République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et la Recherche scientifique

Université Dr YAHIA FARES- Médéa
Faculté des sciences et de la technologie
Département Génie Mécanique



En vue de l'obtention du diplôme de master académique
En : génie mécanique

Option : génie climatique

Thème

Etude Paramétrique d'une Tour Aéroréfrigérante humide Ouverte et fermée .comparaison des performances

Réalisé par :

- *Kihal djahida*
- *Khennouche soumia*

Encadré par :

DR.BOUAZIZ A.M

Année universitaire : 2022/2023



Remerciements

Remerciements

En guise de reconnaissance, on tient à témoigner nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de notre stage de fin d'étude et à l'élaboration de ce modeste travail.

Nos sincères gratitudes à Mme.bouaziz Amina manel pour la qualité de son enseignement, ses conseils et son intérêt incontestable qu'elle porte à tous les étudiants.

On remercie nos très chers parents et tous les professeurs intervenants dans notre département génie mécanique option climatique, ainsi toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté de nous rencontrer et de répondre à nos questions durant notre recherche.

À tous ces intervenants, on présente nos remerciements, notre respect et notre gratitude.

Soumia ET Djahida



DÉDICACES



Dédicace

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail

A ma très chère mère, qui me donne toujours l'espoir de vivre et qui n'a jamais cessé de prier pour moi.

A mon très cher père, pour ses encouragements, son soutien, surtout pour son amour et son sacrifice afin que rien n'entrave le déroulement de mes études

A mon frère Anise

A mes sœurs Amira, Friel ,Safae ,Zahrah ,Maya et la future petite fille

INCHA ALLAH Mariya Batoule.

A mes amis Loubna et Rania et tous mes amis de la promo master 2 Génie Climatique 2022 \2023

En fin, je remercie ma binôme djahida qui a contribué a la réalisation de ce modeste travail .

Soumia



Dédicace

Je dédie ce mémoire à mes chers parents qui ont été toujours á mes côté et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études.

En signe de reconnaissance qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude pour réussir dans mes études

A mon frére Atia ,Kamal ,Ali ,Mustapha

A Mes sœurs Hayat, Khayra ,Wissame et leurs fils Abid ,Abdelmalek , Linda et Sirine

Â mes amis Siham , Bouthina et bien sur ma binôme Soumia qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail

A amis de la promo master 2 Génie Climatique 2022 \2023

DJAHIDA

Sommaire

REMERCIEMENTS..... I

DÉDICACE SOUMIA IV

DÉDICACE DJAHIDA V

SOMMAIRE VI

LISTE DES FIGURES VI

NOMENCLATURE..... VI

RÉSUMÉ..... VI

INTRODUCTION GENERALE.....1

CHAPITRE 01 : GÉNÉRALITÉ SUR LES CENTRALES NUCLÉARES

1.1. Introduction.....5

1.2. Histoire.....6

1.3. Description.....9

1.3.1. L'îlot nucléaire.....9

- le bâtiment du réacteur (BR).....9
- le bâtiment du combustible (BK).....10
- le bâtiment des auxiliaires de sauvegarde et des locaux électriques (BAS/BL).....11
- La cuve du réacteur 11
- Les générateurs de vapeur (GV) 11
- Un pressuriseur.....11

1.3.2. L'îlot conventionnel 11

- la salle des machines (SDM) 12
- la station de pompage 12
- Le condenseur 13
- Le Moteur 13
- La pompe à eau.....13
- Le radiateur.....13

- Le Thermostat……..13
- Le radiateur de chauffage……13

1.3.3. Les circuits auxiliaires……..13

1.3.4. Les circuits de sauvegarde……..14

1.3.5. Les autres circuits……15

1.4. Fonctionnement d'une centrale nucléaire……16

1.4.1. Circuit primaire……16

1.4.2. Circuit secondaire……..17

1.4.3. Circuit de refroidissement……18

1.5. Rendement d'une centrale nucléaire……19

1.8. La sécurité autour des centrales nucléaires…….. 19

CHAPITRE 02: LES TOURS DE REFROIDISSEMENTS, TOURS ET SYSTÈMES

2.1. Introduction……22

2.2. Les procédés de refroidissement……23

2.2.1. Air sec……23

2.2.1.1. Principe de fonctionnement……23
2.2.1.2. Description et illustration des composants……24
2.2.1.3. Principaux avantages……24
2.2.1.4. Principaux inconvénients……24

2.2.2. Air évaporatif……25

2.2.2.1. Principe de fonctionnement……26
2.2.2.2. Description et illustration des composants……26
2.2.2.3. Principaux avantages……26
2.2.2.4. Principaux inconvénients……26

2.3. Vue synoptique……..27

2.3.1. La solution Tour aéroréfrigérante……..27

2.4. Secteurs d'application des tours……..28

2.5. Les critères à prendre en compte pour une tour aéroréfrigérante……..29

2.6. Les différents types des tours de refroidissement……..29

2.6.1. Tour de refroidissement à circuit ouvert……..30

2.6.1.1. Les composants d'une tour de refroidissement ouverte……30

a. Corps d'échange……..30
b. Séparateurs de gouttelettes……..30
c. Entraînements et ventilateurs……..31
d. Système de distribution d'eau……..31
e. Louvres d'aspiration d'air……..31
f. Le bassin de rétention……..32
g. L'échangeur intermédiaire……..32
h. La pompe de circulation additionnelle……..32

2.6.1.2. Principe de fonctionnement d'une tour de refroidissement ouvert……..32

2.6.2. Tour de refroidissement fermée……..33

2.6.2.1. Les composants d'un tour de refroidissement fermée……..34

2.6.2.2. Principe de fonctionnement d'une tour de refroidissement fermée……..35

2.6.3. Condenseurs évaporatifs……..36

2.6.4. Tour de refroidissement à circuit fermés hybride……..37

2.7. Maintenance appliquée aux aéroréfrigérants……..38

2.7.1. Maintenance préventive……..38

2.7.1.1. Améliorer la fiabilité des aéroréfrigérants……..38

2.7.1.2. Garantir la qualité de refroidissement……..39

2.7.1.3. Améliorer l'ordonnancement des travaux……..39

2.7.1.4. Assurer la sécurité humaine……..39

2.7.1.5. Améliorer la gestion des stocks……39

2.7.1.6. Améliorer le climat de relation humaine……39

2.8. Encrassement intérieur……39

CHAPITRE 03: L'AIR HUMIDE

3.1. Introduction……42

3.2. L'air humide……44

3.3. Grandeurs caractéristiques de l'air humide……44

3.3.1. La température sèche: θ_s……44

3.3.2. L'humidité absolue: r……44

3.3.3. L'humidité absolue à la saturation: r_s……44

3.3.4. Pression partielle de la vapeur d'eau: p……44

3.3.5. Pression partielle de la vapeur d'eau à la saturation: P_S……44

3.3.6. Humidité relative: φ……44

3.3.7. La température de rosée θ_R……45

3.3.8. La température humide θ_h……45

3.3.9. L'enthalpie massique : h……45

3.3.10. Masse volumique: ρ……45

3.3.11. Le volume spécifique :v……45

3.4. Grandeurs mesurables……46

3.4.1. Humidité absolue……46

3.4.4. Humidité relative (H_R)……46

3.4.5. Volume spécifique en $\mathbf{m}^3$/kg d'air……46

3.4.6. Enthalpie……46

3.5. Diagramme de l'air humide……47

- But……47
- Courbe de saturation……47
- Courbe d'égale humidité absolue……47
- Courbe d'égale humidité relative……47
- Courbe d'égale température humide……47
- Isenthalpes……48
- Courbe d'égale masse volumique……48
- Température de rosée……50
- Température du thermomètre humide……50

3.6. Exemples d'evolution de l'air humide……50

3.6.1. Echauffement à pression constante……50

3.6.2. Refroidissement à pression constante……51

3.6.3. Humidification adiabatique……51

Chapitre 04 :Modèles simples du transfert évaporatif dans une tour

4.1. Principe d'une tour de refroidissement……53

4.2. Equations générales des tours de refroidissement……54

4.2.1. Bilan thermique d'une tour……54

4.2.2. Equations théoriques……55

A. Equations de la conservation de la masse d'eau……56
B. Equation de la conservation d'énergie……56
C. Equation de surface de chaleur……57
D. Equation de transfert de masse……58
E. Relation de Lewis……58

4.3. Equation combinées complémentaires…… 59

4.4. Résolution par nombre de MERKEL……59

Chapitre 05 : Modélisation des tours ouvertes et fermées ,résultats, comparaison et discussion

5.1. Domaine Technologique……64

5.1.1. refroidissement humide à cycle ouvert et fermé……64

5.2. Travaux sur les TR……65

5.3. Hypothéses du modèle et procédure……65

5.3.1. Tour fermée……65

5.3.2. Tour ouverte……65

5.3.3. Procédure Tour ouverte ……66

5.3.4. Procédure Tour fermée……66

5.4. Description mathématique……67

5.4.1. Tour fermée……67

5.4.2. Tour ouverte……70

5.5. Résultats, interprétation et discussion……71

5.5.1. Paramétres d'entrée……71

5.5.2. Paramétres de sortie……72

5.6. Variation suivant la température d'entrée d'eau……73

5.7. Variations suivant la température d'entrée d'air……75

5.8. Variations suivant le débit d'air……76

5.9. Variations suivant l'humidité de l'air à l'entrée……78

5.10. Variations suivant le débit d'eau à l'entrée……79

CONCLUSION GENERALE……82

Bibliographie……85

Liste de figures

Figure 1.1 : Photo d'un centrales nucléaires……5

Figure 1.2 : photo de Description d'une centrale nucléaire……9

Figure 1.3 : Schéma d'une Bâtiment réacteur ……10

Figure 1.4 : Schéma d'une Bâtiment du combustible……..11

Figure 1.5 : photo sur le bâtiment salle des machines ……12

Figure 1.6 : Schéma d'une la station de pompage……..12

Figure 1.7 : Schéma de fonctionnement d'une centrale nucléaire……16

Figure 1.8 : Schéma d'une Le circuit primaire……17

Figure 1.9 : Schéma d'une le circuit secondaire……18

Figure 1.10 : Schéma d'une Le circuit de refroidissement……19

Figure 1.11 : Schéma des niveaux de protection d'une centrale nucleaire……20

Figure 2.1 : photo réelle de centrale nucléaire ……22

Figure 2.2 : Schéma de principe d'un aéroréfrigérant sec Principe de fonctionnement……23

Figure 2.3 : Illustration d'une batterie à ailettes……24

Figure 2.4 : Schéma de l'installation et sa relation avec le procédé à refroidir……25

Figure 2.5 : Corps d'échange de type gouttes……30

Figure 2.6 : Exemples de pare-gouttelettes……30

Figure 2.7 : ventilateurs centrifuge et axial……31

Figure 2.8 : distribution d'eau……31

Figure 2.9 : distribution d'air……31

Figure 2.10 : principe d'une installation de refroidissement avec un tour ouvert où l'eau dispersée provient directement du circuit à refroidir……32

Figure 2.11 : une tour ouverte ……33

Figure 2.12 : Schéma d'une Tour à circuit fermée……..34

Figure 2.13 : Exemple d'un échangeur tubulaire intégré dans un tour de refroidissement fermée……35

Figure 2.14 : Principe de fonctionnement d'une tour de refroidissement fermée……36

Figure 2.15 : Schéma d'un condenseur évaporatif ventilateurs centrifuge et axial……..37

Figure 2.16 : Tour hybride fermée……38

Figure 2.17 : une tour de refroidissement hybride ouverte……38

Figure 3.1 : La vapeur d'eau se liquéfie sur une paroi froide, asséchant l'air……43

Figure 3.2 : diagramme de Carrier……49

Figure3.3 : Détermination de la Température de rosée et la température humide a l'aide de diagramme de carrier……49

Figure 3.4 : Représentation d'un échauffement à pression constante sur le diagramme de l'air humide……50

Figure 3.5 : Schéma d'une Humidification adiabatique……51

Figure 4.1 : schéma de principe d'une tour de refroidissement d'eau……53

Figure 4.2 : tour théorique à contre-courant……55

Figure 4.3 : illustration du transfert de chaleur et diagramme pour TR……58

Figure 4.4 : solution de MERKEL……61

Figure 5.0 : Refroidissement humide à cycle ouvert et fermé……64

Figure 5.1 : Variation suivant la température d'entrée d'eau sur les températures de sortie……73

Figure 5.2 : Variation suivant la température d'entrée d'eau sur l'humidité de sortie……74

Figure 5.3 : Variation suivant la température d'entrée d'eau sur le taux d'échange de chaleu……74

Figure 5.4 : Variation suivant la température d'entrée d'eau sur la consommation d'eau……75

Figure 5.5 : Variation suivant la température d'entrée d'air sur les températures de sortie……75

Figure 5.6 : Variation suivant la température d'entrée d'air sur l'humidité de sortie……76

Figure 5.7 : Variation suivant le débit d'entrée d'air sur les températures de sortie……76

Figure 5.8: Variation suivant le débit d'air d'entrée sur l'humidité de l'air de sortie ,(a)TR fermée ,(b)TR ouverte……77

Figure 5.9 : Variation suivant le débit d'entrée d'air sur le taux d'échange de chaleur……77

Figure 5.10 : Variation suivant le débit d'entrée d'air sur la consommation d'eau……78

Figure 5.11 : Variation suivant l'humidité d'entrée d'air sur les températures de sortie……78

Figure 5.12 : Variation suivant l'humidité d'entrée d'air sur l'humidité de sortie……79

Figure 5.13: Variation suivant le débit d'entrée d'eau sur la température d'eau de sortie……79

Figure 5.14 : Variation suivant le débit d'entrée d'eau sur l'humidité d'air de sortie……80

Nomenclature

Symbol	Désignation	Unité
$\mathbf{T_r}$	Température de rosé	℃
$\mathbf{P_v}$	La pression partielle de la vapeur d'eau	**K Pa**
$\mathbf{P_s}$	La pression de la vapeur saturante qui correspond à l'état de saturation	**K Pa**
X	Humidité absolue	%
$\mathbf{m_v}$	La masse de vapeur d'eau	**Kg**
$\mathbf{m_a}$	La masse de vapeur d'air sec Kg	**Kg Pa**
$\mathbf{P_a}$	La pression de l'air sec	**K Pa**
$\mathbf{R_v}$	Constante caractéristique de l'eau	**J/KgK**
T	Température de l'air au voisinage du panneau humide	℃
Q	Humidité relative	%
$\mathbf{P_vs}$	La pression de saturation a la température bulbe sec	**K Pa**
H	L'enthalpie de l'air humide	**J/Kg**
$\mathbf{C_P}$	Chaleur massique de l'air	**J/KgK**
$\mathbf{h_{1V}}$	L'enthalpie spécifique de la vapeur d'eau	**J/Kg**
a	Rapport Se/V0	$\mathbf{m^{-1}}$
$\mathbf{C_{PW}^{V}}$	Chaleur spécifique de l'eau	$\mathbf{Kcal.Kg^{-1}.℃^{-1}}$
$\mathbf{C_{Pa}}$	Chaleur spécifique de l'air humide	$\mathbf{Kcal.Kg^{-1}.℃^{-1}}$
$\mathbf{C_{PV}}$	Chaleur spécifique de l'air sec	$\mathbf{Kcal.Kg^{-1}.℃^{-1}}$
h	Hauteur de l'empilage	**m**

$\mathbf{H}$	Hauteur totale de l'empilage	$\mathbf{m}$
$\mathbf{h_{w0}}$	Coefficient globale de transfert massique de l'eau	$\mathbf{Kg.m^{-2}}$
$\mathbf{i}$	Enthalpie de l'air humide	$\mathbf{Kcal.Kg^{-1}}$
$\mathbf{i_1}$	Enthalpie de l'air humide entrant dans la tour	$\mathbf{Kcal.Kg^{-1}}$
$\mathbf{i_2}$	Enthalpie de l'air humide sortant dans la tour	$\mathbf{Kcal.Kg^{-1}}$
$\mathbf{i_{Sf}}$	Enthalpie de l'air au contact de surface de séparation air/eau	$\mathbf{Kcal.Kg^{-1}}$
$\mathbf{i_{stw}}$	Enthalpie de l'air sature a la température de l'eau	$\mathbf{Kcal.h^{-1}}$
$\mathbf{K_w}$	Coefficient de transfert thermique dans le film d'eau	$\mathbf{Kcal.h^{-1}.m^{-2}.℃^{-1}}$
$\mathbf{K_a}$	Coefficient de transfert thermique d'air	$\mathbf{Kcal.h^{-1}.m^{-2}.℃^{-1}}$
$\mathbf{L_V}$	Chaleur latente de vaporisation d'eau	$\mathbf{Kcal.Kg^{-1}}$
$\dot{m}_w$	Débit massique de l'eau a refroidir	$\mathbf{Kcal.h^{-1}}$
$\dot{m}_{w1}$	Débit massique de l'eau entrant dans la tour	$\mathbf{Kcal.h^{-1}}$
$\dot{m}_{w2}$	Débit massique de l'eau sortant de la tour (après la surface de refroidissement)	$\mathbf{Kcal.h^{-1}}$
$\Delta\dot{m}^2_{w1}$	Débit massique de l'eau évaporée entre le sommet et la base de la tour	$\mathbf{Kcal.h^{-1}}$
$\dot{m}_a$	Débit massique de l'air (constant)	$\mathbf{Kcal.h^{-1}}$
$\mathbf{NMe_0}$	Nombre sans dimension de MERKEL	
$\mathbf{S_0}$	Section de passage brute de l'air	$\mathbf{m^2}$
$\mathbf{S_e}$	Surface d'échange thermique et massique	$\mathbf{m^2}$
$\mathbf{T}$	Température variable de l'air humide	℃
$\mathbf{T_1}$	Température de l'air entrant par le bas de la tour	℃
$\mathbf{T_2}$	Température de l'air sortant par le haut de la tour	℃
$\mathbf{T_w}$	Température de l'eau	℃

$\mathbf{T_{w1}}$	Température de l'eau entrant dans la tour	℃
$\mathbf{T_{w2}}$	Température de l'eau sortant de la tour	℃
$\mathbf{\Delta T_w}$	Ecart de température entre l'eau entrant et sortant	℃
$\mathbf{T_{h1}}$	Température de l'air entrant par le bas de la tour (bulbe humide)	℃
$\mathbf{T_{ap}}$	Température de l'eau d'appoint	℃
$\mathbf{T_{st}}$	Température de la surface de séparation air/eau	℃
$\mathbf{V_0}$	Volume de l'empilage formant la surface de ruissèlement	$\mathbf{m^3}$
$\mathbf{V_{ma}}$	Vitesse massique d'air	$\mathbf{Kg.h^{-1}.m^{-2}}$
$\boldsymbol{W}$	Humidité absolu de l'air	$\mathbf{Kg/Kg}$
$\mathbf{W_1}$	Humidité absolu de l'air entrant de la tour	$\mathbf{Kg/Kg}$
$\mathbf{W_2}$	Humidité absolu de l'air sortant de la tour	$\mathbf{Kg/Kg}$
$\mathbf{W_{sf}}$	Humidité absolu de l'air au contact de la surface de séparation air/eau	$\mathbf{Kg/Kg}$
$\mathbf{\tan \emptyset}$	Angle formée par la droite de fonctionnement et l'axe des températures	
$\mathbf{i_{2stw}}$	Enthalpie de l'air sature a la température de l'eau d'entrée de l'eau dans la tour	$\mathbf{Kcal.Kg^{-1}}$
$\mathbf{R_a}$	Constante des gaz parfaits	$\mathbf{J/KgK}$

الملخص

أبراج التبريد في محطات الطاقة النووية هي منشآت لها تأثير كبير على الأداء المحقق.

يتم إجراء الحساب التنبؤي لاستهلاك الطاقة لمبنى ثالثي مكيف الهواء عن طريق مبرد هواء رطب مغلق ومفتوح باستخدام نموذج تشغيل مبسط. وبالتالي ، يقترح هذا المشروع دراسة هذه المعدات من خلال محاكاة عددية لتأثير المعلمات ذات الصلة لتسهيل الاختيار للوهلة الأولى وفقًا للمواصفات.

كلمات مفتاحية تكييف هواء، مبرد هواء، مغلق، محاكاة.

Résumé

Les tours de refroidissement dans les centrales nucléaires sont des installations qui ont un impact important tertiaire sur les performances atteintes.

Le calcul prévisionnel de la consommation d'énergie d'un bâtiment tertiaire climatisé au moyen d'une tour aéroréfrigérante Humide fermée et ouverte est conduit à partir d'un modèle de fonctionnement simplifié En conséquence, ce projet se propose d'étudier cet équipement par une simulation numérique de l'effet des paramètres pertinents pour faciliter au premier abord le choix suivant les spécifications.

Mots clés: climatisation, tour aéroréfrigérante , fermée, ouverte, modèle, simulation.

Abstract

Cooling towers in nuclear power plants are facilities that have a significant impact on the performance achieved.

The forecast calculation of the energy consumption of an air-conditioned tertiary building by means of an air cooler Closed and open wet is driven from a simplified operating model Consequently, this project proposes to study these equipment by a numerical simulation of the effect of the relevant parameters to facilitate at first the choice according to the specifications.

Keywords: air conditioning, air cooler, closed, model, simulation.

Introduction générale

Introduction générale

Une des solutions techniques utilisables sur les installations de refroidissement d'eau industrielle est les tours aerorfrigerantes.

Également appelée tour de refroidissement, la tour aéroréfrigérante (TAR) est un échangeur de chaleur air/eau, dans lequel l'eau à refroidir est directement mise en contact avec l'air ambiant
Elles sont des équipements très importants destines dans le secteur industriel et tertiaire mais popularisés dans les centrales nucléaires.

Les tours aéroréfrigérante (ou de refroidissement) sont en mesure de réaliser au mieux le processus d'échange de chaleur eau/air : à l'intérieur de ces tours, le phénomène d'évaporation est forcé au moyen de composants simples, efficaces et qui, en général, requièrent peu d'entretien. On cite souvent les tours humides en référence à la vaporisation de l'eau par le biais de la chaleur latente, comme moyen principal de l'échange thermique entre le procédé et l'air passant par la tour.
La tour aéroréfrigérante est un système de refroidissement d'eau conçu pour être utilisé dans un circuit ouvert c'est ***la tour ouverte***, l'eau à refroidir est directement conduite à l'intérieur de la tour et est distribuée de manière homogène en partie haute. L'air, en contact direct avec l'eau à refroidir, abaisse sa température par évaporation. La ventilation mécanique prend ensuite le relais en véhiculant l'air à contre-courant de l'eau. Enfin, l'eau refroidie est ensuite récupérée dans le bassin pour retourner au process.
On parle de tour fermée si l'eau du circuit de refroidissement circule dans un échangeur fermé sur lequel de l'air extérieur est pulsé, et de l'eau est pulvérisée.

Notre projet d'étude se compose des chapitres suivants :

Nous décrirons dans le premier chapitre le rôle des tours particulièrement dans une centrale nucléaire a qui le circuit de refroidissement est d'une importance capitale dans le « process » et refroidir l'eau du condenseur est d'une utilité absolue. Par les dégâts causés à l'environnement, l'introduction d'une tour sera mise en évidence et permettra donc de résoudre le problème, en insistant sur les éléments constitutifs.

Dans le deuxième chapitre, nous décrirons tous les types de tours de refroidissement et les systèmes associés. Leurs composants et caractéristiques ainsi leurs principes de fonctionnement. Une classification sera alors établie pour permettre d'une part de situer le type retenu et d'envisager les possibilités offertes quant au système de transfert thermique. Ainsi, il sera d'intérêt d'étudier le système evaporatif, système complexe où a lieu les transferts de chaleur et de masse entre plusieurs fluides.

Dans le quatrième chapitre nous allons caractériser l'air humide qui est le fluide principal dans les tours aerorefrigerantes afin d'accéder soit par diagrammes, soit par expressions des températures de l'air humide, des valeurs d'humidités absolues ou encore des enthalpies.

Cette connaissance de base est indispensable pour ce mélange complexe afin de comprendre toutes les transformations ayant lieu dans une tour aéroréfrigérante.

Nous aborderons de la modélisation des tours fonctionnant de manière évaporative dans le quatrième chapitre, pour nous permettre d'appréhender l'essentiel des phénomènes se passant dans la tour.

D'abord, il s'agit d'évaluer les pouvoirs des différents milieux en termes de capacité de transfert thermique, pour mettre en valeur le système évaporatif.
Ensuite, nous exposerons les équations générales ainsi que les différents bilans sous des hypothèses simplificatrices.

