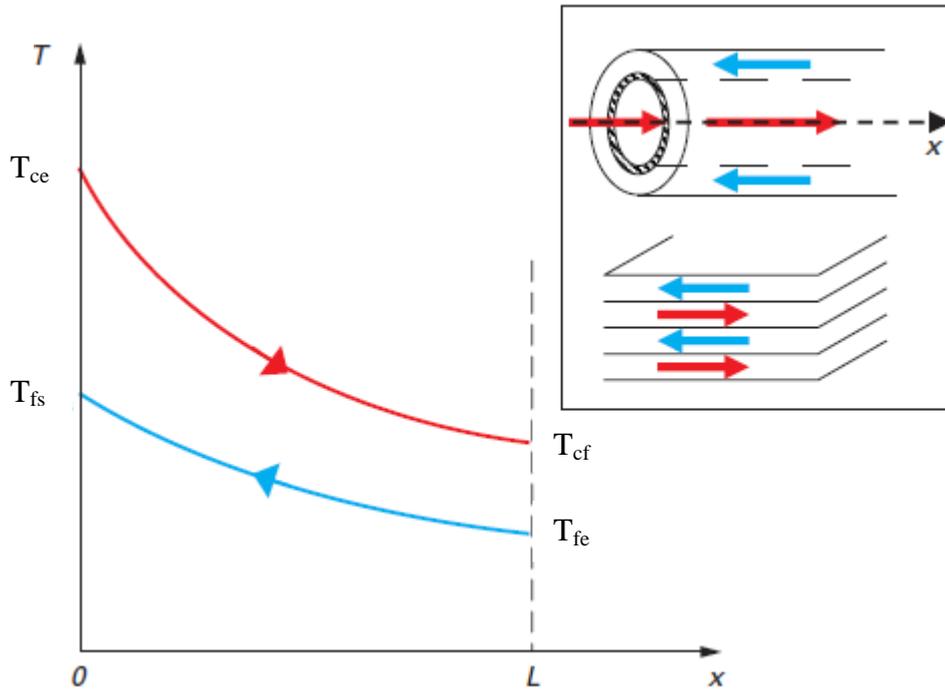


Figure III-26 : Profil longitudinal des températures dans un échangeur contre-courant [7].

III-5-3- Ecoulement à courants croisés :

Dans cette configuration, les écoulements sont perpendiculaires l'un à l'autre. Cette configuration est bien adaptée à certaines utilisations, dont l'exemple typique est le radiateur automobile. Dans ce radiateur, un écoulement d'air se propage perpendiculairement à un écoulement d'eau confiné dans de nombreux canaux.

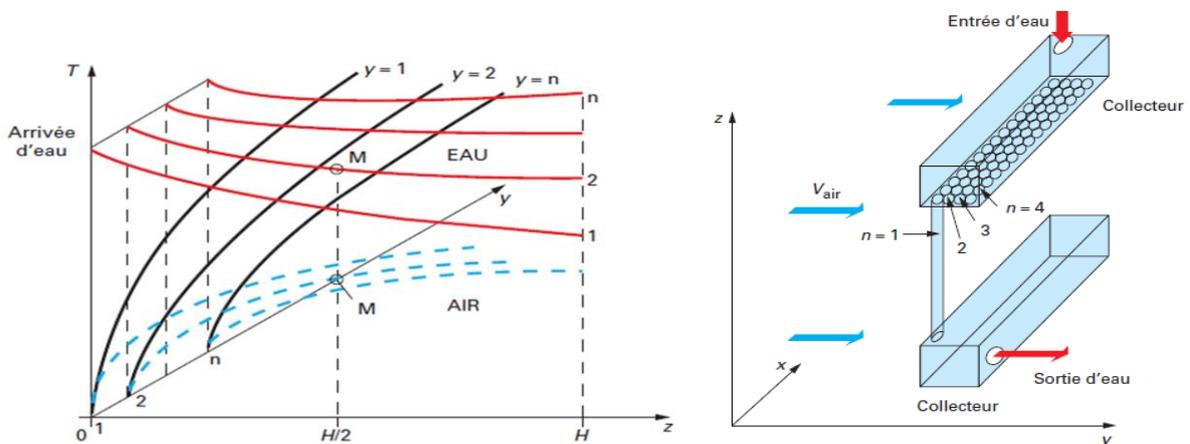


Figure III-27 : Profil longitudinal des températures dans un échangeur à courants croisés [8].

On peut remarquer sur la figure ci-dessus que le fluide chaud (eau) s'écoule suivant z et le fluide froid (air) suivant y. On identifie par n la position d'un plan perpendiculaire, n étant le nombre de plans perpendiculaires à l'écoulement d'air relativement aux tubes contenant le liquide.

III-6- Méthodes de calcul des échangeurs :

III-6-1- méthode de ΔTLM :

En entend par l'expression ΔTLM , l'écart des températures logarithmique moyen. Cette expression peut être déterminée en faisant un bilan énergétique pour un échangeur à courant parallèles.

Le flux de chaleur échangé à travers la paroi :

$$d\Phi = K \cdot (T_c - T_f) \cdot dS \quad (III. 21)$$

Le flux de chaleur cédé ou reçu :

$$d\Phi = -\dot{m}_c \cdot C_c \cdot dT_c = \dot{m}_f \cdot C_f \cdot dT_f \quad (III. 22)$$

Le bilan total d'énergie :

En combinant les trois équations on aura :

$$\Phi = \dot{m}_c \cdot C_c \cdot (T_{ce} - T_{cs}) = \dot{m}_f \cdot C_f (T_{fs} - T_{fe}) \quad (III. 23)$$

$$d(T_c - T_f) = -\left(\frac{1}{\dot{m}_c \cdot C_c} + \frac{1}{\dot{m}_f \cdot C_f}\right) \cdot d\Phi \quad (III. 24)$$

$$d(T_c - T_f) = -\left(\frac{1}{\dot{m}_c \cdot C_c} + \frac{1}{\dot{m}_f \cdot C_f}\right) \cdot K \cdot (T_c - T_f) dS \quad (III. 25)$$

$$\ln \left(\frac{T_{cs} - T_{fs}}{T_{ce} - T_{fe}} \right) = [(T_{cs} - T_{fs}) - (T_{ce} - T_{fe})] \cdot \frac{K \cdot S}{\Phi} \quad (III. 26)$$

D'où :

$$\Phi = K \cdot S \cdot \Delta T_{LM} \quad (III. 27)$$

Avec :

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_s - \Delta T_e}{\ln \frac{\Delta T_s}{\Delta T_e}} \quad (III. 28)$$

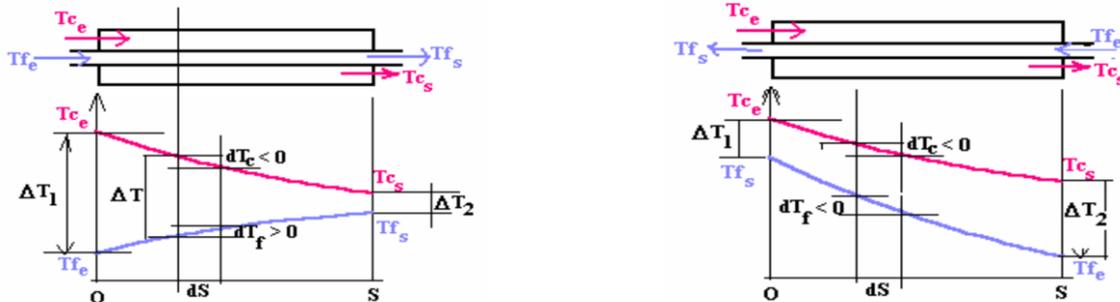


Figure III-28 : Evolution des températures le long des échangeurs co-courant et contre-courant

Remarque :

- L'expression de ΔT_{LM} d'un échangeur co-courant est identique à celle d'un échangeur contre-courant
- Lorsque l'on a affaire à un échangeur à courants croisés, le ΔT_{LM} est multiplié par un coefficient de correction F qui est fonction du type d'échangeur utilisé. Ces coefficients sont obtenus à partir des abaques où F est fonction de deux paramètres sans dimension (R et P) calculés à partir des températures terminales des deux fluides. Dans les calculs automatiques on utilise la relation suivante pour évaluer le coefficient de correction F.

$$F = \frac{\sqrt{P^2 + 1} \cdot \ln \frac{1 - R}{1 - P \cdot R}}{(P - 1) \cdot \ln \frac{2 - R \cdot (P + 1 - \sqrt{P^2 + 1})}{2 - R \cdot (P + 1 + \sqrt{P^2 + 1})}} \quad (III. 29)$$

Avec : $P = \frac{T_{fs} - T_{fe}}{T_{ce} - T_{fe}}$ et $R = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{T_{fs} - T_{fe}}$ (III. 30)

III-6-2- méthode des NUT [10] :

La méthode des NUT (Nombre d'Unité de Transfert) connaît une grande utilisation dans la pratique car elle est très proches des contraintes du concepteur, et permet aussi un calcul direct en basant seulement sur les températures d'entrées dans l'échangeur. Elle repose souvent sur la notion d'efficacité, notée ϵ et définie de la manière suivante :

$$\varepsilon = \frac{\text{Puissance réelle}}{\text{Puissance maximale}} = \frac{P}{P_{max}} \quad (\text{III. 31})$$

