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

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE LA TECNOLOGIE

Département de Génie des procédés et d'environnement

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES Pour l'Obtention du Diplôme de Master

Spécialité de génie des procédés et l'environnement

THÈME

Etude numérique de transfert thermique des tours de Refroidissement Des réacteurs nucléaires en 3D.

Préparé par:

*****Alili Ilham. * Othmani Asma**.**

Encadré par:

Dr. Hadidi Noureddine.

Dr. REBHI Redha.

Soutenu Le 28 06- 2020 devant le jury composé de:

* Dr **.**Kerchich yacine.

* Dr .Rahmani ahmed chrif.

*****

Année Universitaire : 2019-2020

REMERCIEMENTS

Avant tout, je tiens à remercier le tout puissant, généreux et miséricordieux ALLAH, qui nous a tendu la santé et la chance d''étudier, et nous le prions de nous guider vers la réussite dans notre vie.

Je tiens vivement à exprimer ma profonde reconnaissance à Messieurs. HADIDI ALI mon encadrant pédagogique, pour leur encouragement, leur conseil et leur suivi régulier au cours de mon recherche universitaire.

Que Sous l'encadrement de Messieurs REBHI REDHA, je les remercie vivement pour la confiance qu'ils m'ont portées et pour la qualité de leur encadrement, leur compétence, leur encouragement, leur grande disponibilité, leur bienveillantes attention qu'il m'a toujours accordées et pour l'aide qu'ils m'apportées durant la réalisation de ce travail.

Mes remerciements vont également à tous les membres du jury pour le temps qu'ils ont pris à examiner ce travail.

Nous remercions également : La collecte des échantillons. Tous les enseignants du département génie de procèdes. Pour son aide de la recherche bibliographique. Toutes les personnes qui ont contribuées de près et de loin.

Dédicace

L'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir ; À toi mon père

Ua la lumière de mes jours la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur maman que j'adore

A celui que j'aime beaucoup et qui m'a soutenue tout au long de ce projet : mes sœurs, ASMA, HADJIRA et MAROUA, et bien sur A mes frère BRAHIM et MAHDI.

Sans oublié Mon fiancé....., que Dieu le garde toujours

Et mes grands-parents qui ne m'ont pas oublié prier et surtout ma grand-père, qui dieu ait pitié d'elle, que j'aime.

A toute ma famille, et amis, Et à tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin pour que ce projet soit possible,

je vous dis merci.

ILHAM.

Dédicace

A mes parents.

A mes sœurs.

A tous mes amis.

A mes professeurs.

Asma.

On est toujours un scientifique tant qu'il cherche la connaissance,

S'il pense qu'il a su, il semble ignorer.

Albert Einstein.

Liste des abréviations :

AVT: technologie.

AGR : Advanced Gaz Reactor.

AGR: Advanced Gas-cooled Reactor.

ANSYS: Analysi system.

BWR : Boiling Water Reactor.

CANDU : CANada Deuterium-Uranium.

DOE: Département de l'Énergie des États-Unis.

EPR: Européen Pressurized Reactor.

EPR : European Pressurized water Reactor.

FBR : Fast Breeder Reactor.

HTR : High Temperature Reactor.

PH: potential hydrogène.

PHWR : Pressurized Heavy Water Reactor.

PWR : Pressurized Water Reactor.

Puo2: Dioxide de plutonium.

REB : Réacteur à eau bouillante.

REL : Réacteur à eau légère.

RELP: réacteurs à eau lourde sous pression.

REP : Réacteur à eau sous pression.

REOMG : Réacteurs à eau ordinaire modérés au graphite.

RHT : Réacteur à haute température.

RNR : Réacteur à Neutrons Rapides.

RNG: Range distance.

RRG: Réacteurs refroidis par gaz.

SNR: Surgénérateurs à neutrons rapides.

SST: Temporary storage site.

TAR: Tour Aéro-Réfrigérante.

UOX : Uranium OXide (combustible standard des réacteurs à eau légère, constitué d'oxyde d'uranium enrichi en uranium 235).

U02 : dioxyde d'uranium, forme standard du combustible à l'uranium des réacteurs à eau légér.

Nomenclature.

Nom	Symbole
Température	T
coefficient de sécurité	K
Diamètre économique de la conduite en mètres	D
Débit	Q
Température initiale et finale.	t1,t2
température du solide	Ts
température du fluide	Tf
Coefficient de convection.	H
chute de température	ΔT
conductivités thermiques des phases solides	Ks
conductivités thermiques des phases fluide	Kf
temps de fonctionnement journalier de la pompe en heures divisé par 24	N
conductivité thermique	ʎ
Prix de la conduite posée par kilogramme	F
Coefficient de convection	h
émissivité équivalente	**ε**
constante de Stefan	σ s
efficacité de la pompe	E
débit d'entrainement vésiculaire	Ev
Nombre de Reynolds	Re
diamètre hydraulique	Dh
Viscosité dynamique	M
La masse volumique	P
la hauteur du canal	Hc
la largeur du canal	Lc
a section mouillé du canal	Se
Nombre de Prandtl	Pr
la chaleur massique du fluide	Cp
Nombre de Nusselt	Nu
Nombre de Peclet	Pe

pente du fond	If
les termes correctifs de paroi.	D , E
La viscosité cinématique turbulente	Vt
la distance à la paroi	Y
Fonctions d'amortissement visqueux	f_μ,$f_{\varepsilon 1}$,$f_{\varepsilon 2}$
Coefficients de fermeture du modèle de turbulence	σ_κ,σ_ε
Tenseur de Reynolds	T
dissipation spécifique de l'énergie cinétique turbulente	Ω
Taux de dissipation turbulente	E
constante de von Kármán	K
Accord de profil aérodynamique	C
Distance	Y
Coefficient de fermeture du modèle de turbulence	C_μ
Coefficients de fermeture du mode turbulence	$C_{\varepsilon 1}$,$C_{\varepsilon 2}$,$C_{\varepsilon 3}$
Échelle de longueur turbulente	L
débit de l'eau et de l'air.	$Qeau$, $Qair$
Température de l'eau	T_e
l'humidité relative au haut de la tour	$RH1$
coefficients du modèle de turbulence	β,$\beta*$,ɣ
coordonner dans la direction tangentielle du mur	S
Pression	P
Tenseur de contrainte de Reynolds	$-\rho\, ui'\, uj'$
coordonner dans le sens normal du mur	H
coordonnée cartésienne x,y,z	Xi
Paramètre structurel de Bradshaw	$a1$

LISTE DE FIGURES **les pages**

Figure II.1:schéma du transfert de chaleur par conduction……..……...13

Figure II.2. La convection…….……..……13

Figure II.3 : principe de la convection……..……...…14

Figure II.4 : principe du rayonnement……...……..15

Figure II.5 : Evolution de la conductivité avec la température……..…….17

Figure II.6 :echangeur thermique…….…..……18

Figure II.7 : différents modes de circulation…….……..20

Figure II.8: L'eau est en contact indirect avec L'air……23

Figure II.9 : Échangeurs à tube…….…….…..……23

Figure II.10 : tour de refroidissement humide……...…..…….24

Figure II.11 : Types de tours de refroidissement selon la nature d'échange……...……25

Figure II.12: Tour a circuit ouvert…….…..…..……26

Figure II.13: Tour à circuit ferme……..…..……..27

Figure II.14: Tour de refroidissement à tirage naturel……..…..…….30

Figure II.15 : Tour de refroidissement à tirage forcé……..……..31

Figure II.16 : Tour de refroidissement à tirage induit…….……..32

Figure II.17: Exemple de différents tirages…….…….……32

Figure II.18 : Types de tours selon la circulation d'air……..…..……33

Figure II.19 : Schéma d'une tour de refroidissement à circuit ouvert……...…….……..34

Figure II.20 : fonctionnement des Tour de refroidissement ferme……...…35

Figure II.21 : tour de refroidissement ferme……..…….…….36

Figure II.22: Evolution de Génération I à III et saut technologique pour Génération……..37

Figure II.23 : Organigramme des différentes filières technologiques de réacteurs nucléaires…….39

Figure II.24: Réacteur à eau sous pression(REP)……..…. ……40

Figure II.25 : Réacteur à eau bouillante……..……..41

Figure II .26: Réacteur à eau lourde pressurisée (PHWR/CANDU)…… ……..……..42

Figure II.27: Surgénérateur à neutrons rapide……..…….43

Figure II .28: Fonctionnement d'un centrale nucléaire de type ref…….....……45

Figure II.29 : les neutrons et une barre de commande…….……45

Figure II.30: Cour de réacteur……..…….50

Figure II.31 : Vestige d'une tour en bois, à Łódź (Pologne)…….……51

Figure II.32: Tours de type hyperboloïde en acier de la centrale thermique (Ukraine)……51

Figure II.33: La tour, en membrane textile, de la Centrale thermique de Bouchain…….51

Figure II.34: Tours de type hyperboloïde en béton de la centrale thermique(Etat uni)……..51

Figure II.35: Emissions de co2 dans le monde depuis 2000…….52

Figure III.1 : Représentation entrées/sorties de la tour de refroidissement…….……...…57

Figure III.2 : expérience de Reynolds…….…….58

Figure IV.1 : Problème physique…….....….66

Figure IV.2 : l'évolution de la fraction volumique de vapeur d'eau à 100°C……..68

Figure IV. 3 : l'évolution de la température de vapeur d'eau à 100°C…….……68

Figure IV.4 : l'évolution de la vitesse de vapeur d'eau à 100°C…….……69

Figure IV.5 : les lignes de courant……69

Figure IV. 6 : l'évolution de la fraction volumique de vapeur d'eau à 100°C…….70

Figure IV.7 : l'évolution de la température de vapeur d'eau à 100°C…….70

Figure IV .8 : l'évolution de la vitesse de vapeur d'eau à 100°C…….71

Figure IV.9 : les lignes de courant……...…….71

Figure IV .10 : l'évolution de la fraction volumique de vapeur d'eau à 100°C……72

Figure IV.11 : l'évolution de la température de vapeur d'eau à 100°C……72

Figure IV.12 : l'évolution de la vitesse de vapeur d'eau à 100°C……..……..73

Figure IV.13 : les lignes de courant…….…….73

Figure IV.14 : l'évolution de la fraction volumique de vapeur d'eau à 100°C…….74

Figure IV.15 : l'évolution de la température de vapeur d'eau à 100°C……74

Figure IV.16: l'évolution de la vitesse de vapeur d'eau à 100°C…….……75

Figure IV.17: les lignes de courant…….……..75

Figure IV.18 : la variation de la fraction volumique en fonction de la hauteur pour les différents cas…….……...…….77

Figure IV.19 : la variation de la température en fonction de la hauteur pour les différents cas……..77

Figure IV.20 : la variation de la vitesse u en fonction de la hauteur pour les différents cas.....78

Figure IV.21 : la variation de la vitesse v en fonction de la hauteur pour les différents cas……...…78

Liste des tableaux **Les pages**

Tableau II.1: Spécifications techniques de base qualitatives des différentes filières……..….40

Tableau II.2: Les composantes de l'eau lourde…….….. 42

Tableau II.3: différences entre les divers types de réacteurs……...…….……44

Tableau II.4 : La centrale classique et nucléaire……..…… 49

Les équations **Les pages**

Equation II.1 : flux thermique……...…….11

Equation II.2 : Bilan de chaleur pour un milieu……...…….12

Equation II.3 : Loi de Fourier……..……...…..12

Equation II .4 : Loi de Fourier pour un milieu isotrope……..……..……12

Equation II .5 : flux de convection à la paroi…….……..…….13

Equation II .6 : 2ième loi de Newton ……..13

Equation II .7: le transfert radiatif……..……..15

Equation II .8 : Loi de Planck……..……...…..16

Equation II.9: débit d'évaporation……..……..28

Equation II.10 : débit d'entrainement vésiculaire ration totale……..…..28

Equation II.12 : Taux de concentration.…….....…….28

Equation II.13: débit d'appoint…….……..…..……29

Equation II.14 : la surface d'échange…….…..……..……..29

Equation III.1 : Nombre de Reynolds……..……..…..….57

Equation III.2 : diamètre hydraulique de rynolds……..……...……..…..58

Equation III.3 : Nombre de Prandtl…….……..…….……..58

Equation III .4 : Nombre de Nusselt……...……..……59

Equation III.5 : Nombre de Peclet……..……..……..59

Equation *III.6 :* équation de continuité…….……59

Equation *III.7 :* équation de l'énergie **……..……..……..……**59

Equation III.8: équation du mouvement…….…….....……...…..59

Equation III.9 : tenseur de contrainte de Reynolds inconnu……..……...…...…59

Equation III.10 : transport d'un générique $\kappa - \varepsilon$ turbulence modèle……...……60

Equation III.11 : La viscosité cinématique turbulente……..……..…….60

Equation III.12 : l'équation de transport k-omega (ω)…….…… ……..……60

Equation III.13: le champ moyen……..…….…….61

Equation III.14 : taux de dissipation……61

Equation III.15 : Viscosité cinématique des tourbillons……...……..…….....61

Equation III.16 : Énergie cinétique de turbulence…….....……..……..62

Equation III.17 : Taux de dissipation spécifique…...……...……..62

Equation III.18 : Coefficients de fermeture et relations auxiliaires……..…..……...…..62

Table des matières Les pages

Remerciements

Dédicace de Alili

Dédicace de Othmani

Liste des abréviations

Nomenclature

Liste de figures

Liste des tableaux

Liste des équations

Table des matières

Résumé

Introduction générale…….....……....1

Chapitre I : Recherche bibliographique……..……...4

Chapitre II : Généralités sur les tours de refroidissement nucléaire……..…….9

II .1-Introduction……...……..……..10

II.2.Transferts thermiques……...…….…….11

II.2.1.Notion de température……...…….…….11

II.2.2.Notion de chaleur…….……...…….11

II.2.3.Mode de transmission de chaleur……..…….…….11

II.2.3.1.Conduction…….……...…….12

II.2.3.2-Convection…….……...…13

II.2.3.2.1.Les type de la convection……...…….…….……..14

1/La convection naturelle (libre)…… …….……..……14

2/La convection forcée (ventilation)…… ……..……..14

3/la convection mixte……..…….……15

II .2.3.3.Rayonnement……..…….…….15

II.2.4.Conductivité Thermique…….…..……16

II.2.5.Les Echangeures Thermique…….……..……..17

II.2.5.1.définition…….……..…….17

II.2.5.2.Principe …….……..……17

II.2.5.3.But des échangeurs de chaleur…….…..…….18

II.2.5.4.Critères de classement des échangeurs……..…….…….18

II.2.5.4.1.Classement suivant le mode de transfert de chaleur……..18

1-Classement des échangeurs de chaleur……..…..……..18

a-Type de contact……..18

*échangeurs à contact direct……..……..……..18

*échangeurs à contact indirect……....……....19

1) Classement des types d'échangeurs……..……..…….....19

a-échangeur sans changement de phase……..……..…….19

b-échangeur avec changement de phase……..19

II.2.5.4.2.classement suivant la disposition des écoulements……...19

1-circulation à Co-courant……20

2-circulation à contre-courant……...……20

II.2.5.4.3.échangeurs tubulaires…….…….……21

II.3.Les tours de refroidissement…….…….…...21
II.3.1.Historique des tours de refroidissement……..…….…..21

II.3.2.Définition……..…….22

II.3.3.Classification des tours de refroidissement……...….22

II.3.3.1.Classification suivant la nature des échanges……..22

II.3.3.1.1.tours de refroidissement humide……..23

II.3.3.1.2.tours de refroidissement sec…….24

1-Aéroréfrigérant sec……..……..……...24

II.3.3.1.3.tours de refroidissement sèches/humides (hybrides)…… …….24

II.3.3.2.Classification suivant le mode de refroidissement de l'eau…….25

II.3.3.2.1.tour de refroidissement a circuit ouvert…….25

II.3.3.2.2.Tour de refroidissement a circuit fermé.....26

II.3.3.2.3.Paramètres de fonctionnement du circuit de refroidissement……27

1) Volume d'eau en circulation.……..27

2) Q: débit de circulation (m³/h)……..… ……...27

3) E: débit d'évaporation (m³/h)…… ……...…….27

4) Ev: débit d'entrainement vésiculaire (m³/h)……..…… …….28

5) D: débit de purge de la déconcentration totale (m³/h)……..… ……28

6) C: Taux de concentration.…….....……...28
7) A: débit d'appoint……..…….29
8) a: la surface d'échange…….....29

II.3.3.3.Classification suivant l'appel d'air……...…….....29

II.3.3.3.1.Tour de refroidissement a ventilation naturelle……...……29

II.3.3.3.2.Tours de refroidissement à tirage mécanique…….……..30

II.3.3.3.3. Les tours à tirage forcé (obligatoire)……..…… 31

II.3.3.3.4. Les tours à tirage induit…….……..31

II.3.3.4.Classification suivants la circulation d'air……..33

II.3.3.4.1. Courants parallèles…….……..……..……33

II.3.3.4.2.Contre courants……..……..33

II.3.3.4.3.Ecoulement à courants croisés…….……...……33

II.3.4.Principe de fonctionnement d'une tour de refroidissement……34

II.3.4.1.Principe de fonctionnement d'une tour de refroidissement à circuit ouvert……...34

II.3.4.2.Principe de fonctionnement d'un tour de refroidissement fermé……..…...34

II.4.Les tours de refroidissement nucléaire…….…….……...36

II.4.1.les réacteurs nucléaires dans le monde……..…..……...36

II.4.1.1.Les générations de réacteurs nucléaires……..……37.

II.4.1.1.1.La 1re génération……..……38

II.4.1.1.2.La 2eme génération……38

II.4.1.1.3.La 3eme génération…….……38

II.4.1.1.4.La 4eme génération……..…38

II.4.2.Classification des réacteurs nucléaires……39

II.4.2.1.Les typologie générale des réacteurs nucléaires……39

II.4.2.1.1.Réacteurs à eau sous pression REP/PWR ….....40

II.4.2.1.2.Réacteurs refroidis par gaz RRG/AGR.....41

II.4.2.1.3.Réacteurs à eau bouillante REB/BWR ……41

II.4.2.1.4.Réacteurs à eau lourde sous pression PHWR/CANDU…….....…..41

II.4.2.1.5.Réacteurs à eau ordinaire modérés au graphite REOMG……..42

. II.4.2.1.6.Surgénérateurs à neutrons rapides SNR /FBR :…….…… 42

II.4.2.1.7.Réacteur à très haute température (VHTR) au gaz (hélium)……...… ……43

II.4.3.comment fonctionne une centrale nucléaire?.....44

II.4.4.La commande principale d'un réacteur nucléaire……...…….……...45

II.4.5.Les centrales nucléaires……...46

II.4.6.Connexion eau-énergie…….……...46

II.4.7.Les composants d'un réacteur nucléaire……..…47

II.4.7.1.Le combustible……...…..…….47

II.4.7.2.Les barres de conrôle, piégeuses de neutrons…….……..47

II.4.7.3.le modérateur, un ralentisseur de neutrons……...…….……...47

II.4.7.4.Le générateur de vapeur, un échangeur de chaleur……..48

II.4.7.5.Le caloporteur, un transporteur de chaleur…….……..…48

II.4.8.Refroidissement des centrales nucléaires……...…….……48

II.4.8.1. Le circuit primaire **pour extraire la chaleur……...…….…….49**

II.4.8.2.Le circuit secondaire **pour produire la vapeur……...…….…….49**

II.4.8.3.Le circuit refroidissement **pour condenser la vapeur et évacuer la chaleur…...…49**

II.4.9.Comparaison entre les réacteurs classique et nucléaire……..49

II.4.9.1.la cours nucléaires……..……..……...49

II.4.10.Tendances rétrospectives des émissions de co2 dans le monde……51

II.4.10.1.Rejets thermiques……...52

II.4.10.2.Rejets chimiques…….....53

II.4.10.3.Rejets chimiques induits par les traitements contre les micro-organismes pathogènes……....54

II.4.11.Eau et catastrophes nucléaires …….…….54

Conclusion……...…….…55

Chapitre III: Modèle physique et formulation mathématique……...56

III.1.Introduction…….……..57

III.1.1 -Nombre de Reynolds…….…..57

III.1.2-Nombre de Prandtl…….…58

III.1.3 -Nombre de Nusselt……...58

III.1.4-Nombre de Peclet…….…..59

III. 3.Formulations Mathématique :…….……...…..59

III.3.1-Equation de continuité…….59

III.3.2.Equation de l'énergie……...…….……...…59

III.2.3-Equation du mouvement……..……..…….59

III.4-La turbulence RANS…….……60

III.4.1/Le modèle k-epsilon (ε) de turbulence…….…60

III.4.2 -Le modèle k-omega (ω) de la turbulence……...…….….61

ІІІ.4.3-Le modèle RNG K-epsilon(ε) de la turbulence…….…....61

ІІІ.4.4-Le modèle SST K- omega(ω)…… …….……..62

CHAPITRE IV : Simulation numérique……63

IV.1- Introduction……...…….64

IV.2-Définition de logiciel de simulation ANSYS……..……64

IV.2.1-Environnements logiciels……..…64

IV.2.2-Design3D……..……...…65

IV.2.3-Problème physique…….……...65

IV.3-Résultat et discussion…….…..……66

IV. 3.1- L'interprétation des figures de 2 a 17……...……...…….…66

1. la variation de la Fraction Volumique dans le domaine d'étude pour les vitesses…….…..66
2. la variation de la Température dans le domaine d'étude pour les vitesses……..…66
3. la variation de la vitesse dans le domaine d'étude pour les vitesses ……..67
4. la variation streamlines dans le domaine d'étude pour les vitesses……..……67

IV .3.2- L'interprétation des figures de 18 à 21…….…….75

1. la variation de la Fraction Volumique minimale et maximale dans le domaine d'étude pour les vitesses…….……75
2. la variation de la Température minimale et maximale dans le domaine d'étude pour les vitesses.....76
3. la variation de la vitesse selon l'axe (X et Y) dans le domaine d'étude pour les vitesses….....76
4. la variation de la vitesse selon l'axe (Y est V) dans le domaine d'étude pour les vitesses…….……76

Conclusion générale……...……..…….78

Références……..……...79

ملخص: الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة انتشار بخار ماء مفرز من أبراج التبريد في منطقة الدراسة. لقد أخذنا بخار الماء كغاز مفرز لأن الماء هو المبرد الأكثر استخدامًا في معظم الصناعات أو المفاعلات النووية. تم اعتماد برنامج Ansys-CFX للمحاكاة في هذه الدراسة.

لقد أظهرنا من خلال هذا البحث أن سرعة الغاز مفرز ودرجة حرارة المبرد الأولية وسرعة الهواء للوسط المحيط لها تأثير كبير على انتشار هذا الغاز عن طريق التلوث البيئي. تم تقديم النتائج التي تم الحصول عليها في شكل سحابة لانتشار غازات ال مفرزة في الغلاف الجوي والتي تمثل اختلاف نسبة حجمية ودرجة الحرارة ومكونات السرعة والخطوط الحالية وكذلك ملامح هذه المتغيرات سرعة الغاز مفرزة مختلفة.

Résumé : L'objectif principal de ce travail est l'étude de la dispersion de la vapeur d'eau d'échappement des tours de refroidissement dans domaine d'étude. Nous avons pris le la vapeur d'eau comme un gaz d'échappement parce que l'eau représente le fluide le plus utilisé comme fluide de refroidissement dans la majorité des industries ou les réacteurs nucléaires. Le logiciel Ansys-CFX à été adopté pour la simulation dans cette étude.

Nous avons montré à travers de cette investigation que la vitesse d'échappement, la température initiale de fluide refroidissement et la vitesse de l'air de milieu environnant à un effet notable sur la dispersion de ce gaz via la pollution de l'environnement. Les résultats obtenus ont été présenté sous formes des panaches de dispersion de gaz d'échappement dans l'atmosphère qui représente la variation de la fraction volumique, la température, les composantes de vitesse et les lignes de courant ainsi les profiles de ces variables pour les différents vitesse d'échappement

Abstract:

The main objective of this work is the study of the dispersion of the exhaust water vapor from the cooling towers in the study area. We have taken water vapor as an exhaust gas because water is the most commonly used coolant in most industries or nuclear reactors. The Ansys-CFX software was adopted for the simulation in this study.

We have shown through this investigation that the exhaust speed, the initial coolant temperature and the air speed of the surrounding medium have a significant effect on the dispersion of this gas via environmental pollution. The results obtained were presented in the form of plumes of dispersion of exhaust gases in the atmosphere which represents the variation of the volume fraction, the temperature, the speed components and the current lines as well as the profiles of these variables for the different exhaust speeds.

Most clefs: Analyse numérique, Transfer thermique, tours de refroidissement, réacteur nucléaire, 3dimention.

Introduction Générale

Toutes les centrales thermiques qui utilisent de la chaleur pour produire de la vapeur pour Alimenter un générateur nécessite un système de refroidissement à eau. La majorité utilise un système de refroidissement unique dans lequel l'eau est tirée d'un lac, d'une rivière ou d'un réservoir.

Il est important de noter que les systèmes de refroidissement sont conçus pour le refroidissement des usines et la protection de l'environnement. en fait, des tours de refroidissement ont été utilisées pour de nouvelles centrales électriques de plus de 100 mégawatts en vertu de la clean water act 1972 afin de protéger la vie aquatique d'une rivière ou d'un lac dont les eaux sont en train d'être abattues.

L'eau est pompée du lac vers le bassin de la tour de refroidissement. L'eau du bassin de la tour de refroidissement circule dans le condenseur de l'usine, absorbe la chaleur de la vapeur et retourne dans la tour de refroidissement. Ensuite, l'eau est pulvérisée sur une grille au milieu de la tour de refroidissement. L'air froid coule du centre, est creux et l'eau qui tombe chaude passe.

Pour terminer le cycle, le tuyau de vidange renvoie l'eau dans un lac avec un ou deux degrés de température normale du lac. Cela garantit qu'il n'y a pas de dommages aux poissons dans le lac.

Le processus de refroidissement est le même d'une usine à l'autre, à l'exception de la source et du volume d'eau. Au lieu de puiser l'eau d'un lac artificiel dans le bassin de la tour de refroidissement, l'eau est pompée dans les condenseurs de l'usine directement à partir de la rivière cape fear. L'eau chaude est ensuite drainée et refroidie pendant qu'elle parcourt plus de cinq miles à travers un canal de drainage artificiel jusqu'à ce qu'elle atteigne sa destination finale.

La présente mémoire est constituée de quatre chapitres :

- Le premier chapitre présentée une résumé des recherches bibliographique générale.
- Le deuxième chapitre s'intéresse au principe, classification des tours de refroidissement et les notions de transfert thermique : convection, conduction, rayonnement, il est aussi contient les types, les composant, les composantes, les rejets dangereux dans l'environnement des tours de refroidissement nucléaire, aussi l'énergie nucléaire.
- Le troisième chapitre présente les équations mathématiques : continuité, mouvement et de l'énergie.
- Le quatrième chapitre présente une simulation numérique par logiciel ANSYS, les résultats de la simulation et l'interprétation.

- Finalement nous avons montré les principaux résultats trouvés le long de cette étude avec une conclusion générale.

CHAPITRE I

Recherches Bibliographique

CHAPITRE I

Recherches Bibliographique

Abdelhamid et al. [**1**]. L'étude des transferts thermique permet de quantifier les échanger énergétiques entre un système et un autre. On distinguera deux cas : si le champ de temps donc le régime est permanent (stationnaire), si l'évolution du champ de temps avec le temps donc le régime est transféré par conduction, convection et rayonnement.

Rebhi[**2**]. La conductivité thermique effective: dépend de la porosité et des conductivités thermiques des phases solides Kset fluide Kf, en trouve que Ksolide>Kfluide. De manière générale, il n'existe pas de modelés exacts de conductivité thermique effective qui peuvent être appliquées aux cas pratiques d'écoulement dans les milieux poreux. Les modèles existants sont plutôt des modèles approchés construits pour des géométries simples sont tous des combinaisons pondérées des modèles sérié et parallèles basés sur l'analogie électrique. Les échangeurs de chaleur: prennent une place très importante dans tous les domaines de l'industrie, dans les secteurs de l'électronique, l'automobile, l'aéronautique et la cryogénie. Ils permettent de réduire l'encombrement, le poids et le coût des dispositifs d'échange thermique. Le mouvement de convection de double-diffusion (convection thermosolutale) générés par les gradients de densité qui sont dus au cham de température et de concentration, ce phénomène apparait dans des situations réelles diverses : croissance de cristaux destines a l'industrie des semi-conducteurs, processus de séchage, processus de fusion-solidification de mélanges binaires stockage des gaz liquide ou oxydation des surfaces métalliques …

La diversité de configurations très importantes paramètres dans ce type d'écoulement. On se trouve que cette anisotropie géométrique des grains ou des fibres rencontrée dans de nombreux milieu poreux.

Padet [3]. Dans des sociétés industrielles dont le fluide vital est l'énergie, les échangeurs thermiques ont acquis une importance économique majeure. Les choses simple sont ces appareils une très grande diversité, puisqu' ils vont du radiateur de chauffage central aux générateurs de vapeurs des centrales nucléaires, en passant par les échangeurs des moteurs turbocompressés et les récupérateurs divers. Mais la réalisation est très difficile : difficultés de calcul en particulier, dues à l'extrême complexité des formes géométriques et des

écoulements, les problèmes de corrosion, d'encrassement, et les pertes des performances qui en découlent.

Rebhi[4]. Dans le but de d'optimisation des couts de production lors de l'extraction des fluides des gisements, en couplant la convection naturelle au phénomène de thermo-diffusion , par la distribution des pressions dans le réservoir. Les combustibles sont stockes sous forme liquide ou solide pour les moteurs à combustion interne ou les moteurs fusées,ou bien séparer les isotopes d'un même élément. Consiste en l'établissement d'un gradient de concentration d'un composant chimique par la présence d'un gradient thermique (causée par une migration différenciée des espèces) qui induit un effet de déplacement de matière.

Vafai and Ltien [5].Une attention particulière à l'écoulement à travers un milieu poreux au voisinage d'une frontière imperméable. On utilise la technique de la moyenne locale en volume un nouveau concept de couche limite placé au centre de la routine numérique. Les effets de limite et d'inertie sont caractérisés pas trous groupements pour des fluides à gram de nombre de prend, pour des forts gradients de pression et dans la région proche du bord d'attaque de la couche limite de l'écoulement.

