République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l`Enseignement Supérieur et la Recherche scientifique
Université de Dr YAHIA FARES- Médéa
Faculté des sciences 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 Aéroréfrigérante Humide OUVERTE

Réalisé par :

- ***TOUMI Sarra***
- ***RAHMOUNI Imane***

Encadré par :

DR.BOUAZIZ .A.M

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

Enfin me voilà rédigeant mes remerciements ! Quelle longue mais belle aventure. Une thèse, en deux mots, est un parcours plein de surprises. C'est toute une histoire qui ne se limite point à son côté scientifique.

C'est aussi aventures, rencontres, amitiés. Je remercier le premier lieu Allah le tout puissant pour m'avoir donné la force et la volonté d'accomplir ce travail, ainsi que ma famille, et mes amies et tous les collègues qui m'ont aidé durant toute la période de mes études.

J'adresse mes sincères remerciements à Madame Bouaziz Amina pour son encadrement, sa contribution, sa patience et son aide tout au long de ce travail. Finalement je tiens à remercier chaleureusement tous les enseignants du Département de génie mécanique, et tous qui ont participé de près ou de loin pour accomplir ce travail.

DÉDICACE

Je dédie ce travail à :

A mon cher père Laid,

A ma chère mère Fatima,

C'est grâce à votre amour, votre immense affection, vos encouragements, la confiance que vous m'avez accordée ainsi que vos innombrables sacrifices que j'arrive aujourd'hui au terme de ce travail.

Je dédie ce travail à mes frères Khaled que Dieu lui fasse miséricorde,et Ibrahim, Ishak.

Et mes sœurs Dalila,Hayatet leurs enfants Rania, Adem, et mes tantes Fatiha ,Fatima et masouda

Je dédie ce travail à Toutes mes amies Soumia ,Chahinez,Khaoula,Imane et collègues.

SARRA

DÉDICACE

Je dédie ce travail à :

MES PARENTSHada et Bouelem

Mon Mari Hicham

Mes frères Amer ,Hakim ,Karim et Ma sœur Naima

Toutes mes amies Fatiha, Sarra et Lamia,Soumia et Mes collègues

A tous les étudiants de Génie Climatique 2021/2022

Tous ceux qui me sont chers.

IMANE

Sommaire

DÉDICACE SARRA …………………………………………………………………………………… .. I

DÉDICACE IMANE………………………………………………………………………………. II

REMERCIEMENTS………………………………………………………………………………… III

SOMMAIRE……………………………………………………………………………………… IV

LISTE DES FIGURES ……………………………………………………………………………. . IV

NOMENCLATURE……………………………………………………………………………… IV

RÉSUMÉ………………………………………………………………………………………. IV

ABSTRACT……………………………………………………………………………………... IV

ملخص…………………………………………………………………………………………. IV

INTRODUCTION GENERALE………………………………………………………………….. 1

CHAPITRE 01 : GÉNÉRALITÉ SUR LES CENTRALES NUCLÉARES

1.1. Introduction………………………………………………………………………………. 3

1.2. Histoire……………………………………………………………………………………… 4

1.3. Description……………………………………………………………………………….. 4

1.3.1. Le bâtiment réacteur…………………………………………………………………... 4

1.3.2. Le bâtiment combustible……………………………………………………………... 5

1.3.3. Le bâtiment salle des machines ……………………………………………………... 6

1.3.4. Une station de pompage………………………………………………………........ 6

1.4. Fonctionnement…………………………………………………………………………. 8

1.4.1. Circuit primaire……………………………………………………………………… 8

1.4.2. Circuit secondaire……………………………………………………………………... 8

1.4.3. Circuit de refroidissement……………………………………………………….. 8

1.5. Rendement d'une centrale nucléaire……………………………………………………. 9

1.6. Le nucléaire et l'environnement…….. 10

1.6.1. Les rejets radioactifs……. 10

1.6.2. Les rejets thermiques…… 10

1.6.3. Les rejets chimiques……...….. 10

1.6.4. Déchet……...… 10

1.7. Impacts de l'accident nucléaire……. 11

1.7.1. La radioactivité de l'air…….. 11

1.7.2. Les dépôts radioactifs…… 11

1.7.3. Les denrées contaminées……... 11

1.7.4. L'impact sur le milieu marin……. 11

1.8. La sécurité autour des centrales nucléaires…….. 12

1.9. Conclusion…… 13

CHAPITRE 02: LES TOURS DE REFROIDISSEMENTS, TOURS ET SYSTÈMES

2.1 Introduction**……**……. 15
2.2. Historique d'un tour de refroidissement……. 15
2.3. Le rôle de tour de refroidissement…….. 16
2.4. Les procédés de refroidissement…… 17
2.4.1. Air sec…… 17
2.4.1.1. Principe de fonctionnement…… 17
2.4.1.2. Description et illustration des composants…….... 18
2.4.1.3. Principaux avantages (par rapport à une tour ouverte)……. 18
2.4.1.4. Principaux inconvénients (par rapport à une tour ouverte)…….... 19
2.4.2. Air évaporatif……...……. 19
2.4.2.1. Principe de fonctionnement……... 20
2.4.2.2. Description et illustration des composants……. 20
2.4.2.3. Principaux avantages (par rapport à une tour ouverte)……. 21
2.4.2.4. Principaux inconvénients (par rapport à une tour ouverte)……...…… 21
2.4.3. A air……... 21
2.4.3.1. Principe de fonctionnement…….. 22
2.4.3.2. Description des composants…….. 22
2.4.3.3. Principaux avantages (par rapport à une tour ouverte)……..... 23

2.4.3.4. Principaux inconvénients (par rapport à une tour ouverte)…….. 23
2.5. Les différents types des tours de refroidissement……. 23
2.5.1. Tour de refroidissement à circuit ouvert…… 23
2.5.2.Tour de refroidissement à circuit fermé……..…… 25
2.5.3. Condenseurs évaporatifs……. 27
2.5.4. Tour de refroidissement à circuit fermés hybride……... 28
2.6. Les principaux composants d'un tour de refroidissement……. 30
2.6.1. Les composants d'un tour de refroidissement ouvert……. 30

2.6.1.1 Le corps d'échange ou packing……..…….. 30

2.6.1.2. Le pare-gouttelettes…….…… 31
2.6.1.3 Les rampes de dispersion (rampes de pulvérisation)……... 32
2.6.1.4. Le bassin de rétention……. 33
2.6.1.5. Les ventilateurs……... 33
2.6.1.6. L'échangeur intermédiaire……... 34
2.6.1.7. La pompe de circulation additionnelle…….…… 34

2.6.2. Les composants d'un tour de refroidissement fermé…… 34

2.7. Principe de fonctionnement d'une tour de refroidissement…….. 35
2.7.1. Principe de fonctionnement d'une tour de refroidissement ouvert……. 35
2.7.2. Principe de fonctionnement d'un tour de refroidissement fermé…….. 39
2.8. Les modes de transfert……. 40
2.8.1. Conduction……...…… 41
2.8.2. Convection……. 42
2.9. Conclusion…… 42

CHAPITRE 03: L'AIR HUMIDE

3.1. Introduction…….. 44
3.2. Propriétés et grandeurs de l'air humide……... 44
3.2.1. Température sèche en °C……... 55
3.2.2. Température humide en °C…… 55
3.2.3. Température adiabatique de saturation…… 55
3.2.4. Température de rosée en °C…….. 55
3.2.5. Humidité spécifique ou humidité absolue ou teneur en vapeur……..… 55
3.2.6. Humidité relative……... 46
3.2.7. Volume spécifique en $\mathbf{m}^3$/kg d'air…….……. 46
3.2.8. Masse volumique en kg/$\mathbf{m}^3$ d'air humide……. 47
3.2.9. Chaleur sensible et chaleur latente…… 47
3.2.10. Enthalpie…….. 47
3.3. Diagramme de l'air humide…….. 47

3.3.1. But…….. 47

3.3.2. Utilisation du diagramme…….. 47

3.4. Mesure de l'humidité…….. 48

3.4.1. Hygromètre et psychromètre……..…… 48

3.4.1.1. Hygromètre à cheveu……..……. 48

3.4.1.2. Hygromètre à cellule hygroscopique……. 49

3.4.1.3. Hygromètre à variation de capacité……... 49

3.4.2. Psychromètre…… 50

3.4.3. Diagramme de l'air humide……. 51

3.5. Conclusion…….. 51

CHAPITRE 4 : MODÈLE SIMPLE DU TRANSFERT ÉVAPORATIF DANS UNE TOUR

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

4.2. Equations générales des tours de refroidissement……. 53

4.2.1. Bilan thermique d'une tour…….…… 53

4.2.2. Equations théoriques……..……. 54

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 5 : TOUR AÉRORÉFRIGÉRANTE HUMIDE OUVERTE

5.1. Domaine technologique……..... 64

5.2. Description générale……..... 65

5.3. Nomenclature……. 65

5.4. Description mathématique……... 66

5.4.1. Caractérisation dela tour……... 66
5.4.2.Calcul des performances de la tour…… 67
5.4.3. Calcul de la consommation d'eau de la tour…….. 70
5.5. Algorithmes…….. 71
5.5.1. PREP_TAO…… 71
5.5.2. TAO……... 71
5.6. Résultats et discussion…… 72
5.6.1. Variations suivant le débit d'eau à refroidir…….…….. 72
5.6.2. Variations suivant le débit d'air……...……. 74
5.6.3. Variations suivant la température d'entrée d'eau……...…….. 76
5.6.4. Variations suivant la température d'entrée d'air…….….. 77
5.6.5. Variations suivant l'humidité de l'air à l'entrée……...… 79
5.6.6. Variations suivant le nombre de cycle……...….... 80

CONCLUSION GENERALE…… 82
Bibliographie…….. 84

Liste des figures

Figure1.1: Schéma d'une centrale électrique nucléaire …… 3

Figure 1.2 : photo sur le bâtiment réacteur……... 5

Figure 1 .3 : photo sur le bâtiment combustible……. 5

Figure 1.4 : photo sur le bâtiment salles des machines……. 6

Figure 1.5 : photo sur une station de pompage……. 7

Figure 1.6 : les composants d'une centrale nucléaire……... 7

Figure 1.7 : schéma fonctionnement d'une centrale nucléaire…… 9

Figure 1.8: schéma représenté d'un rendement de l'électricité thermique……. 9

Figure 1.9 : accident nucléaire de Fukushima…… 11

Figure 1.10 : 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…… 12

Figure 2.1 : photo réelle de tour de refroidissement……. 15

Figure 2.2 : Schéma de principe d'un aéroréfrigérant sec Principe de fonctionnement... 17

Figure 2.3: Illustration d'une batterie à ailettes……... 18
Figure 2.4 : Schéma de l'installation et sa relation avec le procédé à refroidir……... 19
Figure 2.5 : Illustration d'un refroidisseur de liquide à condensation par air……... 20
Figure 2.6 : Illustration d'un évaporateur à plaques muni de son kit hydraulique pour alimentation et retour du fluide à refroidir…… 21
Figure 2.7 : Schéma de principe d'une installation de refroidissement utilisant la nappe phréatique……... 22
Figure 2.8 : un tour ouvert…… 24
Figure 2.9 : les composants de tours de refroidissements ouverts……... 25
Figure 2.10: Tour à circuit fermé……. 25
Figure 2.11: tour fermé……. 26
Figure 2.12 : un condenseur évaporatif…… 27
Figure 2.13 : Tour hybride fermés…… 28
Figure 2.14: un tour de refroidissement hybride ouvert…….. 29

Figure 2.15 : les principaux composants d'un tour de refroidissement…….. 30

Figure 2.16 : Corps d'échange avec Canaux verticaux…….. 31

Figure 2.17 : Corps d'échangede type gouttes……. 31

Figures 2.18 : Exemples de pare-gouttelettes…… 32

Figure 2.19 : Système de dispersion du fluide à refroidir…….. 32

Figure 2.20 : Exemples de bassin de rétention avec point de vidange…….. 33

Figure 2.21 : ventilateurs centrifuge et axial……. 34

Figure 2.22 : Exemple d'un échangeur tubulaire intégré dans un tour de refroidissement fermé…… 35

Figure 2.23 : principe d'une installation de refroidissement avec un tour ouvert où l'eau dispersée provient directement du circuit à refroidir…….. 36

Figure 2.24 **:** principe d'une installation de refroidissement avec un tour ouvert et un échangeur intermédiaire distant……. 36

Figure 2.25 : principe de fonctionnement d'un tour de refroidissement ouvert…… 37

Figure 2.26 : le circuit d'eau dans un tour de refroidissement ouvert……... 38

Figure 2.27: Principe de fonctionnement d'un tour de refroidissement fermé…….. 39

Figure 2.28 : le circuit d'eau dans une tour de refroidissement fermée……. 40

Figure 2.29 : transfert de chaleur par conduction…….. 41

Figure 3.1 : Diagramme de l'air humide…… 48

Figure 3.2 :l'air humide……. 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: tour de refroidissement ouverte…….. 64

Figure 5.1 : Etats en entrée et en sortie de l'air et l'eau sur un diagramme de l'air humide 65

Figure 5.2 : évolution des températures en fonction de débit d'eau entrée…… 72

Figure 5.3évolution des humidités de l'air à la sortie en fonction de débit d'eaux àl'entré ……... 73

Figure 5.4évolution des puissances en fonction de débit d'eau àl'entré…… 73

Figure 5.5évolution des températures en fonction de débit d'air à l'entré…… 74

Figure 5.6évolution dès l'humiditéde l'air à la sortie en fonction de débit d'air à l'entré ……. 75

Figure 5.7 évolution des puissances en fonction de débit d'air à l'entré…… 75
Figure 5.8 évolution des températures en fonction de la température d'entrée d'eau……. 76
Figure 5.9 évolution dès l'humidité de l'air à la sortie en fonction de la température d'entrée d'eau…… 76
Figure 5.10 évolution des consommations et les puissances en fonction de la température d'entrée d'eau…… 77
Figure 5.11 évolution des températures en fonction de la température d'entrée d'air 77
Figure 5.12 évolution dès l'humidité de l'air à la sortieen fonction de la température d'entée d'air**……** 78
Figure 5.13 évolution des consommations et les puissances totales en fonction de la température d'entée d'air…… 78
Figure 5.14 évolution des températures en fonction l'humidité de l'air à la sortie…… 79
Figure 5.15 évolution de l'humidité de l'air à la sortie en fonction de l'humidité de l'air à l'entrée…… 79
Figure 5.16 évolution des puissances totales en fonction de l'humidité de l'air à la sortie …… 80
Figure 5.17 évolution des puissances totales en fonction du nombre de cycle…… 80
Figure 5.18 évolution des températures fonction du nombre de cycle…… 81

Nomenclature

Symbol	Désignation	Unité
T_r	Température de rosé	°C
P_v	La pression partielle de la vapeur d'eau	K Pa
P_s	La pression de la vapeur saturante qui correspond à l'état de saturation	K Pa
X	Humidité absolue	%
m_v	La masse de vapeur d'eau	Kg
m_a	La masse de vapeur d'air sec Kg	Kg Pa
P_a	La pression de l'air sec	K Pa
R_v	Constante caractéristique de l'eau	J/Kg K
R_a	Constante des gaz parfaits	J/Kg K
T	Température de l'air au voisinage du panneau humide	°C
Q	Humidité relative	%
P_vs	La pression de saturation à la température bulbe sec	K Pa
H	L'enthalpie de l'air humide	J/kg
C_P	Chaleur massique de l'air	J/Kg K
h_{1v}	L'enthalpie spécifique de la vapeur d'eau	J/kg
a	Rapport S_e/V_0	m^{-1}
C_{pw}^{v}	Chaleur spécifique de l'eau	$Kcal.Kg^{-1}.°C^{-1}$
C_{pa}	Chaleur spécifique de l'air humide	$Kcal.Kg^{-1}.°C^{-1}$
C_{pv}	Chaleur spécifique de l'air sec	$Kcal.Kg^{-1}.°C^{-1}$
h	Hauteur de l'empilage	m
H	Hauteur totale de l'empilage	m
h_{w0}	Coefficient globale de transfert massique de l'eau	$Kg.m^{-2}$
i	Enthalpie de l'air humide	$Kcal.Kg^{-1}$

i_1	Enthalpie de l'air humide entrant dans la tour	Kcal.Kg^{-1}
i_2	Enthalpie de l'air humide sortant dans la tour	Kcal.Kg^{-1}
i_{sf}	Enthalpie de l'air au contact de surface de séparation air/eau	Kcal.Kg^{-1}
i_{stw}	Enthalpie de l'air saturé a la température de l'eau	Kcal.h^{-1}
i_{2stw}	Enthalpie de l'air saturé a la température de l'eau d'entrée de l'eau dans la tour	Kcal.Kg^{-1}
K_w	Coefficient de transfert thermique dans le film d'eau	Kcal.h^{-1}.m^{-2}.°C^{-1}
K_a	Coefficient de transfert thermique d'air	Kcal.h^{-1}.m^{-2}.°C^{-1}
L_v	Chaleur latente de vaporisation d'eau	Kcal.Kg^{-1}
$\dot{m}_w$	Débit massique de l'eau à refroidir	Kcal.h^{-1}
$\dot{m}_{w1}$	Débit massique de l'eau entrant dans la tour	Kcal.h^{-1}
$\dot{m}_{w2}$	Débit massique de l'eau sortant de la tour (après la surface de refroidissement)	Kcal.h^{-1}
$\Delta\dot{m}_{w1}^2$	Débit massique de l'eau évaporée entre le sommet et la base de la tour	Kcal.h^{-1}
$\dot{m}_a$	Débit massique de l'air (constant)	Kcal.h^{-1}
NMe_0	Nombre sans dimension de MERKEL	-
S_0	Section de passage brute de l'air	m^2
S_e	Surface d'échange thermique et massique	m^2
T	Température variable de l'air humide	°C
T_1	Température de l'air entrant par le bas de la tour	°C
T_2	Température de l'air sortant par le haut de la tour	°C
T_w	Température de l'eau	°C
T_{w1}	Température de l'eau entrant dans la tour	°C
T_{w2}	Température de l'eau sortant de la tour	°C
ΔT_w	Ecart de température entre l'eau entrant et sortant	°C
T_{h1}	Température de l'air entrant par le bas de la tour (bulbe humide)	°C
T_{ap}	Température de l'eau d'appoint	°C
T_{st}	Température de la surface de séparation air/eau	°C
V_0	Volume de l'empilage formant la surface de ruissèlement	m^3
V_{ma}	Vitesse massique d'air	Kg.h^{-1}.m^{-2}
w	Humidité absolu de l'air	Kg/Kg
w_1	Humidité absolu de l'air entrant de la tour	Kg/Kg

w_2	Humidité absolu de l'air sortant de la tour	Kg/Kg
w_{sf}	Humidité absolu de l'air au contact de la surface de séparation air/eau	Kg/Kg
tanØ	Angle formée par la droite de fonctionnement et l'axe des températures	

INDICE

1	Conditions d'entrée de l'eau ou de l'air dans une tour
2	Conditions sortie de l'eau ou de l'air dans une tour
A	air
Sf	Surface de contact eau/air
W	eau

Résumé

Une tour aéroréfrigérante humide et ouverte fait office d'échangeur direct air-eau. Elle est généralement composée d'une rampe de distribution d'eau qui permet d'asperger l'eau sur un "packing", c'est à dire un ensemble de feuilles obtenues par collage permettant d'augmenter les échanges air-eau. L'eau tombe ensuite dans un réservoir tandis que l'air circule à contre-courant. L'eau se trouve refroidie par l'air.

Sa température en sortie de tour tend vers la température humide de l'air. Quant à l'air, il est humidifié et sa température est généralement augmentée. Le travail présenté dans cette thèse s'intéresse à modéliser de façon simplifiée le fonctionnement d'une telle tour aéroréfrigérante humide à contre-courant ou à courants croisés à partir d'un point de fonctionnement donné. Une simulation numérique de l'effet des paramètres pertinents sur les outputs permettra le choix des imputes pour contrôle.

Mots clés : Refroidissement, tour ouverte, contre-courant, croisée, simulation

Abstract

A wet and open cooling tower acts as a direct air-water exchanger. It is generally composed of a water distribution ramp which allows the water to be sprayed on a "packing", ie a set of sheets obtained by gluing to increase air-water exchanges. The water then falls into a reservoir while the air circulates against the current.

The water is cooled by the air. Its temperature at the outlet of the tower tends towards the wet bulb temperature of the air. As for the air, it is humidified and its temperature is usually increased. The work presented in this thesis focuses on modeling in a simplified way the operation of such a counter-current or cross-current wet cooling tower from a given operating point. A numerical simulation of the effect of the relevant parameters on the outputs will allow the choice of inputs for control .

Keywords: Cooling, open tower, countercurrent, crossover, simulation

ملخص

يعمل برج التبريد الرطب والمفتوح كمبادل مباشر للماء والهواء. وتتكون بشكل عام من منحدر لتوزيع المياه يسمح برشالماء على "حشوة" ، أي مجموعة من الألواح يتم الحصول عليها عن طريق اللصق لزيادة التبادل بين الهواء والماء. ثم يسقط الماء في الخزان بينما يدور الهواء عكس التيار.

يتم تبريد الماء عن طريق الهواء. تميل درجة حرارته عند مخرج البرج نحو درجة حرارة الهواء المبلل. أما الهواء فهو رطب وعادة ما ترتفع درجة حرارته. يركز العمل المقدم في هذه الأطروحة على النمذجة بطريقة مبسطة لتشغيل مثل برج التبريد الرطب بالتيار المعاكس أو التيار المتقاطع من نقطة تشغيل معينة. ستسمح المحاكاة الرقمية لتأثير المعلمات ذات الصلة على المخرجات باختيار المدخلات للتحكم.

الكلمات المفتاحية: تبريد ، برج مفتوح ، تيار معاكس ، كروس ، محاكاة.

Introduction générale

Les tours de refroidissement peuvent être considérés comme des échangeurs de chaleur utilisés pour la dissipation de larges charges thermiques vers l'atmosphère.

Elles sont des équipements très importants dans beaucoup d'applications industrielles mais popularisées par les grandes tours visuels et dominants dans les centrales nucléaires.

Lorsque l'eau est utilisée comme milieu du transfert thermique, que ce soit humide ou évaporative, les tours de refroidissement sont les plus adaptées. 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.

Bien que la classification puisse être établie selon plusieurs critères, une principale, consiste en tour humide ou sec et même hybride. Dans une tour à contact direct, l'eau chaude à refroidir est mise en contact avec l'air ambiant, soit par pulvérisation en fines gouttelettes, soit par ruissellement le long de surfaces d'écoulement. Les deux fluides étant en contact, de la chaleur est échangée par convection, et une partie de l'eau se vaporise, en augmentant ainsi l'humidité de l'air. Notre projet s'inscrit dans ce cadre et l'objectif assigné est de :

Comprendre et enregistrer le fonctionnement et le rôle d'une tour particulièrement dans une centrale nucléaire. A ce stade, 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. Nous décrirons tout cela dans le premier chapitre, en insistant sur les éléments constitutifs.

Dans le second chapitre, nous passerons en revue tous les types de tours de refroidissement et les systèmes associés. 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.