La puissance maximale P_{max} peut s'écrire comme suit :

$$P_{max} = C_{min} \cdot (T_{ce} - T_{fe}) \quad (\text{III. 32})$$

Avec :

$$C_{min} = \text{Min}(\dot{m}_c \cdot C_c, \dot{m}_f \cdot C_f) \quad (\text{III. 33})$$

On trouve ainsi :

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_c \cdot C_c \cdot (T_{ce} - T_{cs})}{C_{min} \cdot (T_{ce} - T_{fe})} \quad (\text{III. 34})$$

On démontre assez facilement que pour des échangeurs à courants parallèles, l'efficacité est essentiellement fonction de deux paramètres NUT et C définis de la manière suivante :

$$C = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (\text{III. 35})$$

$$NUT = \frac{K \cdot S}{C_{min}} \quad (\text{III. 36})$$

Avec :

$$C_{max} = \text{Max}(\dot{m}_c \cdot C_c, \dot{m}_f \cdot C_f) \quad (\text{III. 37})$$

Conclusion :

Ce chapitre est un aperçu descriptif sur les échangeurs de chaleur, en effet nous avons donné une définition ainsi que le principe de fonctionnement et les critères de classement relatif à ces appareils.

IV-1- Introduction :

Les puissances dissipées sous forme de pertes joules dans un alternateur sont énormes et ceci dans un volume restreint. Il est donc nécessaire de mettre en place des systèmes d'évacuation de ces pertes.

Actuellement, presque toute l'énergie produite ou recueillie transite au moins une fois par un échangeur thermique. Cet appareil est destiné également à des usages extrêmement divers malgré une fonction générale de base identique qui est le transfert de chaleur du fluide chaud au fluide froid. Les techniques de l'industrie du chauffage et du froid nécessitent pour la grande majorité de leurs applications des échangeurs thermiques avec une grande efficacité thermique. Cette diversité des applications a entraîné à développer des échangeurs avec une grande surface d'échange sous un volume très réduit qui est la solution pour la majorité des problèmes de chauffage et de froid de l'industrie.

L'étude d'un tel système nécessite une bonne maîtrise du fonctionnement de l'alternateur ainsi un certain nombre de propriétés thermo-physiques. Dans ce chapitre, nous allons présenter l'alternateur avec ses éléments constitutifs et une méthode de calcul d'un échangeur de chaleur et nous donnerons les principaux modèles utilisés pour le calcul des coefficients de transfert de chaleur ainsi que la limite de colmatage.

IV-2- Description de l'alternateur [1] :

Cet alternateur est un alternateur bipolaire à refroidissement direct de l'enroulement rotor et à refroidissement indirect de l'enroulement stator. L'alternateur est doté d'une enveloppe résistante à la pression qui règne à l'intérieur et étanche au gaz ainsi que de paliers placés à ses deux extrémités à cause de l'utilisation d'hydrogène comme fluide de refroidissement. Les réfrigérants (les échangeurs) d'hydrogène sont logés horizontalement à l'intérieur de l'enveloppe cylindrique du stator.

L'alternateur comprend les deux principaux éléments suivants :

IV-2-1- Le stator :

Il se compose essentiellement de :

➤ L'enveloppe :

L'enveloppe du stator est constituée de tôles soudées étanches au gaz et résistant à la pression. Elle porte le circuit magnétique, l'enroulement et les réfrigérants disposés horizontalement dans la partie supérieure de l'enveloppe. Le stator repose sur la table-support par l'intermédiaire de pattes soudées à l'enveloppe. Les pattes du stator sont fixées à la table-support au moyen de boulons d'encrage.

➤ Le circuit magnétique :

Le circuit magnétique est constitué par un empilage de tôles minces. Chaque couche de l'empilage est constitué de plusieurs segments de tôles de 5 mm d'épaisseur, les tôles sont au silicium à grande résistivité et isolées par du vernis. Le paquet de tôle est maintenu serré au moyen de tiges d'assemblage et plaques de serrage, puis fixé à l'enveloppe du stator.

La chaleur dégagée par le circuit magnétique est évacuée par des canaux axiaux qui résultent de la division axiale de l'empilage en plusieurs paquets de tôle. L'hydrogène s'écoule par de larges fentes entre les paquets de tôles séparés par des entretoises.

➤ Enroulement :

L'enroulement du stator est un enroulement à têtes de bobines coniques en deux couches composé de barres. Il est logé dans des encoches rectangulaires régulièrement réparties sur le bord intérieur du circuit magnétique. Les conducteurs élémentaires de chaque barre de la couche supérieure ou inférieure sont soudés et isolés les uns par les autres.

➤ Réfrigérants d'hydrogène :

Les quatre réfrigérants d'hydrogène sont installés horizontalement dans la partie supérieure de l'enveloppe du stator.

IV-2-2- Le rotor :

Il se compose essentiellement de :

➤ Arbre :

L'arbre du rotor est un élément massif monobloc forgé à partir d'un lingot coulé sous vide. Des encoches radiales, qui reçoivent l'enroulement inducteur, sont fraisées dans la table de rotor. Ces encoches sont disposées sur la périphérie de l'arbre de façon à donner deux pôles massifs.

➤ Enroulement :

L'enroulement du rotor se compose de plusieurs bobines logées dans les encoches et connectées entre elle de manière à créer deux groupes de bobines qui entourent chacun un des deux pôles de l'arbre. Chaque bobine comprend plusieurs enroulement montés en série qui sont constitués chacun par deux demi-enroulements réunis par brasage dans les têtes de bobines. El se compose de conducteurs creux présentant chacun deux canaux de refroidissement latéraux.

➤ Frettes :

Les frettes monobloc soustraient les têtes de bobines à l'action de la force centrifuge. Le coté des frettes opposé à la table du rotor n'est pas en contact avec l'arbre, ce qui garantit la flexion non entravée de l'arbre au niveau des têtes de bobines.

La surface des frettes en contact avec l'arbre est argentée de manière à garantir une faible résistance de passage des courants de l'amortisseur. Les frettes sont en métal amagnétique pour réduire les pertes supplémentaires.

➤ Les ventilateurs :

Le gaz de refroidissement de l'alternateur est mis en circulation par deux ventilateurs axiaux disposés sur les deux fusés de l'arbre. La pression engendrée par les deux ventilateurs vient s'ajouter à la propre hauteur de refoulement du rotor pour intensifier le refroidissement de l'enroulement rotor. Les pales ont une base filetée qui est vissée dans l'arbre du rotor. Cet assemblage permet de modifier l'angle d'incidence des pales.

IV-2-3- Fonctionnement :

Le rotor de l'alternateur est entraîné par la turbine. Lorsque la vitesse de la turbine atteint 97.5 % de la vitesse nominale, le relais s'excite et donne l'ordre d'amorçage de l'excitation alternateur en fermant le contacteur, qui donne lui-même l'ordre de fermeture du contacteur d'amorçage. La batterie alimente l'inducteur de l'excitateur, l'excitateur fournit le courant d'excitation au rotor de l'alternateur principal.

Le rotor induit une f.é.m. au niveau du stator. Cette tension croît. L'amorçage est stoppé à environ 30% de la tension nominale stator.

Dès cet instant là l'alternateur est auto excité. La tension stator continue de croître jusqu'à la tension de consigne.

L'arrêt du groupe sur un ordre normal ou par un ordre issu d'une protection, fait ouvrir le disjoncteur de groupe et ensuite le circuit d'excitation.

IV-2-4- Caractéristiques générales de l'alternateur :

L'alternateur est construit par SIEMENS-ELIN avec les caractéristiques de conception suivante :

| | |
|--|-------------------|
| Volume de l'alternateur | 62 M ³ |
| Poids du stator | 184000 KG |
| Poids du rotor | 35000 KG |
| Poids d'un réfrigérant d'hydrogène avec la boîte à eau | 1560 KG |
| Puissance apparente | 220 MVA |
| Puissance active | 176 MW |
| Intensité | 8,195 KA |
| Tension | 15,5 KV |
| Vitesse de rotation | 3000 TPM |
| Fréquence | 50 HZ |