Degiovanni [6].La particularité de transfert de chaleur et de masse en milieu non saturé, est de mettre en évidence l'influence du gradient de pression en phase gazeuse sur le transfert de masse (un gradient de température et d'humidité) pour évaluer la conductivité thermique et une mesure de type plaque coude on obtint l'importance fondamentale du gradient de pression et des conditions aux limites du system.

Kaneyasu et al. [7].On étudie l'ébullition de l'eau en réservoir, à la pression atmosphérique, sur un plaque de cuivre pour étudié l'effet de la configuration de la surface sur le transfert thermique, il n'y pas d'effet marqué dans la région des grams des flux. Au contraire dans la région des faibles flux thermiques l'effet est remarquable, traduit par l'augmentation du coefficient de transfert lorsque l'angle augmente. On propose deux mécanismes pour expliquer l'effet, le transfert de chaleur sensible par le déplacement de la couche thermique imposé par l'ascension des bulles et par le transfert de chaleur latent dû à l'évaporation du filment liquide mince sous la bulle qui monte.

Chan[8].pour déterminer les effets de la forme des côtes de l'angle d'attaque, du rapport du pas à la hauteur sur le coefficient de frottement et sur le transfert thermique, on utilise une géométrie à plaque parallèle et on propose une relation générale pour le coefficient

de frottement et le transfert thermique en basant sur la loi de similitude de paroi et sur l'application de l'analogie de la quantité de mouvement on trouve que les côtes avec un angle de 45°c ont des performances supérieures, à celles attaquées à 90°c en/ou comparaison de la rugosité granulaire.

Sahraoui [9].L'écoulement avec une instabilité thermiques la géométrie choisie est un canal horizontal chauffé par la basse et refroidis la paroi supérieure, dans lequel un fluide non newtonien entre avec vitesse de profil parabolique et un temps linéaire, tels que le nombre de Prandtl, le nombre de Reynolds. Elle permit d'évaluer la bonne performance et la capacité des différentes méthodes de Boltzmann pour produire le phénomène physique, elles offrent une facilité pour les études paramétriques.

Khalfouni [10].Le principe d'évaporation de l'eau pour refroidir l'air est l'une des méthodes les plus anciennes que l'homme ait utilisée pour réaliser son confort dans les régions à climats chauds ou arides,Ces quantités de chaleur doivent être évacuées vers Une source froide qui doit être à la température la plus basse possible afin d'obtenir un rendement optimal de l'installation. Les circuits de refroidissement commandent ces températures en transférant la chaleur à partir des fluides de processus chaud dans l'eau de refroidissement. La limitation des sites d'eau résulte une difficulté à satisfaire les besoins en eau de tous les usages, donc ce n'était pas possible de remplacer l'eau de refroidissement à chaque fois. La solution est de réutiliser de nouveau cette quantité d'eau ayant servi préalablement au refroidissement.

Le nom de l'auteur [11].Tout procédé lié à une activité de type industriel, de conditionnement d'air ou de réfrigération, produit une certaine quantité d'énergie perdue sous forme de chaleur. Cette chaleur perdue devra être rejetée dans l'environnement et nécessite donc un refroidissement, Selon les températures on peut distinguer quatre catégories de technologie de refroidissement : l'eau,l'air évaporait,l'air sec, Le refroidissement mécanique par groupes frigorifiques.

André et al. [12].Le refroidissement du milieu est intimement lié à sa conductivité thermique. En équilibre chimique, la conductivité thermique est habituellement déterminée par la somme de quatre conductivités thermiques : les deux conductivités thermiques dues aux mouvements de translation des électrons et des particules lourdes, la conductivité interne due aux degrés libertés, et la conductivité de réaction chimique, nous montrons que certaines espèces chimiques ont besoin de plus de 1ms pour atteindre cet équilibre.

Sahnoun[13].Pour fabrique des flacons de parfum et mieux les phénomènes de transfert thermique lors du refroidissement de la pâte de verre au contact avec les moules de formage, on proposées deux approches convolutées qui se base sur l'utilisation d'une impédance thermique et qui repose sur l'utilisation de modèles paramétrique, l'intérêt est que l'impédance thermique représente par un modèle convoluté (paramétrique) Independent des condition limites thermique du système, la qualité de la production est un paramètre important pour la fabrication de flacons haut de gamme.

Michèle [14].La réfrigération humide est basée sur le contact direct entre Lair et Léau à refroidir qui conduit à une évaporation de Léau, cette évaporation est le moteur principal de l'échange thermique et des échangeurs par convection, les installations pour les quelles va de la tour vers un échangeur ou un procédé éloigné de la tour, la concentration deslégionnelles doit être maîtrisée et suppose une surface de canalisation former du bio film plus grande que dans le cas des installation du type circuit primaire ferme. Une tour hybride (voie sèche/voie humide) du type circuit primaire ferme si la tour est fermée.

Merai[15].Dans les équipements frigorifique, la chaleur est transférée principalement par convection, par ainsi que son homogénéité liées à l'écoulement de l'air. Tels que les chambres froides, les camions de transport et les meubles frigorifiques le vente, permettant de connut l'effet de modification des paramètres opératoires et leur impact sur l'efficacité thermique des enceintes réfrigérées.

RUFFENACH et al [16].Le refroidissement des produits riches en eau implique un couplage entre les transferts de chaleur et de masse l'évaporation de l'eau à la surface des carcasses modifie l'évolution thermique des produits. Les coefficients de transfert de chaleur et de masse dépendent très fortement de la position de produit dans l'équipement. .

Ruffenach et al. [17].Pour caractériser le réacteur nucléaire on effectuer des analyses isotopique et chimiques des éléments par la spectrométrie, ainsi la fluence, l'indice de spectre, le nombre total de fissions d'uranium, le % de fission de U et Pu, la durée du réacteur et on évaluée la date du réacteur nucléaire à partir de l'analyse du plomb et le nombre de fission de l'uranium et les terres rares de fission n'ont pas migré.

Guillaunont[18].L'énergie nucléaire nécessite de connaître le comportement chimique des éléments et radioéléments naturels ou artificiels en présence des rayonnements ionisants.

La fission des noyaux lourds produit (produit de fission) des isotopes stables ou radioactifs, les neutrons conduisent à la production d'isotopes d'actinides et de produit d'activation.

Hchkel[19].Les processus d'application aux réacteurs nucléaires étaient complexes et l'effet du temps sur la radiolyse de l'eau liquide a été négligeable on a 80% des réacteurs nucléaires utilisa pour la production d'électricité, sont refroidis à l'eau qui sou mis à un flux de rayonnement intense à un temps de 300°C, on obtient des rendements radio lytiques et des énergies d'activation.

Yamagata et al. [20]. Un écoulement d'eau supercritique dans un tube horizontal et vertical. Pour pressions entre 226 à 294 bars, et la température entre 230 à 540°c, des flux thermique de 116 à 930 kW/m² et de Vm de 310 à 1830 kg/m³.s.p, les propriétés physiques de fluide supercritiques varient rapidement avec la température dans la régionpseucto-critique, les coefficients de transfert thermique dépendant du flux thermique. Les caractéristiques de la détérioration du transfert thermique sont clarifiées et le flux thermique limite déterminé en relation avec le débit.

Dhurther et lemmin[21].Pour réduire la contribution du bruit aux paramètres de turbulence moyens obtenus par acoustique 3D on mesure du profileur de vitesse Doppler. Qui basé sur une reconstruction du spectre de bruit à partir de spectres croisés, Les spectres de bruit et les variances de bruit sont calculés et supprimés pour les troisComposantes de vitesse fluctuante mesurées dans un écoulement turbulent à canal ouvert, tandis que les spectres de turbulence non corrigés ont des régions hautes fréquences plates typiques des effets de bruit. Avec l'utilisation d'un émetteur à réseau de phases, la méthode de correction proposée permet des mesures avec une erreur relative moins de 10% dans la zone d'écoulement externe. Les mesures corrigées de la région d'écoulement interne sont toujours affectées par des erreurs Qui peuvent provenir d'effets de moyen nage spatial dans le volume d'échantillon en raison du gradient de vitesse local élevé.

Sylvain. [22].Pour réduire lemittance du faisceau radioactif avec minimum de pertes, en exploitent un quadripôle a radiofréquence remplie de gaz pour la collection et le refroidissement rapide de faisceaux d'ions de basse énergie, afin d'augmentée la sensibilité des deux spectromètres : MISTRAL et ISOLTRAP porte une haute tension (MISTRAL : ré-accélérer le faisceau continu refroidi) et (ISOLTRAP : délivredes paquets d'ions de faible énergie. Les mesures de masse de haute précision résultantes une idée plus claire des énergies de Liaison et de leurs corrélations avec les coexistences de formes connue

CHAPITRE II

Généralité sur les tours de refroidissement nucléaire.

CHAPITRE II

Généralité sur les tours de refroidissement nucléaire.

1-Introduction :

L'énergie thermique est l'énergie cinétique d'agitation microscopique d'un objet, qui est due à une agitation désordonnée de ses molécules et de ses atomes. Les transferts d'énergie thermique entre corps sont appelés transferts thermiques. Ils jouent un rôle essentiel en thermodynamique. Deux corps ayant la même température sont dits en équilibre thermique. Si leur température est différente, le corps le plus chaud cède de l'énergie au corps le plus froid : il y a alors transfert de chaleur.

Une tour de refroidissement, ça fait immédiatement penser à une centrale nucléaire. C'est un raccourci. Il peut y en avoir partout dès que dans une usine, on a le besoin de refroidir des pièces en nombre important. La tour permet indirectement d'abaisser la température des pièces d'échauffement, par la maintenance d'un flux d'eau refroidie qu'on amène en contact avec les pièces chauffées.la tour refroidit de l'eau, on pulvérise cette eau sur les éléments chauds.

Dans une centrale nucléaire, la chaleur provient de la fission. Ce processus produit une chaleur intense, qu'il est nécessaire de contenir dans des bassins de refroidissement chargés d'eau. En cas de défaut de refroidissement, les pièces s'échauffent, fondent, se déforment, brûlent. A terme, cela peut produire une explosion et par exemple.

La tour de refroidissement des centrales nucléaires refroidit l'eau qui s'est échauffée après son passage dans le condenseur. Le condenseur, placé en sortie du circuit secondaire, sert à transformer ce qui reste de vapeur après le passage dans la turbine, en eau, car c'est de l'eau qui doit être renvoyé à l'entrée du circuit secondaire (qui est fermé sur lui-même, tout comme le circuit primaire).Sauf utilisation anecdotique, cette eau à basse température n'a pas d'utilisation industrielle intéressante possible.

La tour n'est pas obligatoire sur toutes les centrales : on peut pomper dans le fleuve ou en mer et rejeter dans le même milieu. Ce n'est pas gagné, au contraire, laisser la vapeur en sortie plus chaude et à plus haute pression, ce serait de l'énergie perdue. La raison de base il faut aller la rechercher dans le principe de Carnot : pour récupérer de l'énergie, il faut un échange

entre une source chaude et une source froide, et plus la différence est grande, plus l'énergie est récupérable sous forme mécanique.

II.2.Transferts thermiques:

Les deux notions fondamentales en transferts thermiques sont la température et la chaleur; la température caractérise l'état d'un corps : la chaleur exprime une énergie échangée.

Le transfert d'énergie thermique se faisant des particules les plus énergétiques à température la plus élevée (la puce dans notre cas) vers les moins énergétiques, dont la température est inférieure. [22]

II.2.1.Notion de température:

C'est une variable d'état qui, du point de vue de la structure de la matière, caractérisé le degré d'agitation de ses particules. Elle résulte donc de la détermination d'une moyenne et, de ce fait, il est impossible en toute rigueur de définir la température en un point géométrique.

On dit qu'à l'instant t la température d'un corps est uniforme si, en cet instant, tous les appareils de mesure indiquent la même valeur t quelle que soit leur position. Nous dirons en outre qu'elle est constante si test indépendante de l'instant d'observation.si ces deux conditions ne sont pas réalisées, nous dirons que la température est une fonction t(x, y, z, t) des coordonnées du repère d'espace-temps. L'unité de température peut s'exprimer soit en kelvins, avec T=273.15K.Soit en degrés Celsius [23].

II.2.2.Notion de chaleur:

C'est une forme d'énergie au même titre que le travail d'un système de forces au cours d'un déplacement.il il s'agit forcement dune change d'énergie entre plusieurs corps(ou entre plusieurs domaines d'un même corps) au cours d'un laps de temps déterminé. L'unité est le joule [J]. Sa valeur est petite, ce qui fait qu'on a communément recours au kilo joule [KJ]. Si entre deux instants t et t^*, l'interaction étudiée s'accompagned'une change de chaleur Dq, on appelle flux thermique moyen la quantité.

$$DQ/(t - t^*) \qquad \text{(II.1)}$$

II.2.3.Mode de transmission de chaleur

On distingue trois types de transmission d'énergie thermique : la conduction, la convection et le rayonnement [23].

II.2.3.1.Conduction

C’est une transmission de chaleur dans la masse d’un milieu matériel, les zones chaudes cédant de la chaleur à celles qui le sont moins. C’est le cas lorsqu’ on chauffe l’extrémité d’une barre. Au plan corpusculaire : une zone chaude est occupée par des particules a vitesse élevée, par définition même de la température .le mouvement brownien fait constamment passer des particules d’une zone a l’autre ;mais entre zones a températures inégales, les particules ont des énergies cinétiques différentes ;le brassage a pour effet de transférer de l’énergie cinétique d’agitation, des zones chaudes vers celles qui le sont moins. La manifestation macroscopique en est un transfert de chaleur. C’est donc un mécanisme de chocs qui intervient [23].

Bilan de chaleur pour un milieu considéré a température uniforme :

$$\text{mcp}\ \frac{dT}{dt} = \text{Q} - \int {}^{s}\Phi.\,\text{ndS}\ \text{II(II.2)}$$

La variation de température est due aux sources de chaleur internes moins les flux sortant du volume. Ces termes de flux sortant sont le plus souvent évalues sur les diverses frontières du volume V. Ils peuvent être conducators, radiatifs ou convectifs[23].

Loi de Fourier :

$$d\Phi = -K\,\nabla T.\,n.\,dS \qquad \text{(II.3)}$$

Le signe moins traduit le fait que la chaleur ne peut être cédée que par la zone chaud au profit de celle plus froide.

Loi de Fourier pour un milieu isotrope

$$d\Phi = -\lambda.\,\nabla T.\,n.\,dS\text{(II.4)}$$

λ est la conductivité thermique, λ peut être considérer comme constant dans large intervalle de température s exprime en w. m^{-1} k^{-1}.

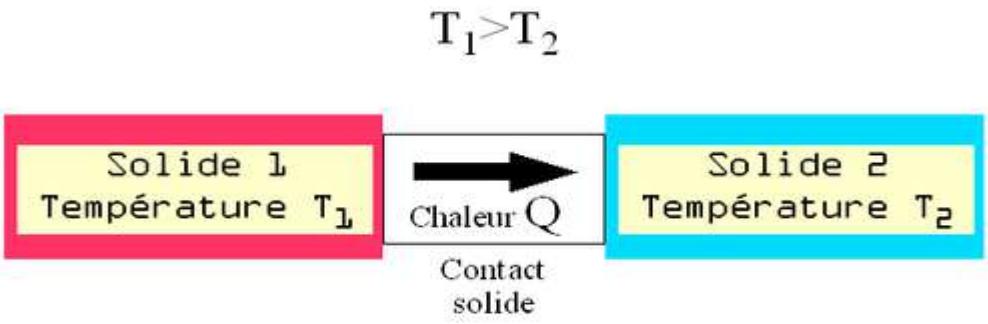


Figure II.1:schéma du transfert de chaleur par conduction.

II.2.3.2-Convection:

On appelle convection la recherche du champ de vitesse et de température dans un milieu matériel dont les différentes parties sont en mouvement les unes par rapport aux autres. Par milieu matériel, nous entendons un fluide (gaz ou liquide) homogène et isotrope.

Dans le solide en contact, comme dans le fluide, les flux peuvent donc s'écrire à la paroi:

$$\lambda s(\frac{\partial T}{\partial n})Ps = \lambda f(\frac{\partial T}{\partial n})Pf = \Phi p \qquad (II.5)$$

avec$n$ normale à la paroi, tandis que l'on aura la continuité des températures:

$$(Ts)pM = (Tf)pM$$

avec :$(Ts)pM$:température du solide en un point M de la paroi.

$(Tf)pM$: température du fluide en ce même point [23].

Le flux de chaleur transmise par convection est donné par la(2ième) loi de Newton :

$$\phi = h.S.\Delta T \qquad (II.6)$$

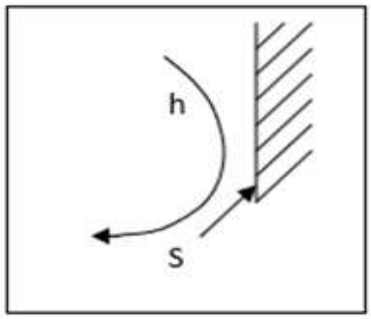


Figure II.2 : La convection [24].

ϕ: Flux de chaleur transporte.

h: Coefficient de convection.

S : Surface d'échange.

ΔT: représente la chute de température entre la paroi et le fluide égal à la valeur absolue de la différence entre les températures du fluide et de la paroi du corps [24].

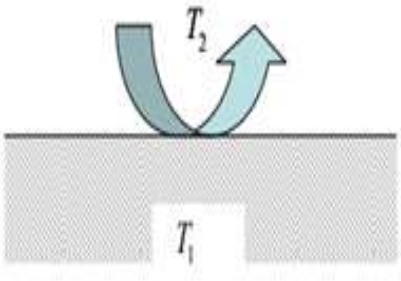


Figure II.3 : principe de la convection [22].

II.2.3.2.1.Les type de la convection :

- **La convection naturelle (libre) :**

Le phénomène de convection naturelle (ou libre) a pour origine les variations de la masse volumique au sein d'un fluide, liées aux variations de sa température [25]. Dans laquelle ce mouvement résulte seulement de la différence de densité entre les parties chaudes et froides du fluide (principe d'archimède) [26], donc, la mise en mouvement du fluide n'est pas due à une cause extérieure, mais à la distribution de la température à l'intérieur même du fluide [25]. Cette variation crée un champ de forces gravitationnelles qui conditionne les déplacements des particules fluide. La convection naturelle est due au contact du fluide avec une paroi plus chaude ou plus froide et qui crée des différences de masse volumique, génératrice du mouvement au sein du fluide. On retrouve dans plusieurs applications industrielles ce mode de transfert de chaleur, par exemple, dans les échangeurs de chaleur où deux fluides en mouvement, séparés par une paroi solide s'échange de l'énergie [27].

- **La convection forcée (ventilation):**

Grossesse forcée dans laquelle un mouvement se produit en raison d'une opération mécanique indépendante des phénomènes thermiques; elle se produit quand le mouvement du

fluide est imposé artificiellement ce qui va accélérer les échanges thermiques.le transfert de chaleur par convection est donc étroitement lié à la chaleur l'écoulement d'un fluide [27].

- **la convection mixte:**

Le mouvement du fluide dépend des forces extérieures et de la gravité, avec un Δt assez grand pour modifier le mouvement [28].

II .2.3.3.Rayonnement:

Tous les corps matériels (solides, liquides ou gaz), à une température supérieure à0C peuvent émettre par radiation de l'énergie thermique d'échangé entre eux.

Cette transmission se réalise par des ondes électromagnétiques et ne nécessite pas de support matériel (milieu de transport) pour être réalisée. Dans le domaine des basses températures, La convection et la conduction jouent un rôle important. Le flux transmis par rayonnement devient prépondérant aux températures élevées.

Les différents modes de transfert thermique (convection, conduction, rayonnement) peuvent intervenir de façon couplée. Toutefois, quand le transfert radiatif est considéré, un problème particulier se pose lorsque le fluide lui-même se comporte comme un milieu semi-transparent, c'est-à-dire qu'il absorbe et émet le rayonnement infrarouge. Il faut alors tenir compte d'une source de chaleur interne au milieu, résultant de la différence entre l'énergie radiative absorbée et celle qui a été émise par chaque élément de volume. Dans cette étude le modèle de rayonnement a été utilisé [29].

$$\Phi = \boldsymbol{\varepsilon}\ \sigma\ s\ (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{(II.7)}$$

$\boldsymbol{\varepsilon}$ Est l'émissivité équivalente et σ la constante de Stefan boltzman.

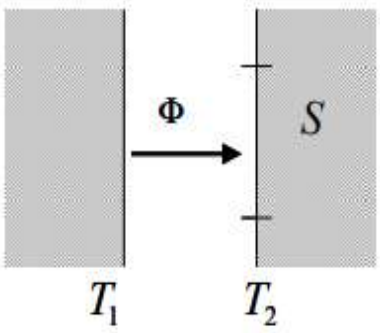


Figure II.4 : principe du rayonnement [22]

Un corps noir est une surface idéal (qui n'existe donc pas dans la nature), Le rayonnement est plus grande que celui de toute autre surface, Il est isotrope.[29]

Loi de Planck :

$$U(\lambda, T) = \frac{8\pi hC}{\lambda^5}.\frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)^{-1}} \qquad \text{(II.8)}$$

Limittance d'un corps noir $M=\delta T^4$

La cste de stefan-boltzmann $\delta=5{,}670\times 10^{-8}$ $w.m^{-2}.k^{-4}$. [30]

II.2.4.Conductivité Thermique :

Les conductivités thermiques de quelques corps sont représentées en fonction de la température sur la figure 1 .Parmi les bons conducteurs, le cuivre et l'aluminium, Les gaz ont des conductivités faibles (de l'ordre de quelques $10^{-2}Wm^{-1}K^{-1}$) ;

Et sont dépend généralement avec la température et indépendantes de la pression [31].

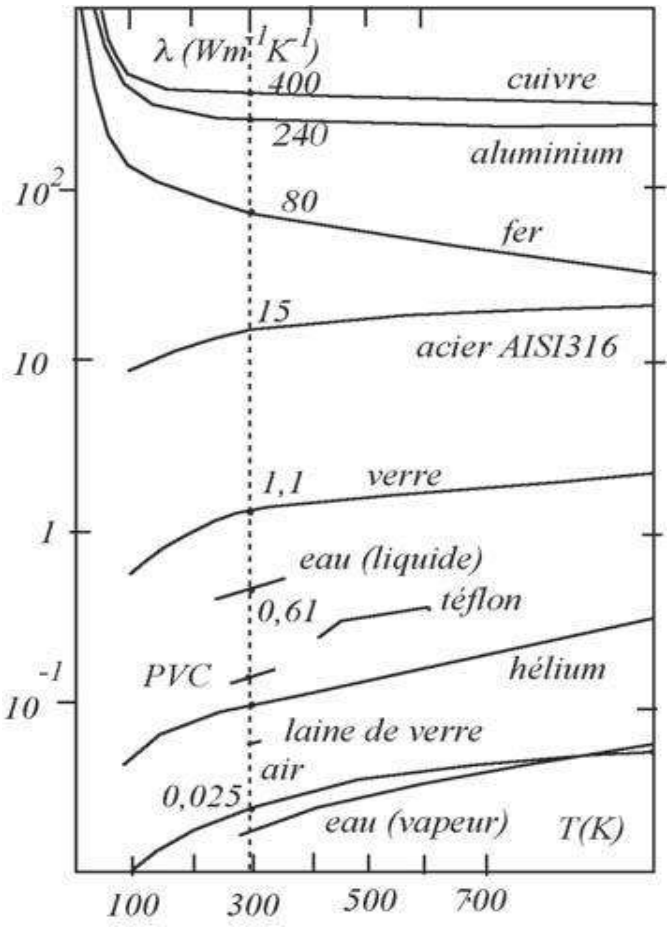


Figure II.5 : Evolution de la conductivité avec la température [31].

II.2.5.Les Echangeures Thermique

II.2.5.1.définition

Les échangeurs de chaleur sont des appareils permettant de transférer de la chaleur entre deux fluides à des températures différentes. qui permet d'échanger la chaleur entre deux fluides sans se mélanger (un fluide chaud et un fluide froid), ces deux fluides sont séparés par une paroi (plane ou tubulaire), la transmission de la chaleur se fait du fluide chaud vers le fluide froid, les fluides, chauffant et chauffé sont des fluides caloporteurs . Au sein de la cloison, le mécanisme de transfert de chaleur est fixe, et sur les surfaces de contact des fluides, le phénomène de convection prévaut souvent [32].

II.2.5.2.Principe

Le principe constructif des échangeurs thermiques est simple : ce sont des appareils destinés à transférer de la chaleur entre deux fluides de températures différentes, ou plus

rarement d'un fluide à un milieu solide. Dans des sociétés industrielles dont le fluide vital est l'énergie, les échangeurs thermiques ont acquis une importance économique majeure [24].

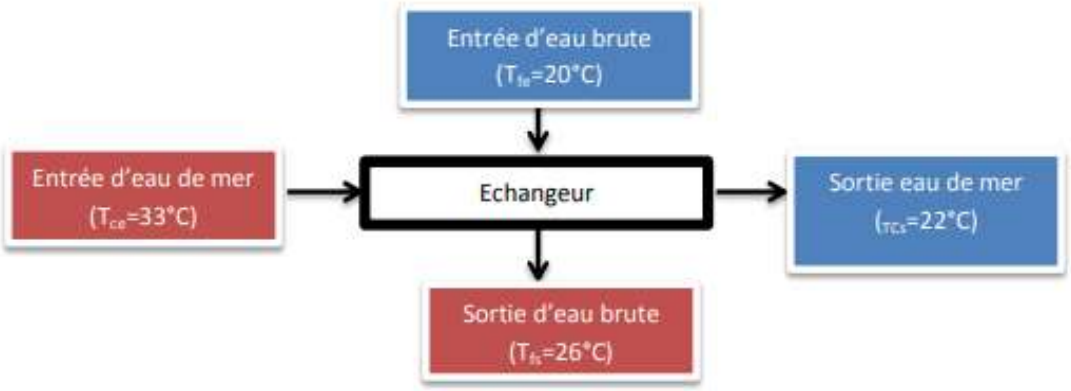


Figure II.6 : Echangeur thermique [24].

II.2.5.3.But des échangeurs de chaleur:

Le but d'un échangeur de chaleur est de récupérer un maximum d'échange thermique entre deux fluides séparés ou non par une paroi

II.2.5.4.Critères de classement des échangeurs :

Il existe plusieurs critères de classement des différents types d'échangeurs. Énumérons les principaux. [33]

II.2.5.4.1.Classement suivant le mode de transfert de chaleur :

Les trois modes de transfert de chaleur (conduction, convection, rayonnement) sont couplés dans la plupart des applications (chambre de combustion, récupération sur les fumées, etc.) ; il y a souvent un mode de transfert prédominant. Pour tout échangeur avec transfert de chaleur à travers une paroi, la conduction intervient [33].

1. Classement des échangeurs de chaleur :

a. Type de contact :

- **échangeurs à contact direct :**

C'est un échangeur sans paroi matérielle de séparation entre les deux fluides qui circulent dans l'échangeur. On distingue [34] :

- les désurchauffeurs de vapeur.
- les dégazeurs.
- les tours de refroidissement à convection naturelle ou forcée.
- les ballons de détente de purges.

➢ **échangeurs à contact indirect :**

Dans cette catégorie qui est la plus importante en raison de ses nombreuses applications industrielles, les deux fluides circulent de manière continue de part et d'autre de la surface d'échange [34].

1)Classement des types d'échangeurs:

a. échangeur sans changement de phase :

Les échangeurs de chaleur sans changement de phase correspondent aux échangeurs dans lesquels l'un des fluides se refroidit pour réchauffer le deuxième fluide sans qu'il y ait changement de phase .les températures des fluides sont donc variables, tout le long de l'échangeur [35].

b. échangeur avec changement de phase :

Les échanges avec changement de phase sont caractérisés par trois cas différents:

1- l'un des fluides se condense alors que l'autre se vaporise : ces échangeurs sont rencontrés dans les machines frigorifiques.

2- le fluide secondaire se vaporise en recevant de la chaleur du fluide primaire, lequel ne subit pas de changement d'état. Ils sont appelés évaporateurs.

3- le fluide primaire se condense en cédant sa chaleur latente au fluide secondaire plus froid, lequel ne subit pas de transformation d'état [36].

II.2.5.4.2. Classement suivant la disposition des écoulements

Dans les échangeurs à fluide séparés, les modes de circulation des fluides peuvent se ranger en deux catégories :

- Co-courant (mouvements des fluides dans le même sens).
- Contre-courant (mouvement des fluides dans les sens contraires).

ou bien les vecteurs vitesses des fluides sont perpendiculaires l'un à l'autre , il s'agit cette fois de « courant croisés »

1) circulation à Co-courant :

Les fluides 1 (froid) et 2 (chaud) entrent d'un même côté de l'appareil, circulent en parallèle, et sortent à l'autre extrémité

2) circulation à contre-courant :

Le fluide 1 et 2 entrent des côtés opposés de l'appareil et circulent en sens contraires.Les échangeurs les plus utilisés sont les échangeurs à faisceaux complexes : échangeurs tubulaires échangeurs à tubes et calandre échangeurs à plaques échangeurs double tubes [37].