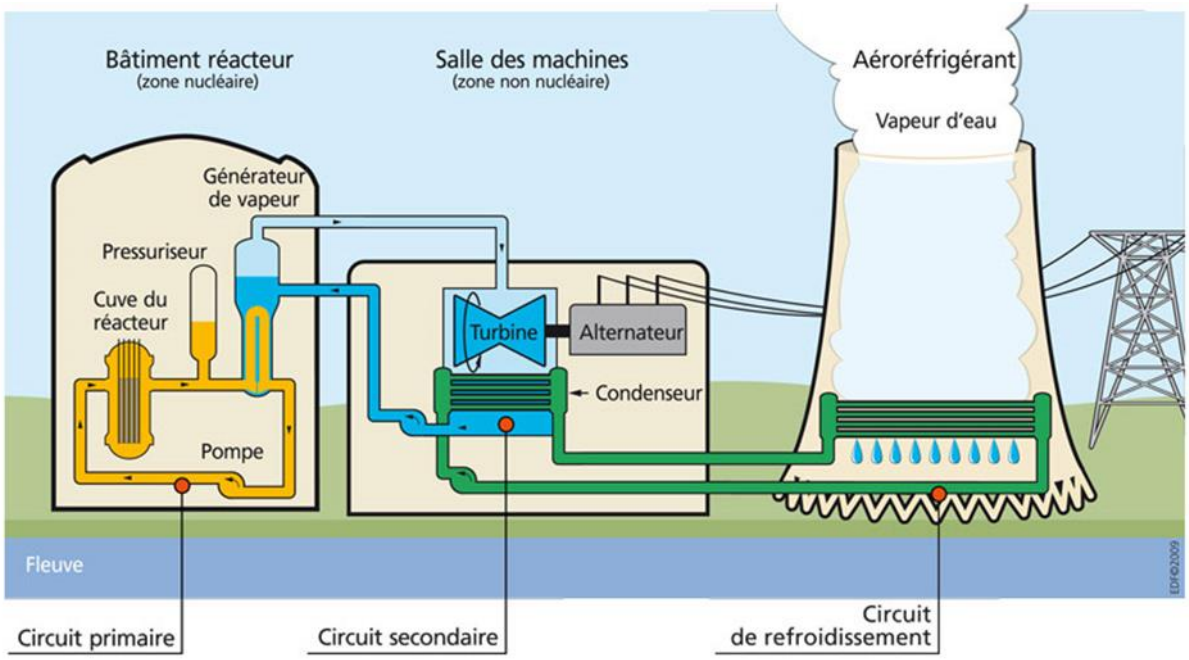
La théorie classique des tours sera ainsi montrée et une des résolutions possibles connue sous la dénomination de MERKEL sera succinctement décrite.

Le cinquième chapitre sera consacré à une modélisation avancée, basée sur des hypothèses plus réalistes et pertinentes.

Nous aurons à conduire une étude paramétrique et comparaison des deux types de tours de refroidissement ouvertes et fermées sur les principales grandeurs telle les débits d'eau et d'air, les températures d'entrée et de sortie, l'humidité de l'air ainsi que les niveaux de consommations d'eau de pulvérisation .
Enfin nous allons terminer par une conclusion avec des points essentiels à relever.

Chapitre 1

Généralités sur les centrales nucléaires et les aéroréfrigérants



1.1.Introduction

Une centrale nucléaire est un site industriel destiné à la production d'électricité, comprenant un ou plusieurs réacteurs nucléaires. La puissance électrique d'une centrale varie de quelques mégawatts à plusieurs milliers de mégawatts en fonction du nombre et du type de réacteur en service sur le site.

L'énergie d'une centrale nucléaire provient de la fission de noyaux d'atomes lourds. Celle-ci dégage de la chaleur, qui sert dans un premier temps à vaporiser de l'eau, comme dans toute centrale électrique thermique conventionnelle, puis la vapeur d'eau produite entraîne en rotation une turbine accouplée à un alternateur qui produit à son tour de l'électricité. C'est la principale application de l'énergie nucléaire dans le domaine civil.

On compte, dans le monde, environ 250 centrales nucléaires qui ont produit 10 % de l'électricité mondiale en 2020. Ces centrales comptent en décembre 2022 un total de 439 réacteurs opérationnels, dont 16 réacteurs japonais en attente d'autorisation de redémarrage. Leur puissance atteint 394 GW (897 MW en moyenne par réacteur) et 57 réacteurs en cours de construction (59 GW).[1]



Figure 1.1 : Photo d'une centrale nucléaire

1.2. Historique

Années 1950 : premières centrales

La première centrale nucléaire du monde à produire de l'électricité (puissance de quelques centaines de watts) est l'Experimental Breeder Reactor I (EBR-I), construite au laboratoire national de l'Idaho aux États-Unis. Elle entre en service le 20 décembre 1951.

Le 27 juin 1954, une centrale nucléaire civile est connectée au réseau électrique à Obninsk en Union soviétique, fournissant une puissance électrique de cinq mégawatts.

Les centrales nucléaires suivantes sont celles de Marcoule dans la vallée du Rhône le 7 janvier 1956, de Sellafield au Royaume-Uni, connectée au réseau en 1956, et le réacteur nucléaire de Shippingport aux États-Unis, connecté en 1957.

Cette même année, les travaux de construction du premier réacteur à usage civil en France (EDF1) démarrèrent à la centrale nucléaire de Chinon **.**

De 1960 à 1986 : croissance rapide

La puissance nucléaire mondiale a augmenté rapidement, s'élevant de plus de un gigawatt (GW) en 1960 jusqu'à 100 GW à la fin des années 1970, et 300 GW à la fin des année 1980 .

Pendant l'année 1970, la construction de 37 nouveaux réacteurs était en cours et six étaient mis en service opérationnel.

Entre 1970 et 1990 étaient construits plus de 5 GW par an, avec un pic de 33 GW en 1984.

Plus des deux tiers des centrales nucléaires commandées après janvier 1970 ont été annulées notamment comme conséquence de l'accident nucléaire de Three Mile Island **.**

1986 : Tchernobyl

En 1986, la catastrophe nucléaire de Tchernobyl a conduit à plusieurs moratoires ; la baisse des prix du pétrole durant les années 1990 a renforcé cette tendance, conduisant à construire moins de nouveaux réacteurs dans le monde.

Parallèlement, les centrales vieillissent : en 2006, la majorité des réacteurs avaient de 15 à 36 ans, sept ayant même de 37 à 40 ans.

Les coûts économiques croissants, dus aux durées de construction de plus en plus longues, et le faible coût des combustibles fossiles, ont rendu le nucléaire moins compétitif dans les années 1980 et 1990.

Par ailleurs, dans certains pays, l'opinion publique, inquiète des risques d'accidents nucléaires et du problème des déchets radioactifs, a conduit à renoncer à l'énergie nucléaire. Le nombre de réacteurs nucléaires en construction dans le monde a commencé à diminuer en 1986, date de la catastrophe nucléaire de Tchernobyl.

Il s'est ensuite stabilisé vers 1994, année à partir de laquelle le taux de mise en construction de nouveaux réacteurs a stagné entre deux et trois par an.

En 1993, la part de la production d'électricité nucléaire dans la production électrique mondiale a atteint son plus haut point historique, à hauteur de 17 %. Cette part n'est plus que de 10 % en 2020 et 66,5 % en France **.**

Années 2000 : relance annoncée

À partir du milieu de la décennie 2000, la croissance des besoins en énergie, associée à la remontée des prix des énergies (hausse du prix du pétrole et du gaz, taxe carbone…) a conduit certains experts à annoncer une *renaissance du nucléaire* en Europe, Asie et Amérique.

Par exemple, la Finlande s'est engagée dans la construction d'un réacteur pressurisé européen (EPR) à Olkiluoto depuis 2003, la construction d'un EPR à Flamanville (France) est en cours depuis 2007 et 27 réacteurs sont aussi en construction en Chine.

En 2005, seuls trois nouveaux réacteurs étaient mis en construction dans le monde et quatre réacteurs achevés étaient connectés au réseau. La capacité mondiale a augmenté beaucoup plus lentement, atteignant 366 GW en 2005, en raison du programme nucléaire chinois.

En 2006, mais surtout 2007, la demande repart poussée par les besoins énormes de la Chine en énergie et la hausse généralisée du prix des énergies fossiles.

2011 : accident nucléaire de Fukushima

La crise économique de 2008 et l'accident nucléaire de Fukushima ont provoqué une baisse de la production d'électricité d'origine nucléaire, de 4,3 % en 2011 par rapport à 2010.

Des pays comme l'Allemagne, la Belgique, la Suisse et Taïwan ont annoncé leur sortie du nucléaire. L'Égypte, l'Italie, la Jordanie, le Koweït et la Thaïlande ont décidé ne pas s'engager ou se réengager dans le nucléaire.

Les chantiers de dix-huit réacteurs en construction affichent plusieurs années de retard, dont neuf en construction depuis plus de vingt ans.

À la suite de l'accident nucléaire de Fukushima en 2011, certains pays ont revu leur politique de développement de l'énergie nucléaire.

Par exemple :

- l'Allemagne : en mixant énergies fossiles et renouvelables (et la complexification des échanges européens), a annoncé sa décision de fermer toutes ses centrales nucléaires avant fin 2022.
- l'Italie a abandonné ses projets nucléaires.
- la Suisse :ne renouvellera pas ses centrales.
- le Québec a fermé sa seule centrale nucléaire, la centrale nucléaire de Gentilly fin 2012.
- le Japon : le précédent gouvernement a annoncé une sortie du nucléaire avant 2030 Plus tard, malgré les résistances de la population, le gouvernement japonais issu des élections de décembre 2012 s'est montré favorable au retour du nucléaire et a poursuivi le redémarrage des réacteurs nucléaires arrêtés à la suite de l'accident de Fukushima ; ainsi, début 2019, neuf réacteurs ont été remis en service et six autres ont reçu l'autorisation de redémarrer.
- la Chine, après avoir gelé les autorisations pour de nouveaux réacteurs, a décidé, fin 2012, une reprise des projets de construction de centrales.

Réacteurs nucléaires et centrales en projet

En septembre 2022, 57 réacteurs nucléaires sont en construction (pour 59 GW) dont 18 en Chine (pour 18,5 GW). [1]

1.3. Description d'une centrale nucléaire

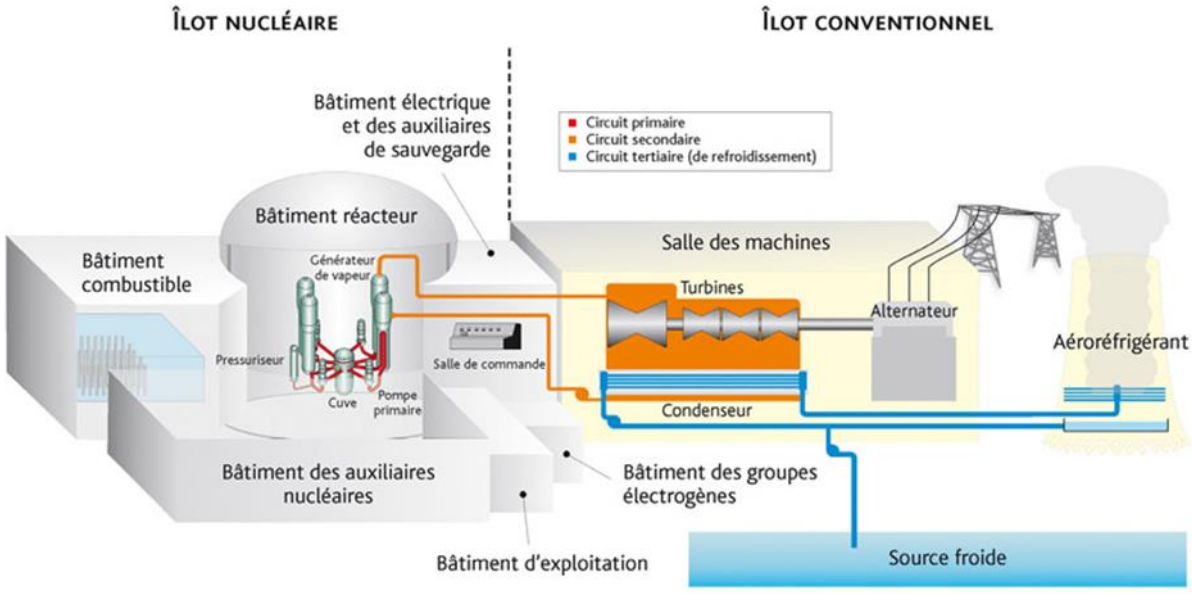


Figure 1.2 : photo de Description d'une centrale nucléaire

Une centrale nucléaire regroupe l'ensemble des installations permettant la production d'électricité sur un site donné. Elle comprend fréquemment plusieurs tranches, identiques ou non ; chaque tranche correspond à un groupe d'installations conçues pour fournir une puissance électrique donnée (par exemple 900 MW, 1 300 MW ou 1 450 MW).

1.3.1. L'îlot nucléaire

- **le bâtiment du réacteur (BR) :** qui contient le réacteur proprement dit et l'ensemble du circuit primaire sous pression ainsi qu'une partie des circuits assurant le fonctionnement et la sûreté du réacteur.

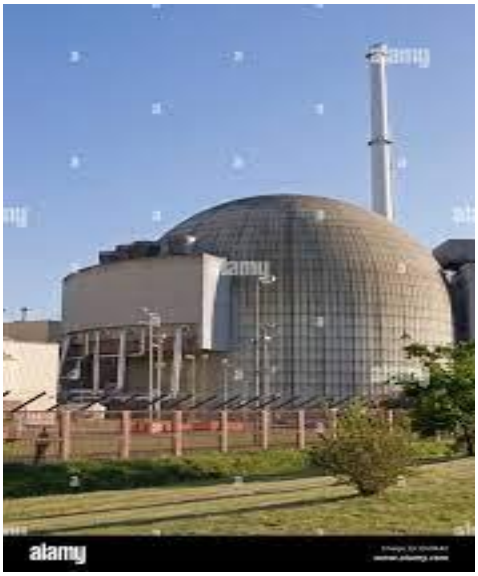


Figure 1.3 : Schéma d'un Bâtiment réacteur

- **le bâtiment du combustible (BK) :** où sont notamment implantées les installations d'entreposage (les piscines d'entreposage, en photo ci-contre) et de manutention du combustible neuf (en attente de chargement dans le réacteur) et du combustible irradié (en attente de transfert vers l'usine de retraitement).

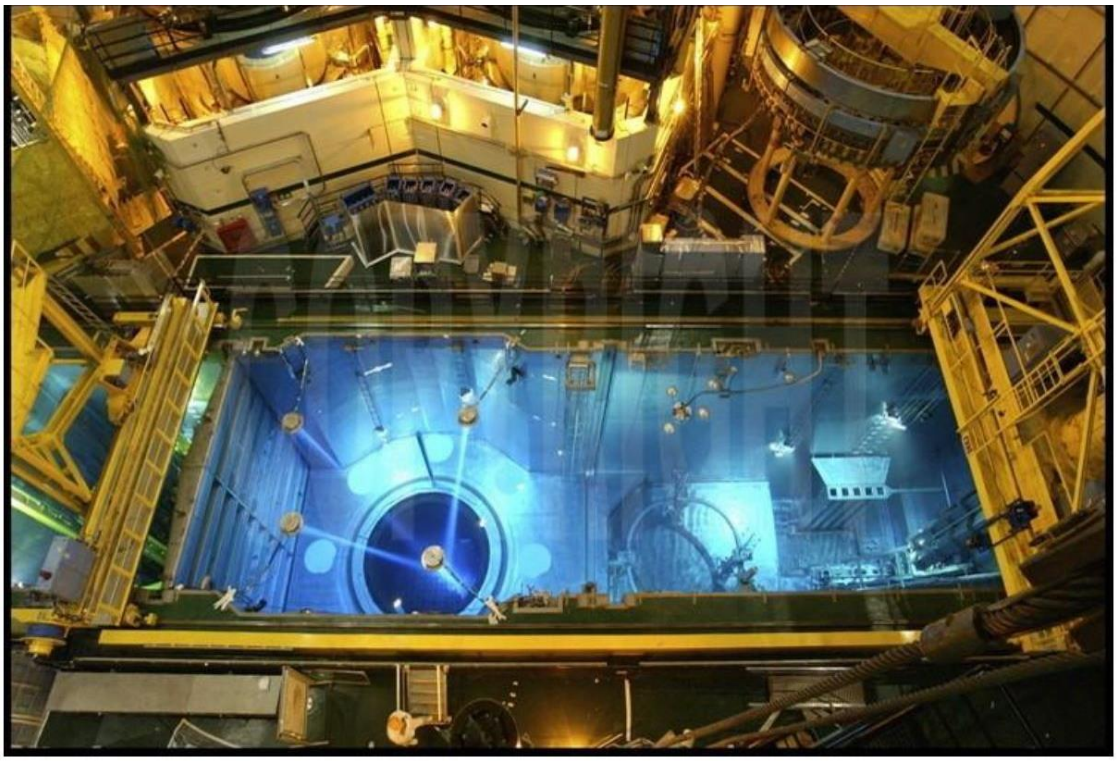


Figure 1.4 : Schéma d'un Bâtiment du combustible

- **le bâtiment des auxiliaires de sauvegarde et des locaux électriques :** qui abrite en sa partie inférieure les principaux circuits de sauvegarde et en sa partie supérieure les locaux électriques (salle de commande et locaux d'exploitation, alimentations électriques, contrôle-commande du réacteur).
- **le bâtiment des auxiliaires nucléaires :** qui abrite les circuits auxiliaires nécessaires au fonctionnement normal du réacteur.
- **bâtiment d'exploitation.** [3]

- **La cuve du réacteur** : constitue un élément essentiel du circuit primaire des centrales électronucléaires. C'est un composant considéré comme « non ruptible » et, en conséquence, sa conception, sa fabrication, sa réception et son suivi en service font l'objet de dispositions de contrôle particulièrement exigeantes.
- **Les générateurs de vapeur** : sont des échangeurs de chaleur qui utilisent l'énergie du circuit primaire pour transformer l'eau du circuit secondaire en vapeur qui alimentera la turbine.
- **Un pressuriseur :** raccordé à une boucle de refroidissement, permet l'expansion de l'eau due à sa dilatation et la maîtrise de la pression dans le circuit primaire à 155 bars, afin de maintenir sous forme liquide l'eau chauffée à plus de 300°C. [3]

1.3.2. L'îlot conventionnel

Les équipements de l'îlot conventionnel fournissent l'énergie électrique au réseau de transport à partir de la vapeur produite dans l'îlot nucléaire. L'îlot conventionnel comporte notamment :

- **la salle des machines (SDM)** qui abrite le groupe turboalternateur, dont le rôle est de transformer la vapeur produite dans l'îlot nucléaire en électricité, et ses auxiliaires.



Figure 1.5 : photo sur la salle des machines

- **la station de pompage** qui permet d'assurer le refroidissement de l'installation au moyen de la source froide, cours d'eau ou mer (circuit ouvert). selon les modèles de centrale, un aérofrigérant, qui sert à réfrigérer l'eau du circuit de refroidissement. [3]



Figure 1.6 : Schéma d'une station de pompage

Le condenseur : Partons du condenseur qui va servir à transformer en eau la vapeur ayant fait tourner la turbine, au niveau des points froids créés par le circuit de refroidissement qui le traverse de part en part.

C'est dans le condenseur que vont être extraits les gaz incondensables (notamment l'O^2) par des pompe à vide . A cette pression et température, l'eau est en ébullition dans le condenseur. A 30°C ça paraît impossible, mais c'est pourtant le cas. On dira qu'on est sur la courbe de saturation de l'eau, il y a donc présence d'eau et de vapeur.

La pompe à eau : La pompe à eau est actionnée par la courroie d'accessoire ou par la courroie (ou chaine) de distribution. Elle comporte une turbine qui permet à l'antigel de circuler dans le système de refroidissement. Puisqu'elle est entrainée par une courroie reliée à d'autres éléments du moteur, sa vitesse d'action augmente proportionnellement avec le régime du moteur.

Le radiateur : Le liquide de refroidissement circule depuis la pompe à eau vers le radiateur. Ce dernier est formé d'un ensemble de tubes qui permettent à l'antigel d'évacuer la chaleur qu'il contient. L'air passe dans le radiateur grâce à la vitesse du véhicule ou grâce à un ventilateur de refroidissement, ce qui élimine la chaleur du liquide.

Le Thermostat : La prochaine étape pour l'antigel est le moteur. Mais il lui reste à franchir le thermostat. Tant que le moteur n'a pas atteint sa vitesse optimale, le thermostat reste fermé et empêche la circulation du liquide de refroidissement dans le moteur. Une fois cette température optimale atteinte, le thermostat s'ouvre et l'antigel continue son chemin dans le circuit de refroidissement.

Le Moteur : Le liquide de refroidissement emprunte de petits passages entourant le bloc moteur, que l'on appelle chemise de refroidissement. L'antigel absorbe la chaleur du moteur et l'évacue en continuant son circuit.

Le radiateur de chauffage : Ensuite, l'antigel passe par le système de chauffage du véhicule. Un radiateur de chauffage est installé dans l'habitacle, et le liquide de refroidissement passe par là. Un ventilateur souffle sur ce radiateur, ce qui transfère une partie de la chaleur du liquide vers l'habitacle. [5]

1.3.3. Les circuits auxiliaires

Le circuit de contrôle chimique et volumétrique du réacteur (RCV) est l'un des deux principaux circuits auxiliaires. Il a plusieurs rôles :

- d'ajuster la concentration du bore dans l'eau du circuit primaire par ajout d'eau déminéralisée ou d'eau borée en fonction des variations de la puissance du cœur du réacteur.

- d'ajuster la masse d'eau dans le circuit primaire en fonction des variations de température.

- de maintenir la qualité de l'eau du circuit primaire, en réduisant sa teneur en produits de corrosion grâce à l'injection de substances chimiques.

Deuxième principal circuit auxiliaire, le circuit de refroidissement du réacteur à l'arrêt (RRA) a pour fonction, lors d'une mise à l'arrêt du réacteur, d'évacuer la chaleur résiduelle produite par le combustible dans la cuve du réacteur et d'éviter l'échauffement de l'eau du circuit primaire dû à la présence de combustible dans le cœur. [2]

1.3.4. Les circuits de sauvegarde

Le rôle des circuits de sauvegarde est de maîtriser les situations accidentelles et d'en limiter les conséquences. Les principaux circuits de sauvegarde sont :

- le circuit d'injection de sécurité (RIS) qui permet d'injecter de l'eau borée dans le cœur du réacteur afin de stopper la réaction nucléaire et de maintenir le volume d'eau dans le circuit primaire en cas d'accident de perte de réfrigérant primaire.

- le circuit d'aspersion dans l'enceinte (EAS) qui, en cas d'accident conduisant à une augmentation significative de la pression dans le bâtiment du réacteur, permet de faire décroître cette pression et de préserver ainsi l'intégrité de l'enceinte de confinement. Ce circuit permet également de rabattre au sol les éléments radioactifs sous forme d'aérosols éventuellement relâchés dans cette enceinte.

- le circuit d'alimentation de secours en eau des générateurs de vapeur (ASG) qui permet de maintenir le niveau d'eau dans la partie secondaire des générateurs de vapeur et donc de refroidir l'eau du circuit primaire en cas d'indisponibilité du circuit normal d'alimentation en eau des générateurs de vapeur . [2]

1.3.5. Les autres circuits

Il existe d'autres circuits importants pour la sûreté du réacteur, en particulier :

- le circuit de réfrigération intermédiaire (RRI) qui assure le refroidissement d'un certain nombre d'équipements importants pour la sûreté du réacteur (RCV, RIS, EAS, RRA et circuits de ventilation).

- le circuit d'eau brute secouru (SEC) qui assure le refroidissement du RRI au moyen de la source froide.

- le circuit de réfrigération et de purification de l'eau des piscines (PTR) qui permet, entre autres, d'évacuer la chaleur résiduelle des assemblages combustibles entreposés dans la piscine d'entreposage des assemblages combustibles usés.

- les circuits de ventilation qui jouent un rôle essentiel dans le confinement des matières radioactives par la mise en dépression des locaux et la filtration des rejets.

- les circuits destinés à la lutte contre l'incendie.

- le circuit de contrôle-commande et les circuits électriques. [2]

1.4. Fonctionnement d'une centrale nucléaire

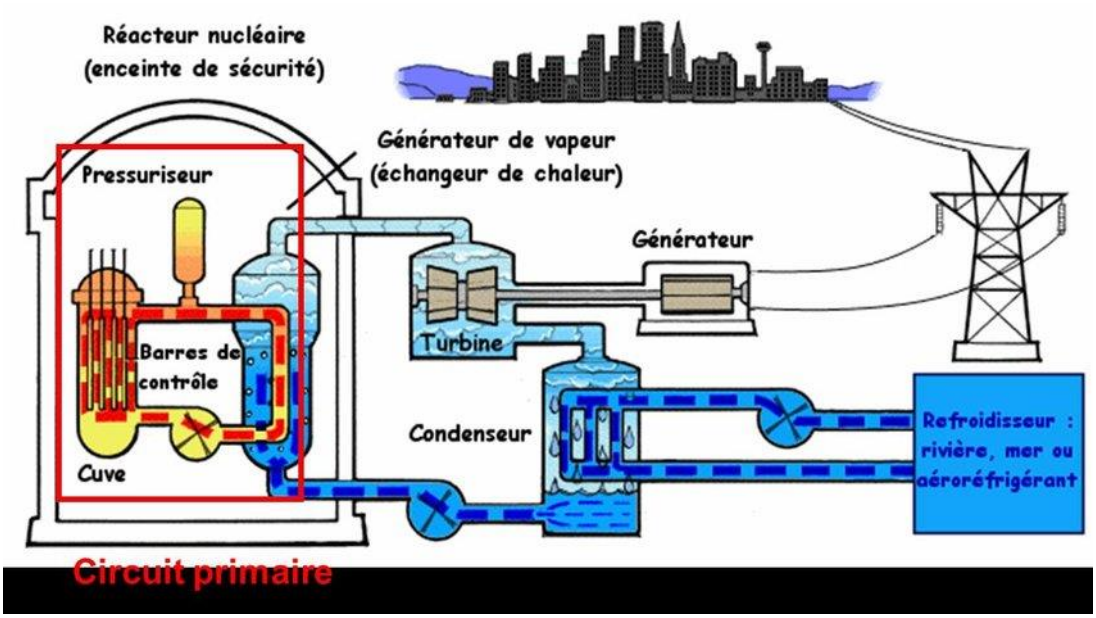


Figure 1.7 : Schéma de fonctionnement d'une centrale nucléaire

La fission des atomes d'uranium produit de la chaleur, chaleur qui transforme alors de l'eau en vapeur et met en mouvement une turbine reliée à un alternateur qui produit de l'électricité.