Tableau IV-1: Caractéristiques de l'alternateur

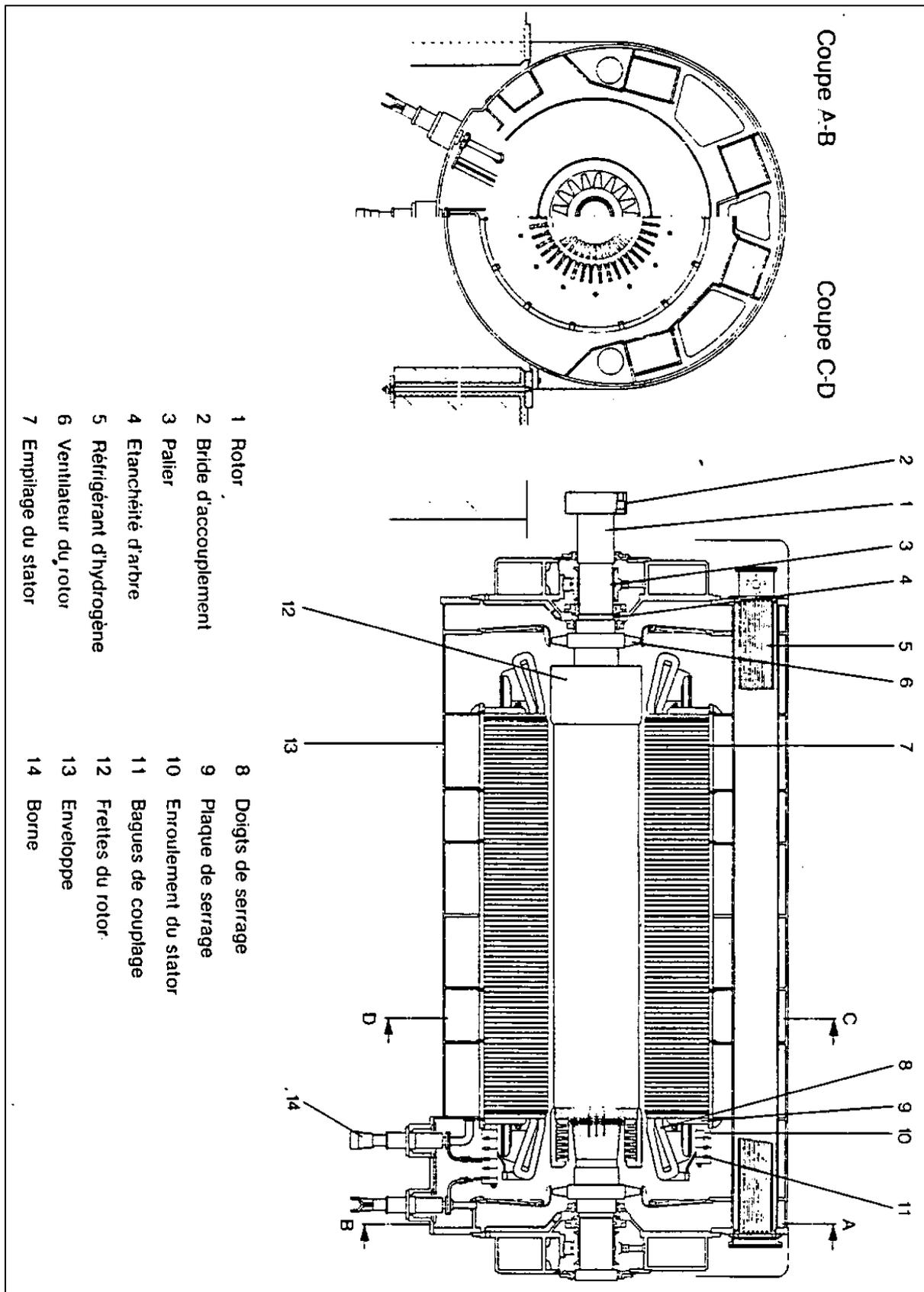


Figure IV-1 : Coupe longitudinale de l'alternateur [1].

IV-3- Refroidissement de l'alternateur [1] :

Les pertes de chaleur à l'intérieur de l'alternateur sont évacués par l'hydrogène gaz qui les transmet vers l'eau de refroidissement à travers les tubes ailetés qui les transmet à son tour vers l'extérieur.

Le mode de refroidissement adopté pour le rotor est le refroidissement direct grâce auquel la chaleur est cédée directement au fluide de refroidissement à l'endroit où elle se dégage. Il permet d'éviter en grande partie les points chauds et les grande différences de température entre pièces voisines et par conséquent les différences de dilatation thermique qui entraînent des sollicitations mécaniques notamment au niveau des conducteurs de cuivre, de l'isolation et de table de rotor.

IV-3-1- Le circuit de refroidissement par hydrogène :

L'hydrogène circule en circuit fermé à l'intérieure de l'alternateur. Il est refoulé dans les réfrigérant par deux ventilateurs axiaux montés aux extrémités de l'arbre du rotor. Les ventilateurs aspirent aussi l'hydrogène des réfrigérant.

Le flux d'hydrogène se divise en trois parties au refoulement de chaque ventilateur comme le montre le schéma de circulation du gaz de refroidissement dans l'alternateur.

➤ Première partie du flux :

L'hydrogène froid passe sous les frettes et se dirige vers la chambre des têtes de bobines du rotor pour refroidir directement l'enroulement du rotor.

L'enroulement du rotor est symétrique par rapport à l'axe de machine et à l'axe polaire.

Chaque quart de bobine qui résulte de cette symétrie est divisée en deux zones de refroidissement.

La première zone comprend les têtes de bobine du rotor et les extrémités des barres en sortie d'encoche, alors que la deuxième zone comprend l'enroulement depuis l'extrémité de la table jusqu'au milieu du rotor.

Dans la première zone de refroidissement l'hydrogène froid arrive au milieu des têtes de bobine alors que dans la deuxième, il arrive juste avant l'extrémité de la table.

Grace à des boutonnières pratiquées dans chaque conducteur, l'hydrogène froid pénètre dans les canaux de refroidissement fermés qui sont dimensionnés de façon de la température de tous les conducteurs soit sensiblement identique.

L'hydrogène chaud des deux premières zones de refroidissement sort du rotor au milieu de la table par des orifices radiaux aménagés dans des conducteurs creux et par les cales de fermeture des encoches et se dirige vers l'entrefer de la machine.

➤ **Deuxième partie du flux :**

La deuxième partie du flux passe au-dessus des têtes de bobines du stator vers les canaux d'hydrogène froid, puis vers les chambres d'hydrogène froid dans l'espace du stator entre l'enveloppe extérieure et le circuit magnétique.

L'hydrogène se dirige ensuite vers l'entrefer par les fentes de refroidissement pratique dans l'empilage de tôles et absorbe au passage la chaleur de l'empilage de tôles et de l'enroulement du stator.

➤ **Troisième partie du flux :**

La troisième partie du flux pénètre dans l'entrefer de la machine après être passé au-dessus de la frette du rotor, puis longe les broches de pression et revient par les fentes de refroidissement de l'empilage de tôles à la chambre extérieure d'hydrogène chaud située dans l'enveloppe du stator et par conséquent au réfrigérant.

Sur son trajet, l'hydrogène refroidit principalement les frettes du rotor, les extrémités de la table du rotor et l'extrémité du circuit magnétique.

Les trois parties du flux d'hydrogène se rejoignent dans l'entrefer et ressortent radialement au niveau des chambres des chambres d'hydrogène chaud dans l'enveloppe du stator après avoir traversé les fentes de refroidissement du circuit magnétique. L'hydrogène refroidi d'autres sections du circuit magnétique et de l'enroulement du stator. L'hydrogène chaud passe ensuite dans les réfrigérants ou il est refroidi avant d'être recyclé par les ventilateurs.