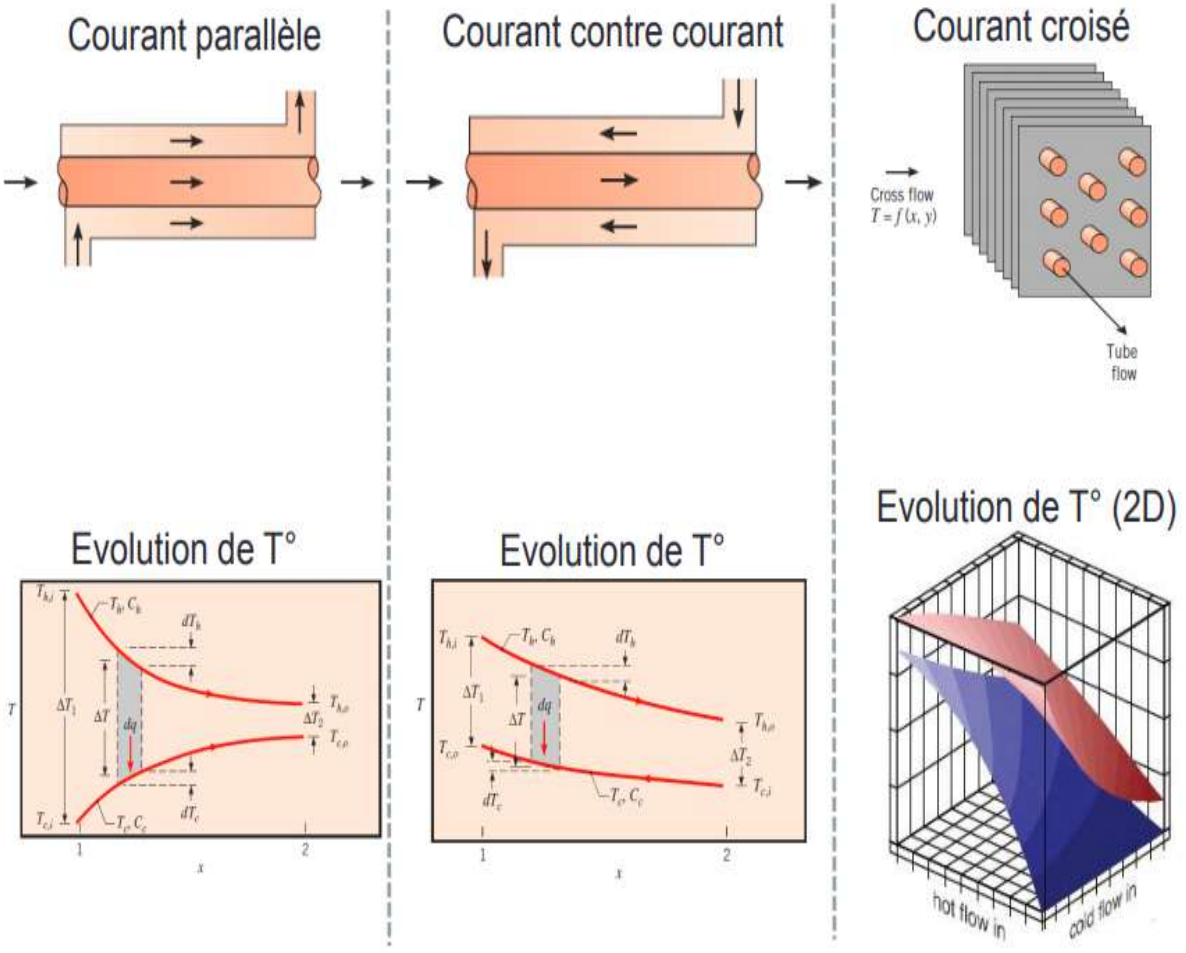


Figure II.7 : différents modes de circulation [28].

II.2.5.4.3.échangeurs tubulaires :

Les échangeurs tubulaires utilisant des tubes comme constituant principal de la paroi sont largement répandus. On distingue 3 catégories :

- Échangeur monotube, dans lequel le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir. Il a généralement la forme d'un serpentin.
- Échangeur coaxial, dans lequel les tubes sont le plus souvent contrés ; en général, le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur.

Échangeur multitubulaire, existant sous quatre formes :

1. échangeur à tubes séparés
2. échangeurs à tubes rapprochés
3. échangeurs à tubes ailettes
4. échangeur à calandre [39].

II.3.Les tours de refroidissement:

II.3.1.Historique des tours de refroidissement:

Le premier prototype de tour de refroidissement depuis 1957, en polyester armé de fibre de verre fut fabriqué à l'usine de Lindau (Allemagne), notre objectif fut d'allier les plus hautes performances à une qualité optimale. Les tours de refroidissement : Un état de l'art 5 A partir de 1970, de nombreuses centrales électriques de forte puissance ont été construites et équipées de tours de refroidissement atmosphérique en Europe, aux USA, en Afrique du Sud, en Inde, en Chine, etc. Les tours de refroidissement atmosphérique ont été abusivement associées aux centrales nucléaires. Depuis la fin des années 1980, très peu de tours de ce type ont été construites dans les pays occidentaux en raison de l'absence de projets de centrales, de leur impact visuel et d'un sentiment général de pollution qui leur est attribué. La tendance s'inverse actuellement car les prescripteurs et les utilisateurs sont convaincus de leurs avantages pour l'environnement grâce, essentiellement, à l'économie d'énergie qu'elles procurent. En plus de cet aspect économique, les tours de refroidissement atmosphérique offrent les avantages suivants :

- surface au sol limité
- pas de bruit mécanique (aucun ventilateur)
- entretien limité (très peu d'éléments mobiles)

- grande longévité (généralement plus élevée que la durée de vie de la centrale) [40].

II.3.2.Définition:

Un réacteur nucléaire est une machine à vapeur très perfectionnée qui actionne un alternateur. C'est l'énergie libérée par la réaction de fission qui produit la chaleur pour générer la vapeur. Le combustible d'uranium, le modérateur et le caloporteur sont trois composants essentiels d'un réacteur nucléaire. Selon le type de réacteur, l'uranium utilisé peut être naturel (0,71 % de 235u) ou enrichi (de manière que la part de 235u est de 3 % ou plus). Le modérateur, matériau léger comme l'eau, ralentit les neutrons sans les absorber. Le ralentissement des neutrons libérés au cours de la fission accroît la possibilité de fission supplémentaire. Le caloporteur est un fluide qui circule dans le cœur du réacteur et permet l'absorption et le transfert de la chaleur produite par la fission nucléaire. Il permet également de maintenir la température du combustible dans les limites acceptables.

II.3.3.Classification des tours de refroidissement:

La fonction assurée par le système de refroidissement est celle d'un échangeur. La partie essentielle est donc le système d'échange thermique inséré le plus souvent dans un circuit d'eau et un circuit d'air. La façon de mettre l'eau en contact direct ou indirect avec l'air, le mode et les systèmes d'échanges mises en œuvre permettent une première classification. Les trajectoires relatives de l'air et de l'eau (contre-courant ou courant croisé), en particulier dans les systèmes d'échange [41].

II.3.3.1.Classification suivant la nature des échanges :

Il y a deux types de base : la tour aéroréfrigérante humide et la tour aéroréfrigérante sèche. De nombreuses solutions mixtes existent mélangeant parties sèche et humide.

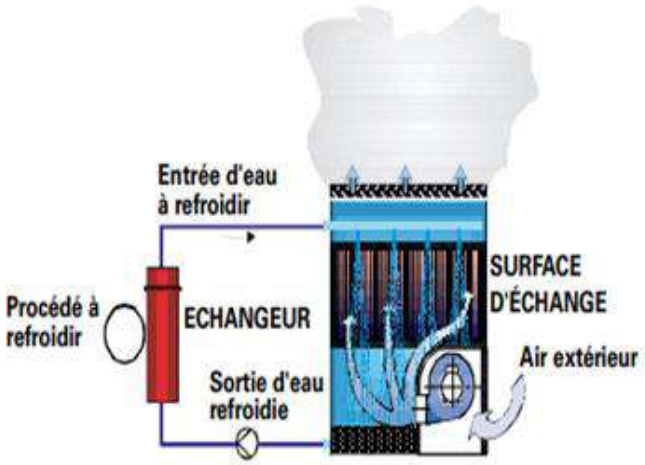


Figure II.8:L'eau est en contact indirect avec L'ai [42].

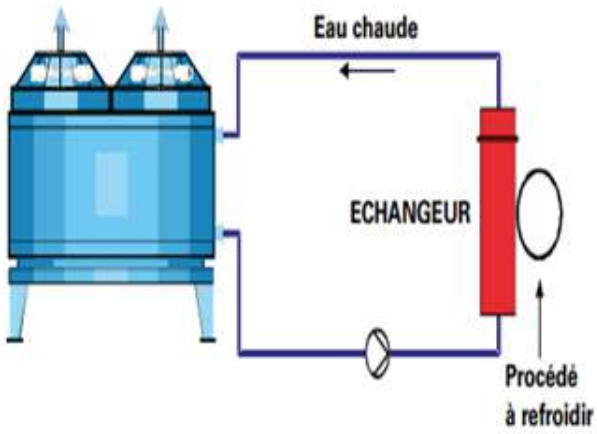


Figure II.9 : Échangeurs à tube [42].

II.3.3.1.1. tours de refroidissement humide :

Une tour aéroréfrigérante humide (Fig. II.11a)est un échangeur de chaleur « air/eau » dans lequel l'eau à refroidir est en contact direct avec l'air ambiant. L'eau chaude est pulvérisée en partie haute de la tour aéroréfrigérante et ruisselle sur le corps d'échange. L'air traverse le système de ruissellement et est rejeté dans l'atmosphère. Le refroidissement s'effectue principalement par évaporation de l'eau ; l'efficacité du système est liée à la conception et à l'entretien de la tour aéroréfrigérante ainsi qu'aux conditions atmosphériques (température et humidité) [43].

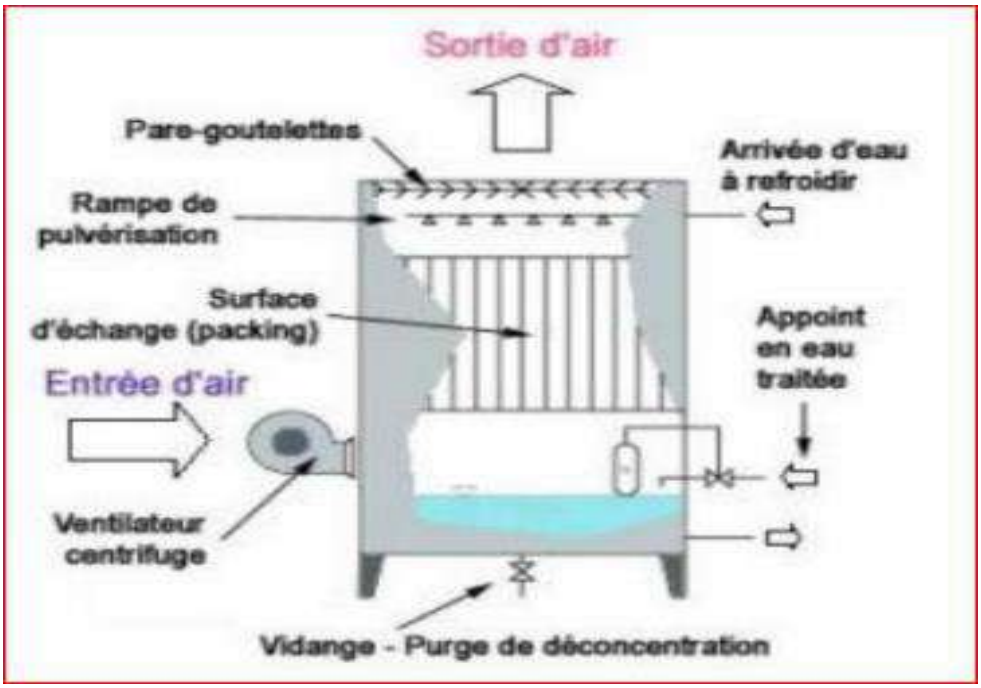


Figure II.10 : tour de refroidissement humide [43].

II.3.3.1.2.tours de refroidissement sèches :

Dans ce cas (Fig. II.11b) les systèmes de refroidissement utilisant l'air sec Le refroidissement sec utilise l'air ambiant pour refroidir un fluide caloporteur pouvant être gazeux ou liquide. Ce mode de refroidissement est souvent utilisé lorsque le medium ne doit être refroidi que de quelques degrés en deçà de la température ambiante.

1) Aéroréfrigérant sec :

Le fluide à refroidir circule dans les tubes d'un échangeur à ailettes et est refroidi par l'air mis en mouvement par des ventilateurs et traversant cet échangeur, l'échange se faisant à courant croisé. Ce type de système ne fonctionne qu'en mode sec. Il ne permet donc pas d'obtenir des températures de refroidissement aussi basses qu'avec un refroidissement évaporait [41].

II.3.3.1.3.tours de refroidissement sèches/humides (hybrides) :

Une tour hybride (Fig. II.11c), allie les deux modes refroidissement sec et humide, constituée d'une batterie sèche situé au sommet de la tour couplée à un corps d'échange sur lequel l'eau à refroidir est pulvérisée. Ce choix se justifie par considérations environnementales qui limitent par exemple la consommation d'eau en été ou la formation d'un panache de vapeur condensée par temps humide et froid en hiver [10].

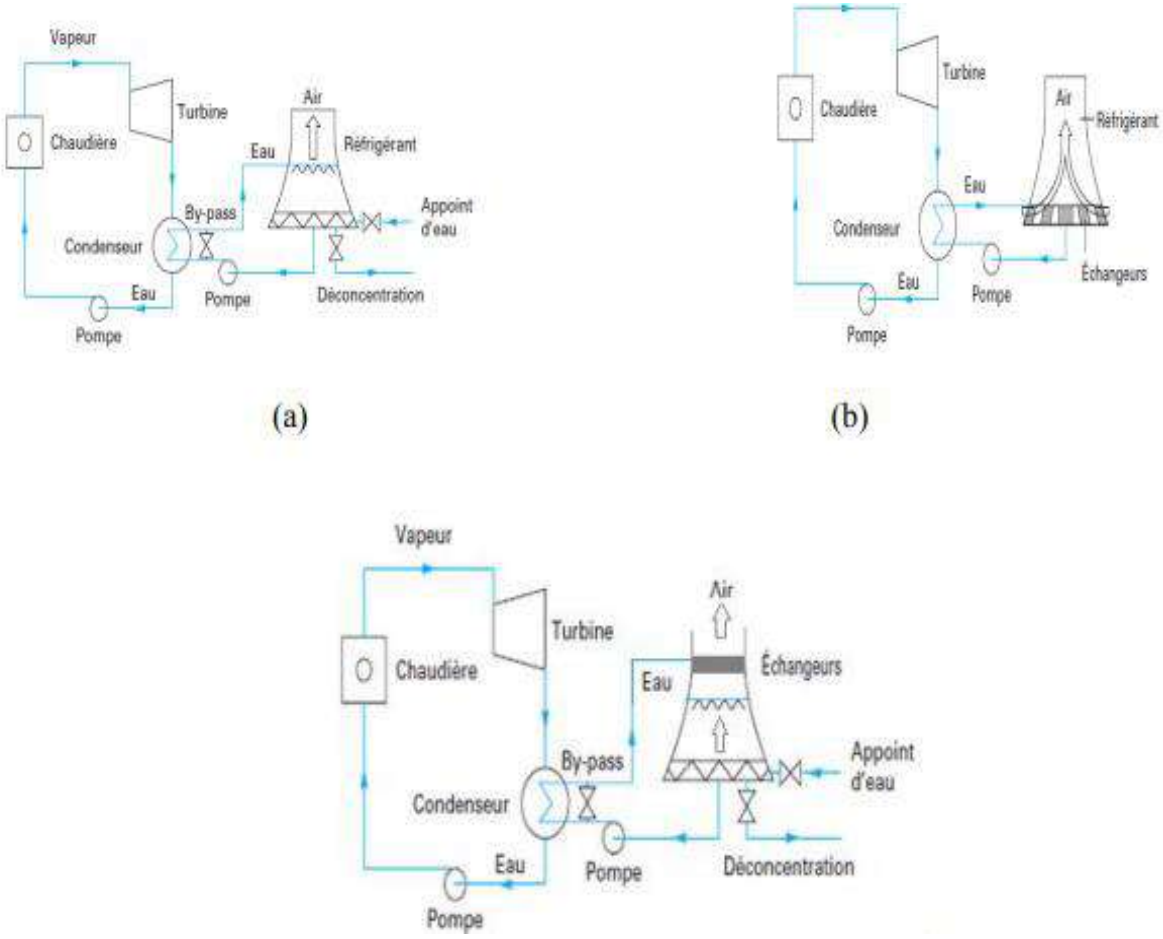


Figure II.11 : Types de tours de refroidissement selon la nature d'échange [10].

II.3.3.2.Classification suivant le mode de refroidissement de l'eau:

II.3.3.2.1.tour de refroidissement a circuit ouvert:

Dans les tours de refroidissement à circuit ouvert illustré dans la figure II.12, l'air et l'eau à refroidir entrent directement en contact. Une tour de refroidissement à circuit ouvert est un échangeur de chaleur qui permet de refroidir de l'eau en contact direct avec l'air. Le transfert de chaleur s'effectue partiellement par l'échange de chaleur entre l'air et l'eau, mais surtout par l'évaporation d'une petite quantité de l'eau à refroidir. De cette façon, on peut atteindre des températures de refroidissement inférieures à celles de l'air ambiant. Est l'équipement évaporait qui offre les plus grands avantages en matière de rendement, d'encombrement, de coût unitaire et de consommation énergétique, présentant également le poids d'installation le plus faible [44].

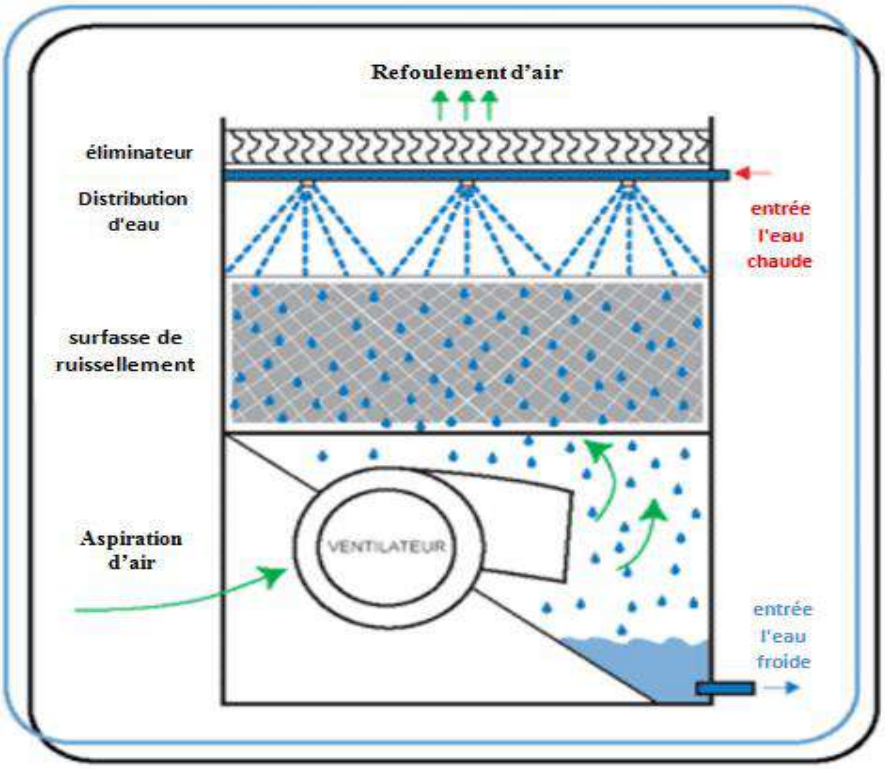


Figure II.12: Tour a circuit ouvert [44].

II.3.3.2.2.Tour de refroidissement a circuit ferme

Un circuit fermé est un circuit dans lequel le fluide distribué « tourne en rond » sans contact direct avec l'atmosphère. Les circuits de chauffage à eau chaude et de climatisation à eau glacée sont des circuits fermés [45].

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 [46].

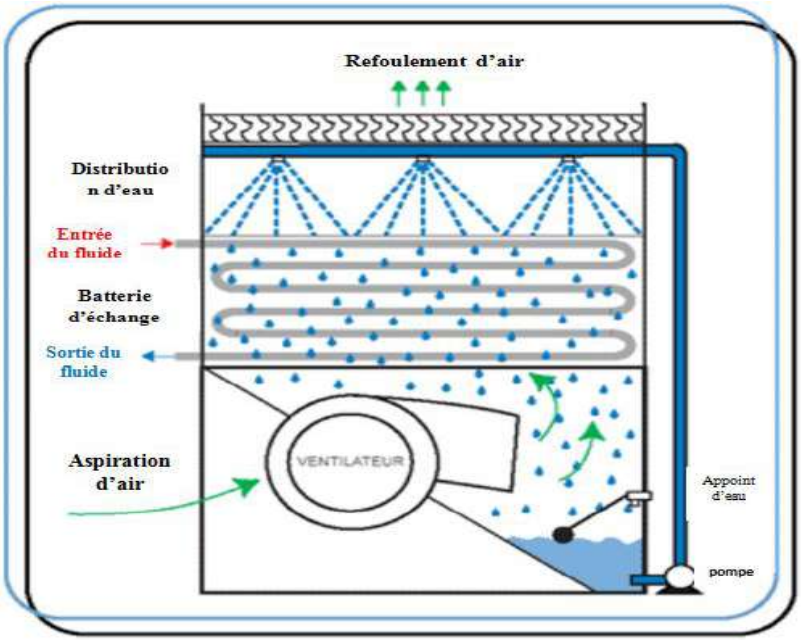


Figure II.13: Tour à circuit ferme [46]

II.3.3.3.Paramètres de fonctionnement du circuit de refroidissement :

Le circuit de refroidissement utilisé dans la raffinerie est du type semi-ouvert à recyclage d'eau de réfrigérée par aéroréfrigérant à ventilateurs de type contre courant. Les définitions qui suivent sont utilisées pour expliquer les paramètres de fonctionnement du système d'évaporation et permettre de calculer les performances de la tour de refroidissement. Les paramètres qui caractérisent ce circuit sont :[47]

1) Volume d'eau en circulation :

C'est la quantité d'eau totale contenue dans le circuit, c'est-à-dire dans :

- les bassins des eaux froides.
- les canalisations de liaisons.

2) Q: débit de circulation (m^3/h) :

C'est le débit d'eau chaude envoyée à la réfrigération atmosphérique.

3) E: débit d'évaporation (m^3/h) :

L'échange thermique entre l'air et l'eau chaude provoque une évaporation d'une quantité d'eau laissant refroidir le débit principal. Ce débit d'évaporation est constitué d'eau pure qui

n'entrante aucun sel dissout. Par approximation, un litre d'eau évaporé correspond à % (cal) il en ressort la relation suivante [50].

$$E = \frac{Q\Delta T}{560} \qquad \text{(II.9)}$$

4) Ev: débit d'entrainement vésiculaire (m³/h) :

C'est le débit d'eau entrainée dans l'atmosphère sous forme de gouttelettes liquides finement divisées. Cette eau, contrairement à l'eau évaporée, possède la même composition chimique + (analyse) que celle de l'eau en circulation. Elle représente '0.1%du débit circulé.

$$Ev = \frac{Q}{1000} \qquad \text{(II.10)}$$

5) D: débit de purge de la déconcentration totale (m³/h) :

L'évaporation entraine une augmentation de la concentration des sels dissous dans l'eau en circulation.il y'à lieu de procéder à des purges pour éviter que cette concentration ne devient trop importante il y risque de provoquer des dépots divers, on doit extraire et re1eter à l'égout une partie de l'eau en circulation

$$D = \frac{E}{C-1} \qquad \text{(II.11)}$$

La purge se fait uniquement quand le taux de concentration 2 C 3 est supérieur à 4

6) C: Taux de concentration :

C'est le rapport de la teneur +concentration en sels dissous dans l'eau en circulation et la concentration dans l'eau d'appoint

$$C = \frac{salintedecircuit}{salinitedapointe} \qquad \text{(II.12)}$$

Habituellement, ce taux de concentration est déterminé par la mesure des chlorures, facilement dosable qui du fait de leur solubilité sont les plus stables dans le circuit.

C =minéralisation de l'eau du circuit / minéralisation de l'eau d'appoint.

C = titre en chlorures dans le circuit / titre en chlorures dans d'appoint

7) A: débit d'appoint (m³/h) :

Il compense l'ensemble des pertes d'eau dans le circuit à savoir : l'évaporation, l'entrainement vésiculaire et les purges de la déconcentration.

$$A = D + E + Ev + fuite \text{(II.13)}$$

8) a: la surface d'échange (m^5/m³) :

C'est la section latérale du garnissage par le volume de la tour ou s'effectué l'échange thermique.

$$a = \frac{S}{V} \qquad \text{(II.14)}$$

II.3.3.3.Classification suivant l'appel d'air:

II.3.3.3.1.tour de refroidissement a ventilation naturelle:

Pour des débits d'eau recerclée supérieurs à 10000 m^3/h on utilise des tours en béton à tirage naturel de structure hyperbolique. Leur hauteur peut atteindre 180m et leur diamètre 160m. Ce type de tours est utilisé dans les grosses centrales thermiques, les centrales nucléaires et certaines usines chimiques ou pétrochimiques. L'air se réchauffe au contact de l'eau et par différence de pression (due à la différence de densité entre l'air chaud à l'intérieur de la tour et l'air froid à l'extérieur) circule naturellement du pied de la structure, vers le sommet. Le tirage est amélioré en augmentant la hauteur des tours au-dessus du garnissage [48].

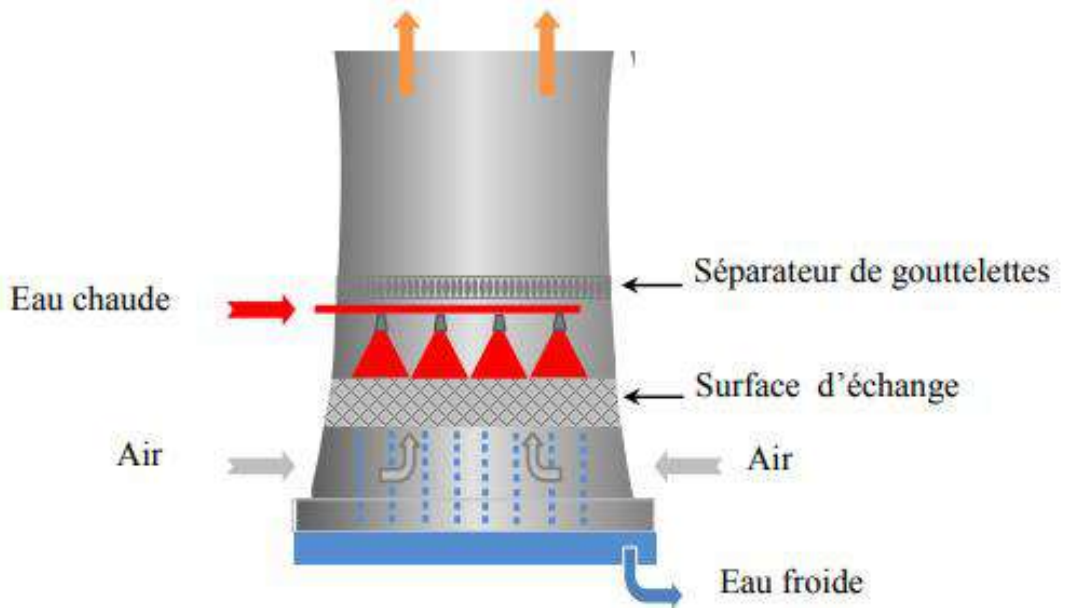


Figure II.14: Tour de refroidissement à tirage naturel [49].

II.3.3.3.2.Tours de refroidissement à tirage mécanique

Les tours de refroidissement à tirage mécanique construites sur place sont utilisées dans une vaste gamme d'applications de refroidissement telles que les centrales électriques, les processus industriels, le raffinage, la fabrication, etc. Les tours de refroidissement à tirage mécanique utilisent un ou plusieurs grands ventilateurs mécaniques afin de faire circuler l'air dans la tour.

Dans ce modèle il existe deux différentes classes de fonctionnement selon l'emplacement des ventilateurs :

- Tours de refroidissement à tirage forcé
- Tours de refroidissement à tirage induit

La circulation d'air dans l'une ou l'autre classe peut être à contre-courant ou à courant croisé en ce qui concerne l'eau de chute. Le croisement de flux indique que le flux d'air est horizontal dans la partie remplie de la tour tandis que le contre-courant signifie que le flux d'air est dans la direction opposée de l'eau de chute.

Toutes les tours mécaniques doivent être localisées de sorte que l'air de décharge se répande librement sans passer par la tour de recirculation, et ainsi les admissions d'air ne sont pas restreintes. Les tours de refroidissements devraient être localisées aussi près que possible des systèmes de réfrigération qu'elles servent, mais ne devraient jamais être localisées au-

dessous d'eux afin de permettre à l'eau du condensateur de sortir hors du système par la tour de bassin quand le système est arrêté [49].

II.3.3.3.3. Les tours à tirage forcé (obligatoire) :

Tours de refroidissement a tirage forcé Les tours à circuit ouvert dites à tirage forcé sont plus répandues et plus communes dans l'industrie, et ont plusieurs avantages par rapport au type à tirage naturel. Elles sont plus petites pour le devoir équivalent et ont donc besoin de moins de zone au sol. Elles ne dépendent pas des conditions atmosphériques pour faciliter la convection et ainsi elles donnent une exécution plus constante durant toutes les saisons de l'année. Contre ces avantages doit être placée la complication supplémentaire des ventilateurs simple ou multiple et de la puissance qu'ils absorbent. Elles sont divisées en deux grandes classes : Tours de refroidissement à circulation obligatoire : cas de ventilateurs placés au refoulement en bas de la tour (ventilateur en amont); Tours de refroidissement à circulation induite : cas de ventilateurs placés à l'aspiration au sommet de la tour (ventilateur naval) [40].

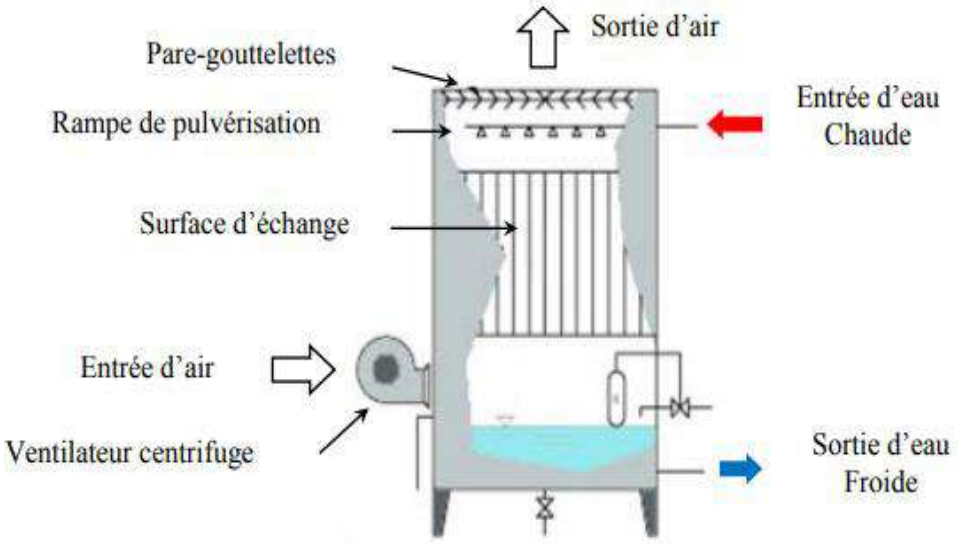


Figure II.15 : Tour de refroidissement à tirage forcé [49].

