الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Climatique

Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
de Master en Génie Climatique

Option : énergie et froid industriel

THEME

MODÉLISATION DU FONCTIONNEMENT D'UNE TOUR AÉRO-REFRIGÉRANT HUMIDE A CONTRE COURANT OU COURANT CROISÉS

Proposé et dirigé par :

- Dr. Mohamed KHAZRANE

Préparé et présenté par :

- M^{em}. Fatma KERMOUS
- Melle. Zohra KHENNOUCH

Remerciement

Merci ALLAH de nous avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur.

*Nous tenons à remercier sincèrement monsieur : **KHAZRANE Mohamed**, qui, en tant que le directeur de ce travail, c'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce travail, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer*

*Nos remerciements s'adressent également à monsieur **BOUAZIZ Mohamed nadjib**, pour ses conseils, ses informations et l'aide, tous les enseignants de faculté de sciences et technologie spécialement mes jurés qui m'aident*

J'exprime ma gratitude à tous les consultants rencontrés lors des recherches effectuées et qui ont accepté de répondre à mes questions avec gentillesse.

Je n'oublie pas mes parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Dédicace

Je dédie ce travail de fin d'études à :

Mes parents, ceux à qui je dois tant pour leur amour et leur support continu tout le long du cursus de mes études. Que ce travail soit le témoignage sincère et affectueux de ma profonde reconnaissance pour tout ce que vous avez fait pour moi. Ils m'ont soutenu au prix de sacrifices inoubliables.

A mon marie Khaled qui a su toujours me remonter le moral pendant les moments difficiles, et qui est me poussé à être à la hauteur et suivre mes études.

Ma sœur et mes frères : Khaled, Abdelrazak, Ramzi, Adbelghani et Samia, qui m'ont encouragé et soutenu dans mes moments les plus difficiles. Que l'excellence recherchée dans ce travail symbolise la perfection d'un amour, d'une attention, d'un soutien qu'ils n'ont cessés de me donner aux cours des années passées. A mes belles sœurs et mes beaux frères

A toute ma famille et à mes copines Massouda, Habiba, Zineb, Ahlem et hadjira.qui ont me partagées moments de joie et de malheur durant mes années études.

.

Fatma

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ma très chère personne : mon père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études.

A celle qui m'a donné la vie, symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur est ma mère.

Que Dieu les gardes et les protège

A ma sœur adorable : Iman

A mes chers frères : Amine, Omar et Mohamed

A toute ma famille, à mes cousines et cousins

A tous mes proches et amis, en particulièrement : LAMANI Zineb, MORSI Hadjira, AOUDJ Ahlem, KHALFI Massaouda, et à celle qui me partager le travail KERMOUS Fatma.

A tous ceux que j'aime

Je dédie ce modeste travail.

Zohra

Liste des figures

figure	*Titre de la figure*	*page*
Figure 1.1	schéma d'une centrale nucléaire	4
Figure 1.2	Réacteur à eau bouillante	5
Figure 1.3	Schéma synoptique des étapes pour la production Électrique	7
Figure 1.4	réaction en chaine pour la fission	8
Figure 1.5	vue réelle de deux tours	9
Figure 1.6	Échangeur à tubes et calandre	13
Figure 1.7	Échangeur à plaques brasées : assemblage de plaques	14
Figure 1.8	Échangeur à courants croisés	15
Figure 1.9	Classement suivant la compacité de l'échangeur	17
Figure 1.10	température sèche et humide	20
Figure 1.11	lecture d'un diagramme psychrométrique	21
Figure 2.1	tour de refroidissement atmosphérique	29
Figure 2.2	tour à courant d'air forcé	31
Figure 2.3	tour à courant d'air induit	32
Figure 2.4	tour à courant d'air hybride	32
Figure 2.5	Tour à tirage induit et contre courant	33
Figure 2.6	tour a tirage induit et courant croisé	34
Figure 2.7	tour rectiligne	35
Figure 2.8	tour rond	35
Figure 2.9	exemples de corps d'échange	37
Figure 2.10	Exemples de pare-gouttelettes	39
Figure 2.11	Système de dispersion du fluide à refroidir	39
Figure 2.12	Exemples de bassin de rétention avec point de vidange	40
Figure 2.13	Photos de ventilateurs centrifuge et axial.	41
Figure 2.14	tour ouverte	43
Figure 2.15	tour ferme	45
Figure 2.16	principe d'une tour de refroidissement hybride	47
Figure 2.17	tour hybrides fermé	48
Figure 2.18	principe de la tour de refroidissement hybride fermé	49
Figure 3.1	Tour de refroidissement ouverte (envisagée).	50
Figure 3.2	États en entrée et en sortie de l'air et l'eau sur un diagramme	51

	de l’air humide	
Figure 3.3	Evolutions des Ce, Was, Tes, Qtot en fonction de Was	63
Figure 3.4	Evolutions des Ce, Was , Tes, Qtot en fonction de Mae	63
Figure 3.4	Evolutions des Ce, Was, Tes, Qtot en fonction de Tee	64
Figure 3.6	Evolutions des Ce, Was, Tes, Qtot enfonction de Tee	64
Figure 3.7	Evolutions des Ce , Was, Tes, Qtot en fonction de Ncycle	65
Figure 3.8	Evolutions des Ce, Was, Tes, Qtot en fonction de n	65
Figure 3.9	Evolutions des Ce, Was, Tes, Qtot en fonction de c	66
Figure 3.10	Evolutions des Ce, Was, Tes, Qtot en fonction de Tae	66
Figure 3.11	Evolutions des Ce, Was, Tes, Qtot en fonction de Wae	67
Figure 3.12	Evolutions des Ce, Was, Tes, Qtot en fonction de Mae	67
Figure 3.13	Evolutions des Ce, Was, Tes, Qtot en fonction de Tee	68
Figure 3.14	Evolutions des Ce, Was, Tes, Qtot en fonction de Mee	68
Figure 3.15	Evolutions des Ce, Was, Tes, Qtot en fonction de Ncycle	69
Figure 3.16	Evolutions des Ce, Was, Tes, Qtot en fonction de c	69
Figure 3.17	Evolutions des Ce, Was, Tes, Qtot en fonction de n	70
Figure 3.18	Evolution de Ce en fonction de Tae	71
Figure 3.19	Évolution de Was en fonction deTae	71
Figure 3.20	Evolution de Tes en fonction deTae	71
Figure 3.21	Evolution de Qtot en fonction de Tae	71
Figure 3.22	Evolution de Ce en fonction de Wae	72
Figure 3.23	Evolution de Qtot en fonction de Wae	72
Figure 3.24	Evolution de Was en fonction de Wae	72
Figure 3.25	Evolution de Tes en fonction de Wae	72
Figure 3.26	Evolution de Ce en fonction de Mae	73
Figure 3.27	Evolution de Was en fonction de Mae	73
Figure 3.28	Evolution de Tes en fonction de Mae	73
Figure 3.29	Evolution de Qtot en fonction de Mae	73
Figure 3.30	Evolution de Ce en fonction de Tee	74
Figure 3.31	Evolution de Tes en fonction de Tee	74
Figure 3.32	Evolution de Qtot en fonction de Tee	74
Figure 3.33	Evolution de Ce en fonction de Mee	74
Figure 3.34	Evolution de Was en fonction de Mee	74

Figure 3.35	Evolution de Tes en fonction de Mee	74
Figure 3.36	Evolution de Qtot en fonction de Mee	75
Figure 3.37	Evolution de Qtot en fonction de Tee	75
Figure 3.38	Evolution de Ce en fonction de c	75
Figure 3.39	Evolution de Was en fonction de c	75
Figure 3.40	Evolution de Tes en fonction de c	75
Figure 3.41	Evolution de Qtot en fonction de c	75
Figure 3.42	Evolution de Ce en fonction de n	76
Figure 3.43	Evolution de Was en fonction de n	76
Figure 3.44	Evolution de Tes en fonction de n	76
Figure 3.45	Evolution de Qtot en fonction de n	76
Figure 3.46	Evolution de Ce en fonction de Ncycle	76
Figure 3.47	Evolution de Was en fonction de Ncycle	76
Figure 3.48	Evolution de Tes on fonction de Ncycle	77
Figure 3.49	Evalution de Qtot en fonction de Ncycle	77

Liste des tableaux

Tableau 3.1 gamme de variations des variables d'entrée	59
Tableau 3.2 : les grandeurs de sortie	60
Tableau 3.3 les grandeurs Constantes	60
Tableau 3.4 les Indices	60

SOMMAIRE

Résumés

Remerciement

Dédicace

Liste des figures

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre 1 généralité sur les centrales nucléaire et les échangeurs thermique	
1.1 Introduction	3
1.2 Description	3
1.3 Fonctionnement technique	7
1.4 Rendement d'une centrale nucléaire	10
1.5 Effet sur l'environnement	10
1.6 Échangeur thermique	11
1.6.1 Principe général	11
1.6.2 Classement technologique	12
1.6.2.1 Échangeurs à tubes et calandres	12
1.6.2.2 Échangeurs à plaques	13
1.6.2.3 Échangeurs à courants croisés	15
1.6.3 Les autres classements des échangeurs	15
1.7 Notion sur le diagramme de l'air humide	18
1.7.1 Grandeurs relatives à l'air humide	19
1.7.2 Diagramme de l'air humide	20
Chapitre 2 les tours de refroidissement, types et systèmes	
2.1 introduction	22
2.2 définition	22

2.3 Rôle	23
2.4 Procédés de refroidissement, évaporatif	23
2.5 Émissions des installations de refroidissement par voie humide	25
2.6 La legionella	26
2.7 Différents type des tours des de refroidissement	28
2.7.1 Atmosphérique	29
2.7.2 À courant d'air mécanique	29
2.7.3Caractérisation par flux d'air	33
2.7.4 Caractérisation par forme	34
2.7.5 Caractérisation par méthode transfert de chaleur	36
2.7.6Caractérisation par construction	36
2.8 Description et illustration des composants	37
2.9 Maintenance, entretien, nettoyage, désinfection des tours	41
2.10 Refroidissement industriel	42
2.10.1 Systèmes de refroidissement par voie humide ou évaporatif	43
2.10.2 Systèmes de refroidissement par voie humide/sèche	46
Chapitre3 : Modélisation d'une tour ouvert, résultat	
3.1 Domaine technologique	50
3.2 Description générale	51
3.3 Description mathématique	52
3.3.1 Caractérisation de la tour	52
3.2.2 Calcul des performances de la tour	53
3.4 Calcul de la consommation d'eau de la tour	56
3.5 L'organigramme	57
3.5.1 TAO	58
3 .6 Résultats, interprétation et discussion	59
3.6.1 Variations suivant le débit d'eau à refroidir	61
3.6.2 Variation de débit d'air	61
3.6.3 Variations suivant la température d'entrée d'eau à refroidir	62
Conclusion générale	77

Introduction générale

Introduction générale

Une tour de refroidissement est un échangeur d'un type particulier qui permet le rejet de la chaleur dans l'air environnent.

Elles sont des équipements très important dans beaucoup d'application industrielles comme (centrales électrique, installations de combustions, sucreries, chimie…).

Lorsque l'eau utilisée comme milieu du transfert thermique, que ce soit humide ou évaporateur le tour de refroidissement sont les plus adaptées. On cité sauvant les tours humide référence à la vaporisation de l'eau par le biais de la chaleur latente, comme moyenne principal de l'échange thermique entre le procédé et l'air passant par la tour.

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

Notre projet s'inscrit dans ce cadre et l'objectif assigné est de :

* Comprendre et enregistrer le fonctionnement et le rôle d'une tour particulièrement dans une centrale nucléaire. En plus, on abordait un point important existant dans la tour qui est les échangeurs thermiques. Où on a expliqué ses fonctionnements et on a fait un classement selon plusieurs critères mais on a expliqué le point qui est le plus important. Ce point est le classement technologique. Et on a touché un autre point qui est l'air humide, tout ce là est trouvable dans le premier chapitre.
* Dans le deuxième chapitre, on a centré la recherche sur les différents types de tours de refroidissement et les systèmes associés. Une classification sera alors

établie pour permettre d'une part de situer le type retenu et d'envisager les possibilités offertes quant au système de transfert thermique.

* Le troisième chapitre sera consacré à une modélisation avancée, basée sur des hypothèses plus réalistes et pertinentes. Après avoir passé en revue les différentes corrélations disponibles pour les échanges thermiques et de masse dans les deux cotés du système d'échange, une description élaborée des équations mathématiques sera aussi développée. Par la suite, un organigramme pourra être arrangé pour faciliter une écriture des programmes simples en Matlab et sous forme « m-files » reprenant toutes les équations de la modélisation des tours de refroidissement ouvertes. Cette tache sera grandement facilitée si on pourra s'affranchir de la détermination plus ou moins simple et sur la base de données réelles, des coefficients de transfert.

Dans ce même chapitre, nous aurons à conduire une étude paramétrique sur les principales grandeurs telles les débits d'eau et d'air, les températures d'entrée et de sortie, l'humidité de l'air ainsi que les niveaux de consommations d'eau de pulvérisation. Une possibilité sera offerte pour l'examen de la tour en régime sec, cas où le fluide à refroidir ne nécessite pas une grande charge de dissipation.

La conclusion, sera un résumé pour l'ensemble des questions posées avec le maximum de réalisation du programme.

Chapitre 1

Généralité sur les centrales nucléaire et les échangeurs de chaleur



Chapitre 1 généralité sur les centrales nucléaire et les échangeurs de chaleur

1.1 Introduction

Les tours de refroidissement constituent un poste très important dans les centrales nucléaires. Aussi, nous allons décrire une unité pour montrer la place de ce poste, son intérêt et les diverses connexion aux autres équipements. **[1]**

Une **centrale nucléaire** est un site industriel destiné à la production d'électricité, qui utilise comme chaudière un réacteur nucléaire pour produire de la chaleur. Comme pour toute centrale thermique conventionnelle, cette chaleur vaporise de l'eau, la vapeur d'eau entrainant en rotation une turbine accouplée à un alternateur qui produit à son tour de l'électricité. C'est la principale application de l'énergie nucléaire dans le domaine civil. **[1]**

1.2 Description

Une centrale nucléaire regroupe l'ensemble des installations permettant la production d'électricité sur un site donné. Elle comprend fréquemment plusieurs tranches, identiques ou non ; chaque tranche correspond à un groupe d'installations conçues pour fournir une puissance électrique donnée (par exemple 990 MWe, 1 300 MWe ou 1 450 MWe). En France, une tranche comprend généralement : **[1]**

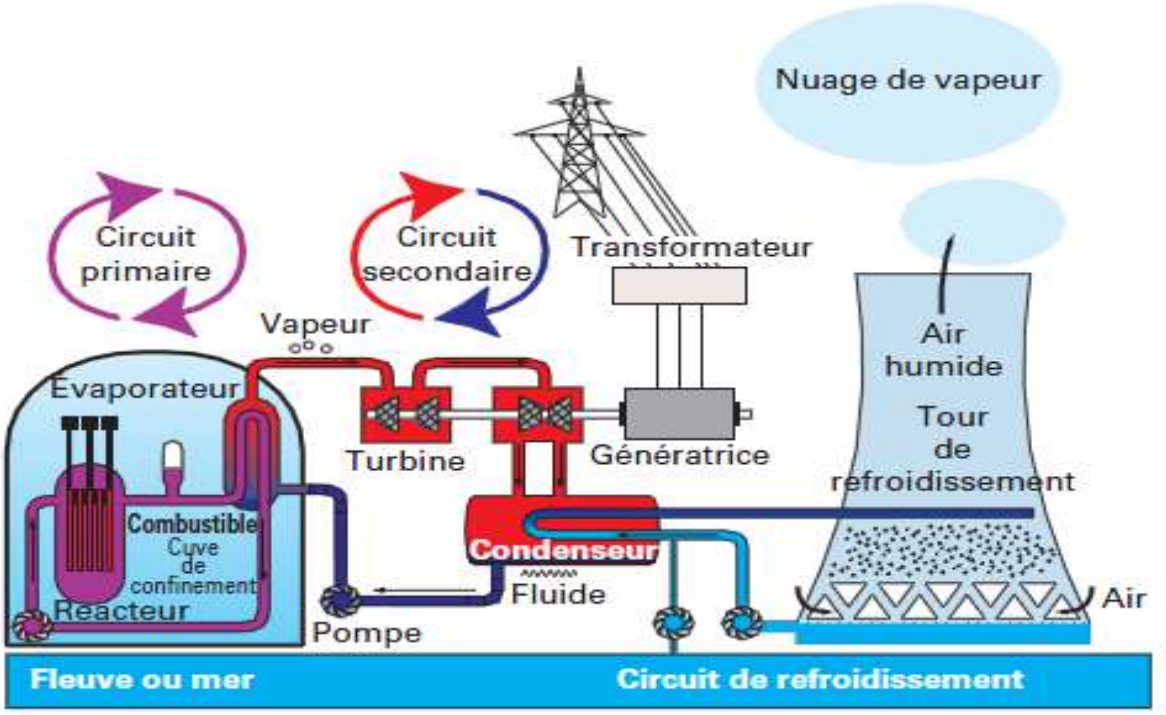


Figure 1.1 schéma d'une centrale nucléaire

❖ Le bâtiment réacteur

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

le cœur du réacteur est constitué par une cuve en acier contenant les assemblages combustible et l'eau du circuit primaire. C'est là, l'intérieur de la cuve que se passe la fission. On plonge dans l'eau les crayons d'uranium, figure 1.2 . **[1]**