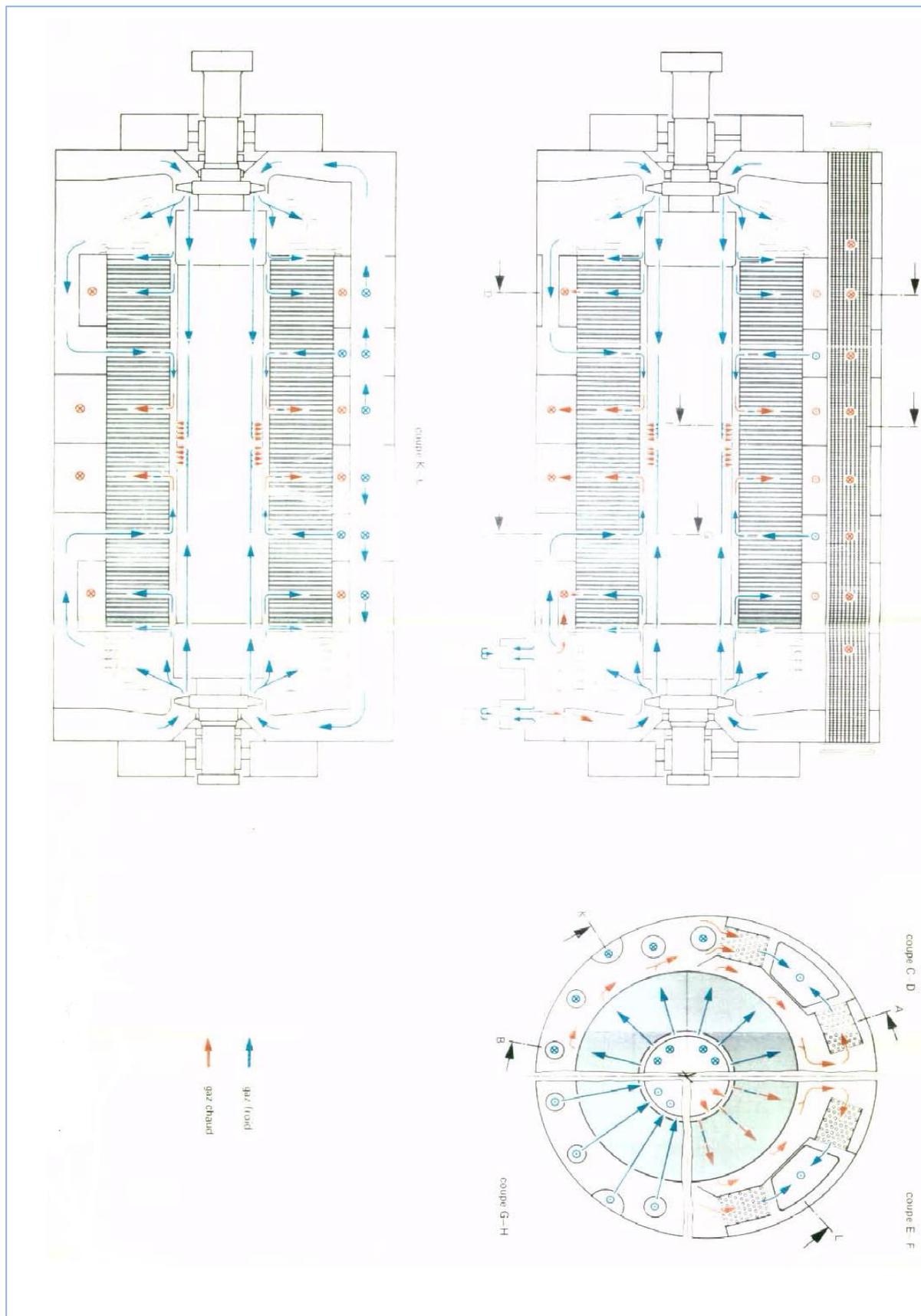


Figure IV-2 : Schéma de circulation de l'hydrogène dans l'alternateur [1].

IV-3-2- Spécification des gaz [1] :**➤ Hydrogène :**

L'hydrogène doit présenter les caractéristiques suivantes :

- Il doit être pur à 99,7 % en volume.
- Le gaz est fourni à partir d'un poste centralisé ; il doit être disponible sous une pression relative de 8 à 10 bars.
- Pression de l'explosion de l'alternateur est de 10 bars.

Le gaz a été choisi pour sa faible densité (14 fois plus faible que celle de l'air) ce qui réduit dans le même rapport les pertes par frottement de fluides, ainsi que pour ces propriétés thermique (conductibilité thermique est 8 fois plus grande que celle de l'air).

➤ Gaz carbonique :

Etant donné que l'hydrogène et l'air forment un mélange facilement explosif, l'alternateur doit être rempli avec une quantité de CO₂ suffisante pour exclure toute possibilité de mélange explosif lors de remplissage ou de la vidange.

Le gaz doit présenter les caractéristiques suivantes :

- Il doit être pur à 99,7 % en volume.
- Le gaz est fourni à partir d'un poste centralisé avec une pression de 1 à 2,5 bars et une température de 20 à 30 °C.

IV-3-3- Description des réfrigérants d'hydrogène [1] :

Les réfrigérants d'hydrogène sont au nombre de quatre, logés horizontalement dans l'enveloppe de stator.

Les réfrigérants d'hydrogène sont des échangeurs à courants croisés, composé de faisceaux de tubes à simple passe de disposition quinconce, muni d'ailettes transversales circulaire d'épaisseur constant, et une calandre.



Figure IV-3 : Disposition des réfrigérants le long de l'enveloppe du stator



Figure IV- 4 : Le réfrigérant d'hydrogène

IV- 4- Calcul de la limite de colmatage :

Dans ces échangeurs thermiques, le problème principal rencontré, est les fuites d'eau de refroidissement causé par les percements des tubes.

Pour assurer le bon fonctionnement de ces échangeurs avec un meilleur rendement, il faut donc éviter toute fuite d'eau ; avec la technologie d'auto surveillance, la fuite d'eau est détectée instantanément, et l'échangeur défectueux est mis hors service, mais cette solution à l'inconvénient de diminuer la puissance de l'alternateur ce qui mène à des pertes du point de vue économique. Alors si une fuite est apparue dans un tube, on fait immédiatement le colmatage de ce dernier.

Le colmatage d'un tube est le supprimer à l'aide d'un bouchon.

Etant donné que le système de refroidissement est constitué de quatre échangeurs thermiques identiques avec les mêmes caractéristiques techniques, donc nous allons limiter notre calcul pour un seul échangeur.

➤ **Objectif du calcul :**

Dans le cadre de l'étude de la sûreté de fonctionnement du système de refroidissement de l'alternateur, nous cherchons à calculer la limite de colmatage des tubes des réfrigérants, afin de prévoir la nécessité de remplacement des tubes défectueux, ou éventuellement l'échangeur en entier, dans le but d'assurer le refroidissement nécessaire pour l'alternateur

➤ **Caractéristiques de conception de l'échangeur :**

| | Valeur | Unité |
|---|--------|-------------------|
| Débit volumique de l'hydrogène | 5,5 | m ³ /s |
| Température du gaz froid | 40 | °C |
| Température du gaz chaud | 60,2 | °C |
| Débit volumique de l'eau de refroidissement | 52,5 | m ³ /h |
| Température maximale d'entrée de l'eau de refroidissement | 35 | °C |
| Température de sortie de l'eau de refroidissement | 42,8 | °C |

Tableau IV-2 : Caractéristiques de l'échangeur

➤ **Dimensions de l'échangeur :**

- La calandre :

La longueur $L = 7$ m

La largeur $l = 0,39$ m

La hauteur $H = 0,56$ m

- Les tubes :

Disposition en quinconce

Le pas $p = 35$ mm

Le diamètre extérieur $D_e = 20$ mm

Le diamètre intérieur $D_i = 18$ mm

Longueur d'un tube $L = 7$ m

Nombre de tubes $N_T = 60$ tubes

- Les ailettes :

Type : ailettes circulaires d'épaisseurs constantes

Épaisseur d'une ailette $e = 0,2$ mm

Espace entre ailettes $a = 2$ mm

Hauteur $h = 6$ mm

➤ **Les matériaux utilisés :**

Pour les tubes : alliage du cuivre Cu Ni 10 Fe

Pour les ailettes : cuivre Cu

IV- 4-1- Surface d'échange totale :

La surface d'échange totale est déduite à partir de l'expression de la puissance thermique échangée par les deux fluides dans un échangeur à courants croisés.

$$\Phi = K \cdot S \cdot F \cdot \Delta TLM \quad (\text{IV.1})$$

Ainsi :

$$S = \frac{\Phi}{K \cdot F \cdot \Delta TLM} \quad (\text{IV.2})$$

IV- 4-2- Evaluation du coefficient d'échange global :➤ **Calcul du coefficient d'échange convectif intérieur h_i :**

Le coefficient de convection interne h_i est évalué à partir de la relation de MAC ADAMS [11] :

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (\text{IV.3})$$

Utilisable pour : $10000 < Re < 120000$ et $0,7 \leq Pr \leq 120$

Avec :

$$Re = \frac{G \cdot D_i}{\mu} \quad (\text{IV.4})$$

Où :

$$G = \frac{\dot{m}_e}{S_e} = \frac{\dot{m}_e}{N_T \cdot \pi \cdot D_i^2 / 4} \quad (\text{IV.5})$$

Et :

$$\dot{m}_e = \frac{q_{v_e} \cdot \rho}{3600}$$

Les propriétés physiques et thermiques de l'eau de refroidissement sont évaluées à la température moyenne :

$$T_m = \frac{T_{Ee} + T_{Se}}{2} = 38,9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{IV.6})$$

Ainsi [12] :

$$\mu = 6,667 \cdot 10^{-4} \text{ Kg/m} \cdot \text{s} ; \lambda = 0,629 \text{ W/m} \cdot \text{°C} ; Pr = 4,4293 ; \rho = 992,63 \text{ Kg/m}^3 ;$$

$$C_p = 4179,3 \text{ J/Kg} \cdot \text{K}$$

A.N :

$$\dot{m}_e = 14,47 \text{ Kg/s}$$

$$G = 948,2 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

$$Re = 25600$$

L'expression du coefficient d'échange h_i est alors :

$$h_i = \frac{\lambda_e}{D_i} \cdot 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (\text{IV.7})$$

A.N :

$$h_i = 4890 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}.$$

➤ **Calcul du coefficient d'échange convectif extérieur h_e :**

a- Calcul du nombre de RENOLDS :

$$Re = \frac{G \cdot D_h}{\mu_e} \quad (\text{IV.8})$$

Avec :

$$G = \frac{\dot{m}_{H_2}}{S_{H_2}} = \frac{\dot{m}_{H_2}}{L \cdot l \cdot (P - D_e)/P} \quad (\text{IV.9})$$

Et :

$$\dot{m}_{H_2} = q_{v_{H_2}} \cdot \rho$$

A.N :

$$\dot{m}_{H_2} = 1,257 \text{ Kg/s}$$

$$G = 1,074 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

On a le diamètre hydraulique pour un pas triangulaire [13] :

$$D_h = \frac{4 \cdot S_p}{P_m} = \frac{4 \cdot \left(\frac{0,865}{2} \cdot p^2 - \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D_e^2}{4} \right)}{\frac{1}{2} \cdot \pi \cdot D_e}$$

A.N :

$$D_h = 0,02 \text{ m}$$

$$Re = 2240$$

Les propriétés physiques et thermiques de l'hydrogène H₂ sont évaluées à la température du film, et à une pression constante P_{H2} = 3 bars [14].

$$T_f = \frac{T_{Ee} + T_{Se} + T_{GC} + T_{GF}}{4} = 44,5 \text{ °C}$$

Ainsi : [12]

$$\mu = 0,93141 \cdot 10^{-5} \text{ Kg/m} \cdot \text{s} \quad ; \quad \lambda = 0,19426 \text{ W/m} \cdot \text{°C} \quad ; \quad Pr = 0,68906$$

$$\rho = 0,22859 \text{ Kg/m}^3 \quad ; \quad C_p = 14385 \text{ J/Kg} \cdot \text{K}$$

L'abaque de la figure IV-5 Représente une corrélation du type $J=St Pr^{2/3} = f(Re)$ pour l'écoulement sur les ailettes dans un échangeur gaz-liquide normalisé [15].