II.3.3.3.4. Les tours à tirage induit :

La méthode induite c'est un courant d'air entraîné par le sommet, est la plus largement répandue à l'heure actuelle. La tour à circulation induite utilise un ou plusieurs ventilateurs, montés à l'aspiration au sommet de la tour, qui encouragent l'air chargé d'humidité à quitter et

à être remplacé par de l'air frais qui peut mieux recevoir plus de vapeur. Une vue en coupe d'une tour humide à circulation induites montrée dans la figure II.16 [49].

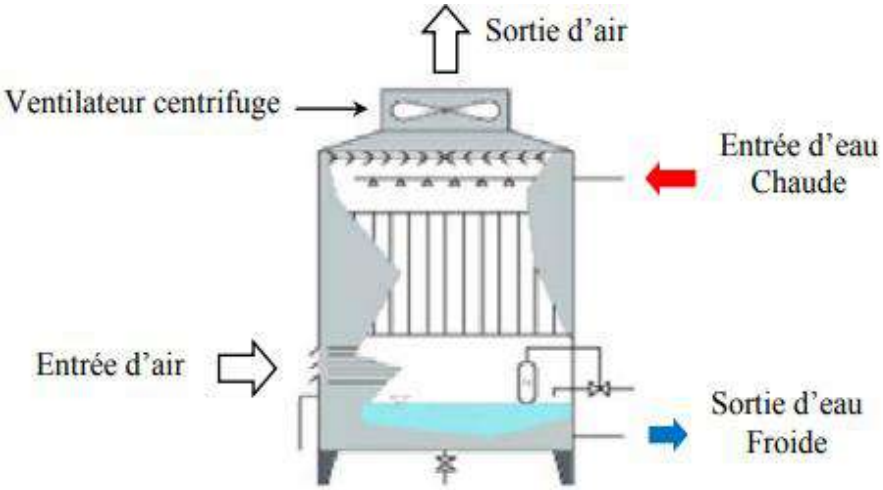


Figure II.16 : Tour de refroidissement à tirage induit [49].

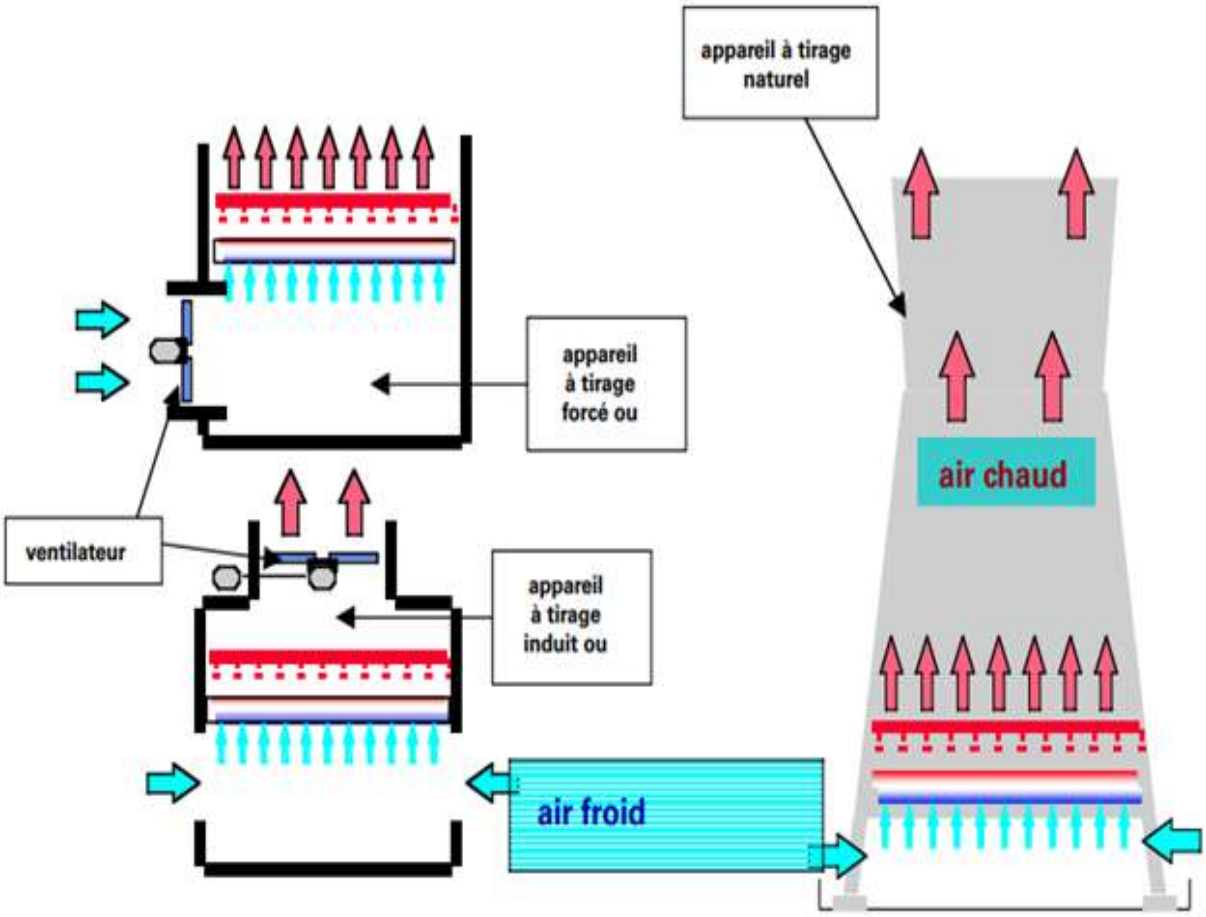


Figure II.17: Exemple de différents tirages [42].

II.3.3.4.Classification suivants la circulation d'air :

II.3.3.4.1. Courants parallèles (II.18a) :

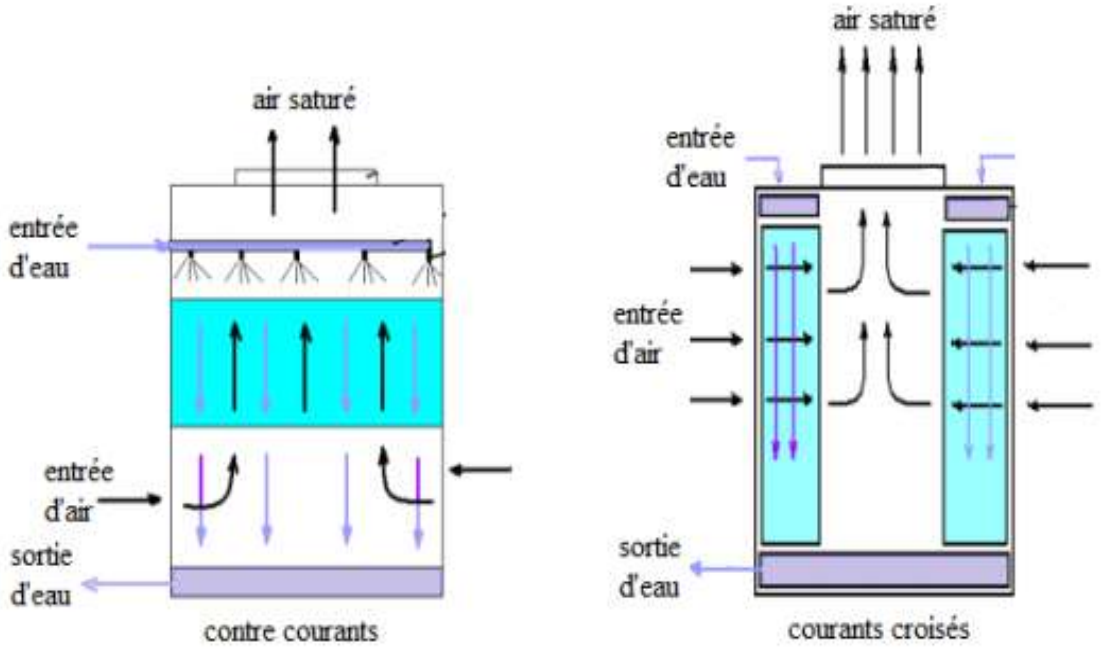
Dans ce cas, l'eau et l'air s'écoulent verticalement dans la tour et dans le même sens (de haut en bas).

II.3.3.4.2.Contre courants (II.18b) :

Dans ce type d'écoulement, l'air est animé d'un mouvement ascendant à travers le corps d'échange, alors que l'eau ruisselle de haut en bas sur ce même corps. Cette configuration est la plus répandue car elle procure à la tour une meilleure efficacité. Les modèles de calculs développés pour ces deux configurations d'écoulements, sus citées, sont unidimensionnels.

II.3.3.4.3.Ecoulement à courants croisés :

L'air circule horizontalement alors que l'eau, pulvérisée en fines gouttelettes, chute librement. Cette configuration d'écoulement implique un modèle de calcul bidimensionnel. Généralement on rencontre dans les tours de refroidissements soit des écoulements à contre courants, soit à courants croisés. Cependant, le fonctionnement à contre-courant offre 25% de plus d'efficacité [10].



(a) (b)

Figure (II.18) : Types de tours selon la circulation d'air [10].

II.3.4.Principe de fonctionnement d'une tour de refroidissement :

II.3.4.1.Principe de fonctionnement d'une tour de refroidissement à circuit ouvert :

Comme l'illustre la figure II.19 ci-dessous, l'eau chaude venant de l'installation à refroidir entre en (1) et circule dans la tuyauterie de distribution. L'eau est ensuite pulvérisée en fines gouttelettes grâce aux buses. Ces gouttelettes ruissellent le long de l'échangeur, celui-ci devant avoir une surface d'échange la plus grande possible pour accroître le phénomène d'évaporation. L'eau non évaporée mais refroidie est recueillie dans le bassin de récupération ou par le séparateur de gouttelettes qui permet de récupérer les gouttelettes en suspension dans le courant d'air. Enfin l'eau est stockée et réintroduite dans l'installation. L'air rentre par les persiennes, un fort débit est obtenu grâce à la mise en place d'un ventilateur, ce qui permet d'accroître le phénomène d'évaporation. Le courant d'air circule dans l'échangeur puis dans le séparateur. Il est ensuite rejeté à l'air libre avec une faible teneur en eau. Les pertes en eau sont compensées par une arrivée d'eau d'appoint contrôlée par le flotteur [44].

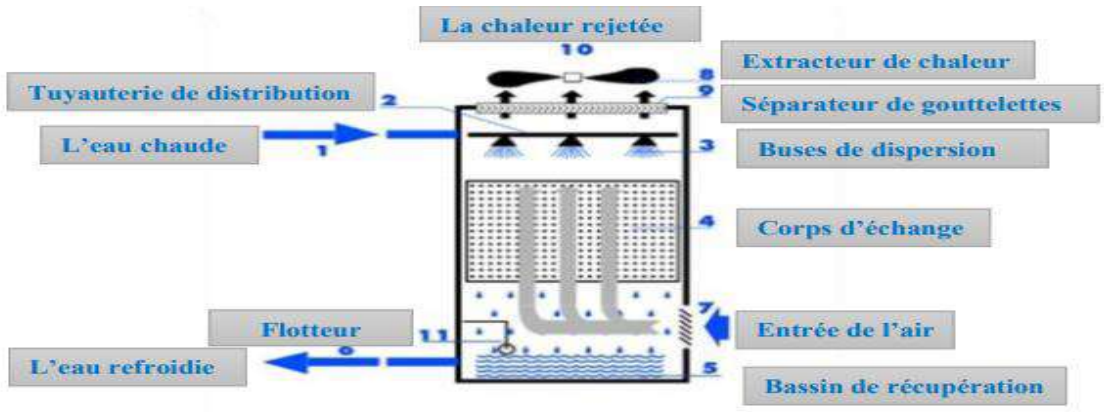


Figure II.19 : Schéma d'une tour de refroidissement à circuit ouvert [44].

II.3.4.2 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 Les puissances thermiques évacuées varient de quelques centaines de kW à plusieurs M [50].

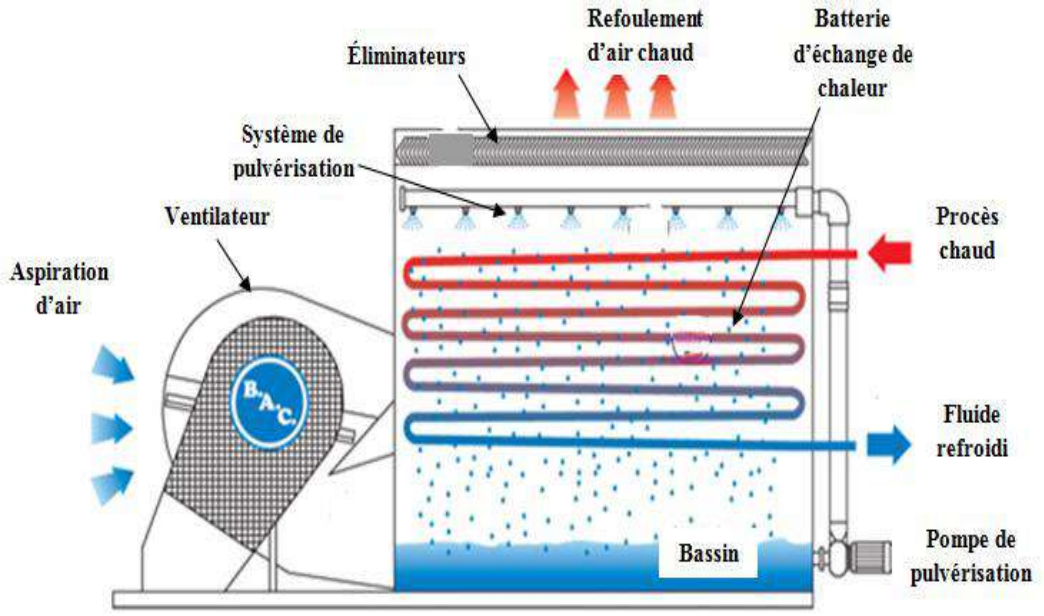


Figure II.20 : fonctionnement des Tour de refroidissement fermé [50].

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 [51].

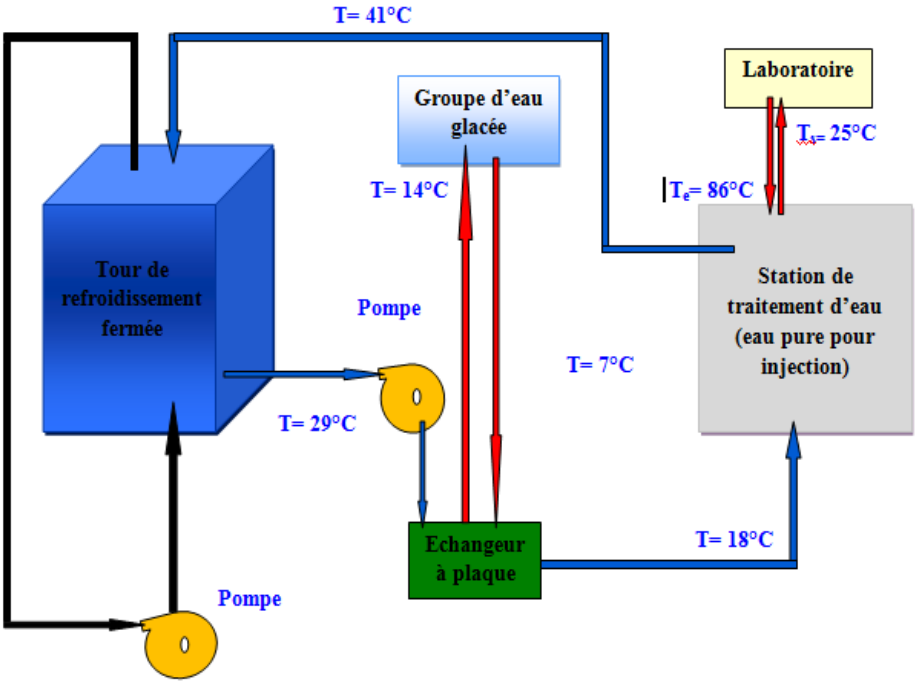


Figure II.21 : tour de refroidissement ferme [50].

Il s'agit du processus d'interaction de la tour de refroidissement avec les autres systèmes de la centrale nucléaire

La tour a des ventilateurs qui pompent de l'air dans le bas de la structure en forme d'hyperboloïde et pompent également l'air du haut. Cela crée un flux d'air ascendant assez fort. L'eau chauffée est ensuite libérée à environ 10% de la hauteur totale. Lorsque cette eau tombe, elle est refroidie par le flux d'air ascendant. Environ 2% de l'eau est transférée dans la vapeur et libérée par le haut. Le reste se refroidit et tombe dans un bassin d'eau au bas de la tour. Ce bassin alimente ensuite le condenseur en eau froide [51].

L'une des plus courantes est que le "nuage" quittant le sommet d'une tour de refroidissement - qui est souvent visible à des kilomètres de distance et peut créer une traînée pouvant atteindre deux milles de long depuis des tours plus hautes - est de la fumée. C'est, bien sûr, la vapeur d'eau propre qui résulte du processus de refroidissement. Il ne contient pas de polluants et n'est pas radioactif - le processus nucléaire se déroule à l'intérieur d'un bâtiment de confinement sécurisé, pas dans la tour de refroidissement [52].

II.4.Les tours de refroidissement nucléaire:

II.4.1.les réacteurs nucléaires dans le monde :

Il y a 453 réacteurs nucléaires actuellement exploitables dans le monde, qui ont une capacité utile de production d'environ 400 GWE.

Ce nombre comprend les 42 réacteurs japonais qui ont été mis hors service peu après l'accident de fukushima survenu en 2011. Depuis octobre 2018, neuf réacteurs ont été raccordés au réseau de nouveau, sept seront fermés et 17 autres ont fait une demande de redémarrage.

• ce nombre comprend également les sept réacteurs allemands qui ont été déconnectés après fukushima. l'Allemagne prévoit la mise hors service progressive de tous ses réacteurs nucléaires d'ici 2022. Au total, 57 réacteurs sont construction dans le monde, principalement dans les économies émergentes comme la chine et l'inde. En outre, plus de 150 réacteurs ont été commandés ou sont en cours de commande, tandis qu'il est envisagé d'en commander 335 autres.

453 réacteurs en exploitation.

57 réacteurs en construction.

335 réacteurs proposés.

150 réacteurs commandés en cours de commande [53].

II.4.1.1.Les générations de réacteurs nucléaires

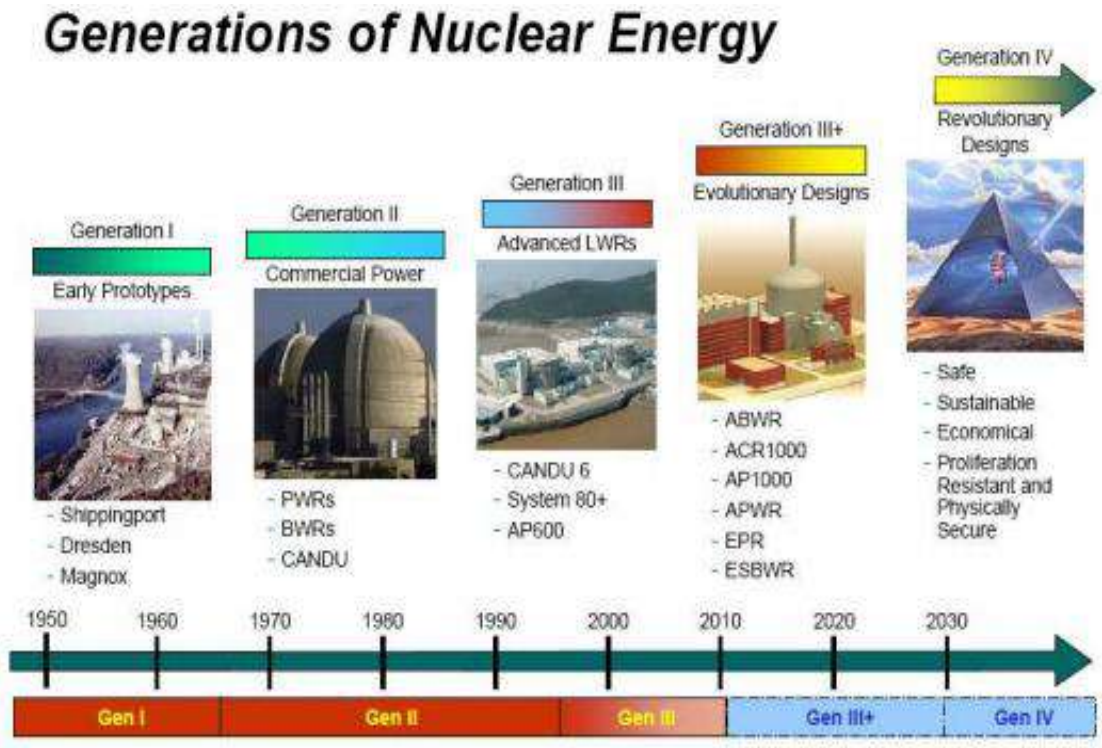


Figure II.22: Evolution de Génération I à III et saut technologique pour Génération IV [54]

II.4.1.1.1.La 1re génération:

Comprend les prototypes et les premiers réacteurs de taille industrielle à usage commercial mis au point dans les années 1950 et 1960 et entrés en service avant les années 1970. Durant cette période, la France, qui ne disposait pas des technologies d'enrichissement de l'uranium, a développé une filière technologique utilisant l'uranium naturel comme combustible.

II.4.1.1.2.Le 2eme génération:

Sont entrés en service à partir des années 1970. Ils répondaient à la nécessité d'atteindre une meilleure compétitivité de l'énergie nucléaire et d'améliorer l'indépendance énergétique, dans un contexte de fortes tensions sur le cours des énergies fossiles (choc pétrolier). La majorité des réacteurs actuellement en exploitation dans le monde sont des réacteurs de 2e génération. En France, ils appartiennent à la filière à eau sous pression (REP), une technologie américaine adaptée par EDF.

II.4.1.1.3.La 3eme génération

Met l'accent sur les impératifs liés à la sûreté et à la sécurité : résistance renforcée aux agressions externes, type chute d'avion par exemple. Ces réacteurs tirent les enseignements du retour d'expérience de l'exploitation des réacteurs de 2e génération, des accidents de Three Mile Island et de Tchernobyl ainsi que des attentats du 11 septembre 2001. Exemple de réacteur de ce type : L'EPR (Européen PressurizedReactor), dont quatre sont actuellement en construction (un en France, un en Finlande et deux en Chine) et plusieurs autres sont prévus, notamment au Royaume-Uni.

II.4.1.1.4.La 4eme génération:

Correspond aux réacteurs, actuellement en phase de conception, qui pourraient voir un déploiement industriel à l'horizon 2050. Ils sont en rupture technologique totale avec tout ce qui a été réalisé jusqu'à présent. Les recherches sur ces systèmes du futur sont menées dans le cadre du Forum international Génération IV qui a établi les critères auxquels ils devront répondre : la durabilité, la sûreté, la compétitivité économique et la résistance à la prolifération nucléaire [55].

II.4.2.Classification des réacteurs nucléaires:

Les réacteurs nucléaires peuvent être classés comme:

- réacteurs nucléaires thermiques.
- réacteurs nucléaires rapides.

Les réacteurs nucléaires thermiques sont ceux qui fonctionnent en ralentissant (modérant) les neutrons les plus rapides ou en augmentant la proportion d' atomes fissiles. pour ralentir ces neutrons, appelés neutrons lents, vous avez besoin d'un modérateur nucléaire qui peut être de l'eau légère, de l'eau lourde ou du graphite.

Les réacteurs nucléaires rapides sont ceux qui n'ont pas besoin de modérer la vitesse des électrons et d'utiliser des neutrons rapides. Un réacteur nucléaire rapide n'a pas besoin de modérateur de neutrons, mais il doit utiliser un combustible relativement riche en matière fissile par rapport à celui requis par un réacteur nucléaire thermique [56].

II.4.2.1.Les typologie générale des réacteurs nucléaires :

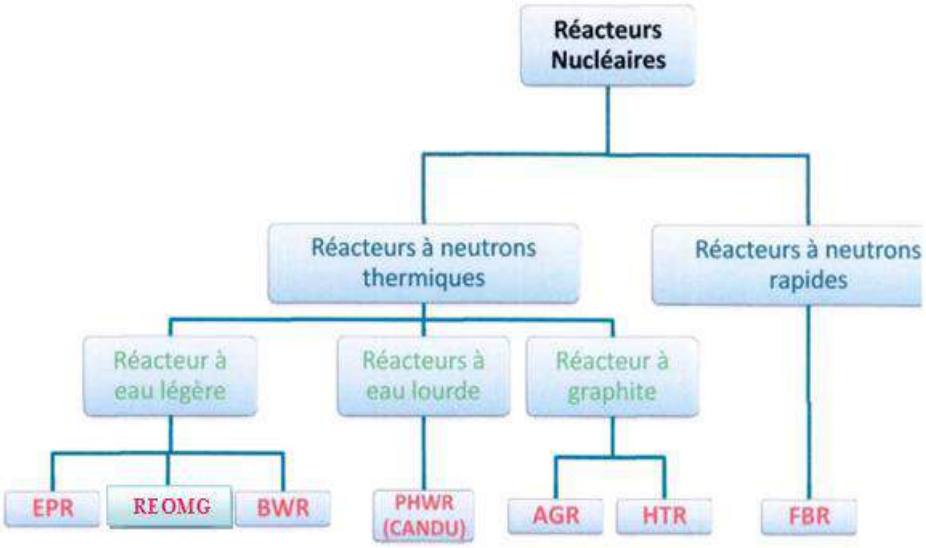


Figure II.23 : Organigramme des différentes filières technologiques de réacteurs nucléaires [57]

Réacteur / Critère	PWR (EPR)	BWR	PHWR	AGR	HTR	FBR
Caloporteur	H_2O	H_2O	D_2O	CO_2	He	Na
Modérateur	H_2O	H_2O	D_2O	Graphite	Graphite	-
Combustible	UO_2 enrichi **ou** UO_2/MOX	UO_2 enrichi	UO_2 naturel **ou** enrichi	UO_2 enrichi	UO_2, UC_2, ThO_2	UO_2 enrichi-PuO_2

Tableau II.1: Spécifications techniques de base qualitatives des différentes filières [57].

II.4.2.1.1.Réacteurs à eau sous préssion REP/PWR :

Réacteurs à eau sous pression (REP) Au début de 2003, il y avait 212 réacteurs REP en service dans le monde, dont 150 en France, au Japon et aux États-Unis. L'eau ordinaire sert à la fois de réfrigérant et de modérateur. En service, elle est maintenue à très haute pression (environ 15,5 MPa ou 155 bar) pour qu'elle reste sous forme liquide à température élevée (au-dessus de 300°C). Elle circule dans l'enveloppe du circuit primaire, composée principalement de la cuve du réacteur et des tuyauteries primaires, sous l'action de pompes puissantes. En traversant le générateur de vapeur, elle cède sa chaleur à une eau qui circule dans un circuit secondaire et qui se transforme en vapeur. La vapeur entraîne le groupe turboalternateur qui produit l'électricité (voir figure II.24) [58].

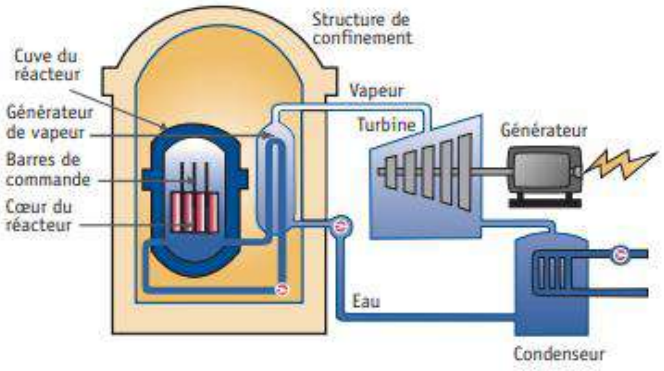


Figure II.24:Réacteur à eau sous pression(REP) [58].

II.4.2.1.2.Réacteurs refroidis par gaz RRG/AGR :

Il y a 33 RRG en service industriel, tous au Royaume-Uni. On distingue deux types de RRG : le réacteur Magnox (qui tire son nom de l'alliage de magnésium utilisé pour le gainage des éléments combustibles) et le réacteur avancé AGR « advancedgas-cooledreactor ». Ils utilisent tous du dioxyde de carbone comme réfrigérant et du graphite comme modérateur. Le réacteur Magnox consomme de l'uranium naturel et l'AGR de l'uranium enrichi. Comme les réacteurs CANDU, ils peuvent être rechargés en fonctionnement avec les mêmes avantages et inconvénients [58].

II.4.2.1.3.Réacteurs à eau bouillante REB/BWR :

Les réacteurs à eau bouillante (REB), modérés et refroidis à l'eau ordinaire, forment 15 % du parc nucléaire mondial. le caloporteur est maintenu à une pression plus basse que dans un REP, ce qui lui permet de bouillir. la vapeur actionne directement les turbo-alternateurs pour produire l'électricité. L'absence de générateurs de vapeur simplifie la conception, mais la radioactivité peut contaminer la turbine [59].

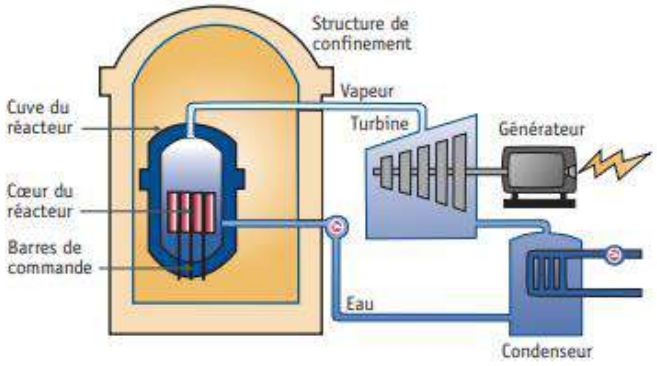


Figure II.25 : Réacteur à eau bouillante.[58]

II.4.2.1.4.Réacteurs à eau lourde sous pression PHWR/CANDU:

Aussi connus sous le nom de « réacteurs CANDU », les réacteurs à eau lourde sous pression (RELP) représentent environ 12 % du parc nucléaire mondial. Toutes les centrales nucléaires canadiennes sont équipées de ce type de réacteurs, qui utilisent l'eau lourde à la fois comme caloporteur et modérateur et l'uranium naturel comme combustible. De la même manière que dans un REP, le caloporteur permet de porter à ébullition l'eau qui circule dans

un circuit distinct. Il est possible de recharger les réacteurs CANDU sans stopper la réaction [59].