Un des fluides étant l'air, sa caractérisation ainsi que sa charge en vapeur d'eau, conséquence d'une interaction avec l'eau nécessite un troisième chapitre afin d'accéder soit par diagrammes, soit par expressions des températures de l'air humide, des valeurs d'humidités absolues ou encore des enthalpies. Ce fluide complexe qu'est l'air humide est en fait un mélange qu'il est difficile de comprendre toutes les transformations ayant lieu dans une tour sans cette connaissance de base du fluide.

Nous aborderons de manière simplifiée 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 transport thermique, pour mettre en valeur le système évaporatif. Ensuite, les équations générales ainsi que les différents bilans seront exposés 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.Une description élaborée des équations mathématiques sera aussi développée.

Nous aurons à conduire une étude paramétrique sur les principales grandeurs telles 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.

Une conclusion terminera ce mémoire avec des possibilités d'extension.

Chapitre: 1

GÉNÉRALITÉS SUR LES CENTRALES NUCLÉAIRES



1.1. Introduction

Une **centrale nucléaire** est un site industriel destiné à la production d'électricité et dont la chaudière est constituée d'un ou plusieurs réacteurs nucléaires ayant pour source d'énergie un combustible nucléaire. 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.

On compte, dans le monde, environ 250 centrales nucléaires qui ont produit 10,3 % de l'électricité mondiale en 2017. Ces centrales comptent en juillet 2020 un total de 441 réacteurs opérationnels (y compris 33 réacteurs japonais dont les deux tiers sont en attente d'autorisation de redémarrage), dont la puissance atteint 390 GW (885 MW en moyenne par réacteur) et 54 réacteurs en cours de construction. [1]

La figure 1.1 représente le schéma d'une centrale électrique, l'eau dans la cuve se réchauffe au contact de ces éléments combustibles. Cette eau, à la sortie de la cuve, cède sa chaleur à l'eau d'un second circuit, par l'intermédiaire d'un générateur de vapeur. Une fois refroidie, elle retourne dans la cuve à l'aide d'une pompe. Cette eau est chauffée à 320 °C et est maintenue à une pression de 155 atmosphères afin de rester à l'état liquide. [2]

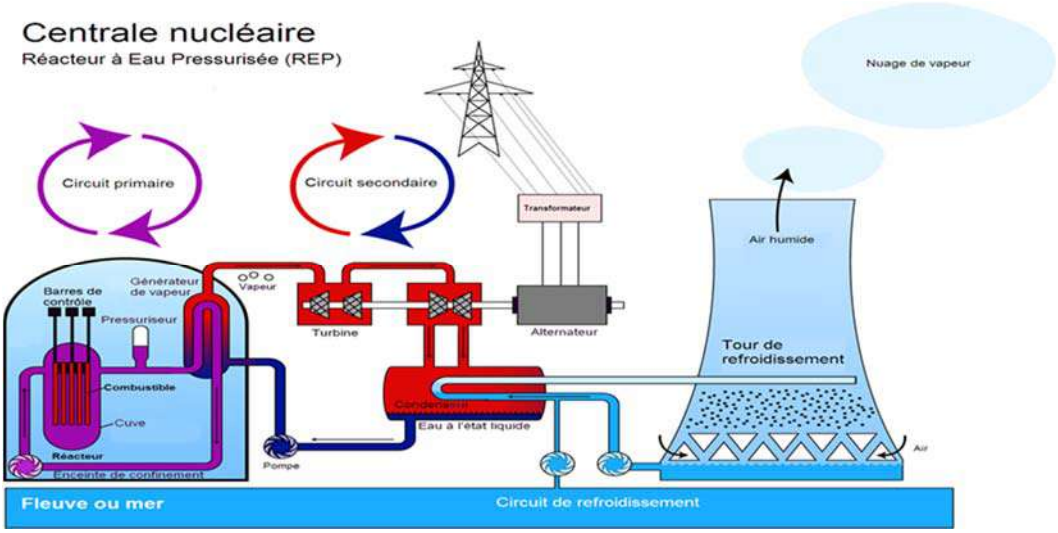


Figure 1.1 : Schéma d'une centrale électrique nucléaire

1.2. Histoire

- Dès 1951, la première centrale nucléaire entre en service aux États-Unis. Le 27 juin 1954, une centrale nucléaire civile est connectée au réseau électrique à Obninsk en Union soviétique, avec une puissance de production d'électricité de cinq mégawatts. Les centrales nucléaires suivantes furent celles de Marcoule en Provence le 7 janvier 1956, de Sella Field au Royaume-Uni, connectée au réseau en 1956, et le réacteur nucléaire de Shipping port 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.
- La puissance nucléaire mondiale a augmenté rapidement, s'élevant de plus de 1 gigawatt (GW) en 1960 jusqu'à 100 GW à la fin des années 1970, et 300 GW à la fin des années 1980. Depuis, la capacité mondiale a augmenté beaucoup plus lentement, atteignant 366 GW en 2005, en raison du programme nucléaire chinois. 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.
- 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. [1]

1.3. Description

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). En France, une tranche comprend généralement :

1.3.1. le bâtiment réacteur : généralement double enceinte étanche qui contient le réacteur nucléaire, le pressuriser qui a pour fonction de maintenir l'eau (traitée) du circuit primaire à l'état liquide, les générateurs de vapeur (trois ou quatre selon la génération), le groupe motopompe primaire servant à faire circuler le fluide caloporteur (eau), le circuit d'eau primaire, dont le rôle principal est d'assurer le transfert thermique entre le cœur du réacteur et les générateurs de vapeur, et une partie du circuit d'eau secondaire ;

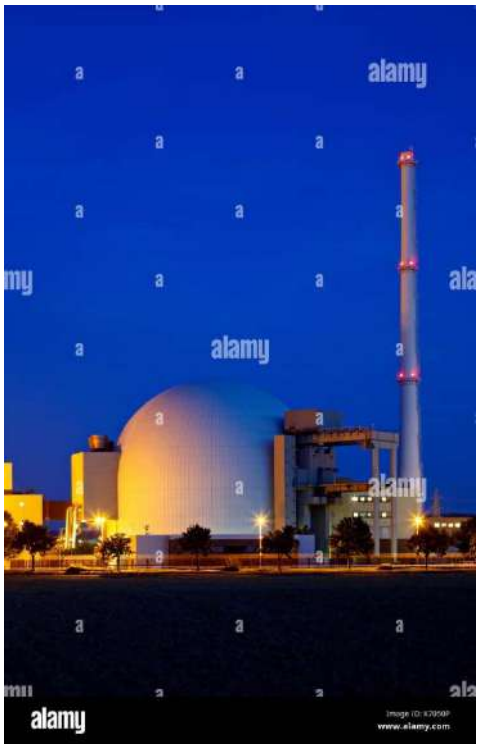


Figure 1.2 : photo sur le bâtiment réacteur

1.3.2. Le bâtiment combustible : collé au bâtiment réacteur, il sert de stockage des assemblages du combustible nucléaire avant, pendant les arrêts de tranche et pour le refroidissement du combustible déchargé (un tiers du combustible est remplacé tous les 12 à 18 mois). Le combustible est maintenu immergé dans des piscines dont l'eau sert d'écran radiologique ;



Figure 1 .3 : photo sur le bâtiment combustible

1.3.3. Le bâtiment salle des machines : qui contient principalement :

- une ligne d'arbre comprenant les différents étages de la turbine à vapeur et l'alternateur (groupe turbo-alternateur),
- le condenseur, suivi de turbopompes alimentaires (fonctionnement normal, de secours) ;
- les locaux périphériques d'exploitation (salle de commande…) ;
- des bâtiments annexes qui contiennent notamment des installations diverses de circuits auxiliaires nécessaires au fonctionnement du réacteur nucléaire et à la maintenance, les tableaux électriques alimentant tous les auxiliaires et générateurs Diesel de secours ;



Figure 1.4 : photo sur le bâtiment salles des machines

1.3.4. Une station de pompage : pour les tranches dont le refroidissement utilise l'eau de mer, de fleuve ou de rivière, et éventuellement une tour aéroréfrigérante (la partie la plus visible d'une centrale nucléaire ; hauteur de 28 m pour la CNPE de Chinon, jusqu'à 178 m pour la CNPE de Civaux).



Figure 1.5 : photo sur une station de pompage

Les autres installations de la centrale électrique comprennent :

- un ou plusieurs postes électriques permettant la connexion au réseau électrique par l'intermédiaire d'une ou plusieurs lignes à haute tension, ainsi qu'une interconnexion limitée entre tranches ;
- les bâtiments technique et administratif, un magasin général… [1]

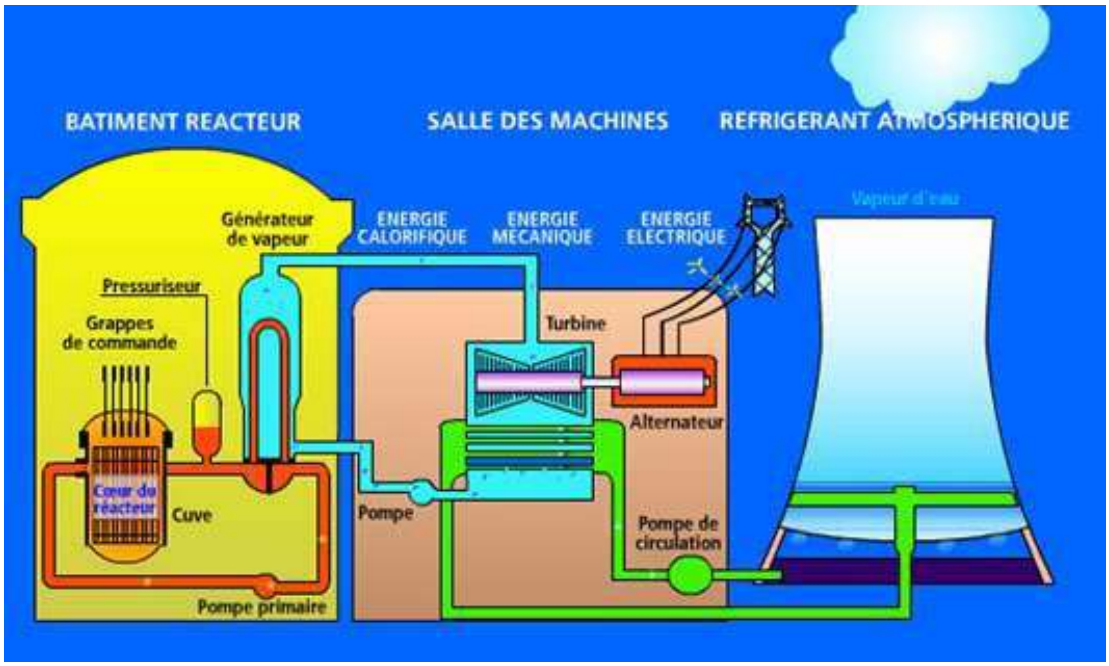


Figure 1.6 : les composants d'une centrale nucléaire

1.4. Fonctionnement

Une centrale nucléaire, utilise la chaleur dégagée par la fission des atomes pour chauffer de l'eau pressurisée et, au final, faire tourner une turbine et entrainer un alternateur qui produit de l'électricité.

Dans une centrale on trouve **3 circuits d'eau indépendants** et étanches les uns des autres.

1.4.1 Circuit primaire :

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

1.4.2. Circuit secondaire :

Le circuit primaire échange la chaleur avec un deuxième circuit fermé, appelé circuit secondaire, dans 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 de l'électricité.
Un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il soit plus facilement transporté dans les lignes à très haute tension (400 000 volts).

1.4.3. Circuit de refroidissement :

À la sortie de la turbine, la vapeur du circuit secondaire est refroidie et transformée en eau grâce à un **condenseur** dans lequel circule de l'eau froide en provenance de la mer ou d'un cours d'eau. Ce troisième circuit est appelé circuit de refroidissement. Au bord d'un cours d'eau, l'eau de ce troisième circuit peut être refroidie au contact de l'air circulant dans une **tour de refroidissement**. Une petite partie s'échappe de la tour ; il s'agit du panache de vapeur. [3]

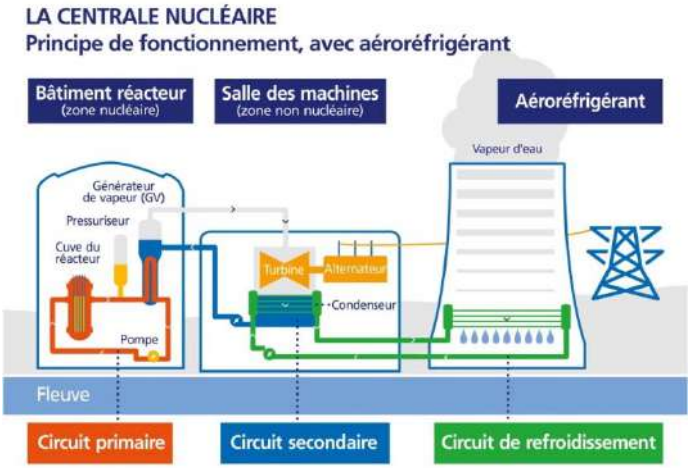


Figure 1.7: schéma fonctionnement d'une centrale nucléaire

1.5. 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. [4]

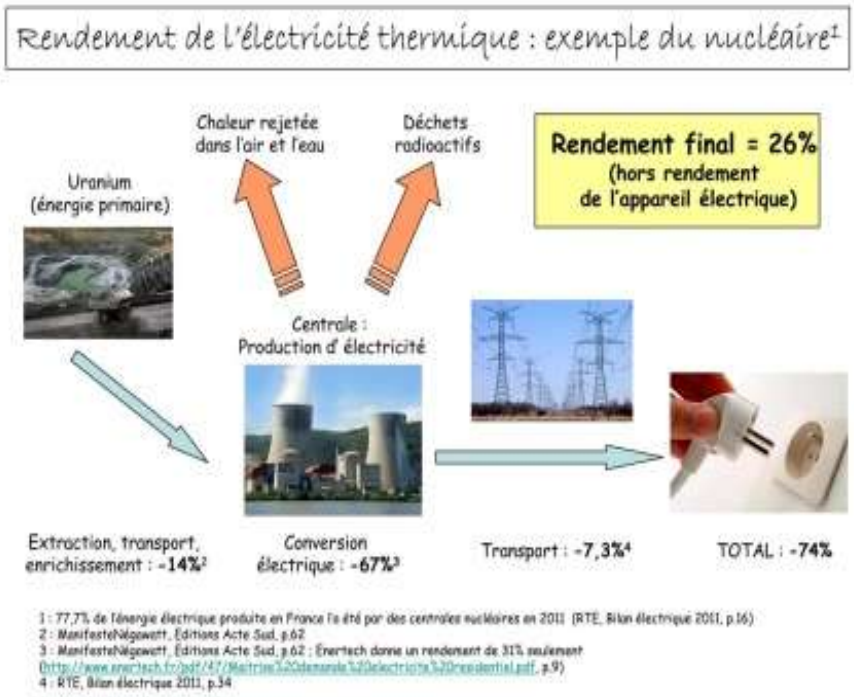


Figure 1.8: schéma représenté d'un rendement de l'électricité thermique

1.6. Le nucléaire et l'environnement

Les centrales nucléaires assurent la production d'électricité. Mais, contrairement à ce que l'on pourrait penser, le fonctionnement d'une telle centrale crée seulement **7 grammes de CO2 pour un kilowattheure produit**, contre plus de 1000 grammes par kilowattheure pour les centrales à charbon par exemple.

Aussi, les émissions en gaz à effet de serre sont limitées et ont permis d'éviter le rejet de plus de 56 gigatonnes de CO2 depuis la création de la toute première centrale nucléaire. Précisons également qu'une telle structure ne génère pas de dioxyde d'azote ou de soufre, ni de particules fines. La pollution centrale nucléaire n'est donc pas avérée et pour certains l'énergie nucléaire serait même une énergie écologique.

Toutefois, il est nécessaire de nuancer. En effet, si les centrales nucléaires n'interviennent pas dans le réchauffement climatique, ni dans la pollution de l'environnement, celles-ci génèrent cependant des rejets de diverses natures :

1.6.1. Les rejets radioactifs : ceux-ci sont générés par les circuits d'épuration et de filtration qui équipent les centrales nucléaires. Ces déchets sont triés, en fonction de leur niveau de radioactivité, puis libérés sous forme liquide ou gazeuse. Il existe des seuils réglementaires imposés aux producteurs d'électricité, qui ne doivent en aucun cas être dépassés, afin de ne pas augmenter la radioactivité naturelle de l'environnement.

1.6.2. Les rejets thermiques : une centrale nucléaire produit de la chaleur, provoquant ainsi le réchauffement du milieu aquatique environnant. Là encore, il existe un seuil de température à ne pas dépasser, afin de ne pas influer sur la faune, la biodiversité et l'écosystème aquatique concerné.

1.6.3. Les rejets chimiques : ils se trouvent dans l'eau permettant de refroidir la centrale. Celle-ci est filtrée avant d'être rejetée dans la nature. Là encore, la réglementation est stricte et les rejets sont contrôlés régulièrement, afin de limiter l'impact sur la biodiversité [5]

1.6.4. Déchet : À la sortie de la centrale, le combustible usé étant, en majorité soit à près de 95 %, constitué d'uranium appauvri ainsi que de plutonium (1 %), peut servir après retraitement à retourner en centrale sous forme d'uranium de retraitement enrichi ou de combustible ,selon le cycle du combustible du pays concerné.

- Donc les déchets radioactifs, qui proviennent de différentes étapes du cycle du combustible nucléaire ne font qu'une fraction du volume des combustibles usés, soit moins de 5 % après retraitement. Environ 10 % de ces déchets sont des éléments dé forte activité radiologique ou de longue période radioactive. La gestion de ces

- déchets est un processus complexe, en général confiée à une organisation spécifique. [6]

1. 7. Impacts de l'accident nucléaire

En effet, nous connaissons tous les évènements tragiques qui se sont déroulés à **Tchernobyl ou Fukushima.**

Des études ont été réalisées à la suite de ces accidents nucléaires, et les résultats sont inquiétants :

1.7.1. La radioactivité de l'air : à Fukushima en 2015, soit 5 ans après l'accident nucléaire, des radionucléides sont toujours présents dans l'air. Plus l'on se rapproche de la zone du réacteur, et plus leur taux augmente.

1.7.2. Les dépôts radioactifs : les chercheurs ayant réalisé les études sur place ont constaté qu'entre 2011, la date de l'accident, et 2015, les dépôts radioactifs et plus particulièrement les dépôts de césium 134 et 137 ont drastiquement diminué. La cause de cette décroissance n'est pas encore parfaitement comprise par les scientifiques, mais les arbres et plus précisément les conifères de la région ont pu participer à leur diminution.

1.7.3. Les denrées contaminées : la pollution radioactive ne s'arrête pas à la contamination de l'eau, des sols et de l'air. En effet, les denrées alimentaires consommées par les Japonais vivant à proximité de la centrale ont également été contaminées. Il s'agit principalement du gibier, de la viande d'élevage, des produits laitiers et de la production agricole. Là encore, on remarque une décroissance de la radioactivité mais en 2015, les champignons, le gibier ainsi que les feuilles de thé ou les pousses de bambou affichaient un taux supérieur à la normale.

1.7.4. L'impact sur le milieu marin : 5 ans après la catastrophe, la pollution radioactive marine est encore bien présente et se maintient. [7]



Figure 1.9 : accident nucléaire de Fukushima

1.8. La sécurité autour des centrales nucléaires

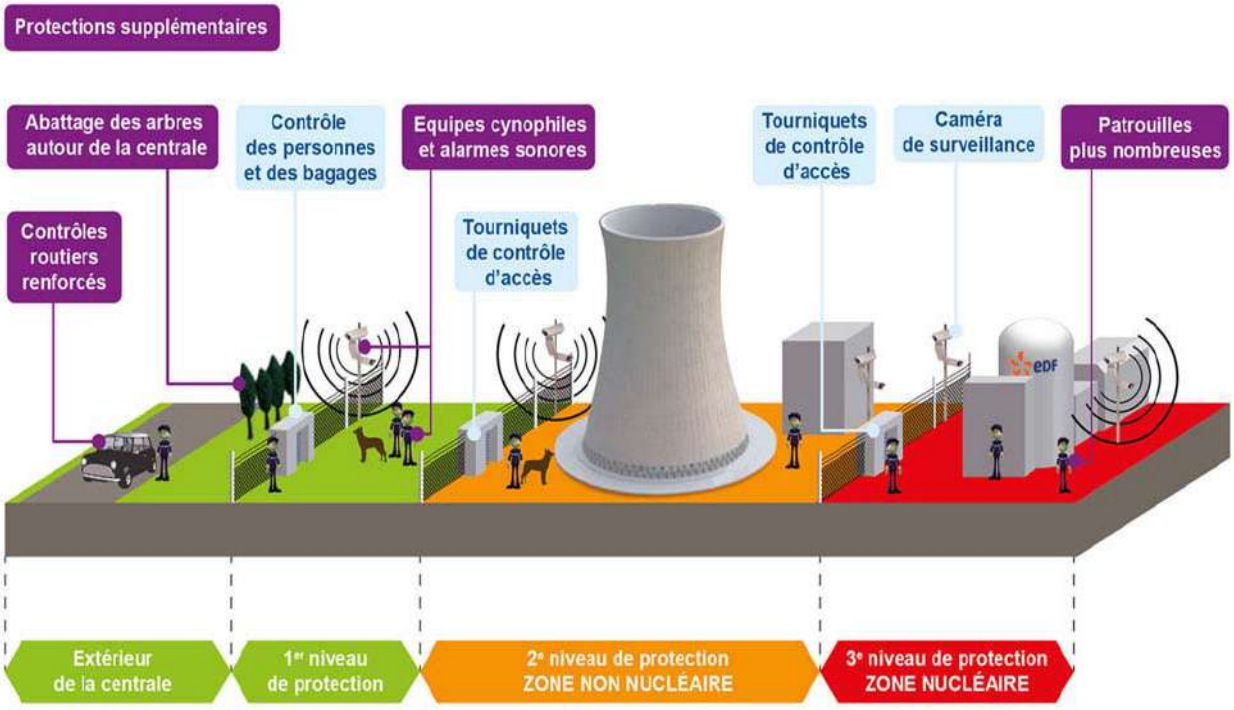


Figure 1.10 : Schéma illustre les mesures prises pour renforcer la sécurité autour des centrales nucléaires. Ces mesures visant à rendre les intrusions, même pacifistes, beaucoup plus difficiles, font l'objet d'exercices de crise réguliers. [8]

1.9. Conclusion

Malgré une sûreté très sophistiquée sans équivalent dans aucune autre industrie, une **centrale nucléaire** n'est pas infaillible. Offrant une alternative crédible, l'énergie **nucléaire** peut et doit être considérée comparativement aux autres énergies de masse aujourd'hui disponibles, essentiellement fossiles. [9]

Chapitre : 02

LES TOURS DE REFROIDISSEMENTS

TYPES ET SYSTÈMES



2.1 Introduction

Une tour de refroidissement, également dénommées refroidisseurs atmosphérique ou encore cooling tower, est un échangeur par lequel on prélève de la chaleur de l'eau en mettant cette eau en contact avec de l'air. Les quantités de chaleur à évacuer étant importantes donc les systèmes de refroidissement doivent être prévus en conséquence. Ceci implique l'usage de quantité de fluide caloporteur (eau) considérable.