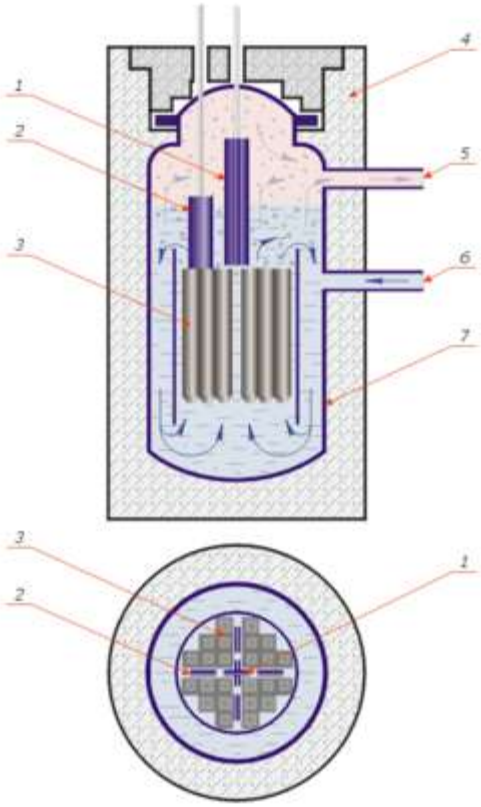


Figure1.2 Réacteur à eau bouillante[1]

1) barre d'arrêt d'urgence
2) barre de contrôle
3) assemblage combustible
4) protection biologique
5) sortie de vapeur
6) entrée de l'eau
7) protection thermique

- **Le bâtiment combustible** :

collé au bâtiment réacteur, il sert de stockage des assemblages du combustible nucléaire avant, pendant les arrêts de tranche et pour le refroidissement du combustible déchargé (un tiers du combustible est remplacé tous les 12 à 18

mois). Le combustible est maintenu immergé dans des piscines dont l'eau sert d'écran radiologique.

❖ Le bâtiment salle des machines

Qui contient principalement :

Une ligne d'arbre comprenant les différents étages de la turbine à vapeur et l'alternateur (groupe turbo-alternateur).

Le condenseur suivi de turbopompes alimentaires (fonctionnement normal, de secours).

❖ Les autres installations de la centrale

- les locaux périphériques d'exploitation (salle de commande…).
- Des bâtiments annexes qui contiennent notamment des installations diverses de circuits auxiliaires nécessaires au fonctionnement du réacteur nucléaire et à la maintenance, les tableaux électriques alimentant tout les auxiliaires et générateurs Diesel de secours.
- Une station de pompage pour assurer les besoins en eau.
- Une ou plusieurs tours de refroidissement, généralement la partie la plus visible de centrale thermique.
- Un ou plusieurs postes électriques permettant la connexion au réseau électrique par l'intermédiaire d'une ou plusieurs lignes à haute tension, ainsi qu'une interconnexion limitée ente tranches.
- Les bâtiments technique et administratif. **[1]**

1.3 Fonctionnement technique

Une tranche thermique nucléaire a le même fonctionnement qu'une tranche thermique classique : un combustible (en l'occurrence nucléaire) produit de la chaleur ; cette chaleur permet soit directement soit au travers d'un échangeur (le « générateur de vapeur ») de transformer de l'eau en vapeur ; cette vapeur entraine une turbine qui est couplée à un alternateur qui produit l'électricité**. [2]**

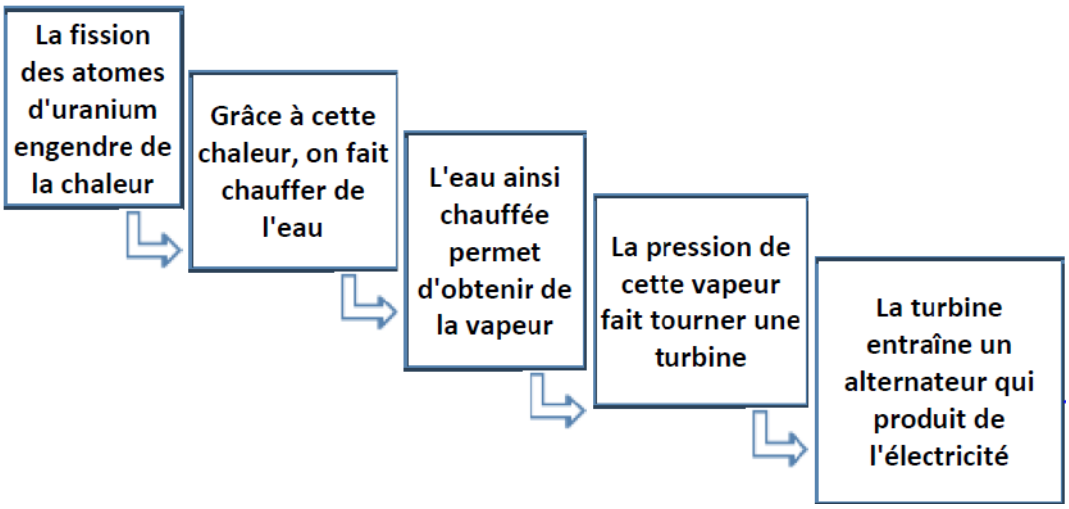


Figure 1.3 Schéma synoptique des étapes pour la production Électrique [2]

- **Circuit primaire** :

L'uranium est enrichit dans son isotope 235. L'uranium est mis sous forme de petites pastilles puis en assemblage de graines métalliques. Placés dans une cuve en acier remplie d'eau, ces assemblages forment le cœur du réacteur. L'eau de la cuve est sous pression, ce qui l'empêche de bouillir en s'échauffant au contact des assemblages. C'est un circuit fermé. **[3]**

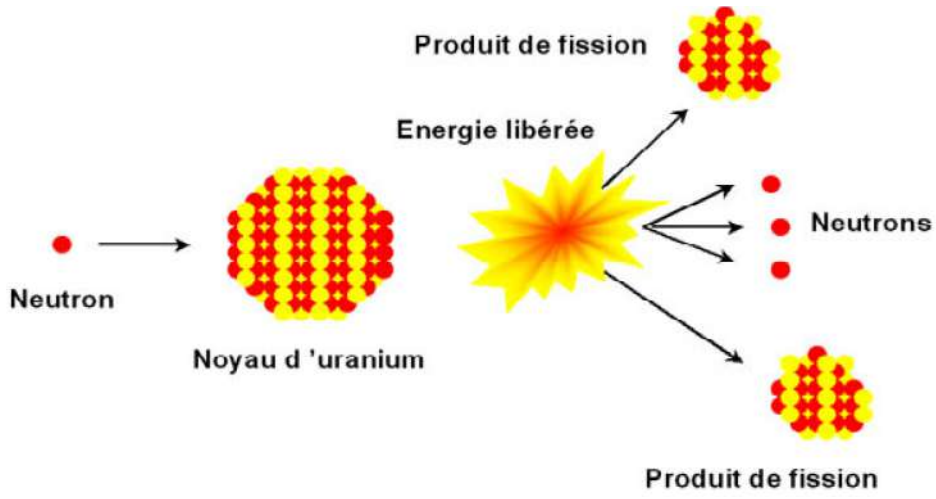


Figure 1.4 : réaction en chaine pour la fission [3]

- **Circuit secondaire** :

L'eau du circuit primaire transmet sa chaleur à l'eau circulant dans un autre circuit fermé : le circuit secondaire. Cet échange de chaleur s'effectue grâce à un générateur de vapeur. Au contact des tubes d'eau du circuit primaire, l'eau du circuit secondaire s'échauffe à son tour et se transforme en vapeur. Cette vapeur fait tourner la turbine entraînant la production d'électricité. Après son passage dans la turbine, la vapeur est refroidie, retransformée en eau et renvoyée vers le générateur de vapeur pour un nouveau cycle. **[1]**

- **Circuit de refroidissement** :

Le circuit de refroidissement est la partie de la centrale qui sert condenser la vapeur et évacuer la chaleur, non transformée en travail.

C'est le seul circuit qui fonctionne en continu, car il faut assurer un refroidissement permanent afin que la pression due à la vapeur du circuit secondaire ne soit pas trop importante. C'est pour cela qu'on y utilise un condenseur. C'est un appareil formé de milliers de tubes dans lesquels circule de l'eau froide prélevée à une source extérieure (rivière, mer, ...) et d'autres tubes

contenant la vapeur arrivant du circuit secondaire; qui va se recondenser au contact des premiers tubes pour ensuite refaire un cycle, et ainsi de suite. **[1]**

Il y a deux problèmes à ce système.

- Le premier est causé par un débit trop faible de la rivière,
- et le deuxième est d'ordre écologique puisque l'eau qui circule dans le condenseur est rejetée légèrement échauffée par rapport au moment où elle a été prélevée.

Une solution résolue les deux problèmes en même temps : les tours de refroidissement, figure 1.



Figure 1.5 : vue réelle de deux tours [1]

Ce sont les espèces de grosses cheminées ci-dessus que l'on prend en général elles mêmes pour des centrales nucléaires.

Elles fonctionnent toujours avec le même principe de refroidissement qu'avant sauf que l'eau n'y est pas refroidie par une autre eau mais par des **courants d'airs** qui circulent du **bas de la tour vers le haut** dans la tour. Seule une petite partie s'évapore dans l'atmosphère (ce sont les **panaches blancs** de la figure 1.5), alors que l'essentiel de l'eau repart vers le condenseur. **[3]**

1.4 Rendement d’une centrale nucléaire

Le rendement théorique des centrales nucléaires actuelles est d'environ 33 %. Les centrales électriques alimentées au fioul ou au charbon possèdent un rendement un peu supérieur (environ 40 %) car elles fonctionnent avec une température de vapeur plus élevée (moins de contraintes de sécurité). Avec de nouveaux générateurs de vapeur, la pression secondaire des nouveaux réacteurs EPR atteint quasiment 80 bars ce qui, d'après ses promoteurs, représente la valeur conduisant au maximum de rendement pour un cycle à eau vapeur saturée soit sensiblement 36 % (cf. EPR "Différences en termes de performances). **[1]**

1.5 Effet sur l’environnement

L'impact d'une installation nucléaire sur l'environnement est dû principalement à sens rejets radioactifs, thermiques et chimiques. Les mesures édictées par la réglementation sont destinées à maintenir ces rejets à des niveaux acceptables du point de vue de la santé des personnes et de la protection de l'environnement. Il en résulte un impact environnemental limité, d'autant plus que les installations nucléaires ne rejettent à l'atmosphère ni gaz à effet de serre ni produits polluants tels les dioxydes de soufre ou d'azote ou les poussières. **[1]**

1.6 Échangeur thermique

Dans les installations industrielles, il est souvent nécessaire d'apporter une quantité de chaleur importante à une partie du système. Dans la majorité des cas, la chaleur est transmise à travers un échangeur de chaleur. On estime à 90% la part des transferts d'énergie réalisée par les échangeurs de chaleur dans l'industrie. **[13]**

1.6.1 Principe général :

Le principe le plus général consiste à faire circuler deux fluides à travers des conduits qui les mettent en contact thermique. De manière générale, les deux fluides sont mis en contact thermique à travers une paroi qui est le plus souvent métallique ce qui favorise les échanges de chaleur. On a en général un fluide chaud qui cède de la chaleur à un fluide froid. En d'autres termes, le fluide chaud se refroidit au contact du fluide froid et le fluide froid se réchauffe au contact du fluide froid. Les deux fluides échangent de la chaleur à travers la paroi d'où le nom de l'appareil. On le voit, le principe général est simple mais il donne lieu à un grand nombre de réalisations différentes par la configuration géométrique. Le principal problème consiste à définir une surface d'échange suffisante entre les deux fluides pour transférer la quantité de chaleur nécessaire dans une configuration donnée. On vient de le dire, la quantité de chaleur transférée dépend de la surface d'échange entre les deux fluides mais aussi de nombreux autres paramètres ce qui rend une étude précise de ces appareils assez complexe. Les flux de chaleurs transférées vont aussi dépendre des températures d'entrée et des caractéristiques thermiques des fluides (chaleurs spécifiques, conductivité thermique) des fluides ainsi que des coefficients d'échange par convection. Ce dernier paramètre dépend fortement de la configuration des écoulements et une étude précise doit faire appel à la mécanique des fluides.

- D'après ce qui précède, on voit bien qu'il y a différentes manières de traiter le problème. Une étude fine doit prendre en compte tous les paramètres et résoudre les problèmes de mécanique des fluides qui peuvent être très compliqués. Une telle approche est possible par des méthodes numériques à travers un logiciel approprié. Cette approche est très coûteuse mais tend à se répandre avec le développement des outils informatiques. Nous ne développerons pas cet aspect des choses et nous nous contenterons de donner quelques références pour le lecteur intéressé.
- Par ailleurs, il existe des méthodes d'étude globales qui moyennant quelques hypothèses simples peuvent donner des résultats approximatifs qui seront suffisants dans la plupart des cas. Ces méthodes seront présentées ici de manière succincte. **[13]**

1.6.2 Classement technologique

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants :

à tubes : monotubes, coaxiaux ou multitubulaires.
à plaques : à surface primaire ou à surface secondaire.
Autres types *:* courants croisés, à caloducs ou à lit fluidisé.

1.6.2.1 Échangeurs à tubes et calandres

C'est de loin le type d'échangeur le plus répandu mais la part qu'il représente ne cesse de diminuer au profit de configurations plus efficaces. Dans ce type d'échangeurs, l'un des fluides circule dans un réservoir autour de tubes qui le traversent tandis que l'autre fluide circule à l'intérieur des tubes. Le modèle le plus simple sera constitué d'un réservoir dans lequel sera plongé un serpentin. Le modèle le plus courant est constitué d'un faisceau de tubes traversant un réservoir de manière longitudinale. On parle alors d'échangeur

multitubulaire. Des parois bien placées permettent de forcer la circulation du fluide à travers les tubes de manière à ce qu'il effectue un ou même plusieurs allers-retours. Voir figure x. On trouve assez fréquemment des chicanes dans le réservoir pour forcer la circulation du fluide à travers tout le réservoir sans quoi le fluide aurait tendance à prendre le plus court chemin entre l'entrée et la sortie.

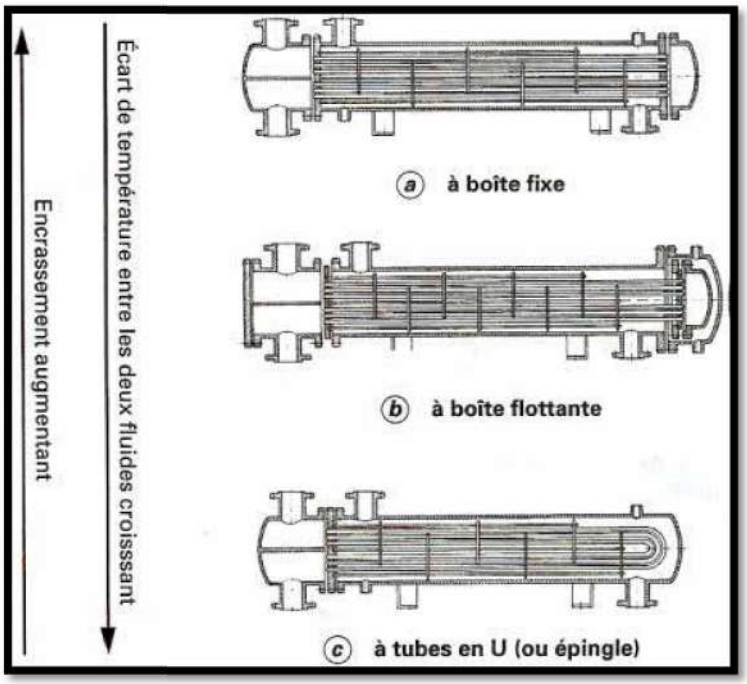


Figure 1.6 Échangeur à tubes et calandre[13]

1.6.2.2 Échangeurs à plaques

Les échangeurs à plaques sont constitués de plaques formées dont les alvéoles constituent les chemins empruntés par les fluides. Les plaques sont assemblées de façon que le fluide puisse circuler entre elles. La distribution des fluides entre les plaques est assurée par un jeu de joints de telle sorte que chacun des deux fluides soit envoyé alternativement entre deux espaces inter-plaques successifs. Les fluides peuvent ainsi échanger de la chaleur à travers es plaques.