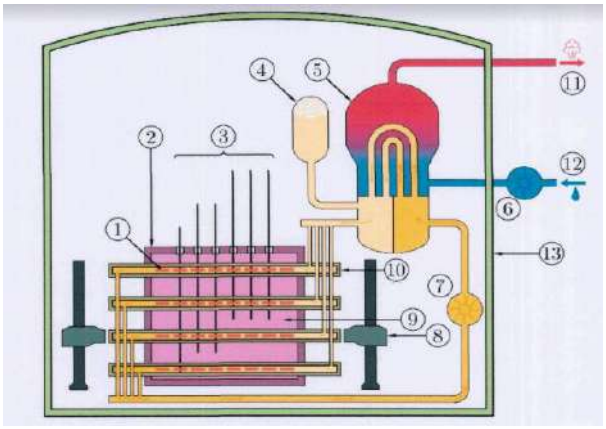


Figure II .26: Réacteur à eau lourde pressurisée (PHWR/CANDU) [57].

1	Combustible nucléaire	9	Eau lourde (modérateur)
2	Cuve	10	Tubes de force
3	Barres de contrôle	11	Vapeur
4	Préssurisateur	12	Eau condensée
5	Générateur de vapeur	13	Enceinte du réacteur nucléaire
6	Pompe de l'eau légère condensée (boucle de refroidissement secondaire)		
7	Pompe de l'eau lourde (boucle de refroidissement primaire)		
8	Machine de chargement du combustible nucléaire		

Tableau II.2: Les composantes de l'eau lourde [57].

II.4.2.1.5.Réacteurs à eau ordinaire modérés au graphite REOMG :

Les réacteurs à eau ordinaire modérés au graphite (REOMG) sont en exploitation en Russie. Comme dans les REB, l'eau ordinaire servant de caloporteur est portée à ébullition en circulant dans le réacteur et la vapeur ainsi générée est acheminée directement aux turbo-alternateurs. Les premiers modèles de REOMG étaient souvent construits et exploités sans les caractéristiques et fonctions de sûreté exigées dans les autres pays. Le tristement célèbre accident survenu en 1986 à Tchernobyl, en Ukraine, mettait en cause ce type de réacteur [59].

II.4.2.1.6.Surgénérateurs à neutrons rapides SNR /FBR :

L'utilisation de l'hélium comme caloporteur permet d'envisager une gamme de réacteurs à cycle direct (l'hélium à haute température alimente directement, sans échangeur

intermédiaire, le groupe turbo-alternateur) avec un rendement thermodynamique élevé. Ils ont déjà été étudiés dans le passé, mais bénéficient aujourd'hui des très importants progrès accomplis en matière de turbine à gaz. Ils sont susceptibles de permettre la réalisation d'unités de petite taille (de 100 à 300 MWe), économiques et sûres. Ce type de réacteur est également susceptible de fonctionner avec des neutrons rapides et donc de présenter alors les avantages complémentaires des RNR [59].

Neutrons rapides : neutrons libérés lors de la fission, se déplaçant à très grande vitesse (20 000 km/s). Leur énergie est de l'ordre de 2 MeV.

Sur(ré)génération: phénomène qui permet dans un réacteur nucléaire(sur[ré]générateur) de produire plus de matière fissile qu'il en consomme, de nouveaux noyaux fissiles étant créés par la capture de neutrons de fission par des noyaux fertiles après un certain nombre de désintégrations radioactives.

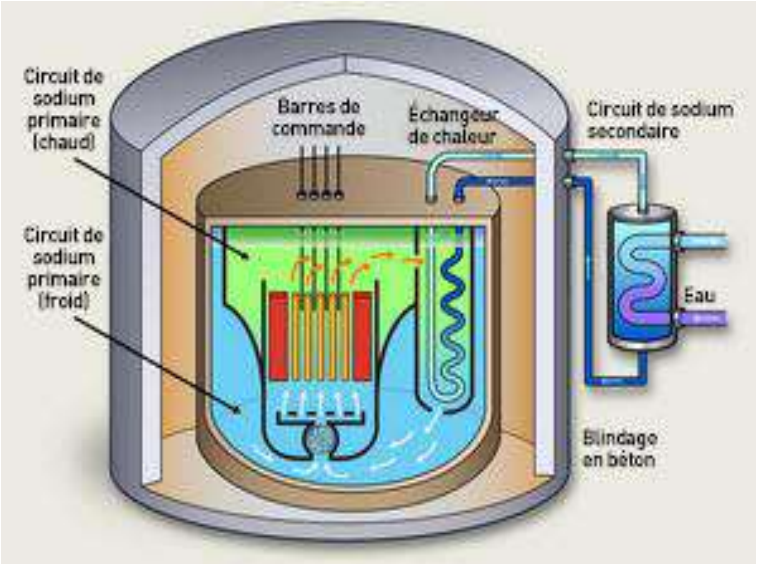


Figure II.27:Surgénérateur à neutrons rapide [59].

II.4.2.1.7.Réacteur à très haute température (VHTR) au gaz (hélium):

Euratom, Japon, Canada, France, Corée, Suisse, USA, Chine - cogénération d'électricité et de chaleur à très haute température; température de sortie du cœur jusque 1000 °C avec efficacité 50 %; spectre neutronique thermique; puissance de référence=600 MWth ou 300 MWe (démonstration vers 2020) - enjeux de recherche : matériaux à hautes températures ; combustible réfractaire (à «particules enrobées»); technologies de production massive d'hydrogène ; échangeurs; turbines à gaz; risque interaction oxygène – combustible; recyclage des actinides [60].

Type de réacteur	Combustible	Modérateur	Caloporteur	Quantité
Réacteur à eau sous pression**REP**	Uo2 enrichi	Eau	Eau	297
Réacteur à eau bouillante**REB**	Uo2 enrichi	Eau	Eau	75
Réacteur à eau lourde sous pression**RELP**	Uo2 naturel	Eau lourde	Lourde eau	49
Réacteur à eau ordinaire modéré au graphite **REOMG**	Uo2 enrichi	Graphite	Eau	15
Réacteur refroidi au gaz**RRG**	U naturel et uo2 enrichi	Graphite	Dioxyde de carbone	14
Réacteur surgénérateur à neutrons rapides**RSNR**	Puo2 et uo2	Aucun	Sodium fondu	3

Tableau: II.3:différences entre les divers types de réacteurs [61].

*eau lourde: eau constituée de molécules d'eau dont l'atome d'hydrogène est un atome de deutérium, isotope lourd de l'hydrogène [59].

II.4.3.comment fonctionne une centrale nucléaire? :

Une centrale nucléaire peut être comparée à une machine à vapeur. Elle chauffe l'eau qui, transformée en vapeur, fait tourner une dynamo géante qui génère de l'électricité. Mais, contrairement à une machine à vapeur, l'échauffement de l'eau se fait au moyen de matières fissiles, donc sans combustion.

Dans toutes les centrales nucléaires, la production d'électricité provient de la fission de noyaux d'uranium ou de plutonium. Lorsqu'un noyau d'uranium ou de plutonium fissile est bombardé par un neutron**,** il se fragmente. Cette fission nucléaire produit des neutrons (deux ou trois par fission) et crée de nouveaux atomes (les produits de fission tels que le xénon, le Chaleur qui permet de chauffer de l'eau pour la transformer en vapeur. Celle-ci fait ensuite tourner une turbine à laquelle est couplé l'alternateur qui produit l'électricité [62].

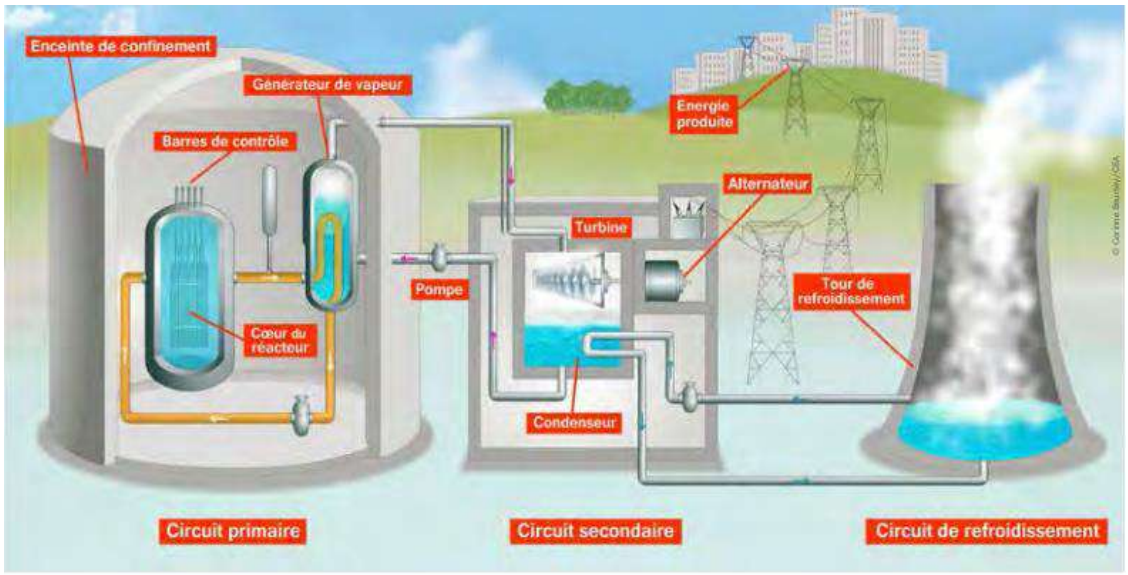


Figure II .28: Fonctionnement d'un centrale nucléaire de type ref [63]

II.4.4.La commande principale d'un réacteur nucléaire :

Les barres de commande situées entre les assemblages combustibles constituent le principal élément de régulation de la fission nucléaire. Elles sont composées d'un matériau qui capture les neutrons. Comme nous l'avons déjà évoqué, la concentration en neutrons détermine le rythme de fission. Un dispositif mécanique permet de pousser les barres de commande entre les assemblages combustibles, ce qui ralentit la réaction de fission nucléaire. Le retrait de ces barres produit l'effet inverse. L'insertion complète des barres de commande stoppe la réaction en chaîne et le réacteur s'arrête. Cela prend quelques secondes seulement. On entend toutefois par «arrêt» du réacteur l'interruption de la réaction en chaîne. La chaleur résiduelle doit encore être évacuée, grâce à des systèmes de refroidissement propres.

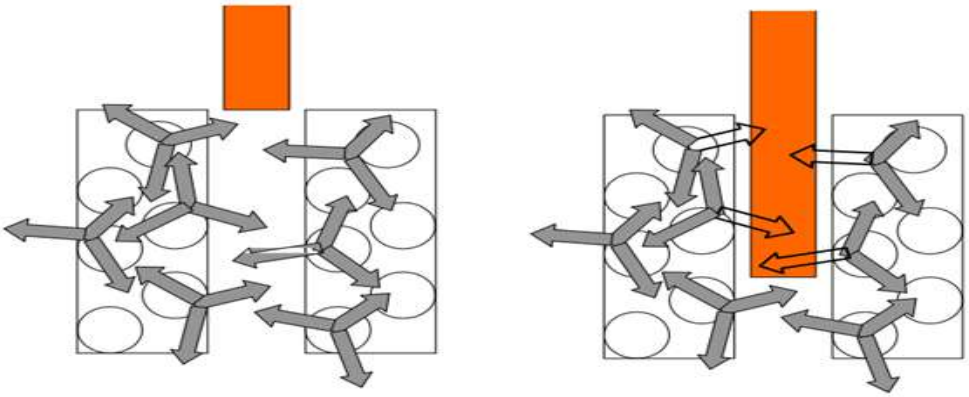


Figure II.29 : les neutrons et une barre de commande [64]

Le schéma de gauche représente les neutrons (flèche grise) qui apparaissent dans le cadre de la fission de l'uranium et engendrent à leur tour de nouvelles réactions de fission. Le schéma de droite représente une barre de commande (orange) poussée entre les assemblages combustibles et qui «avale» une partie des neutrons (flèche transparentes). Ces neutrons ne pourront alors pas donner lieu à une nouvelle réaction de fission et celle-ci ralentit progressivement [64].

II.4.5.Les centrales nucléaires:

Tout comme les centrales électriques qui fonctionnent au pétrole, au gaz ou au charbon, les centrales nucléaires font partie des centrales thermiques. Dans ce type de centrale, de l'énergie thermique (vapeur d'eau) est mise en mouvement (énergie cinétique) grâce à une turbine. La turbine entraîne un alternateur qui convertit l'énergie cinétique en énergie électrique, produisant ainsi de l'électricité. La spécificité d'une centrale nucléaire réside dans le fait que la chaleur n'est pas produite suite à la combustion de charbon, de gaz ou de pétrole, mais grâce au processus de fission nucléaire. Bien que les centrales nucléaires soient surtout connues pour le gros nuage blanc qu'elles dégagent, il faut savoir que celui-ci n'est pas composé de gaz mais uniquement de la vapeur d'eau produite dans le cadre du refroidissement de l'installation [64].

II.4.6.Connexion eau-énergie :

Le concept de « connexion eau-énergie » vise à évaluer la relation entre l'eau et l'énergie, une analyse du cycle de vie initiée par Peter Gleick (en) en 1994. En 2014, le département de l'Énergie des États-Unis (DOE) a publié son rapport sur le lien entre l'eau et l'énergie, soulignant la nécessité de politiques conjointes eau-énergie et une meilleure compréhension du lien et de sa vulnérabilité au changement climatique en matière de sécurité nationale. Le diagramme hybride de Sankey dans le rapport eau-énergie de 2014 du DOE résume les flux d'eau et flux d'énergie aux États-Unis par secteur, démontrant l'interdépendance et mettant en évidence la puissance thermoélectrique comme le plus grand utilisateur d'eau, principalement utilisée pour le refroidissement.

Le secteur de l'énergie est responsable de 10 % des prélèvements d'eau dans le monde, principalement pour l'exploitation de centrales électriques et pour la production de combustibles fossiles et de biocarburants. Selon les prévisions de Agence internationale de l'énergie, ces besoins devraient augmenter jusqu'en2040: les prélèvements d'eau dans le secteur de l'énergie augmenteraient de moins de 2 % pour atteindre plus de 400 milliards de

mètres cubes, tandis que la quantité d'eau consommée (l'eau prélevée mais qui n'est pas rétrocédée à une source) devrait augmenter de près de 60 %, à plus de 75 milliards de mètres cubes. [64]

II.4.7.Les composants d'un réacteur nucléaire :

II.4.7.1.Le combustible :

Le combustible d'une centrale nucléaire contient des atomes fissiles dont on va extraire de l'énergie par fission. Les principaux atomes fissiles sont l'uranium 233, l'uranium 235, le plutonium 239 et le plutonium 241. Seul l'uranium 235 se trouve à l'état naturel. C'est donc le plus souvent lui qui est utilisé comme combustible dans les centrales nucléaires. Le combustible nucléaire est placé dans le cœur du réacteur. [65]

II.4.7.2.Les barres de contrôle, piégeuses de neutrons :

Dans un réacteur, le contrôle permanent de la réaction en chaîne est assuré grâce à des "barres de commande", également appelées "barres de contrôle", absorbantes de neutrons qui sont, par exemple, à base de bore. Ces barres sont mobiles dans le cœur du réacteur: elles peuvent être remontées ou extraites en fonction du nombre de neutrons à absorber. Elles permettent de piloter le réacteur. De plus, en cas d'incident, l'enfoncement complet, ou chute, de ces barres au sein du combustible stoppe presque instantanément la réaction en chaîne. [65]

II.4.7.3.le modérateur, un ralentisseur de neutrons :

Outre le combustible gainé, le caloporteur et les barres de contrôle, la plupart des réacteurs comportent ce que l'on appelle un modérateur (voir schéma page 9). Le rôle de ce dernier est de ralentir les neutrons qui sont souvent trop énergétiques pour provoquer efficacement une nouvelle fission. Ces neutrons, du fait de leur grande énergie, se déplacent à grande vitesse (20000 km/s). Ce sont des neutrons rapides. En effet, lorsque les neutrons ont une trop grande vitesse, ils passent trop vite à proximité des atomes d'uranium et les réactions de fission sont difficiles à obtenir. Elles sont rares. Pour que les réactions de fission se produisent plus facilement, et en plus grand nombre, il faut donc ralentir considérablement les neutrons, d'une vitesse de 20000 km/s jusqu'à une vitesse de l'ordre de 2 km/s. ces derniers sont alors appelés neutrons lents ou neutrons "thermiques". Les neutrons sont freinés lorsqu'ils traversent une matière composée d'atomes dont les noyaux ne les absorbent pas. En effet, comme des boules se déplaçant sur une table de billard où se trouvent d'autres boules, les neutrons perdent de la vitesse en rebondissant sur les noyaux. Ce ralentissement se produit

rapidement lorsque les obstacles sont des noyaux légers, de masse voisine de celle des neutrons, tels que ceux d'hydrogène. La matière constituée par ces atomes est appelée le modérateur. Pour un bon fonctionnement du réacteur, combustible et modérateur doivent être alternés : combustible, modérateur, combustible, modérateur [66].

II.4.7.4.Le générateur de vapeur, un échangeur de chaleur:

Le caloporteur s'échauffe au contact du combustible. Il sort du cœur du réacteur à une température élevée, entre 300 et 550°C. Ce caloporteur est ensuite utilisé pour chauffer l'eau dans un appareil appelé "générateur de vapeur" et la porter à ébullition pour produire de la vapeur. Cette vapeur entraîne ensuite une turbine couplée à un alternateur produisant de l'électricité. À la sortie de la turbine, la vapeur se condense en eau dans un condenseur refroidi par l'eau d'une rivière. Les générateurs de vapeur n'existent pas dans les centrales à eau bouillante (REB) où la vapeur est directement produite dans le cœur. Il n'y a pas de centrales de ce type en France [66].

II.4.7.5.Le caloporteur, un transporteur de chaleur:

L'énergie libérée sous forme de chaleur lors de la fission des noyaux d'uranium 235 doit être récupérée pour servir à la production d'électricité. Ce rôle est assuré par le caloporteur. Comme son nom l'indique, il s'agit d'un fluide transporteur de chaleur. En circulant autour des barreaux d'uranium, ce fluide joue deux rôles : prendre la chaleur du combustible pour la transporter hors du cœur du réacteur, et maintenir la température de celui-ci à une valeur compatible avec la tenue des matériaux. Le combustible est entouré d'une gaine métallique formant un boîtier étanche afin de l'isoler du fluide caloporteur. Cette précaution évite que le combustible, qui est très chaud, soit directement en contact avec le caloporteur, ce qui pourrait provoquer des réactions chimiques entre les deux. Elle empêche aussi que des particules du combustible puissent passer dans le caloporteur et sortir ainsi de la cuve du réacteur. En fait, ce ne sont pas les particules d'uranium qui seraient les plus gênantes si elles passaient dans le caloporteur, mais les produits de fission qui sont radioactifs [59]**.**

II.4.8.Refroidissement des centrales nucléaires :

Une centrale nucléaire produit de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la fission D'atomes d'uranium. Cette chaleur transforme de l'eau en vapeur d'eau et met en mouvement une turbine reliée à un alternateur qui produit de l'électricité

II.4.8.1. Le circuit primaire pour extraire la chaleur :

Dans les réacteurs la fission des atomes d'uranium produit une grande quantité de chaleur. Cette chaleur fait augmenter la température de l'eau qui circule autour du réacteur, à 320° l'eau est maintenue sous pression pour l'empêcher de bouillir.

II.4.8.2.Le circuit secondaire pour produire la vapeur :

Le circuit primaire communique avec un deuxième circuit fermé, appelé circuit secondaire par l'intermédiaire d'un générateur de vapeur. Dans ce générateur de vapeur, l'eau chaude du circuit primaire chauffe l'eau du circuit secondaire qui se transforme en vapeur. La pression de cette vapeur fait tourner une turbine qui entraîne à son tour un alternateur. Grace à l'énergie fournie à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif. Un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes très haute tension.

II.4.8.3.Le circuit refroidissement pour condenser la vapeur et évacuer la chaleur :

A la sortie de la turbine, la vapeur du circuit secondaire est à nouveau transformée en eau grâce à un condenseur dans lequel circule de l'eau froide en provenance de la mer. Ce troisième circuit est appelé circuit de refroidissement. Au bord de la rivière, l'eau du 3 circuit peut alors être refroidie au contact de l'air circulant dans de grandes tours, appelées aéroréfrigérant [37].

II.4.9.Comparaison entre les réacteurs classique et nucléaire :

Type de centrale	Puissance électrique MW	Echange aux condenseurs MW	Débit eau froide m^3/s	Echauffement ^oc
Classique	115-125 500	155 620	4*5 à 8*2 18 à 20	7*4 à 8*2 8*2
Nucléaire	115-125 500	300 1200	8 à 9 32 à 36	8 à 9^o

Tableau II.4 : La centrale classique et nucléaire [66].

II.4.9.1 La cours nucléaires : Le cœur du réacteur est la source d'énergie. Comparable au foyer d'une chaudière, il produit de la chaleur. Il est composé d'éléments de combustibles contenant de l'uranium enrichi à 3,5 % o. Ces éléments sont entourés d'une gaine métallique en « zircaloy », première barrière de protection destinée à piéger les produits radioactifs qui se forment.

Les réactions en chaîne productrices d'énergie se produisent dans les assemblages de combustibles. L'eau qui circule sous pression (150 atmosphères) entre les assemblages sert à évacuer la chaleur des réactions de fission et à ralentir les neutrons pour qu'ils entretiennent la réaction en chaîne. Un cœur de réacteur de 0,9 Gigawatt de puissance électrique contient 157 assemblages de combustibles, 41448 crayons et 11 273 856 pastilles d'oxyde d'uranium enrichi.

Le cœur est contenu dans une cuve métallique étanche, revêtue intérieurement d'acier inoxydable. Il comporte des dispositifs de pilotage, et notamment des barres de contrôle en cadmium, ainsi que des dispositifs de sécurité. Cette enceinte constitue une seconde barrière de protection. De l'eau à haute pression circule à l'intérieur de la cuve entre les éléments de combustible. Elle prélève la chaleur produite dans les éléments de combustible et joue également le rôle de modérateur. La pression de cette eau primaire atteint 155 atmosphères [67].

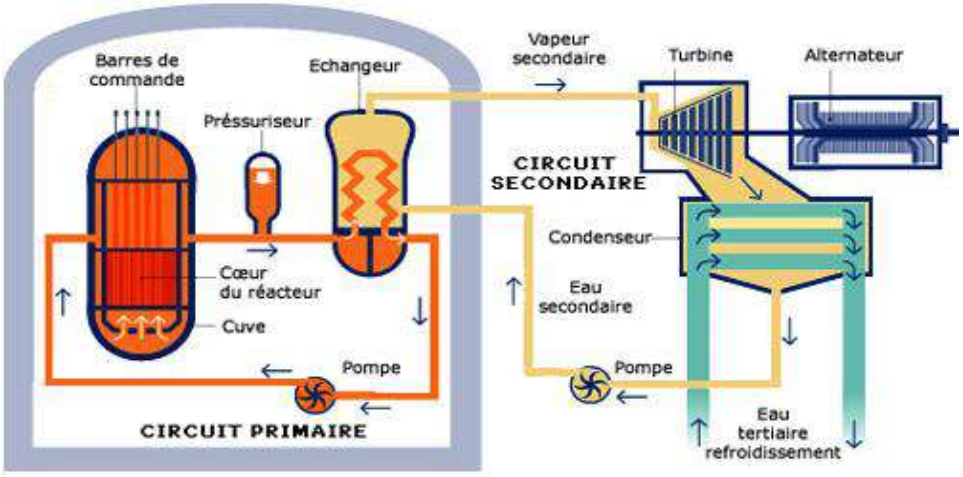


Figure II.30:Cour de réacteur [67].

Quelque exemple des tours de refroidissement nucléaire : [67]



Figure II.31 : Vestige d'une tour en bois, à Łódź (Pologne)



Figure II.32: Tours de type hyperboloïde en acier de la centrale thermique de Kharkov (Ukraine)



Figure II.33: La tour, en membrane textile, de la Centrale thermique de Bouchain.



Figure II.34: Tours de type hyperboloïde en béton de la centrale thermique de Ratcliffe (Royaume-Uni).

II.4.10.Tendances rétrospectives des émissions de co2 dans le monde

Les émissions globales de CO2 ont atteint un niveau record en 2017, soit 32,5 milliards de tonnes. L'usage du combustible fossile est la première source d'émissions de CO2. En remplaçant toutes les centrales au charbon et au gaz naturel par des centrales nucléaires, qui produisent une énergie à faible émission de carbone, on ferait baisser les émissions mondiales de CO2 de près de 13 milliards de tonnes par an. Dès aujourd'hui, en remplaçant le charbon et le gaz naturel, l'énergie nucléaire aide à éviter l'émission d'environ 2,2 milliards de tonnes de CO2 par an. C'est autant que si l'on retirait environ

480 millions d'automobiles de la route soit plus de la moitié des voitures de tourisme dans le monde entier.

En remplaçant le charbon et le gaz naturel par le nucléaire, notre climat reviendrait à ce qu'il était il y a plus de deux décennies [68].

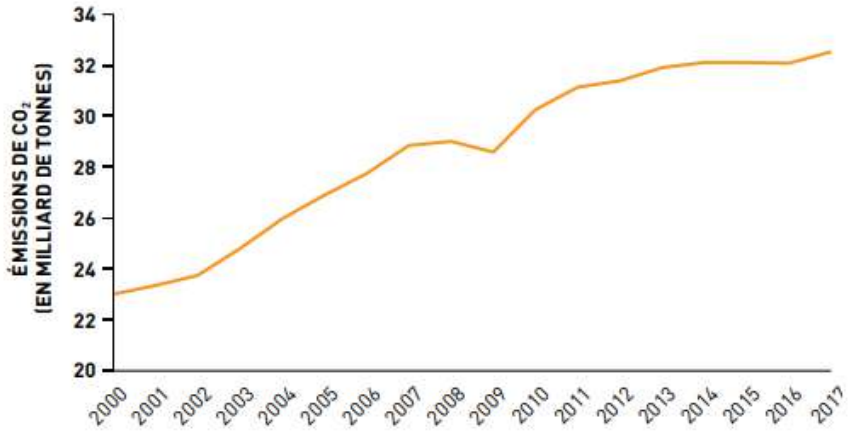


Figure II.35: Emissions de co2 dans le monde depuis 2000 [68].

II.4.10.1.Rejets thermiques:

L'eau utilisée pour refroidir la vapeur génératrice d'électricité quitte la centrale à des températures sensiblement plus élevées. Pour des centrales électriques à passage unique (ces systèmes ont une plus grande charge calorifique associée et sont les plus susceptibles d'entrer en conflit avec les limites réglementaires sur les rejets thermiques) des températures jusqu'à 37 °C ont été relevées en période estivale. Les eaux rejetées sont en général de 9,5 à 10 °C plus chaudes que les températures habituellement relevées en été. Cette "pollution thermique" peut nuire aux écosystèmes aquatiques locaux. Les organismes aquatiques dépendent fortement des conditions thermiques spécifiques des milieux aquatiques. Des températures de l'eau supérieures ou inférieures aux régimes thermiques optimaux peuvent causer du stress ou même la mort. Les températures élevées peuvent en outre augmenter la toxicité des produits chimiques et inhiber les processus biologiques.

Aux États-Unis, les rejets d'effluents thermiques sont régis par l'article 316 a du Clean Water Act. En France, la température des rejets est limitée à 30 °C en règle générale par l'article 31 de l'arrêté du 2 février 1998. Dans le cas des centrales nucléaires, les seuils sont

fixés au cas par cas dans l'arrêté fixant les limites de rejets dans l'environnement des effluents liquides et gazeux de chaque installation [69].

II.4.10.2.Rejets chimiques:

Cette section met en évidence les principaux problèmes identifiés dans les permis et les rejets de produits chimiques par ordre d'importance.

- Biocides dans les systèmes d'eau de refroidissement principaux, en particulier le chlore utilisé dans les systèmes de refroidissement par eau de mer. D'autres impacts dus à d'importants flux d'eau de refroidissement, tels qu'impacts thermiques et entraînement, sont également importants.
- Hydrazine dans les effluents provenant de la maintenance des centrales thermiques. L'hydrazine est utilisée en tant que piégeur d'oxygène dans le circuit de vapeur principal (technologie AVT) et lors de la de la dépose humide de certains systèmes de la centrale. Bien que l'hydrazine soit très efficace dans cette application, il s'agit d'un cancérigène génotoxique dont l'usage est réglementé voir interdit. De nouvelles expérimentations visent à le remplacer.
- Ammoniac et amines utilisés dans le circuit de vapeur secondaire. L'ammoniac est utilisé comme agent de contrôle du pH dans le circuit de vapeur principal de certaines usines et résulte également de la décomposition de l'hydrazine. Certaines usines utilisent également des espèces d'ammoniac organique brevetées comme inhibiteurs de corrosion, notamment des algicides et des biocides alternatifs dans des circuits fermés ou des tours de refroidissement. Les amines peuvent être utilisées à la place de l'ammoniac ou en combinaison avec l'ammoniac pour contrôler le pH dans le circuit de vapeur secondaire des REP. L'avantage des amines est qu'elles ont une meilleure rétention dans la phase aqueuse, améliorant ainsi le contrôle du pH et réduisant davantage la corrosion et le transport potentiel de produits de corrosion du fer provenant du train d'alimentation dans les générateurs de vapeur.
- Phosphates et composés du phosphore, y compris les inhibiteurs de corrosion à base de phosphore, les produits chimiques anticalcaires et les détergents. Des solutions de sels de phosphate de sodium sont utilisées pour la dépose humide de systèmes de la centrale où l'hydrazine ne peut pas être utilisée pour des raisons opérationnelles. Les phosphates sont également utilisés comme inhibiteurs de corrosion par aspersion dans certains systèmes d'approvisionnement en eau. Les effluents aqueux contenant du phosphate inorganique seront évacués par la salle des turbines ou d'autres puisards ou par des réservoirs de neutralisation plutôt que par l'intermédiaire des systèmes de traitement des déchets radioactifs.