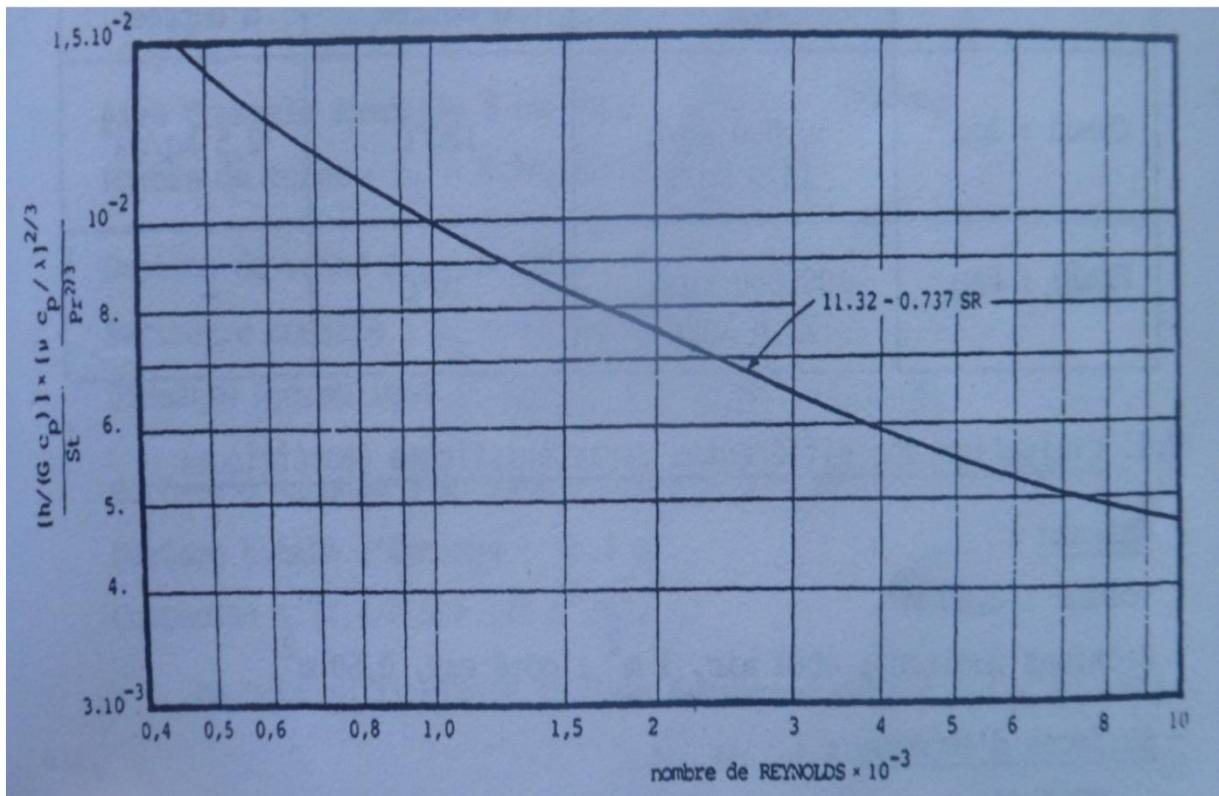


Figure IV-5 : Abaque de corrélation pour un échangeur compact normalisé de 11 à 23 ailettes par pouce [15].

A partir de la valeur du nombre de RENOLDS, on tire de l'abaque la valeur du produit $St Pr^{2/3}$

Alors :

$$St \cdot Pr^{2/3} = 7,3 \cdot 10^{-3} \quad (\text{IV. 18})$$

Et on tire le nombre de STATON :

$$St = \frac{7,3 \cdot 10^{-3}}{Pr^{2/3}}$$

On a aussi :

$$St = \frac{h_e}{G \cdot C_p}$$

Donc :

$$h_e = St \cdot G \cdot C_p \quad (IV.19)$$

A.N :

$$St = 1,06 \cdot 10^{-3}$$

$$h_e = 161 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

On remarque la différence importante entre les valeurs des coefficients d'échange convectif pour l'hydrogène (h_e) et pour l'eau (h_i) ; en effet c'est le coefficient d'échange (h_e) qui va conditionner la valeur du coefficient d'échange global.

b- Evaluation du coefficient d'efficacité de la surface ailetée :

On utilise l'abaque de la figure (IV-6) pour l'ailette circulaire d'épaisseur constante pour trouver l'efficacité d'une ailette [15].

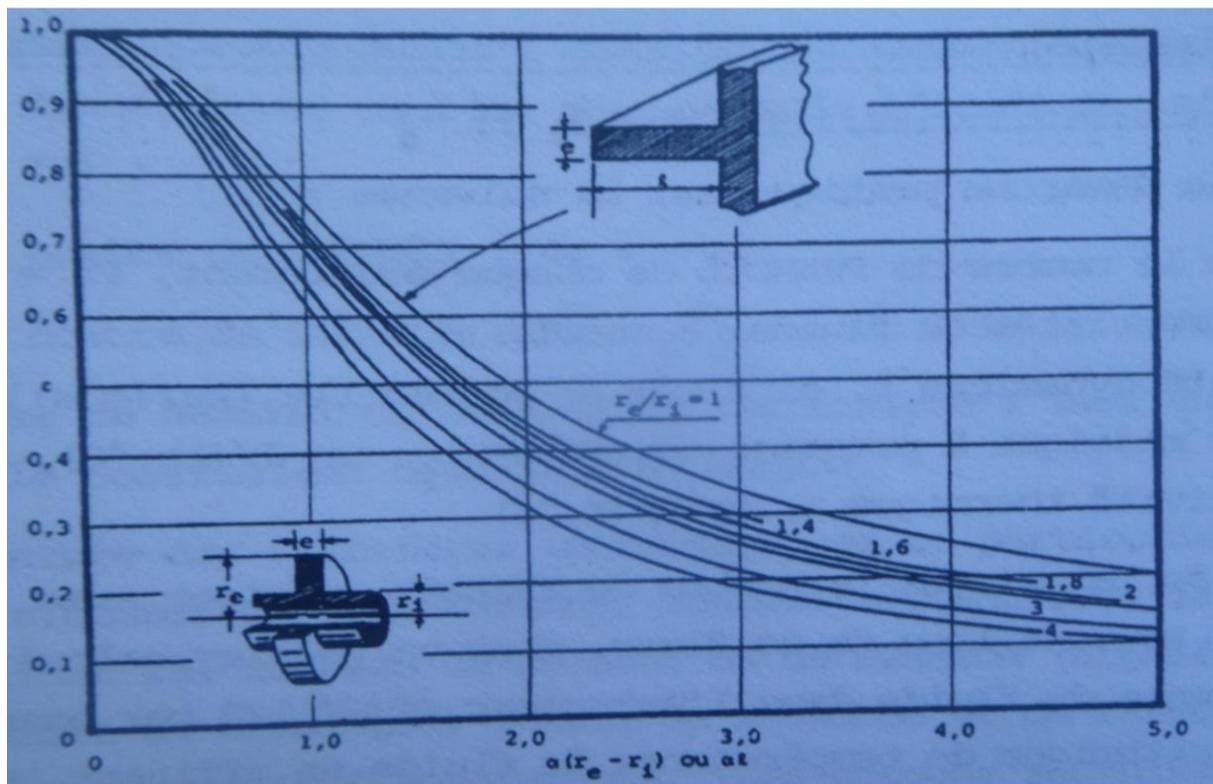


Figure IV-6 : efficacité des ailettes d'épaisseur constante, circulaires et rectilignes [15].