Les 3 circuits d'eau sont étanches les une par rapport aux autres :

1.4.1. Le circuit primaire

Dans le réacteur, la fission des atomes d'uranium produit une grande quantité de chaleur. Cette chaleur fait augmenter la température de l'eau qui circule autour du réacteur, à 320 °C. L'eau est maintenue sous pression pour l'empêcher de bouillir. Ce circuit fermé est appelé circuit primaire.

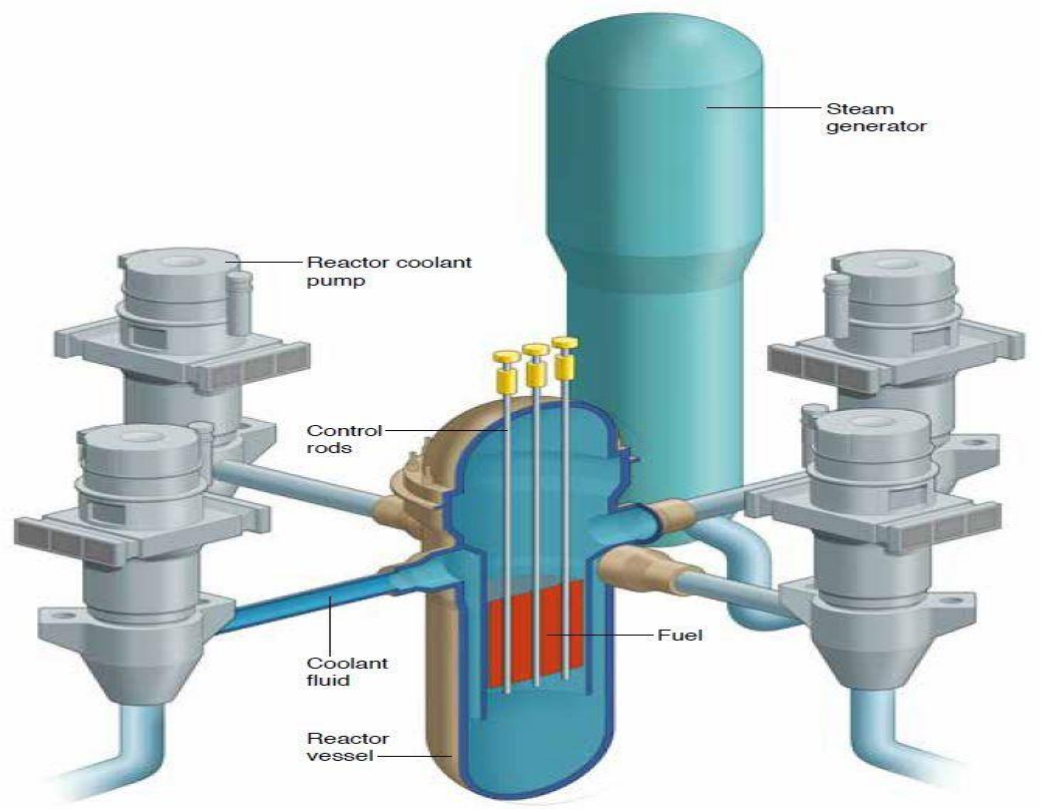


Figure 1.8 : Schéma d'un circuit primaire

1.4.2. Le circuit secondaire

Le circuit primaire communique avec un deuxième circuit fermé, appelé circuit secondaire par l'intermédiaire d'un générateur de vapeur. Dans ce générateur de vapeur, l'eau chaude du circuit primaire chauffe l'eau du circuit secondaire qui se transforme en vapeur. La pression de cette vapeur fait tourner une turbine qui entraîne à son tour un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif.

Un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes très haute tension.

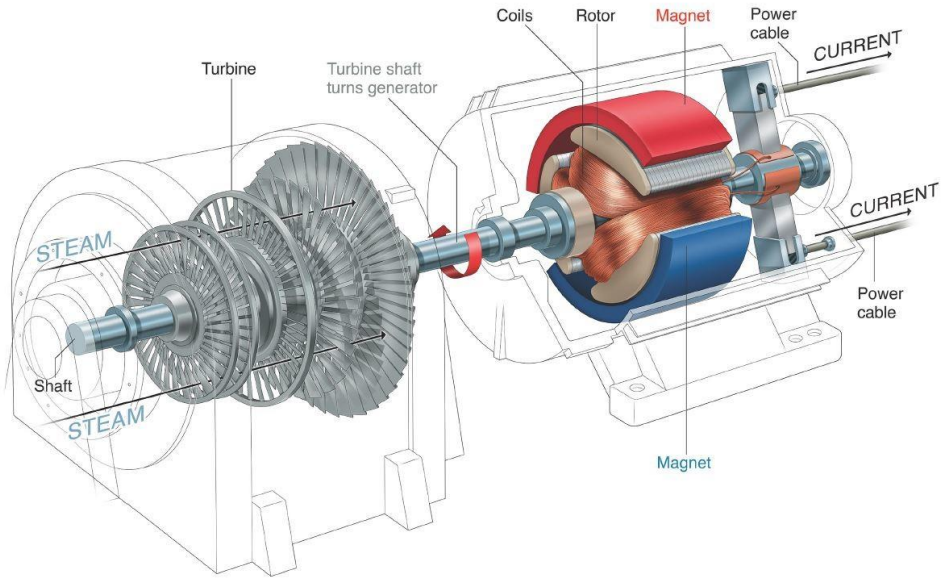


Figure 1.9 : Schéma d'un circuit secondaire

1.4.3. Le circuit de refroidissement

À la sortie de la turbine, la vapeur du circuit secondaire est à nouveau transformée en eau grâce à un condenseur dans lequel circule de l'eau froide en provenance de la mer ou d'un fleuve. Ce troisième circuit est appelé circuit de refroidissement. En bord de rivière, l'eau de ce 3^{e} circuit peut alors être refroidie au contact de l'air circulant dans de grandes tours, appelées aéroréfrigérantes . [6]

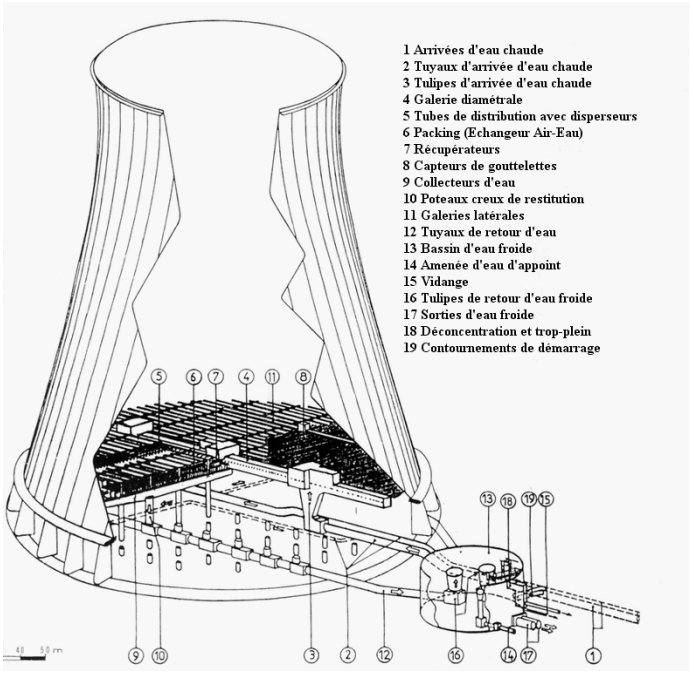


Figure 1.10 : Schéma d'un circuit de refroidissement

1.5. Le rendement d'une centrale nucléaire

Il est ainsi admis que le rendement des centrales nucléaires est de **33 %** ; c'est-à-dire qu'elles produisent 33 unités d'énergie pour 100 consommées.28 juin 2018 [7]

1.6. La sûreté nucléaire

Ce schéma illustre les mesures prises pour renforcer la sécurité autour des centrales nucléaires. Ces mesures visant à rendre les intrusions, même pacifistes, beaucoup plus difficiles, font l'objet d'exercices de crise réguliers. [8]

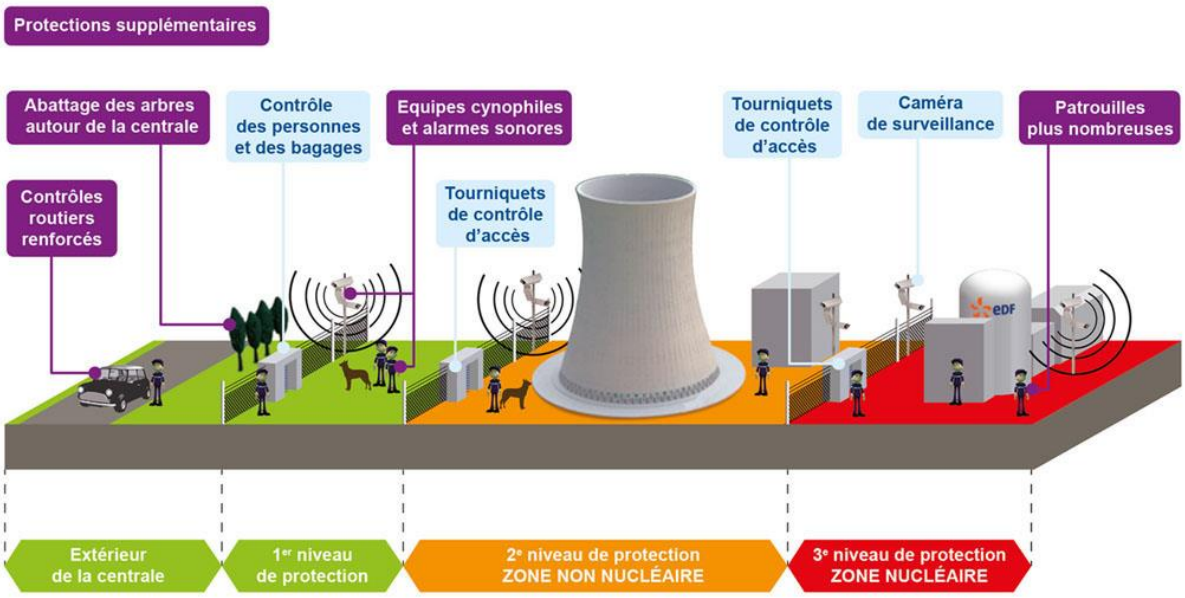


Figure 1.11 :Schéma des niveaux de protection d' une centrale nucleaire

Chapitre 2

les tours aéroréfrigérantes types et systémes



2.1 Introduction

Une tour aéroréfrigérante ou tour de refroidissement est un système servant à transférer de l'énergie thermique du fluide interne vers l'air extérieur.

Il permet d'évacuer les rejets thermiques des centrales thermiques ou des installations frigorifiques sans engendrer une pollution des rivières.

La tour aéroréfrigérante se compose d'une surface d'échange et d'un moyen de ventilation. Le fluide à refroidir passant dans des tubes et l'air extérieur passant autour des tubes qui sont pourvus d'ailettes pour augmenter le coefficient d'échange thermique.

La technologie trouve une grande utilité en climatisation pour réduire la chaleur qui se dégage des condensateurs des groupes frigorifiques eau/eau.

Une tour de refroidissement est un système de refroidissement d'eau conçu pour être employé dans un circuit fermé. Mieux adaptée aux puissances frigorifiques élevées, la tour de refroidissement permet d'obtenir une meilleure efficacité énergétique mesurée à d'autres équipements semblables (condenseurs à air, aéroréfrigérants secs, drycoolers, …).

L'efficacité énergétique exprime le rapport entre les performances du dispositif et sa consommation en énergie. Moins l'appareil consomme pour le même confort thermique, meilleur sera le résultat en termes d'efficacité énergétique. [9]



Figure 2.1: photo réelle de centrale nucléaire

2.2. Les procédés de refroidissement

Selon les températures souhaitées pour obtenir le rendement optimal du procès, l'on peut distinguer quatre catégories de technologie de refroidissement sont air évaporatif , a eau , air sec. [10]

2.2.1. Air sec

Ce type de système ne fait pas partie des installations de refroidissement par dispersion d'eau dans un flux d'air. Le principe d'une telle installation de refroidissement est schématisé sur la figure suivante :

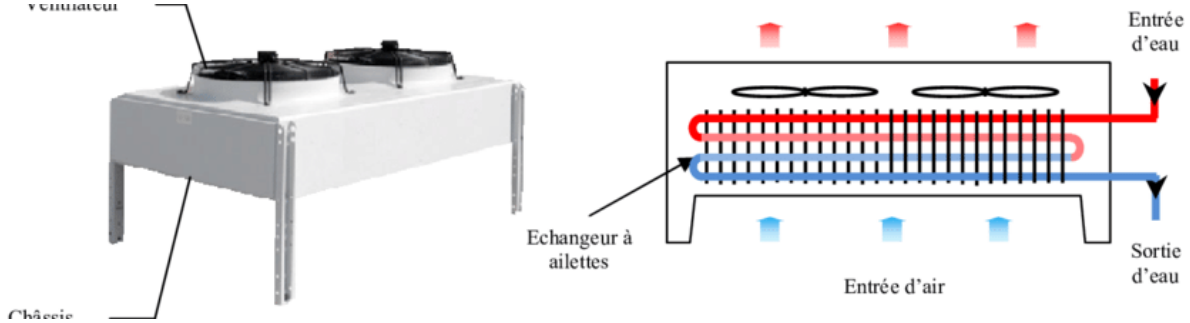


Figure 2.2 : Schéma de principe d'un aéroréfrigérant sec Principe de fonctionnement

2.2.1.1. Principe de fonctionnement

Le fluide du procédé à refroidir circule dans les tubes d'une batterie à ailettes et est refroidi par de l'air circulant à l'extérieur des tubes, l'échange se faisant à courant croisé. La circulation d'air sur l'échangeur air/fluide à refroidir est assurée aux moyens de ventilateurs. Les conditions de fonctionnement nominales sont 35°C en température d'air sec, pour des températures d'entrée et de sortie d'eau par exemple de 50/45°C.

Ce type de fonctionnement nécessite des surfaces d'échange et un débit d'air élevé. Plus généralement, on compte au minimum une différence de 10 K entre la température de l'air et la température du fluide refroidi.

Les installations de refroidissement utilisant des aéroréfrigérants sec ne peuvent garantir une température de sortie du fluide à refroidir inférieure à 45°C en régime été. Cela implique généralement que ce système doit être couplé avec un autre système de refroidissement pour un fonctionnement pendant toute l'année dans le cas de procédés industriels nécessitant des températures de retour d'eau inférieures à la température de l'air ambiant. Une autre solution pourrait consister à pulvériser de l'eau sur la batterie à ailettes afin de fonctionner en régime humide. Cela conduirait à retrouver une solution technique de type tour de refroidissement à circuit primaire fermé, sans toutes ses caractéristiques techniques, donc moins bien adaptée à la gestion du risque de prolifération des légionnelles.

Ce cas ne sera donc pas développé dans cette annexe. Ces systèmes s'appliquent principalement dans le domaine de la climatisation en tertiaire, pour des puissances relativement faibles, mais peuvent également être utilisés en applications industrielles de puissances inférieures à 2 MW. [10]

2.2.1.2. Description et illustration des composants

Les principaux composants sont la batterie à ailettes et les ventilateurs de type axiaux, dont il est possible d'asservir la vitesse à la température de sortie du fluide.

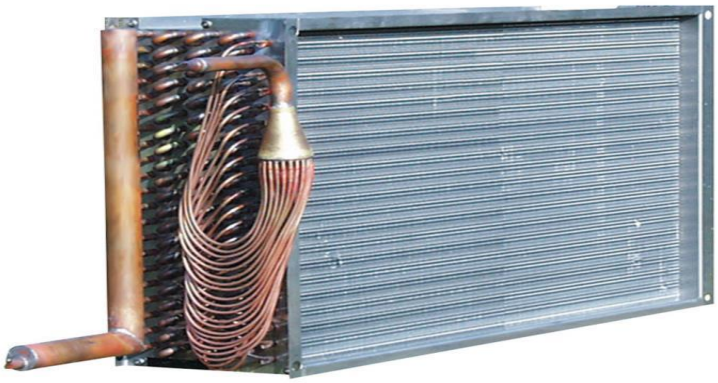


Figure 2.3 : Illustration d'une batterie à ailettes

2.2.1.3. Principaux avantages

- coût d'investissement comparable à celui d'une tour ouverte (mais ne permettant pas d'atteindre les mêmes niveaux de températures).
- pas de consommation d'eau.
- absence de panache.
- entretien aisé, bien que la batterie à ailettes demande à être nettoyée régulièrement, par des procédés adéquats afin de ne pas pénaliser les performances thermiques plus faibles que celles des systèmes humides.

2.2.1.4. Principaux inconvénients

Les aéroréfrigérants secs présentent les inconvénients suivants :

- limitation de la température de sortie d'eau, en fonction du niveau de la température de l'air ambiant (température sèche), ce qui dégrade la performance énergétique du procédé.
- surface au sol important.

- consommation d'énergie électrique élevée (coût d'exploitation).
- niveau sonore plus élevé qu'avec une tour de refroidissement car les débits d'air sont supérieurs.

- nombreux moteurs électriques (nombre de ventilateurs).
- nécessité d'utiliser de l'eau glycolée pour prévenir le gel de l'installation.

2.2.2. Air évaporatif

Ce type de système ne fait pas partie des installations de refroidissement par dispersion d'eau dans un flux d'air. Le principe d'une telle installation de refroidissement est schématisé sur la figure suivante :

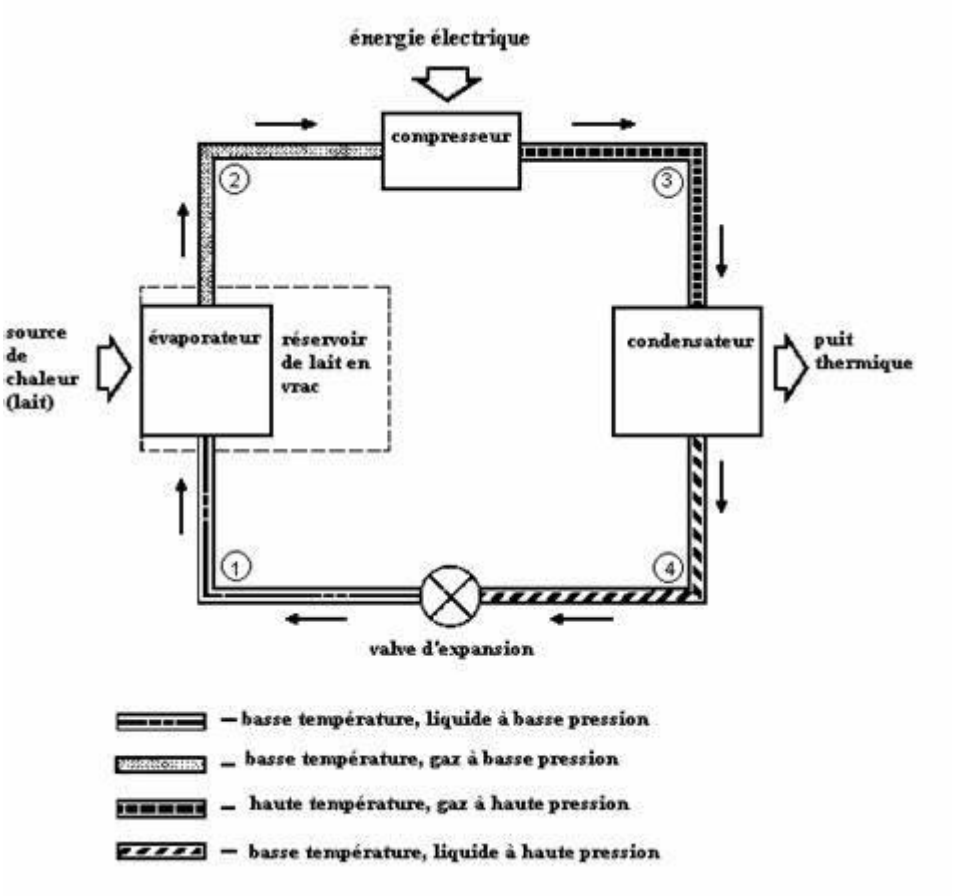


Figure 2.4 : Schéma de l'installation et sa relation avec le procédé à refroidir

2.2.2.1. Principe de fonctionnement

Ces systèmes de refroidissement d'eau sont basés sur le principe du cycle thermodynamique entraîné par un compresseur frigorifique. La chaleur est évacuée au condenseur directement à l'air ambiant. Ce type de système assure la production d'eau de procédé, à une température de l'ordre de 7°C, mais il est aussi possible d'atteindre une température maximale de sortie d'eau de 15°C. Ces systèmes s'appliquent principalement dans le domaine de la climatisation en tertiaire, pour des puissances relativement faibles, mais peuvent également être utilisés en applications industrielles de puissances inférieures à 2 MW.

2.2.2.2. Description et illustration des composants

Les principaux composants sont :

- le ou les compresseur (s) frigorifique (s).
- l'évaporateur qui permet le refroidissement du fluide du procédé à la température désirée, généralement inférieure à 15°C. Les évaporateurs utilisés sont à plaques pour les puissances inférieures à 250 kW et tubulaires pour des puissances thermiques supérieures.
- le condenseur à air constitué d'une ou plusieurs batteries à ailettes, l'air circulant à travers au moyen de ventilateurs.
- le fluide frigorigène faisant partie intégrante du refroidisseur d'eau, et devant respecter les réglementations en vigueur.
- le détendeur permettant de compléter le cycle frigorifique.

2.2.2.3. Principaux avantages

- ce système de refroidissement constitue un circuit fermé : aucun contact entre l'eau du procédé à refroidir et l'air.
- possibilité d'adaptation de la puissance du groupe, par rapport à la charge thermique demandée, la régulation se faisant sur la température de retour d'eau.
- encombrement inférieur à celui d'une tour ouverte.
- masse en service sensiblement égale à celle d'une tour ouverte.

2.2.2.4. Principaux inconvénients

- coût d'investissement environ 5 fois plus élevé qu'une tour de refroidissement ouverte.
- consommation électrique très pénalisante (au moins 10 à 15 fois supérieure).
- niveau sonore élevé (avec 2 sources : ventilateurs et compresseurs).
- encrassement des échangeurs à eau (évaporateur) et à air (batterie à ailettes) : des procédés éprouvés existent pour pallier ces encrassements.

2.2.2.5. Principe de fonctionnement

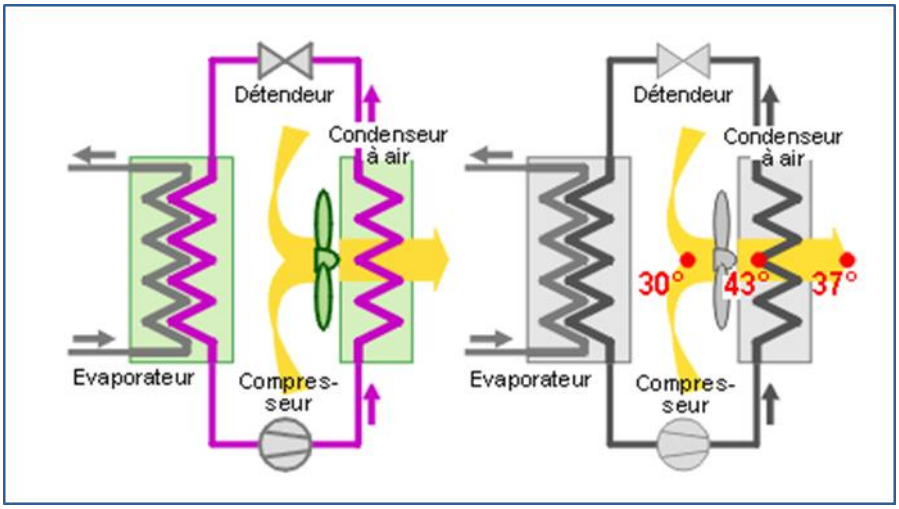
Dans le cas d'utilisation de l'eau de nappe phréatique, il s'agit de la prélever par l'intermédiaire d'un puits d'extraction, de la pomper jusqu'à un échangeur à plaques et de la rejeter dans un puits de rejet à une distance minimale et à une profondeur différente. Cette eau prélevée dans le sol constitue le circuit secondaire d'un échangeur à plaques venant prélever par conduction et convection de la chaleur au fluide à refroidir. Dans le cas des centrales électriques, l'eau est prélevée dans une rivière à l'amont de l'installation et rejetée à l'aval. L'eau prélevée circule dans un échangeur thermique afin de refroidir l'eau provenant de la centrale électrique

- ce système permet d'obtenir des températures de sortie de fluide comprises entre 15°C et 50°C.
- les puissances thermiques échangées peuvent aller de quelques centaines de kW à plusieurs MW.