La disponibilité en qualité et en quantité de cette eau justifiera le choix de l'un des types de ces échangeurs.[10]



Figure 2.1 : photo réelle de tour de refroidissement

2.2.Historique d'un tour de refroidissement

Les noms les plus reconnus de l'industrie de refroidissement sont à l'origine de sa création: Balcke, Marley, Ceramic, Recold et Hamon Dry Cooling.

Balcke& Co. a été fondée en Allemagne en 1894 et est devenue le premier fabricant mondial de tours de refroidissement au début des années 1900.

Marley a été fondée aux États-Unis en 1922 en tant qu'équipementier de centrales électriques, avant de devenir The Marley Company en 1926. Recold a été fondée en 1932 à Brea en Californie. Ces entreprises ont inventé et breveté la plupart des innovations et des technologies ayant trait aux tours de refroidissement industrielles utilisées à l'heure actuelle.

- Les plus grandes installations de refroidissement au monde :

En 1920 : pulvérisateurs; tour atmosphérique ;

En 1930 :**tour de refroidissement** à tirage naturel hyperbolique en béton ; **tour de refroidissement** à tirage mécanique avec ventilateur d'extraction ;

En 1950 : condenseur à air ; **tour de refroidissement** avec écoulement inférieur ;

En 1960 : conception à flux transversal avec remplissage sous forme de pellicules ; échangeur de chaleur à air ; condenseur à évaporation de 100 tonnes ;

En 1970 : Années 1970 : plus grands ventilateurs au monde ; tour de refroidissement à tirage mécanique à ventilateurs multiples ;

En 1980 : tour de refroidissement hybride à voie humide-sèche ; tour de refroidissement à voie humide à tirage naturel avec désulfuration des effluents gazeux intégrée ; système de refroidissement à voie sèche indirecte complète ;

En 1990 : construction en bois pour tours de refroidissement hybrides multi cellules système complet à extrémité froide ;

En 2000 : tour thermique à gaz naturel liquide; tour de refroidissement à tirage mécaniquecirculaire assistée d'un tirage naturel.[11]

2.3.Le rôle de tour de refroidissement

Les tours de refroidissement sont utilisées pour refroidir un liquide ou un gaz à l'aide d'un moyen de refroidissement.

Il s'agit d'un cas particulier d'un échangeur de chaleur où le transfert thermique s'effectue par contact direct ou indirect entre les flux.

Le moyen de refroidissement de telles installations est le plus souvent l'air ambiant. Les tours de refroidissement sont des équipements courants, présents dans des installations de climatisation, ou dans des procédés industriels et énergétiques.

2.4.Les procédés de refroidissement :

- Selon les températures souhaitées pour obtenir le rendement optimaldu procès, l'on peut distinguer quatre catégories de technologie derefroidissement sont air évaporatif ,a eau, air sec :[12]

2.4.1.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 :

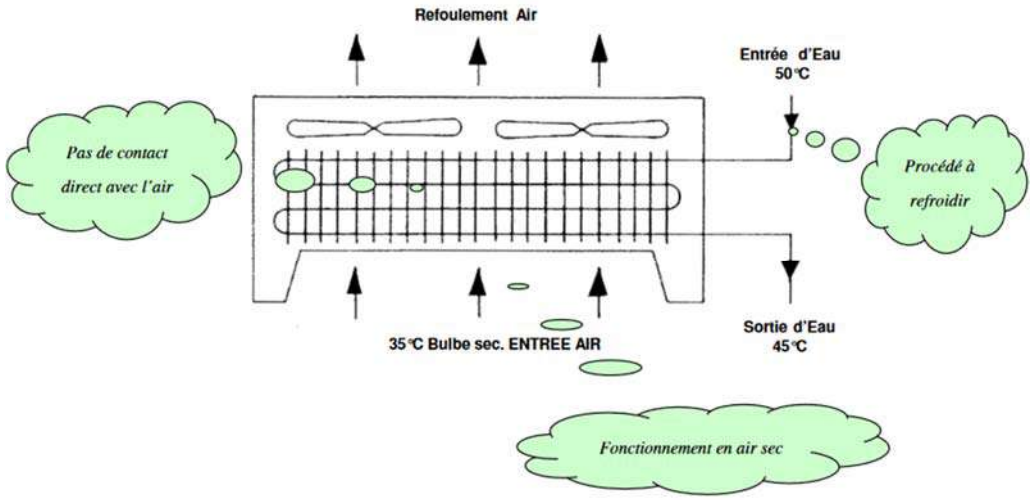


Figure 2.2 : Schéma de principe d'un aéroréfrigérant sec Principe de fonctionnement

2.4.1.1.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 procédésindustriels 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 doncpas 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.

2.4.1.2.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

2.4.1.3.Principaux avantages (par rapport à une tour ouverte)

- 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 nepas pénaliser les

performances thermiques plus faibles que celles des systèmes humides.

2.4.1.4.Principaux inconvénients (par rapport à une tour ouverte)

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 importante,
- 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.

2.4.2. 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 :

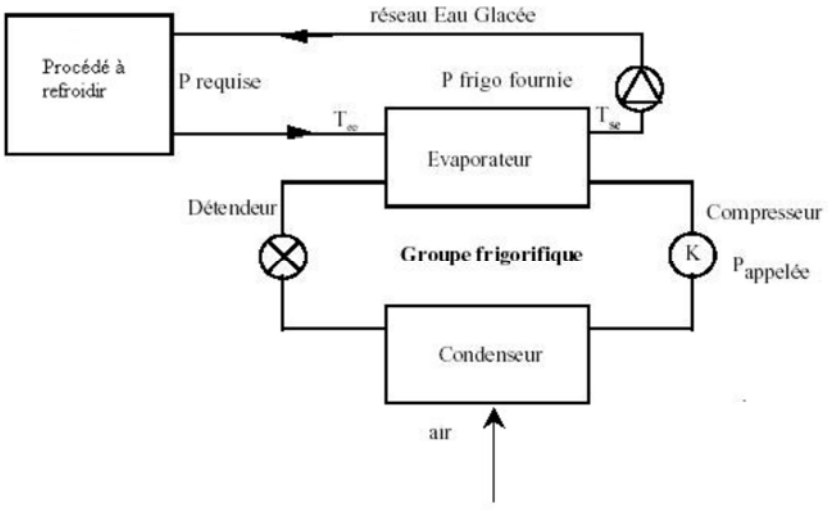


Figure 2.4 :Schéma de l'installation et sa relation avec le procédé à refroidir

2.4.2.1.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.

2.4.2.2.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.



Figure 2.5: Illustration d'un refroidisseur de liquide à condensation par air



Figure2.6: Illustration d'un évaporateur à plaques muni de son kit hydraulique pour alimentation et retour du fluide à refroidir

2.4.2.3Principaux avantages (par rapport à une tour ouverte)

- 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.

2.4.2.4Principaux inconvénients (par rapport à une tour ouverte)

- 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.

2.4.3A air

Ce type de système ne fait pas partie des installations de refroidissement par dispersion d'eau dans un flux d'air.

Ces installations utilisent l'eau se trouvant dans le milieu naturel (nappe phréatique ou rivière) pour assurer le refroidissement de procédés tertiaires, industriels et de centrales électriques.

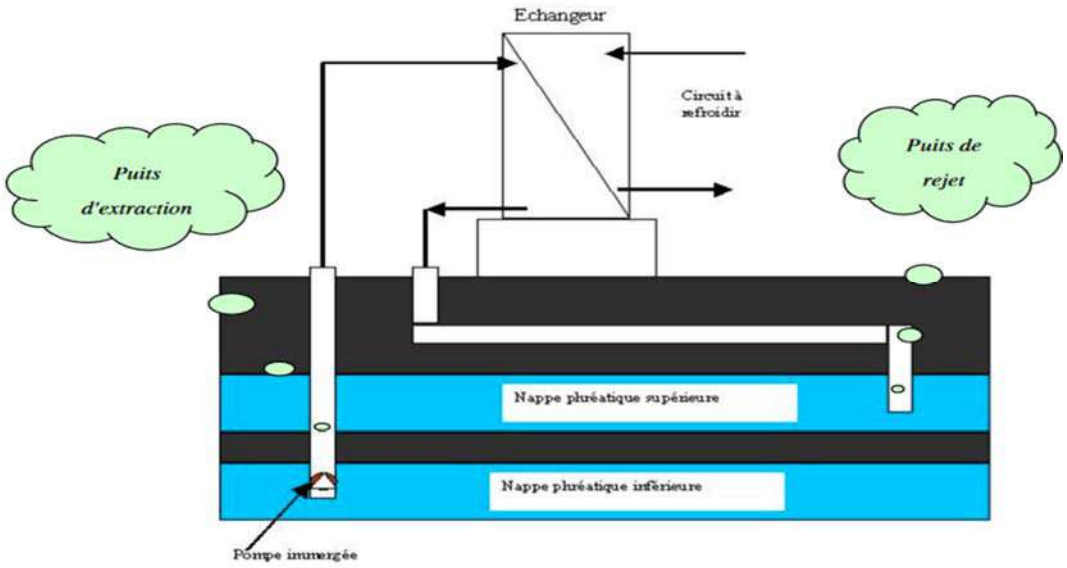


Figure 2.7: Schéma de principe d'une installation de refroidissement utilisant la nappe phréatique

2.4.3.1.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.

2.4.3.2.Description des composants

Les principaux composants de ce type de refroidissement par eau sont :

- les puits à réaliser dans le cas de prélèvement sur nappe phréatique, avec des distances minimales à respecter,
- la ou les pompes de sous-titrage de l'eau,

- l'échangeur à plaques ou à tubes en inox,
- les canalisations pour conduire l'eau extraite à l'échangeur et celle ramenant l'eau au milieu naturel (nappe ou rivière). Cette dernière est d'une longueur particulièrement importante car la réglementation en vigueur impose des distances minimales de l'ordre de80 m.

2.4.3.3.Principaux avantages (par rapport à une tour ouverte)

- possibilité d'obtenir des niveaux de température correspondant à la plupart des applications industrielles et tertiaires,
- surface au sol réduite,
- niveau sonore minimal,
- bonne résistance à la corrosion de l'échangeur à plaques ou à tubes,
- utilisation naturelle des ressources disponibles dans le sol, ou les révères.[12]

2.4.3.4.Principaux inconvénients (par rapport à une tour ouverte)

- le coût d'investissement d'un tel système est élevé (forage des puits, conduites d'extraction et de rejet),
- le coût d'installation est élevé en raison de la réglementation exigeante relative aux prélèvements, à la consommation d'eau ainsi qu'aux rejets dans la nappe ou la rivière : de nombreux suivis, analyses, maintenance et contrôles doivent être effectués régulièrement afin de protéger le milieu naturel
- l'encrassement de l'échangeur à plaques ou à tubes exige un entretien régulier,
- l'eau prélevée dans la nappe ou dans la rivière est taxée en fonction de sa situation géographique (taxe sur le captage en fonction de la profondeur (pour la nappephréatique) et de la zone géographique et sur la restitution en fonction du milieu et de l'usage).

2.5. Les différents types des tours de refroidissement :

Il existe quatre types d e tour de refroidissement :

- Tour de refroidissement ouvert ;
- Tour de refroidissement fermé ;
- Tour de refroidissement avec un condenseur évaporatif ;
- Tour de refroidissementà circuit fermé hybride.[11]

2.5.1. Tour de refroidissement à circuit ouvert :

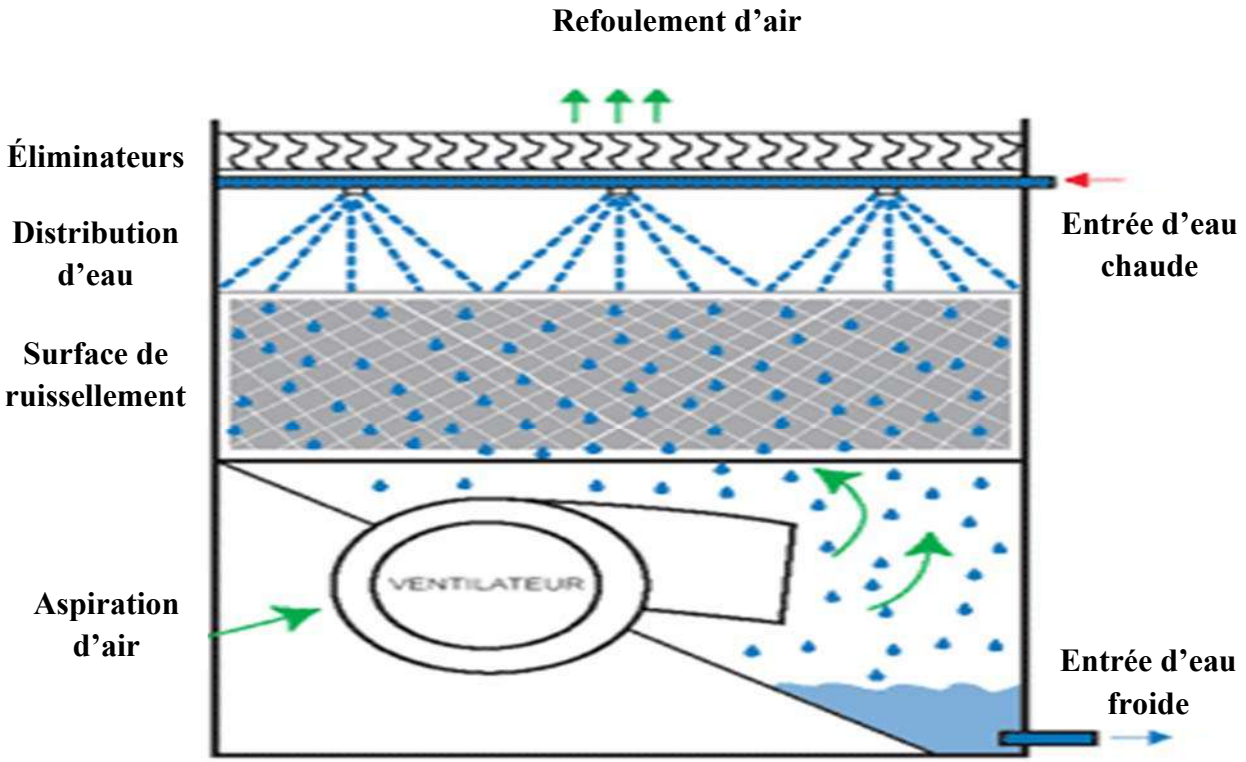


Figure2.8 : un tour ouvert

Dans une tour à circuit ouvert, l'eau provenant de la source de chaleur du procédé est distribuée directement sur la surface de ruissellement et entre en contact avec l'air soufflé au travers de la tour, assurant ainsi le refroidissement par évaporation d'une petite partie de cette eau, grâce à l'échange direct obtenu entre l'eau et l'air.

La tour ouverte est l'équipement évaporatif qui offre les plus grands avantages en matière de rendement, d'encombrement, de coût unitaire et de consommation, présentant également le poids d'installation le plus faible

Dans le cadre de la gestion du risque lié au suivi de la qualité de l'eau, il faudra cependant tenir compte de la totalité du volume du circuit incluant la tour de refroidissement proprement dite et tout le réseau, les échangeurs, les bassins éventuels, et les pompes. Il faut donc gérer souvent des volumes importants et des matériaux constitutifs de natures différentes.

Dans ces systèmes, les points chauds tels que l'échangeur de chaleur ou le condenseur sont des sites plus favorables au développement du tartre, de la corrosion ou de la prolifération microbienne. Au vu de leur taille et de leur volume, ces systèmes peuvent parfois être plus difficiles à nettoyer ou à désinfecter en cas d'encrassement ou de pollution.



Figure 2.9 : les composants de tours de refroidissements ouverts

2.5.2.Tour de refroidissement à circuit fermé :

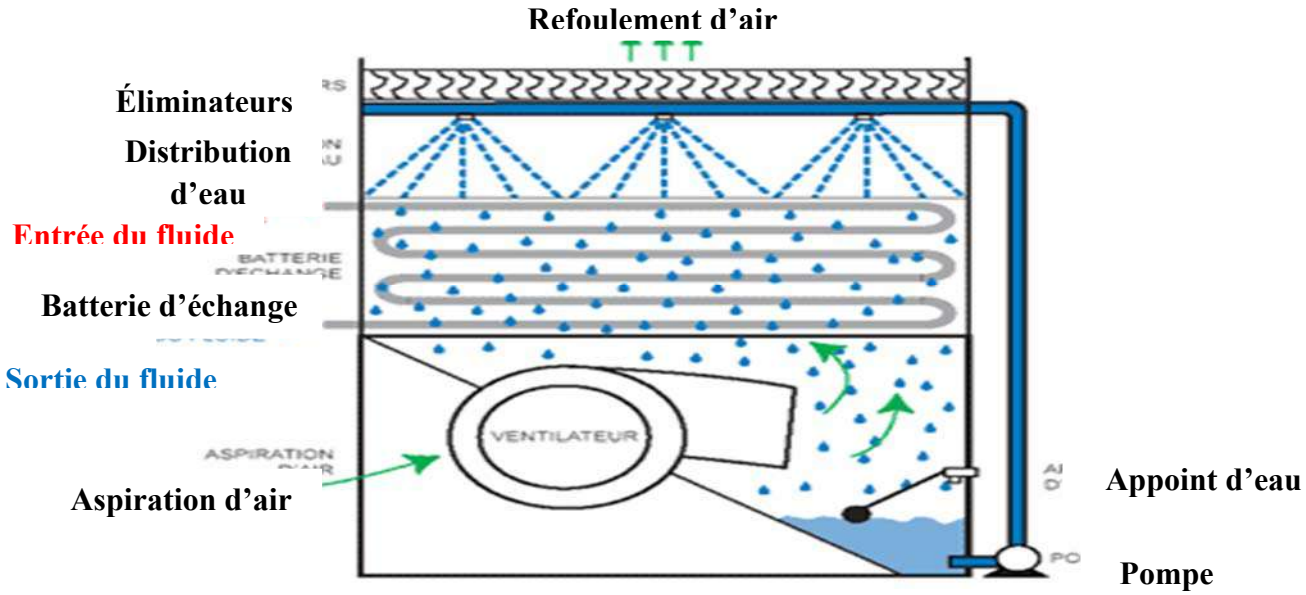


Figure 2.10 : Tour à circuit fermé

Dans une tour à circuit fermé, 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 terme de qualité d'eau.



Figure 2.11 : tour fermé

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.

2.5.3. Condenseurs évaporatifs :

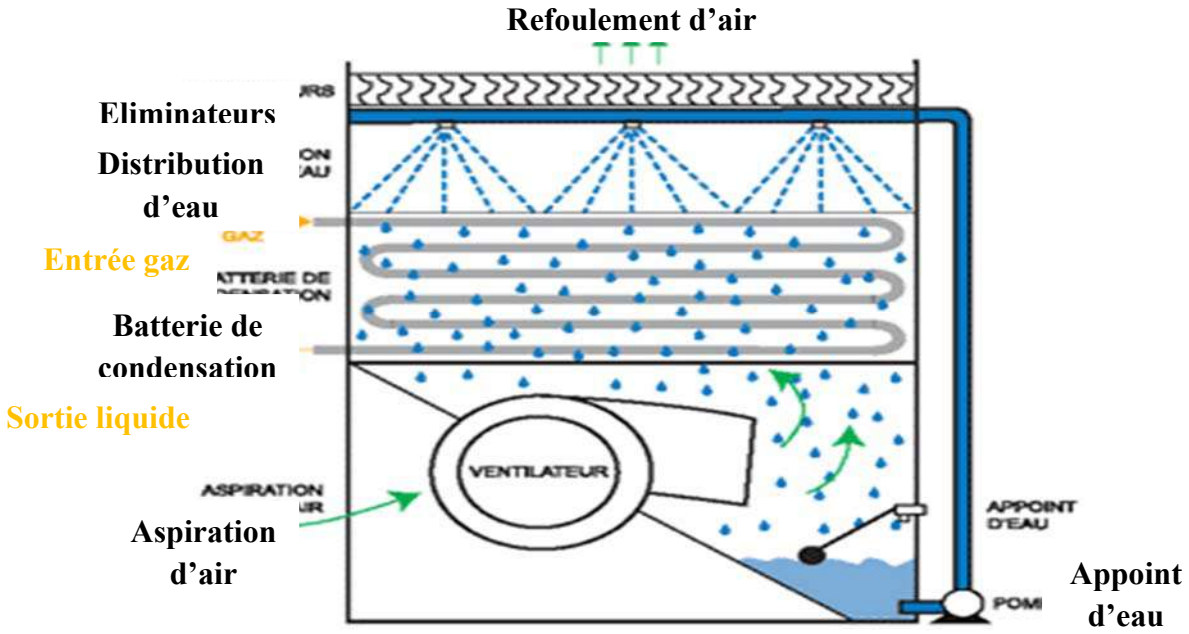


Figure2.12: un condenseur évaporatif

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.

2.5.4. Tour de refroidissement à circuit fermés hybride :

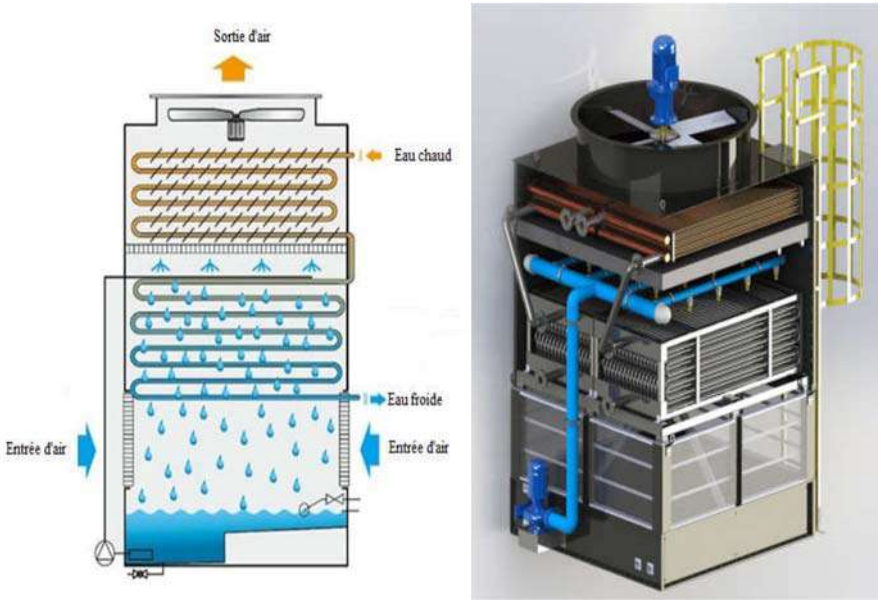


Figure 2.13 : Tour hybride fermés

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.