- Traces de métaux et métaux lourds, y compris les produits de corrosion et les impuretés métalliques présents dans certains produits chimiques en vrac. Le fer, le chrome, le manganèse et le nickel constituent l'acier inoxydable (plus de 10 % de chrome) et l'acier faiblement allié (moins de 10 % de chrome) utilisés dans le réacteur, le circuit de vapeur principal et les systèmes auxiliaires. La corrosion de ceux-ci peut donner lieu à de petites quantités de ces métaux en solution et sous forme de particules.

Un grand nombre des produits chimiques énumérés ci-dessus sont susceptibles de devenir des systèmes propriétaires contenant une gamme d'autres additifs [70].

II.4.10.3.Rejets chimiques induits par les traitements contre les micro-organismes pathogènes:

Amibes et légionnelle peuvent se développer dans l'eau chaude des circuits de refroidissement de la centrale. Les amibes peuvent se retrouver dans les eaux rejetées à la rivière et légionnelle dans les aérosols dispersés par les tours de refroidissement. Les micro-organismes pathogènes présentant un risque élevé sont Naegleriafowleri, legionella totales et legionellapneumophilia). Pour s'assurer de l'absence d'impact sanitaire des activités de la centrale on procède encore une fois à la chloration ou plus efficace un traitement à la chloramine. La principale nuisance de ces traitements réside dans les rejets chimiques associés comportant en particulier des composés chlorés et azotés indésirables pour la rivière où ils sont rejetés, puisque c'est la rivière qu'ils doivent protéger des amibes. Pour les légionnelles, les produits chimiques se retrouvent également dans la rivière du fait des purges de déconcentration du circuit.

II.4.11.Eau et catastrophes nucléaires :

- L'accident nucléaire de Three Mile Island en 1979 est la suite d'un enchainement de défaillances matérielles et humaines provoquant la fusion partielle du cœur du réacteur nucléaire (à eau pressurisée – REP). La cause initiale de l'accident s'était produite onze heures plus tôt, lors d'une tentative de la part d'un opérateur de réparer un blocage sur l'un des huit polisseurs de condensat (Condensat (en)), dispositif utilisé pour filtrer l'eau condensée du circuit de vapeur. Il est fréquemment rempli de résines polymères qui sont utilisées pour éliminer ou échanger des ions, de sorte que la pureté du condensat soit

maintenue égale ou proche de celle de l'eau distillée. Les sécurités de la centrale n'ont par la suite pas fonctionné de manière correcte du fait qu'une vanne était anormalement fermée.

- La catastrophe nucléaire de Fukushima provoquée par le séisme de 2011 de la côte Pacifique du Tōhoku était en 2017, une cat² aqs²astrophe toujours en cours, puisqu'il fallait toujours refroidir les trois réacteurs qui étaient entrés en fusion en 2011, faute de quoi ceux-ci reprennent leurs rejets dans l'atmosphère. La centrale dans le tremblement de terre et le tsunami qui a suivi, a vu la plupart de ses organes anéantis. À la date du 16 février 2017, le site comporte 1100 réservoirs contenant plus de 961 000 m^3 d'eau contaminée. Tepco pompe alors quotidiennement environ 300 m^3 dans le sous-sol de la centrale qui enferme probablement près de 60 000 m^3 de liquide très radioactif. Et pour le refroidissement du corium, 286 m^3 d'eau fraîche sont injectés quotidiennement dans les trois réacteurs. Mais une partie du liquide contaminé s'échappe toujours dans le Pacifique malgré la barrière d'acier construite dans le port. Une barrière de glace a été mise en place par congélation du sol en 2016 qui ne devrait pas pouvoir fonctionner au-delà de 2021. Il n'a pas été trouvé de solution pour toutes ces eaux contaminées. Loins des cercles vertueux balisés par la thermodynamique, Fukushima est un « puits sans fond » [71].

Conclusion :

Avec le changement climatique et son corollaire, la nécessité d'établir des parcs énergétiques durables, les regards se tournent à nouveau vers le nucléaire.

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.

Pour le nucléaire, comme pour toute autre technologie, la recherche scientifique et le progrès technologique devraient permettre d'importantes économies sur les coûts du traitement, de la manutention et du stockage des déchets radioactifs. De plus, l'arrivée de nouveaux réacteurs ou de cycles du combustible devrait permettre de réduire la consommation de combustible et les volumes de déchets produits.

Chapitre III

Modèle physique et formulation mathématique

Chapitre III

Modèle physique et formulation mathématique

III-1.Introduction:

Il est actuellement possible d'aborder le dimensionnement et d'étude le fonctionnement des tours de refroidissement en base sur la perte en eau par évaporation, des pertes thermiques et le flux de matière et d'énergie.

En va parler dans ce chapitre sur le transfert de chaleur dans un tour de refroidissement .Et les équations physique et mathématique les plus importantes en tri-démontions (3D).

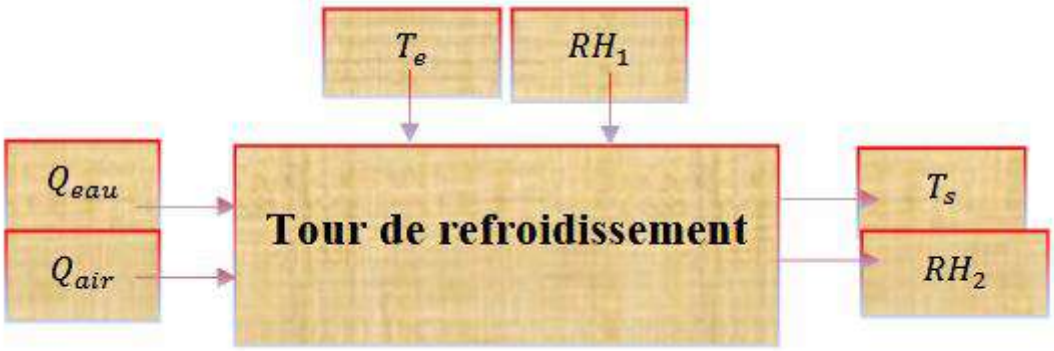


Figure III. 1 : Représentation entrées/sorties de la tour de refroidissement [71]

III.2.5. Nombre de Reynolds

C'est Reynolds, ingénieur anglais spécialiste de l'hydrodynamique qui a introduit ce nombre qui est constamment utilisé dans les calculs d'écoulements. L'écoulement peut être laminaire, transitoire ou turbulent. Dans le premier cas, le fluide s'écoule sous forme des filets parallèles aux parois, dans le troisième cas, la notion de filet n'existe plus, le mouvement des particules de fluide est aléatoire. Et dans le second l'écoulement du fluide est intermédiaire entre laminaire et turbulent.

Pour connaître le régime d'écoulement dans un canal, nous utilisons le nombre de Reynolds. Ce nombre est fonction de la masse volumique du fluide ρ, de sa viscosité dynamique μ, de sa vitesse moyenne, et du diamètre hydraulique Dh des canaux. Il s'exprime par la formule suivant :

$$Re = \frac{\rho v Dh}{\mu} \qquad \text{(III.1)}$$

avec

$$Dh = \frac{4Se}{périmetre} = \frac{Hclc}{2(Hc+lc)} \qquad \text{(III.2)}$$

Dans le des canaux rectangulaires, Équation (III.2), et périmètre sont respectivement la section et le périmètre mouillé du canal, Hc et lc sont respectivement la hauteur et la largeur du canal. Le nombre de Reynolds définit la transition entre un écoulement laminaire et un écoulement turbulent. Dans un canal, les limites entre les différents régimes sont les suivantes :

- Re ≤ 2300 Régime laminaire
- 2300 ≤ Re ≤ 6000 Régime transitoire
- Re ≥ 6000 Régime turbulent.

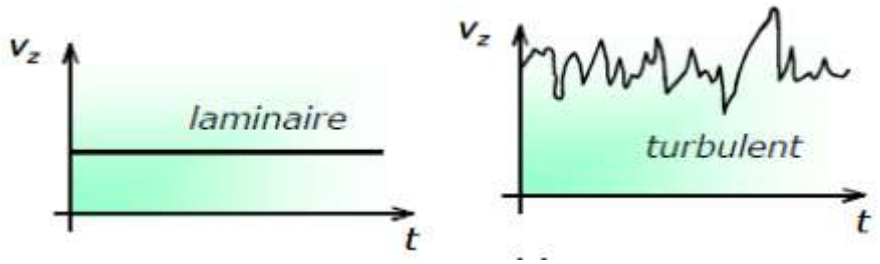


Figure III.2 : expérience de Reynolds. [73]

III.2.6-Nombre de Prandtl

C'est un nombre qui dépend essentiellement des caractéristiques physiques du fluide. Il représente le rapport de la diffusivité de la matière sur la diffusivité thermique et est défini par

$$\mathrm{Pr} = \frac{\mu pC}{\lambda} \qquad \text{(III.3)}$$

avecCp la chaleur massique du fluide et λ sa conductivité thermique. Nous pouvons dire que, pour un nombre de Prandtl élevée $Pr \geq 1$, le profil de température dans le fluide sera fortement influencé par le profil de vitesse. C'est le cas de l'eau où le nombre de Prandtl varie entre 2 et 13. En revanche un faible nombre de Prandtl $Pr \leq 1$ indique que la conduction thermique est tellement bonne que le profil de vitesse a peu d'effet sur le profil de température. C'est le cas des fluides métalliques où le nombre de Prandtl est de l'ordre de 10-2.

III.2.7. Nombre de Nusselt.

Le nombre de Nusselt est un nombre adimensionnel très utilisé dans les applications de transfert de chaleur. Il est défini par la relation suivante :

$$Nu = \frac{\mathrm{hDh}}{\lambda} \qquad \text{(III.4)}$$

avec$h$ le coefficient de transfert de chaleur entre le liquide et la paroi, λla conductivité thermique du liquide, et Dh le diamètre hydraulique du canal. Ainsi, une fois le nombre de Nusselt calculé, nous pouvons déterminer facilement le coefficient de transfert de chaleur h. Le nombre de Nusselt dépend principalement de la géométrie des canaux et de la nature de l'écoulement.

Ils ont pu démontrer que la meilleure corrélation du nombre de Nusselt dans le cas de la convection forcée dans des canaux circulaires en régime turbulent établi thermiquement et hydrauliquement pour un flux constant sur les parois est :

$$\mathrm{Nu} = 0.625(RePr)^{0.4} \qquad \text{(III.5)}$$

III.2.7 Nombre de Peclet.

Le nombre de PecletPe représente le rapport entre le transfert de chaleur par convection et le transfert par conduction (ou transfert par diffusion pour les transferts massiques). Il est équivalent au produit du nombre de Reynolds et du nombre de Prandtl dans le cas du transfert thermique. [73]

$$Pe = Re.Pr \text{(III.6)}$$

III.3-Formulations Mathématique :

2.1-Equation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \qquad \text{(III.7)} \ [23]$$

III .2.2-Equation de l'énergie :

$$\mathrm{r}\frac{D}{Dt}(\mathrm{e} + \frac{1}{2}\mathrm{V}^2) = -\,\tilde{\mathrm{N}}.\,Q + \tilde{\mathrm{N}}(\mathrm{V}.\,t) + rv.g \qquad (II.8)$$

III.2.3-Equation du mouvement :

$$\frac{\partial Z1}{\partial t} + \mathrm{v1}\ \frac{\partial Z1}{\partial x} + \mathrm{z1}\ \frac{\partial V1}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial V1}{\partial t} + g\frac{\partial z1}{\partial x} + g\frac{\partial z2}{\partial x} + v1\frac{\partial v1}{\partial x} + g|\mathrm{i1\text{-}if}| = 0$$

$$\frac{\partial z2}{\partial t} + v2\frac{\partial z2}{\partial x} + z2\frac{\partial v2}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial v2}{\partial t} + g\left[1 - \frac{\Delta\rho}{\rho}\right]\frac{\partial z1}{\partial x} + g\frac{\partial z2}{\partial x} + v2\frac{\partial v2}{\partial x} + \mathrm{g}|\mathrm{i2\text{-}if}| = 0 \qquad \text{(III.9)}$$

Avec i =$\frac{\tau i-\tau s}{\rho g z1}$ i2= $\frac{\tau f-\tau i}{\rho 2 g z2}$

If= - $\frac{dzf}{dx}$ pente du fond. [74]

III.4. La turbulence RANS :

III.4.1.Le modèle k-epsilon (ε) de turbulence :

La tâche principale dans le développement d'un modèle de viscosité au tourbillon k- ε est de fournir une formulation de viscosité de Foucault et une équation du taux de dissipation modèle. Le tourbillon k- ε standard modèle de viscosité, qui est largement utilisé dans la dynamique des fluides de calcul, fonctionne tout à fait bien pour les écoulements de couche limite mais pas pour les écoulements avecun taux de cisaillement moyen élevé ou un séparation, car dans ces cas, la viscosité des tourbillons est surestimée par la norme formulation à viscosité tourbillonnante. [73]

Les équations de transport d'un générique k – ε turbulence modèle peuvent être écrites :

$$\frac{Dk}{Dt} = \mathrm{pk} - \varepsilon + \mathrm{D} + \frac{\partial}{\partial \mathrm{xj}}\left[\left(v + \frac{vt}{\sigma k}\right)\frac{\partial \mathrm{k}}{\partial \mathrm{xj}}\right] \text{ (III.10)}$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \mathrm{C}\,\varepsilon 1\ \frac{\varepsilon}{K}\ \mathrm{Pk} - \mathrm{f}\,\varepsilon 2\mathrm{C}\,\varepsilon 2\ \frac{\varepsilon^2}{k} + E + \frac{\partial}{\partial \mathrm{xj}}\left[\left(\mathrm{v} + \frac{vt}{\sigma\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathrm{xj}}\right] \qquad \text{(III.11)}$$

oùDet Esont les termes correctifs de paroi. La viscosité cinématique turbulente est donnée pour ces modèles par :

$$v_t = \mathrm{C}_\mu \mathrm{f}_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \qquad \text{(III.12)}$$

et $C_\mu = 0.09, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92, C\,\varepsilon 1 = 1.44, C\,\varepsilon 2 = 1.92, \sigma k = 1, \sigma\,\varepsilon = 1.3$

Le modèle de Chien (1982) se base aussi sur le comportement asymptotique à la paroi mais repose beaucoup plus sur la distance à la paroi *y*. Les termes supplémentaires sont :

D=-$\frac{2vk}{y^2}$ et E=-$\frac{2v\varepsilon}{y^2}$ exp(-$\frac{c4UTy}{v}$)

Avec :

$f\,\varepsilon\,2$=1- $\frac{0.4}{1.8}$ exp(-($\frac{k^2}{6v\varepsilon}$)²) , fu=1-exp(- $\frac{C4UTy}{v}$)

et $C\,\varepsilon\,1$=1.35 , C ε2=1.8 , , $\sigma\ k=1$, $\sigma\ \varepsilon=1.3$, $C3=0.0115$ *et* $C4=0.5$

Les modèles $k-\varepsilon$ " reproduisent mal l'effet d'un gradient de pression adverse sur la couche limite.

Leurs atouts principaux sont la bonne prévision des écoulements libres, des couches limites en gradient de pression faible et un bon comportement à l'interface entre écoulement turbulent et écoulement laminaire. [75]

III.4.3 .Le modèle k-omega (ω) de la turbulence:

Une seconde possibilité très populaire pour définir la seconde échelle caractéristique de turbulence Wilcox (1988) a formulé l'équation de transport de ω *a* partir de celle de *k* :

$$\frac{Dk}{Dt} = Pk - \beta^* \omega k + \frac{\partial}{\partial xj}\left((\nu + \sigma k \nu t)\frac{\partial k}{\partial xj}\right)$$

$$\frac{D\omega}{Dt} = \gamma \frac{\omega}{k} pk - \beta\omega^2 + \frac{\partial}{\partial xj}\left((\nu + \sigma\omega\nu t)\frac{\partial\omega}{\partial xj}\right) \qquad \text{(III.13)}$$

Avec $\omega = \frac{\varepsilon}{k.\beta^*}$, $\beta^* = 0.09$, $\nu t = \frac{k}{\omega}$, $\beta = \frac{3}{40}$, $\gamma = \frac{5}{9}$, $\sigma k = 0.5$, $\sigma\omega = 0.5$.

Ce modèle a l'avantage de fournir de bonnes prévisions en couche limite et de pouvoir prévoir les effets d'un gradient de pression adverse. [76]

III.4.4/Le modèle RNG K-epsilon (ε) de la turbulence :

Les méthodes du groupe de renormalisation (RNG) sont des outils généraux utilises dans différentes branches de la Physique pour modéliser des phénomènes dynamiques complexes. Ont utilisées pour construire les équations d'un modèle dans lequel les effets des petites structures isotropes sont pris en compte de façon, quantitative. Cette approche appuie sur hypothèse D'universaliste des petites échelles.

*pour le champ moyen :

$$\frac{\partial Ui}{\partial t} + Uj\frac{\partial Ui}{\partial xj} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial xi} + \frac{\partial}{\partial xj}\left[(\nu + \nu t)\left(\frac{\partial Ui}{\partial xj} + \frac{\partial Uj}{\partial xi}\right)\right] \qquad \text{(III.14)}$$

*Pour l'énergie cinétique de la turbulence :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + Ui\frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial xj} + \left[\left(\nu + \frac{\nu t}{\sigma k}\right)\frac{\partial k}{\partial xi}\right] + Pk - \varepsilon$$

*Seule l'équation du taux de dissipation contient un terme source supplémentaire Rε :

$$\frac{\partial\varepsilon}{\partial t} + Ui\frac{\partial\varepsilon}{\partial xi} = \frac{\partial}{\partial xi}\left[\left(\nu + \frac{\nu t}{\sigma\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial xi}\right] + C\varepsilon 1P\frac{\varepsilon}{k} - C\varepsilon 2\frac{\varepsilon^2}{k} - R\varepsilon \qquad \text{(III.15)}$$

avec: $\nu t = C\nu\frac{k^2}{\varepsilon}$ $R\varepsilon = \frac{C\nu\eta^3(1-\frac{\eta}{\eta 0})\varepsilon 2}{1\beta\eta^3}\frac{k}{}$ $\eta = \sqrt{\frac{Pk}{\nu t}}\frac{k}{\varepsilon}$

Les constantes, calculées explicitement par le modèle sont:

$C\nu = 0{,}0845$ $C\varepsilon 1 = 1{,}42$ $C\varepsilon 2 = 1{,}68$ $\sigma k = \sigma\varepsilon = 0{,}7179$ $\eta 0 = 4{,}377$ $\beta = 0{,}012$

On préfère généralement exprimer l'équation(III.15) sous la forme :

$$\frac{\partial\varepsilon}{\partial t} + Ui\frac{\partial\varepsilon}{\partial xi} = \frac{\partial}{\partial xi}\left[(\nu + \frac{\nu t}{\sigma\varepsilon})\frac{\partial\varepsilon}{\partial xi} + C^*\varepsilon 1Pk\frac{\varepsilon}{k} + C\varepsilon 2\frac{\varepsilon^2}{k}\right.$$

Ou : $C^*\varepsilon = C\varepsilon 1 - \frac{\eta(1-\frac{\eta}{\eta 0}}{1+\beta\eta^3}$. [77]

III.4.5/Le modele SST K- omega(ω) :

Le modèle d'turbulence k-omega SST de Menter a gagné en popularité dans la communauté aéronautique en raison de sa bonne performance dans les flux aérodynamiques typiques. Il a été spécialement conçu pour prédire les écoulements de gradient de pression défavorables où la plupart des modèles à deux équations, et même des modèles d'ordre supérieur, sont connus pour échouer gravement. [75]

Viscosité cinématique des tourbillons:

$$VT = \frac{a1\ k}{\max(a1\omega, SF2)}$$

(III.30)

Énergie cinétique de turbulence:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + Uj\frac{\partial k}{\partial xj} = Pk - \beta^* k\omega + \frac{\partial}{\partial xj}[(v+\sigma k vT)\frac{\partial k}{\partial xj}] \qquad \text{(III.16)}$$

Taux de dissipation spécifique:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + Uj\frac{\partial \omega}{\partial xj} = \alpha s^2 - \beta\omega^2 + \frac{\partial}{\partial XJ}[(v+\sigma\omega VT)\frac{\partial \omega}{\partial xj}] + 2(1-F1)\,\sigma\omega 2\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial xi}\frac{\partial \omega}{\partial xi} \qquad \text{(III.17)}$$

Coefficients de fermeture et relations auxiliaires:

$$F2 = \tanh[[\max(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^*\omega y}, \frac{500v}{y^2\omega})]^2] \qquad \text{(III.18)}$$

$$Pk = \min(\tau ij\frac{\partial Ui}{\partial xj}, 10\,\beta^* k\omega)$$

$$F1 = \tanh\{\{\min[\max(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* k\,\omega}, \frac{500v}{y^2\omega}), \frac{4\sigma\omega 2k}{CDk\omega y^2}]\}1^4\}$$

$$CDk\omega = \max(2\rho\sigma\omega 2\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial xi}\frac{\partial \omega}{\partial xi}, 10^{-10})$$

$$\phi = \phi 1F1 + \phi 2(1-F1)$$

$$\alpha 1 = \frac{5}{9},\ \alpha 2 = 0.44,\ \beta 1 = \frac{3}{40},\ \beta 2 = 0.0828\ .$$

$$\beta^* = \frac{9}{100},\ \sigma k1 = 0.85,\ \sigma k2 = 1,\ \sigma\omega 1 = 0.5,\ \sigma\omega 2 = 0.856$$

CHAPITRE 4

SIMULATION NUMIRIQUE

CHAPITRE IV.

SIMULATION NUMIRIQUE

IV.1-Définition de simulation numérique

Depuis l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs, la simulation numérique a pris une grande place dans la recherche et l'industrie et a remplacé l'expérimentation directe trop coûteuse et longue à mettre en œuvre. Nous avons étudié dans le chapitre 2 expérimentalement le tour de refroidissement Dans le chapitre suivant, nous étudions numériquement le transfert de chaleur par convection naturelle et par changement de phase.La simulation numérique est fondée sur la résolution d'équations aux dérivées partielles conduisant à l'obtention de solutions approchées. De nombreuses méthodes d'approximation ont été développées pour résoudre les problèmes à dérivées partielles cirons, à titre d'exemple, la méthode des différences finies, la méthode des volumes finis, les méthodes spectrales ainsi que la méthode des éléments finis que nous avons utilisé durant cette étude.Dans ce chapitre nous nous intéressons à l'étude numérique du refroidissement des composants du tour de refroidissement. Nous faisons une description du code utilisé ainsi que la méthode de résolution, nous décrivons ensuite le modèle et les résultats obtenus.[71]

IV.2-Définition de logiciel de simulation ANSYS :

ANSYS est un logiciel de simulation numérique VEM leader de son marché utilisé dans le développement de produits industriels. Il couvre toutes les étapes nécessaires à une simulation : le traitement géométrique, le maillage, la résolution, le traitement de résultats et l'optimisation. ANSYS offre une plateforme de calcul multi-physique intégrant la mécanique des fluides et des structures, l'électromagnétisme, la thermique ainsi que la simulation de systèmes et de circuits.

Les utilisateurs ANSYS sont de domaines industriels différents telles que la construction de machines, les secteurs de l'énergie, l'automobile, le ferroviaire, l'aérospatial, le médical, la microtechnique, la micro-électronique ou encore les biens de consommation.

IV.2.1. Environnements logiciels :

Deux environnements logiciels permettent de mettre en œuvre le code ANSYS :

- **ANSYS classique (APDL):** première solution logicielle développée par le constructeur. Elle est destinée à la construction de modèles éléments finis à la

géométrie simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques. À partir de cet environnement, l'utilisateur construit directement un modèle éléments finis en utilisant le langage de script APDL (*ANSYS Paramétrique Design Langage*). *ANSYS classique* est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique.

- **ANSYS Workbench :** cette plate-forme propose une approche différente dans la construction d'un modèle en réutilisant le code ANSYS initial. Elle est particulièrement adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièces) et aux utilisateurs non confirmés dans le domaine du calcul. Dans cet environnement, l'utilisateur travaille essentiellement sur une géométrie et non plus sur le modèle lui-même. La plateforme est donc chargée de convertir les requêtes entrées par l'utilisateur en code ANSYS avant de lancer la résolution. Le modèle éléments finis généré reste néanmoins manipulable en insérant des commandes propres au code ANSYS.

IV.2.2-Design3D :

Les produits ANSYS 3D Design permettent aux ingénieurs de concevoir, développer et optimiser des produits efficacement, rendant la simulation accessible à tous les ingénieurs. Construit sur la technologie de modélisation directe, ANSYS DiscoverySpaceClaim facilite la création, la réparation ou l'édition de géométrie, au lieu d'une corvée. Que vous soyez impliqué dans la modélisation de concepts, la rétro-ingénierie de données scannées ou la préparation d'un modèle pour la fabrication ou la simulation, les outils de DiscoverySpaceClaim sont conçus pour éliminer les goulots d'étranglement géométriques et accélérer le processus de conception. [79]

Notre but est de savoir l'effet de la fraction volumique, la température et la vitesse de dispersion de gaz d'échappement (sortie) des tours pour la différente vitesse mentionnée auparavant (5, 10, 20 et 30 m/s) respectivement.

IV.2.3-Problème physique :

Le domaine d'étude représente: deux tours de refroidissements de hauteur 10m, la vitesse de sortie de l'eau chaude est à 5, 10, 20 et 30m/s (différentes vitesses) avec quatre blocs de différente hauteur à une distance fixe entre les deux tours et les blocs. Le domaine de calcul est rectangle de 400m de long, 100m de large et 100 d'hauteur.

La problématique de notre recherche est :

- Ces facteurs : la fraction volumique, la température et la vitesse de dispersion de gaz d'échappement (sortie) des tours de refroidissements affectent-ils pour la différente vitesse mentionnée auparavant (5, 10, 20 et 30 m/s) respectivement?

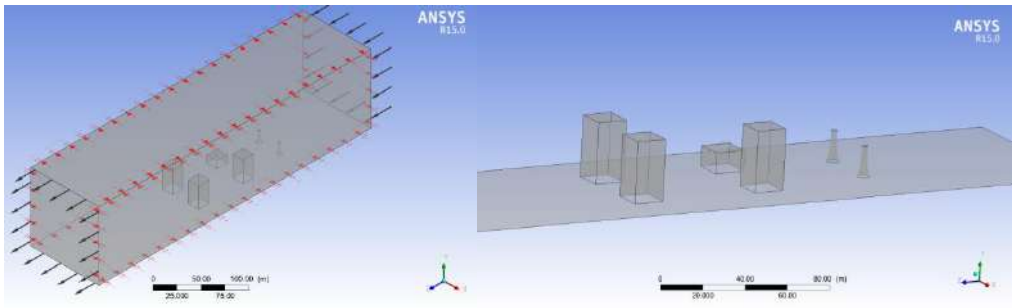


Figure IV.1 : Problème physique

Dans les figures (2-5), (6-7), (9-12) et (14-16) : nous avons présenté les figures en deux vues (vue de face (2D) et vue en haut en (3D)) la variation de température et de la fraction volumique sous forme de panache dans le domaine d'étude présenté par un parallélépipède.

Dans les figures 6, 8 ,13 et 17 représente les lignes de courant (streamlines en 2D) ou bien (suivie de la particule Stream trace en 3D) en d'autre terme c'est la trajectoire des particules de gaz d'échappement dans le domaine d'étude.

IV.3-Résultat et discussion :

IV.3.1. L'interprétation des figures de 2 à 17 :

On a quatre (04) cas de vitesse d'échappement des vapeur d'eau (considéré comme polluant) au niveau de la sortie des deux tours de refroidissement. Je vous donne les valeurs maximale c'est à dire au voisinage de la source (sortie des tours) zone en rouge.

1. la variation de la Fraction Volumique dans le domaine d'étude pour les vitesses

V=5m/s	en 2D Fv = 1	en 3D Fv=1	Figure IV.2
V=10m/s	0.8	0.8	Figure IV.6
V=20m/s	0.9	0.708	Figure IV.10
V=30m/s	1.0	1.0	Figure IV.14

2. la variation de la Température dans le domaine d'étude pour les vitesses

V=5m/s	T=373K	Figure IV.3
V=10m/s	T=359K	Figure IV.7
V=20m/s	T= 369K	Figure IV.11
V=30m/s	T=373K	Figure IV.15

3. la variation de la vitesse dans le domaine d'étude pour les vitesses

V=5m/s	en 2D	v= 5.85m/s	en 3D 14.22	Figure IV.4
V=10m/s		9.98	13.39	Figure IV.8
V=20m/s		19.56	19.79	Figure IV.12
V=30m/s		30.09	47.36	Figure IV.16

4. la variation streamlines (ligne de courant) dans le domaine d'étude pour les vitesses

V=5m/s	12.75m/s	Figure IV.5
V=10m/s	14.96m/s	Figure IV.9
V=20m/s	16.02 m/s	Figure IV.13
V=30m/s	7.48 m/s	Figure IV.17

on remarque : si la vitesse d'échappement est faible ou bien très élevé la faction volumique est élevé Fv=1 soit en 2D (deux dimension x et y) ou tridimensionnel (3D) (x,y et z) de même pour la température, pour la vitesse il ya une variation parce que l'effet de la vitesse de l'air qui entraine cette augmentation, Mais pour les stream lines pour la vitesse des lignes de courant augmente avec l'augmentation de la vitesse d'échappement sauf lorsque la vitesse de sortie est égale à 30m/s est diminue de 16.02m/s à 7.48m/s parce que il ya phénomène de recirculation qui provoque cette diminution, Dans le cas où la vitesse est modérée 10m/s et 20m/s les valeurs de la fraction volumique, la température, la vitesse et les streamlines augmentent avec la vitesse échappement, généralement la fraction volumique en 3D inférieur par rapport en 2D parce que il y a une diffusion sur le troisième Direction.