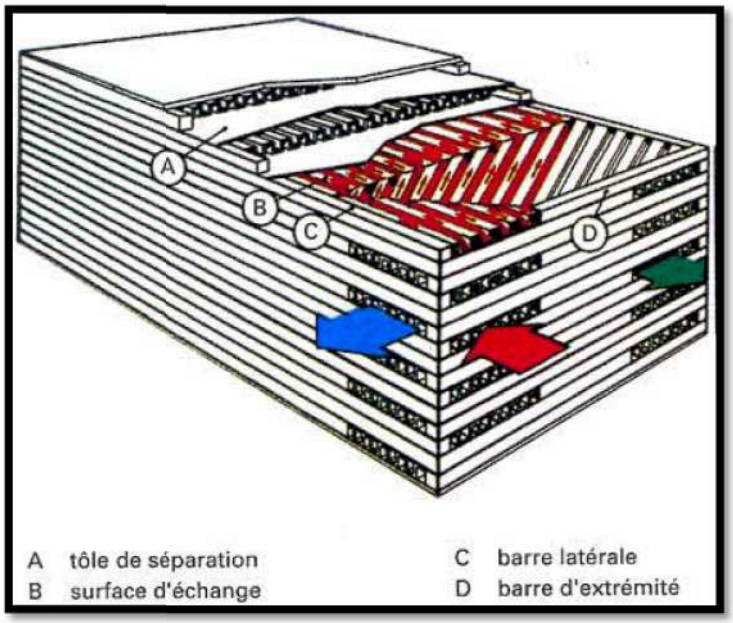


Figure1.7 Échangeur à plaques brasées : assemblage de plaques[13]

De ce type d'échangeur est la compacité. En effet, on voit bien que ce dispositif permet une grande surface d'échange dans un volume limité, ce qui est particulièrement utile lorsque des puissances importantes doivent être échangées. Les échangeurs à plaques sont très utilisés dans l'industrie agroalimentaire (pasteurisation du lait) ou l'industrie nucléaire. Les plaques sont généralement en acier inoxydable en particulier dans l'agroalimentaire pour des raisons évidentes d'hygiène et de santé publique. A noter que l'utilisation de joints en matières organiques réduit la gamme de températures de fonctionnement. **[13]**

1.6.2.3 Échangeurs à courants croisés :

Dans ce type d'échangeurs, l'un des fluides circule dans une série de tubes tandis que l'autre fluide circule perpendiculairement autour des tubes. Dans la plupart des cas, c'est un liquide qui circule dans les tubes tandis que c'est un gaz qui circule autour. Les tubes sont presque toujours munis d'ailettes qui permettent d'augmenter le flux de chaleur échangée en augmentant la surface d'échange. L'exemple type de ce modèle d'échangeur est le radiateur de refroidissement qu'on trouve à l'avant de la plupart des véhicules à moteur.

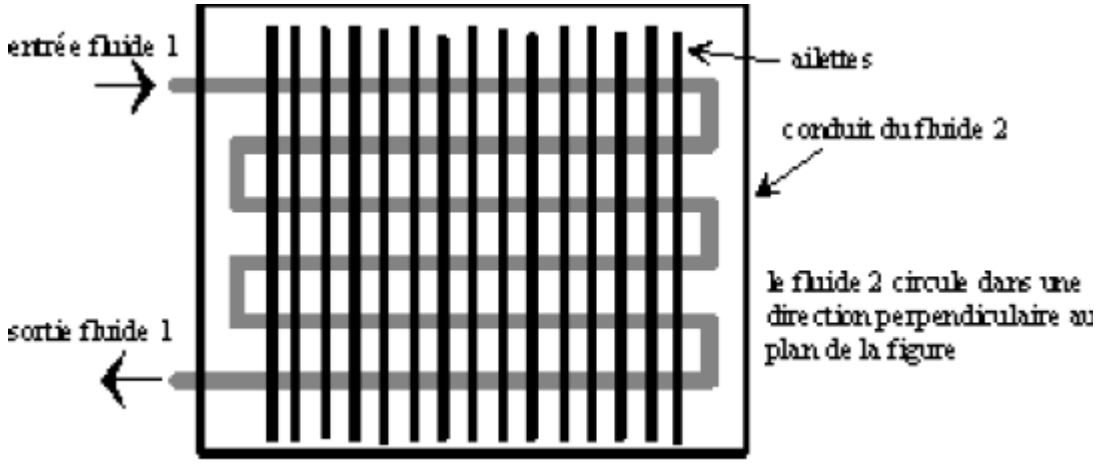


Figure 1.8 : Échangeur à courants croisés [13]

1.6.3 Les autres classements des échangeurs

- **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.

- **Classement suivant le procédé de transfert de chaleur**

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

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

- **Classement fonctionnel**

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

- **Classement suivant la compacité de l'échangeur**

La compacité est définie par le rapport de l'aire de la surface d'échange au volume de l'échangeur. R.K. Shah propose qu'un échangeur soit considéré comme compact si sa compacité est supérieure à 700 m2/m3 ; cette valeur est susceptible de varier de 500 à 800 m2/m3. Une classification en fonction de la compacité peut être donnée

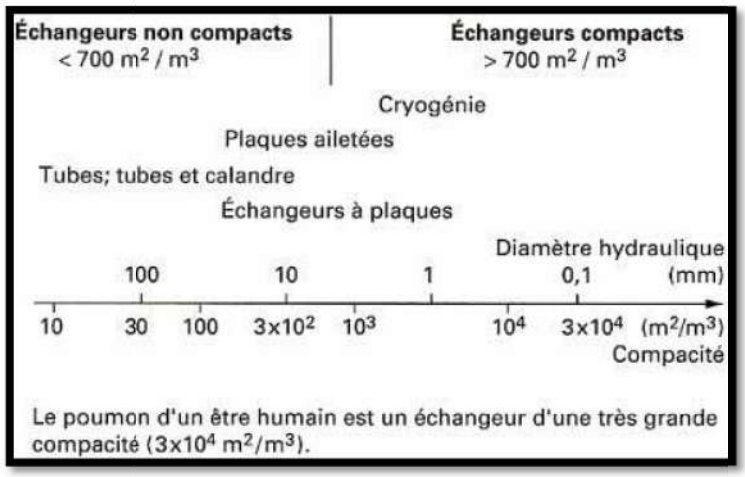


Figure 1.9 Classement suivant la compacité de l'échangeur[13]

- **Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange**

  On retiendra deux types de paroi :

  - les échangeurs métalliques en acier, cuivre, aluminium ou matériaux spéciaux : superalliages, métaux ou alliages réfractaires ;
  - les échangeurs non métalliques en plastique, céramique, graphite, verre, etc.

- **Quel choix proposer ?**

  - Ces différents groupes peuvent se recouper ; aussi choisirons-nous pour décrire les échangeurs :
  - tout d'abord, les échangeurs tubulaires et à plaques pour des raisons technologiques ;
  - puis, les évaporateurs et condenseurs pour leurs applications et, enfin, quelques autres types d'échangeurs en fonction de la nature de la paroi.
  - Le choix d'un échangeur de chaleur pour une application donnée dépend de nombreux paramètres : les propriétés physiques des fluides, leur agressivité, les températures ainsi que les pressions de

service. Les contraintes d'encombrement et de maintenance doivent aussi être prises en compte, ainsi que les considérations économiques. **[13]**

1.7 Notion sur le diagramme de l'air humide

L'air qui nous entoure renferme toujours une proportion d'eau sous forme de vapeur ; on qualifie cet air « d'air humide » par opposition au cas (idéal) d'un « Air sec » qui ne renfermerait pas de vapeur d'eau.

L'air humide renferme une quantité de vapeur d'eau variable mais limitée ; lorsque cette quantité est maximale, on parle « d'air saturé ».

La quantité maximale d'eau que peut renfermer un air « saturé » dépend des conditions de température et de pression dans lesquelles il se trouve. Toutes les variétés d'air humide se situent entre le cas idéal d'un air parfaitement sec et un air saturé.

- On considère l'air humide comme un mélange de deux gaz parfaits, cette hypothèse permet de simplifier les calculs et de comprendre la construction d'un diagramme psychrométrique réel :
  - L'air sec (indice **as)**
  - La vapeur d'eau (indice **v)**
  - Pour le mélange, considéré comme un gaz parfait, on utilise l'indice **m**.
- Les grandeurs seront, fréquemment, rapportées à l'unité de masse d'air sec ; on parle, alors, de grandeurs spécifiques. **[9]**

1.7.1 Grandeurs relatives à l'air humide

1.7.1.1 Pressions partielles

La pression **pm** du mélange est égale à la somme des pressions partielles des deux constituants.

1.7.1.2 Pression de vapeur saturante et degré hygrométrique

La quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air a une température et pression donnée ne peut dépasser une certaine valeur. Au delà, toute quantité d'eau est supplémentaire ne peut apparaitre que sous forme liquide a cette valeur, l'air est dit saturé.

1.7.1.3 Humidité absolue

On appelle **humidité absolue** $\boldsymbol{W}$ d'un air humide, le rapport entre la masse m_v de vapeur d'eau et la masse m_{as} d'air sec contenues dans un volume quelconque V d'air humide.

1.7.1.4Température sèche

C'est la température réelle de l'air humide observé à l'aide d'un thermomètre ou d'un capteur de température. C'est la température de l'air indiquée par un thermomètre non affecté par l'humidité d'air, notée T.

1.7.1.5Température humide ou température « bulbe humide »

On définit la température humide Th de l'air : c'est la température enregistrée par un thermomètre ou le bulbe est recouvert d'une mèche imprégnée d'eau, figure 3.1. Les températures humides sont toujours inférieures aux températures sèches et le seul cas ou elles sont identiques est avec une humidité relative à 100%.

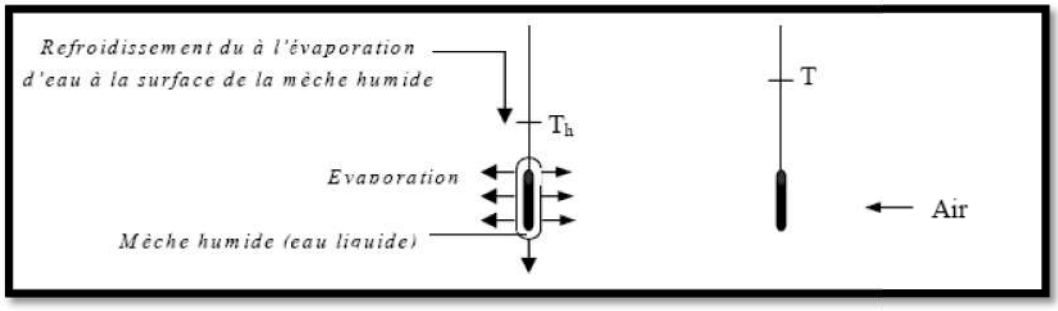


Figure 1.10 : température sèche et humide [10]

1.7.1.6 Température de rosée

Imaginons de l'air qui serait refroidi, tout en gardant son humidité absolue constante. Cet air va perdre de plus en plus la faculté de porter de l'eau à l'état vapeur. Au moment ou l'air sera saturé, et que diminuer encore la température engendrerait la condensation partielle de la vapeur d'eau, on sait que l'on a atteint la température de rosée de l'air son symbole est **Tr**. **[10]**

1.7.2 Diagramme de l'air humide

La mesure de l'humidité relative est la propriété atmosphérique la plus difficile mesurable de manière précise. Différentes techniques de mesure ont été mises au point mais l'obtention d'enregistrements fiables dans des conditions difficiles pose toujours problème.

1.7.2.1 But des diagrammes

Le but est de construire un diagramme qui permette, par simple lecture et sans effectuer aucun calcul, de déterminer la valeur de toutes les grandeurs caractérisant l'air humide connaissant deux d'entre elles, figure 1.11

Le diagramme permet en fonction de deux éléments d'entrées de connaitre tous les autres paramètres d'un état de l'air humide, soit en fonction :

- de la température sèche et de l'humidité relative
- de la température sèche et de la température humide

- de la température sèche et l'humidité spécifique
- de la température sèche et de l'enthalpie
- de l'humidité relative et de l'humidité spécifique
- de l'humidité spécifique et de l'enthalpie **[10]**

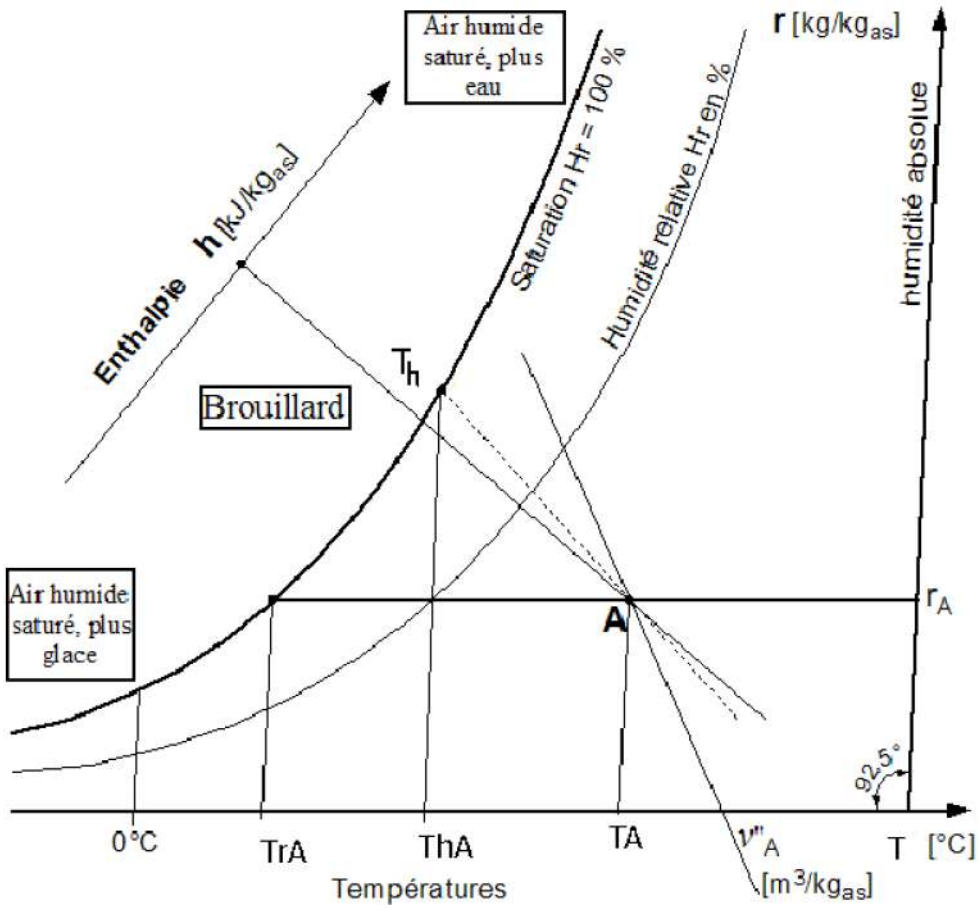
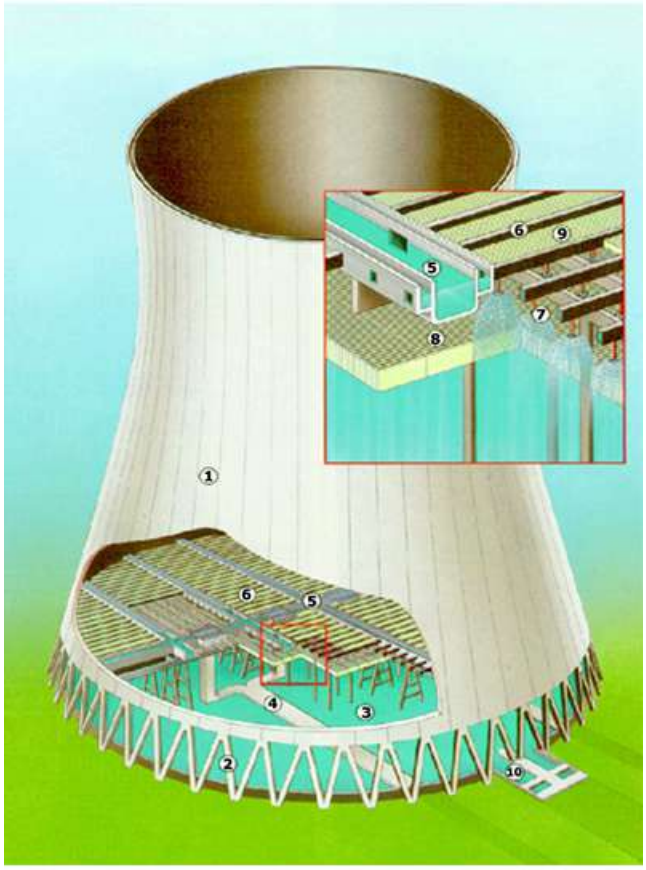


Figure 1.11 : lecture d'un diagramme psychrométrique [10]

Chapitre 2

Les tours de refroidissement, types et systèmes



1 Coque
2 Piliers
3 Bassin
4 Conduits d'amenée (du condenseur)
5 Canaux de dispersion
6 Goulottes des dispersion
7 Diffuseurs avec plaque de ruissellement
8 Claies de ruissellement
9 Collecteur de gouttelettes
10 Sortie de l'eau de refroidissement (vers le condenseur)

2.1 Introduction

Les processus industriels s'accompagnent très généralement de production de chaleur provenant du traitement de corps chauds (sidérurgie, plasturgie, automobile …), de condensations (centrales électriques, sucreries, distilleries, ...) de transformations d'énergie mécanique ou de réactions exothermiques (gaz industriels, chimie, papeteries, verreries….) en chaleur. Ces quantités de chaleur doivent être, en général, évacuées vers une source froide qui doit être à une température la plus faible possible afin d'obtenir un rendement optimal de l'installation, c'est à dire une consommation de combustible, de réactifs ou d'énergie la plus faible possible. La solution qui permet d'atteindre la température la plus basse possible, en contact avec l'air extérieur, est la tour aéro-réfrigérante (réfrigérant atmosphérique humide).