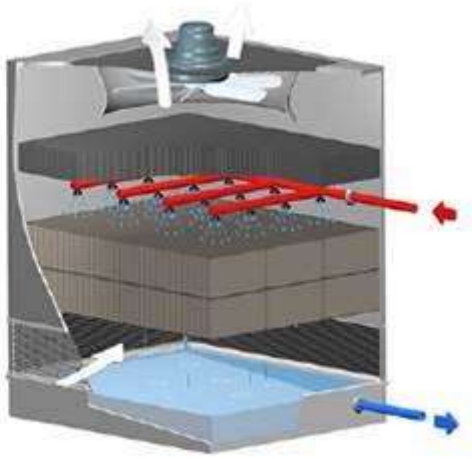


Figure 2.14 : un tour de refroidissement hybride ouvert

2.6. Les principaux composants d'un tour de refroidissement :



Figure 2.15 : les principaux composants d'un tour de refroidissement

2.6.1. Les composants d'un tour de refroidissement ouvert

Les principaux composants d'un tour de refroidissement ouvert sont :

2.6.1.1 Le corps d'échange ou packing

Il est constitué :

- D'un empilement de parois ondulées ou en nid d'abeille sur lesquelles les gouttelettes d'eau s'écoulent sous forme de film ;
- D'un empilement de lattes sur lesquelles l'eau s'éclate en gouttes successives.

Les matières plastiques généralement utilisées éliminent le risque de corrosion.

Ces corps d'échange sont sensibles à l'encrassement et surtout à l'entartrage.

Les figures suivantes illustrent des exemples de corps d'échange utilisés couramment :



Figure 2.16 : Corps d'échange avec. Canaux verticaux



Figure 2.17 : Corps d'échange de type gouttes

Pour réduire l'encrassement et l'entartrage des corps d'échange, il est recommandé de veiller à garantir une accessibilité optimale, en vue du nettoyage et détartrage (ce dernier est nécessaire en cas de traitement d'eau non approprié) au minimum une fois par an. Une porte d'accès doit en outre permettre le contrôle visuel de la surface d'échange.

Un échange standard du Packing peut également s'avérer être une solution économique [

2.6.1.2. Le pare-gouttelettes

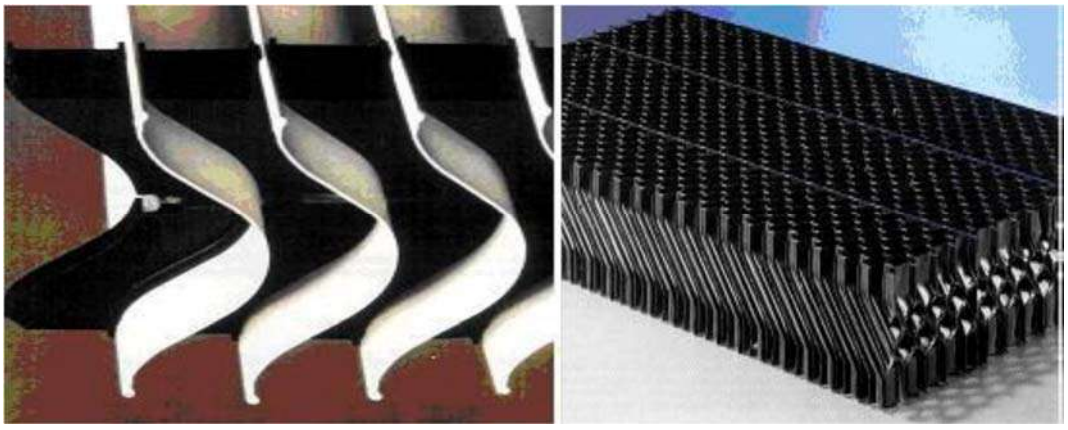
Ils sont appelé aussi éliminateur de gouttes, séparateur de gouttelettes ou dévésiculeur. Il est très important pour prévenir le risque d'entraînement de gouttelettes potentiellement infectées par les légionelles. Sa conception doit être telle que le taux d'entraînement soit limité le plus possible.

Le taux d'entraînement (appelé aussi entraînement vésiculaire) ne doit pas être supérieur à 0,01% du débit d'eau en circulation (valeur donnée pour le point de fonctionnement nominal, car le taux d'entraînement varie selon les conditions de fonctionnement d'une tour aéroréfrigérante).

Il revient donc aux exploitants de s'assurer auprès du fabricant de la tour de refroidissement que ce seuil est respecté.

La même démarche doit être effectuée lors d'un changement d'un des composants de la tour.

Les matériaux utilisés pour ce composant sont principalement des matières plastiques. Il est aussi nécessaire de tenir compte de l'accessibilité à ce composant pour faciliter son nettoyage.



Figures 2.18 : Exemples de pare-gouttelettes

2.6.1.3 Les rampes de dispersion (rampes de pulvérisation)

Ces rampes servent à la dispersion du fluide sous forme de gouttelettes sur le corps d'échange. Il est préférable d'utiliser des systèmes permettant une dispersion à des pressions faibles pour éviter les éclaboussements.

Les disperseurs à basse pression (environ 0,5 bar) sont préférés.



Figure 2.19: Système de dispersion du fluide à refroidir

De même que pour les autres composants, les résistances à la corrosion, à l'entartrage et à l'encrassement doivent être prises en compte pour leur sélection. Les disperseurs

sontgénéralement en matières plastiques, ce qui élimine le risque de corrosion, mais pas ceux d'encrassement, ni d'entartrage.

Ces derniers aspects sont en prendre en compte lors de l'exploitation.

2.6.1.4. 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 uncontrôleur 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 ».

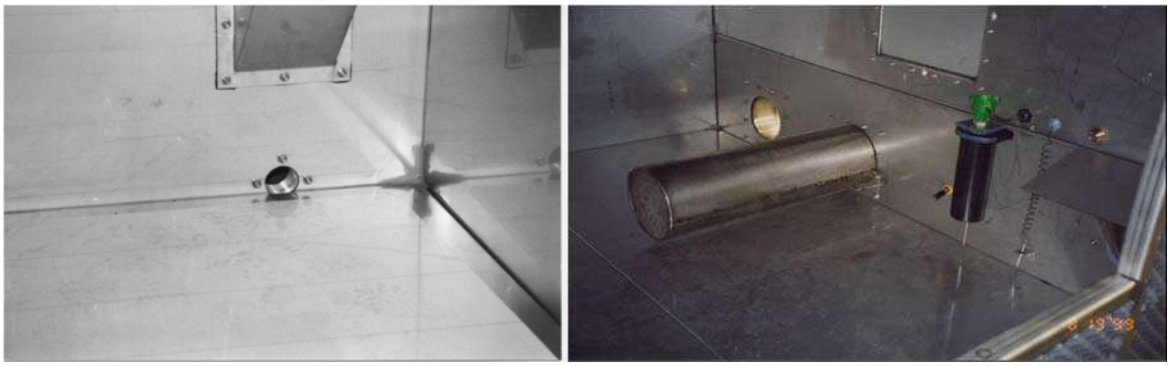


Figure 2.20: Exemples de bassin de rétention avec point de vidange

2.6.1.5. Les ventilateurs

Ces ventilateur assure la circulation de l'air à traversant le corps d'échange, deux types de ventilateurs sont utilisés sur les tours de refroidissement :

- Les ventilateurs axiaux,
- Les ventilateurs centrifuges.

Les ventilateurs peuvent soit être en accouplement direct avec le moteur qui les entraîne, soit équipés de transmission ; ils exigent dans le second cas une maintenance renforcée.

La vitesse des ventilateurs est régulée pour maintenir la température de sortie d'eau souhaitée qu'elles soient les conditions ambiantes.

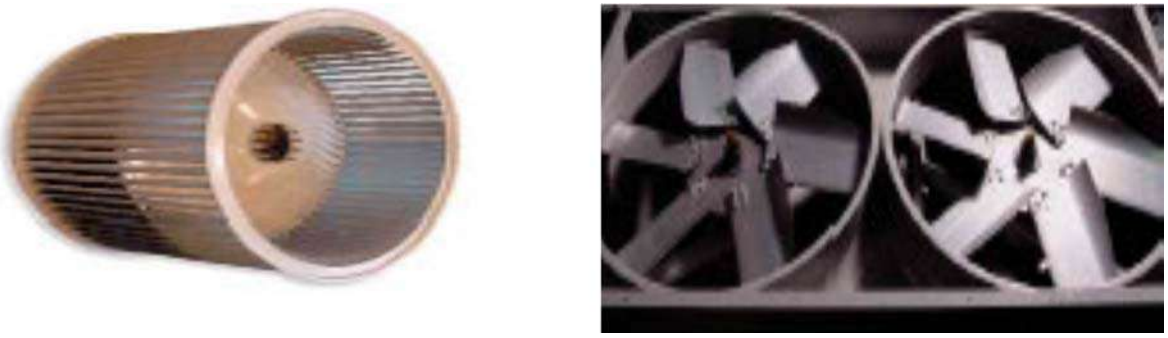


Figure 2.21 : ventilateurs centrifuge et axial

Dans le cas d'un tour de refroidissement ouvert avec un échangeur intermédiaire distant, deux autres composants font partie du système de refroidissement :

2.6.1.6. 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.

2.6.1.7. La pompe de circulation additionnelle

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

2.6.2.Les composants d'un tour de refroidissement fermé

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 remplacementpar un échangeur tubulaire. La figure suivante montre un exemple du type d'échangeurcouramment utilisé :

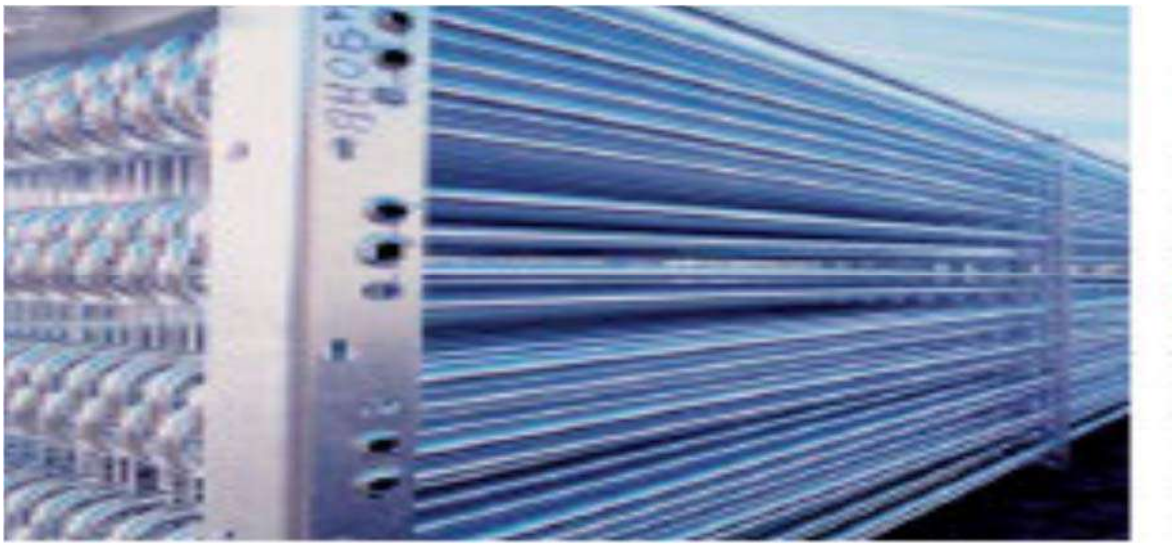


Figure 2.22: Exemple d'un échangeur tubulaire intégré dans un tour de refroidissement fermé

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.

2.7. Principe de fonctionnement d'une tour de refroidissement

2.7.1. 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.

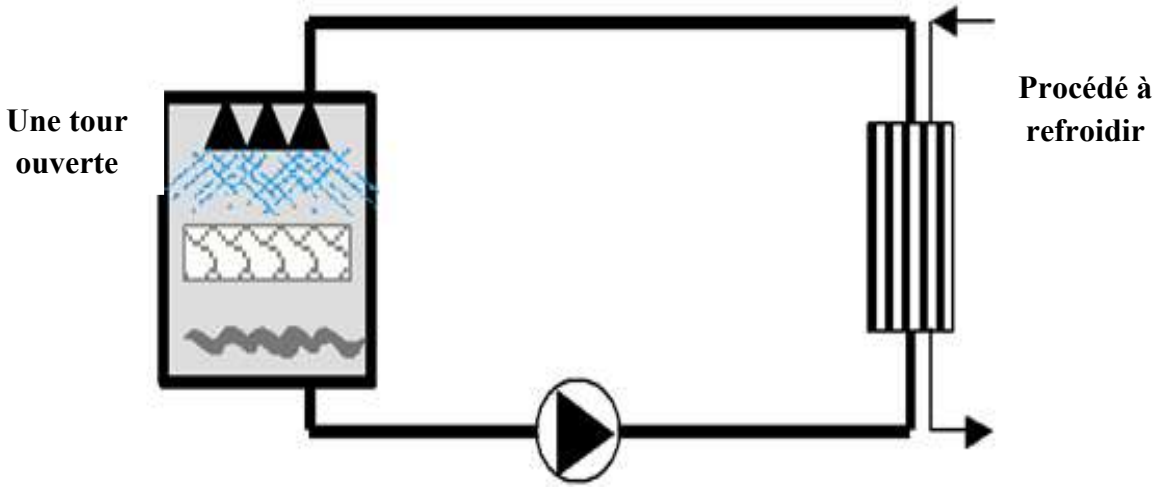


Figure 2.23 : principe d'une installation de refroidissement avec un tour ouvert où l'eau dispersée provient directement du circuit à refroidir

- Soit le circuit primaire (circuit d'eau à refroidir) traverse d'abord un échangeur intermédiaire distantde la tour aéroréfrigérante ouverte. Le circuit secondaire de l'échangeur intermédiaire constitue le circuit tour. L'eau de ce circuit est dispersée dans l'air humide en circulation dans la tour.

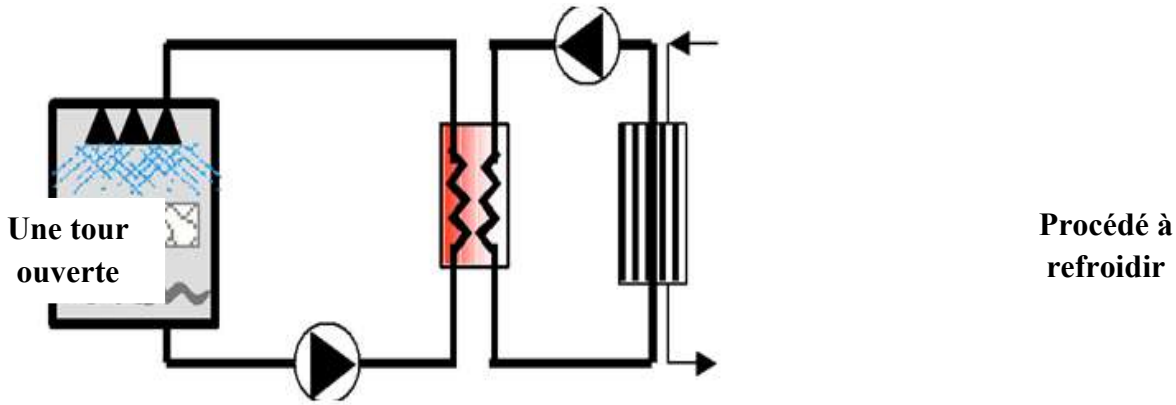


Figure 2.24: principe d'une installation de refroidissement avec un tour ouvert et un échangeur intermédiaire distant

L'eau provenant du procédé à refroidir (dans le premier type de tour ouvert) ou de l'échangeur intermédiaire (dans le deuxième type de tour ouvert) est dispersée en fines gouttelettes par une ou plusieurs rampes de dispersion. L'eau traverse alors de haut en bas une surface d'échange constituée par le packing.

Ce packing peut être considéré comme un échangeur air/fluide avec une surface d'échange élevée.

L'eau refroidie est collectée dans un bassin de rétention en bas de la tour avant de retourner vers le procédé à refroidir, directement ou par l'intermédiaire d'un échangeur.

L'air est mis en mouvement par un ventilateur (centrifuge ou hélicoïde) ou par tirage naturel. Il y a donc contact direct de l'eau venant du procédé avec l'air extérieur.

Ce flux d'air se charge en humidité prélevant de la chaleur à l'eau pour s'évaporer (chaleur latente de vaporisation) et peut entraîner des gouttelettes d'eau.

Un pare gouttelettes est disposé au sommet de la tour afin de limiter l'entraînement vésiculaire des gouttelettes éventuellement contaminées.

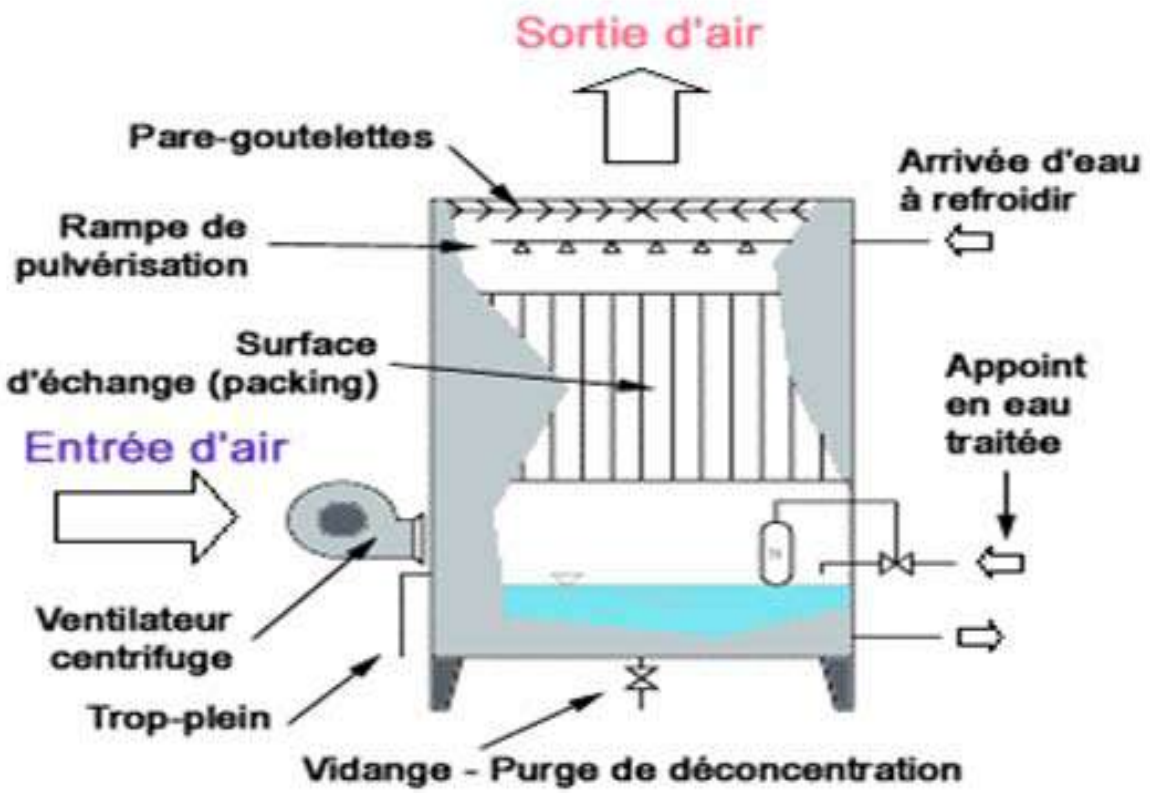


Figure 2.25 : principe de fonctionnement d'un tour de refroidissement ouvert

A l'institut pasteur, on trouve une installation de refroidissement avec un tour de refroidissement ouvert où l'eau dispersée provient directement au procédé à refroidir.

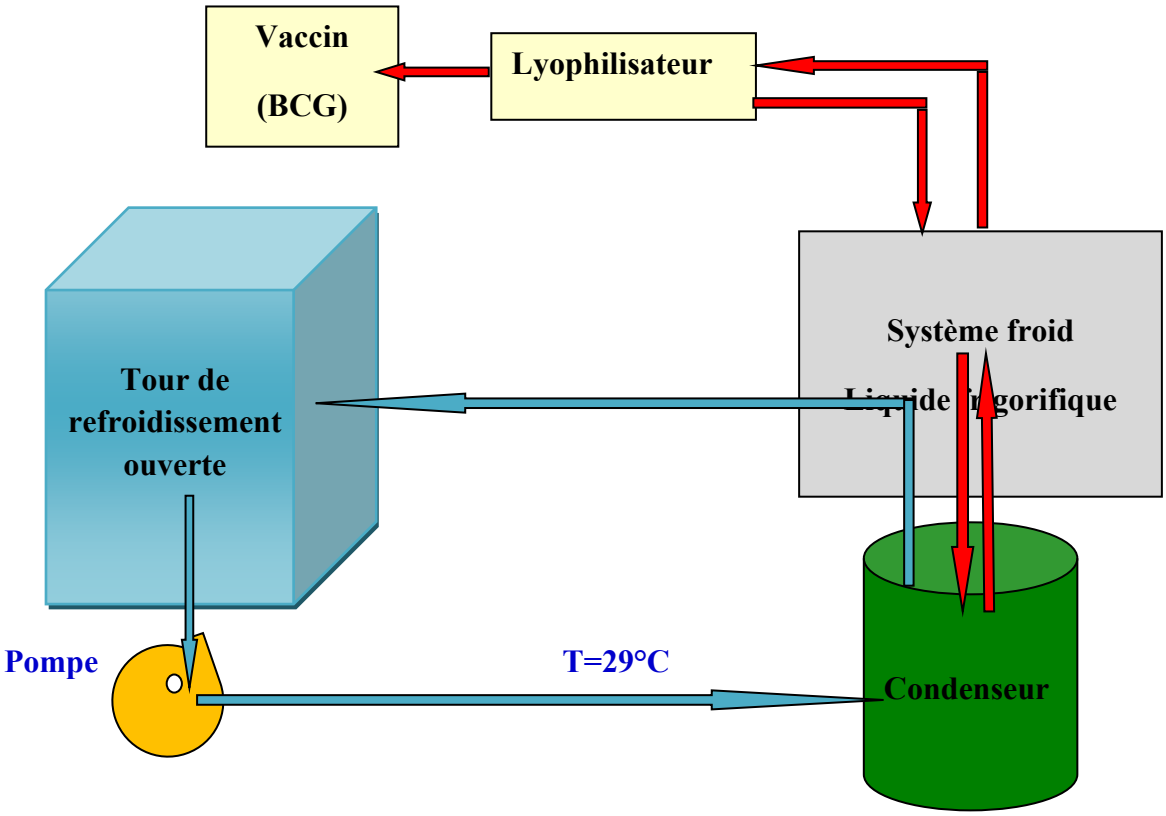


Figure 2.26 : le circuit d'eau dans un tour de refroidissement ouvert

L'eau refroidit par la tour ouvert est refoulé vers le condenseur d une machine de lyophilisation.
Le condenseur joue le rôle d'un échangeur dont il refroidit le gaz frigorifique chaud (gaz frigorifique condensé) pour que le compresseur fonctionne en régime normal.

Ce dernier refroidit le lyophilisateur pour qu'il détermine les conditions favorables pour la production du vaccin (BCG).

L'eau retourne enfin au tour de refroidissement à une température de 38°C par l'intermédiaire du condenseur.