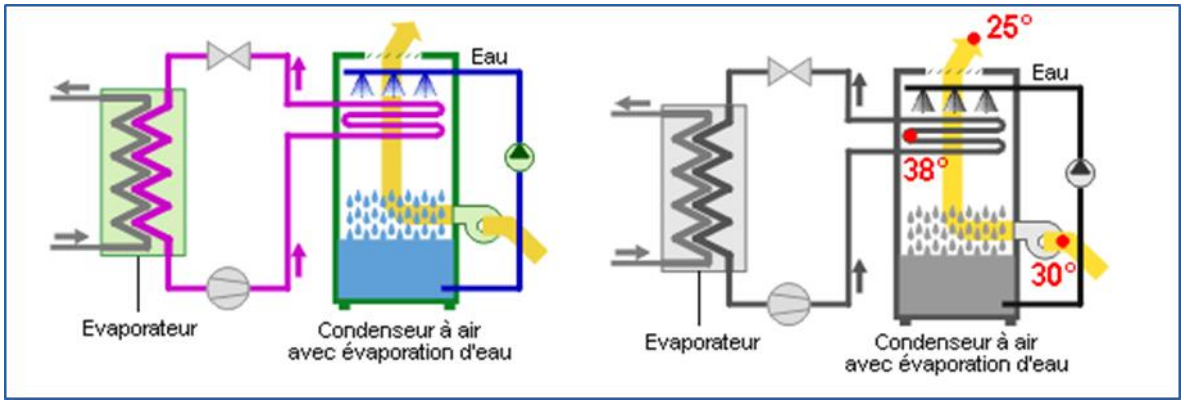
2.3. Vue synoptique

2.3.1. La solution Tour aéroréfrigérante

La chaleur extraite par une machine frigorifique doit être évacuée vers l'extérieur. Le plus simple est de refroidir le fluide frigorigène avec l'air extérieur :



Mais la puissance de refroidissement est parfois trop faible. On peut la renforcer grâce à l'évaporation d'eau supplémentaire (lorsque de l'eau s'évapore, la chaleur de la vaporisation est "pompée" sur la goutte d'eau qui reste et qui donc se refroidit):

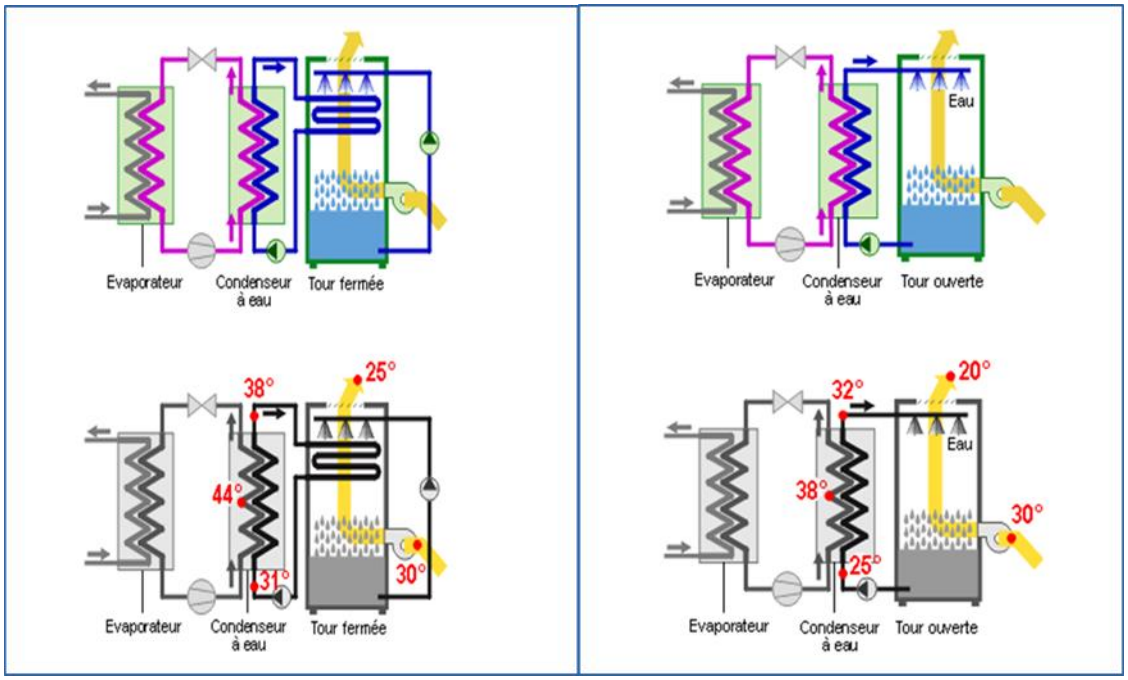


Problème : parfois, la distance entre le groupe et la toiture est fort élevée et la perte de charge sur le circuit frigorifique serait trop importante.

Aussi, un circuit d'eau est créé : l'eau refroidit le fluide frigorifique et l'air refroidit l'eau !

Une des solutions sont les tours de refroidissement

Dans une tour de refroidissement, on va profiter de l'effet de refroidissement créé par la vaporisation de l'eau. En effet, pour passer à l'état vapeur, l'eau a besoin d'énergie. Et cette énergie, elle la prend sur elle-même. Une eau qui s'évapore … se refroidit. [11]



2.4. Secteurs d'application des tours

Pour conclure, et à titre d'exemple, voici une liste de secteurs d'applications industrielles ou civiles dans lesquels les tours de refroidissement peuvent servir à éliminer la chaleur de procès.

- Centrales nucléaires, thermiques, géothermiques et à charbon.
- Installations pétrolières : de grandes tours de refroidissement industrielles y sont souvent employées.
- Raffineries.
- Production de matières plastiques et traitements thermiques des métaux (comme les aciéries et fonderies).
- Cogénération et trigénération.
- Installations de conditionnement dans des bâtiments civils et industriels (secteur **HVAC**).
- Grandes surfaces, combinées aux refroidisseurs.
- Petites installations de production comme les fabricants de glaces**.** [11]

2.5. Les critères à prendre en compte pour une tour aéroréfrigérante

- **La longévité :** afin de garantir une longue durée de vie de la tour de refroidissement, il est important de sélectionner une tour conçue avec des matériaux robustes, tels que des tôles épaisses en acier inoxydable.

- **La sécurité :** suivant le domaine d'activité, la tour aéroréfrigérant devra être adaptée aux risques potentiels liés à votre secteur. Pour le milieu de l'industrie, où la sécurité est une question particulièrement cruciale, il est conseillé d'opter pour des aéroréfrigérants dotés de motrice anti-déflagration, qui permettent une utilisation plus sécurisée des tours de refroidissement.

- **L'économie d'énergie :** Pour optimiser les performances énergétiques, il est possible d'équiper une tour aéroréfrigérante de moteurs à vitesse réglable. ainsi moduler la puissance de refroidissement afin de réduire votre consommation énergétique, sans pour autant dégrader la qualité de confort thermique.

- **La résistance anti encrassement :** une atmosphère sale ou polluée entraîne la défectuosité rapide des équipements. Afin de lutter contre ce phénomène d'encrassement, il faudra choisir des tours de refroidissement adaptées, fonctionnant à base de tubes en aluminium extradé ou encore de tubes à ailettes. Ces pièces empêcheront l'air de s'introduire dans les tubes et faciliteront le nettoyage du système.

- **Les performances aérauliques :** Pour des meilleures performances en termes de ventilation, il faut opter pour des tours aéroréfrigérantes équipées de groupes moto-ventilateurs. Très performants, ils limitent également les nuisances sonores. [12]

2 .6. Les différents types des tours de refroidissement

Il existe quatre types d e tour de refroidissement :

- Tour de refroidissement ouvert.
- Tour de refroidissement fermée.

- Tour de refroidissement avec un condenseur évaporatif.
- Tour de refroidissement à circuit fermé hybride.

2.6.1. Tour de refroidissement à circuit ouvert

Gouttelettes par des buses à travers une surface de ruissellement, un ventilateur souffle de l'air à contre-courant assurant ainsi le refroidissement par évaporation Dans une tour ouverte l'eau provenant du condenseur est répartie en fines d'une partie de cette eau. L'eau est ensuite recueillie dans un bac en partie basse puis réinjectée par une pompe à travers le condenseur, un système de remplissage par flotteur remplace l'eau évaporée, des résistances sont incorporées dans le bac commandé par un thermostat antigel.

Le défaut majeur de ce type de tour est l'entretien, calcaire, algue, corrosion et bien sûr légionellose (risques à prendre en compte).

2.6.1.1. Les composants d'une tour de refroidissement ouverte

a. Corps d'échange

La surface de ruissellement ou le corps d'échange forme l'un des composants les plus importants d'une tour de refroidissement. [13]



Figure 2.5 : Corps d'échange de type gouttes

b. Séparateurs de gouttelettes

Les séparateurs de gouttelettes, également appelés éliminateurs de gouttelettes, ont pour objectif d'empêcher que des gouttelettes ou des aérosols plus fins soient entraînés par le flux d'air hors de la tour de refroidissement.



Figures 2.6 : Exemples de pare-gouttelettes

c. Entraînements et ventilateurs

Toutes les pièces d'une tour de refroidissement sont importantes, mais il est absolument essentiel de s'intéresser à l'entraînement de votre tour de refroidissement, c'est-à-dire à ses pièces rotatives.

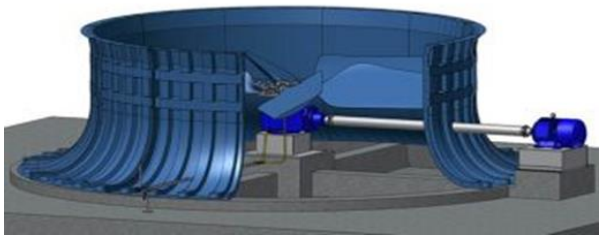


Figure 2.7: ventilateurs centrifuge et axial

d. Système de distribution d'eau

Ingénierie, fabrication et installation de systèmes de distribution d'eau ouverts et fermés pour votre tour de refroidissement, y compris les pulvérisateurs ad



Figure 2.8 : distribution d'eau

e. Louvres d'aspiration d'air

Les louvres d'aspiration d'air empêchent les éclaboussures d'eau depuis le bac de collecte d'eau, et évitent l'entrée des insalubrités dans le bassin d'eau.

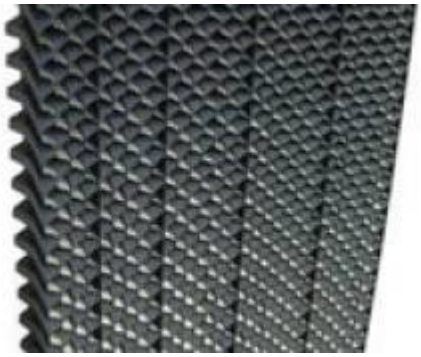


Figure 2.9 : distribution d'air

f. Le bassin de rétention

Il est situé sur la partie basse de la tour afin de récupérer l'eau non évaporée après qu'il passe dans le corps d'échange. Cet élément doit être conçu de façon à être fermé et non poreux, tout en facilitant sa maintenance, en privilégiant les pentes d'écoulement et l'accessibilité. Il doit comprendre un point de vidange situé à son point bas, ainsi qu'une purge de déconcentration. Le remplissage en eau d'appoint y est généralement régulé par un contrôleur de niveau soit mécanique, soit électronique. Les matériaux utilisés pour les bacs de rétention sont généralement l'acier galvanisé, l'inox, les polyesters et le béton « pour les applications industrielles de puissances thermiques supérieures à 4 MW ».

g. L'échangeur intermédiaire

Il est disposé entre le circuit d'eau de la tour et le circuit du procédé à refroidir. Celui-ci peut être un échangeur à plaques ou un échangeur tubulaire (à l'institut Pasteur il est un échangeur à plaque). Cet échangeur intermédiaire doit résister à la corrosion, l'entartrage et à l'encrassement.

h. La pompe de circulation additionnelle

Elle assure la circulation de l'eau de la tour au procédé à refroidir.

2.6.1.2. **Principe de fonctionnement d'une tour de refroidissement ouvert**

Ce type d'installation est basé sur les deux principes suivants :

- Soit le circuit primaire (circuit d'eau à refroidir) traverse le tour aéroréfrigérant ouvert. Le refroidissement se produit directement par dispersion de l'eau du circuit primaire dans l'air humide en circulation dans la tour.

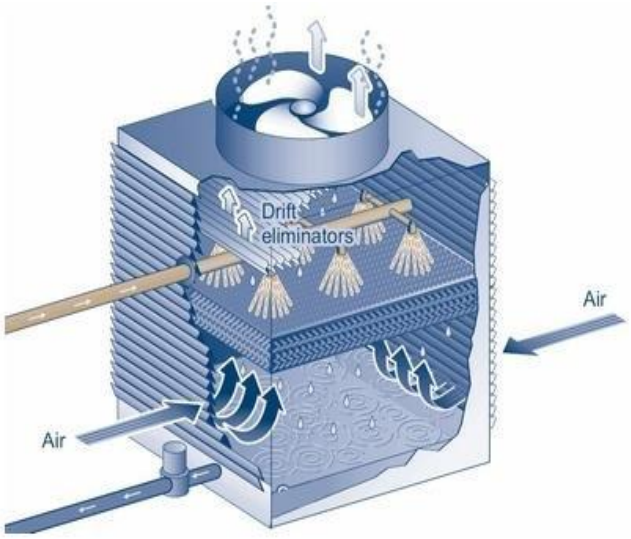


Figure 2.10 : principe d'une installation de refroidissement avec un tour ouvert où l'eau dispersée provient directement du circuit à refroidir

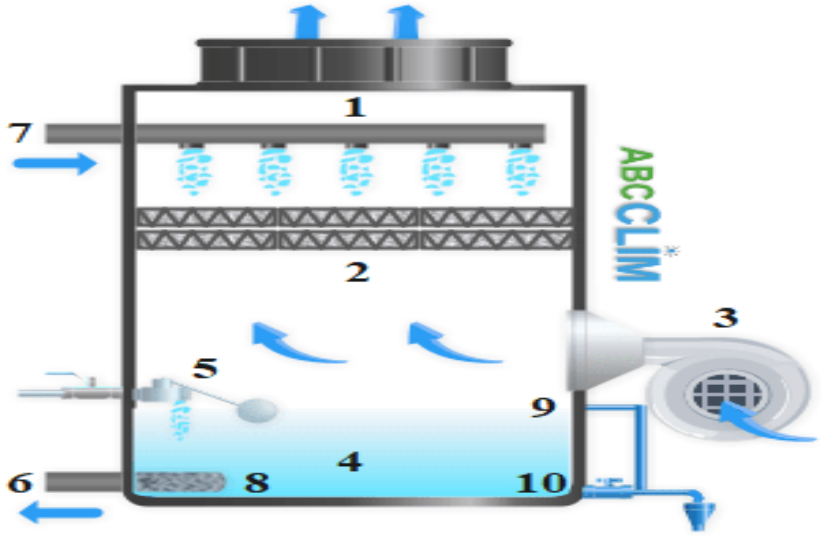


Figure 2.11 : une tour ouverte

1:tour refroidissement ouvert

2:Surface de ruissellement

3:Ventilateur

4:Bac

5:Système de remplissage

6:Sortie tour (retour condenseur)

7:Entrée tour (aller condenseur)

8:Filtre

9: Trop plein

10 : Vidange (déconcentration)

2.6.2. Tour de refroidissement fermée

Une tour à circuit fermée, le fluide à refroidir circule dans un échangeur tubulaire étanche, lui-même directement arrosé. Le refroidissement est assuré comme dans une tour ouverte, par évaporation d'une partie de l'eau de pulvérisation. En matière de gestion du risque, la tour fermée avec échangeur arrosé offre donc de nombreux avantages. Ce principe permet ainsi de confiner l'eau de pulvérisation à la seule tour de refroidissement. Le circuit primaire est fermé et totalement confiné, sans entrer en contact avec l'air. L'eau de pulvérisation ne peut donc pas être contaminée par les bactéries qui se développent dans les bras morts des tuyauteries ou dans les autres équipements externes au refroidisseur évaporatif (condenseur). De plus, elle se trouve à une température inférieure à celle du procédé. Plus la température d'eau est basse, moins il y a de prolifération bactérienne. Seul le circuit de pulvérisation totalement confiné à la tour de refroidissement doit être traité et géré en

termes de qualité d'eau. Par ailleurs la conception de ces équipements avec tubes d'échangeurs à surface lisse, liée à une bonne accessibilité pour le nettoyage, évite les zones permettant l'accumulation ou l'encrassement typique dans les échangeurs tubulaires ou échangeurs à plaques, dans les surfaces d'échange de type parking ou nids d'abeille qui présentent des surfaces complexes favorables à l'encrassement et difficile à nettoyer par la suite. Avec de grands débits d'eau de pulvérisation et un débit de distribution homogène, les tubes et le bassin seront lavés en permanence, limitant ainsi la probabilité de formation de dépôt. Par ailleurs, ces appareils nécessitant des débits d'air plus importants sont plus favorables à la réduction éventuelle de panache. L'association d'une tour de refroidissement de type ouvert avec un échangeur à plaques qui permet d'isoler le circuit d'utilisation du circuit pulvérisation réduit la gestion du risque de Légionnelle à un circuit plus confiné. Il faut toutefois se rendre compte que ceci ne supprime pas de surfaces complexes comme les échangeurs à plaques et les garnissages. Ces équipements sont plus favorables au risque d'entartrage ou à la formation de bio film et restent difficiles à inspecter et nettoyer.

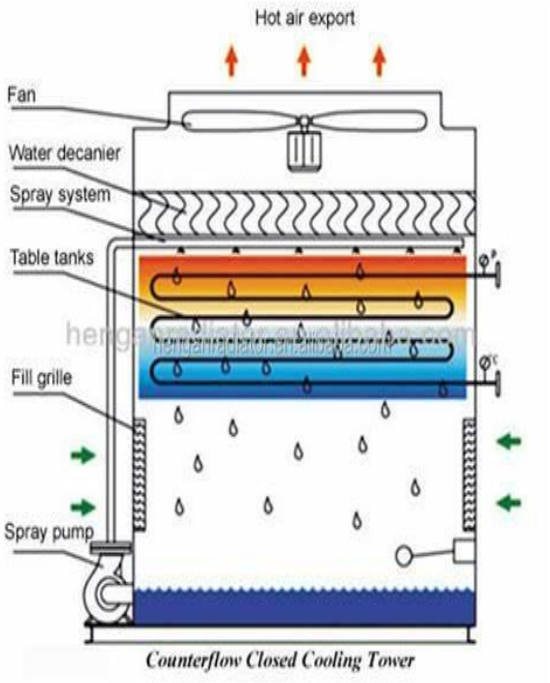


Figure 2.12 : Tour à circuit fermée

2.6.2.1. Les composants d'une tour de refroidissement fermée :

Comparativement à une tour ouverte, le principal changement est la suppression du corps d'échange (packing) sur laquelle ruisselait l'eau du procédé à refroidir et son remplacement par un échangeur tubulaire. La figure suivante montre un exemple du type d'échangeur couramment utilisé.



Figure 2.13: Exemple d'un échangeur tubulaire intégré dans un tour de refroidissement fermée

Cet échangeur tubulaire est généralement en acier galvanisé, parfois en inox. Les aspects encrassement et entartrage sont des points essentiels à prendre en considération au moment de la conception de l'installation et lors de son exploitation.

2.6.2.2. Principe de fonctionnement d'une tour de refroidissement fermée

Le fluide de procès chaud entre dans une batterie d'échange de chaleur et l'eau est pulvérisée par le système de pulvérisation au sommet de la tour de refroidissement. En même temps, le ventilateur centrifuge aspire l'air ambiant de bas en haut de la tour. Durant le fonctionnement, la chaleur est transférée du circuit interne de la batterie à l'eau, puis dans l'atmosphère, par évaporation d'une partie de l'eau. Le fluide refroidi sort ensuite de l'appareil. Le bassin de la tour recueille l'eau pulvérisée restante. La pompe de pulvérisation fait recirculer l'eau vers le système de pulvérisation. L'air chaud saturé sort de la tour à travers les éliminateurs de gouttelettes qui éliminent les gouttelettes d'eau de l'air. La puissance disponible avec ces tours fermées est légèrement inférieure à celle d'une tour ouverte, mais il est tout de même possible d'atteindre 25°C en régime été. Ces performances ne sont possibles qu'en sur dimensionnant la tour de refroidissement, comparativement à une tour ouverte (augmentation nette du débit d'air et de la taille)

. • La température de retour du fluide peut donc être comprise entre 25 et 50°C,

• Les puissances thermiques évacuées varient de quelques centaines de kW à plusieurs MW.

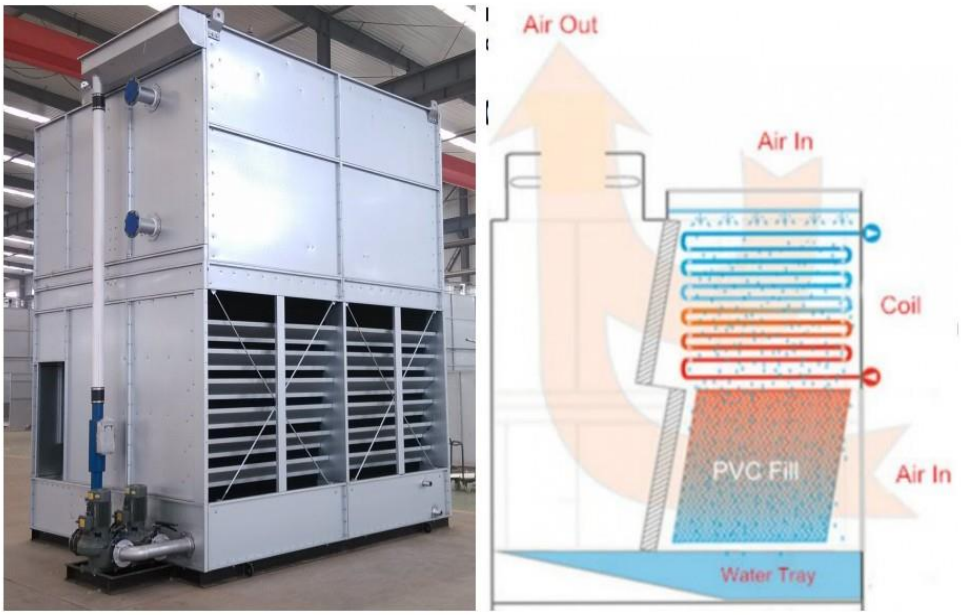


Figure 2.14: Principe de fonctionnement d'une tour de refroidissement fermée

2.6.3. Condenseurs évaporatifs

Les condenseurs évaporatifs sont de construction équivalente à celle des tours de refroidissement à circuit fermé. En lieu et place d'une surface d'échange dans une tour de refroidissement conventionnelle, on trouve une batterie de condensation dans laquelle circule le frigorigène. Le refroidissement évaporatif est assuré en recyclant et en pulvérisant de l'eau sur cette batterie de condensation, pendant que de l'air ambiant circule au travers et à l'extérieur de cette batterie, ce qui entraîne l'évaporation d'une faible quantité d'eau de pulvérisation. La chaleur latente prélevée du frigorigène qui se condense est transmise à l'air en circulation. Le condenseur évaporatif, en condensant directement le fluide frigorigène, est la forme d'équipement évaporatif offrant le meilleur rendement. Les avantages en matière de gestion du risque sont identiques à ceux offerts par une tour de refroidissement du type évaporatif ; L'inconvénient majeur du condenseur évaporatif reste le volume du fluide frigorigène du système global, qui sera plus important et nécessite donc une gestion plus poussée du risque lié aux exigences de confinement de l'ammoniaque. [14]

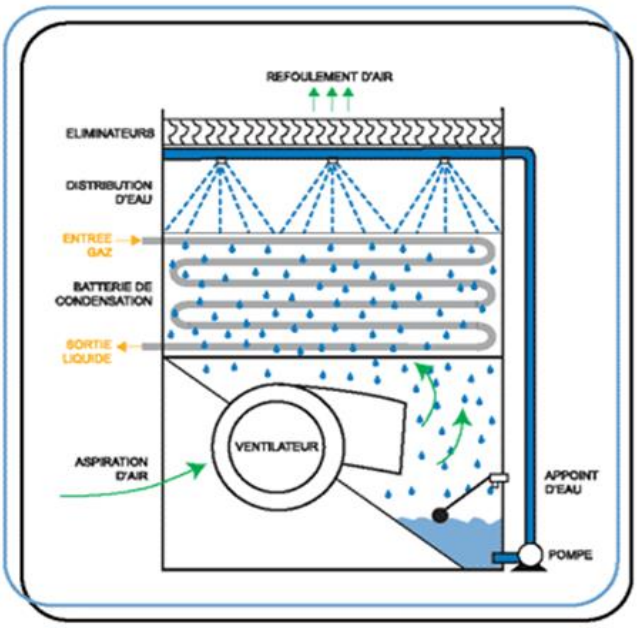


Figure 5. Condenseur évaporatif

Figure 2.15 : un condenseur évaporatif

2.6.4. Tour de refroidissement à circuit fermés hybride

Ce type de tour est constitué d'une batterie sèche et d'un corps d'échange sur lequel l'eau du procédé ruisselle : le fluide à refroidir circule en premier lieu dans une batterie sèche située au sommet de la tour de refroidissement. Si le refroidissement en mode sec n'est pas suffisant, le fluide est alors dispersé sur un corps d'échange, s'évapore en partie puis retourne à la température désirée vers le procédé. Grâce à l'utilisation d'une batterie placée au refoulement, l'appareil peut travailler selon trois modes distincts :

- Mode sec et humide combiné, dans les conditions de sélection nominales et d'ambiance les plus élevées
- Mode adiabatique, en intermédiaire, lorsque la température ambiant et/ou la charge seront plus faibles
- Mode sec uniquement, dans les conditions plus froides et de charges plus réduites.