Pour se positionner dans l'axe des abscisses, on calcule la valeur de $\alpha (r_e - r_i)$, puis on fait la projection vers l'une des courbe après avoir calculé la valeur du rapport r_e / r_i , par la

suite on aura l'efficacité de l'ailette par la projection du point d'intersection vers l'axe des efficacités

On a [16] :

$$\alpha = [2 \cdot h_e / \lambda_{ai} \cdot e_{ai}]^{1/2} \quad (\text{IV.20})$$

Avec :

$$\lambda_{ai} = 385 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

A.N :

$$\alpha = 52,29 \text{ m}^{-1}$$

$$\alpha \cdot (r_e - r_i) = 0,31$$

$$\frac{r_e}{r_i} = 1,6$$

Alors en utilisons l'abaque de la figure (IV-6) on tire le coefficient d'efficacité ε :

On aura alors :

$$\varepsilon(0,31) = 0,96$$

Puis on calcule le coefficient d'efficacité de la surface ailetée à l'aide de l'équation suivante [15] :

$$\eta = 1 - (1 - \varepsilon) \cdot \left(\frac{S_{ai}}{S_{T-ai}} \right) \quad (\text{IV.21})$$

Avec :

$$S_{ai} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot (2 \cdot h)^2}{4} \cdot N_{ai} \cdot N_T$$

Où :

$$N_{ai} = \frac{L}{a + e}$$

Et :

$$S_{T-ai} = \pi \cdot D_e \cdot L \cdot N_T + S_{ai}$$

A.N :

$$\eta = 0,98$$

Le coefficient d'échange global rapporté à l'unité de surface coté H₂ est donné par l'équation suivante [15] :

$$K = \left(\frac{1}{\eta \cdot h_e} + \frac{e}{\lambda_T} \cdot \frac{S_{T-ai}}{S_m} + \frac{1}{\frac{S_i}{S_{T-ai}} \cdot h_i} \right)^{-1} \quad (\text{IV. 22})$$

Où :

$$S_m = \frac{S_{T-ai} + S_i}{2}$$

$$S_i = \pi \cdot D_i \cdot L \cdot N_T$$

Avec :

$$\lambda_T = 30 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

A.N :

$$K = 143 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

IV-4-3- Calcul de la puissance thermique échangée :

L'expression du flux total cédé par l'hydrogène à l'eau, est en fonction de leurs températures à l'entrée et à la sortie de l'échangeur

$$\Phi = \dot{m}_e \cdot C_{pe} \cdot (T_{Se} - T_{Ee}) = \dot{m}_{H_2} \cdot C_{p_{H_2}} \cdot (T_{Gc} - T_{Gf}) \quad (\text{IV. 23})$$

A.N :

$$\Phi = 472 \text{ KW}$$

IV-4-4- Calcul de la différence moyenne logarithmique de température :

La différence moyenne logarithmique de température est évaluée comme pour un échangeur à contre-courant, puis corrigée par la suite par le facteur de correction F.

$$\Delta TLM = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\log \frac{\Delta T_a}{\Delta T_b}} \quad (\text{IV. 24})$$

Avec :

$$\Delta T_a = T_{GC} - T_{Se} = 17,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_b = T_{GF} - T_{Ee} = 5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

A.N :

$$\Delta TLM = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

IV-4-5- Détermination du facteur de correction :

Le coefficient de correction F est fourni par des abaques ayant comme paramètre d'entrée les quantités :

$$R = \frac{T_{GC} - T_{GF}}{T_{Se} - T_{Ee}} \quad (\text{IV. 25})$$

$$P = \frac{T_{Se} - T_{Ee}}{T_{GC} - T_{Ee}} \quad (\text{IV. 26})$$

Dans ce cas : R = 2,6 et P = 0,3

La valeur de F est lue sur l'abaque dressé pour un échangeur à courants croisés, dont un fluide est brassé (l'hydrogène) et l'autre non brassé (eau) :

$$F \approx 0,85$$

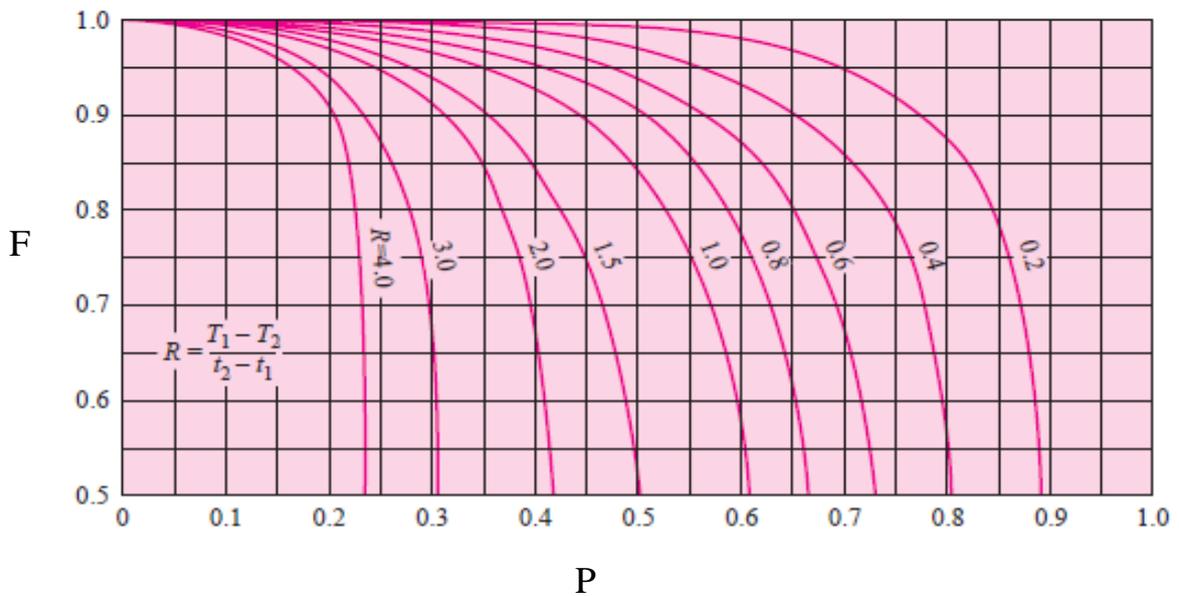
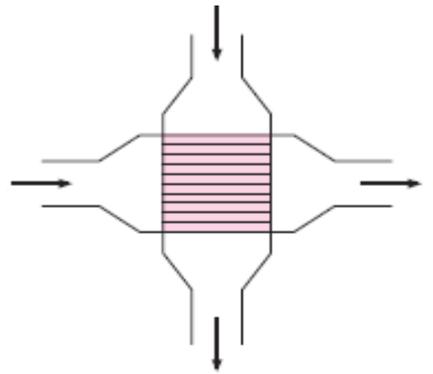


Figure IV-7 : facteur de correction pour un échangeur à courants croisés avec une seule passe du fluide primaire, et un fluide non brassé [17].

Donc la surface d'échange totale est :

$$S = \frac{\phi}{K_g \cdot F \cdot \Delta TLM}$$

A.N :

$$S = 391 \text{ m}^2$$

IV-4-6- Calcul de la puissance thermique maximale dégagée par l'alternateur :

On dispose des données des grandeurs électriques suivantes :

La puissance utile $P_u = 176 \text{ MW}$;

Le rendement de l'alternateur $\eta = 0,985$

Pour le rotor :

$$U_e = 240 \text{ V ;}$$

$$I_e = 2450 \text{ A ;}$$

$$r_e = 0,074 \text{ } \Omega \text{ ;}$$

Pour le stator :

$$U = 155000 \text{ V ;}$$

$$I = 8195 \text{ A ;}$$

$$R_S = 0,0013 \text{ } \Omega \text{ ;}$$

➤ Calcul des pertes par effet joule :

$$P_{je} = U_e \cdot I_e = r_e \cdot I_e^2 \quad (\text{Pour le rotor}) \quad (\text{IV.27})$$

$$P_j = \frac{2}{3} \cdot R_S \cdot I^2 \quad (\text{Pour le stator}) \quad (\text{IV.28})$$

A.N :

$$P_{je} = 0,6 \text{ MW}$$

$$P_j = 0,13 \text{ MW}$$

➤ Calcul de la puissance absorbée :

$$\eta = \frac{Pu}{Pa} \quad (\text{IV.29})$$

A.N :

$$Pa = 178,68 \text{ MW}$$

➤ Dédution des pertes collectives :

$$Pc = Pa - (Pu + P_{je} + P_j) \quad (\text{IV.30})$$

A.N :

$$P_c = 1,95 \text{ MW}$$

Alors la puissance maximale échangée avec les quatre échangeurs sera égale à :

$$\Phi_{max} = P_c + P_{je} + P_j \quad (\text{IV. 31})$$

A.N :

$$\Phi_{max} = 2,7 \text{ MW} = 2700 \text{ KW}$$

Donc on trouve la puissance maximale échangée pour seul échangeur :

$$\Phi_{MAX} = \Phi_{max}/4 = 675 \text{ KW}$$

IV-4-7- Calcul de la surface minimale nécessaire pour l'échange :

On suppose que la puissance maximale est entièrement transférée à l'échangeur, puis on déduit le coefficient d'échange maximal pour une même surface d'échange.