2.2. Définition

Une tour aéro-réfrigérante humide 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 aéro-réfrigérante et ruisselle sur le corps d'échange. L'air traverse le système de ruissellement et est rejetée 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 aéro-réfrigérante ainsi qu'aux conditions atmosphériques (température et humidité). **[5]**

2-3 Rôle

Les tours de refroidissement ont pour fonction d'évacuer vers le milieu extérieur la chaleur issue de systèmes de refroidissement (climatisation ou procédé industriel) en pulvérisant de l'eau chaude dans un flux d'air. Cette eau tombe par gravitation à l'intérieur d'un flux d'air frais remontant dans la tour. Cette circulation d'air permet de refroidir l'eau par vaporisation d'une partie de l'eau pulvérisée. Cette vapeur d'eau est parfois visible sous la forme d'un panache au dessus de la tour**. [5]**

2.4 Procédés de refroidissement, évaporatif

D'une façon générale, 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. De manière générale, quel que soit le procédé, plus la température à laquelle peut s'effectuer ce rejet sera basse, meilleur sera le rendement du procédé.

Selon les températures souhaitées pour obtenir le rendement optimal du procédé, l'on peut distinguer quatre catégories de technologie de refroidissement :

- **l'eau**, avec refroidissement par passage unique; aujourd'hui, beaucoup de procédés, particulièrement dans les applications industrielles, utilisent toujours ces systèmes à «eau perdue» (interdit par l'arrêté du 2 février 98, article 14) entraînant pollution, nuisance pour l'environnement et gaspillage de ce si précieux élément qu'est l'eau. Il est donc primordial de prendre en compte d'autres systèmes;
- **l'air évaporatif** : ce principe, appelé refroidissement évaporatif, est celui utilisé dans les tours de refroidissement. En réutilisant 95% de l'eau de

refroidissement, il est le plus adapté pour le refroidissement de procédés nécessitant des températures comprises entre 25°C et 45°C.

- **l'air sec** : utilisé dans tous les aéroréfrigérants secs, est destiné au procédé ayant un rendement optimal avec des températures supérieures à 45°C. Dans les applications de conditionnement d'air, beaucoup de procédés utilisent aujourd'hui des condenseurs à air pour évacuer la chaleur générée. Ces systèmes entraînent à la fois des consommations électriques et des coûts d'installation très élevés ;
- le refroidissement mécanique par **groupes frigorifiques** qui sera utilisé pour des températures de refroidissement inférieures à 25°C et pour tout besoin en températures négatives.

Nous nous efforçons tous de réduire le réchauffement de la planète et l'émission des gaz détruisant la couche d'ozone. La réduction de la production électrique, grâce à l'utilisation du refroidissement **évaporatif**, nous amène à un environnement plus sain. Le **refroidissement évaporatif** est basé sur un principe naturel simple. Dans une tour ouverte l'eau à refroidir est pulvérisée sur une surface de ruissellement alors que de l'air est soufflé ou aspiré au travers de cette surface de ruissellement. Une petite quantité d'eau est évaporée, provoquant ainsi le refroidissement de l'eau restante. Cette eau froide tombe dans le bac de la tour, et la chaleur est extraite par l'air sortant de la tour.

Les tours sont un moyen efficace et peu onéreux pour évacuer la chaleur inutilisable des systèmes industriels. Le refroidissement **évaporatif** combine une efficacité thermique élevée, des prix attractifs, une température basse du fluide avec une consommation réduite d'énergie et d'eau.

Des températures basses sont essentielles pour beaucoup de systèmes de refroidissement afin d'atteindre des rendements élevés. Ceux-ci consomment moins d'énergie et permettent de réduire les émissions de CO2. C'est dans cette

perspective que les systèmes de refroidissement **évaporatif** contribuent à préserver les ressources naturelles de l'environnement.

Le refroidissement **évaporatif** utilise la température de bulbe humide de l'air ambiant, alors que les équipements de refroidissement à air sec dépendent de la température ambiante du bulbe sec. La température du bulbe humide est généralement de 8 à 12° inférieure à la température du bulbe sec et les tours de refroidissement ou condenseurs évaporatifs sont donc capables d'atteindre des températures de refroidissement ou de condensation au moins égales à la différence de température entre celle du bulbe sec et du bulbe humide.

Les échangeurs de chaleur améliorent l'échange de chaleur entre le fluide de procédé et le réfrigérant. Le réfrigérant transporte la chaleur dans le milieu ambiant. Dans les systèmes en circuit ouvert, le réfrigérant est en contact avec le milieu ambiant. Dans les systèmes en circuit fermé, le réfrigérant ou le fluide de procédé circule dans des tubes ou des serpentins et il n'est pas en contact direct avec 'environnement. **[6]**

2.5 Émissions des installations de refroidissement par voie humide

L'utilisation du principe de refroidissement par voie humide sur les installations équipées de tours de refroidissement conduit à deux types d'émissions dans l'air :

- **le panache** : qui est un nuage visible constitué de vapeur d'eau condensée, provenant de la quantité d'eau évaporée pour assurer le refroidissement. Ce débit d'évaporation est constitué par de l'eau pure qui n'entraîne aucun sel dissous.
- **un entraînement vésiculaire :** (dénomination en application tertiaire) ou primage (dénomination en application industrielle). Cet entraînement vésiculaire est constitué de fines particules d'eau (ou aérosol) entraînées dans l'atmosphère par la circulation de dans la tour de refroidissement.

Ces gouttelettes entraînées possèdent la même composition que le circuit d'eau et sont donc susceptibles de véhiculer des sels et des bactéries si le circuit est contaminé. **[6]**

2.6 La legionella

La legionella est une bactérie aérobie. Elle a été identifiée dans de nombreux milieux naturels (lacs, étangs, rivières) mais également dans certains réseaux d'eau chaude sanitaire, des forages et des circuits de refroidissement. Elle prolifère entre 20°C et 45°C. Au-dessous de 20°C, les bactéries sont viables mais ne se développent pas. Aux alentours de 50°C une destruction survient (en quelques heures) .vers 60°C le temps de destruction devient très court (de l'ordre de la minute).

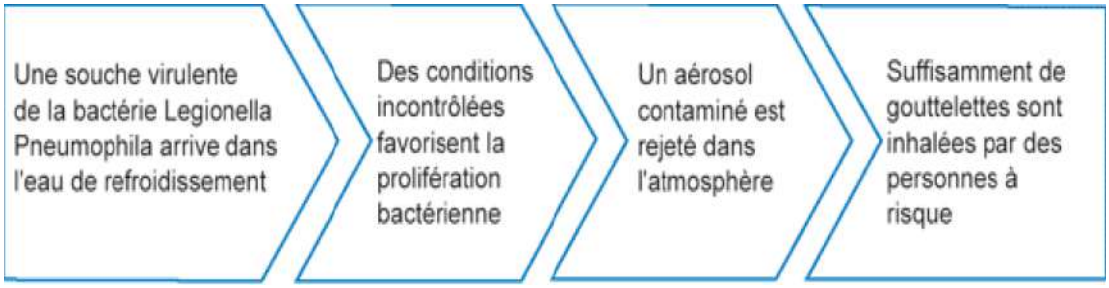
Dans les tours aéro-réfrigérantes, les températures d'eau sont généralement comprises entre 10°C et 50°C. La legionella peut être présente dans le bio- film qui est susceptible de se déposer dans sels minéraux est susceptible, au cours de son évolution, de se détacher, libérant ainsi les bactéries dans l'eau.

Les infections qui peuvent être occasionnées par la legionella sont de deux formes :

- une pneumopathie appelée maladie de légionnaires à déclaration obligatoire depuis 1987.
- Une infection à caractère bénin appelée fièvre de Pontiac.

  Dans ces deux formes, la transmission se fait par inhalation de fines gouttelettes d'eau ou aérosols (taille<5um) contenant des legionella qui vont pénétrer jusqu'au niveau des alvéoles pulmonaires.

Les cas de légionellose engendrés par une tour de refroidissement ou un Condenseur évaporatif nécessitent l'enchaînement de quatre événements consécutifs décrits ci-dessous, montrés aussi dans le schéma et ce, impérativement dans l'ordre indiqué. Si cette chaîne est interrompue, n'importe où, le risque de légionellose est évité.



Mais tous les maillons de la chaîne n'ont pas la même importance et tous ne peuvent pas être évités directement. Il est, par exemple, impossible d'empêcher la bactérie de la souche virulente Legionella Pneumophila d'arriver dans l'eau de refroidissement parce qu'elle est souvent présente en petites quantités dans l'eau d'appoint.

Il est également impossible d'éliminer totalement l'entraînement de gouttelettes ou d'empêcher que des personnes soient en contact avec cet aérosol. L'approche dynamique d'une action préventive est d'empêcher la prolifération bactérienne et en particulier de la Legionella Pneumophila. De cette façon, l'eau reste bactériologiquement inoffensive et l'aérosol, même inhalé par une personne à risque ne sera pas dangereux.

Une approche de bonne pratique globale, ainsi que la mise en œuvre de méthodes planifiées et systématiques de gestion de la qualité de l'eau et de maintenance du système, ont prouvé qu'elles permettaient de minimiser la possibilité de développement de la bactérie Legionnella et de prolonger ainsi l'adurée de vie de l'équipement sans risque de développement de corrosion ou déformation de tartre. **[7]**

2.7 Différents type des tours des de refroidissement

Les machines et les différents procédés industriels sont des sources de production de chaleur importante qui doit être canalisée ou évacuée continuellement de manière à ne pas altérer le fonctionnement et diminuer le rendement de la machine. Pour récupérer cette chaleur on procède à un échange de chaleur avec de l'eau par exemple. **[6]**

Après évaporation, les vapeurs sont relâchées dans l'atmosphère. Les tours de refroidissement ont une surface d'échange limitée et leur efficacité dépend du facteur très aléatoire :

- Les différents types de tours de refroidissement

Tours de refroidissement atmosphériques	Tour de refroidissement à courant d'air mécanique

- Les différents types de flux d'air

Contre courant	Courant croisé	Spray-filled (jet)

- les différents types de construction

Construction sur chantier	assemblage en usine

- Les différents types par forme

Rectiligne	Mécanique ronde

- Les différents types par méthodes de transfert de chaleur

Evaporation	tour sèche	plume abattement	conservation de l'eau

2.7.1 Atmosphérique

Les tours de refroidissement atmosphériques n'utilisent pas de ventilateur Mécanique pour créer l'air dans la tour, son air est dérivé d'un écoulement. D'induction naturelle fournit par un jet de pression.

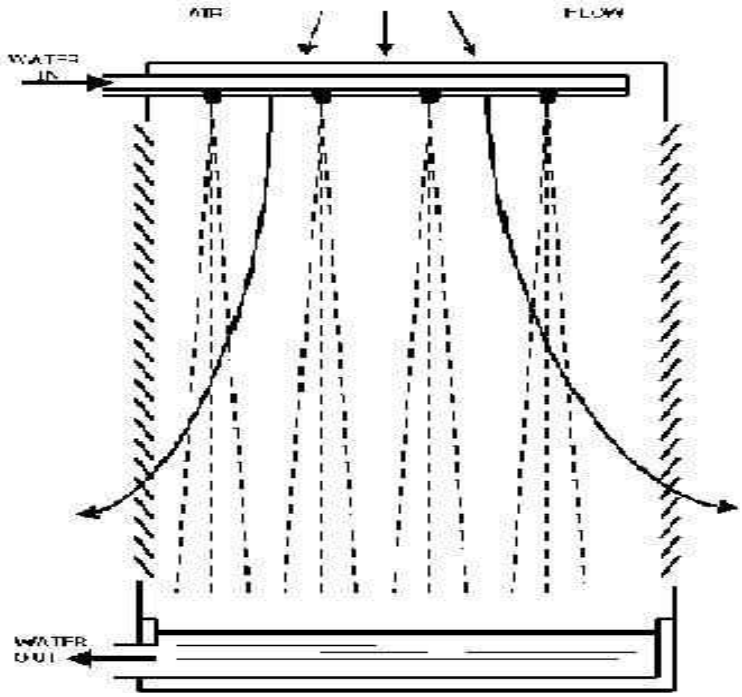


Figure 2.1 : tour de refroidissement atmosphérique

2.7.2 À courant d'air mécanique

Les tours de refroidissement à courant d'air mécanique utilisent des ventilateurs pour bouger les grandes quantités d'air à travers la tour. Il y a deux différentes classes :

- Tours de refroidissement à air induit
- Tours de refroidissement à air forcé

La circulation d'air dans l'une ou l'autre des classes 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.

La tour de contre-courant occupe moins de surface au sol qu'une tour de croisement de flux mais elle est plus grande pour une capacité donnée. Les principaux avantages de la tour de croisement de flux sont une basse pression par rapport à sa capacité et une demande faible en énergie pour les ventilateurs menant à abaisser les coûts énergétiques. 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.

2.7.2.1 à courant d’air forcé

La tour à air forcé, montrée sur la figure 2.2, a le ventilateur, le bassin et la Canalisation localisés dans la structure de la tour. Dans ce modèle, le ventilateur est localisé à la base. Il n'y a pas de murs extérieurs à claire-voie. Au lieu de cela, l'acier de construction ou le bois d'encadrement est couvert de panneaux d'aluminium, d'acier galvanisé ou de panneaux de ciment et d'amiante figure 2.2

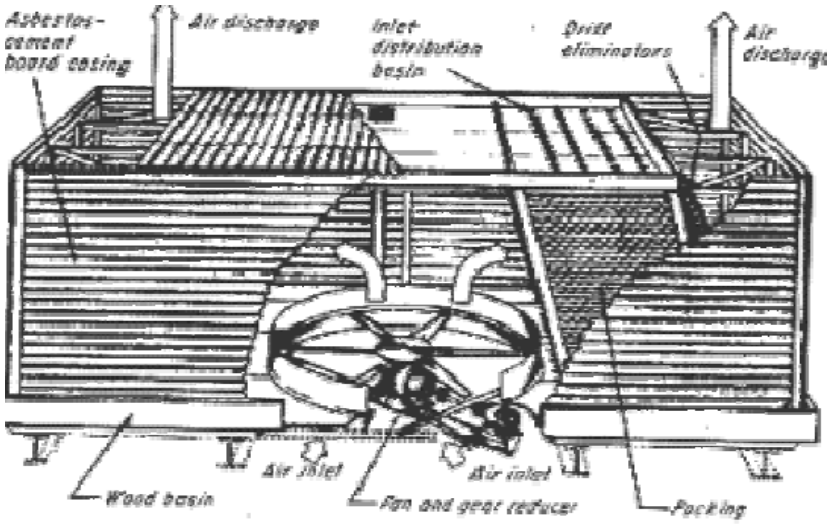


Figure 2.2 : tour à courant d'air forcé

Pendant l'opération, le ventilateur aère à une basse vitesse horizontalement à travers l'emballage et ensuite verticalement contre l'écoulement du flux d'eau qui se produit de chaque côté du ventilateur. Les suppresseurs de dérive situés au-dessus de la tour enlèvent l'eau entraînée dans l'air. La vibration et le bruit sont minimes puisque l'équipement tournant est construit sur une base pleine. Les ventilateurs manipulent la plupart du temps de l'air sec, réduisant considérablement l'érosion et les problèmes de condensation de l'eau. **[6]**

2.7.2.2 à courant d'air induit

La tour à air induit, figure 2.3, a un ou plusieurs ventilateurs, localisés au sommet de la tour, qui aspirent l'air vers le haut contre l'écoulement du flux d'eau passant autour du bois ou de l'emballage. Puisque le flux d'air est à l'opposé de l'écoulement de l'eau, l'eau la plus froide au fond est en contact avec l'air le plus sec tandis que l'eau la plus chaude au dessus est en contact avec l'air moite. Ainsi, le transfert de chaleur augmente efficacement.