2.7.2. Principe de fonctionnement d'un tour de refroidissement fermé

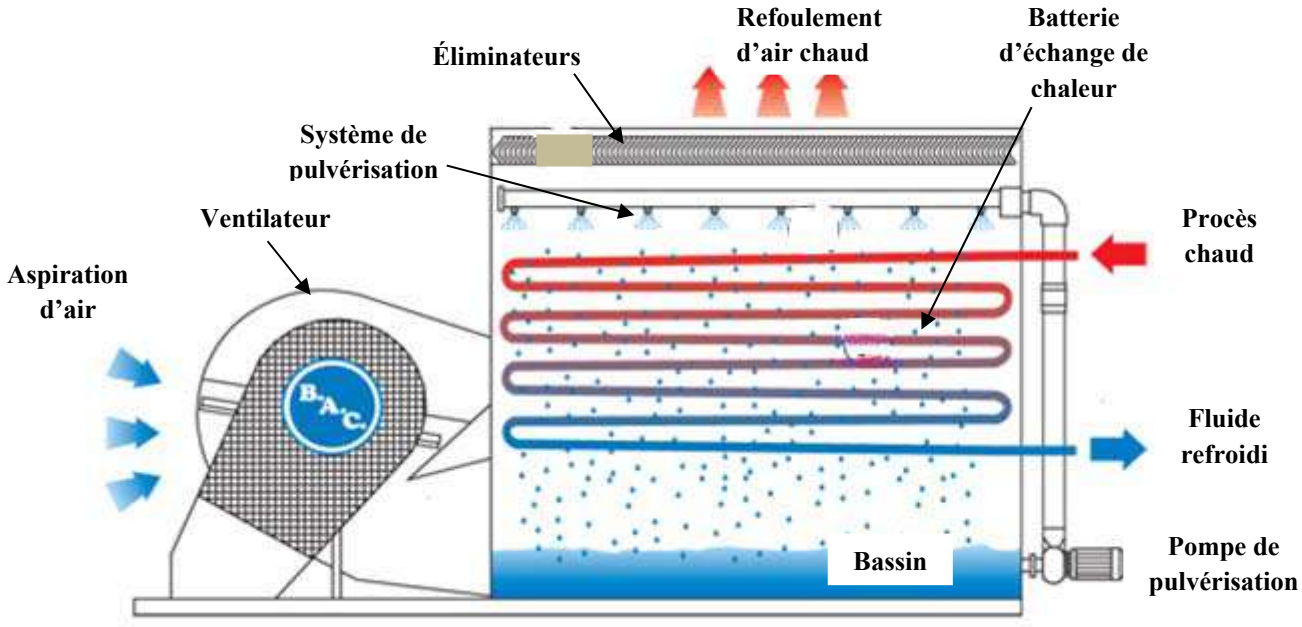


Figure 2.27 : Principe de fonctionnement d'un tour de refroidissement fermé

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.

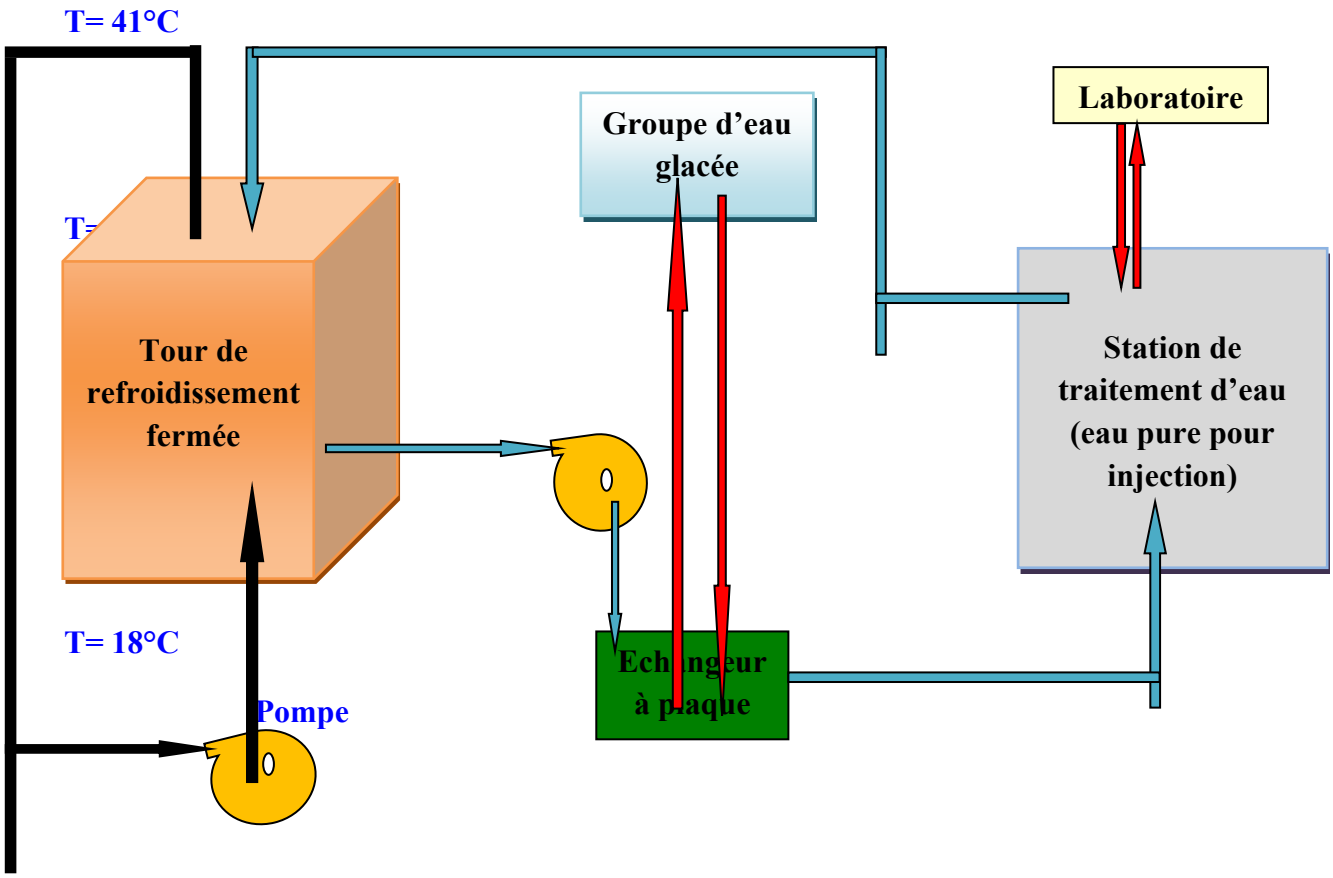


Figure 2.28 : le circuit d'eau dans une tour de refroidissement fermée

Le refroidissement de l'eau est assuré par l'intermédiaire de deux phases de changement de température. La première phase est au niveau de l'échangeur **tubulaire intégré dans la tour de refroidissement fermée** et la deuxième phase au niveau de l'échangeur à plaque liée au groupe d'eau.

2.8. Les modes de transfert

Il y existe trois modes de transfert :

- **Conduction :** l'énergie passe d'un corps à un autre, par contact.
- **Convection :** un corps qui se déplace emmène avec lui l'énergie qu'il contient. La quantité d'énergie ainsi transportée peut être importante, notamment dans le cas d'un changement de phase.

- **Rayonnement (radiation) :** tous les corps émettent de la lumière, en fonction de leur température, et sont eux-mêmes chauffés par la lumière qu'ils absorbent.

Les deux modes de transfert appliqué dans les tours de refroidissement sont la conduction et la convection :

- **Pour la tour fermée :** un transfert par conduction et convection ;
- **Pour la tour ouverte :** un transfert par conduction.

2.8.1.Conduction :

Le transfert par conduction est un échange d'énergie avec contact quand il existe un gradient de température (variation progressive de la température) au sein d'un système.

Dans un gaz ou un liquide, l'énergie se propage par contact direct entre molécules au gré des chocs aléatoires à l'échelle microscopique. Dans un solide ou fluide immobilisé, la des chocs aléatoires à l'échelle microscopique.

Dans un solide ou fluide immobilisé, la vibration des atomes autour de leur position d'équilibre dans le solide, se transmet de proche en proche. Les cristaux disposent d'un mode de transfert thermique supplémentaire particulier associé aux vibrations du réseau.

Exemples de transfert par conduction : transfert à travers une paroi diathermique (par exemple les ailettes de refroidissement d'un moteur ou les radiateurs d'un chauffage central…) contrairement à une paroi adiabatique qui s'oppose au transfert de chaleur (par exemple, la paroi d'une bouteille thermos).

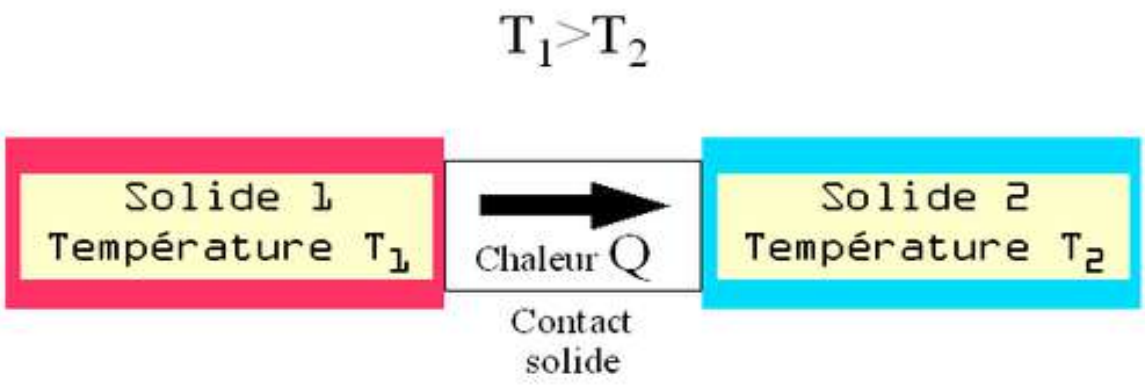


Figure 2.29 : transfert de chaleur par conduction

2.8.2. Convection :

Définition : transfert d'énergie qui s'accompagne de mouvement de molécules dans un fluide (liquide ou gaz).

- **Convection naturelle (ou libre) :** l'échange de chaleur est responsable du mouvement. Le transfert thermique provoque le mouvement.
- **Convection forcée :** un dispositif mécanique entraine les molécules vers le dispositif chauffant. Le mouvement favorise le transfert thermique.

Les lois sont très différentes dans les deux cas.

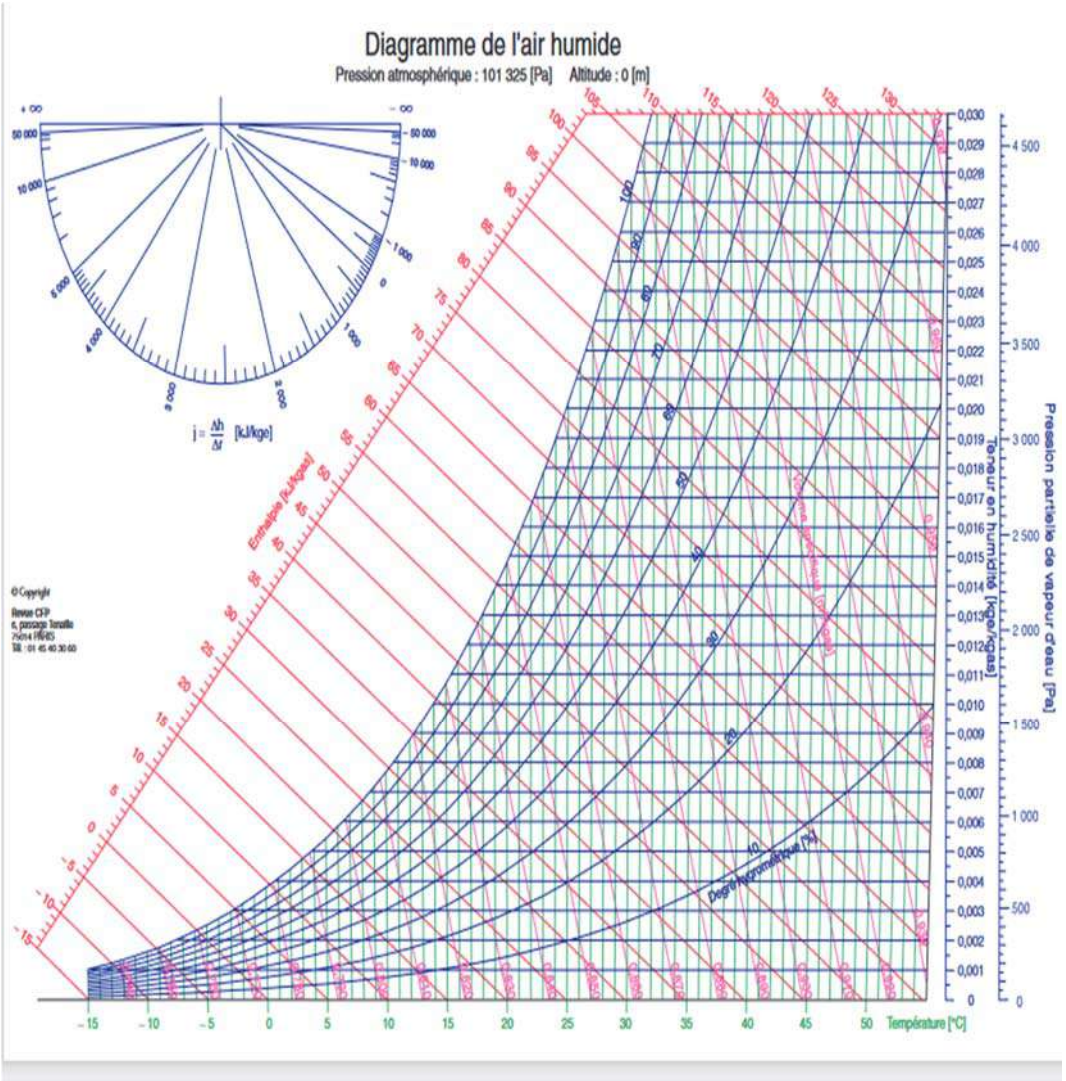
- **Exemples de transfert par convection :** échange de chaleur dans des radiateurs à circulation d'eau ou d'air (convection forcée), refroidissement d'une tasse de liquide chaud en soufflant dessus (convection forcée), diffusion de l'air chaud au-dessus d'un radiateur électrique (convection naturelle s'il n'y a pas de soufflerie dans le radiateur)

2.9. Conclusion

Dans ce chapitre j'ai présenté les différents types des tours de refroidissement ainsi leurs modes de fonctionnement, leurs composants, et les modes de transfert thermique. Le chapitre qui suive spécifie les deux types de tours de refroidissement étudié et introduit le bilan thermique résultant de mon étude.[11]

Chapitre : 03

L'AIR HUMIDE



3.1. Introduction

Afin de mieux comprendre le comportement de l'air dans un processus de conditionnement d'air, une étude théorique doit s'adopter, ce qui impose une étude psychométrique de l'air et les propriétés thermodynamiques de l'air humide.
Il existe deux types principaux d'air :

- Air sec :

L'air sec est un mélange de gaz contenant principalement de l'azote, de l'oxygène, du gaz carbonique et en faibles quantités un certain nombre d'autres gaz tels que l'hélium, krypton, hydrogène, Argon,…etc.

- 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. [13]

En appliquant la loi de dalton à l'air humide, tel que :

$$P_{at} = P_a + P_v \quad (3.1)$$

Avec :

P_{at} : Pression de l'air humide (P_a)
P_{as} : Pression de l'air sec (P_a)
P_v : Pression de la vapeur d'eau (P_a)

3.2. Propriétés et grandeurs de l'air humide

L'air humide est caractérisé par plusieurs grandeurs dont on gardera traditionnellement: [13]

- La température (dite température sèche)
- La température humide ou température de thermomètre humide
- La température de rosée ou point de rosée
- L'humidité absolue ou teneur en eau
- L'humidité relative

- L'enthalpie

3.2.1. Température sèche en °C

C'est la température réelle de l'air humide observée à l'aide d'un thermomètre ou d'un capteur de température, elle est indiquée par un thermomètre non affecté par l'humidité de l'air.

3.2.2. Température humide en °C

C'est la température enregistrée par un thermomètre où le bulbe est recouvert d'une mèche imprégnée d'eau. Les températures humides sont toujours inferieures aux températures sèches, le seul cas, où elles sont identiques est avec une humidité relative à 100 %. [14]

3.2.3. Température adiabatique de saturation

C'est la température à laquelle l'air humide peut être apporté à saturation adiabatique par l'évaporation d''eau, c'est à dire à la température humide, aucun gain ou perte de la chaleur aux environnements.

3.2.4. Température de rosée en °C

C'est la température à partir de laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air humide commence à se condenser au contact d'une surface froide. Au cours d'un refroidissement, l'humidité spécifique et la pression partielle de la vapeur d'eau restent constantes.

3.2.5. Humidité spécifique ou humidité absolue ou teneur en vapeur

C'est la masse d'eau sous forme liquide, solide ou vapeur contenue dans 01 kg d'air sec. Ce poids d'eau reste constant lorsque la température ambiante varie sous réserve qu'elle ne tombe pas en dessous de la température de rosée. Si la température tombe en dessous du point de rosée, une partie de cette masse d'eau va se condenser sous forme de gouttelettes sur les parois les plus froides.

$$X= \frac{m_v}{m_a} \qquad (3.2)$$

Où : m_a et m_a sont respectivement les masses de vapeur d'eau et d'air sec contenues dans un même volume V d'air humide, autrement (1+n) kg d'air humide contient donc 1 kg d'air sec et n kg de vapeur d'eau.

$$X= \frac{(P_v V/r_v T)}{(P_a V/r_a T)} \qquad (3.3)$$

Avec, P V = m R T

P_v et P_a : sont la pression partielle de la vapeur d'eau et la pression de l'air sec (P_a).
r_v et r_a : sont les constantes spécifiques de l'eau et de l'air sec (J/Kg K).
T : Température (°K)
Où, P étant la pression totale de l'air humide exprimée par la somme de la pression partielle de la vapeur d'eau et celle de l'air sec tel que :

$$P = P_v + P_a \quad (3.4)$$

Avec : r_v = 461.5 J/Kg.K

r_a = 287 J/Kg.K

Par conséquent l'expression de la teneur en humidité de la teneur en humidité devient :

$$X = 0.622 \frac{P_v}{P - P_v} \quad (3.5)$$

3.2.6. Humidité relative

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 %. [15]

L'humidité relative est exprimée par le rapport :

$$Q = \frac{P_v}{P_v \ S} \quad (3.6)$$

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 [14]

3.2.7. Volume spécifique en 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. [14]

$$V = \frac{V_{ah}}{m_{as}} \quad (3.7)$$

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)

3.2.8. Masse volumique en kg/m^3 d'air humide

C'est la masse d'un d'air humide à la pression du mélange (air sec + vapeur d'eau) est égale la somme des pressions qu'aurait chacun des constituants s'il était seul à occuper le volume de l'ensemble. Donc dans un m3 d'air humide, on retrouve la somme des masses de constituants, c'est la somme des masses volumiques de l'air sec et de la vapeur d'eau, aux pressions partielles et températures désignées.

3.2.9. Chaleur sensible et chaleur latente

La chaleur sensible est la quantité de chaleur dans l'air du à la température d'air. La chaleur latente est la chaleur dans l'air du à l'humidité d'air. Apres ceci, l'air avec la même quantité d'énergie peut être de l'air chaud sec (chaleur sensible élevée) ou de l'air humide rafraîchis.

3.2.10. 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. [13]

$$H = C_P\, T + X\, h_{1v} \tag{3.8}$$

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.

3.3. Diagramme de l'air humide

3.3.1. But :

Le but est de construire un diagramme qui permet, par une simple lecture et sans recourir au calcul, de déterminer la valeur de toutes les grandeurs caractérisant l'air humide. [16]

3.3.2. Utilisation du diagramme

Le diagramme de l'air humide permet par une simple lecture directe sans effectuer aucun calcul, de déterminer la valeur de toutes les grandeurs caractéristiques de l'air humide connaissant uniquement deux paramètres d'entre elles. [17]

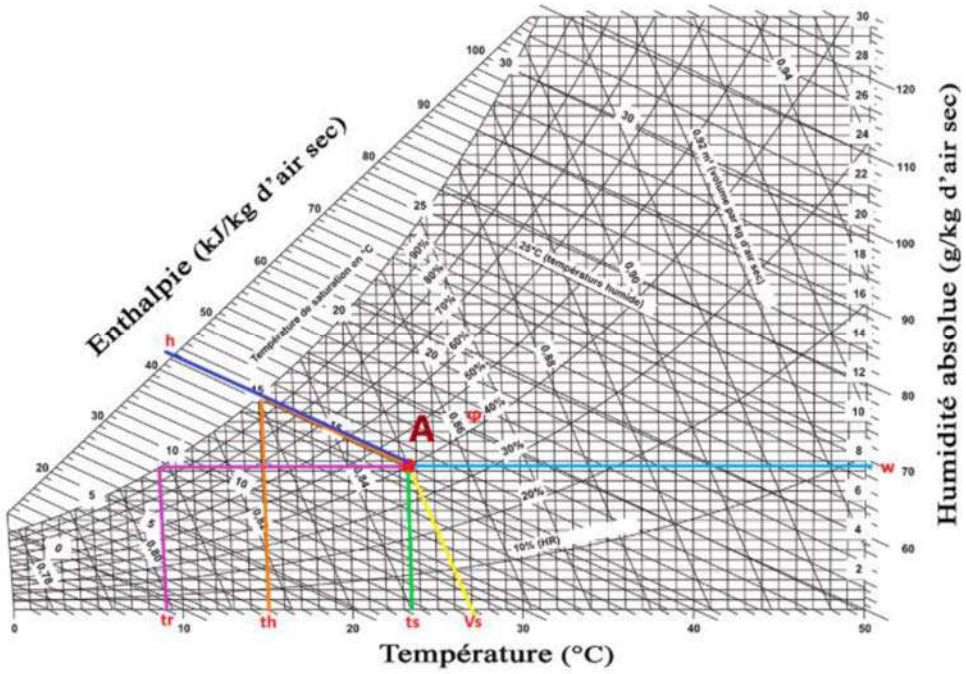


Figure 3.1 : Diagramme de l'air humide

3.4. Mesure de l'humidité

3.4.1 Hygromètre et psychromètre

3.4.1.1 Hygromètre à cheveu

La longueur d'un cheveu varie sous l'effet de la vapeur d'eau, tout particulièrement le cheveu des femmes !

L'appareil enregistre la variation de longueur d'un faisceau de cheveux suite à la variation de l'humidité.

La précision est de l'ordre de 5 %, si l'appareil est régulièrement étalonné. Autrement, la lecture n'est pas fiable;

Le temps de réponse est de l'ordre de 20 minutes.
Le cheveu peut être remplacé par un fil de soie ou de coton, voire par une fibre synthétique.

La plage normale de mesure s'étale entre 30 et 90 % et entre – 10 °C et + 50 °C de température sèche.

Il existe également des appareils électroniques qui convertissent la variation de longueur en signal de tension (mesure de résistance électrique ou magnéto-inductive). [14]

3.4.1.2. Hygromètre à cellule hygroscopique

Le plus connu est l'hygromètre à cellule hygroscopique au chlorure de lithium. Le chlorure de lithium est une solution saline (LiCl). Ses propriétés hygroscopiques lui font absorber constamment de la vapeur d'eau contenue dans l'air.

L'appareil comprend deux électrodes entourant une couche de fibre de verre imbibée de LiCl Le tout est monté sur un capteur de température.

Lorsque les électrodes sont sous tension, le courant circulant au travers du tissu imbibé de LiCl produit de la chaleur qui évapore une partie de l'eau. Par évaporation, la résistance électrique du tissu augmente (la conductivité du tissu diminue), la puissance calorifique diminue, donc aussi la température sur la sonde intérieure. Une température d'équilibre s'établit finalement sur la sonde.