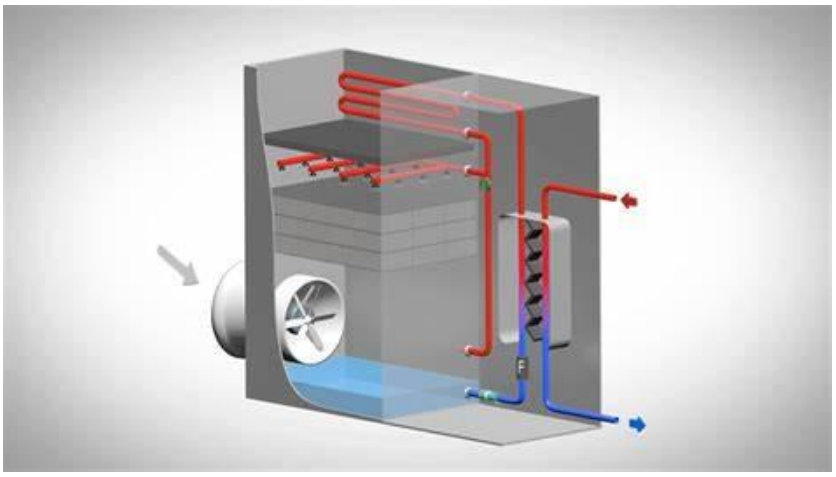


Figure 2.16 : Tour hybride fermée

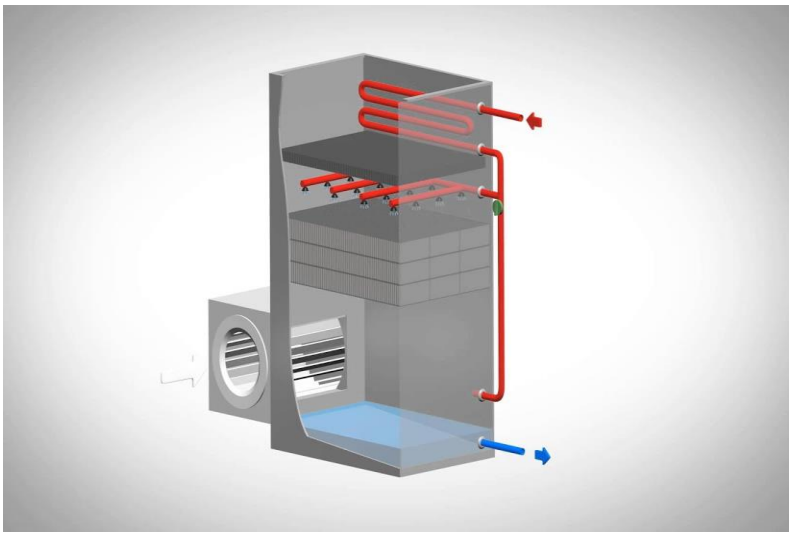


Figure 2.17 : une tour de refroidissement hybride ouverte

2.7. Maintenance appliquée aux aéroréfrigérants

2.7.1. Maintenance préventive

Ce type de maintenance appliquée aux aéroréfrigérants comprend :

- Les contrôles ou visites systématiques,
- Les expertises, les actions et les remplacements effectués à la suite de contrôles ou devisites,
- Les remplacements systématiques,
- La maintenance conditionnelle ou les contrôles non destructifs. [15]

2.7.1.1. Améliorer la fiabilité des aéroréfrigérants

La mise en œuvre de la maintenance préventive nécessite les analyses techniques du comportement de l'ensemble de l'aéroréfrigérant. Cela permet à la fois de pratiquer une maintenance préventive optimale et de supprimer complètement certaines défaillances.

2.7.1.2. Garantir la qualité de refroidissement

La surveillance quotidienne est pratiquée pour détecter les symptômes de défaillance et veiller à ce que les paramètres de réglage et de fonctionnement soient respectés. Ce contrôle des aéroréfrigérants permet d'éviter les aléas de fonctionnement. La qualité du refroidissement est ainsi assurée sans excès ou déficit de chaleur.

2.7.1.3. Améliorer l'ordonnancement des travaux

La planification des interventions de la maintenance préventive, correspondant au programme d'arrêt des baies d'aéroréfrigérants, devra être validée par la production. Cela implique la collaboration du service d'exploitation, ce qui facilite la tâche du service de maintenance. Les techniciens de maintenance sont souvent mécontents lorsque le responsable d'exploitation ne permet pas l'arrêt de l'installation alors qu'il a reçu un bon de travail pour l'intervention. Une bonne coordination prévoit un arrêt selon un programme défini à l'avance et prend en compte les impossibilités en fonction des impératifs de production.

2.7.1.4. Assurer la sécurité humaine

La préparation des interventions de maintenance préventive ne consiste pas seulement à respecter le programme. Elle doit tenir compte des critères de sécurité pour éviter les imprévus dangereux. Par ailleurs, le programme de maintenance doit aussi tenir compte des visites réglementaires.

2.7.1.5. Améliorer la gestion des stocks

La maintenance préventive est planifiable. Elle maîtrise les échéances de remplacement des organes ou pièces, ce qui facilite la tâche de gestion des stocks. On pourra aussi éviter de mettre en stock certaines pièces et ne les commander que le moment venu.

2.7.1.6. Améliorer le climat de relation humaine

Une panne imprévue est souvent génératrice de tension. Le dépannage doit être rapide pour éviter la perte de production. Certains problèmes, par exemple le manque de pièces de rechange, entraînent l'arrêt des aéroréfrigérants pendant longtemps. La tension peut monter entre la maintenance et la production.

2.8. Encrassement intérieur

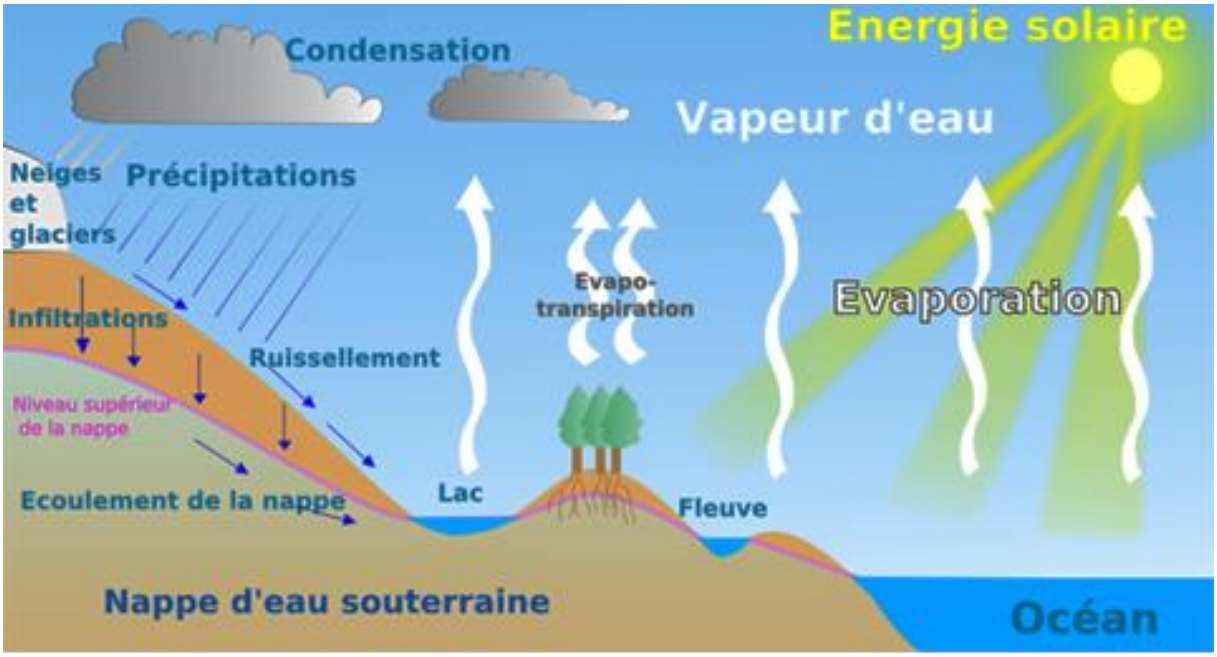
Ce problème peut survenir quand les fluides sont visqueux ou le procédé contient des solides. L'encrassement intérieur peut être détecté par les méthodes suivantes :

- Mesure de la chute de pression à travers la baie puis la comparer à la valeur de conception.

- Inspection pour des tubes pliés/déformés. Comme un tube bouché va être plus froid qu'un autre contenant le fluide chaud, différentes dilatations thermiques se produisent
- Utilisation de caméra thermiquepour une vue d'ensemble de la baie.
- Mesure de la température de sortie des tubulures en utilisant des thermomètres infrarouges et des peintures non réfléchissantes (de même pour les points de référence). Si les différences sont larges d'une baie à une autre (même intensité de tous les ventilateurs), il y a des chances qu'il existe des problèmes d'encrassement intérieur.

Chapitre 03

l'air humide



Source : Wikimédia Commons / Auteur toony

3.1. Introduction

Les propriétés physiques et thermodynamiques de l'air sont souvent implicitement celles de l'air sec, c'est-à-dire en l'absence de toute vapeur d'eau, notamment pour les raisons qui suivent.

- L'humidité de l'air est variable dans l'espace et dans le temps, à l'échelle de quelques heures voire moins (par exemple quand il pleut ou quand la rosée se forme) et non uniforme à l'échelle de centaines de mètres, voire parfois du mètre de sorte qu'il est impossible de définir des propriétés standard de l'air ambiant. L'humidité de l'air est principalement influencée par la quantité d'eau disponible, la température et les courants atmosphériques.

- Les propriétés de l'air humide peuvent en dévier fortement, car la proportion de vapeur d'eau peut atteindre jusqu'à 4 % en volume dans des conditions météorologiques usuelles ; la portance de l'air, le transport de la lumière, des odeurs, de certaines molécules (dont certains parfums, hormones), la portée des sons, la transparence de l'air, l'acidité et la pollution de l'air, les halos ou la pollution lumineuse, etc. sont ainsi affectés par l'humidité de l'air. La vapeur d'eau est d'ailleurs un des gaz à effet de serre les plus importants.

- L'évaporation de l'eau des océans, des rivières et des nuages, le vent ainsi que la transpiration végétale et l'évapotranspiration sont sources d'augmentation ou de régulation de l'humidité de l'air. Dans la nature, tous ces facteurs dépendent pour tout ou partie de l'énergie solaire et du vivant. En milieu anthropisé ou confiné (maison, voiture, lieu de travail) l'eau-vapeur expirée par l'homme, l'eau émise par les cheminées et les pots d'échappement deviennent déterminantes pour expliquer les variations d'humidité de l'air. Faute d'évapotranspiration végétale, l'air urbain des villes denses est anormalement sec. Paradoxalement au-dessus de la mer ou d'un lac, même en zone tropicale l'air peut-être beaucoup plus sec que sous la canopée. Dans le désert l'air est extrêmement sec le jour, mais peut être humide la nuit.

- À quantité de vapeur d'eau constante, une diminution de température tend à augmenter l'humidité relative jusqu'à la saturation (100 % d'humidité relative) ; la température correspond alors à la température de rosée (la pression partielle de vapeur d'eau est alors égale à la pression saturante).

- Les courants atmosphériques apportent de l'humidité dans les zones de haute atmosphère (régions sèches).

- Les variations de l'humidité de l'air sont amorties par la présence de matériaux ad-ab-sorbants (plâtre, bois..) et par les couplages entre les échanges "vapeur d'eau / énergie" (évapotranspiration, vent de terre/vent de mer, formation de rosée et son évaporation).

En milieu naturel, la rosée et l'apparition très rapide de moisissures sur la matière organique morte sont des indicateurs d'humidité relative élevée.

En milieu confiné, une humidité relative élevée favorise les allergies ou pathologies induites par la présence d'acariens et de spores de moisissures. C'est un des éléments du phénomène dit de pollution intérieure. Inversement une humidité trop basse est facteur de déshydratation des muqueuses et d'empoussièrement également néfastes à la santé.[16]



Figure 3.1 : La vapeur d'eau se liquéfie sur une paroi froide, asséchant l'air

3.2. L'air humide

L'air humide est un mélange gazeux d'air sec et de vapeur d'eau, la caractérisation de l'état thermodynamique de ce dernier nécessité la connaissance de la température, la pression et d'un troisième paramètre qui peut être l'une des grandeurs utilisées pour définir l'humidité (rapport de mélange, humidité relative, température de rosée, température humide, etc.), cella afin de déterminer tous les autres grandeurs telles que la masse volumique, le volume massique, l'enthalpie, etc.

3.3. Grandeurs caractéristiques de l'air humide

3.3.1. La température sèche: θ_s

La température d'air sèche est appelée aussi la température à bulbe sec, représente la température de l'air. L'échelle de température est reportée horizontalement (voir diagramme psychométrique). Les verticales représentent les isothermes.

3.3.2. L'humidité absolue: r

C'est la quantité d'eau que contient 1kg d'air sec. On l'appelle humidité spécifique ou teneur en eau. Elle s'exprime en gv/kgas (g de vapeur par kg d'air sec).

3.3.3. L'humidité absolue à la saturation: r_s

C'est la quantité d'eau que contient 1kg d'air sec à la saturation. Elle s'exprime en gv/kgas (g de vapeur par kg d'air sec).

La saturation : suivant une température bien déterminée, la concentration de vapeur dans l'air peut être élevée jusqu'à une limite où l'air ne peut plus prendre l'eau à l'état vapeur.

3.3.4. Pression partielle de la vapeur d'eau: p

C'est la pression qu'exerce la vapeur d'eau sur l'air. Elle s'exprime en P_a.

3.3.5. Pression partielle de la vapeur d'eau à la saturation: p_S

C'est pression de la vapeur d'eau à la saturation. Si on désire augmenter la pression par augmentation de la quantité de vapeur, cette vapeur passe à l'état liquide : brouillard. Le diagramme est donc divisé par la courbe de saturation en deux zones: zone d'air humide et zone de brouillard.

3.3.6. Humidité relative: φ

Pour une température constante, l'humidité relative représente le degré de saturation des vapeurs d'eau dans l'air. L'humidité relative n'a pas d'unité, elle représente un % de vapeur par rapport à la saturation (100 %).

$$\varphi=\frac{r}{r_s} \quad \text{.....(3.1)}$$

3.3.7. La température de rosée θ_R

Pour une humidité absolue constante, le refroidissement de l'air nous rapproche de la courbe de saturation. Ainsi la température de rosée est celle lue à l'intersection de la courbe de saturation et de l'humidité absolue.

3.3.8. La température humide θ_h

Aussi la température à bulbe humide, est mesurée par un thermomètre humide sur lequel, l'air est envoyé à une vitesse de 2 m/s. Etant donné que l'évaporation d'eau dépend de l'humidité de l'air ambiant, l'eau sur le thermomètre humide s'évapore d'autant plus rapidement que l'humidité relative de l'air est faible. La température indiquée correspond à la température humide.

3.3.9. L'enthalpie massique : h

L'enthalpie spécifique est l'enthalpie rapportée à 1 kg d'air sec, elle s'exprime en kJ/kgas, elle représente l'énergie interne du mélange air sec - vapeur d'eau.

3.3.10. Masse volumique: ρ

C'est la masse d'air en kg qu'occupe 1m3 d'air sec. Elle s'exprime en kgas/m3.

3.3.11. Le volume spécifique :v

C'est le volume qu'occupe 1kg d'air, il s'exprime en m3/kgas . [17]

$v=\frac{1}{\rho}$ $\rho=\frac{1}{V}$

3.4. Grandeurs mesurables

3.4.1. Humidité absolue

L'humidité absolue $(\mathrm{H_a})$ ou teneur en vapeur d'eau s'obtient à partir de l'équation : $\mathrm{H_a} = \frac{\mathrm{m_e}}{\mathrm{m_a}}$ ……(3.2)

Où me est la quantité d'eau, et ma la quantité d'air sec.

$\mathrm{H_a}$ est généralement exprimée en kg d'eau/kg d'air sec. [18]

3.4.2. Humidité relative ($\mathbf{H_R}$)

C'est la quantité d'eau sous forme de vapeur que contient un environnement d'air humide. C'est une valeur comprise entre 0 et 100 % qui indiquent le degré de saturation. Le brouillard apparaît à partir de la valeur Φ = 100 %. [19]

L'humidité relative est exprimée par le rapport :

$$H_R = \frac{P_v}{P_v S} \quad (3.3)$$

Avec :

P_v : étant la pression partielle de vapeur d'eau.

$P_{v\,s}$: la pression de la vapeur saturante qui correspond à l'état de saturation

3.4.3. Volume spécifique en $\mathbf{m^3}$/kg d'air

Noté V ou V_s, C'est le volume occupé par le poids d'un kilogramme d'air sec dans un ensemble des conditions spécifiques. [20]

$$V = \frac{V_{ah}}{m_{as}} \quad (3.4)$$

Où: V_{ah} : est le volume d'air humide considéré (m^3)

m_{as} : est la masse d'air sec contenu dans ce volume d'air humide (kg)

3.4.4. Enthalpie

L'enthalpie de l'air humide décrit l'état thermodynamique de son contenu énergétique. C'est la somme de deux composantes, air sec et vapeur d'eau. [21]

$$H = C_P T + X h_{1v} \quad (3.5)$$

Avec :

C_P: Chaleur massique de l'air (J/Kg K)

X: Humidité absolue.

h_{1v} **:** est l'enthalpie spécifique de la vapeur d'eau.

3.5. Diagramme de l'air humide

Il existe plusieurs autres types de diagramme, par exemple :

- Le diagramme de Mollier : P_v, i
- Le diagramme de Veron : T, x à coordonnées obliques à 92°
- Le diagramme de Missenard : i, x…

But

Le but est de construire un diagramme qui permette, par simple lecture et sans effectuer aucun calcul, de déterminer la valeur de toutes les grandeurs caractérisant l'air humide connaissant deux d'entre elles.

- **Courbe de saturation**

On commence par tracer sur le diagramme la courbe de saturation qui est en fait la courbe H_R= 100% car $P_v=\frac{H_r}{100}P_s(t)$ donc $P_v=P_s(th)$ alor H_r=100 %, en utilisant les tables ou la formule de Dupré.

- **Courbe d'égale humidité absolue**

De la relation : $X=\delta\frac{P_v}{P-P_v}$ nous déduisons que ces courbes sont des verticales, le diagramme étant tracé pour une pression totale constante P = 760 mmHg. Cela revient donc à effectuer une double graduation de l'axe des abscisses : l'une en mmHg pour P_v et l'autre en geau.kgas -1 pour x, la correspondance étant donnée par la formule .

- **Courbe d'égale humidité relative**

D'après la relation : $P_v=\frac{H_r}{100}P_s(t)$ Pour tracer, à une température T donnée, les points correspondants aux humidités relatives 0, 10, 20, …, 90 et 100%, il suffit de partager le segment [AB] en 10 parties égales, le point A étant le point de coordonnées (T,0) et le point B étant le point d'intersection de l'isotherme (verticale) T avec la courbe de saturation. [22]

- **Courbe d'égale température humide**

D'après la relation : $P_v=P_s\,(Th)-\frac{C_{pa}(T-T_h)(P-P_s(Th))}{\delta L_{th}}$ ……(3.6)

La pression totale P étant constante, à th fixé, la relation (6) est de la forme : $P_v=A_{th}+B_{th}(T)$, les courbes d'égale température humide sont donc des droites de pente

$B_{th}=-\frac{C_{pa}[P-P_s(th)]}{\delta L_{th}}$. Pour les tracer il suffit d'en déterminer deux points :

- Pour T = Th , nous avons d'après (1) : P_v = P_s(Th), le point est donc sur la courbe de saturation (H_R = 100%).

- Il suffit de déterminer un second point pour une autre valeur de T.

- **Isenthalpes**

D'après la formule $i(T;X) = C_{pa}\,T + X(L_0 + C_{pv}\,T)$

En remplaçant x par $x = \delta\frac{P_v}{P-P_v}$ il vient :$i(T;X) = C_{pa}\,T + \delta\frac{P_v}{P-P_v}(L_0 + C_{pv}\,T)$

Soit : $(i - C_{pa}\,T)(P - P_v) = \delta P_v(L_0 + C_{pv}\,T)$

Ou : $P_v = \frac{P(i-C_{pa}\,T)}{\delta L_0+i+(\delta C_{pv}-C_{pa})T}$ .....(3.7)

- **Courbe d'égale masse volumique**

D'après la formule : $\rho = \rho_0\frac{T_0}{T}\frac{P}{P_0}\frac{\delta(1+X)}{\delta+X}$ où T est la température en K.

On en déduit : $T = \frac{\rho_0\,T_0}{\rho P_0}[P - (1-\delta)P_v] - 273.15$ si T est exprimé en °C.

Les courbes d'égale masse volumique sont donc des droites de pente $-\frac{\rho_0\,T_0}{\rho P_0}(1-\delta)$ dans un système d'axes (P_v, T). [22]

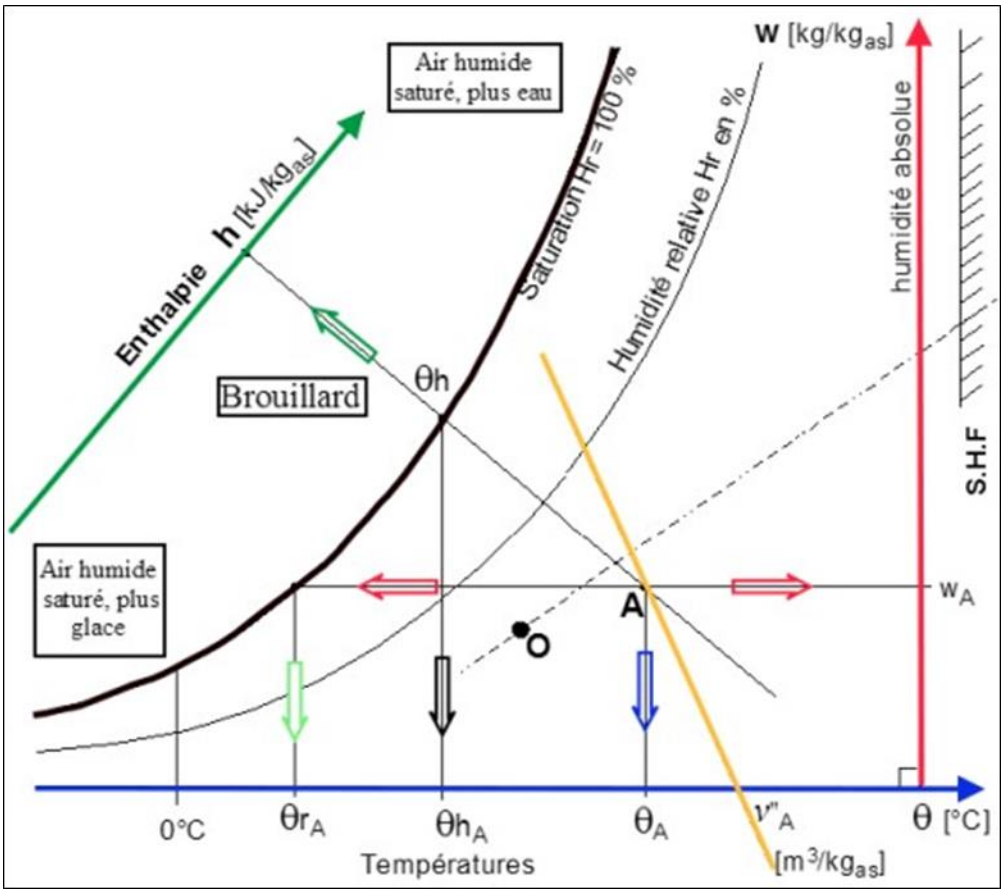


Figure 3.2 : diagramme de Carrier

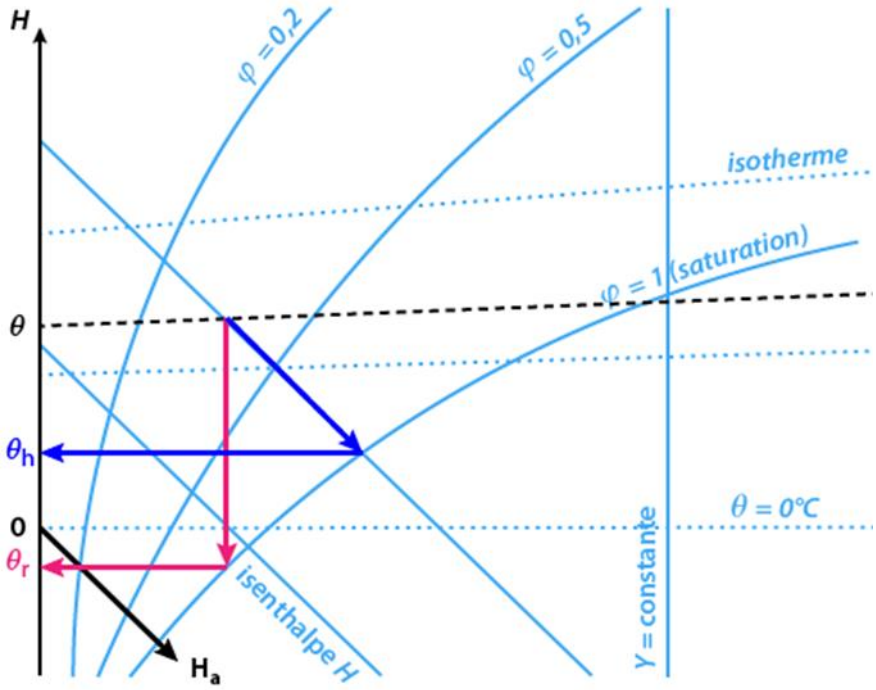


Figure3.3 : Détermination de la Température de rosée et la température humide a l'aide de diagramme de carrier

- **Température de rosée**

La température de rosée (θ_r) d'un air humide est définie comme étant la température pour laquelle la pression de vapeur p est égale à la pression de vapeur saturante (Figure 3.3). On la mesure comme étant la température à laquelle, il faut refroidir l'air humide (à H_a constante) pour atteindre la saturation. Elle est déterminée à l'aide d'un hygromètre à condensation. [18]

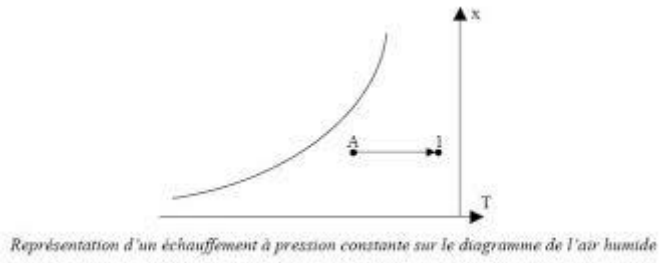
- **Température du thermomètre humide**

La température du thermomètre humide (θ_h) est définie comme la température à l'équilibre de l'air humide amené à saturation (formation des premières gouttes d'eau liquide) par augmentation de Ha (**Figure 3.3**). Elle est déterminée à l'aide d'un psychromètre. En pratique, c'est la température donnée par le thermomètre humide dont le bulbe est enveloppé dans un matériau poreux imprégné d'eau ; l'air humide est amené à une vitesse suffisante autour de celui-ci pour atteindre un équilibre définissant la θ_h . [18]