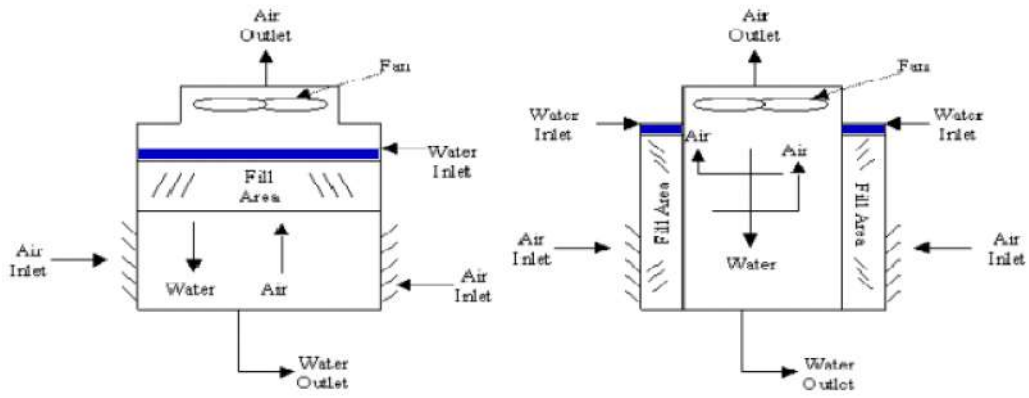


Figure 2.3 : tour à courant d'air induit

2.7.2.3 À courant d'air hybride

Les tours sont équipées avec des ventilateurs mécaniques pour augmenter le flux d'air. Le design permet de réduite au minimum la puissance requise pour le mouvement d'air, mais aussi de faire le moins d'impact possible sur le coût de la pile. S'iles sont correctement conçus, les ventilateurs peuvent être actionnés seulement pendant les périodes des point, figure 2.4.

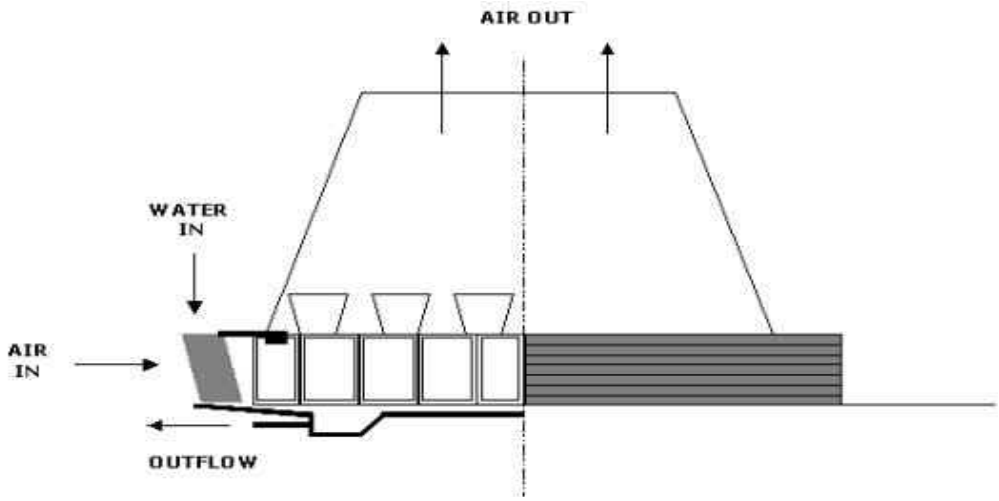


Figure 2.4 : tour à courant d'air hybride

2.7.3 Caractérisation par flux d'air

Les tours de refroidissement sont dévissées en plusieurs groupes par le flux relatif.

2.7.4.1 Contre courant :

Dans les tours à contre-courant, l'air se déplace verticalement en montant à travers le réservoir, contrairement à la chute de l'eau de chute en bas. En raison du besoin d'espaces prolongé de décharge ; de l'utilisation des systèmes à haute pression de jet ; et des pertes typiquement plus élevées de la pression atmosphérique, centaines de plus petite tours de contre-courant sont physiquement plus hautes ; exiges plus de tête de pompe, et utilisez plus de puissance de ventilateur que pour les croisements de flux, cependant dans les tours à contre –courant plus larges, la basse pression gravitaire des système de distribution, plus la disponibilité des secteurs de prises et des espaces pour la gestion de l'air, tend à s'égaliser ou même inverser cette situation.

Le fait que le contre-courant soit inclus dans la tour restreint aussi l'exposition de l'eau directement au soleil, et réduit ainsi la croissance des algues.

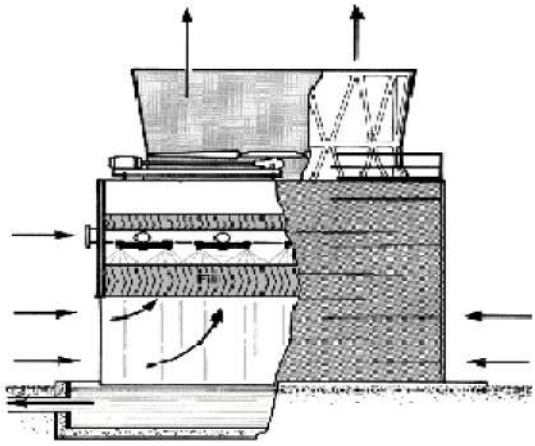


Figure 2.5 : Tour à tirage induit et contre courant

2.7.4.2à courant croiser

Les tours de refroidissement à courant croisé ont une configuration telle que l'air passe horizontalement à travers l'eau qui chut en bas. L'eau à refroidir est de livrée dans les bassins d'eau chaude situés les aires de remplissage au sommet, et est distribuée par la gravité à travers des orifices régulateurs jusqu'au sol de bassin.

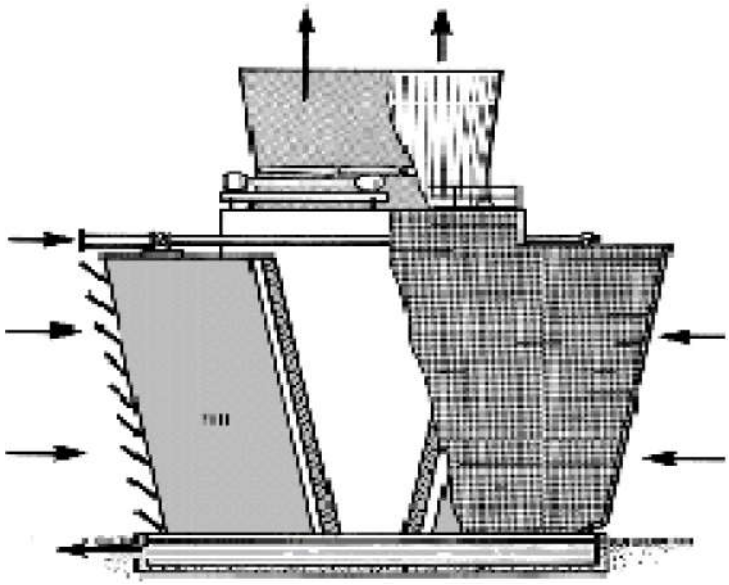


Figure 2.6 : tour a tirage induit et courant croisé

2.7.4 Caractérisation par forme

Il ya deux différents types :

2.7.5.1 rectiligne

Ces tours sont construites en mode cellulaire, augmentant linéairement la longueur et le nombre de cellules nécessaire pour accomplir une performance thermale spéciale ; figure 2.7.

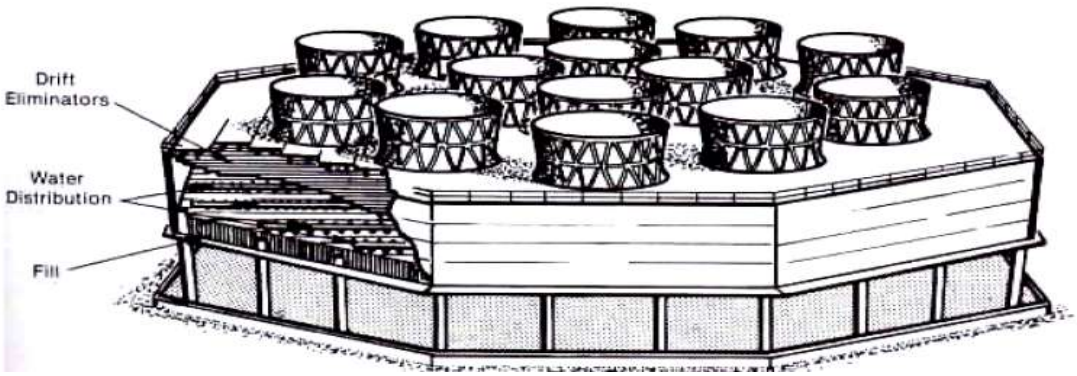


Figure 2.7 : tour rectiligne

2.7.5.2 mécaniques rondes

Ce sonde des tours, comme le nom l'indique, qui sont essentiellement en rond dans la configuration de plan, avec les ventilateurs groupés au centre de la tour, les tours sont à multi-facettes, comme la version mécanique octogonale (OMD) qui est classé généralement dans les tours rondes.

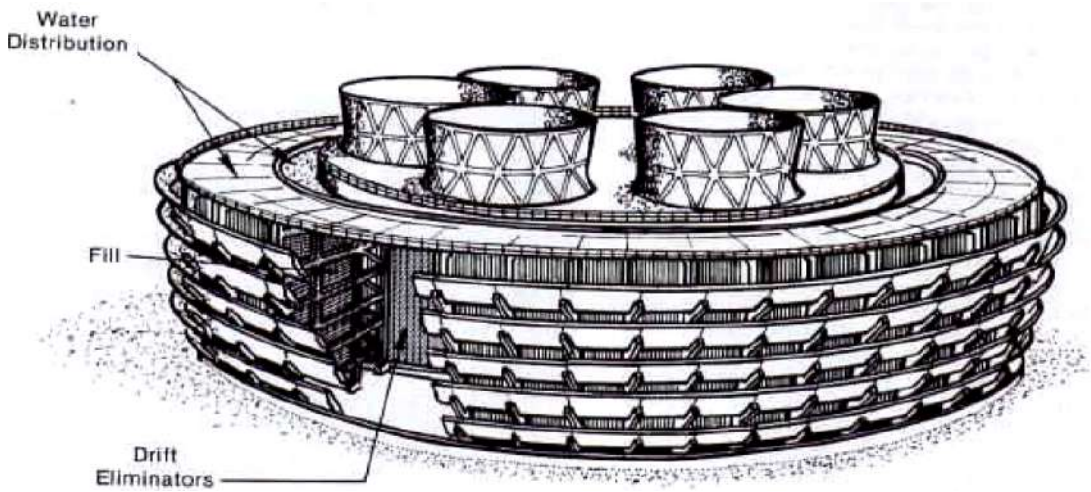


Figure 2.8 : tour rond

2.7.6 Caractérisation par méthode transfert de chaleur

Toutes les tours de refroidissement décrites ici sont des tours de type évaporatife, de ce fait elles dérivent leur premier effet de refroidissement de l'évaporation qui a lieu quand l'air et l'eau sont mis en contact.

D'un autre côté, le spectre est la tour sèche, où, par la pleine utilisation des sections extérieures sèches d'enroulement, aucun contact direct (et donc pas d'évaporation) ne se produit entre l'air l'eau. Par conséquent, le transfert thermique refroidit l'eau totalement.

Entre ces deux extrémités se trouvent les tours de réduction et de conservation de l'eau, où des parties progressivement plus grandes des sections extérieurs sèches d'enroulement sont introduites dans le système de transfert thermique global pour alléger des problèmes spécifique ou pour accomplir de conditions spécifiques.

2.7.7Caractérisation par construction

On peut distinguer deux différents types de tours de refroidissement par construction.

- Construction sur chantier.
- Assemblage en usine.

2.7.7.1 constructions sur chantier.

Les tours de refroidissement construite sur chantier sont celles sur lesquelles l'activité primaire de construction à lieu sur l'emplacement de l'utilisation final. Toutes les grandes tours, et plusieurs petites tours, sont pré-fabriquées et transportées sur le site et le fabriquent des tours de refroidissement fournit habituellement l'assemblage finale.

2.7.7.2 assemblages en usine.

Les tours de refroidissement assemblées en usine subissent un assemblage pratiquement complet à leur point de fabrication, après quoi, elles sont emmenées en plusieurs sections selon le mode de transport utilisé.

2.8 Description et illustration des composants

Les principaux composants d'une tour de refroidissement sont :

2.8.1Le corps d'échange « ou packing » :

Il peut être constitué :

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

Les matières plastiques généralement utilisées éliminent le risque de corrosion. Ces corps d'échange sont sensibles à l'encrassement et surtout à l'entartrage. Les figures 2.9 suivantes illustrent des exemples de corps d'échange utilisés couramment :





Corps d'échange avec panneaux **corps d'échange type gouttes**

Figure 2.9 : exemples de corps d'échange

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

2.8.2 Le pare-gouttelettes :

Encore appelé éliminateur de gouttes, séparateur de gouttelettes ou dévésiculeur :

Celui–ci est très important pour prévenir le risque d'entraînement de gouttelettes potentiellement infectées par les légionelles. Sa conception doit être telle que le taux d'entraînement soit limité le plus possible. Le taux d'entraînement (appelé également entraînement vésiculaire) ne doit pas être supérieur à 0,01% du débit d'eau en circulation (valeur donnée pour le point de fonctionnement nominal, car le taux d'entraînement varie selon les conditions de fonctionnement d'une tour aéroréfrigérante). Il revient donc aux exploitants de s'assurer auprès du fabricant de la tour de refroidissement que ce seuil est respecté. La même démarche doit être effectuée lors d'un changement d'un des composants de la tour.

Les matériaux utilisés pour ce composant sont principalement des matières plastiques. Il est aussi nécessaire de tenir compte de l'accessibilité à ce composant pour faciliter son nettoyage**. [4].**



Figure 2.10 : Exemples de pare-gouttelettes

2.8.3 Les rampes de dispersion :

Encore couramment appelées rampes de pulvérisation :

Celles–ci servent à la dispersion du fluide sous forme de gouttelettes sur le corps d'échange. Afin de prévenir au maximum les risques de dissémination des légionelles, il est préférable d'utiliser des systèmes permettant une dispersion à des pressions faibles pour éviter les éclaboussements. Les disperser à basse pression (environ 0,5 bar) doivent donc être préférés.



Figure 2.11 : Système de dispersion du fluide à refroidir

De même que pour les autres composants, les résistances à la corrosion, à l'entartrage et à l'encrassement doivent être prises en compte pour leur sélection. Les **disperseurs** sont généralement en matières plastiques, ce qui élimine le

risque de corrosion, mais pas ceux d'encrassement, ni d'entartrage. Ces derniers aspects sont en prendre en compte lors de l'exploitation

2.8.4 Bassin de rétention

Il est situé sur la partie basse de la tour afin de récupérer l'eau non évaporée après le passage sur le corps d'échange, figure 2.10. Cet élément doit être conçu de façon à être fermé et non poreux, tout en facilitant sa maintenance, en privilégiant les pentes d'écoulement et l'accessibilité. Il doit comprendre un point de vidange situé en son point bas, ainsi qu'une purge de déconcentration. Le remplissage en eau d'appoint y est généralement régulé par un contrôleur de niveau soit mécanique, soit électronique. Les matériaux utilisés pour les bacs de rétention sont généralement l'acier galvanisé, l'inox, les polyesters et le béton (pour les applications industrielles de puissances thermiques supérieures à 4 MW



Figure 2.12 : Exemples de bassin de rétention avec point de vidange

2.8.5 Ventilateur :

Pour assurer la circulation de l'air à travers le corps d'échange, deux types de ventilateurs sont utilisés sur les tours de refroidissement :

- Les ventilateurs axiaux.
- Les ventilateurs centrifuges.