Cette température est utilisée pour mesurer la pression partielle de vapeur d'eau de l'air et de là le niveau d'humidité absolue de l'air.

Cette technique réclame un entretien important, la solution de chlorure de lithium devant être régénérée régulièrement.

3.4.1.3. Hygromètre à variation de capacité

Les hygromètres électroniques à cellule capacitive sont basés sur la modification de la valeur d'un condensateur en fonction de l'humidité. Plus précisément, c'est le diélectrique du condensateur qui est sensible à l'humidité relative de l'air ambiant.

La variation de la capacité (et donc de son impédance) entraîne une variation d'un signal de tension.

L'appareil est fiable et ne demande un étalonnage que tous les 2 ans. La précision est de 3 %. Le temps de réponse est court (de l'ordre de la dizaine de secondes). Et la plage de mesure est large. Que demander de plus ? !

Si, ils ont un petit défaut : être sensible aux polluants chimiques ! On sera dès lors attentif à ne pas les nettoyer avec des solvants organiques (chlore,…).

Leur durée de vie est estimée à une dizaine d'années.

3.4.2. Psychromètre

Le fonctionnement du psychromètre mécanique est basé sur la lecture de deux températures : la température sèche ordinaire et la température dite "bulbe humide ".

Pour connaître cette dernière, on enrobe la base du thermomètre d'ouate humide. On force l'air à passer au travers de cette ouate (par un ventilateur ou par déplacement rapide dans l'air au moyen d'une fronde). L'air qui passe au travers de l'ouate s'humidifie L'évaporation de l'eau refroidit l'air. Plus il se refroidit, plus il était sec au départ !

En comparant les deux mesures, on peut déduire le taux d'humidité de l'ambiance. Par exemple, supposons que le thermomètre sec mesure une température ambiante de 20 °C, tandis que la température lue au bulbe humide soit de 16°C. En prenant l'intersection entre l'isenthalpe passant par le point 16 °C – 100 % HR, et la droite des points à 20°C, on trouve une humidité relative de 67 %.

Autrement dit, l'air ambiant à 20 °C et 67 % HR, lorsqu'il est humidifié se refroidit jusque 16 °C 100 % HR, ce que lit le thermomètre "bulbe humide".

La précision sur cette mesure est de 0,3 °C sur la température bulbe humide et de 2 % sur l'humidité relative qui s'en déduit.

Un entretien périodique est nécessaire, mais la fiabilité est bonne.

La plage normale de mesure s'étale entre – 10 °C et + 60 °C de température sèche.

Dans le psychromètre électronique, la mesure des températures est réalisée sur base des valeurs données par des thermistances à Coefficient de Température Négatif (CTN).

3.4.3. Diagramme de l'air humide

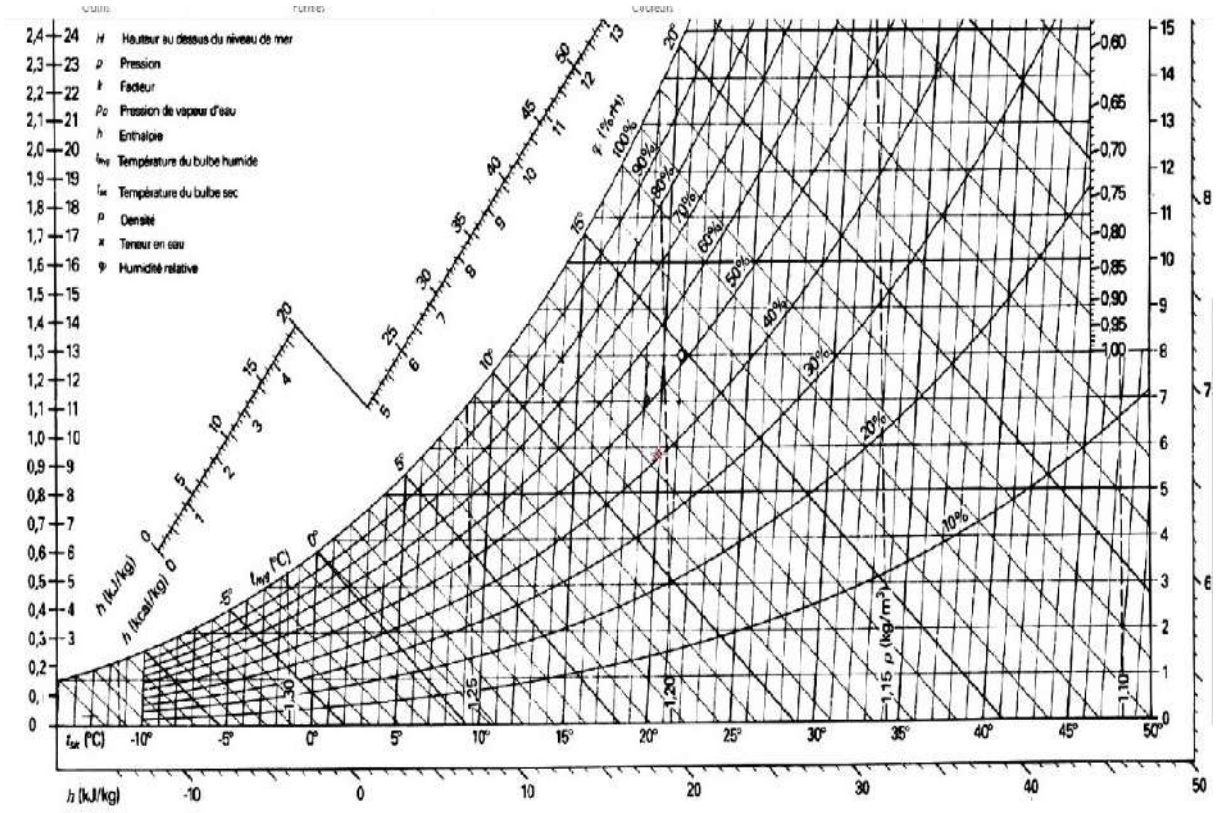


Figure 3.2 :l'air humide

3.5. Conclusion

L'air humide peut être traité comme un mélange de deux gaz parfait, vapeur d'eau et air sec. L'objectif principal de ce chapitre est de présenter les définitions de base des propriétés thermodynamiques de l'air humide. Si le mélange est refroidi à une température où la vapeur contenue dans ce mélange commence à se condenser, cette température est la température de saturation correspondant au point de rosée et la pression partielle de la vapeur est la pression de saturation à cette température.

On a présenté également une explication détaillée des diagrammes psychrométriques. Ces diagrammes illustrent graphiquement les relations entre les propriétés de l'air humide. À première vue, même un simple diagramme psychrométrique semble très complexe. Cependant, la séparation des différentes lignes et échelles simplifie la compréhension de leurs localisations, significations et usages. Dans ces diagrammes, l'air sec est utilisé comme référence.

Chapitre : 04

MODÈLES SIMPLES DU TRANSFERT ÉVAPORATIF DANS UNE TOUR

4.1.Principe d'une tour de refroidissement

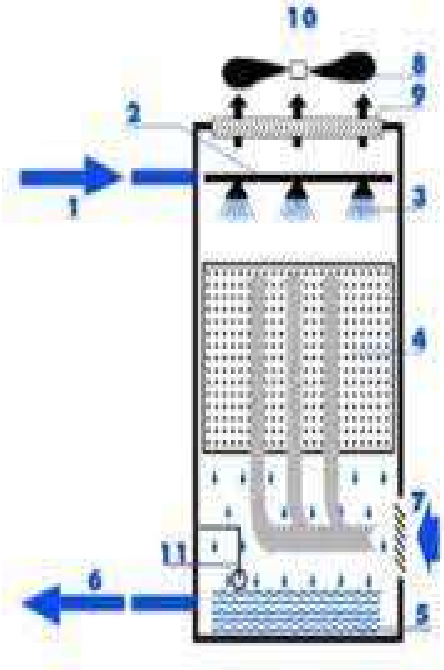


Figure 4.1 : schéma de principe d'une tour de refroidissement d'eau

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.[18]

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

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

La chaleur sortant par la base de la tour est :

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

Avec $(\dot{m}_{w1} - \dot{m}_{w2}) = \Delta \dot{m}^2_{w1}$, 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 $\Delta \dot{m}^2_{w1}$. [18]

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

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

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

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 :

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

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,[19]

Donc $V_0 = S_0\, H$ (4.10)

Et $dV_0 = S_0\, dH$ (4.11)

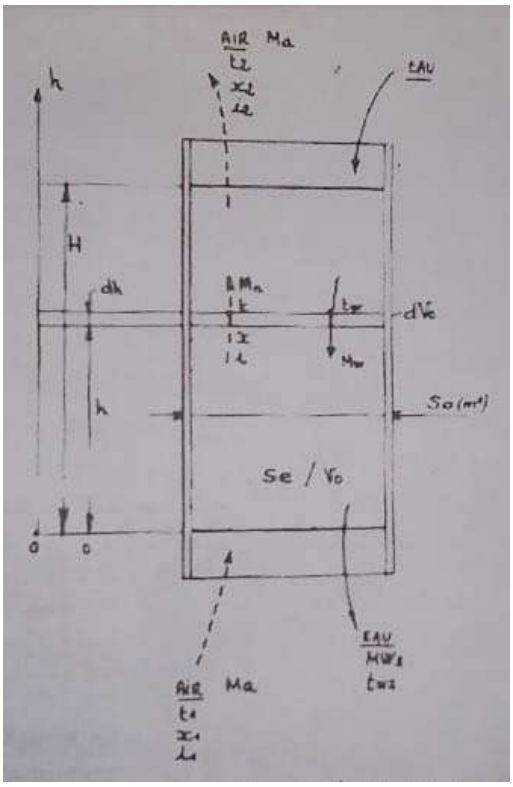


Figure 4.2 : tour théorique à contre-courant

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 $S_e = a\, S_0\, H$ (4.13)

Et $dS_e = a\, S_0\, dh$ (4.14)

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

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

$d\dot{m}_w = \dot{m}_a\, dw$ (4.15)

$(\dot{m}_{w1} - \dot{m}_{w2}) = \dot{m}_a(w_1 - w_2)$ (4.16)

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 :

$\dot{m}_a\, di = \dot{m}_w C_{pw}\, dT_w$ (4.17)

Ou: $\dot{m}_a(i_2 - i_1) = \dot{m}_w C_{pw}(T_{w1} - T_{w2})$ (4.18)

Et lors de transfert de l'eau:

$\dot{m}_a(i - i_1) = \dot{m}_w C_{pw}(T_{w1} - T_w)$ (4.19)

La formule (4.19) donne:

$$\frac{di}{dT_w} = \left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a}\right) C_{pw} \quad (4.20)$$

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 :

$$\frac{i_2 - i_1}{T_{w1} - T_{w2}} = \left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a}\right) C_{pw} \quad (4.21)$$

A noter que la valeur $\left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a}\right) C_{pw}$ est une constante. [19]

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 :

$$\left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a} C_{pw}\right) \max = \left(\frac{i_{2(stw1)} - i_1}{T_{w1} - T_{w2}}\right) \quad (4.22)$$

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: $C_{pa}^{v} = (C_{pa} + C_{pv}\, w)$

Sec vapeur

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

$$i = C_{ap}T + C_{pv}wT + L_v w \qquad (4.23)$$

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

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

Soit : $i \cong 591.7w + 0.24\, T$(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: $\dot{m}_w C_{pw} dT_w = K_w dS_e (T_w - T_{sf})$ (4.26)

Donc $\dot{m}_w C_{pw} dT_w = K_w\, a\, S_0\, dh\, (T_w - T_{sf})$ (4.27)

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

$\dot{m}_a C_{pa} dT = K_w dS_e (T_{sf} - T)$ (4.28)

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

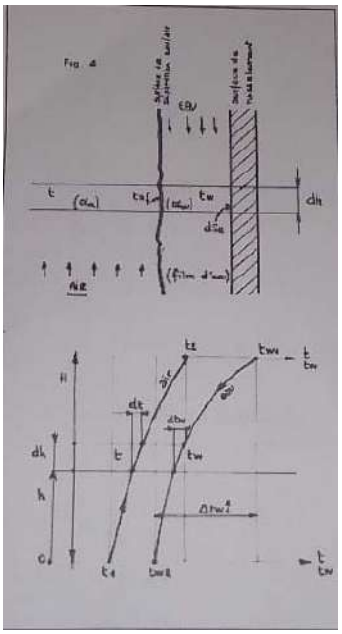


Figure 4.3: illustration du transfert de chaleur et diagramme pour TR

D. Equation de transfert de masse

$$\dot{m}_a \, dw = \, h_w dS_e (w_{sf} - w)$$
(4.30)

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

$$\dot{m}_a \, dw = h_w a \, S_0 \, dh (w_{sf} - w) \qquad (4.31)$$

E. Relation de Lewis

LEWIS a établi la relation de l'échange massique comparé àl'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.[18]

Dès lors, la relation (4.34) de transfert de masse qui à son tour engendre de la chaleur qui devient :

$$\dot{m}_a C_{pa} dT = h_w C_{pa} a \, S_0 \, dh (T_{sf} - T) \qquad (4.32)$$

Soit :

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

Transformons la relation (4.31) en multipliant membre à membre par L_v ; on obtient :

$$\dot{m}_a L_v dw = h_w a\, S_0\, dh\, L_v(w_{sf} - w) \quad (4.34)$$

Soit

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

Additionnonsmembre à membre les relations (4.33) et (4.35) ; on obtient

$$\dot{m}_a\left(C_{pa} dT + L_v dw\right) = h_w a\, S_0\, dh\left(C_{pa} T_{sf} - L_v w_{sf}\right) - \left(C_{pa} dT + L_v w\right) \quad (4.36)$$

La relation (4.37) se résume donc à :

$$\dot{m}_a di = h_w a\, S_0\, dh(i_{sf} - i) \quad (4.37)$$

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

$$H = -\left(\frac{\dot{m}_a}{h_w a\, S_0}\right) \ln \frac{(i_{sf2} - i_2)}{(i_{sf1} - i_1)} \quad (4.38)$$

L'équation (4.39) peut s'appliquer si, dans la zone d'étude, on peut considérer la variation de i_{st}linéaire en fonction de T_{sf} .[21]

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.[20]

Divisons membre à membre les équations (4.27),(4.37) et compte tenu de (4.20)

$$\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a} C_{pa} \frac{dT_w}{di} = 1 \quad (4.39)$$

Donc : $\left(\frac{i_{sf} - i}{T_{sf} - T_w}\right) = -\frac{K_w}{h_w}$ (4.40)

4.4. Résolution par nombre de MERKEL

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

L'équation fondamentale dite «des tours», soit (4.38), donne :

$$\left[\frac{di}{i_{sf} - i}\right] = \left[\frac{h_w\, a\, S_0}{m_a}\right] dh \quad (4.41)$$

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 :

$$\frac{i_{stw}-i}{i_{sf}-i}=\frac{h_w}{h_{w0}} \quad (4.42)$$

Dès lors, l'équation(4.41) devient :

$$\int_1^2 \frac{di}{i_{stw}-i}=\frac{h_{w0}\, a\, S_0\, H}{\dot{m}_a} \quad (4.43)$$

Le groupement sans dimension $\frac{h_{w0}\, a\, S_0\, H}{m_a}$ est représenté par le symbole NMe_0(Nombre de MERKEL).Il contient toutes les variables de construction de la tour

$$NMe_0=\frac{h_{w0}\, a\, S_0\, H}{\dot{m}_a}=\frac{h_{w0}\, a\, V_0}{\dot{m}_a}=\frac{h_{w0}\, S_e}{\dot{m}_a}=\frac{h_{w0}\, a\, H}{V_{ma}} \quad (4.44)$$

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 :

$$NMe_0=\int_1^2 \frac{di}{i_{stw}-i} \quad (4.45)$$

- 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 :

$$H=\frac{\dot{m}_a}{h_{w0}\, a\, S_0}\int_1^2 \frac{di}{i_{stw}-i} \quad (4.46)$$

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.[18]

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 de T_w entre $T_{w1}et\ T_{w2}$.

La courbure dei $= f(T_w)$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 :

$$\int_1^2 \frac{di}{i_{stw}-i} = \frac{i_2-i_1}{(i_{stw}-i)_{moy}} \quad (4.47)$$

La hauteur de la tour sera :

$$H = \frac{\dot{m}_a}{h_{w0}\, a\, S_0} \frac{i_2-i_1}{(i_{stw}-i)_{moy}} \quad (4.48)$$

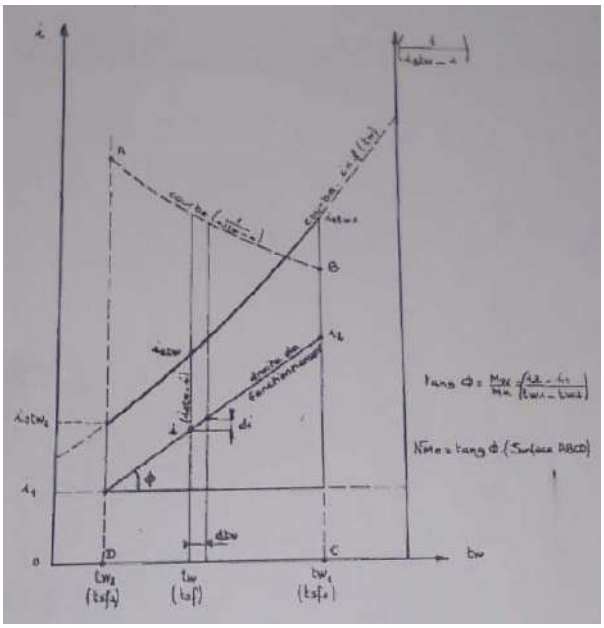


Figure 4.4 : solution de MERKEL

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

$$M_a\, di = h_{w0}\, a\, S_0\ dh(i_{sf} - i) \quad (4.49)$$

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

On aura $$\int_{T_{w2}}^{T_{w1}} \frac{dT_w}{i_{sf}-i} = \frac{NMe}{\tan\emptyset} \quad (4.50)$$

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 facileà déterminer.

On peut tracer$\frac{1}{i_{sf}-i} = f(T_w)$, et on obtient l'intégrale.[21]

Chapitre : 05

TOUR AÉRORÉFRIGÉRANTE

HUMIDE OUVERTE

5.1.Domaine technologique

L'outil développé est destiné à modéliser de façon simplifiée le fonctionnement d'une tour aéroréfrigérante humide à contre-courant ou à courants croisés à partir d'un point de fonctionnement donné. On appelle tour aéro-réfrigérante humide, une tour de refroidissement qui fait office d'échangeur direct air- eau (Figure 1).

Les tours sont généralement composées d'une rampe de distribution d'eau qui permet d'asperger l'eau sur un "packing", c'est à dire un ensemble de feuilles obtenues par collage permettant d'augmenter les échanges air-eau. L'eau tombe ensuite dans un réservoir tandis que l'air circule à contre-courant. L'eau se trouve refroidie par l'air. Sa température en sortie de tour tend vers la température humide de l'air. Quant à l'air, il est humidifié et sa température est généralement augmentée.

L'humidification de l'air entraîne une perte d'eau dans le circuit de l'ordre de 1 à 4% du débit d'eau total.[22]

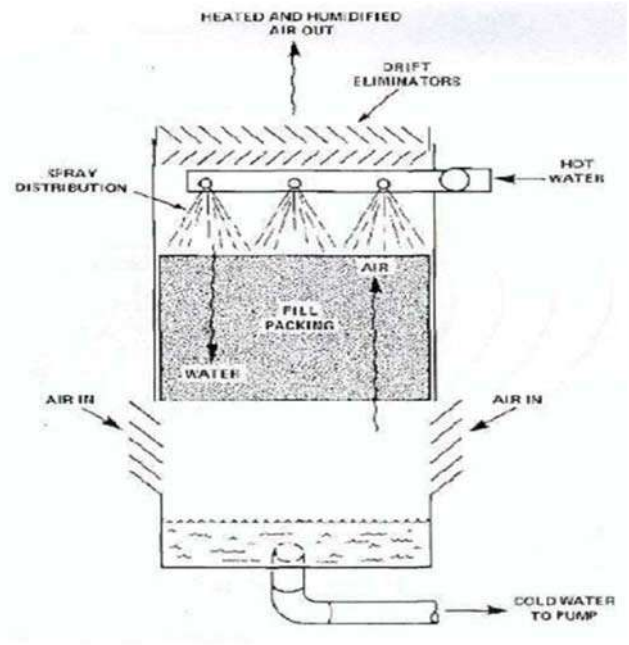


Figure 5.0: tour de refroidissement ouverte

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

5.2. Description générale

Les tours de refroidissement se présentent le plus souvent sous la forme d'échangeurs à contre-courant ou à courants croisés. Dans le cas des tours à courants croisés, la géométrie du packing se présente généralement sous la forme de lattes placées en quinconce sur lesquelles l'eau tombe par gravité. Si on peut considérer l'air comme non brassé, il ne paraît pas évident que l'eau soit un fluide brassé.

L'[ASHRAE, 2000] donne un exemple de calcul de tour à courants croisés avec une différence de température de l'eau en sortie de 1,5°C. Cette valeur montre que l'eau est non brassée. Cependant, pour des commodités de calcul, on considérera par la suite l'eau comme un fluide brassé. Le modèle de [BRAUN, 1991] est utilisé pour caractériser les tours aéroréfrigérantes humides.