La θ_h se lit à l'intersection de la droite isenthalpe passant par (θ, H_a) de l'air avec la courbe H_R = 100%

3.6. Exemples d'evolution de l'air humide

3.6.1. Echauffement à pression constante



Représentation d'un échauffement à pression constante sur le diagramme de l'air humide

Figure 3.4 : Représentation d'un échauffement à pression constante sur le diagramme de l'air humide

C'est le type de transformation subi par l'air lors de son échauffement dans un échangeur de chaleur, sur des résistances chauffantes ou dans un capteur solaire :

$T_a,\ H_{Ra}$ T_1

Air ambiant → Batterie de chauffage → Enceinte de séchage

↑ Q

3.6.2. Refroidissement à pression constante

C'est la transformation subie par l'air lors de son passage sur l'évaporateur d'un système frigorifique, il peut se produire une condensation avec diminution de l'humidité absolue si la température finale est inférieure à la température de rosée :

$T_a,\ H_{Ra}$ T_1

Air ambiant → Evaporateur → Local à refroidir

↓ Q

3.6.3. Humidification adiabatique

C'est le type de transformation subi par l'air lors de son passage dans un séchoir convectif ou dans une tour de refroidissement :

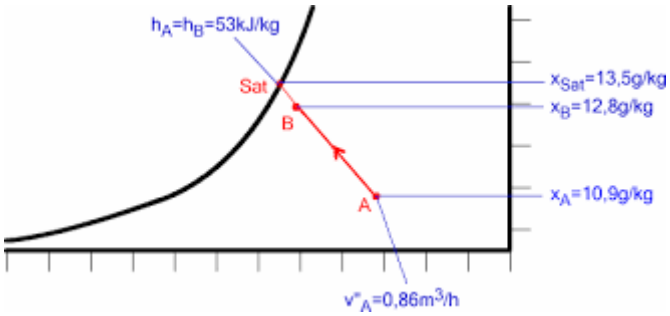


Figure 3.5 : Schéma d'une Humidification adiabatique

Cette transformation A ® 1 est aussi appelée refroidissement évaporatif direct. On définit un rendement d'humidification de l'air par le rapport $\frac{T_a - T_1}{T_a - T_2}$, c'est le rapport du refroidissement réel sur le refroidissement maximal que l'on obtiendrait si l'air était saturé (H_R = 100%) en fin de transformation : [22]

$T_a,\ H_{Ra}$ T_1

Air ambiant → Humidification → Air frais et humide

↓ Q

Chapitre 04

Modèles simples du transfert évaporatif dans une tour

4.1. Principe d'une tour de refroidissement

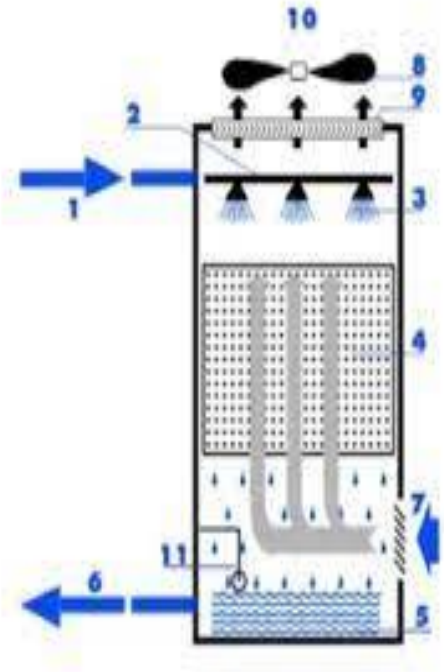


Figure 4.1 : schéma de principe d'une tour de refroidissement d'eau

L'eau chaude venant de l'installation à refroidir entre en (1) et circule dans la tuyauterie de distribution (2).L'eau est ensuite pulvérisée en fines gouttelettes grâce aux buses (3).Ces gouttelettes ruissellent le long de l'échangeur (4), celui-ci devant avoir une surface d'échange la plus grande possible pour accroitre le phénomène d'évaporation. L'eau non évaporée mais refroidie est recueillie dans le bassin de récupération(5) ou par le séparateur de gouttes(9) qui permet de récupérer les gouttelettes en suspension dans le courant d'air.

Enfin l'eau est stockée et réintroduite dans l'installation en (6), L'air entre en (7).Un fort débit est obtenu grâce à la mise en place d'un ventilateur(8), ce qui permet d'accroitre le phénomène d'évaporation. Le courant d'air circule dans l'échangeur puis dans le séparateur .Il est ensuit rejeté à l'air libre avec une arrivée d'eau d'appoint contrôlée par le flotteur(11) .Si l'eau à refroidir n'est pas en contact, le schéma est légèrement modifié. [23]

4.2. Equations générales des tours de refroidissement

4.2.1 Bilan thermique d'une tour

- La chaleur entrant par le sommet de la tour (par le débit d'eau) est, figure 3.3;

$$Q_1 = \dot{m}_{w1} T_{w1} C_{pw} \quad (4.1)$$

La chaleur entrant par l'eau d'appoint

$$\Delta Q_a = \Delta \dot{m}_{w1}^2 T_{ap} C_{pw} \quad (4.2)$$

La chaleur sortant par la base de la tour est :

$$Q_2 = \dot{m}_{w1} T_{w2} C_{pw} \quad (4.3)$$

Avec $(\dot{m}_{w1} - \dot{m}_{w2}) = \Delta \dot{m}_{w1}^2$, Autrement dit, la différence entre le débit d'eau entrant au sommet de la tour et celui sortant par le bas de la tour correspond à l'évaporation compensée par l'eau d'appoint$\Delta \dot{m}_{w1}^2$. [23]

- En régime permanent, le bilan des échanges de l'eau est nul, donc :

$$Q_c = Q_1 + \Delta Q_a - Q_2 \quad (4.4)$$

$$Q_c = \dot{m}_{w1} C_{pw} (T_{w1} - T_{w2}) + \Delta \dot{m}_{w1}^2 T_{ap} C_{pw} \quad (4.5)$$

Sachant que la chaleur latente d'évaporation de l'eau est L_v nous aurons la relation simple, qui exprime que la contrepartie de l'appoint qui a été évaporée :

$$\Delta \dot{m}_{w1}^2 = \frac{Q_c}{L_v} \quad (4.6)$$

Cette formule théorique correspond à une tour parfaite (sans éclaboussures).

L'expression (4.5) devient :

$$Q_C \left[1 - \frac{C_{pw}}{L_v} T_{ap}\right] = \dot{m}_{w1} C_{pw} (T_{W1} - T_{W2}) \quad (4.7)$$

Le terme correctif$\left[\frac{C_{pw}}{L_v} T_{ap}\right]$ est négligeable car :

C_{pw}= 1 Kcal.Kg^{-1}°C^{-1} ; L_v= 600 kcal.Kg^{-1} et$T_{ap} \approx T_{pw}$

Donc la puissance thermique totale de la tour est

$$Q_c \approx \dot{m}_{w1} C_{pw} (T_{w1} - T_{w2}) \approx \dot{m}_{w1} C_{pw} \Delta T_w \quad (4.8)$$

Et sous forme différentielle : $dQ_c \approx \dot{m}_{w1} C_{pw} \Delta T_w$ (4.9)

4.2.2. Equations théoriques

- **Considération géométriques**

Soit une tour de refroidissement d'eau ou l'air et l'eau cheminant à contre-courant (cas le plus générale), figure 3.4.

- Le volume de l'empilage formant surface de ruissèlement est V_0.Ce cas est celui d'une tour ouvert, mais le raisonnement reste valable pour une tour fermée.
- La section de passage brute de l'air et de l'eau est S_0
- La chaleur de l'empilage est égale à H, [24]

Donc $V_0 = S_0 H$ (4.10)

Et$dV_0 = S_0 dH$ (4.11)

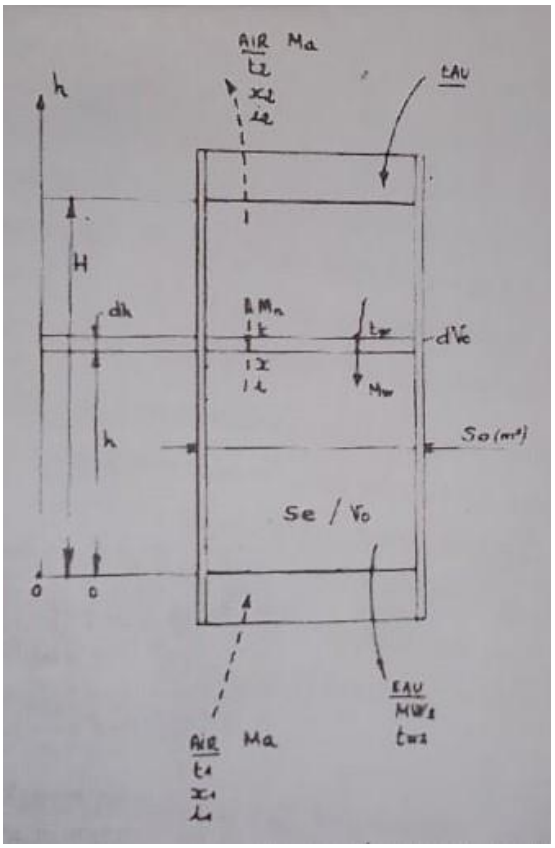


Figure 4.2 : tour théorique à contre-courant

On introduit la surface d'échange. La surface d'échange thermique et massiques est égale à S_e.

Posons$a = \frac{S_e}{V_0}$ (4.12)

Donc $S_e = aS_0H$ (4.13)

Et $dS_e = aS_0dh$ (4.15)

A. Equations de la conservation de la masse d'eau

L'eau qui s'évapore enrichit l'humidité absolue de l'air, donc :

$d\dot{m}_w = \dot{m}_a dw$ (4.16)

$(\dot{m}_{w1} - \dot{m}_{w2}) = \dot{m}_a(w_1 - w_2)$ (4.17)

B. Equation de la conservation d'énergie

Selon le premier principe de la thermodynamique, on peut écrire que : la chaleur cédée par l'eau est récupérée par l'air, donc :

$\dot{m}_a di = \dot{m}_w C_{pw} dT_w$ (4.18)

Ou:$\dot{m}_a(i_2 - i_1) = \dot{m}_w C_{pw}(T_{w1} - T_{w2})$ (4.19)

Et lors de transfert de l'eau:

$\dot{m}_a(i - i_1) = \dot{m}_w C_{pw}(T_{w1} - T_w)$ (4.20)

La formule (4.20) donne:

$\frac{di}{dT_w} = \left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a}\right) C_{pw}$ (4.21)

Cette équation est l'équation fondamentale des tours de refroidissement ainsi que de tours les appareils fonctionnant selon le même principe (laveurs d'air) ou l'air et l'eau sont en contact direct.

Par intégration du haut au bas de la tour, on aura :

$\frac{i_2 - i_1}{T_{w1} - T_{w2}} = \left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a}\right) C_{pw}$ (4.22)

A noter que la valeur $\left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a}\right) C_{pw}$ est une constante. [24]

Si le temps de contact de l'eau et de l'air est infini (surface de ruissellement infinie), l'air «sortira » de la tour saturé à la température d'entrée de l'eau, soit T_{w1}.

La plus grande valeur possible de rapport $\left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a}\right) C_{pw}$ sera :

$$\left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a} C_{pw}\right) max = \left(\frac{i_{2(stw1)} - i_1}{T_{w1} - T_{w2}}\right) \quad (4.23)$$

La valeur de l'enthalpie de l'air humide est :

{enthalpie} = {chaleur sensible} + {chaleur latente}

Soit $i = C_{pa}^{v} + L_v w$

Pour l'air sec à température T=0 °C, i sera forcément égal à 0 (base)

On a:$C_{pa}^{v} =$)

Avec: C_{pa}= 0.24 Kcal.Kg^{-1}°C ; C_{pv} = 0.46 Kcal.Kg^{-1}°C

$$i = C_{ap} T + C_{pv} w T + L_v w \quad (4.24)$$

En générale, on néglige, sans grande erreur, $C_{pv} w T$

Donc :$i \cong L_v w + C_{pa} T$ (4.25)

Soit :$i \cong 591.7w + 0.24T$ (4.26)

Qui constitue une formule pratique pour l'enthalpie de l'air.

C. Equation de surface de chaleur

- **Entre la surface de séparation air/eau et l'eau, figure 4.3 :**

Par convection:$\dot{m}_w C_{pw} dT_w = K_w dS_e \left(T_w - T_{sf}\right)$ (4.27)

Donc $\dot{m}_w C_{pw} dT_w = K_w a S_0 dh \left(T_w - T_{sf}\right)$ (4.28)

- **Entre la surface de séparation air/eau, figure 4.3 :**

$$\dot{m}_a C_{pa} dT = K_w dS_e \left(T_{sf} - T\right)$$
(4.29)

$$\dot{m}_a C_{pa} dT = K_w dS_e dh \left(T_{sf} - T\right)$$
(4.30)

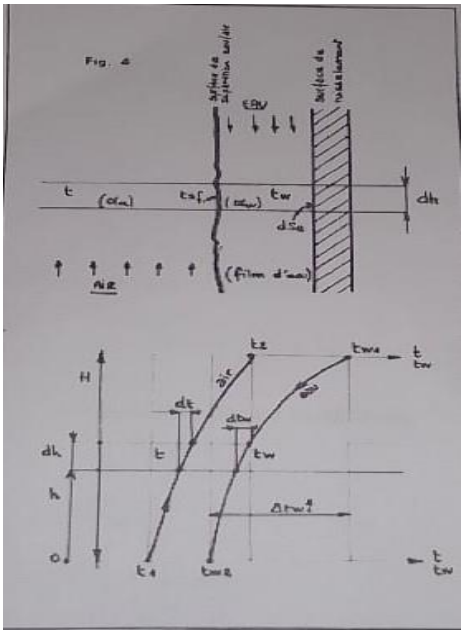


Figure 4.3: illustration du transfert de chaleur et diagramme pour TR

D. Equation de transfert de masse

$$\dot{m}_a dw = h_w dS_e(w_{sf} - w) \quad (4.31)$$

Puisque l'on suppose les surfaces d'échange massique et thermique sont identiques.

$$\dot{m}_a dw = h_w a S_0 dh(w_{sf} - w) \quad (4.32)$$

E. Relation de Lewis

LEWIS a établi la relation de l'échange massique comparé à l'échange thermique en convection forcée. On appelle la quantité adimensionnelle $\frac{h_w C_{pa}}{K_a} = NL_e$(nombre de LEWIS)

Cette relation fondamentale très commode permet de lier les deux phénomènes engendrés par tours et de trouver la solution recherchée. [23]

Dès lors, la relation (4.35) de transfert de masse qui à son tour engendre de la chaleur qui devient :

$$\dot{m}_a C_{pa} dT = h_w C_{pa} a S_0 dh(T_{sf} - T) \quad (4.33)$$

Soit :

$$\dot{m}_a C_{pa} dT = h_w a S_0 dh(C_{pa} T_{sf} - C_{pa} T) \quad (4.34)$$

Transformons la relation (4.32) en multipliant membre à membre parL_v ; on obtient :

$$\dot{m}_a L_v dw = h_w a S_0 dh L_v (w_{sf} - w) \quad (4.35)$$

Soit

$$\dot{m}_a L_v dw = h_w a S_0 dh (L_v w_{sf} - L_v w) \quad (4.36)$$

Additionnons membre à membre les relations (4.34) et (4.36) ; on obtient

$$\dot{m}_a (C_{pa} dT + L_v dw) = h_w a S_0 dh (C_{pa} T_{sf} - L_v w_{sf}) - (C_{pa} dT + L_v w) \quad (4.37)$$

La relation (4.37) se résume donc à :

$$\dot{m}_a di = h_w a S_0 dh (i_{sf} - i) \quad (4.38)$$

Cette relation très importante est fondamentale et résout le problème des tours A noter que l'équation donne par intégration:

$$H = -\left(\frac{\dot{m}_a}{h_w a S_0}\right) ln \frac{(i_{sf2} - i_2)}{(i_{sf1} - i_1)} \quad (4.39)$$

L'équation (4.39) peut s'appliquer si, dans la zone d'étude, on peut considérer la variation de i_{st}linéaire en fonction deT_{sf} . [26]

4.3. Equation combinées complémentaires

- Comme nous verrons, la combinaison de certaine équation peut nous donner des renseignements très intéressants et permettre le calcul de certains paramètres Difficiles à évaluer. [25]

Divisons membre à membre les équations (4.28), (4.38) et compte tenu de (4.21)

$$\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a} C_{pa} \frac{dT_w}{di} = 1 \quad (4.40)$$

Donc :$\left(\frac{i_{sf} - i}{T_{sf} - T_w}\right) = \frac{-K_w}{h_w}$ (4.41)

4.4. Résolution par nombre de MERKEL

- calcul approximatif de NM_{e0} et la hauteur H

L'équation fondamentale dite «des tours», soit (4.39), donne :

$$\left[\frac{di}{i_{sf} - i}\right] = \left[\frac{h_w a S_0}{m_a}\right] dh \quad (4.42)$$

En formulant l'hypothèse simplificatrice, selon laquelle l'enthalpie prise par l'air au contact de la surface du film d'eau ruisselant sur l'empilage soi T_{sf} est celle correspondant à température de l'eau au sien du film, soit T_w , on ne commet qu'une faible erreur. De plus, si

l'on remplace coefficient $h_w$par le coefficient h_{w0} global, cette erreur devient négligeable car :

$$\frac{i_{stw}-i}{i_{sf}-i}=\frac{h_w}{h_{w0}} \quad (4.43)$$

Dès lors, l'équation (4.42) devient :

$$\int_1^2 \frac{di}{i_{stw}-i}=\frac{h_{w0}aS_0H}{\dot{m}_a} \quad (4.44)$$

Le groupement sans dimension $\frac{h_{w0}aS_0H}{m_a}$ est représenté par le symbole NMe_0 (Nombre de MERKEL).Il contient toutes les variables de construction de la tour

$$NMe_0=\frac{h_{w0}aS_0H}{\dot{m}_a}=\frac{h_{w0}aV_0}{\dot{m}_a}=\frac{h_{w0}S_e}{\dot{m}_a}=\frac{h_{w0}aH}{V_{ma}} \quad (4.45)$$

La connaissance de nombre de MERKEL (NMe_0) de l'empilage choisi et de la pente du droit de fonctionnement tanØ résout le problème

Avec $\tan\emptyset=\frac{i_2-i_1}{T_{w1}-T_{w2}}=\frac{M_w}{M_a}$

La formule (4.42) s'écrit donc :

$$NMe_0=\int_1^2 \frac{di}{i_{stw}-i} \quad (4.46)$$

- On connait a, et sachant tanØ, en peut déduire M_a
- $M_w$est connue suivant $\frac{Q_t}{C_{pw}(T_{w1}-T_{w2})}$

On se fixe une vitesse massique de l'air et donc S_0, par table on déduit $h_{w0,}$ d'où :

$$H=\frac{\dot{m}_a}{h_{w0}aS_0}\int_1^2 \frac{di}{i_{stw}-i} \quad (4.47)$$

Le seul problème est l'intégration de $\frac{di}{i_{stw}-i}$, on peut intégrer cette équation par la méthode de MERKEL.

Nous indiquons une méthode approchée permettant l'approximation rapide NMe_0. [23]

Méthode approchée

Intégration $\frac{di}{i_{stw}-i}$, figure 3.6

- On connait i qui varie d'une façon linéaire en fonction de T_W (selon la droite de fonctionnement).
- On peut mesurer eni_{stw} fonctionT_w , le long de la courbe $i=(T|w)$

- L'écart$(i|stw-i)$ est donc parfaitement défini pour chaque valeur deT_w entre T_{w1} etT_{w2}.

La courbure de $i=f(T|w)$ étant faible dans la page des températures généralement admises, en peut calculer la moyenne arithmétique de $(i|stw-i)$ entre T_{w1} et T_{w2}

Dès lors, l'intégrale s'écrira :

$$\int_1^2 \frac{di}{i_{stw}-i} = \frac{i_2-i_1}{(i_{stw}-i)_{moy}} \qquad (4.48)$$

La hauteur de la tour sera :

$$H\frac{\dot{m}_a}{h_{w0}aS_0}\frac{i_2-i_1}{(i_{stw}-i)_{moy}} \qquad (4.49)$$

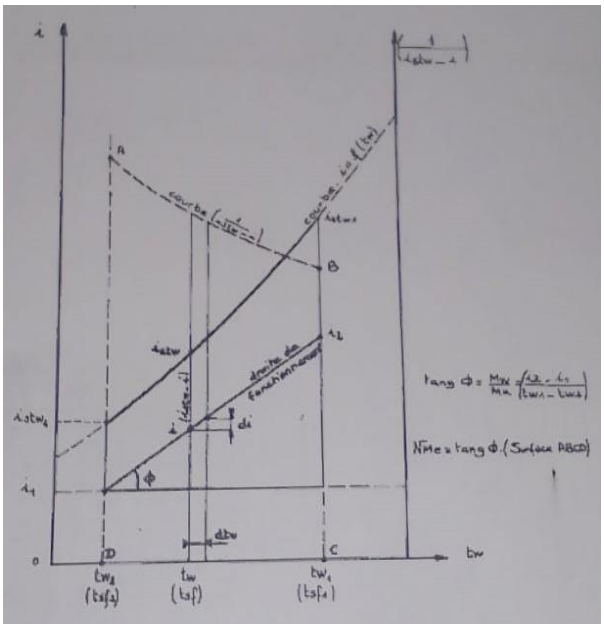


Figure 4.4 : solution de MERKEL

Si on reprend :$\frac{di}{dT_w}=\frac{M_w}{M_a}C_{pw}$

$$M_a di = h_{w0}aS_0 dh\left(i_{sf}-i\right) \qquad (4.50)$$

On peut écrire $di=\frac{M_w}{M_a}C_{pw}tan\emptyset dT_w\left(C_{pw}=1\right)$

On aura $$\int_{T_{w2}}^{T_{w1}} \frac{dT_w}{i_{sf}-i} = \frac{NMe}{tan\emptyset} \qquad (4.51)$$

Sur le diagramme, i=f(T_w), on porte T_{w1} et T_{w2} d'où i_{stw1} et i_{stw2}, on connait i_1 (à l'entrée de la tour).

En se fixe tanØ et en trace la droite de fonctionnement, alors $(i|stw-i)$ entre la droite de fonctionnement et la courbe et facile à déterminer.

On peut tracer$\frac{1}{i_{sf}-i}=f(T_w)$, et on obtient l'intégrale. [26]

Chapitre 5

Modélisation des tours ouvertes et fermées ,résultats et discussion

5.1. Domaine Technologique

5.1.1. Refroidissement humide à cycle ouvert et fermé

L'outil développé est destiné à modéliser de façon simplifiée le fonctionnement d'une tour de refroidissement fermée et ouverte, figure 5.0, à partir d'un point de fonctionnement donné.

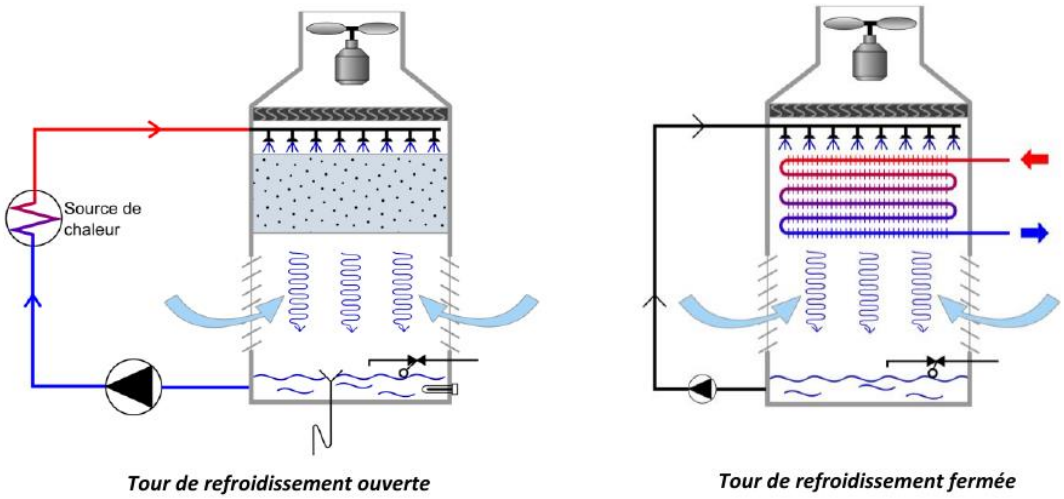


Figure 5.0 : Refroidissement humide à cycle ouvert et fermé

Principe

-La technologie de refroidissement la plus répandue pour les groupes froids thermiques est le refroidissement humide, à l'aide de tours de refroidissement *ouvertes*.

-l'eau du circuit de refroidissement est envoyée en spray au sommet de la tour sur la zone d'échange (matériau de garnissage). Le principal effet de refroidissement est obtenu par évaporation d'un faible pourcentage d'eau (typiquement <5%) ; cette perte doit être compensée par l'ajout d'eau neuve du réseau. L'eau refroidie retourne dans le circuit. Un ventilateur (horizontal en sommet de tour pour les modèles hélicoïdaux ou en partie basse de la tour pour les modèles centrifuges) extrait l'air saturé pour assurer que l'évaporation continue. Cette technologie est très efficace dans les climats appropriés (dotés d'une hygrométrie raisonnable, soit moins de 80% en moyenne) et, en principe la température limite de retour de l'eau refroidie est proche de la température de bulbe humide de l'air (3°C à 5°C au-dessus de la température humide).