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

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

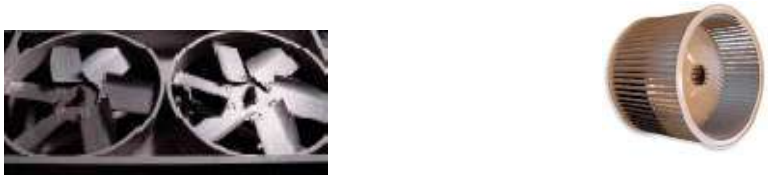


Figure 2.13 : Photos de ventilateurs centrifuge et axial.

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

2.8.6 Échangeur intermédiaire

Disposé entre le circuit d'eau de la tour et celui du procédé à refroidir. Celui-ci peut être un échangeur à plaques ou un échangeur tubulaire (généralement en inox). Cet échangeur intermédiaire doit résister à la corrosion, l'entartrage et à l'encrassement. **[5]**

2.9 Maintenance, entretien, nettoyage, désinfection des tours

L’eau circulant dans la tour de refroidissement doit être traitée pour éviter l’entartage et la corrosion des divers éléments du circuit (canalisations, pompes, équipement de distribution et de dispersion, filtres, etc.) et la prolifération biologique (algues, moisissures, protozoaires, etc.) et plus particulièrement bactérienne, par des biocides en traitement de choc ou continu. L’eau doit être traitée par des biodispersants. Des traitements biocides reposent sur l’utilisation de rayons ultraviolets ou d’ultrasons.

L'évaporation d'une fraction de l'eau à refroidir nécessite des appoints et de purges. L'eau d'appoint doit être, le cas échéant, traitée pour éviter d'introduire des légionelles ou des éléments qui favorisent leur prolifération .les purges doivent être analysées avant leur rejet direct ou indirect dans le milieu naturel.

L'une des difficultés des traitements peut résider dans leur compatibilité avec le processus sur lequel est situé un aéroréfrigérant.

On ne peut qu'insister sur la complexité des opérations de nettoyage approfondi, qui doivent s'étendre, a priori, à des éléments peu accessibles ou relativement fragile. **[5]**

2.10 Refroidissement industriel

Les systèmes de refroidissement sont fondés sur les principes de la thermodynamique. Ils facilitent les échanges de chaleur entre le fluide de procédé et le réfrigérant ainsi que le rejet de la chaleur non récupérable dans l'environnement. Les systèmes de refroidissement industriel peuvent être classés selon leur conception et le type de réfrigérant utilisé : eau ou air ou une combinaison des deux. Pour dissiper la chaleur provenant du condenseur et permettre ainsi le changement d'état nécessaire au fonctionnement d'une installation frigorifique, il existe différents systèmes de refroidissement, dont les tours de refroidissement. **[8]**

2.10.1 Systèmes de refroidissement par voie humide ou évaporatif

2.10.1.1 Tours aéro-réfrigérantes ouvertes

Une tour de refroidissement ouverte, figure 2.9, est un échangeur de chaleur qui permet de refroidir de l'eau en contact direct avec de l'air. Le transfert de chaleur s'effectue partiellement par l'échange de chaleur entre l'air et l'eau, mais surtout par l'évaporation d'une petite quantité de l'eau à refroidir. De cette façon, on peut atteindre des températures de refroidissement inférieures à celles de l'air ambiant.

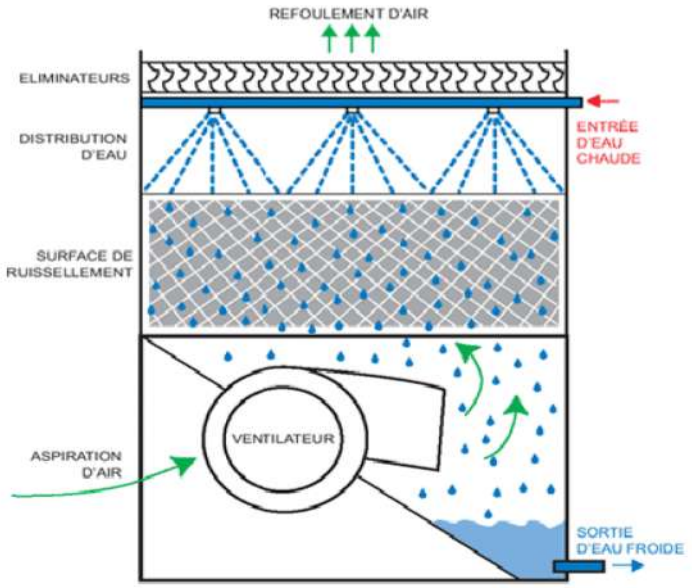


Figure2.14 : tour ouverte

- **Fonctionnement**

L'eau à refroidir est pompée vers le haut de la tour. Les répartiteurs distribuent l'eau sur les surfaces de ruissellement. L'eau est diffusée en film mince et uniforme sur les corps de ruissellement assurant ainsi une très grande surface de contact entre l'air et l'eau (surface d'échange de chaleur).

Le ventilateur souffle ou aspire l'air ambiant au travers des surfaces de ruissellement. Cet air refroidit l'eau de deux manières différentes. Une partie de la chaleur est prélevée par convection (le contact entre l'eau chaude et l'air plus froid) mais la plus grosse partie du transfert de chaleur résulte de l'évaporation.

L'air saturé d'humidité sort ensuite par la partie supérieure de la tour.

L'eau refroidie tombe dans le bassin situé sous l'appareil et est remises-en en circulation dans le processus de production.

Les séparateurs de gouttelettes évitent que les gouttes d'eau quittent la tour de refroidissement. La tour ouverte est l'équipement évaporatif qui offre les plus grands avantages en matière de rendement, d'encombrement, de coût unitaire et de consommation énergétique, présentant également le poids d'installation le plus faible.

Dans le cadre de la gestion du risque lié à la Légionella et du suivi de la qualité de l'eau, il faudra cependant tenir compte de la totalité du volume du circuit incluant la tour de refroidissement proprement dite et tout le réseau, les échangeurs, les bassins éventuels, et les pompes. Il faut donc gérer souvent des volumes importants et des matériaux constitutifs de natures différentes. Dans ces systèmes, les points chauds tels que l'échangeur de chaleur ou le condenseur sont des sites plus favorables au développement du tartre, de la corrosion ou de la prolifération microbienne. Au vu de leur taille et de leur volume, ces systèmes peuvent parfois être plus difficiles à nettoyer ou à désinfecter en cas d'encrassement ou de pollution. **[8]**

2.10.1.2Tours aéro-réfrigérantes ferme

Si l'eau à refroidir ne peut pas entrer en contact avec l'air (par exemple dans l'industrie alimentaire), il est nécessaire d'utiliser un échangeur de chaleur, figure 2.15

Cet échangeur de chaleur sépare l'eau à refroidir de l'eau évaporée dans la tour. Ainsi l'eau du procédé à refroidir n'entre pas en contact avec l'air.

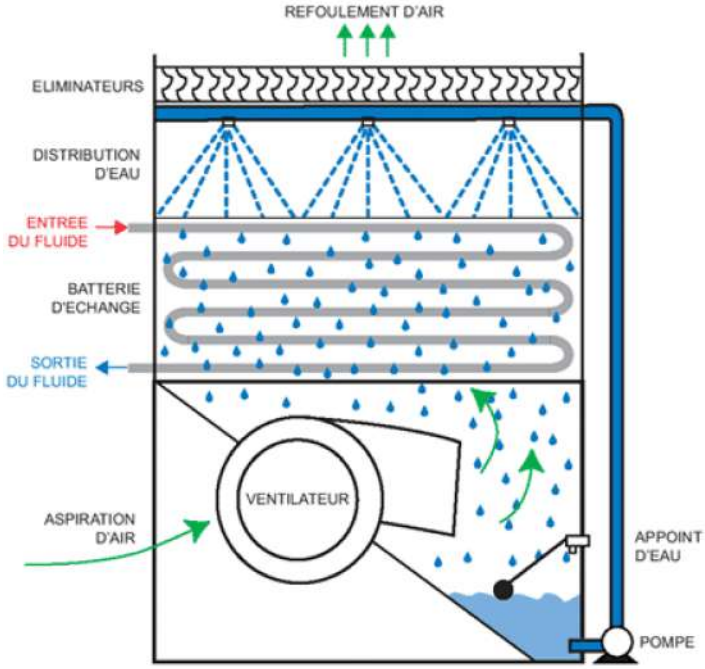


Figure 2.15 : tour ferme

- **Fonctionnement**

Le fluide à refroidir transite par l'échangeur à chaleur. Celui-ci est constitué de plaques en acier inoxydable et se trouve à côté de la tour de refroidissement dans un local contigu.

Dans l'échangeur de chaleur, la chaleur de l'eau à refroidir est échangée avec l'eau de refroidissement.

Le fluide du procédé est maintenant refroidi et peut être réutilisé comme eau de refroidissement dans le procédé. Le circuit de refroidissement est donc totalement fermé entre les consommateurs (machines de production, condensateurs, etc.) et l'échangeur de chaleur.

Par ailleurs la conception de ces équipements avec tubes d'échangeurs à surface lisse, liée à une bonne accessibilité pour le nettoyage, évite les zones permettant l'accumulation ou l'encrassement typique dans les échangeurs tubulaires ou échangeurs à plaques, dans les surfaces d'échange de type packing ou nids d'abeille qui présentent des surfaces complexes favorables à l'encrassement et difficile à nettoyer par la suite. Avec de grands débits d'eau de pulvérisation et un débit de distribution homogène, les tubes et le bassin seront lavés en permanence, limitant ainsi la probabilité de formation de dépôt.

Par ailleurs, ces appareils nécessitant des débits d'air plus importants sont plus favorables à la réduction éventuelle de panache. L'association d'une tour de refroidissement de type ouvert avec un échangeur à plaques qui permet d'isoler le circuit d'utilisation du circuit pulvérisation réduit la gestion du risque de Legionnella à un circuit plus confiné. Il faut toutefois se rendre compte que ceci ne supprime pas de surfaces complexes comme les échangeurs à plaques et les garnissages. Ces équipements sont plus favorables au risque d'entartrage ou à la formation de biofilm et restent difficiles à inspecter et nettoyer.

2.10.2 Systèmes de refroidissement par voie humide/sèche

Les installations de refroidissement équipées de tours de refroidissement hybrides combinent à la fois un échange sec et un échange humide.

L'échange sec est assuré par une batterie à ailettes, appelée également "batterie antipanache " ou "désurchauffeur". Cet échangeur est placé au sommet de la tour de refroidissement. L'échange thermique est réalisé par convection et conduction. Le désurchauffeur assure la suppression du panache visuel.

- **Tours hybride ouvertes**

Une tour de refroidissement ouverte par voie humide/sèche, ou tour de refroidissement « hybride », est une conception spécifique qui a été envisagée pour résoudre le problème posé par l'utilisation de l'eau de refroidissement et par la formation de panache. Il s'agit d'une combinaison d'une tour de

refroidissement par voie humide et d'une par voie sèche soit, en d'autres termes, d'un procédé évaporatif et d'un non-évaporatif. La tour de refroidissement hybride peut fonctionner soit comme une tour de refroidissement par voie humide, soit comme une tour de refroidissement combinée par voie humide/sèche en fonction de la température ambiante.

L'eau de refroidissement réchauffée passe d'abord par une section sèche de la tour de refroidissement, où une partie de la chaleur est extraite par un courant d'air souvent induit par un ventilateur. Après être passée par la section sèche, l'eau est encore refroidie dans la section humide de la tour qui fonctionne comme une tour aéroréfrigérante ouverte. L'air réchauffé provenant de la section sèche est mélangé avec la vapeur issue de la section humide dans la partie supérieure de la tour, réduisant donc l'humidité relative avant que le courant d'air ne quitte la tour de refroidissement. Ceci réduit (presque) complètement la formation d'un panache au dessus de la tour.

Optimiser l'effet d'une tour de refroidissement hybride revient à optimiser la quantité de transfert de chaleur sèche pour satisfaire aux exigences de contrôle du panache. Parallèlement, la section humide est utilisée pour la plus grande partie du refroidissement.

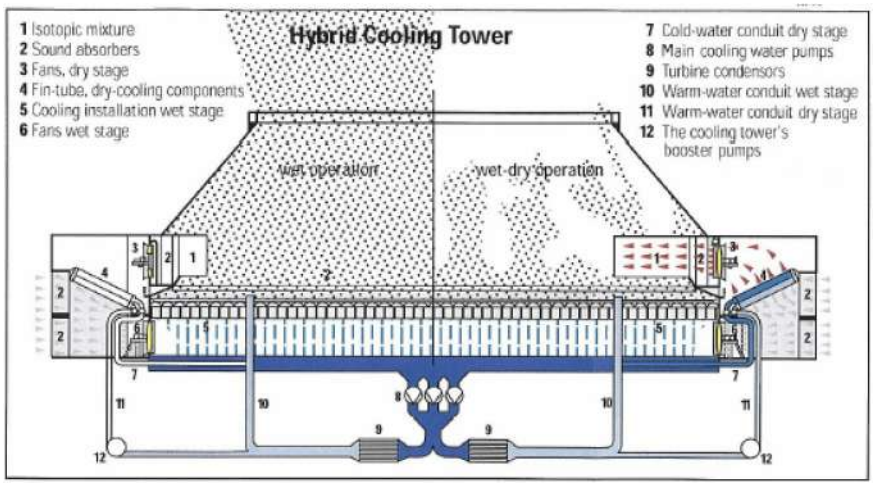


Figure2.16 : principe d'une tour de refroidissement hybride

- **Système hybrides fermé**

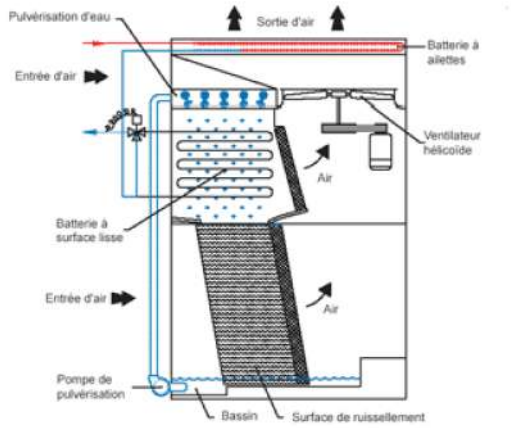


Figure2.17 : tour hybrides fermé

Dans une tour de refroidissement en circuit fermé, le fluide de procédé circule dans les éléments de refroidissement (échangeurs à tubes/plaques ou batterie à ailette) dans une boucle fermée, le circuit de refroidissement primaire. Ces éléments de refroidissement sont mouillés via un circuit d'eau secondaire et l'air traverse les éléments pour créer un transfert de chaleur par évaporation. L'eau de refroidissement qui ressort des éléments est collectée dans un bassin et peut recirculer plusieurs fois, parfois en utilisant une autre tour de refroidissement ou après la purge.