Il est fondé sur un modèle d'efficacité d'échangeur sec. L'eau est considéré comme de l'air à saturation à la températuredе l'eau. L'enthalpie de l'air à saturation est linéarisée.Les évolutions subies par l'air et l'eau peuvent être représentées dans un diagramme de l'air humide (Figure 2). [23]

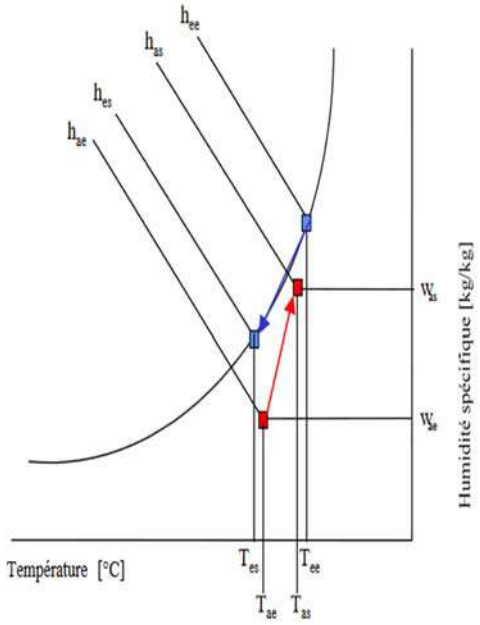


Figure 5.1: **Etats en entrée et en sortie de l'air et l'eau sur un diagramme de l'air humide**

5.3. Nomenclature

Entrée :

Nom	Description	Unité	min	max	Défaut
$\dot{m}_a$	Débit spécifique d'air humide	kg/s	0	$+\infty$	
$\dot{m}_{ee}$	Débit spécifique d'eau	kg/s	0	$+\infty$	
T_{ae}	Température d'air à l'entrée	°C	10	60	
T_{hae}	Température humide de l'air à l'entrée	°C	10	30	
T_{ee}	Température d'eau à l'entrée	°C	10	60	

w_{ae}	Humidité spécifique de l'air à l'entrée	-	0	0.05	
c	Coefficient pour la détermination du NUT tel que $NUT = c \cdot \left(\frac{\dot{m}_{ee}}{\dot{m}_{ae}}\right)^n$	-	1	3	1.2
n	Exposant pour la détermination du NUT tel que$NUT = c \cdot \left(\frac{\dot{m}_{ee}}{\dot{m}_{ae}}\right)^n$	-	0.2	0.6	0.4
Pe	Puissance électrique des ventilateurs	w	0	$+\infty$	
N_{cycle}	Cycle de concentration	-	>1	5	2
CONFIGHX	Configuration (Contre-courant ou courants croisés)	-	1	2	

Sorties :

Nom	Description	Unité	Min	max	défaut
T_{as}	Température d'air en sortie	°C	-20	100	
T_{es}	Température d'eau en sortie	°C	-15	50	
w_{as}	Humidité spécifique de l'air en sortie	-	0	0.05	
Q_{tot}	Puissance échangée totale	W	0	$+\infty$	
$\dot{C}_e$	Consommation d'eau	kg/s	0	$+\infty$	
Pe	Puissance électrique consommée par les ventilateurs	-	0	$+\infty$	

Constantes :

Nom	Description	Unité	Min	max	défaut
C_{pa}	chaleur massique de l'air sec	J/kg°C			1006
C_{pv}	chaleur massique de la vapeur d'eau	J/kg°C			1830
h_{fg}	chaleur de vaporisation de l'eau (l'unité utilisée est le J/kg)	J/kg			2501

Indice :

ae: air entrant

ee: eau entrant

as: air sortant

es: eau sortant

5.4. Description mathématique

5.4.1. Caractérisation de la tour

Il n'existe pas de corrélation générale pour les coefficients de transfert de masse et de chaleur dans les toursaéroréfrigérantes humides. Le coefficient d'échange massique est habituellement corrélé sous la forme suivante :

$$NUT = \frac{h_m \, a \, V_t}{\dot{m}_a} = c \left(\frac{\dot{m}_e}{\dot{m}_a}\right)^n$$

Les coefficients c et n ne sont généralement pas donnés par les constructeurs. Pour déterminer ces coefficients, il faut soit connaître deux points de fonctionnement, soit connaître les caractéristiques du packing.[24]

- Calcul à partir de deux points de fonctionnement (avec des débits d'air ou des débits d'eau différents)

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

$$etc=\exp\left(\ln(NUT1)-n\ln\left(\frac{\dot{m}_{el}}{\dot{m}_{al}}\right)\right)$$

Avec NUT1 et NUT2 calculés par itération. La méthode consiste à calculer, pour une valeur initiale de NUT, le débit d'eau en sortie (Equation (14)) et la puissance totale échangée en l'air et l'eau. A partir de cette donnée de puissance, on calcule l'efficacité (Equation (10)). On détermine un nouveau NUT à partir des formules reliant le nombre d'unité de transfert (NUT) à l'efficacité :

$NUT=\frac{1}{C-1}\ln\left(\frac{\varepsilon-1}{C\cdot\varepsilon-1}\right)$pour une tour à contre-courant

On recommence le calcul à partir du débit jusqu'à convergence entre le NUT supposé et le NUT déduit.

- Données par défaut
  c=1,2 et n=0,4

On pourra retrouver des données plus précises en fonction du type de packing [KREITH, 1999].

5.4.2.Calcul des performances de la tour

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.
- Les équations décrivant les échanges de masse et de chaleur dans la tour sont les suivantes :

$$dh_a=\frac{\bar{h}_m\, a\, dV}{\dot{m}_a}\cdot\left(h_a^{sat}(T_e)-h_a+\left(L_e^{\frac{2}{3}}-1\right)\cdot\left(h^{sat}(T_e)-h_a-(w_{sat}-w_a)\cdot(h_{fg}+c_{pv}\cdot T_e)\right)\right) \quad (5.1)$$

$$dw_a = \frac{\bar{h}_{m\ a\ dV}}{\dot{m}_a} \cdot (w_{sat}(T_e) - w_a) \quad (5.2)$$

$$dT_e = \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}_a}\left[\frac{dh_a}{C_{pe}} - dw_a \cdot T_e\right] \quad (5.3)$$

$$d\dot{m}_e = \dot{m}_a dw_a \quad (5.4)$$

Où a représenté la surface de contact entre l'air et l'eau par unité de volume de la tour en [m²/m³],

L'est le nombre de Lewis défini comme suit $L_e^{2/3} = \frac{\bar{h}_c}{(c_{pa}+w_a \cdot c_{pv})\cdot \bar{h}_m}$

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

$$NUT = \frac{\bar{h}_{m\ a\ V_T}}{\dot{m}_a} \quad (5.5)$$

Si l'on considère un nombre de LEWIS de 1 dans le domaine considéré, l'équation (5.1) devient:

$$dh_a = \frac{\bar{h}_{m\ .a} \cdot dV}{\dot{m}_a}(h_{sat}(T_e) - h_a) \quad (5.6)$$

D'autre part, en négligeant les pertes d'eau devant le débit d'eau en entrée, l'équation (5.3) se réduit à :

$$dT_e = \frac{\dot{m}_e \cdot dh_a}{\dot{m}_a \cdot C_{pe}} \quad (5.7)$$

Cette équation peut être réécrite en enthalpie en introduisant la notion d'enthalpie de l'air à saturation à la température de l'eau, comme suit :

$$dh_{se} = \frac{\dot{m}_a C_{ps}\ dh_a}{\dot{m}_e \cdot C_{pe}} \quad (5.8)$$

$$\text{Ou} \quad C_{PS} = \frac{dh_s}{dT}\Big|_{T=Te} \quad (5.9)$$

C_{ps}est une chaleur spécifique massique qui sera appelée chaleur spécifique massique à saturation. Les équations (5.6) et (5.8) sont équivalentes à celles d'un échangeur "sensible". On suppose que la chaleur spécifique à saturation est constante sur l'intervalle de fonctionnement de la tour. Par la méthode NUT-ε, le transfert de chaleur peut être écrit comme suit :

$$\dot{Q} = \varepsilon_a \cdot \dot{m}_a \cdot (h_{s,ee} - h_{ae}) \quad (5.10)$$

Tour à contre-courant	$\varepsilon = \dfrac{1 - \exp[-(1-C)\cdot NUT]}{1 - C\cdot\exp[-(1-C)\cdot NUT]}$
Tour à courants croisés	$\varepsilon = \dfrac{1}{C}\cdot\left(1 - \exp\left(-C\cdot(1-\exp[-NUT])\right)\right)$

AvecNUT=$\frac{\bar{h}_m\, a\, V_T}{\dot{m}_a}$, $C = \frac{\dot{C}_a}{\dot{C}_e}$ et $\dot{C}_a = \dot{m}_a$, $\dot{C}_e = \dot{m}_e \frac{C_{pe}}{C_{ps}}$.

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 :

$$h_{as} = h_{ae} + \varepsilon_a(h_{see} - h_{as}) \tag{5.11}$$

$$T_{es} = \frac{\dot{m}_{ee}\cdot C_{pe}\cdot T_{ee} - \dot{m}_a(h_{as} - h_{ae})}{\dot{m}_{es}\cdot C_{pe}} \tag{5.12}$$

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

$$C_{pe} = \frac{h_{see} - h_{ses}}{T_{ee} - T_{es}} \tag{5.13}$$

En intégrant l'équation (5.4), on trouve :

$$\dot{m}_{es} = \dot{m}_{ee} - \dot{m}_a \cdot (w_{as} - w_{ae}) \tag{5.14}$$

Les pertes d'eau sont de l'ordre de 1 à 4% du débit d'eau entrant.
L'humidité spécifique de l'air est calculée par intégration de l'équation (5.2) :

$$w_{as} = w_{ae} + (w_{ae} - w_{sm})\cdot\exp(-NUT) \tag{5.15}$$

w_{sm}représente une humidité spécifique moyenne à saturation. Elle est calculée à partir de la connaissance de l'enthalpie moyenne à saturation. Elle est déterminée par intersection entre la courbe d'iso enthalpie à h_{sm}et la courbe de saturation dans le diagramme de l'air humide. L'enthalpie moyenne à saturation est déterminée comme suit :

$$h_{sm} = h_{ae} + \frac{h_{as} - h_{ae}}{1 - \exp(-NUT)} \tag{5.16}$$

La résolution du problème requiert une méthode itérative. On suppose une température initiale de l'eau en sortie de tour et on itère sur cette valeur jusqu'à convergence. Sachant que la température de l'eau en sortie doit approcher la température humide de l'air, on choisit cette dernière comme valeur initiale. La convergence se fait au bout de peu d'itérations.[23]

Le programme donne le choix d'introduire un nombre de Lewis différent de 1 comme préconisé par [BRAUN, 1991]. Le système sera résolu en considérant l'équation suivante :

$$dh_a = \frac{\bar{h}_m .a \cdot dV}{\dot{m}_a} L_e^{2/3} \cdot (h_{sat}(T_e) - h_a) \quad (5.17)$$

L'équation (5.16) devient :

$$h_{sm} = h_{ae} + \frac{h_{as} - h_{ae}}{1 - \exp(-NUT \cdot L_e^{2/3})} \quad (5.18)$$

Cela dit, au regard de l'équation (5.1), il n'est pas assuré que cette méthode donne de meilleurs résultats. L'efficacité de la tour est écrite ainsi :

$$\gamma = \frac{T_{ee} - T_{es}}{T_{ee} - T'_{ae}} \quad (5.19)$$

Où T'_{ae} est la température humide de l'air à l'entrée de la tour.

5.4.3. Calcul de la consommation d'eau de la tour

Dans les tours de refroidissement humides, le refroidissement est dû à l'évaporation d'une partie de l'eau véhiculée. L'évaporation conduit à une augmentation de la concentration de sels dissous, des impuretés etdes agents biologiques dans l'eau en circulation. L'augmentation de la concentration doit être contrôléepour éviter l'entartrage, la corrosion et l'encrassement biologique des tours. En effet, l'entartrage et l'encrassement diminuent les performances des tours. Pour cela une partie de l'eau doit être renouvelée par un système dit de déconcentration (appelé aussi purge ou drainage).

La déconcentration est exprimée de la façon suivante :

$$N_{cycle} = \frac{(\text{débit d'évaporation + débit de déconcentration})}{(\text{débit de déconstration})} \quad (5.20)$$

Les pertes d'eau par évaporation sont estimées comme suit :

Débit d'évaporation $= m_{ee} - m_{es}$ (5.21)

Le débit total d'eau consommée s'écrit donc :

$\dot{C}_e$ = débit d'évaporation + débit de déconcentration $\frac{N_{cycle}}{N_{cycle}-1} débit\ de\ d'évaporation$ (5.22)

De faibles cycles de concentration, 1<N_{cycle}<1,5, conduisent à des consommations d'eau importantes. Connaissant la composition de l'eau neuve, son pH et sa dureté et les valeurs admissibles on peut déterminer le débit d'eau de déconcentration à partir de l'évaporation. Notons qu'un drainage à partir de la mesure instantanée de la concentration en sels permet

d'ajuster au mieux le débit d'eau. Cette solution peut réduire de 46% la consommation d'eau par rapport à un drainage continu.

Le cycle de concentration se situe entre 1 à 4, il ne doit jamais dépasser 5. Par exemple un cycle de concentration égal à 2 revient à déconcentrer au rythme de l'évaporation.
La tour doit être légalement vidangée une fois par an. La consommation d'eau due à cette vidange peut être négligée.

5.5. Algorithmes

5.5.1. PREP_TAO

- Calcul des coefficients de caractérisation des échanges massiques dans la tour à partir de deux points defonctionnement
    - Calcul de l'efficacité pour chaque point
    - Calcul du NUT pour chaque point
    - Calcul des coefficients c et n

5.5.2. TAO

- 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
- Supposition : Température de l'eau en sortie, Tes, est égale à la température de l'air humide en entrée
- N=0
- TANT QUE (N<100)

● 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 d'un échangeur à contre-courant ou à courants croisés
● Calcul de l'enthalpie de l'air en sortie
● Calcul d'humidité spécifique de 'air en sortie
● Calcul de la température de l'eau en sortie, Tes', à partir du bilan thermique
●N=N+1
●SI ($Tes - Tes'$)>0.001

$$Tes = Tes'$$

● SINON
fin
●FIN SI

- FIN TANT QUE
- 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 à partir de la formule (5.22).

5.6.Résultats et discussion

5.6.1. Variations suivant le débit d'eau à refroidir

En premier lieu, nous avons reporté les variations de la température de sortie de l'air et de l'eau en fonction du débit d'eau à l'entrée, figure 5.2 en mode humide .On peut déduire que pour les faibles valeurs du débit d'eau à refroidir, il y a une différence entre les températures d'air et d'eau en sortie, mais pour des valeurs plus élevées, il y a une égalité entre les deux températures de sortie. Cela signifie qu'une quantité plus importante n'est pas nécessaire pour emmener la charge de chaleur prescrite.

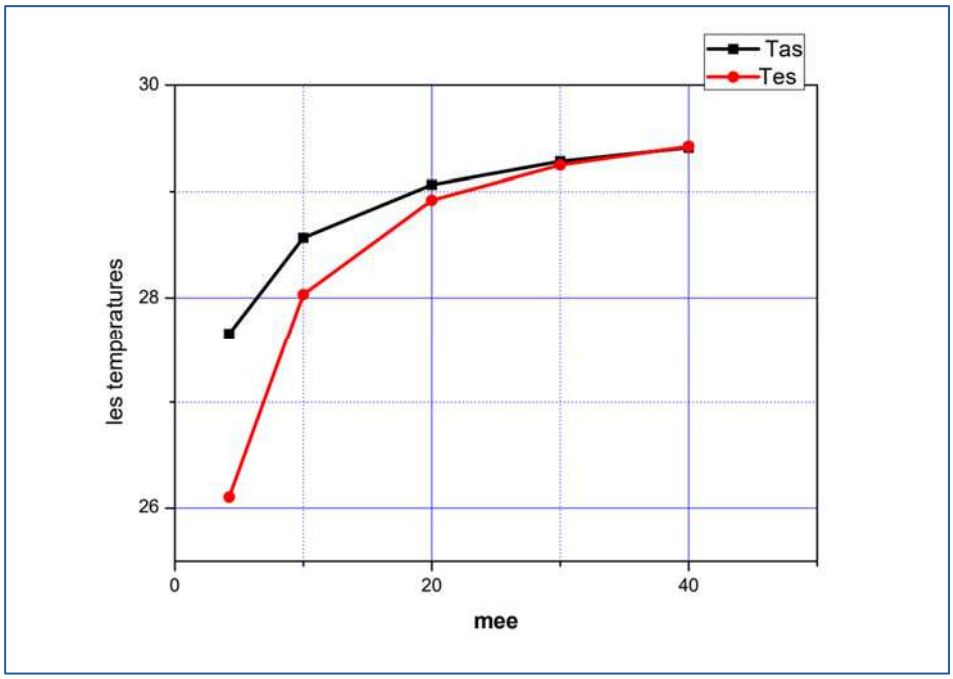


Figure 5.2 :évolution des températures en fonction de débit d'eau entrée

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

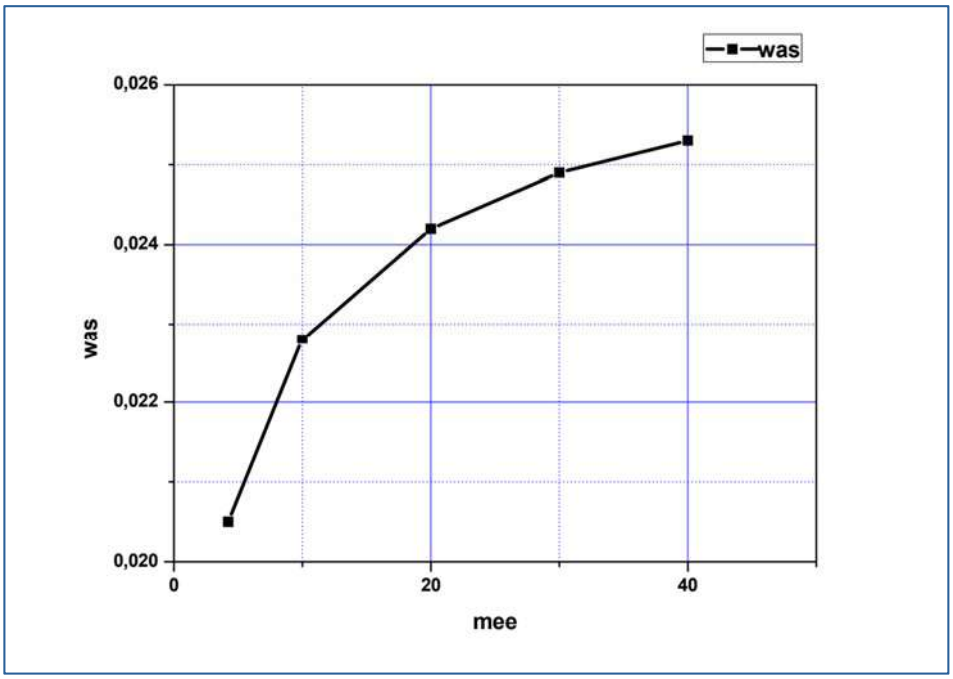


Figure 5.3 : évolution des humidités de l'air à la sortie en fonction de débit d'eaux àl'entré

La puissance échangée suit la même allure que les températures pour le régime humide figure 5.4

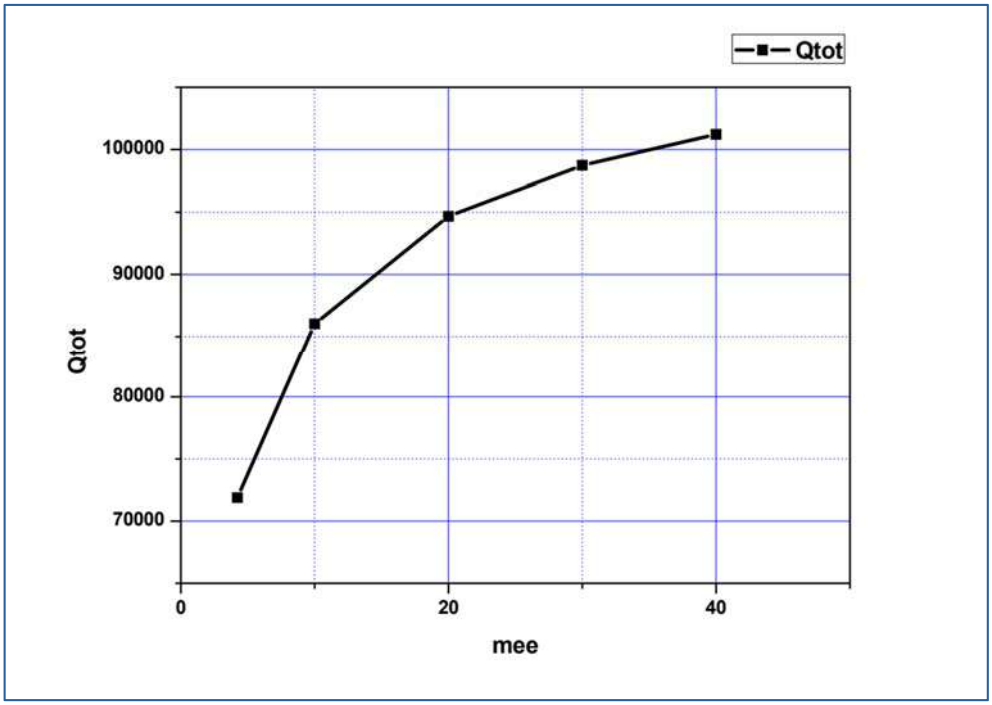


Figure 5.4 : évolution des puissances en fonction de débit d'eau àl'entré

5.6.2. Variations suivant le débit d'air

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.

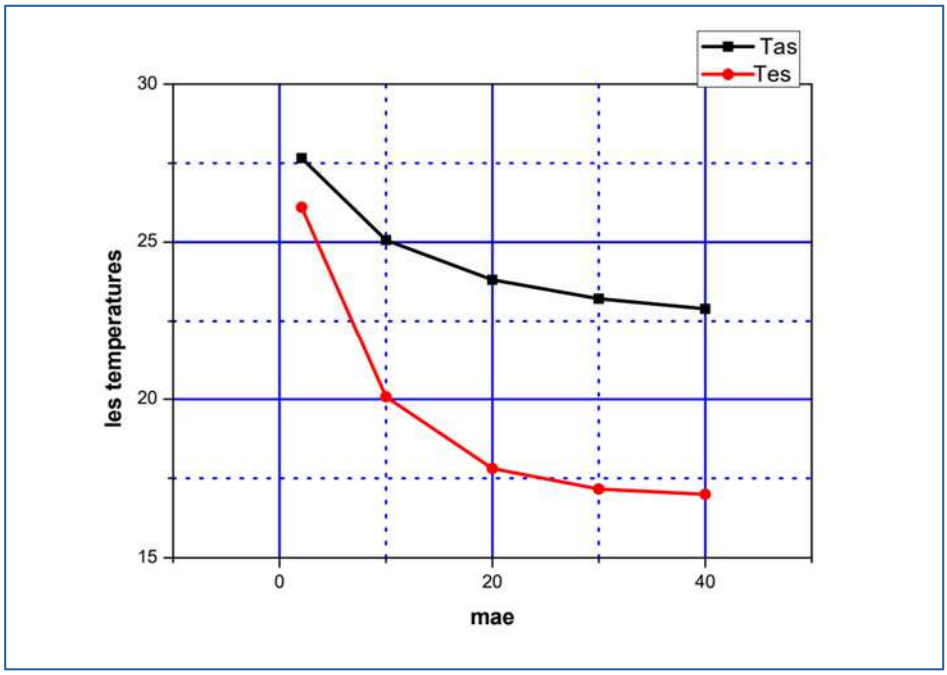


Figure 5.5 : évolution des températures en fonction de débit d'air à l'entré

Dans la figure 5.6 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 entrainées.