-Le principe des tours de refroidissement *fermées* est très similaire, a ceci près que l'eau évaporée lors du procédé de refroidissement est différente de l'eau circulant dans le circuit de refroidissement.

Dans les climats secs, la vitesse des ventilateurs doit souvent être diminuée pour ne pas descendre en dessous de la température minimum acceptée par le groupe froid (souvent

24°C pour les systèmes à absorption), Alors que dans des climats très humides la température de bulbe humide de l'air est souvent élevée.

5.2. Travaux sur les TR

Notre objectif est la modélisation plus réaliste de ces tours pour évaluer les performances et le niveau des énergies mises en jeu ainsi que les consommations d'eau, et enfin pour faire ressortir les avantages de ces équipements.

Le modèle est destiné à être intégré dans un logiciel de calcul prévisionnel de consommation d'énergie d'un bâtiment tertiaire climatisé.

Il est remarquable de souligner que les modèles simplifiés ont pour base la théorie de Merkel décrite dans un chapitre précédent et la méthode NUT. [27]

5.3. Hypothèses du modèle et procédure

5.3.1. Tour fermée

Les équations de base pour les transferts thermiques et massique pour les tours évaporatives fermées sont établies selon les hypothèses suivantes :

- L'échange de chaleur entre la tour et l'extérieur est négligeable.

- Les chaleurs spécifiques des fluides sont considérés constantes.

- Les fluides à l'entrée prennent place uniformément à une section perpendiculaire au sens de l'écoulement.

- le film d'eau couvre toute la partie de la paroi séparant l'air de l'eau à refroidir.

- l'interface entre le film d'eau et l'air est à une température dite température-film.

5.3.2. Tour ouverte

Les hypothèses généralement faites pour modéliser les tours de refroidissement sont les suivantes :

-Pas de transferts de masse et de chaleur dans les directions des écoulements d'eau et d'air.

- Les transferts de masse et de chaleur à travers les parois sont négligés.

-Les apports de chaleurs dus aux ventilateurs sont négligés.

- Les chaleurs massiques de l'eau et l'air sec sont supposées constantes. [27]

5.3.3. Procédure Tour ouverte

Il y a deux modules de calcul:

PREP_TAO « PREParation **à T**our **A**éroréfrigérante **O**uverte **»**

Calcul des coefficients de caractérisation des échanges massiques dans la tour à partir de point de fonctionnement

Calcul de l'efficacité

Calcul du NUT

Calcul des coefficients c et n

TAO_Tour **A**éroréfrigérante **O**uverte

Détermination du NUT à partir des débits d'air et d'eau et des coefficients c et n

Détermination de la température humide de l'air en entrée

Calcul des enthalpies de l'air et de l'air saturé à la température de l'eau

Calcul de l'enthalpie de l'air à saturation à la température de l'eau en sortie

Calcul de la chaleur spécifique effective de l'air à saturation

Calcul de l'efficacité

Calcul de l'enthalpie de l'air en sortie

Calcul d'humidité spécifique de l'air en sortie

Calcul de la température de l'eau en sortie, Tes', à partir du bilan thermique

Détermination des valeurs caractéristiques des deux fluides en sortie à partir de la connaissance de la température de l'eau en sortie.

Calcul de la consommation d'eau.

5.3.4. Procédure Tour fermée

Il y a deux modules de calcul:

Un module permettant l'identification des coefficients d'échange interne et externe à partir d'un point de fonctionnement, nommé PREP_TAF, soit

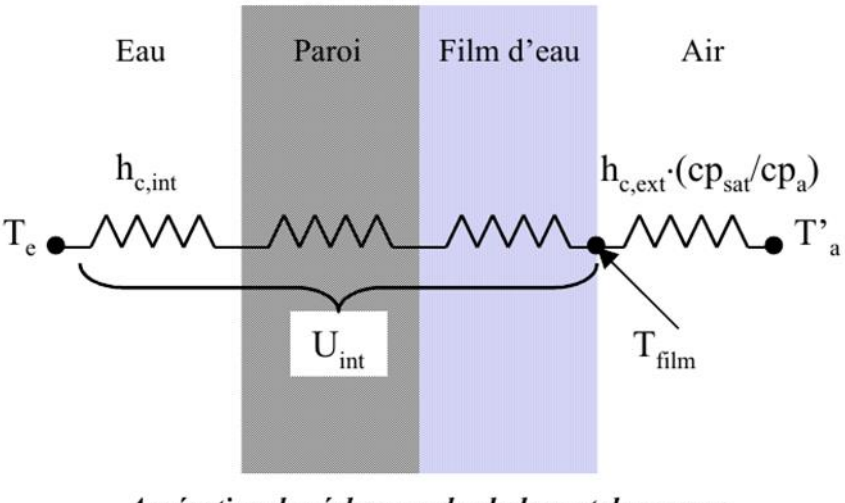
« **PREP**aration à **T**our **A**éroréfrigérante **F**ermée »

Un module permettant le calcul des performances de la tour fermée dans des conditions données par la méthode NUT nommé TAF, soit « Tour **A**éroréfrigérante **F**ermée ». [27]

5.4. Description mathématique

5.4.1. Tour fermée

La représentation suivante illustre les conductances thermiques au sein de l'échangeur humide par analogie électrique :



Agrégation des échanges de chaleur et de masse :

On suppose que l'air immédiatement contre la surface du film d'eau est saturé à la température de surface du film d'eau. La vapeur d'eau et le film d'eau étant à l'équilibre, l'échange entre l'air et le film d'eau s'exprime à partir d'un terme d'échange de chaleur dû à la chaleur latente nécessaire pour évaporer l'eau dans l'air et un terme d'échange de chaleur entre l'eau liquide et l'air par convection . [28]

L'échange de chaleur et de masse au sein de la tour de refroidissement fermée est alors décrit par l'expression suivante de la puissance :

$$\mathbf{d\dot{Q} = U_t . dA_{int}(T_e - T'_a)} \qquad \textbf{(5.1)}$$

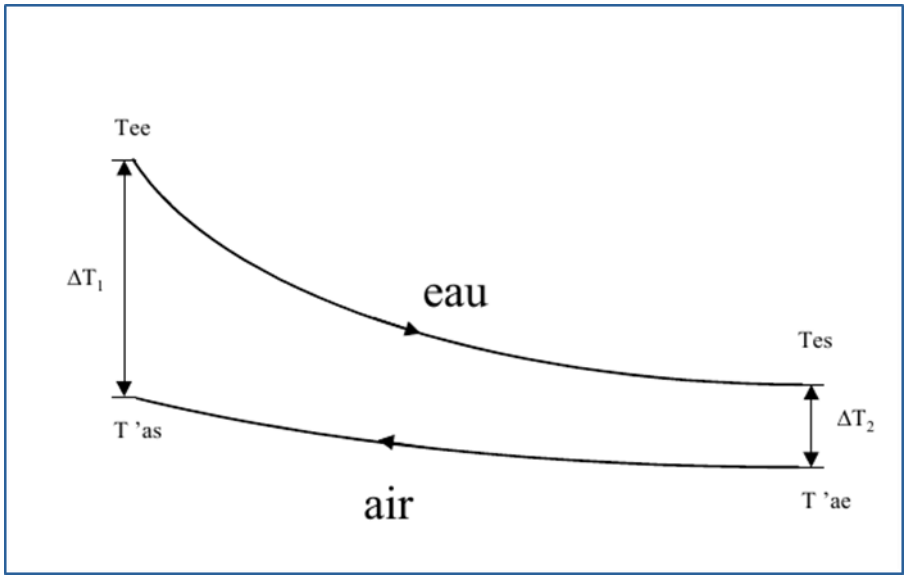
La conductance globale U_t s'écrit en associant le coefficient d'échange cote air et cote eau et la surface d'échange :

$$\mathbf{\frac{1}{U_t} = \frac{c_{pa} + w_a . c_{pv}}{h_{c,ext} . c_{psat} . dA_{ext}} + \frac{1}{U_{int} dA_{int}}} \qquad \textbf{(5.2)}$$

A partir de la formulation de l'échange local, les méthodes de calcul des échangeurs (NUT-ε et ΔTlm) sont utilisées en faisant l'hypothèse d'un coefficient d'échange constant sur l'ensemble de l'échangeur. [28]

Les caractéristiques de la tour de refroidissement fermée sont déterminées à partir d'un point de fonctionnement, indicé rat, en utilisant la méthode des différences logarithmiques des températures appliquée à un échangeur contre-courant. Le transfert de chaleur s'écrit :

$$\dot{\mathbf{Q}} = \mathbf{UA^{rat}\Delta T_{lm}} \qquad \textbf{(5.3)}$$



En considérant la valeur de la différence moyenne logarithmique pour un échangeur à contre-courant :

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} = \frac{(T_{es} - T'_{ae}) - (T_{ee} - T'_{as})}{\ln\frac{T_{es} - T'_{ae}}{T_{ee} - T'_{as}}} \qquad \textbf{(5.4)}$$

Le coefficient d'échange global est calculé comme suit :

$$\mathbf{UA_t^{rat}} = \dot{\mathbf{Q}} \,/\, \mathbf{\Delta T_{lm}} \qquad \textbf{(5.5)}$$

La puissance totale se retrouve à partir des états du fluide interne en considérant :

$$\dot{\mathbf{Q}} = \mathbf{C_e(T_{ee} - T_{es})} \textbf{ et } \mathbf{C_e} = \dot{\mathbf{m}}_\mathbf{e}\mathbf{c_{pe}} \qquad \textbf{(5.6)}$$

L'enthalpie de l'air en sortie est déterminée par un bilan thermique :

$$\mathbf{h_{as}} = \mathbf{h_{ae}} + \dot{\mathbf{Q}}/\dot{\mathbf{m}}_\mathbf{a} \qquad \textbf{(5.7)}$$

La chaleur spécifique à saturation est calculée du côté de l'air comme suit :

$$\mathbf{C_{psat}} = \frac{\mathbf{h_{sat}(T'_{as}) - h_{sat}(T'_{ae})}}{\mathbf{T'_{as} - T'_{ae}}} \quad \textbf{(5.8)}$$

Il s'agit dans un second temps de déterminer le coefficient d'échange du côté de l'air et côté eau. On a :

$$\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{UA_t^{rat}}} = \frac{\mathbf{c_{pa}}}{\mathbf{h_{c,ext} \cdot c_{psat} \cdot A_{ext}}} + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{h_{c,int} \cdot A_{int}}} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{UA_{ext}^{rat}}} + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{UA_{int}^{rat}}} \quad \textbf{(5.9)}$$

Le coefficient d'échange global est ensuite déterminé à partir des coefficients d'échange côté eau et côté air. Les formules NUT-ε sont utilisées pour déterminer l'efficacité de la tour en conditions non nominales. [28]

Les formules utilisées sont les suivantes [INCROPERA, 1996] :

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{\mathbf{1 - exp^{[-NUT.(1-C_r)]}}}{\mathbf{1 - C_r . exp^{[-NUT.(1-C_r)]}}} \qquad \mathbf{(\dot{C}_r < 1)}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{\mathbf{NUT}}{\mathbf{1 + NUT}} \qquad \mathbf{(\dot{C}_r = 1)}$$

$$\mathbf{avec\ NUT} = \frac{\mathbf{UA_t}}{\mathbf{\dot{C}_{min}}}\ ,\ \mathbf{\dot{C}_r} = \frac{\mathbf{\dot{C}_{min}}}{\mathbf{\dot{C}_{max}}}\ ,\ \mathbf{\dot{C}_a = \dot{m}_a . cp_{sat} et\ \dot{C}_e . cp_e} \quad \textbf{(5.10)}$$

La température de l'eau en sortie d'échangeur est calculée suivant :

$$\mathbf{T_{es} = T_{ee} + \varepsilon . \frac{\dot{C}_{min}}{\dot{C}_e} . (T'_{ae} - T_{ee})} \quad \textbf{(5.11)}$$

La puissance totale échangée est déterminée comme suit :

$$\mathbf{\dot{Q}_{tot} = \dot{C}_e . (T_{ee} - T_{es})} \quad \textbf{(5.12)}$$

L'humidité spécifique de l'air en sortie d'échangeur est finalement déterminée comme suit :

$$\mathbf{w_{as} = w_{ae} + (w_{film} - w_{ae}) . \left(1 - exp^{\left(-UA_{ext}//(\dot{m}_a * c_{psat})\right)}\right)} \quad \textbf{(5.13)}$$

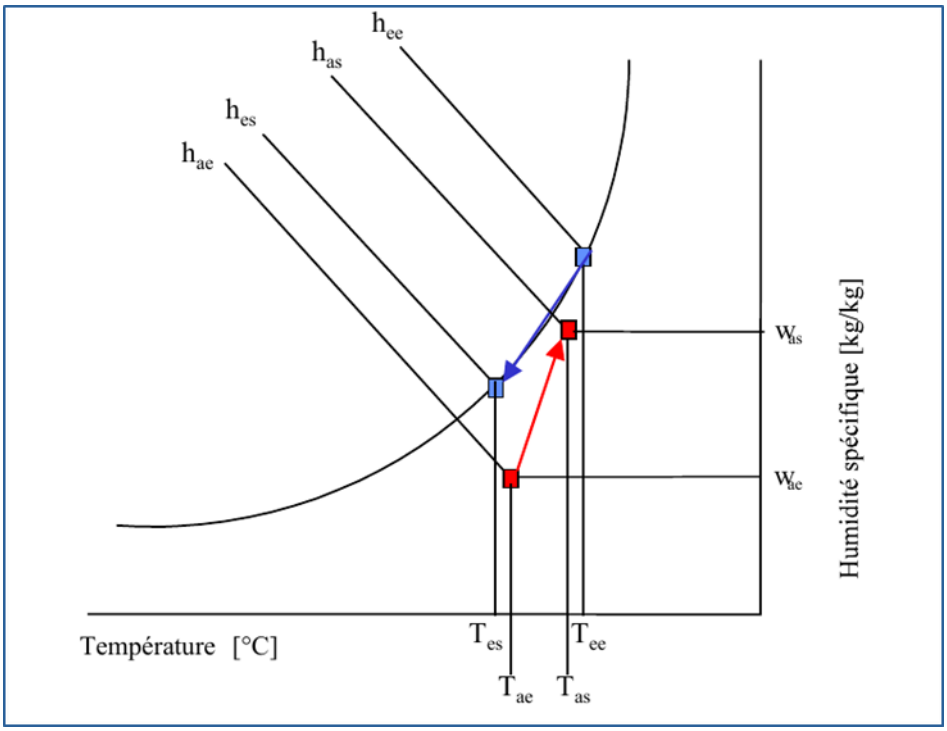
Le débit d'eau évaporé est égal à :

$$\mathbf{\dot{C}_e = \dot{m}_a . (w_{as} - w_{ae})} \quad \textbf{(5.14)}$$

Le débit d'eau consommé est égal à : $\mathbf{= \frac{N_{cycle}}{N_{cycle} - 1} \dot{C}_e}$

5.4.2 Tour ouverte

Les évolutions subies par l'air et l'eau pour la tour ouverte peuvent être représentées dans un diagramme de l'air humide. [28]



On définit le Nombre d'Unité de Transfert (NUT) par la formule suivante :

$$\mathbf{NUT} = \mathbf{c}.\left(\frac{\dot{\mathbf{m}}_{\mathbf{ee}}}{\dot{\mathbf{m}}_{\mathbf{ae}}}\right)^{\mathbf{n}} \qquad \textbf{(5.15)}$$

Tel que c et n sont déterminés à partir deux points de fonctionnement

$$\mathbf{n} = \frac{\ln(NUT1)-\ln(NUT2)}{\ln\left(\frac{\dot{m}_{el}}{\dot{m}_{al}}\right)-\ln\left(\frac{\dot{m}_{e2}}{\dot{m}_{a2}}\right)}$$

$$\mathbf{c} = \exp^{\left(\ln(NUT1)-n.\ln\left(\frac{\dot{m}_{el}}{\dot{m}_{al}}\right)\right)} \qquad \textbf{(5.16)}$$

Le transfert de chaleur peut être écrit comme suit :

$$\dot{\mathbf{Q}} = \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{a}}.\,\dot{\mathbf{m}}_{\mathbf{a}}.\left(\mathbf{h}_{\mathbf{s,ee}} - \mathbf{h}_{\mathbf{ae}}\right) \qquad \textbf{(5.17)}$$

L'enthalpie de l'air et la température de l'eau en sortie de la tour sont déterminées à partir d'un bilan énergétique global sur chacun des fluides :

$$\mathbf{h}_{\mathbf{as}} = \mathbf{h}_{\mathbf{ae}} + \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{a}}(\mathbf{h}_{\mathbf{see}} - \mathbf{h}_{\mathbf{ae}})$$

$$\mathbf{T}_{\mathbf{es}} = \frac{\dot{\mathbf{m}}_{\mathbf{ee}}.\mathbf{c}_{\mathbf{pe}}.\mathbf{T}_{\mathbf{ee}} - \dot{\mathbf{m}}_{\mathbf{a}}.(\mathbf{h}_{\mathbf{as}} - \mathbf{h}_{\mathbf{ae}})}{\dot{\mathbf{m}}_{\mathbf{es}}.\mathbf{c}_{\mathbf{pe}}} \qquad \textbf{(5.18)}$$

Par ailleurs, la chaleur massique spécifique à saturation est calculée comme suit :

$$\mathbf{c_{ps}} = \frac{\mathbf{h_{see} - h_{ses}}}{\mathbf{T_{ee} - T_{es}}} \qquad \textbf{(5.19)}$$

Le débit d'eau à la sortie

$$\mathbf{\dot{m}_{es} = \dot{m}_{ee} - \dot{m}_{a}.(w_{as} - w_{ae})} \qquad \textbf{(5.20)}$$

L'humidité spécifique de l'air est calculée par

$$\mathbf{w_{as} = w_{ae} + (w_{ae} - w_{sm}).exp^{(-NUT)}} \qquad \textbf{(5.21)}$$

L'efficacité de la tour est écrite ainsi $\eta = \frac{\mathbf{T_{ee} - T_{es}}}{\mathbf{T_{ee} - T'_{ae}}}$

Où $\mathbf{T'_{ae}}$ est la température humide de l'air à l'entrée de la tour. [28]

5.5. Résultats, interprétation et discussion

Nous avons utilisé le programme **Matlab** écrit pour simuler les conditions opératoires diverses. En effet nous avons choisi la gamme suivante de variation pour les variables significatives :

5.5.1. Paramètres d'entrée

Pour la tour fermée

Mee	Débit d'eau à l'entrée	10 à 80 Kg.s -1
Mae	débit de l'air à l'entrée	10 à 60 Kg.s-1
Tae	Température d'air d'entrée	10 à 80°C
Tee	Température de l'eau à l'entrée	10 à 60°C
Wae	Humidité de l'air à l'entrée	0 à 0.05 Kg /kg
Ncycle	Nombre de cycle	1
Mode	Mode de fonctionnement	1: humide

Pour la tour ouverte

Mee	Débit d'eau à l'entrée	10 à 80 Kg.s -1
Mae	débit de l'air à l'entrée	10 à 60 Kg.s-1
Tee	Température de l'eau à l'entrée	10 à 60°C
Wae	Humidité de l'air à l'entrée	0 à 0.05 Kg /kg
Tae	Température de l'air à l'entrée	10 à 60°C
Ncycle	Nombre de cycle	1
Pe	Puissance électrique des ventilateurs	750w
C	Coefficient pour détermination de NUT	1.0668
N	Exposant pour la détermination de NUT	0.2579
Confighx	Configuration de l'échangeur	1:contre courant
Mode	Mode de fonctionnement	1 : humide

5.5.2. Paramètres de sortie

Tes	Température de l'eau à la sortie
Tas	Température de l'air à la sortie
Qtot	Puissance échangée totale
Ce	Consommation d'eau dans la tour
Was	Humidité de l'air à la sortie

5.6. Variation suivant la température d'entrée d'eau

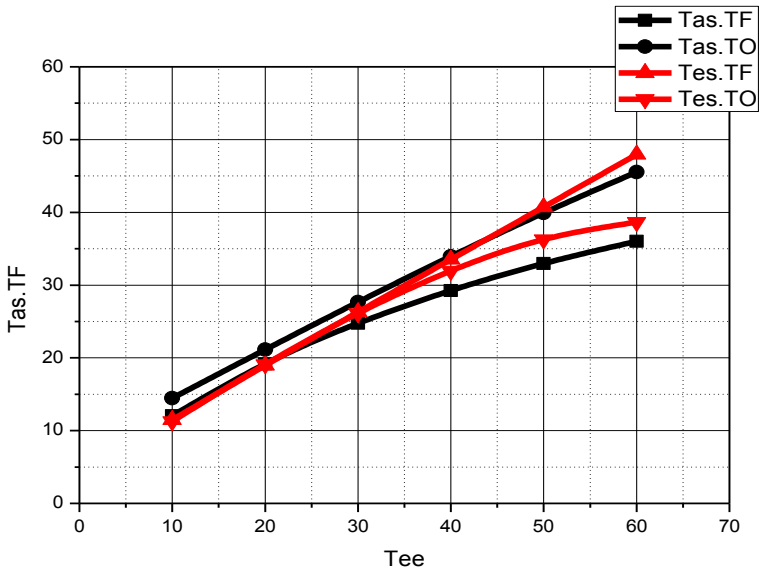


Figure 5.1 : Variation suivant la température d'entrée d'eau sur les températures de sortie

En premier lieu on remarque que l'évolution des températures de sortie d'eau par rapport a la température d'entrée est similaire pour la tour fermée et ouverte.

Cependant et comparaison entre la TO et la TF on remarque au-delà de 40 °C la température d'eau de sortie de la tour fermée est supérieure a celle de la tour ouverte. Le contact direct de l'air et l'eau dans la tour ouverte permet le refroidissement efficace de l'eau.

Par conséquence, on a intérêt à utiliser la tour ouverte pour des températures supérieures a 30 °C

Enfin on peut prédire qu'au-delà de 60 °C la tour ouverte atteint ces limites par rapport a la variation de la température d'eau.

On remarque les mêmes évolutions pour la température de sortie de l'air, il y a un écart substantiel de plus en plus large a mesure que la température d'eau d'entrée augmente. L'humidité absolue de l'air est montrée à la figure 5.2

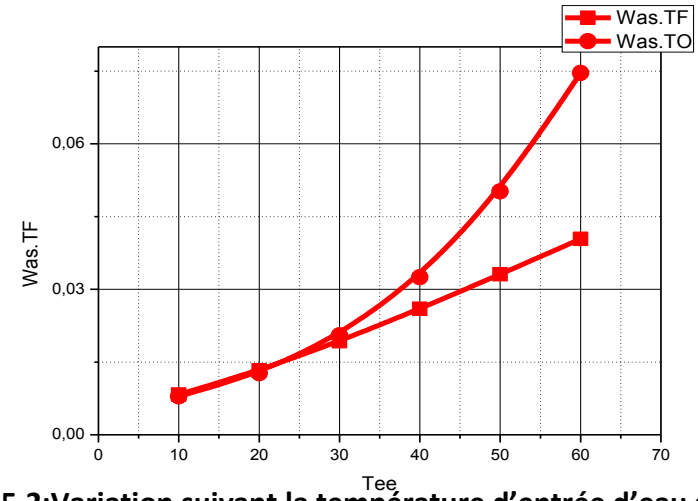


Figure 5.2:Variation suivant la température d'entrée d'eau sur l'humidité de sortie

L'humidité absolue de l'air évolue avec la température d'entrée d'eau à partir de 30 °C de façon importante pour la tour ouverte, car il y a le contact direct entre l'air et l'eau.

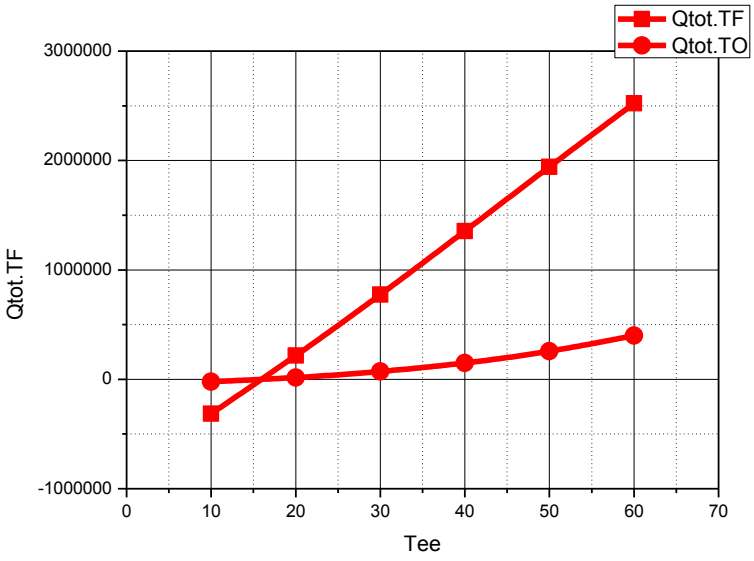


Figure5.3:Variation suivant la température d'entrée d'eau sur le taux d'échange de chaleur

On reporte ces évolutions pour la chaleur échangée et le niveau de consommation d'eau. Figure 5.3, 5.4

On remarque que le taux d'échange de chaleur pour la tour fermée est supérieur par rapport à celui de la tour ouverte

On constate que la tour ouverte ne demande pas de grands échanges thermiques.