On a alors :

$$K_{MAX} = \frac{\Phi_{MAX}}{S \cdot \Delta T_{LM} \cdot F} \quad (\text{IV. 32})$$

A.N :

$$K_{MAX} = 203 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

Puis on calcule la surface d'échange minimale :

$$S_{min} = \frac{\Phi}{K_{MAX} \cdot \Delta T_{LM} \cdot F} \quad (\text{IV. 33})$$

A.N :

$$S_{min} = 273,5 \text{ m}^2$$

Et on a la surface d'échange associée à un tube :

$$S_t = \frac{S_e}{N_T} \quad (\text{IV. 34})$$

A.N :

$$S_t = 6,5 \text{ m}^2$$

Donc, le nombre de tube qu'on peut colmater dans un seul échangeur est donné comme suit :

$$N_{col} = \frac{S_e - S_{min}}{S_t} \quad (\text{IV. 35})$$

A.N :

$$N_{col} = 18 \text{ tubes}$$

D'où le nombre total de tube qu'on peut colmater pour les quatres échangeurs est :

$$N_{Tcol} = N_{col} \cdot 4 \quad (\text{IV. 36})$$

A.N :

$$N_{Tcol} = 72 \text{ tubes}$$

Finalement, on résume les résultats obtenus dans le tableau suivant :

| Grandeurs | Valeurs | Unités |
|---------------------|---------|--|
| h_i | 4890 | $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| h_e | 161 | $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| K | 143 | $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| Φ | 472 | KW |
| ΔTLM | 10 | $^\circ\text{C}$ |
| F | 0,85 | / |
| S | 391 | m^2 |
| Φ_{MAX} | 675 | KW |
| K_{MAX} | 203 | $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| S_{min} | 273,5 | m^2 |
| N_{col} | 18 | tubes |

Tableau IV-3 : Tableau récapitulatif des résultats obtenus.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Ce travail constitue une expérience enrichissante qui nous a donné l'opportunité d'appliquer, dans le cadre d'une étude concrète, le fruit de l'enseignement dont nous avons bénéficié.

Le présent travail nous a permis de réaliser une étude d'un échangeur tubulaire installé sur un alternateur de 176 MW de la centrale thermique de cap djinet.

En effet, nous avons pu déterminer la limite de colmatage dans l'échangeur ainsi que dans tout le système de refroidissement qui contient quatre échangeurs identiques avec les mêmes caractéristiques de conception, à cet effet on a évalué les différentes grandeurs tel que le flux de chaleur échangé, la différence des températures logarithmique moyenne, le coefficient d'échange global et le facteur de correction pour pouvoir déduire la surface d'échange totale ; cependant des différentes puissances et pertes de chaleur sont évaluées afin de déterminer le coefficient d'échange maximale et la surface d'échange minimale nécessaire.

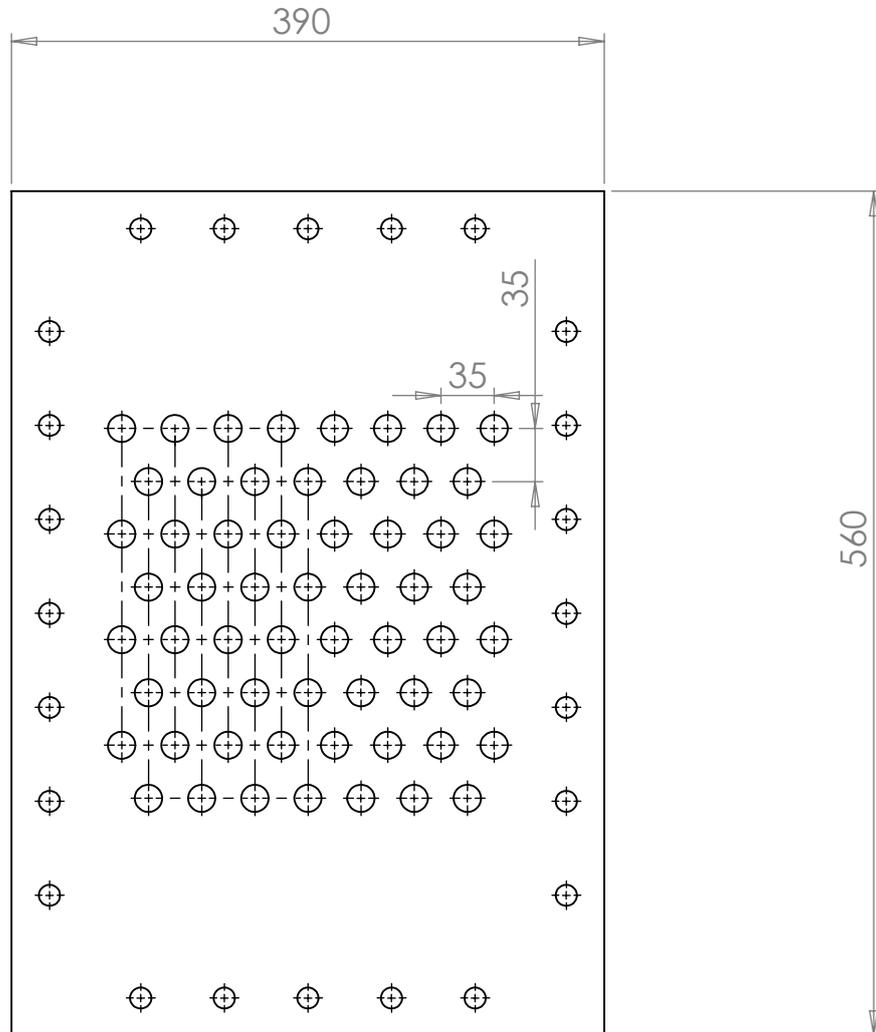
Les résultats obtenus sont jugés justifiés, du fait que l'alternateur peut fonctionner avec trois échangeurs seulement.

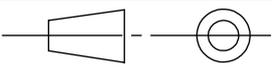
Références bibliographiques

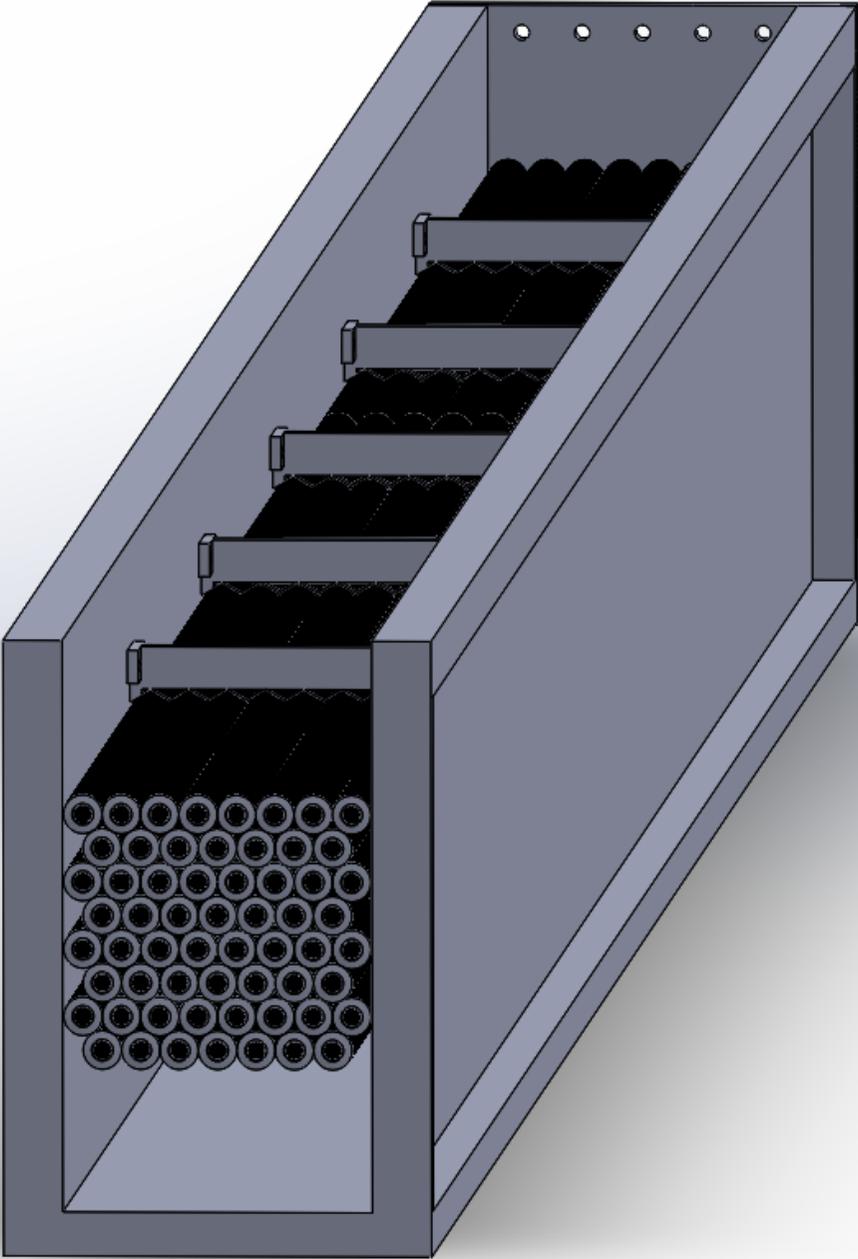
- [1] : documentation de sonalgaz par KWU, service de formation professionnelle, N° d'enregistrement 5521
- [2] : Theodore WILDI et Gilbert CYBILLE
ELECTROTECHNIQUE 4^{eme} Edition
- [3] : Michel VERRIER, Pascal CHAY et Mathieu GABION
« Turboalternateurs », Technique de l'ingénieur [D 3530]
- [4] : Zoé MINVELLE, Nadia CANEY, Patrice CLEMENT, Philippe BANDELIER, Philippe MARTY, Jean Antoine GRUSS et Claude ROUSSEL
« Description des échangeurs de chaleur », Technique de l'ingénieur [BE 9516]
- [5] : A.MENIDJEL « Exploitation des échangeurs à faisceaux et calendre » I.A.P/ SPA SKIKDA (2009)
- [6] : Prof H.HOFMANN « Phénomènes de transfert de chaleur et de masse »
- [7] : André BONTEMPS « Echangeurs de chaleur : Définitions et principes généraux », Technique de l'ingénieur [BE 9515]
- [8] : Jean Castaing LASVIGNOTTES « Technologie et principes de fonctionnement des échangeurs de chaleur »
- [9] : Yves JANNOT « Introduction aux échangeurs de chaleur »
- [10] : B.BOURRET « Les échangeurs de chaleur », INSA Toulouse
- [11] : W.H. MAC ADAMS « Transmission de chaleur », Dunot 2^{eme} édition 1964
- [12] : Logiciel REFPROP « Reference fluid thermodynamic and transport properties »
- [13] : M. BOUSSAID « Cours sur les échangeurs de chaleur »
- [14] : Mémoire de fin d'études : étude et dimensionnement d'un échangeur a tubes et ailettes réalise par Melle : GOUIZI .DJ et Melle : ABROUS. R. UMMTO 2002
- [15] : J .F. SACADURA « Initiation aux transferts thermiques », Edition TEC&DOC