● ***Cas 1 : la vitesse de vapeur d'eau échappé (V=5m/s)***

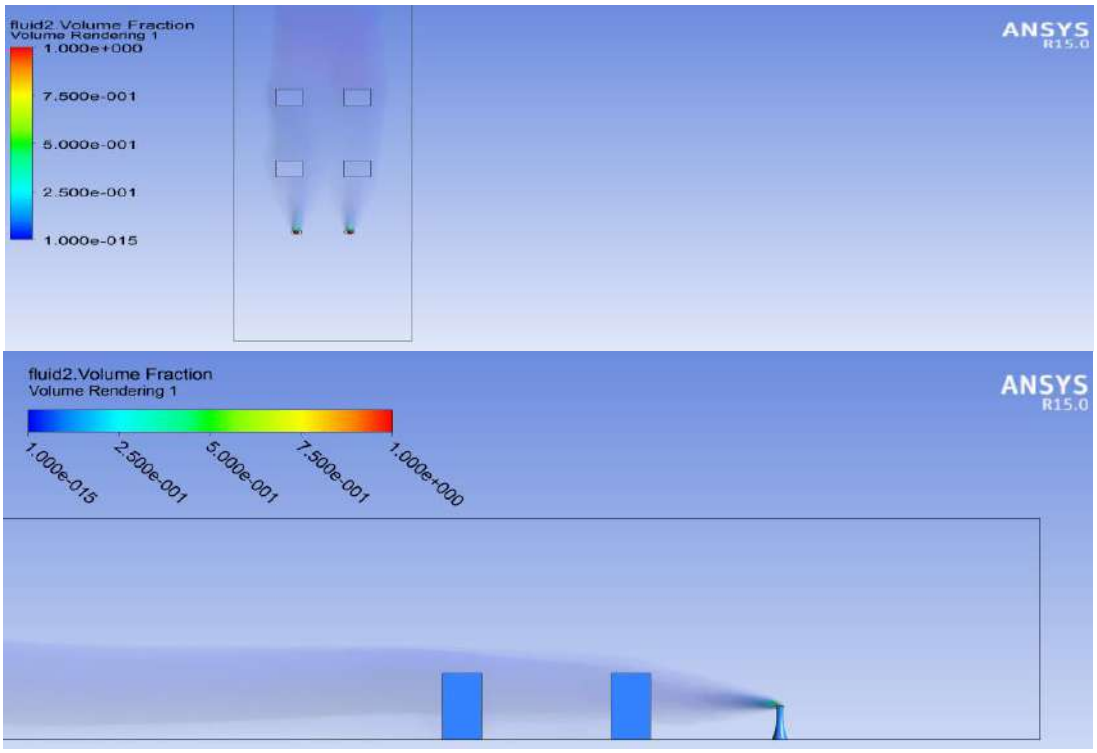


Figure IV .2 : l'évolution de la fraction volumique de vapeur d'eau à 100°C.

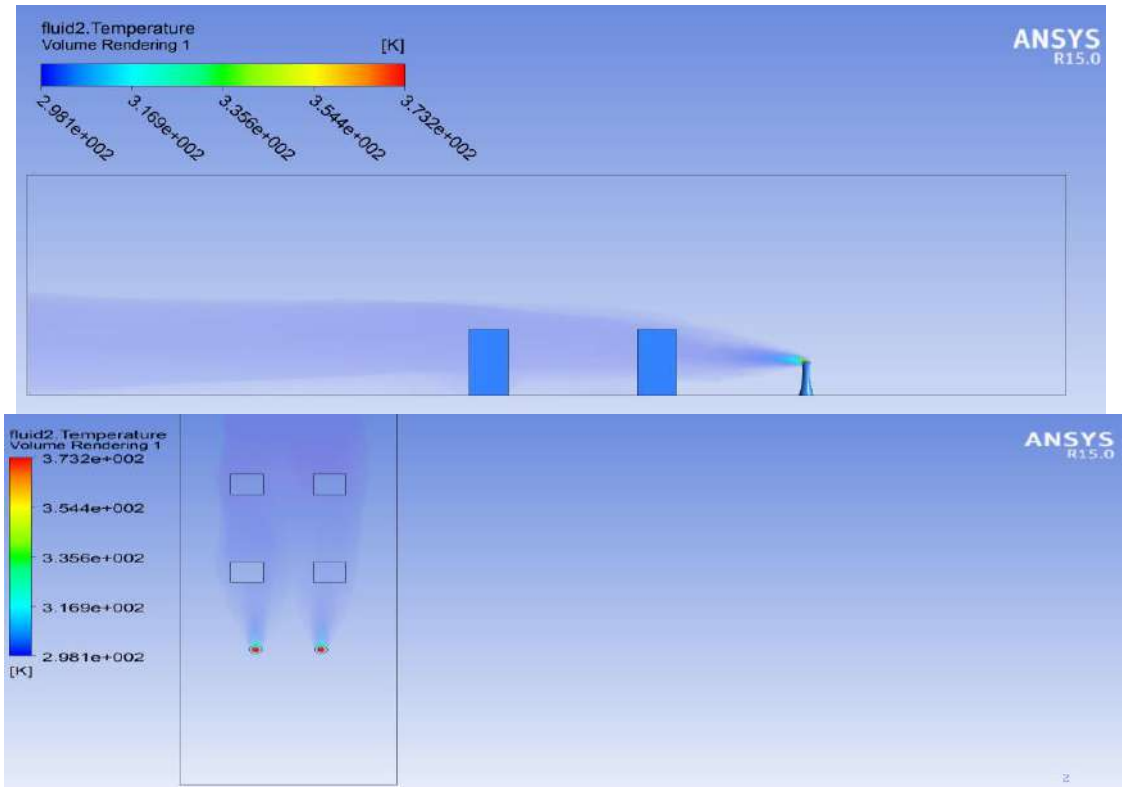


Figure IV.3 : l'évolution de la température de vapeur d'eau à 100°C.

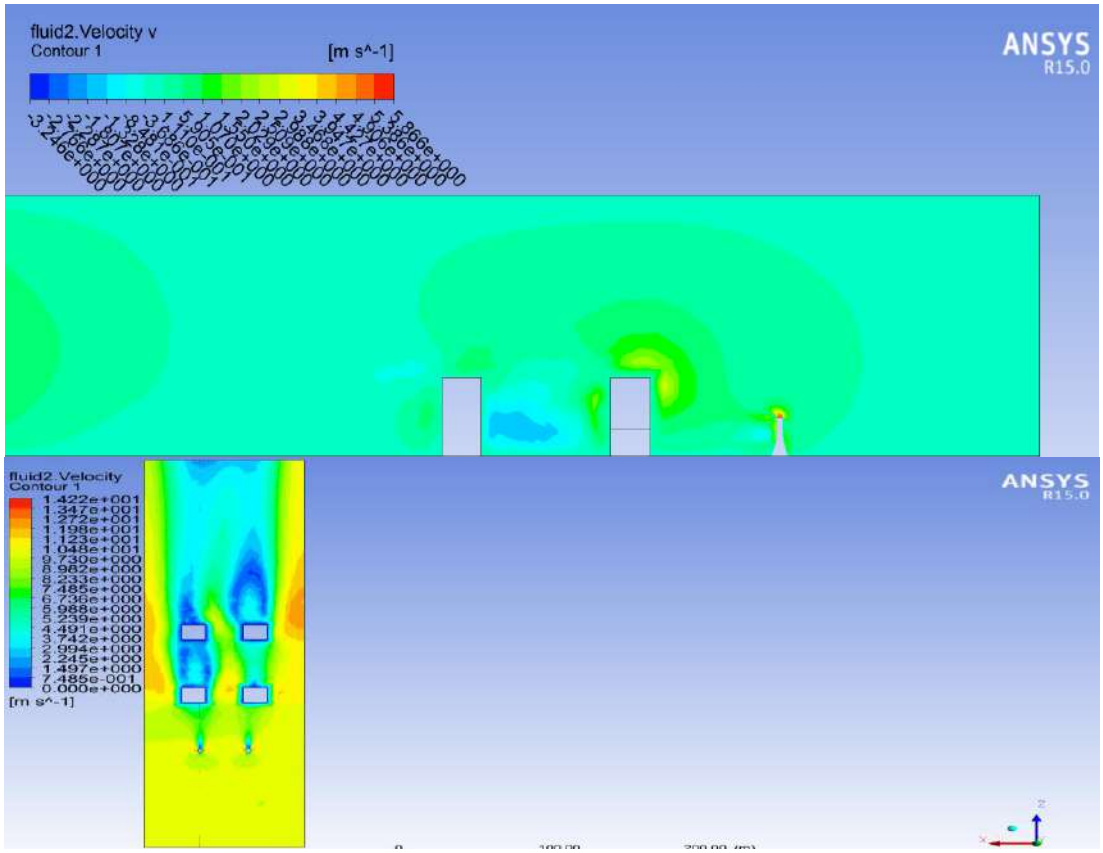


Figure IV.4 : l'évolution de la vitesse de vapeur d'eau à 100°C.



Figure IV.5 : les lignes de courant

- ***<u>Cas 2 : la vitesse de vapeur d'eau échappé (V=10m/s)</u>***

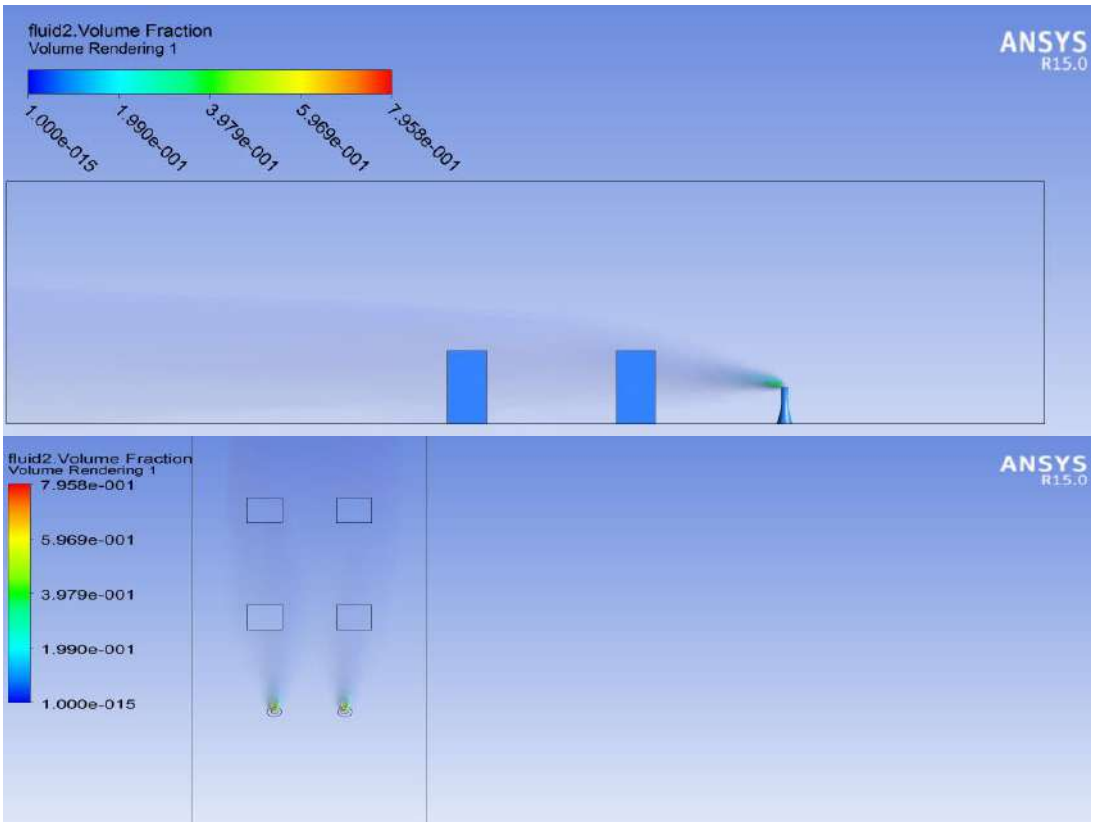


Figure IV.6 : l'évolution de la fraction volumique de vapeur d'eau à 100°C.

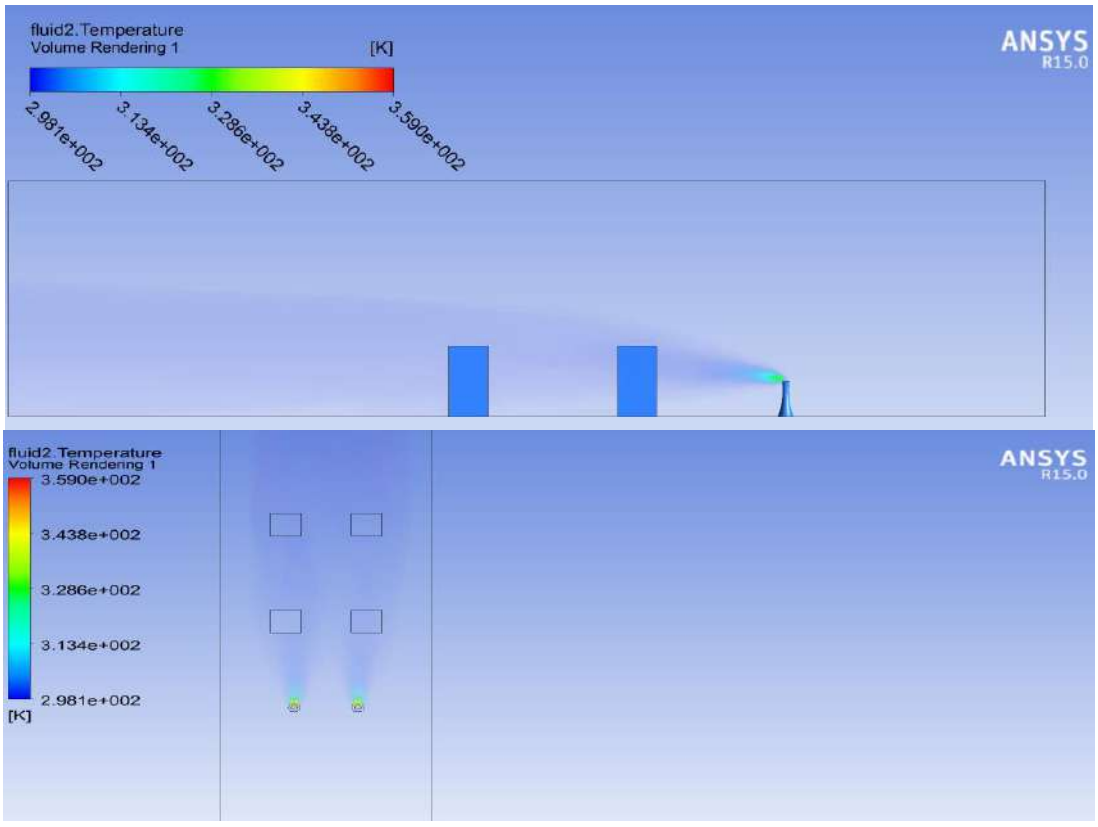


Figure IV.7 : l'évolution de la température de vapeur d'eau à 100°C.

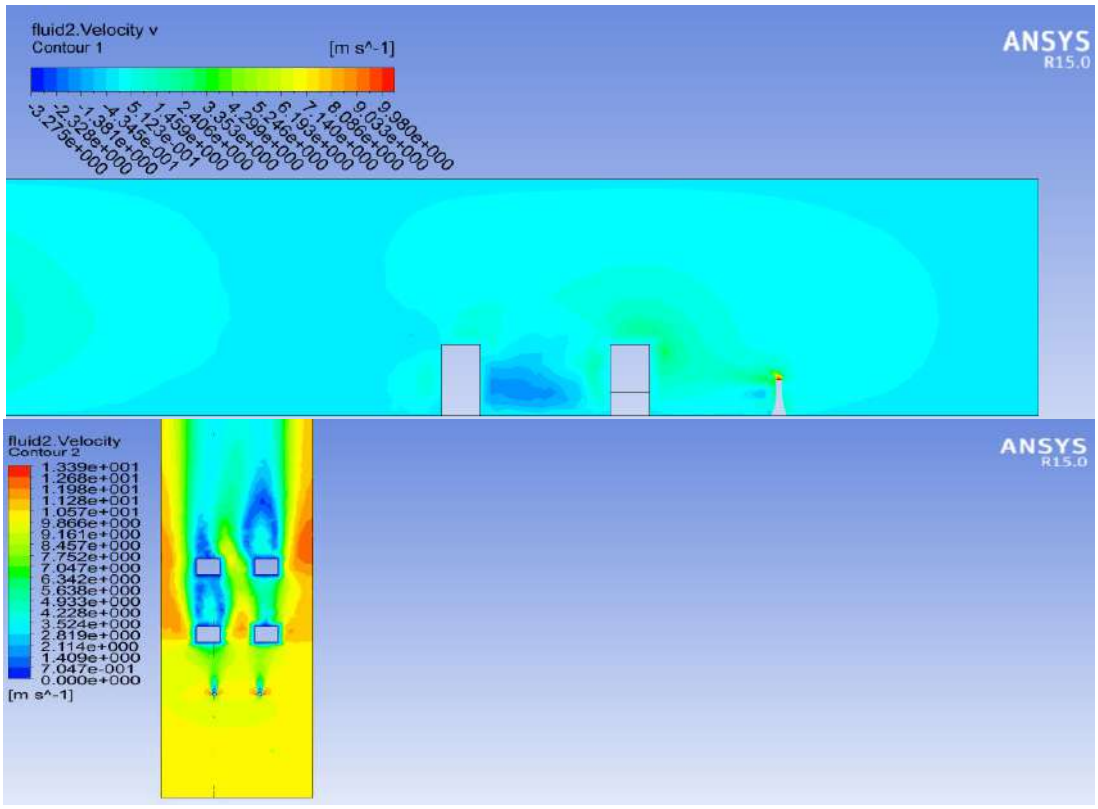


Figure IV.8 : l'évolution de la vitesse de vapeur d'eau à 100°C

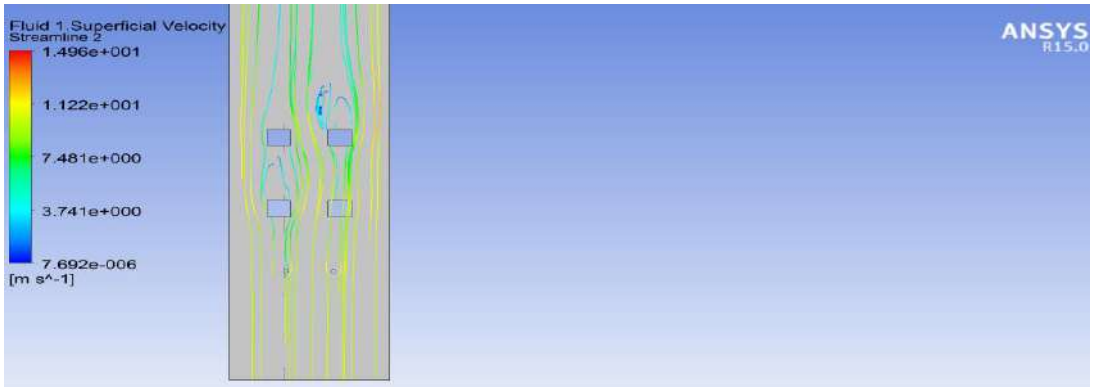


Figure IV.9 : les lignes de courant

- ***<u>Cas 3 : la vitesse de vapeur d'eau échappé (V=20m/s)</u>***

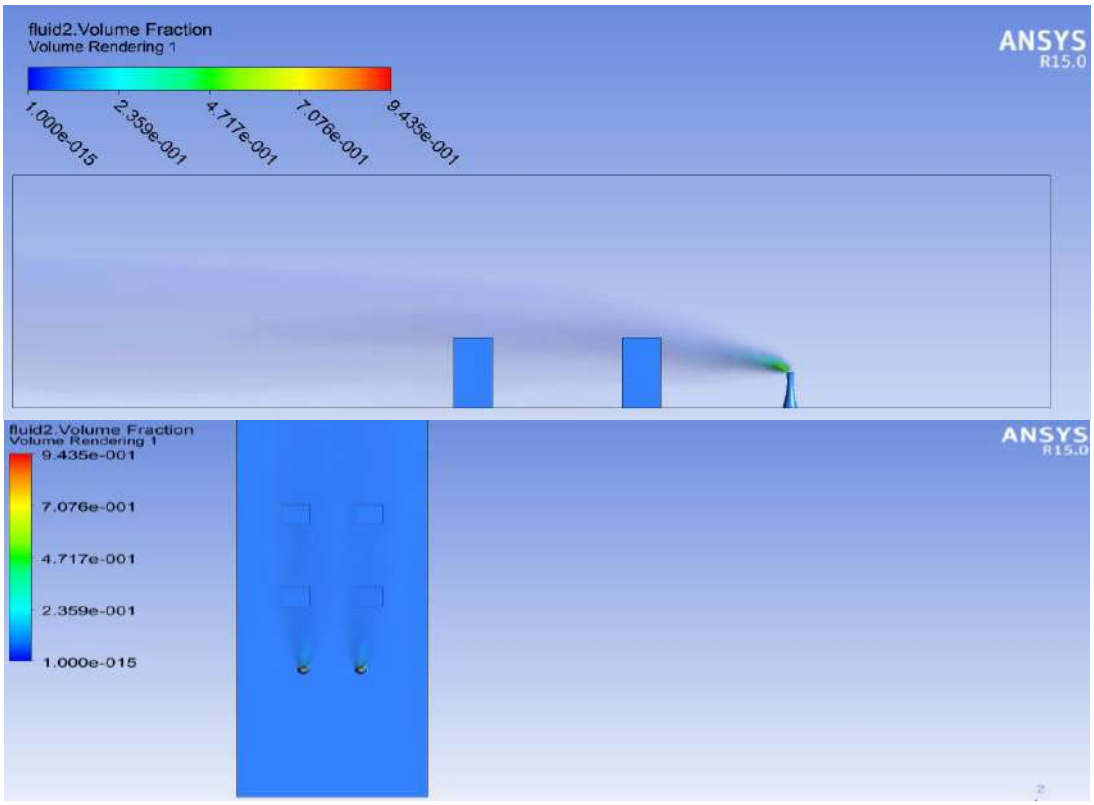


Figure IV.10 : l'évolution de la fraction volumique de vapeur d'eau à 100°C.

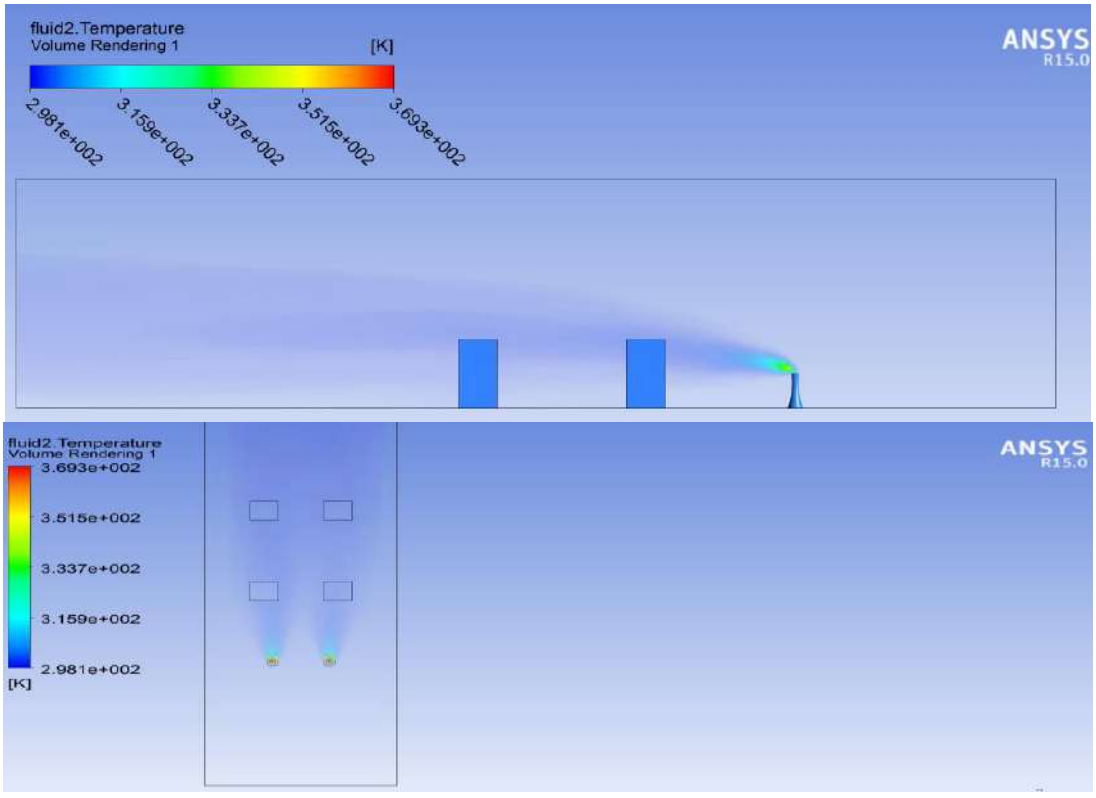


Figure IV.11 : l'évolution de la température de vapeur d'eau à 100°C.

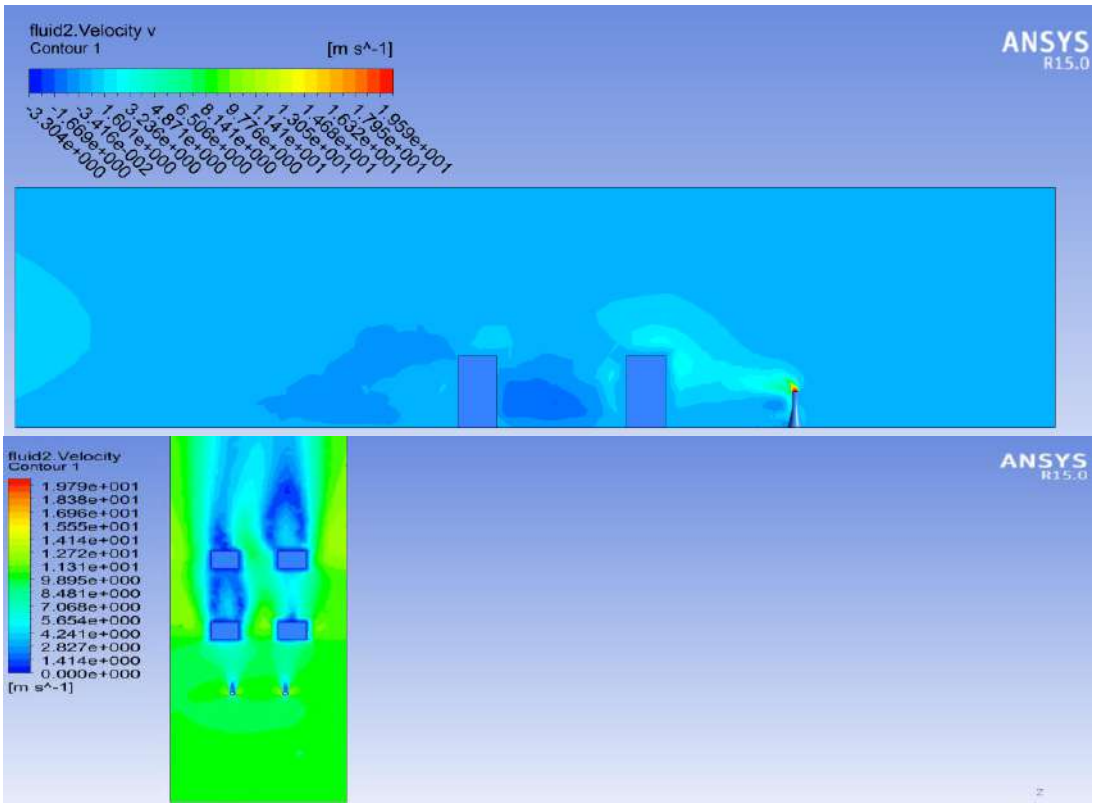


Figure IV.12 : l'évolution de la vitesse de vapeur d'eau à 100°C

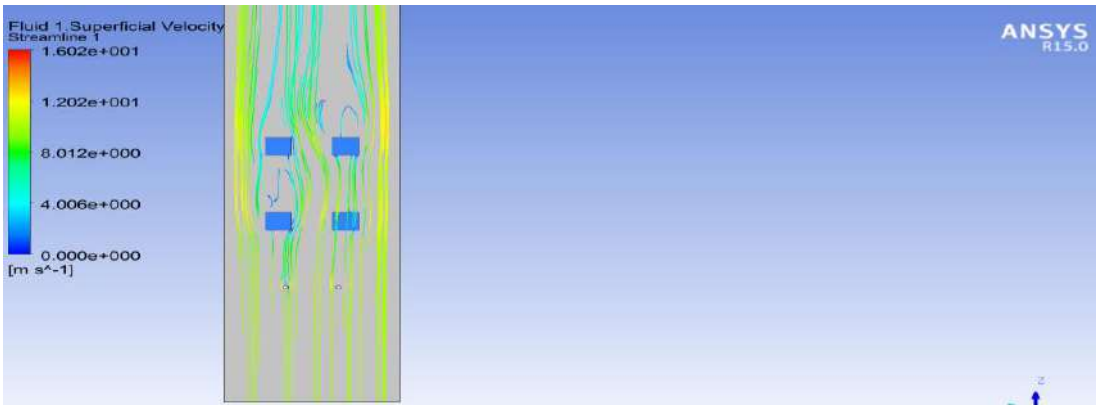


Figure IV.13 : les lignes de courant

- ***<u>Cas 4 : la vitesse de vapeur d'eau échappé (V=30m/s)</u>***

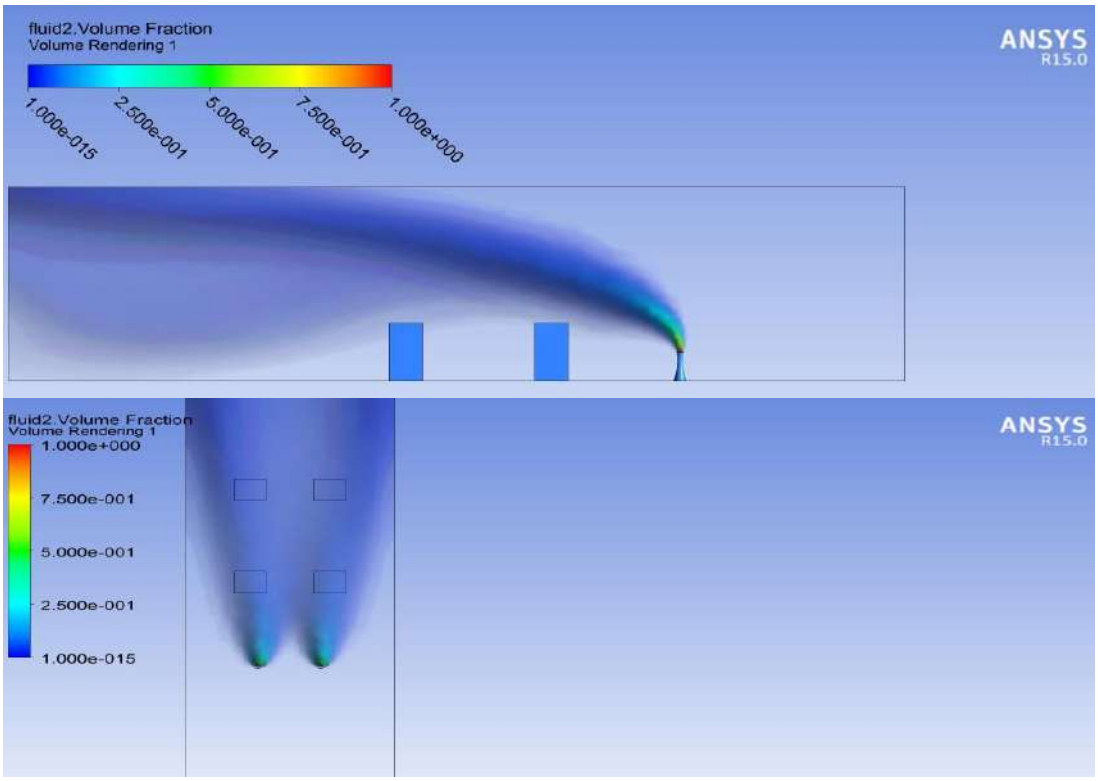


Figure IV.14 : l'évolution de la fraction volumique de vapeur d'eau à 100°C.