Dans une configuration indirecte, le fluide qui circule dans le circuit de refroidissement primaire n'est pas le fluide à refroidir, mais un autre réfrigérant qui, à son tour, refroidit le fluide de procédé dans un second échangeur de chaleur. **[8]**

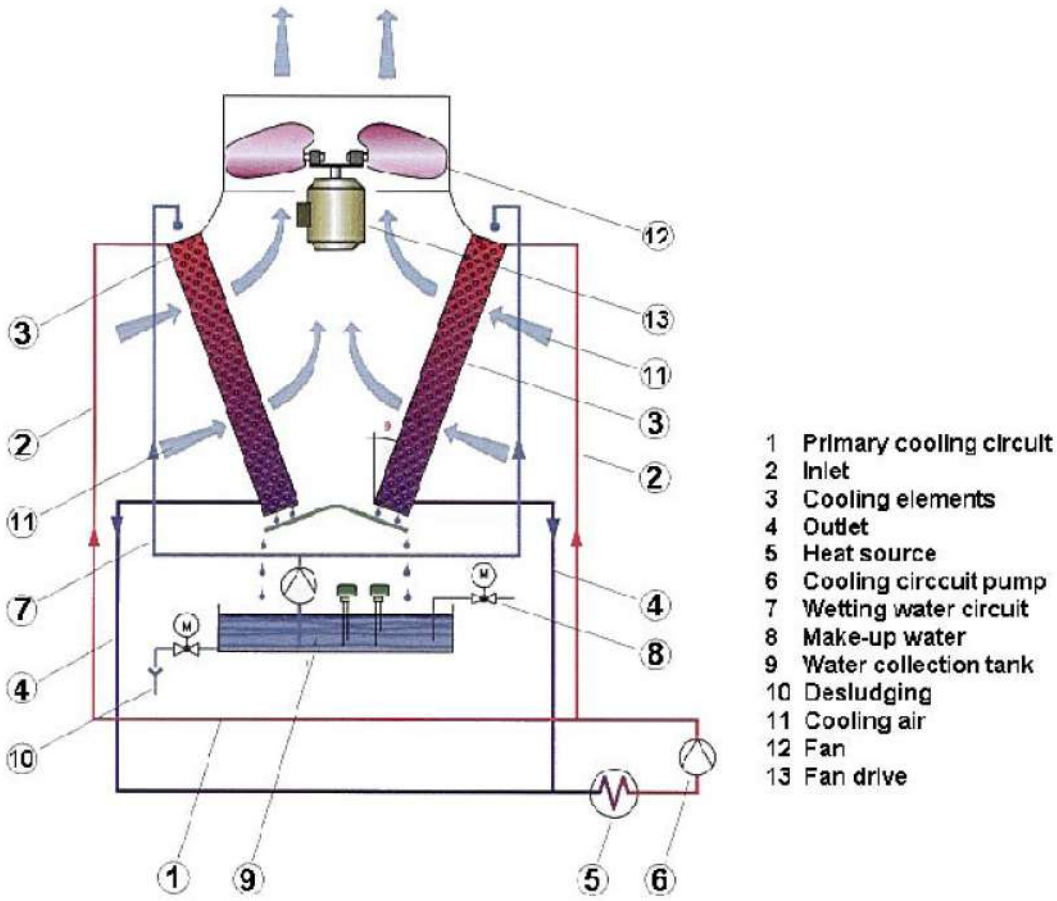
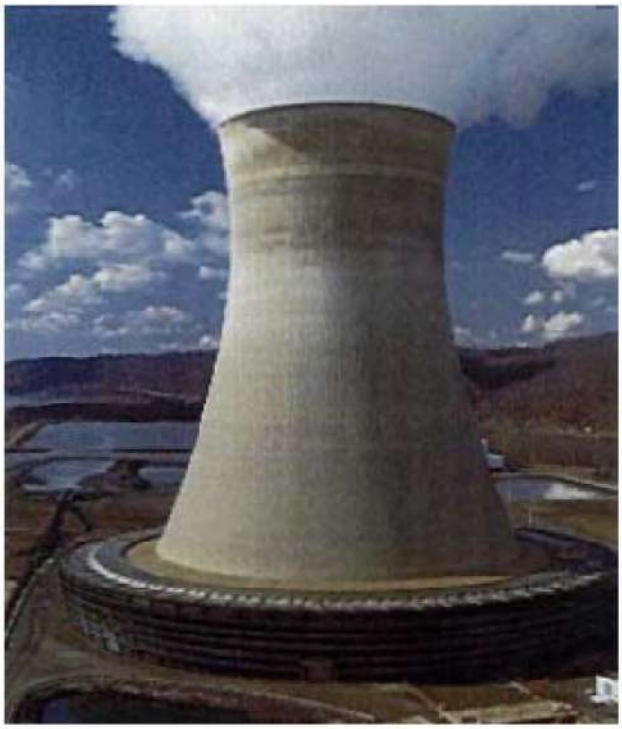


Figure 2.18 : principe de la tour de refroidissement hybride fermé

Chapitre3 :

Modélisation d'une tour ouvert, résultat



Chapitre3 : Modélisation d'une tour de refroidissement ouvert, résultat

3.1 Domaine technologique :

L'outil développé est destiné à modéliser de façons simplifiées le fonctionnement d'une tour aéroréfrigérante humide à contre courant ou courants croisés à partir d'un point de fonctionnement donné.

Les tous sont généralement composées d'une rampe de distribution d'eau qui permet d'augmenter les échanges air-eau, L'eau tombe ensuite dans un réservoir tandis que l'air circule à contre courant. L'eau se trouve refroidie par l'air. Il est humidifié et sa température en sortie de tour tend vers la température humide de l'air. Quant à l'air, il est humidifié et sa température est généralement augmentée.

L'humidification de l'air entraîne une perte d'eau dans le circuit de l'ordre de 1 à 4% du débit d'eau total**. [12]**

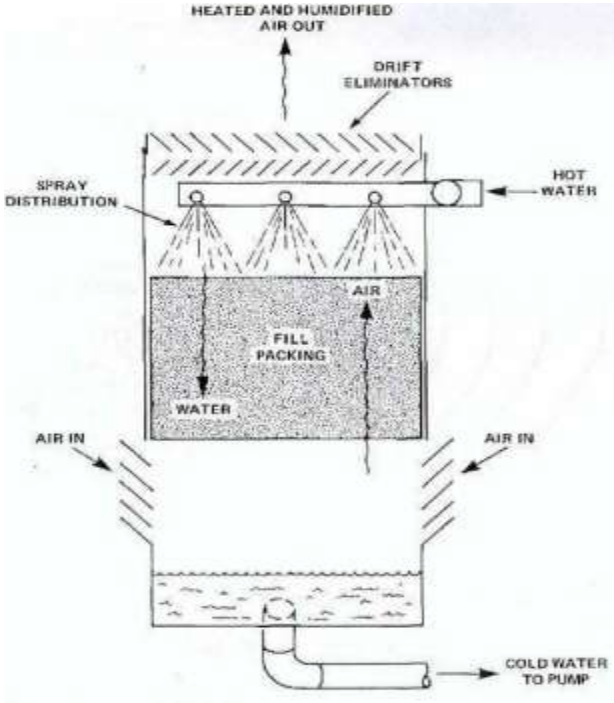


Figure 3.1 : Tour de refroidissement ouverte (envisagée).[12]

3.2 Description générale :

Les tours de refroidissement se présentent le plus souvent sous la forme d'échangeurs à contre courant ou à courants croisés. Dans le cas des tours à courants croisés, La géométrie du packing se présente généralement sous la forme de lattes placées en quinconce sur lesquelles l'eau tombe par gravité. Si on peut considérer l'air comme non brassé, il ne paraît pas évident que l'eau soit un fluide brassé. Les évolutions subies par l'air et l'eau peuvent être représentées dans un diagramme de l'air humide.(Figure 3.2) **[12]**

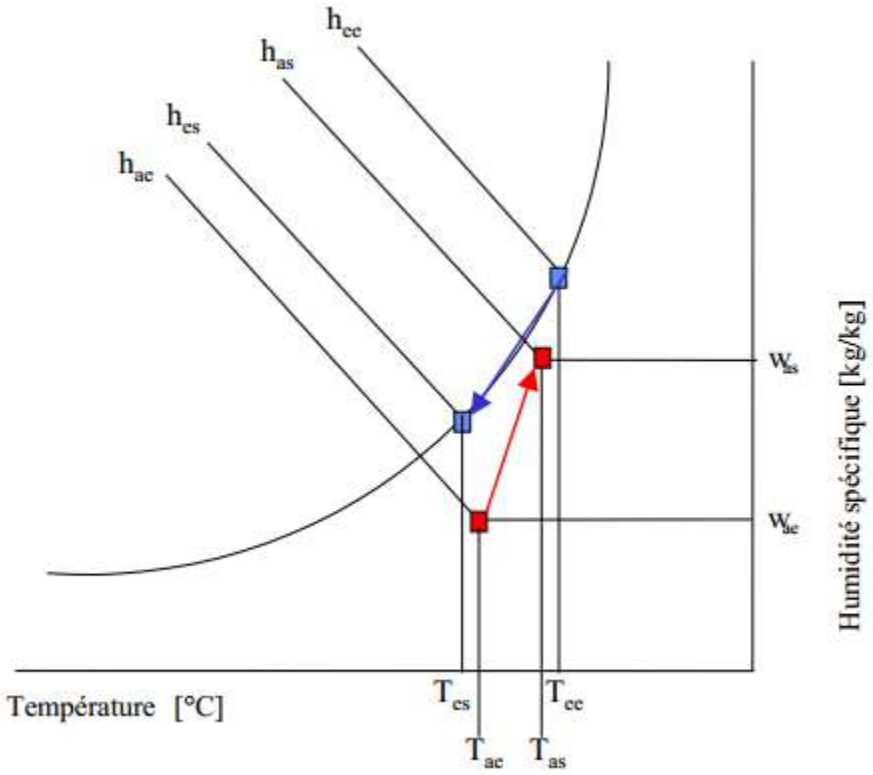


Figure3.2 : États en entrée et en sortie de l'air et l'eau sur un diagramme de l'air humide.[12]

3.3 Description mathématique :

3.3.1 Caractérisation de la tour :

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

$$\mathbf{NUT} = \frac{h_m . a . V_T}{\dot{m}_a} = c \left(\frac{\dot{m}_e}{\dot{m}_a}\right)^n \quad \text{.....(3.1)}$$

Les coefficients c et n ne sont généralement pas donnés par les constructeurs. Pour déterminer ces coefficients, il faut soit connaître Les caractéristiques du packing.

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

$$\mathbf{n} = \frac{\ln(NUT1) - \ln(NUT2)}{\ln\left(\frac{\dot{m}_{e1}}{\dot{m}_{a1}}\right) - \ln\left(\frac{\dot{m}_{e2}}{\dot{m}_{a2}}\right)} \quad \text{..... (3.2)}$$

$$\mathbf{c} = \exp\left(\ln(NUT) - n . \ln\left(\frac{\dot{m}_{e1}}{\dot{m}_{a1}}\right)\right) \text{.....(3.3)}$$

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

$$NUT = \frac{1}{C-1} \ln\left(\frac{\varepsilon - 1}{C.\varepsilon - 1}\right) \text{.....(3.4)}$$

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

3.2.2Calcul des performances de la tour :

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

1-Pas de transfert de masse et de chaleur dans les directions des écoulements d'eau et de d'air ;

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

3-Les apports de chaleurs dus aux ventilateurs sont négligés ;

4-Les chaleurs massiques de l'eau et l'air sec

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

$$dh_a = \frac{\bar{h}_m.a.dV}{\dot{m}_a}.\left(h_a^{sat}(T_e) - h_a - (W_{sat} - W_a).(h_{fg}\, c_{pv}.T_e)\right) \quad (3.5)$$

$$dW_a = \frac{\bar{h}_m.a.dV}{\dot{m}_a}.(W_{sat}(T_c) - W_a) \quad (3.6)$$

$$dT_e = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_e}.\left|\frac{dh_a}{C_{pe}} - dW_a.T_e\right| \quad (3.7)$$

$$d\dot{m}_e = \dot{m}_a.dW_a \quad (3.8)$$

Où a : représente la surface de contact entre l'air et de l'eau par unité de volume de la tour en [m^2/m^3],

L_e : est le nombre de lewis définis comme suit

$$L_e^{2/3} = \frac{\bar{\bar{h}}_c}{(C_{pa} + W_a.C_{pv}).\bar{h}_m}$$

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

$$NUT = \frac{h_m.a.V_T}{\dot{m}_a} \text{..... (3.9)}$$

Si l'on considère un nombre de LEWIS de 1dans le domaine considéré, l'équation (3.5) devient :

$$dh_a = \frac{\bar{h}_m.a.dV}{\dot{m}_a}(h_{sat}(T_e) - h_a) = \frac{\bar{h}_m.a.dV}{\dot{m}_a}(h_{sat}(T_e) - h_a) \text{..... (3.10)}$$

D'autre part, en négligeant les pertes d'eau devant le débit d'eau en entrée, l'équation (3.7) se réduit à :

$$dT_e = \frac{\dot{m}_a.dh_a}{\dot{m}_e.C_{pe}} \text{..... (3.11)}$$

C_{ps} est une chaleur spécifique massique qui sera appelée chaleur spécifique massique à saturation. On suppose que la chaleur spécifique à saturation est constante sur l'intervalle de fonctionnement de la tour. Par la méthode $NUT - \varepsilon$, Le transfert de chaleur peut être écrit comme suit :

$$\dot{Q} = \varepsilon_a.\dot{m}_a.(h_{see} - h_{ae}) \text{ ..... (3.12)}$$

Tour à contre courant	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-(1-C).NUT]}{1 - C \cdot \exp[-1(-C).NUT]}$
Tour à courant croisés, Un fluide brassé, un fluide non brassé	$\varepsilon \frac{1}{C} \cdot \left\{ 1 - exp\left(\frac{1}{C} \cdot (1 - exp[-NUT]) \right\} \right\}$

Avec NUT = $\frac{h_{m.a}V_T}{\dot{m}_a}$, $C = \frac{\dot{C}_a}{\dot{C}_e}$ **et** $\dot{C}_a = \dot{m}_a$, $\dot{C}_e = \dot{m}_e \frac{C_{pe}}{C_{ps}}$.

L'enthalpie de l'air et la température de l'eau en sortie de la tour sont déterminées à partir d'un bilan énergétique global sur chacun des fluides : **[12]**

$$h_{as} = h_{as} + \varepsilon_a(h_{see} - h_{ae}) \quad \text{..... (3.13)}$$
(11)

$$T_{es} = \frac{\dot{m}_{ee} \cdot C_{Pe} \cdot T_{ee} \cdot \dot{m}_a \cdot (h_{as} - h_{ae})}{\dot{m}_{es} \cdot C_{pe}} \quad \text{..... (3.14)}$$

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

$$C_{ps} = \frac{h_{see} - h_{ses}}{T_{ee} - T_{es}} \quad \text{..... (3.15)}$$

En intégrant l'équation (3.8), on trouve :

$$\dot{m}_{es} = \dot{m}_{ee} - \dot{m}_a \cdot (w_{as} - w_{ae}) \quad \text{..... (3.16)}$$

Les pertes d'eau sont de l'ordre de 1 à 4% du débit d'eau entrant.

L'humidité spécifique de l'air est calculée par intégration de l'équation (3.6) **[12]**

$$w_{as} = w_{ae} + (w_{ae} - w_{sm}) \cdot exp(-NUT) \quad \text{..... (3.17)}$$

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

$$h_{sm} = h_{ae} + \frac{h_{as} - h_{ae}}{1 - exp(-NUT)} \quad \text{..... (3.18)}$$

La résolution du problème requiert une méthode itérative. On suppose une température initiale de l'eau en sortie de tour et on itère sur cette valeur jusqu'à convergence. Sachant que la température de l'eau en sortie doit approcher la température humide de l'air. On choisit cette dernière comme valeur initiale. La convergence se fait au bout de peu d'itérations**. [12]**

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

$$dh_a = \frac{h_m \cdot a \cdot dV}{\dot{m}_a} Le^{\frac{2}{3}} \cdot (h_{sat}(T_e) - h_a) \quad \text{..... (3.19)}$$

L'équation (3.18) devient :

$$h_{sm} = h_{ae} + \frac{h_{as} - h_{ae}}{1 - exp(-NUT \cdot Le^{2/3})} \quad \text{..... (3.20)}$$

Cela dit, au regard de l'équation (3.5), il n'est pas assuré que cette méthode donne de meilleurs résultats.

L'efficacité de la tour est écrite ainsi :

$$\eta = \frac{T_{ee} - T_{es}}{T_{ee} - T'_{ae}} \quad \text{..... (3.21)}$$

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

3 .4 Calcul de la consommation d'eau de la tour :

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

La déconcentration est exprimée de la façon suivant :

$\mathbf{N_{cycle}}$ = Cycle de concentration = $\frac{(\text{débit dévaporatio+débit de déconcentration})}{\text{débit de déconcetration}}$**… (3.22)**

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

Débit d'évaporation = $\dot{m}_{ee} - \dot{m}_{es}$ **…… ……..** **(3.23)**

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

$\dot{C}_e$ = débit d′évaporation + débit de déconcentra$\frac{N_{cycle}}{N_{cycle}-1}$débit d′évaporation

(3.24)

De faibles cycles de concentration, $1<N_{cycle}<1.5$, conduisent à des consommations d'eau importantes. Connaissant la composition de l'eau neuve, son pH et sa dureté et les valeurs admissibles on peut déterminer le débit d'eau de déconcentration en à partir de l'évaporation. Notons qu'un drainage à partir de la mesure instantanée de la concentration en sels permet d'ajuster au mieux le débit d'eau. Cette solution peut réduire de 46% la consommation d'eau par rapport à un drainage continu.