[16] : site web www.bedra.com « bercoweld N10 (Cu Ni 10 Fe), fiche technique »

[17] : J.P. HOLMAN « Heat transfert », 10^{ème} Edition



| 01 | 2 | plaque tubulaire | acier | |
|---|-----|--|-----------|------------------------------------|
| Rep | Nbr | Désignation | Matière | observation |
| Echelle: 1:5 | | echangeur de chaleur | ZERROUKHI | |
|  | | | SMALI | Projet de fin d'étude 2013/2014 |
| A4 | | Université Mouloud mammeri tizi ouzou | F.C.C | |

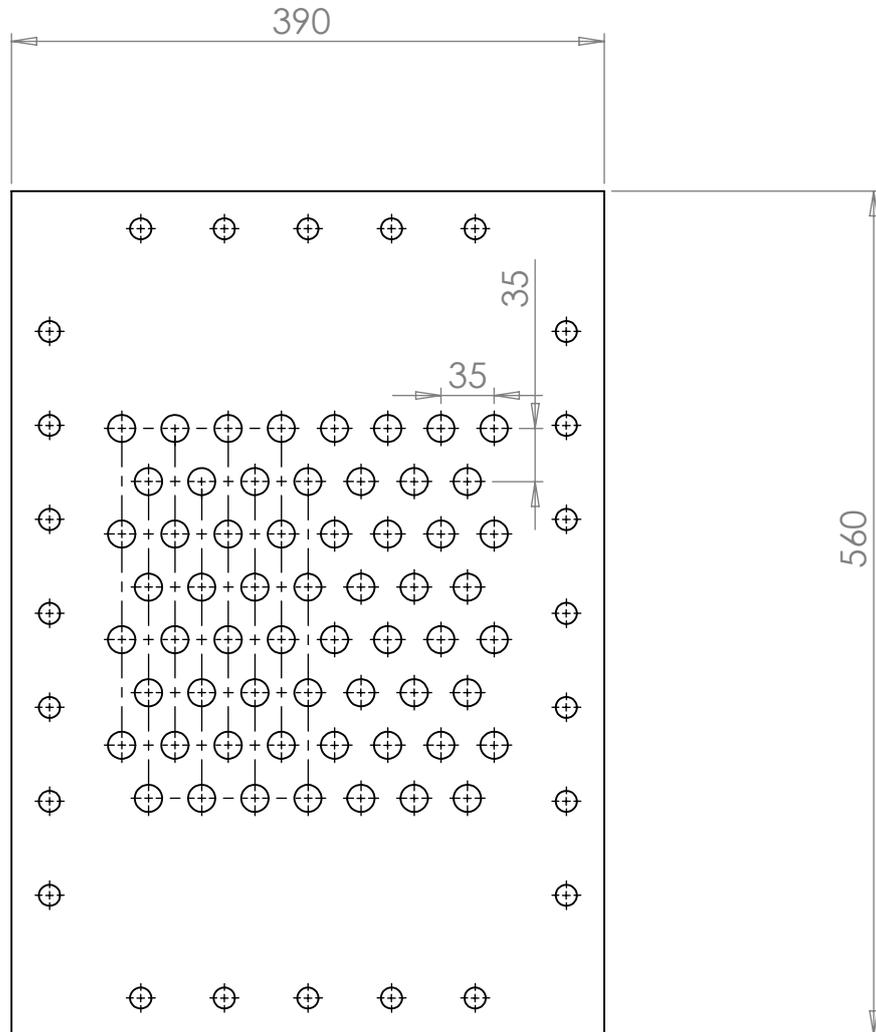


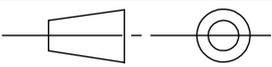
CHAPITRE III :
GÉNÉRALITÉS SUR
LES ECHANGEURS
DE CHALEUR

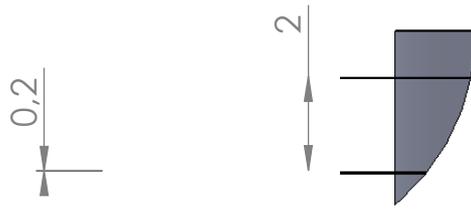
CHAPITRE II :
GÉNÉRALITÉS SUR
LES
ALTERNATEURS

CHAPITRE I :
PRÉSENTATION
GÉNÉRALE DE LA
CENTRALE
THERMIQUE

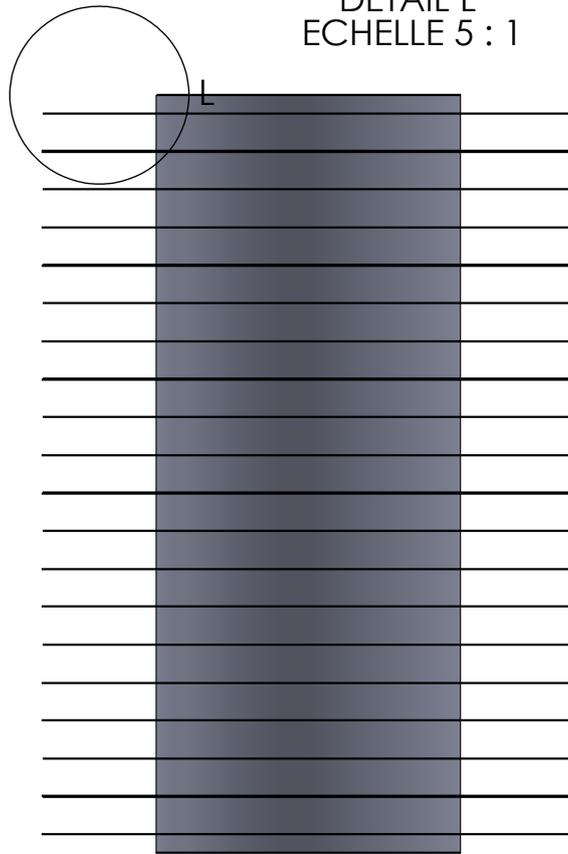
CHAPITRE IV :
ETUDE DU SYSTÈME
DE
REFROIDISSEMENT

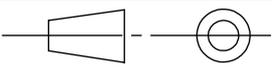


| 03 | 2 | plaque tubulaire | Cu Ni 10 fe | |
|---|-----|--|-------------|------------------------------------|
| Rep | Nbr | Désignation | Matière | observation |
| Echele: 1:5 | | echangeur de chaleur | | ZERROUKHI SMAILI |
|  | | | | Projet de fin d'étude 2013/2014 |
| A4 | | Université Mouloud mammeri tizi ouzou | | F.C.C |



DÉTAIL L
ECHELLE 5 : 1



| | | | | |
|---|------------|--|------------------------------------|--------------------|
| 03 | 60 | tube à ailettes | Cu Ni 10 fe | |
| Rep | Nbr | Désignation | Matière | observation |
| Echele: 1:1 | | Echangeur de chaleur | ZERROUKHI SMAILI | |
|  | | | Projet de fin d'étude 2013/2014 | |
| A4 | | Université Mouloud mammeri tizi ouzou | F.C.C | |