Quant à la consommation d'eau des tours on remarque que celle-ci est importante pour la tour fermée .fig 5.4

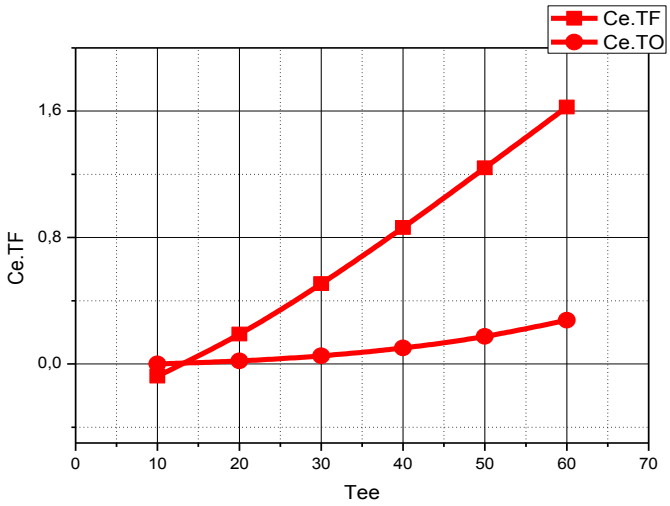


Figure 5.4:Variation suivant la température d'entrée d'eau sur la consommation d'eau

5.7. Variations suivant la température d'entrée d'air

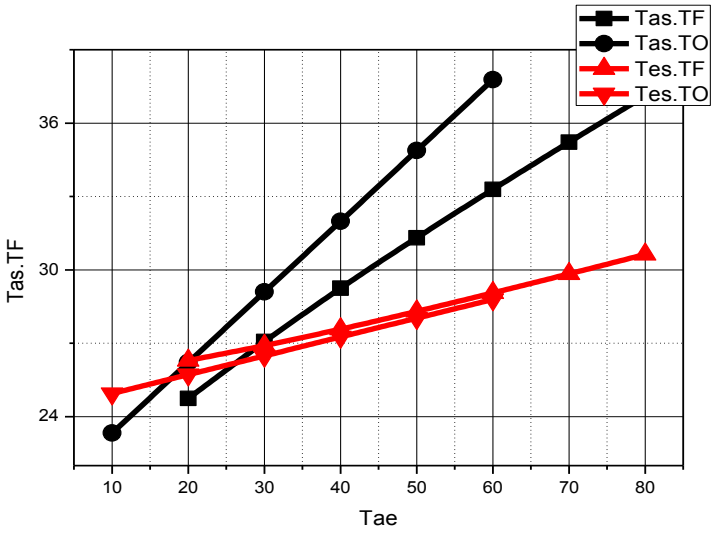


Figure 5.5 : Variation suivant la température d'entrée d'air sur les températures de sortie

La variation possible de la température de l'air à l'entrée n'influe que peu sur la température de l'eau à refroidir à la sortie, figure 5.5

Pour ce qui est de la température de l'air à la sortie, l'influence est beaucoup plus importante. Cela s'explique par la possibilité d'évaporation de l'eau qui contribue à adoucir la température de l'air à la sortie dans le cas humide.

Le contact direct de l'air et l'eau dans la tour ouverte donne forcément une température d'air à la sortie nettement supérieure à celle de la tour fermée.

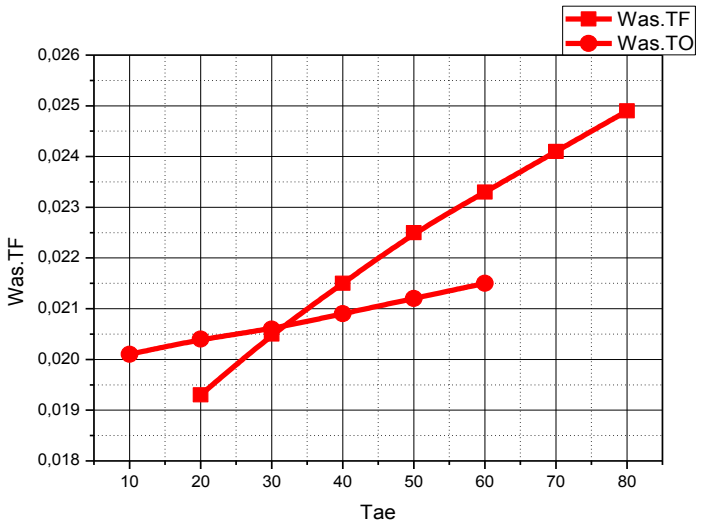


Figure 5.6:Variation suivant la température d'entrée d'air sur l'humidité de sortie

L'humidité absolue de l'air évolue avec la température d'entrée d'air mais de façon peu importante, figure 5.6, car un air plus chaud se charge plus en vapeur.

5.8. Variations suivant le débit d'air

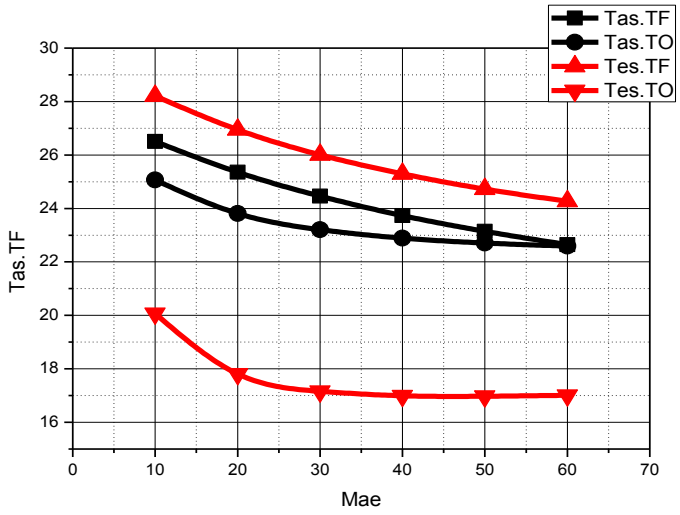
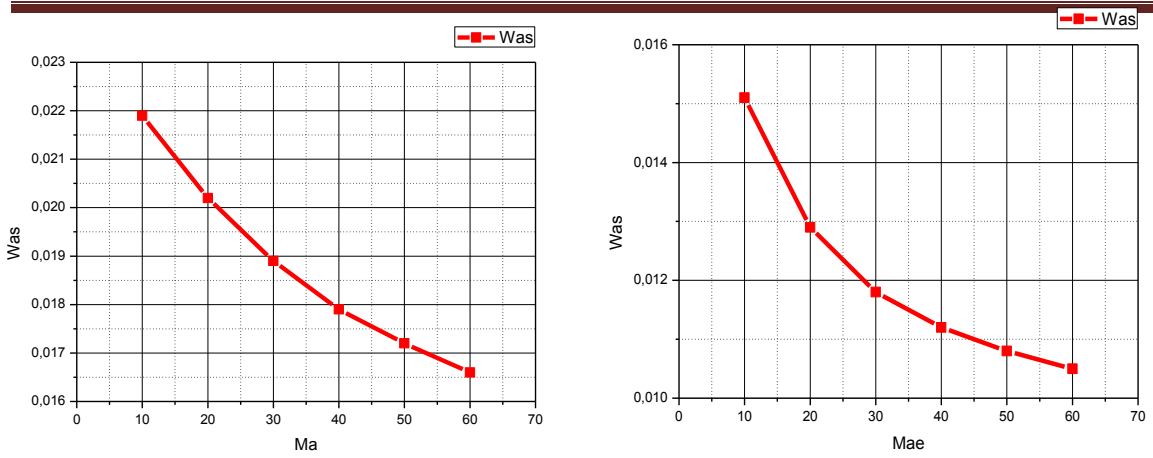


Figure 5.7 : Variation suivant le débit d'entrée d'air sur les températures de sortie

On peut remarquer qu'une plus grande ventilation s'accompagne d'une diminution des températures de sortie que ce soit pour l'eau à refroidir ou l'air en haut du tour.

Il est évident qu'une vitesse d'air plus grande permet de répartir la charge thermique vers des équilibres moins chauds. Cette variation est constatée obéir à une relation linéaire.



a b

Figure 5.8a et b : Variation suivant le débit d'air d'entrée sur l'humidité de l'air de sortie, (a)TR fermée, (b)TR ouverte

Dans la figure 5.8 a et b on observe une chute très brutale de l'humidité absolue de l'air, ce qui signifie que les grandes quantités d'air diluent les quantités de vapeur entraînées.

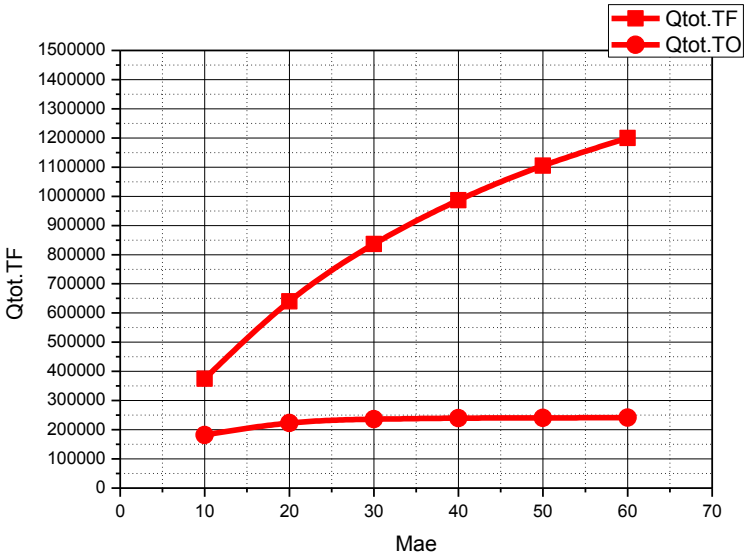


Figure 5.9:Variation suivant le débit d'entrée d'air sur le taux d'échange de chaleur

L'échange total de chaleur est d'un niveau important suivant les variations de débit d'air pour la tour fermée, contrairement à la tour ouverte ces variations n'ont presque aucune influence sur l'échange de chaleur.

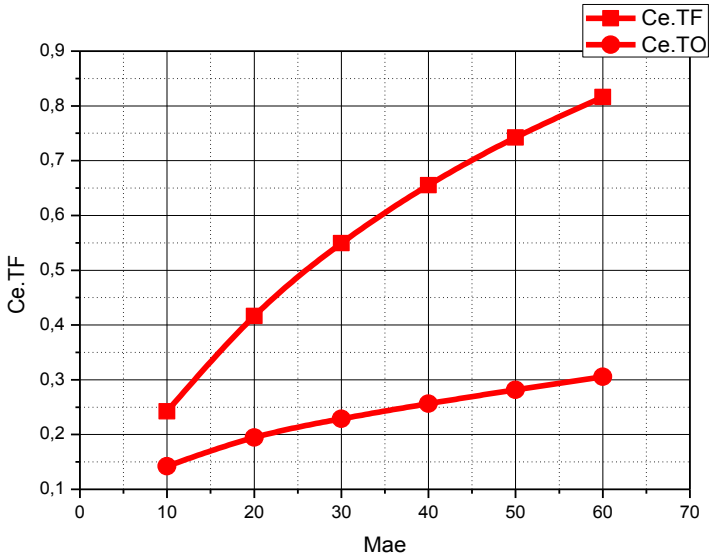


Figure 5.10:Variation suivant le débit d'entrée d'air sur la consommation d'eau

La consommation d'eau augmente avec l'augmentation de débit d'air et ceci de manière importante pour la tour fermée.

5.9. Variations suivant l'humidité de l'air à l'entrée

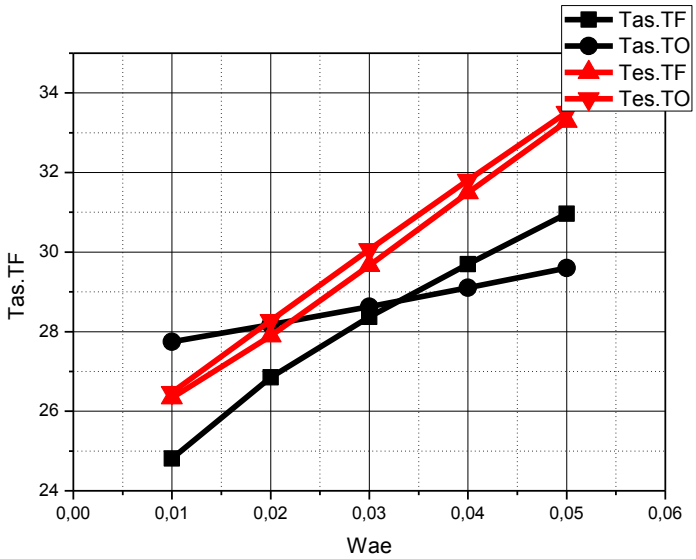


Figure 5.11 : Variation suivant l'humidité d'entrée d'air sur les températures de sortie

Plus l'air est humide à l'entrée, plus les températures de l'eau à refroidir et de l'air à la sortie sont plus grandes, L'air est déjà saturé en vapeur d'eau et ne pouvant prendre plus ou à défaut une quantité moindre. Figure 5. 11

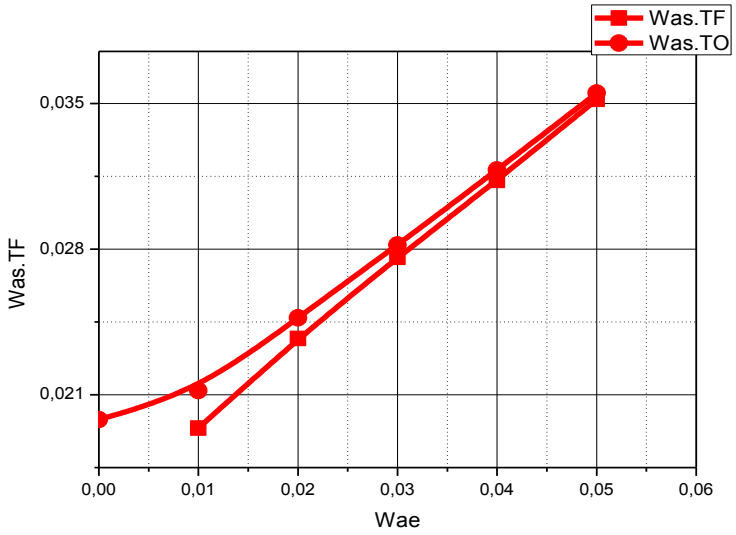


Figure 5.12:Variation suivant l'humidité d'entrée d'air sur l'humidité de sortie

Il y a d'abord une représentation évolutive de l'humidité de l'air à la sortie, quand les niveaux de l'humidité de l'air à l'entrée sont faibles. Ceci traduit un passage de la vapeur d'eau du film vers l'air ascendant, On observe un phénomène inverse à partir d'une humidité de l'air à l'entrée autour de 0.025, figure 5,12.

5.10. Variations suivant le débit d'eau à l'entrée

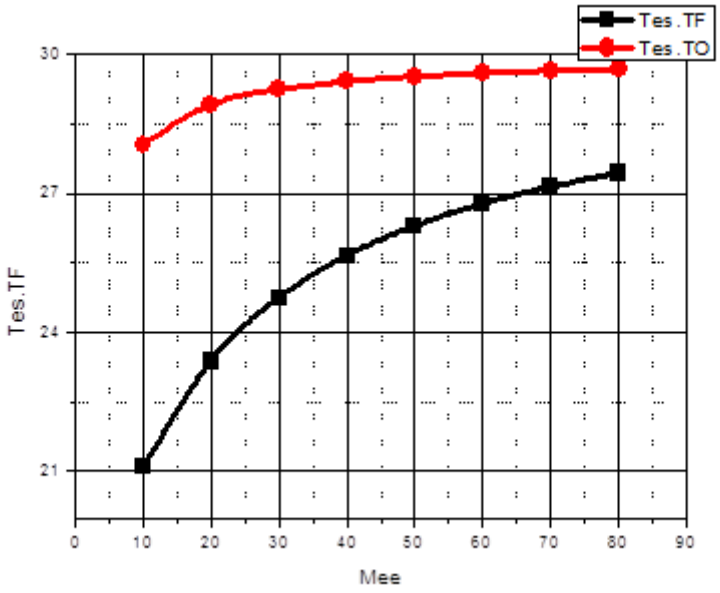


Figure 5.13:Variation suivant le débit d'entrée d'eau sur la température d'eau de sortie

Les variations de la température de sortie de l'eau en fonction du débit d'eau à l'entrée est reportée dans la figure 5.13

On remarque que la température d'eau augmente fortement et de maniére linéaire avec l'augmentation de débit d'eau à l'entrée et ceci pour la tour fermée.

Contrairement a la tour ouverte on remarque une légere augmentation de la température d'eau pour des faibles valeurs de débit d'eau a 20kg/s. Au-delà on remarque qu'il n y a presque aucune influence de débit d'eau sur la température de l'eau à la sortie.

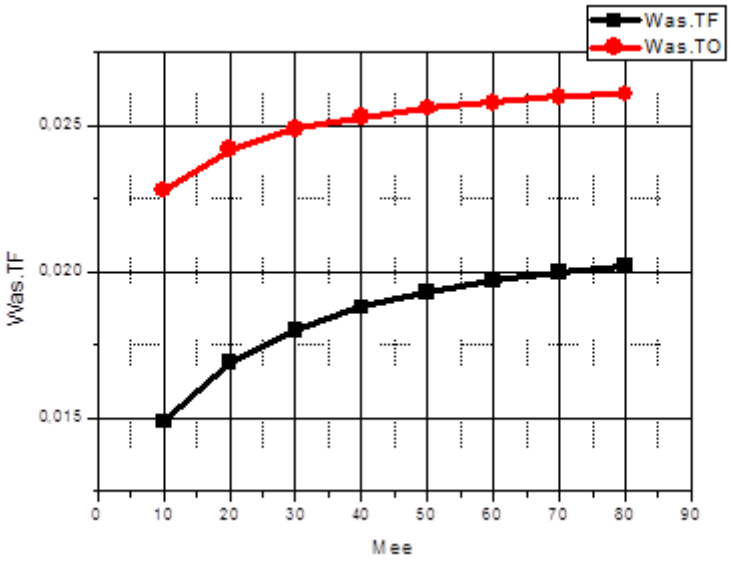


Figure 5.14:Variation suivant le débit d'entrée d'eau sur l'humidité d'air de sortie

Quant à l'humidité absolue de l'air en sortie, on constate physiquement que cet air est plus chargé en vapeur si les débits d'eau sont importants.

En conséquence on peut déduire:

Une tour de refroidissement à circuit ouvert est un échangeur de chaleur qui permet de refroidir de l'eau en contact direct avec de l'air. Le transfert de chaleur s'effectue partiellement par l'échange de chaleur entre l'air et l'eau, mais surtout par l'évaporation d'une petite quantité de l'eau à refroidir.

De cette façon, on peut atteindre des températures de refroidissement inférieures à celles de l'air ambiant.

Si l'eau à refroidir ne peut pas entrer en contact avec l'air (par exemple dans l'industrie alimentaire), il est nécessaire d'utiliser un échangeur de chaleur.

Cet échangeur de chaleur sépare l'eau à refroidir de l'eau évaporée dans la tour. Ainsi l'eau du process à refroidir n'entre pas en contact avec l'air dans le but de limiter les développements de bactéries type légionelles.

La tour ouverte refroidissant sans intermédiaire est de fait le système le plus efficace et le plus compact. La tour fermée devra être plus imposante pour assurer des performances identiques à travers l'échangeur de séparation.

Néanmoins, d'autres considérations doivent être prises en compte :

1/les investissements au début

2/la fréquence de maintenance

3/ les quantités consommées d'eau qui peuvent ne pas être disponibles

4/ l'entartrage des packing et des serpentins.

5/ la localité et l'impact de l'air humide sur l'environnement proche de cette localité

6/Il y a évident tributaire de domaine d'utilisation… industrielle, alimentaire…. etc.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce projet, nous avons examiné les tours de refroidissement utilisées dans de nombreuses applications industrielles et particulièrement dans les centrales nucléaires. L'importance de cet équipement a été mise en évidence, notamment au niveau du refroidissement complémentaire de l'eau issue du condenseur.

Plusieurs systèmes du refroidissement par tours ont été décrits. Notre cas s'inscrit dans l'analyse des performances des tours fermées et ouvertes.
Nous avons élucidé le rôle fondamental de l'air humide qui est à la base du système évaporatif, menant à des charges dissipatives de chaleur très importantes.

La modélisation simplifiée nous a montrée les principaux indicateurs gouvernants les tours. Ensuite une modélisation plus avancée a été traduite en termes de programme qui nous a permis de suivre les évolutions des facteurs de fonctionnement.

Ce projet nous a permis principalement de :

- Se familiariser avec les tours de refroidissement fermées et ouvertes.
- Comprendre la modélisation simple et élaborée.
- Traduire les équations en langage Matlab.
- Poursuivre une étude paramétrique thermique pour la comparaison des performances.

L'étude des tours de refroidissement nous a montré que des variations substantielles sont à relever :
Une tour de refroidissement à circuit ouvert est un échangeur de chaleur qui permet de refroidir de l'eau en contact direct avec de l'air. Le transfert de chaleur s'effectue partiellement par l'échange de chaleur entre l'air et l'eau, mais surtout par l'évaporation d'une petite quantité de l'eau à refroidir.

De cette façon, on peut atteindre des températures de refroidissement inférieures à celles de l'air ambiant.

Si l'eau à refroidir ne peut pas entrer en contact avec l'air (par exemple dans l'industrie alimentaire), il est nécessaire d'utiliser un échangeur de chaleur.

Cet échangeur de chaleur sépare l'eau à refroidir de l'eau évaporée dans la tour. Ainsi l'eau du process à refroidir n'entre pas en contact avec l'air dans le but de limiter les développements de bactéries type légionelles.

La tour ouverte refroidissant sans intermédiaire est de fait le système le plus efficace et le plus compact. La tour fermée devra être plus imposante pour assurer des performances identiques à travers l'échangeur de séparation.
Neomoins, d'autres considerations doivent etre prises en compte :

1/ les investissements au debut.
2/ la frequence de maintenance.
3/ les quantites consommees d'eau qui peuvent ne pas être disponibles.
4/ l'entartrage des paking et des serpentins.

5/ la localite et l'impact de l'air humide sur l'environnement proche de cette localite.
6/ Il ya evident tributaire de domaine d'utilisation...industrielle, alimentaire…. ect

Bibliographie

[1] https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_nucl%C3%A9aire

[2] https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/Les-centrales-nucleaires/reacteurs-nucleaires-France/Pages/3-reacteurs-nucleaires-France-Description-detaillee.aspx?dId=82471a77-677a-40cf-8010-5c30f29507df&dwId=231c8e52-c3bd-4187-990e-01a6e97b5418#.ZA6OmC5KjMw

[3] https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/Les-centrales-nucleaires/reacteurs-nucleaires-France/Pages/2-reacteurs-nucleaires-France-Presentation-reacteur.aspx#.ZA6SmS5KjMy

[4] https://fr.linkedin.com/pulse/le-circuit-secondaire-dun-cnpe-jean-françois-noal?trk=pulse-article

[5] https://www.goodmecano.com/guide-conducteur/refroidissement-et-climatisation/comment-fonctionne-le-circuit-de-refroidissement-d-une-voiture

[6] https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-fonctionnement-d-une-centrale-nucleaire

[7] https://www.google.com/search?q=1.5.+Le+rendement+d%E2%80%99une+centrale+nucl%C3%A9aire&oq=1.5.+Le+rendement+d%E2%80%99une+centrale+nucl%C3%A9aire&aqs=chrome..69i57j33l4.2056j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8

[8] https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/la-securite-autour-des-centrales-nucleaires

[9] www.xpair.com/lexique/definition/aerorefrigerant.htm

[10] https://www.bing.com/search?q=Les+proc%C3%A9d%C3%A9s+de+a%C3%A9ror%C3%A9frig%C3%A9rant&src=IE-TopResult&FORM=IETR02&conversationid=&pc=EUPP

[11]https://energieplus-lesite.be/techniques/climatisation8/composants-installation-frigorifique/condenseurs-et-tours-de-refroidissement/

[12]https://www.dalkiafroidsolutions.com/le-principe-de-fonctionnement-de-la-tour-aerorefrigerante

[13]https://www.dalkiafroidsolutions.com/le-principe-de-fonctionnement-de-la-tour-aerorefrigerante

[14]https://www.bing.com/search?q=type+des+a%C3%A9ror%C3%A9frig%C3%A9raintes&src=IE-TopResult&FORM=IETR02&conversationid=&pc=EUPP_

[15] https://hvac-france.fr/domaines-intervention/tour-aerorefrigerante

[16] https://fr.wikipedia.org/wiki/Hygrom%C3%A9trie

[17] https://tmsec.pagesperso-orange.fr/Clim2-GrandeursAH.pdf

[18] https://tech-alim.univ-lille.fr/sechage/co/Chapitre1_3.html

[19] Rafraîchisseur par évaporation écologique, diffuseurs et accessoires, document en lignepp.1-54, (2012).

[20] Djamel Benaoune, **«** Etude expérimentale du rafraichissement de l'air par évaporation d'eau **»,** mémoire de magistère, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie (2012)

[21] LP Galilée, « Cours de Climatisation L'AIR HUMIDE », BTS FEE 1ère Année.

[22] https://www.thermique55.com/principal/airhumide.pdf

[23] J.GOSSE, livre « guide technique ». Dunod, Paris 1981.

[24] ASHARAE, Handbook, cooling tower, chapitre 36,1999

[25] G.RIGOT, transmission et échangeurs de chaleur, les éditions parisiennes, 1990

[26] http://www.lenntech.com/tour

[27] D.MARCHIO, P.STABAT, Programme de calcul TAF, T_ENSTAT, Ecole des mines de Paris ,2001

[28] ASHRAE Handbook 1999, "Cooling Tower", chapter 36