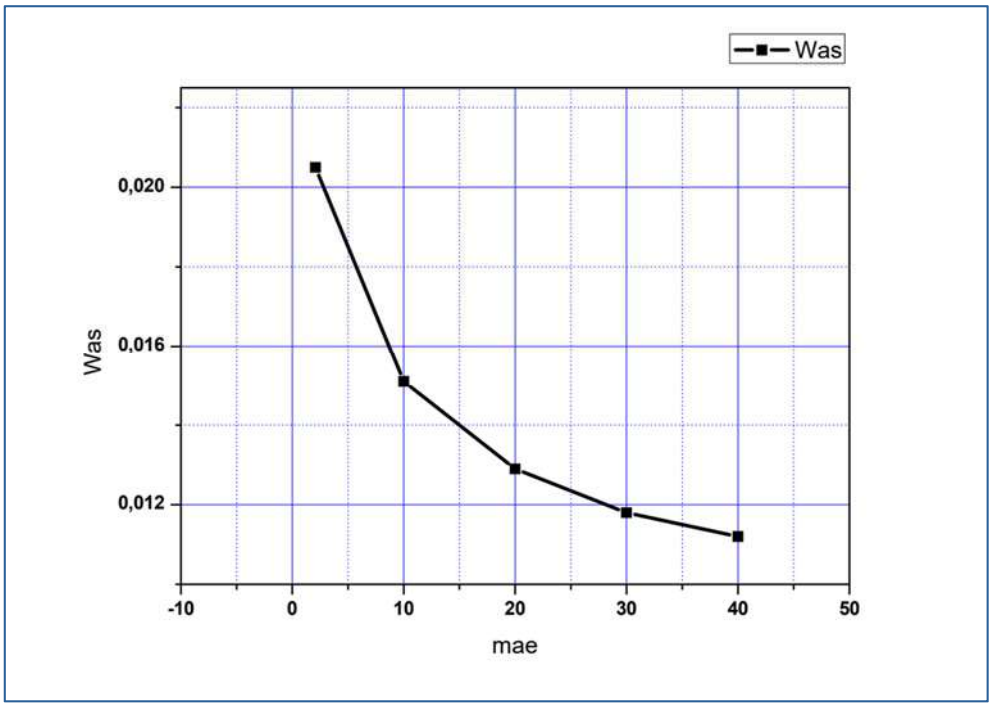


Figure 5.6 : évolution dès l'humiditéde l'air à la sortie en fonction de débit d'air à l'entré

L'échange total de chaleur est d'un niveau important suivant les variations de débit d'air.

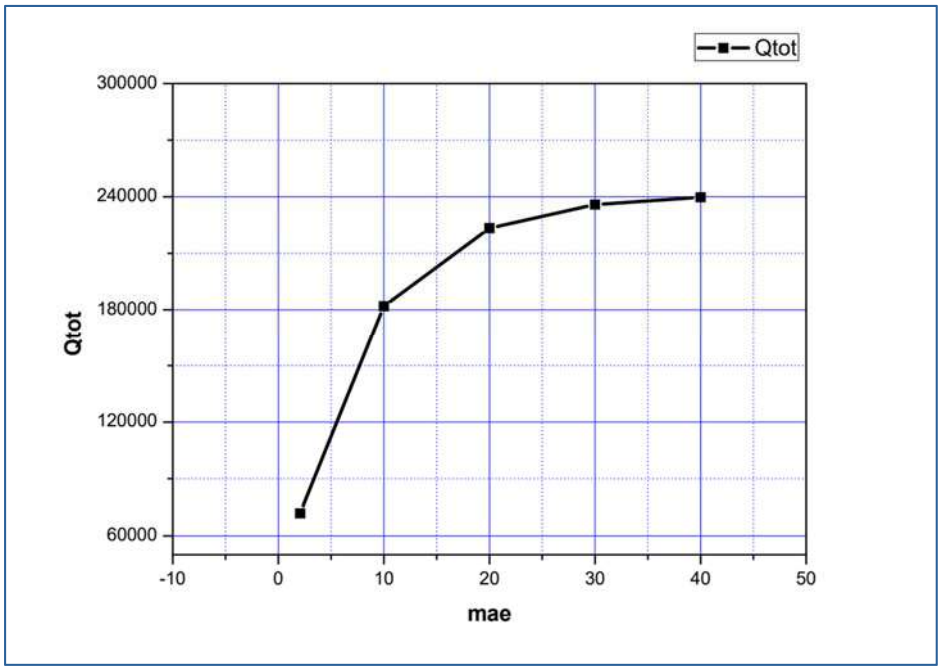


Figure 5.7 : évolution des puissances en fonction de débit d'air à l'entré

5.6.3. Variations suivant la température d'entrée d'eau

En ce qui concerne les variations des gradeurs ciblées en fonction de la température de l'eau à refroidir en entrée, nous observons que cette dernière n'affecte pas les températures en sortie de l'air et de l'eau, à condition qu'elle soit basse, figure 5.8 Cependant, il ya un écart entre les deux températures de sortie, si l'eau à refroidir entre avec une température supérieure à 35°C. Pour le premier intervalle, les niveaux d'évaporation sont plus faibles, mais pour le second intervalle, il y a une nécessité d'évacuation de chaleur importante et par conséquent une évaporation plus grande entrainant une température d'air à la sortie élevée. L'humidité absolue de l'air est montré à la figure 5.9on reporte ces évolutions pour la chaleur échangée et le niveau de consommation d'eau. Figure 5.10.

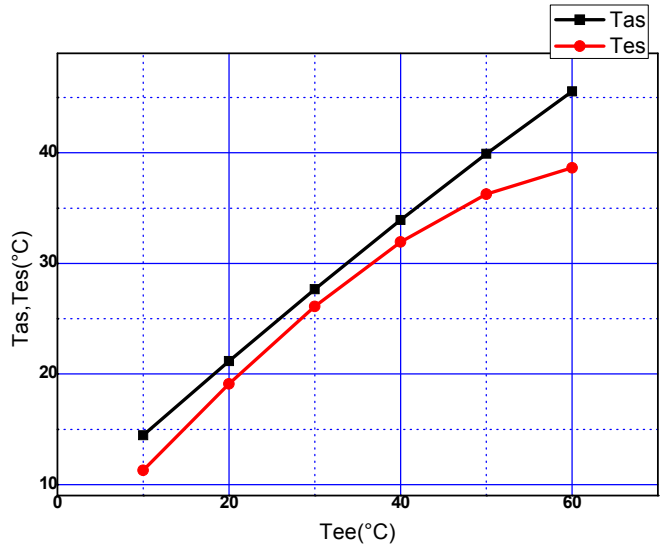


Figure 5.8 : évolution des températures en fonction de la température d'entrée d'eau

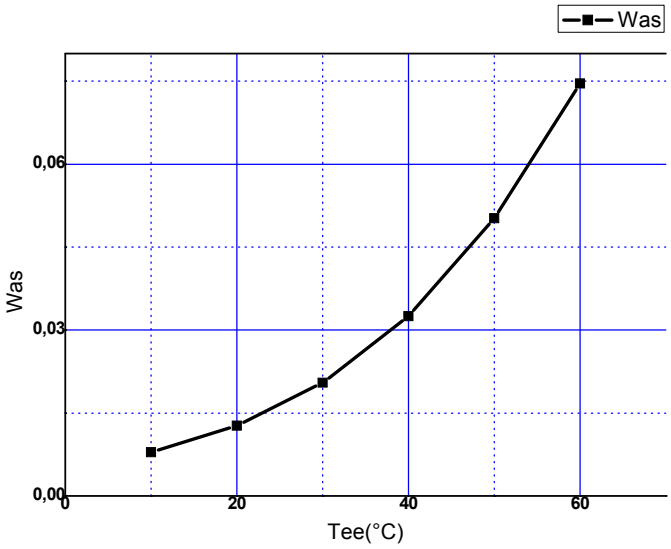


Figure 5.9 : évolution dès l'humiditéde l'air à la sortie en fonction de la températured'entrée d'eau

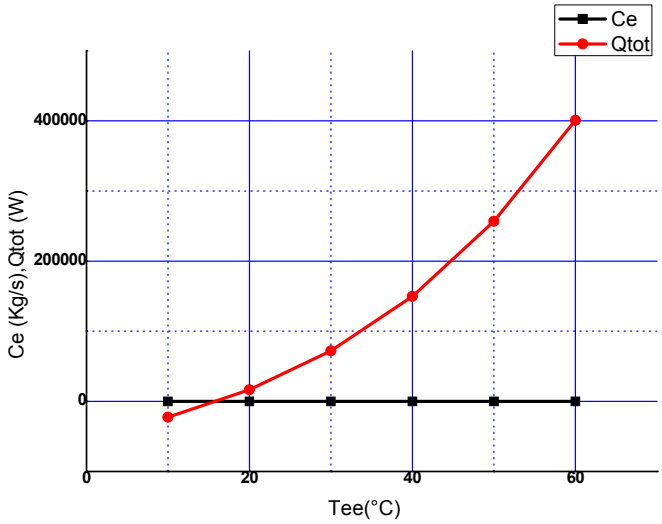


Figure 5.10 : évolution des consommations et les puissances en fonction de la température d'entrée d'eau

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

La variation possible de la température de l'air à l'entrée n'influe que peu sur latempérature de l'eau à refroidir à la sortie, figure 5.11 de 4-5°C en régime humide 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.

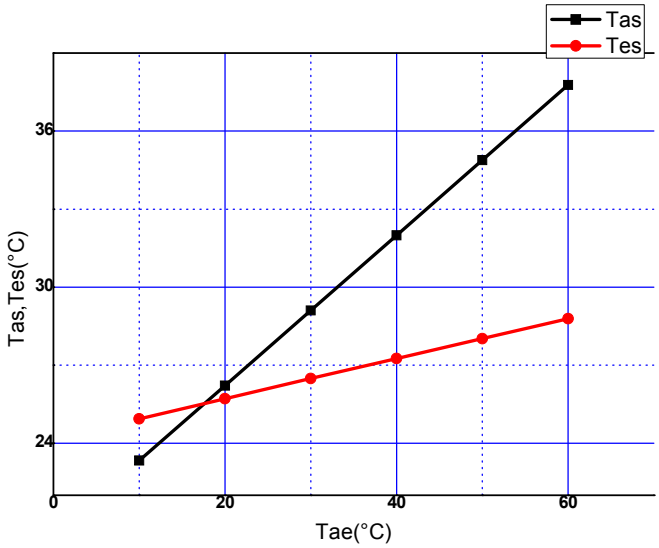


Figure 5.11 :évolution des températures en fonction de la température d'entrée d'air

L'humidité absolue de l'air évolue avec la température d'entrée d'air mais de façon peu importante, figure 5.12, car un air plus chaud se charge plus en vapeur.

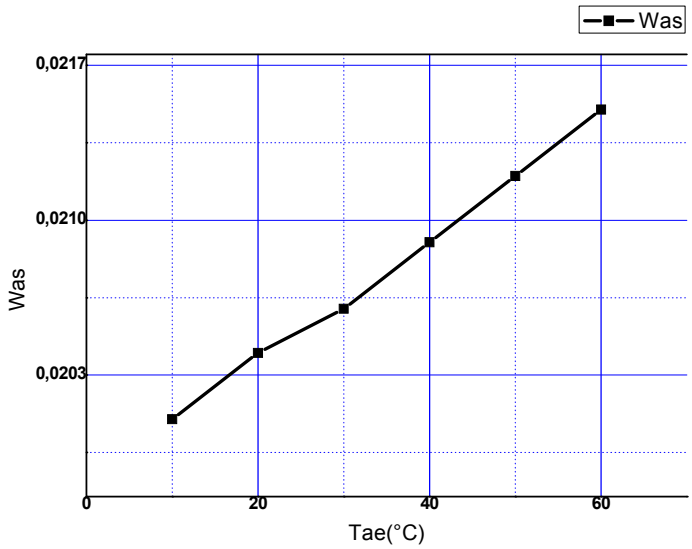


Figure 5.12 :évolution dès l'humiditéde l'air à la sortieen fonction de la température d'entée d'air

Les écarts de températures étant modérées, puisqu'on a une température d'entrée d'air plus élevée, l'échange de chaleur diminue fortement. Ce qui est montré à la figure 5.13. On note aussi une consommation croissante avec la température de l'air à l'entrée.

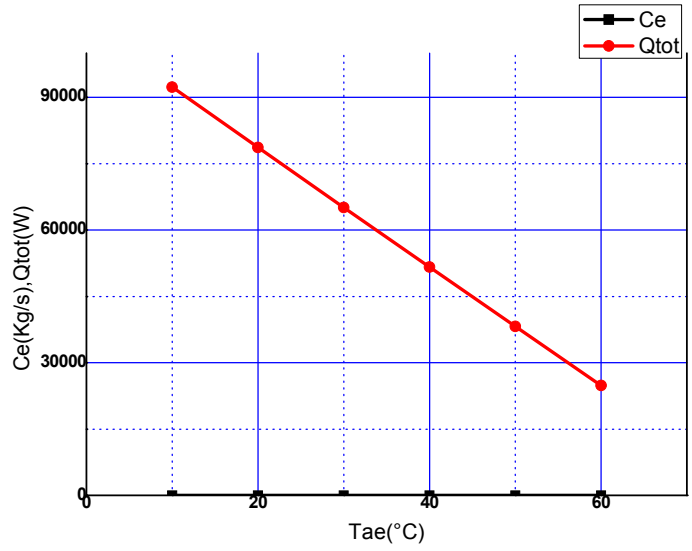


Figure 5.13 : évolution desconsommations et les puissances totales en fonction de la température d'entée d'air

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

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 5,14

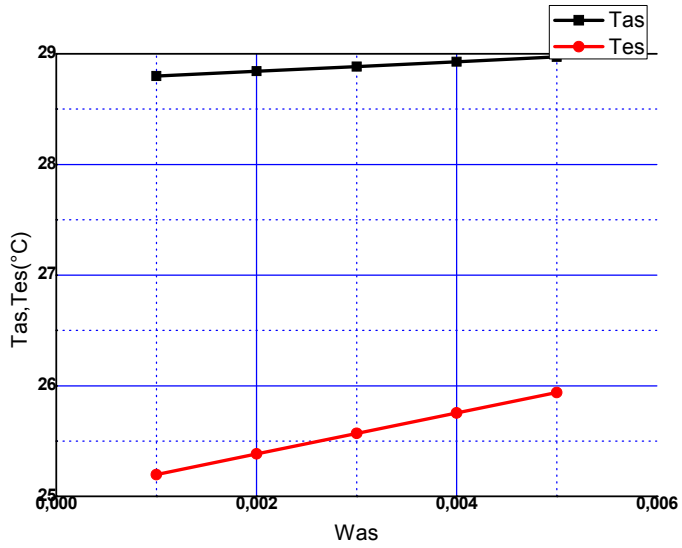


Figure 5.14 : évolution destempératures en fonction l'humidité de l'air à la sortie

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, figure 5.15.

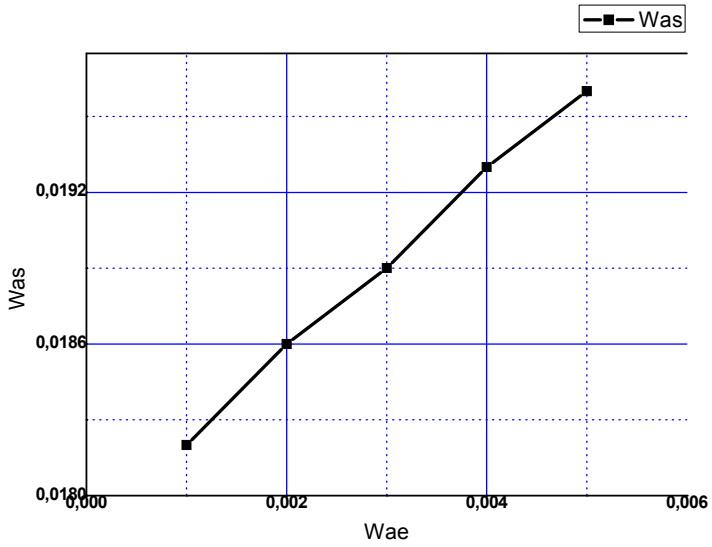


Figure 5.15 :évolution de l'humidité de l'air à la sortie en fonction de l'humidité de l'air à l'entrée

Pour la quantité de chaleur échangée, elle diminue car l'air est déjà saturé et par conséquence la consommation d'eau est réduite, figure 5.16

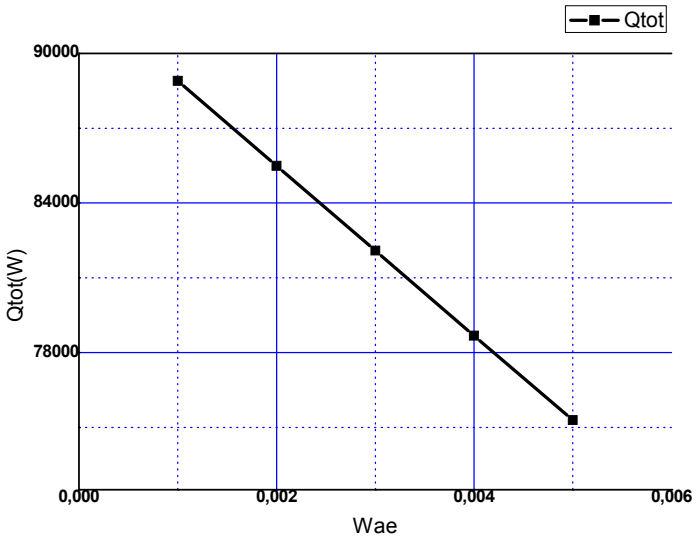


Figure 5.16 : évolution des puissances totales en fonction de l'humidité de l'air à lasortie

5.6.6. Variations suivant le nombre de cycle

On remarque qu'il n'y a aucune influence sur la chaleur échangée ainsi les températures figure 5.17.5.18

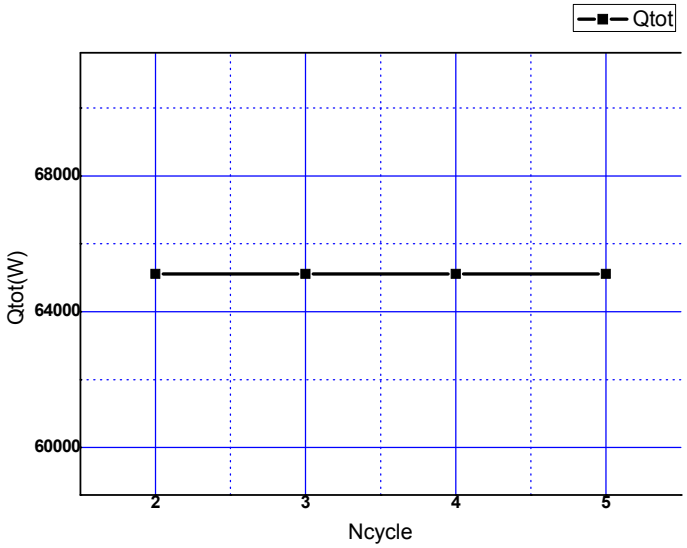


Figure 5.17 : évolution des puissances totales en fonction du nombre de cycle

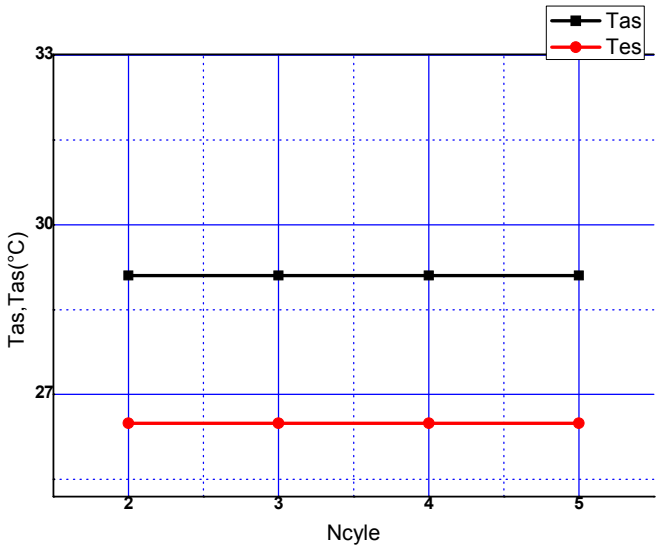


Figure 5.18 : évolution des températures en fonction du nombre de cycle

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 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 montré 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
• Comprendre la modélisation simple et élaborée
• Traduire les équations en langage Matlab
• Poursuivre une étude paramétrique thermique

L'étude des tours de refroidissement ouverte nous a montré que des variations substantielles sont à relever :

Variations suivant le débit d'eau à refroidir
En premier lieu, nous avons reporté les variations de la température de sortie de l'air et de l'eau en fonction du débit d'eau à l'entrée en mode humide .On peut déduire que pour les faibles valeurs du débit d'eau à refroidir, il y a une différence entre les températures d'air et d'eau en sortie, mais pour des valeurs plus élevées, il y a une égalité entre les deux températures de sortie. Cela signifie qu'une quantité plus importante n'est pas nécessaire pour emmener la charge de chaleur prescrite. 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
La puissance échangée suit la même allure que les températures pour le régime humide

Variations suivant le débit d'air
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. 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 entrainées. L'échange total de chaleur est d'un niveau important suivant les variations de débit d'air.

Variations suivant la température d'entrée d'eau

En ce qui concerne les variations des gradeurs ciblées en fonction de la température de l'eau à refroidir en entrée, nous observons que cette dernière n'affecte pas les températures en sortie de l'air et de l'eau, à condition qu'elle soit basse, Cependant, il ya un écart entre les deux températures de sortie, si l'eau à refroidir entre avec une température supérieure à 35°C. Pour le premier intervalle, les niveaux d'évaporation sont plus faibles, mais pour le second intervalle, il y a une nécessité d'évacuation de chaleur importante et par conséquent une évaporation plus grande entrainant une température d'air à la sortie élevée.

Variations suivant la température d'entrée d'air

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, de 4□5°C en régime humide

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

Les écarts de températures étant modérées, puisqu'on a une température d'entrée d'air plus élevée, l'échange de chaleur diminue fortement. On note aussi une consommation croissante avec la température de l'air à l'entrée.

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

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.Pour la quantité de chaleur échangée, elle diminue car l'air est déjà saturé et par conséquence la consommation d'eau est réduite.

Variations suivant le nombre de cycle

on remarque qu' il n'y a aucune influence sur la chaleur échangée ainsi les températures

Bibliographie

[1] https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Centrale-nucleaire.html

[2] http://ftech.univ-skikda.dz/doc2/2018/MASAR%20NOUREDDIN.pdf

[3] https://afcn.fgov.be/fr/dossiers-dinformation/centrales-nucleaires-en belgique/fonctionnement-dune-centrale-nucleaire

[4] https://www.lesechos.fr/idees-debats/cercle/efficacite-energetique-une-centrale-nucleaire-est-une-centrale-thermique-comme-les-autres-133874

[5] https://www.hopenergie.com/energie-verte/pollution-centrale-nucleaire

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

[7] https://www.hopenergie.com/energie-verte/pollution-centrale-nucleaire

[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] https://www.degruyter.com/document/doi/10.1051/978-2-7598-0890-8-014/pdf

[10] R FEIDT Réfrigérants atmosphériques. Tours aéroréfrigérantes indirectes.Technique de l'ingénieur. 2012.

[11]-Institue Pasteur

[12] https://media.xpair.com/pdf/climatisation/guide-cetiat.pdf

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

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

[15] Rafraîchisseur par évaporation écologique, diffuseurs et accessoires, document en ligne pp.1-54, (2012).

[16]https://repository.usthb.dz/bitstream/handle/123456789/4121/TH6282.pdf?sequence=4&isAllowed=y

[17] https://www.google.com/search?client=firefox-b d&q=Utilisation+de+diagramme+de+l%27air+humide

[18] G.RIGOT, transmission et échangeurs de chaleur, les éditions parisiennes, 199

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

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

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

[22] J.E. BRAUN, S.A. KLEIN, J.W. MITCHELL, "Effectiveness Models for Cooling Towers and
Cooling Coils", ASHRAE Transactions, Vol. 92, Part 2, p. 164-174, 1989

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

[24] F. KREITH, "The CRC Handbook of Thermal Engineering", CRC Press Springer, 3Cooling Towers"by A.F. Mills, Chapter 4.9, 1999