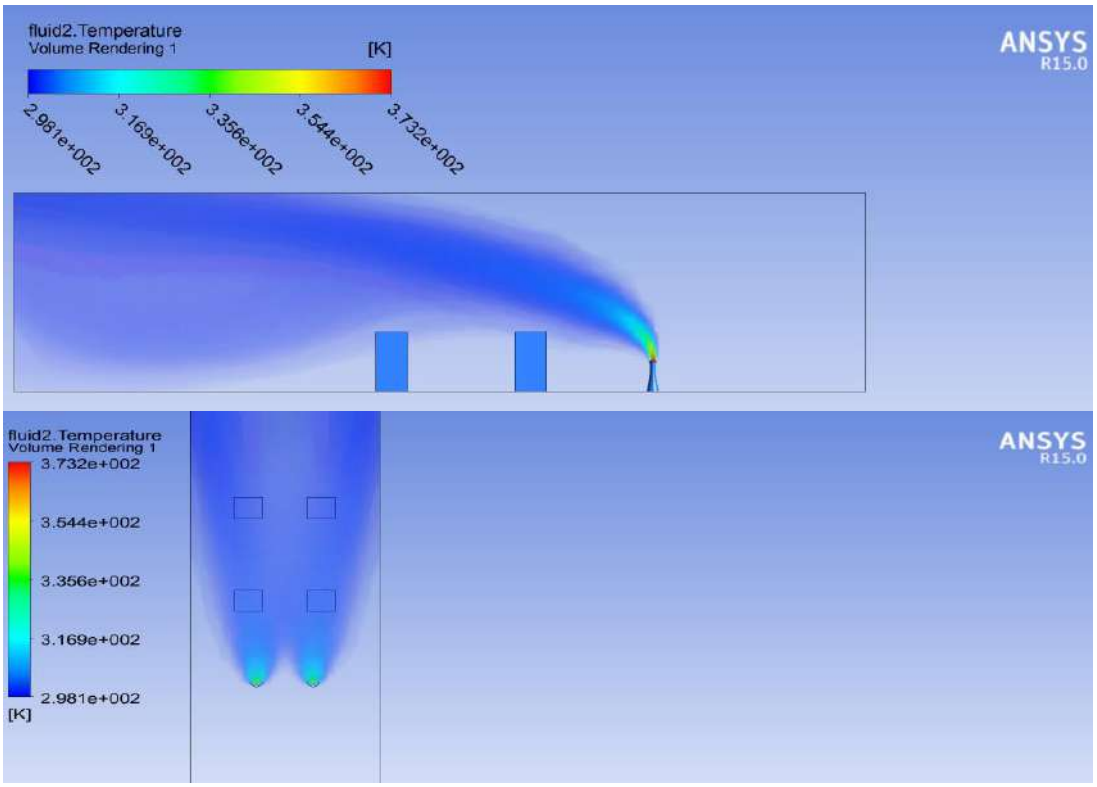


Figure IV.15 : l'évolution de la température de vapeur d'eau à 100°C.

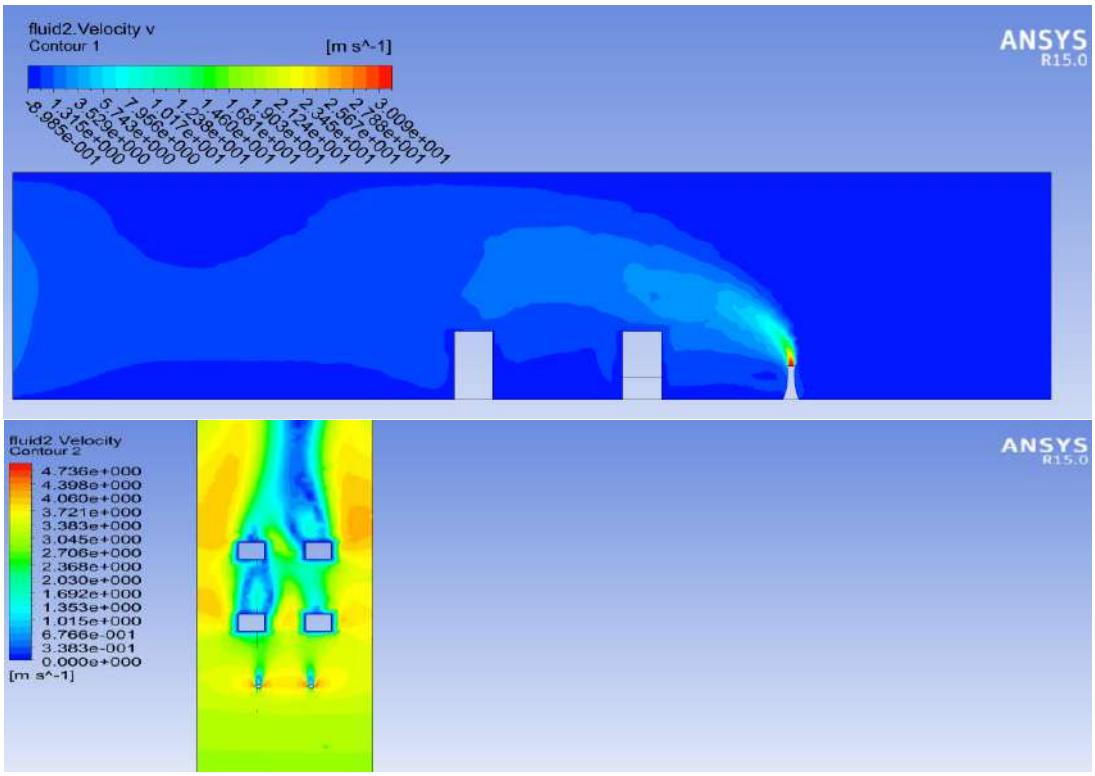


Figure IV.16 : l'évolution de la vitesse de vapeur d'eau à 100°C

.

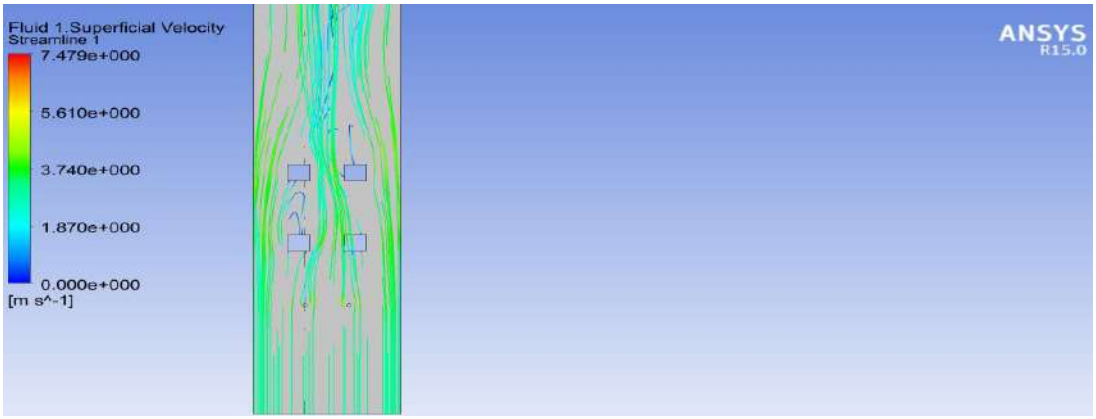


Figure IV.17 : les lignes de courant

IV.3.3.L'interprétation des figures de 18 a 21 :

1. la variation de la Fraction Volumique minimale et maximale dans le domaine d'étude pour les vitesses

V=5m/s	pour min Fv= 0	pour max Fv=0.006	Figure IV.18
V=10m/s	0	0.01	Figure IV.19
V=20m/s	0	0.019	Figure IV.20
V=30m/s	0	0.042	FigureIV.21

2. la variation de la Température minimale et maximale dans le domaine d'étude pour les vitesses

V=5m/s	pour min T=298.25 K	pour max T=298.7K	Figure IV.18
V=10m/s	298.25 299		Figure IV.19
V=20m/s	298.2299.52		Figure IV.20
V=30m/s	298.2 301.5		Figure IV.21

3. la variation de la vitesse selon l'axe (X et Y) dans le domaine d'étude pour les vitesses

V=5m/s	pour min v= 5m/s	pour max v= 0.55m/s	Figure IV.18
V=10m/s	0.1	0.53	Figure IV.19
V=20m/s	0.01	0.59	Figure IV.20
V=30m/s	0.18	0.38	Figure IV.21

4. la variation de la vitesse selon l'axe (Y est V) dans le domaine d'étude pour les vitesses

V=5m/s	pour min $v = 0.04$ m/s	pour max v =0.85 m/s	Figure IV.18
V=10m/s	0.04	0.85	Figure IV.19
V=20m/s	0.04	0.85	Figure IV.20
V=30m/s	0.02	1.69	Figure IV.21

On remarque que les paramètres (fraction volumique, températures, les deux composantes des vitesses) augmente avec l'augmentation des vitesses de vapeur d'eau (5, 10, 20,30m/s), et devienne diminue à la fin plus en plus la distance des blocs augmente.

L'évolution de fraction volumique, de la température et les composantes de vitesse selon les deux axes X et Y (u et v) pour la position de la ligne en coordonnée (x=50m, y=100m et z=190m) en fonction de la hauteur pour les différents cas (la vitesse de sortie de polluant (vapeur de l'eau V=5, 10, 20 et 30m/s) sont illustré sur les figures de IV.18 à IV.21, Il est bien clair que la vitesse de sortie de polluant à un effet notable sur la fraction volumique, la température et les deux composantes de dispersion de polluant dans le domaine d'étude notamment dans le cas où la vitesse est égale à 30m/s l'effet est remarquable la dispersion elle beaucoup plus intense dans ce cas. on observe aussi qu'il y a une croissances de ces paramètres lorsque la vitesse de polluant juste à la sortie de la tour augmente. Les valeurs négatives pour la composante de vitesse (u) indique qu'il ya une recirculation de fluide sur ce sens d'écoulement. La variation de ces paramètres selon l'axe Y sur les mêmes figures cités précédemment montrent qu'il a une augmentation pour avoir une valeur maximale

dépendante avec la valeur de la vitesse de polluant à la sortie de tour ensuite il ya une diminution avec l'augmentation de la hauteur de domaine d'étude ce qui signifié que lorsque distance selon l'axe Y de même en X augmente plus la concentration du polluant, sa température , ainsi sa vitesse diminuent.

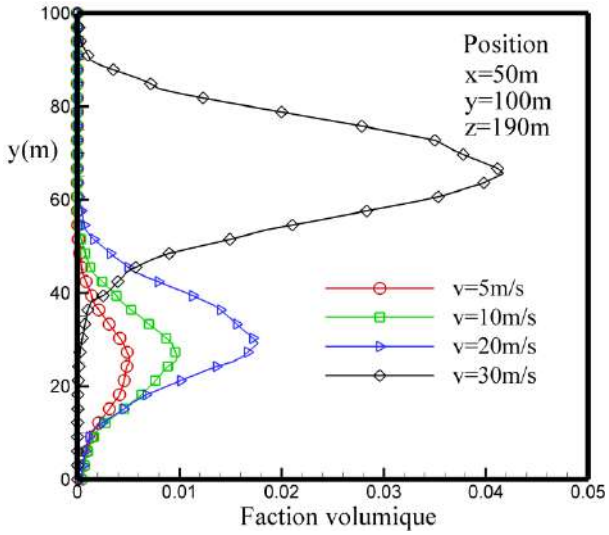


Figure IV.18 : la variation de la fraction volumique en fonction de la hauteur pour les différents cas.

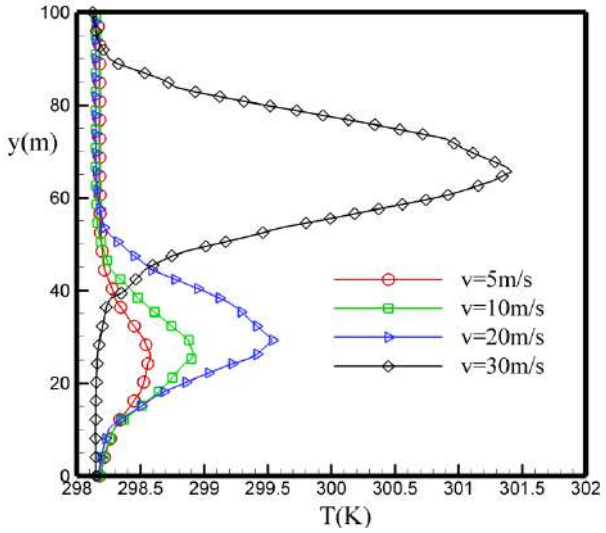


Figure IV.19 : la variation de la température en fonction de la hauteur pour les différents cas.

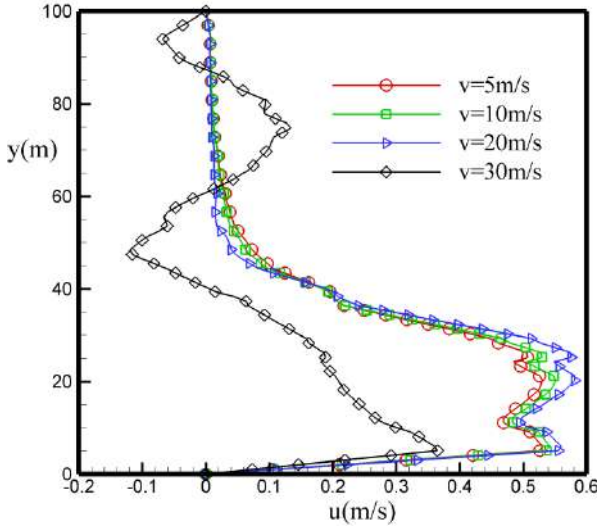


Figure IV.20 : la variation de la vitesse u en fonction de la hauteur pour les différents cas.

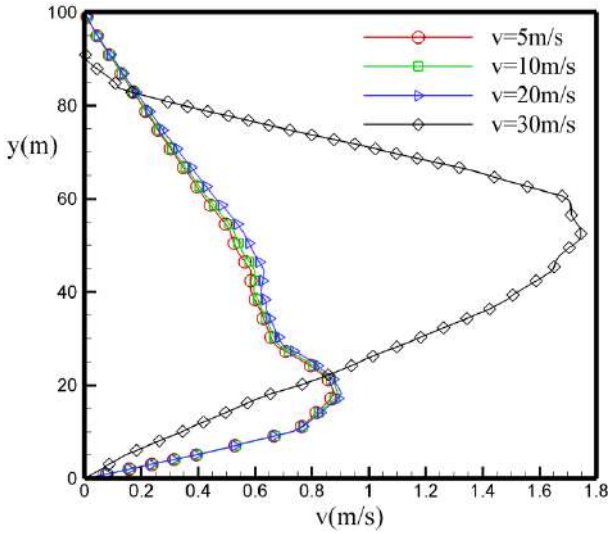


Figure IV. 21 : la variation de la vitesse v en fonction de la hauteur pour les différents cas.

Conclusion générale :

Après ce recherche détaille on conclure que les tours de refroidissement a un rôle principale dans la vie pour la production d'énergie, mais aussi il ya un impact négative sur l'environnement a cause de ces rejet dangereux, pour ce la il faut protéger l'environnement et surtout la santé de l'homme et l'animaux.

Et Nous avons atteint notre objectif de recherche que la vitesse de sortie de polluant à un effet notable sur la fraction volumique, la température et les deux composantes de dispersion de polluant.

Références.

[1] Abdelhamid A, Boucaib R et Abdelkhalak E. La modélisation thermique de transistor a hante puissance de type hemt, 2019.

[2] AMEL R, mémoire Contribution à l'étude de transfert de chaleur et de masse couplé d'un polluant gazeux dans un milieu poreux, université yahia fares; 2015.

[3] JACQUES P. échangeurs thermiques. méthodes globales de calcul avec problèmes résolus, 1993.

[4] Rebhi R. mémoire étude numérique et analytique du transfert thermique et de la dispersion d'espèces par convection naturelle dans des couches poreuses. université yahia fares; Médéa, 2016.

[5] Kaneyasu N, Yasumobu F, Satoru U et Haruhiko O. Effet of surface configuration on nucléale boiling heat transfert. September 1984; 27: 1559-1571.

[6] Vafi k et tien C. Boundary and Inertia affects on flow and heat Transfer IN porous media.7 february 1980; 14: 195-203.

[7] Degiovanni A et Moyne C. Thermal conductivity of porous wet bodies :theoretical examination and measurement feasibility november 1987 ; 30 :2225-2245.

[8] Chan J et Glicksman LR. An investigation of heat transfer and friction for rib roughened surfaces. 8 August 1978 ; 21 :1143-1156.

[9] Sahraoui NM. Modélisation et simulation Microscopique de la convection mixte dans un canal horizontal chouffé par le bas, 2019.

[10] Khalfouni L. Etude Paramétrique d'une tour de refroidissement d'eau. Mémoire De fin d'études. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.

[11] Dziegielewski B and Bik T Water Use Benchmarks for Thermoelectric Power Generation ,Research Report of the Department of Geography and Environmental Resources, Carbondale, IL: Southern Illinois University; 2006.

[12] André P, Kohio N, K.kagoné A, Koalaga Z et Zougmoré F. Contribution à l'étude de la conductivité thermique d'un plasma d'air, 20 mars 2019.

[13] Sahnoun B, Benjamin R, VINCENT S, Antoine L et Guilbaut R. Modélisation et simulation du transfert thermique verre moule dans un procédé de soufflage verrier, juin 2019.

[14] Mechat M. guide de formation a la gestion du risque de prolifération des légionelles dans les installations de refroidissement par dispersion d'eau dans un flux d'air. février, 2005.

[15] Merai M. Caractérisation expérimentale et modélisation des transferts thermiques hydrique et de la croissance microbienne au cours du transfert frigorifique de carcasses de porc. 8 novembre 2018 ; 14.

[16] Ruffenach JC, Deviller J, Lucas M et Hagemamn R. Etude chimiques et isotopiques de l'uranium, du plomb et de plusieurs produits de fission dans un échantillon de minerai du réacteur naturel d'OKLO. April 1976 ; 30 : 94-108.

[17] Guillaumont R. Les éléments chimiques à considérer dans l'aval du cycle nucléaire. Décembre 2004 ; 7 : 1129-1134.

[18] Hckel B. Quelques problèmes concentration la radiolyse de l'eau liquide à haute temps : application aux réacteurs nucléaires.1991 ; 88 :1177-1193.

[19] Yamagata K, Nishikawa KS, Fujui T et Yoshide S. Forced convectuve heat transferte supercritical waterflowing in tubes. December 1972; 15:2575-2593.

[20] Hurther D et Lemmin U. A correction method for turbulence measurements with a 3D acoustic Doppler velocity profiler. March 2001; 18:446.

[21] Henry S. Piégeage et refroidissement d'ions exotiques pour la mesure de masse. 2001.

[22] Ttwk M. etude et réalisation d'un système de refroidissement pour l'électronique de puissance basé sur la mise en mouvement d'un fluide conducteur électrique; thèse de doctorat. l'université de grenoble; 7 août 2006.

[23] Huetz J et Pierre J, Notions de transfert thermique par convection.

[24] Bennai M et Daoudi O. Etude et Simulation tridimensionnelle d'un échangeur de chaleur a tube et calandre (a contre-courant), Université Akli Mohand oulhadj-Bouira, 2017.

[25] Tabet S. Etude numérique de la convection naturelle dans une enceinte fermée partiellement chauffée. thèse de doctorat. université d'oran 2 mohamed ben ahmed, 2017.

[26] Belabes K et Bousbaine A, Comparaison des efficacités des ailettes de quelques formes géométriques; Projet de fin d'etude master. Université akli mohand outhadj de bouira; 2017.

[27] Khider Fz. Amélioration de la convection mixte en utilisant des ailettes cylindriques avec des ouvertures au niveau de la base; Memoire de master, Université mohamed boudiafe m'sila; 2015.

[28] Benmerabet MM. Modélisation et simulation des phénomenes de transfert thermique par convection assistés par le mouvement fluide. Memoire de master. Universite badji mokhtar annaba, 2017.

[29] Medjahed B et Benamor A. mémoire Simulation Numerique du transfer de chaleur dans un four rectangulaire, Université Abdel Hamid Ben Badis-Mostaganem, 2019.

[30] Battaglia JL, Andrzej K. Jean-Rodolphe puiggali Dépôt légal mars; 2010.

[31] Taine J, Franck E et Estelle L. Introduction aux transferts d'energie, 5rue laromiguière, 75005 paris, 2014.

[32] Fadel N et Boussalah S. Etude de l'influence de la température du fluide sur la perfomance d'un échangeur de chaleur de la raffinerie d'Alger, Mémoire de fin d'étude. Université de houari boumediene; 2009**.**

[33] Gharbi S, Dimensionnement d'un échangeur de chaleur pour l'amélioration du rendement de la condensation de l'ammoniac; unité nh3 -fertia l. annaba. mémoire de master, université Badji Mokhtar-Annaba, juin 2018.

[34] Boukecha S et Temmar M. Optimisation et redimensionnement d'un échangeur tubulaire e102 a~f dans l'unite de traitement de gaz. Mémoire de master. Université m'hamed bougara boumerdès, 24/05/2017.

[35] Taourit F. Etude du comportement dynamique et thermique de deux ecoulements du fluide dans un échangeur de chaleur (comparaison entre le cas simple et le cas avec ailettes), mémoire de master, université abou bakr belkaid-tlemcen. 2012.

[36] Mekcem M. Dimensionnement d'un echangeur a tubes et calandre de l'unite de decarbonatation du complexe gl1k skikda, mémoire de master. universite badji mokhtar annaba, 2016.

[37] Nehal S. Contribution à l'étude des transferts thermiques dans les échangeurs. mémoire de master. université A.mira-Bejaia, 2016.

[38] Declaye S, Gendebien S et Lemort V. Les échangeurs de chaleur. university of liége, p 31.

[39] Boudaoud SA et el Haci A. Etude d'un échangeur a plaques. mémoire de fin d'étude master. université abdel hamid ben badis – mostaganem, 2018 .

[40] Meneceur N. Etude expérimentale et modélisation des échanges de chaleur et de masse au sein d'une tour de refroidissement atmosphérique, Thèse de Doctorat, Université du 20 Août 55 Skikda, 12 /06/2018.

[41] Ferouani K. Influence du rejet de chaleur sur les performances d'une machine à absorption, Influence du rejet de chaleur sur les performances d'une machine à absorption, université Abou Bakr Belkaide Tlemcen, 2016.

[42] Papier de recherche Guide des bonnes pratiques Legionella et tours aéroréfrigérantes, Juin 2001.

[43] Bendriss S. Optimisation de la consemation de l'eau de mer et démentoinnement de l'échangeur de chaleur et de tours de refroidissement au sein des nouveaux projets ODI'S à le horizon de 2024.mémoire de master; Université Sidi Mohammed Ben Abdellah; 25 Juin 2015.

[44] Oulefeki H et Ourari N. Diagnostic des dysfonctionnements des tours de refroidissement de la raffinorie de l'huile cevital. Mémoire de fin d'études. Université a/mira de bejaïa; 2019.

[45] Houri D. Traitement et conditionnement des eaux de process, université mohamed boudiaf-oran, 2016/2017.

[46] Papier de recherche Feuille de recherche les tours de refroidissement.

[47] Une tranche nucléaire comporte toujours une tour de refroidissement , Parmi les images associées à l'énergie nucléaire figurent souvent les grandes tours de refroidissement (aéroréfrigérantes) d'où s'échappe un panache de vapeur. Dans une tranche nucléaire, l'eau sort du réacteur sous forme de vapeur.12 avril 2016.

[48] Othmani K, Etude et analyse de l'efficacité du traitement des eaux de refroidissement- Cas complexe fertial- Annaba, memoire de master, universite Badji Mokhtar-Annaba, 2018.

[49] Iffis T, Amimeur S. Etude numérique d'une tour de refroidissement humide a contrecourant. Mémoire de Master. Université Amira-Bejaia, 2016.

[50] Snoussi L. Etude et description du fonctionnement d'un tour de refroidissement d'eau. University of carthage ucar, june 2012.

[51] Kevin A. Nuclear Cooling Towers, Submitted as coursework for PH241, Stanford University, February 26, 2015.

[52] What you need to know about nuclear cooling towers, July 24, 2017.

[53] Barrett J. L'aide-mémoire du nucléaire au canada l'aide-mémoire 2019, © association nucléaire canadienne 2019.

[54] Van Goethem G, Fission nucléaire, aujourd'hui et demain : de la renaissance au saut technologique (Génération IV), article est paru dans le Journal des ingénieurs de la FABI (Fédération Royale d'Associations Belges d'Ingénieurs Civils), novembre 2009.

[55] Livret pédagogique, les réacteurs nucléaires, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, 2016.

[56] Oriol P. Energie nucléaire, ingénieur technique industriel, spécialité mécanique, 18 juillet 2012.

[57] Rihane M. Choix multicritères d'un réacteur nucléaire et application au projet électronucléaire tunisien, mémoire de projet de fin d'études, diplôme national d'ingénieur, université de Monastir école nationale d'ingénieurs de Monastir, 07/07/2009.

[58] Luis E. Echávarri directeur général de l'AEN, l'énergie nucléaire aujourd'hui, agence pour l'énergie nucléaire organisation de coopération et de développement économiques, OCDE 2003.

[59] OUESLATI A, HANNACHI A et EL MAAOUI M. Echange couplé de matière et de chaleur. Colloque International, Rades-Tunisie, 30-31 Octobre 2012.

[60] Drardja N, Analyse thermo hydraulique de l'écoulement d'un gaz autour d'une sphère combustible, mémoire de master, université de Saad Dahlab de Blida, octobre 2018.

[61] Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire; recherche à l'industrie; Commissariat à l'Énergie Atomique, 2002.

[62] Papier de recherche le fonctionnement d'une centrale nucléaire.

[63] Livre pédagogique les réacteurs nucléaires commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, 2016 direction de la communication.

[64] Construction et fonctionnement d'une énergie comment fonctionne une centrale nucléaire content-1-1254-345.

[65] Schneider M. Directeur de wise paris, Changement climatique et énergie nucleaire.commandite par la world wide fund for nature. Édition française, aout 2000.

[66] Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire, cea de la recherche à l'industrie, 2002.

[67] Aube JF. Conditions de similitude pour l'étude des circuits de refroidissement de l'eau des centrales thermiques Similitude conditions in thermal power station cooling water circuit studies.388 ; La houill blanche N° seécial A – 1961.

[68] Michelle T. H. van Vliet, David Wiberg, Sylvain Leduc and Keywan Riahi. Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources Nature Climate Change volume 6, pages 375–380 (2016).

[69] J Macknick, R Newmark, G Heath and K C Hallett. Operational water consumption and withdrawal factors for electricity generating technologies: a review of existing literature. Environmental Research Letters, Volume 7, Number 4. 2012.

[70] Boukharil A, Bessaih R. Simulation numérique de l'absorption d'hydrogène dans un réacteur annulaire d'hydrure de métal avec refroidissement tubulaire. Laboratoire d'Energétique Appliquée et de Pollution (LEAP), Université Constantine 1, Routede Ain El Bey, 25000 Constantine, Algérie.

[71] Nguyen H. Modélisation et simulation du remplissage de moules verriers :«Prise en compte du transfert radiatif » mémoire d'université de lorraine. 02 octobre 2009.

[72] Kadima Kazaku J, Mukepe Kahilu M, Katond Mbay JP. Modélisation d'une tour de refroidissement par approche multi-modèle Takagi-Sugeno. Journal International de Technologie, de l'Innovation, de la Physique, de l'Energie et de l'Environnement.. 4, n°1, 6, 2018.

[73] Touil Amel et Benlazar Fatima. Simulation numérique d'un écoulement autour d'une aube de laturbine à gaz.memoire. Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen .

[74] Zouitene saad, Étude numérique et expérimentale du refroidissement des convertisseurs auxiliaires de puissance dans les trains par convection naturelle, film liquide et caloduc. Autre. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis Français, 2014.

[75] Liou, A. Shabbir, Z Yang, and J. Zhu. A New *k-e* Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows-Model Development and Validation. *Lewis Research Center* ,NASA *Lewis* Research Center, Cleveland, ,32 P. August 1994

[76]Grégory Turbelin. Modélisation de la turbulence atmosphérique en vue de l'étude du chargementaérodynamique des structures soumises aux effets du vent. Mécanique des fluides .Université d'Evry Val d'Essonne, 2000. Français.

[77] Some improvements in menter's SSTk- ω TURBULENCE MODEL . Helsinki University of Technology, Laboratory of AerodynamicsP.O. Box 4400, FIN–02015 hut, Finland. Fluid Dynamics Conference June 15 – 18, 1997, Albuquerque

[78] Menter, F. R. (1994), "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications", AIAA Journal, vol. 32, no 8. pp. 1598-1605.

[79] N. Benlakehal, B. Lamri, A.Kada, L. M.R. Mesquita, A. Bouchair. Etude par simulation numérique du comportement des portiques métalliques en situation d'incendie. Université Hassiba Benbouali de Chlef, n° 13 , Pages 02 à 09 ,09.Mars 2014.