Le cycle de concentration se situe 1 à 2, il ne doit jamais dépasser 5. Par exemple un cycle de concentration égale à 2 déconcentré au rythme de l'évaporation.

La tour doit être légalement vidangée une fois par an. La consommation d'eau due à cette vidange peut être négligée.

Pour faciliter l'écriture d'un programme en langage Matlab, nous avons

3.5 L'organigramme

dressé les instructions séquentielles exprimant les équations établies à partir de la modélisation précédente.

Pour se faire, il a été jugé utile de distinguer le programme relatif à l'estimation des coefficients d'échange de celui de la détermination des performances de la tour.

Notant enfin que l'organigramme est présenté sous l'approche de blocs afin de mieux comprendre les relations entre les grandeurs indiquées.

3.5.2 TAO

- Détermination du NUT à partir des débits l'air et d'eau et des coefficients c et n
- Détermination de la température humide de l'air en entrée
- Calcul des enthalpies de l'air et de l'air saturé à la température de l'air
- Supposition : Température de l'eau en sortie, Tes, est égale à la température de l'air humide en entrée
- N=0
- TANTQUE (N<100)
    - Calcul de l'enthalpie de l'air à saturation à la température de en sortie
    - Calcul de la chaleur spécifique effective de l'air à saturation
    - Calcul de l'efficacité d'un échangeur à contre courant ou à courants croisés
    - Calcul de l'enthalpie de l'air en sortie
    - Calcul d'humidité spécifique de l'air en sortie
    - Calcul de température de l'eau en sortie, Tes', à partir du bilan thermique

    N=N+1

    - SI (Tes-Tes')>0.001

        Tes=Tas'

- SINON

  fin

- FIN SI

- FIN TAN QUE
- Détermination des valeurs caractéristiques des deux fluides en sortie à partir de la connaissance de la température de l'eau en sortie.
- Calcul de la consommation d'eau à partir de la formule (3.24).

3 .6 Résultats, interprétation et discussion

Nous avons utilisé le programme écrit selon l'organigramme précédent pour simuler les conditions opératoires diverses, basé sur la modélisation précédente. En effet nous avons choisi la gamme suivante de variation pour les variables significatives :

Nomenclature

Tableau 3.1 gamme de variations des variables d'entrée

Nom	***Description***	***Unité***
$\dot{m}_a$	Débit spécifique d'air humide	0 à +∞ Kg/s
$\dot{m}_{ee}$	Débit spécifique d'eau	0 à +∞ Kg/s
T_{ae}	Température d'air à l'entrée	10 à 60°C
T_{hae}	Température humide de l'air à l'entrée	10 à 30°C
W_{ae}	Humidité spécifique de l'air à l'entrée	0 à 0.05 Kg/kg
C	Coefficient pour la détermination du NUT	1 à 3
n	Exposant pour la détermination du NUT	0.2 à 0.6
Pe	Puissance électrique des ventilateurs	0 à- +∞ W
N_{cycle}	Cycle de concentration	>1 à 5
CONFIGHX	Configuration (contre courant ou courants croisés)	1 à 2

Tableau 3.2 : les grandeurs de sortie

Nom	***Description***	***Unité***

T_{as}	Température d'air en sortie	°C
T_{es}	Température d'eau en sortie	°C
Q_{tot}	Puissance échangée totale	W
W_{as}	Humidité spécifique de l'air sortie	-
$\dot{C}_e$	Consommation d'eau	Kg/s
Pe	Puissance électrique consommée par les ventilateurs	W

Tableau 3.3 les grandeurs Constantes :

Nom	***Description***	***Unité***
c_{pa}	Chaleur massique de l'air sec	J/kg °C
c_{pv}	Chaleur massique de la vapeur d'eau	J/kg °C
h_{fg}	Chaleur de vaporisation de l'eau	KJ/kg

Tableau 3.4 les Indices

ae	Air entrant
ee	Eau entrant
as	Air sortant
es	Eau sortant

- **Exemple de fonction**

Tae	**Wae**	**Mae**	**Tee**	**Mee**	**CONFIGHX**	**Ncycle**	**Pe**	**c**	**n**
25	0.008	1.79*1.16	30	4.24	1	2	750	1.0668	0.2579

À contre courant

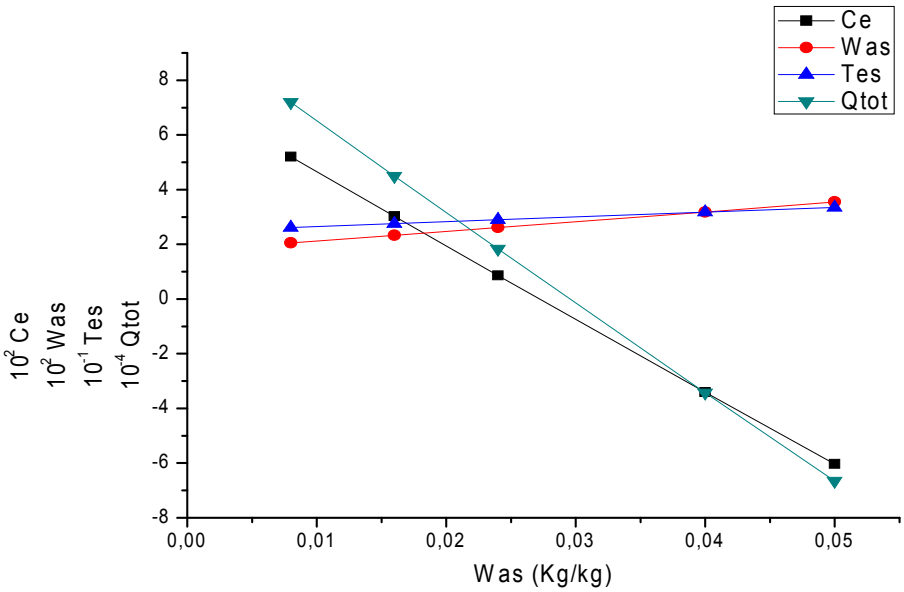


Figure 3.3 : Evolutions des Ce, Was, Tes, Qtot en fonction de Was

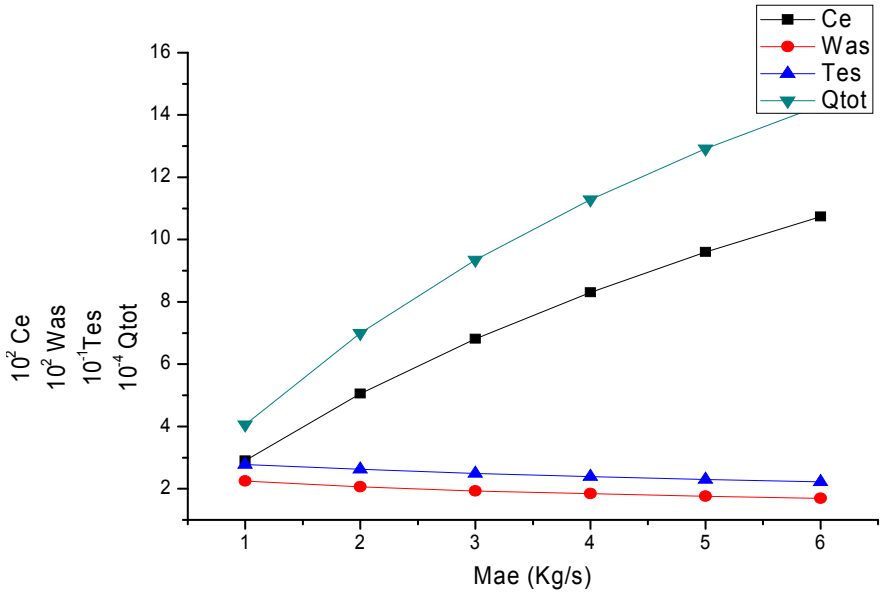
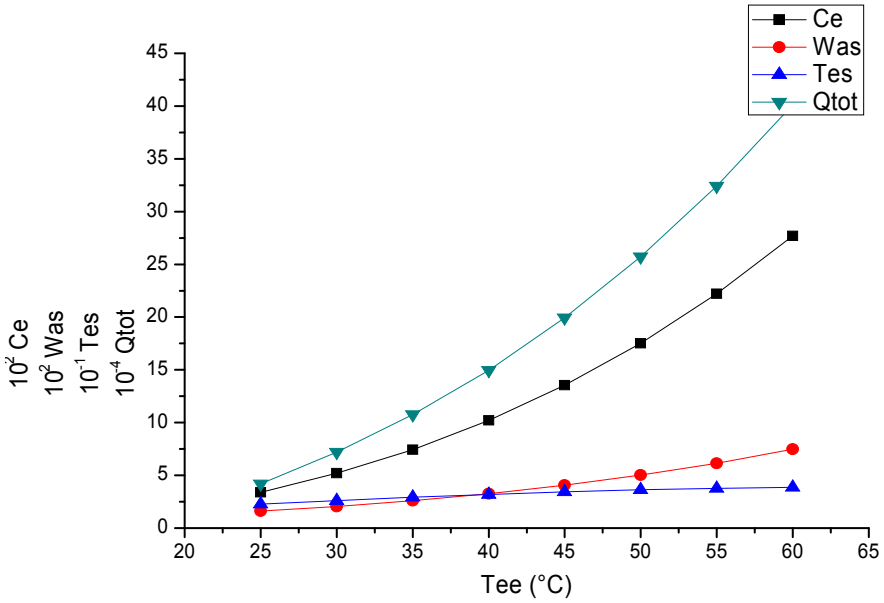


Figure 3.4 : Evolutions des Ce, Was , Tes, Qtot en fonction de Mae



Figurre3.5: Evolutions des Ce, Was, Tes, Qtot en fonction de Tee

3.6.1 Variations suivant le débit d'eau à refroidir

En premier lieu, nous avons reporté les variations de la température de Sortie de l'eau en fonction du débit d'eau à l'entrée, figure en mode Humide à courant croisé et contre courant, On peut déduire que pour les faibles valeurs du débit d'eau à refroidir, il y a une augmenté les températures d'eau en sortie, il y a une nette différence entre les deux température dans le deux cas .

Remarquons Aussi que pour une tour humide, il est possible de descendre à de plus basses températures si on a des débits plus ou moins faibles à refroidir.

La puissance échangée suit la même allure que les températures,

Figure (3.36) mais que le niveau d'échange thermique est très modéré en courant croisés.

La consommation augmente linéairement avec augmentation de début d'eau à contre courant et courant croisés.

3.6.2 Variation de débit d'air

On peut remarquer qu'une plus grande ventilation s'accompagne d'une diminution des températures de sortie l'eau à refroidir en haut de tour.

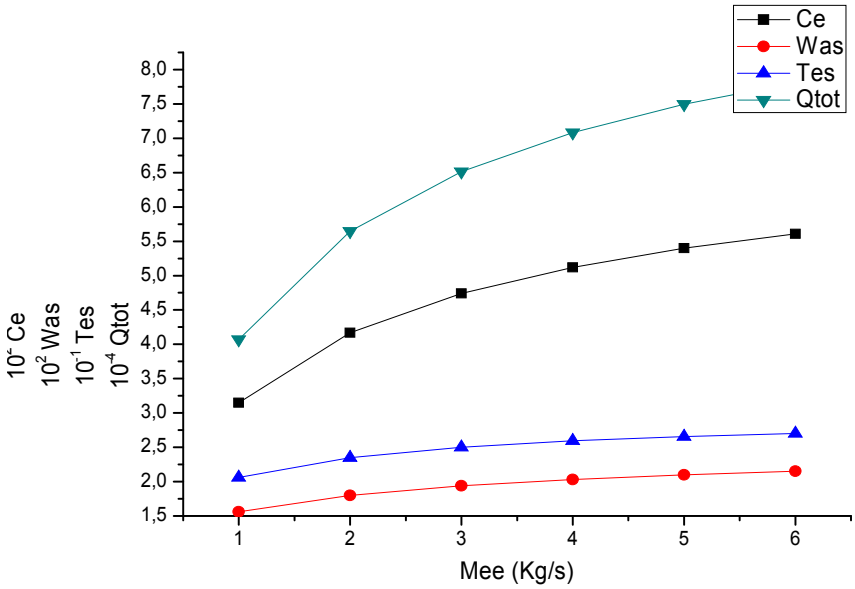
Il est évident qu'une vitesse d'air plus grande permet de répartir la charge thermique vers des équilibres mois chauds.

Dans la figure (3.27), on observe une chute très brutale de l'humidité absolue de l'air, ce qui signifie que les grandes quantités d'air diluent les quantités de vapeur entrainée.

3.6.3 Variations suivant la température d'entrée d'eau à refroidir

En ce que concernent les variations des grandeurs ciblées en fonction de la température de l'eau à refroidir en entrée, nous remarque que les températures d'eau sortie presque en égalité au début de la rentrée. Au milieu, la température de courants croisés augmente par rapport au contre courant

La puissance échangée a les mêmes échanges de la température de sortie d'eau. Mais dans ce cas le contre courant est élevé par rapport au conte croisé.



Figurre 3.6 : Evolutions des Ce, Was, Tes, Qtot en fonction de Mee

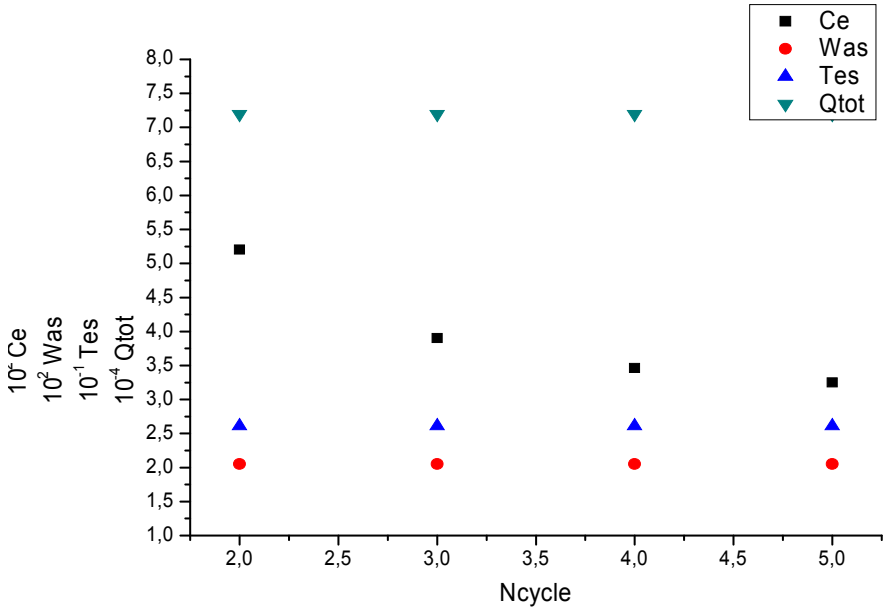


Figure 3.7 : Evolutions des Ce , Was, Tes, Qtot en fonction de Ncycle

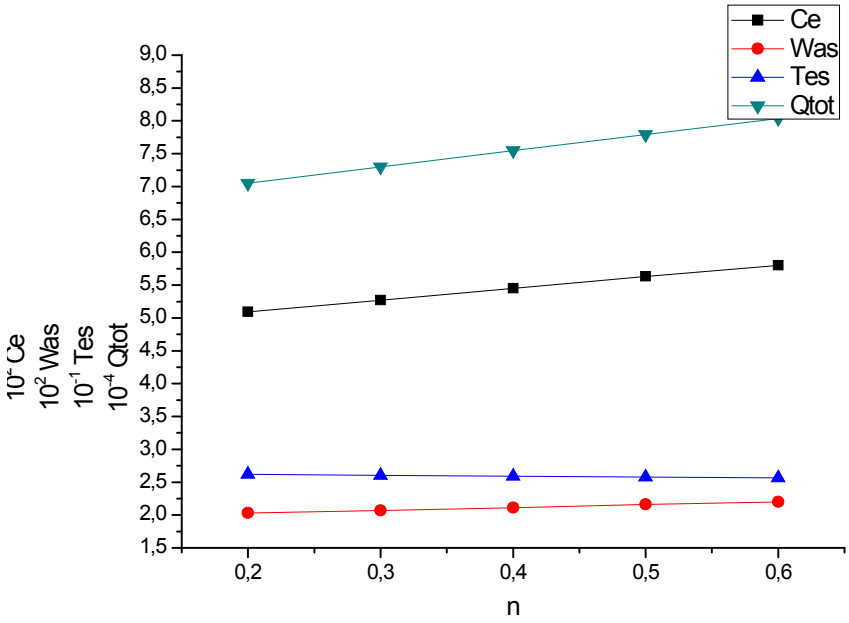


Figure 3.8 : Evolutions des Ce, Was, Tes, Qtot en fonction de n

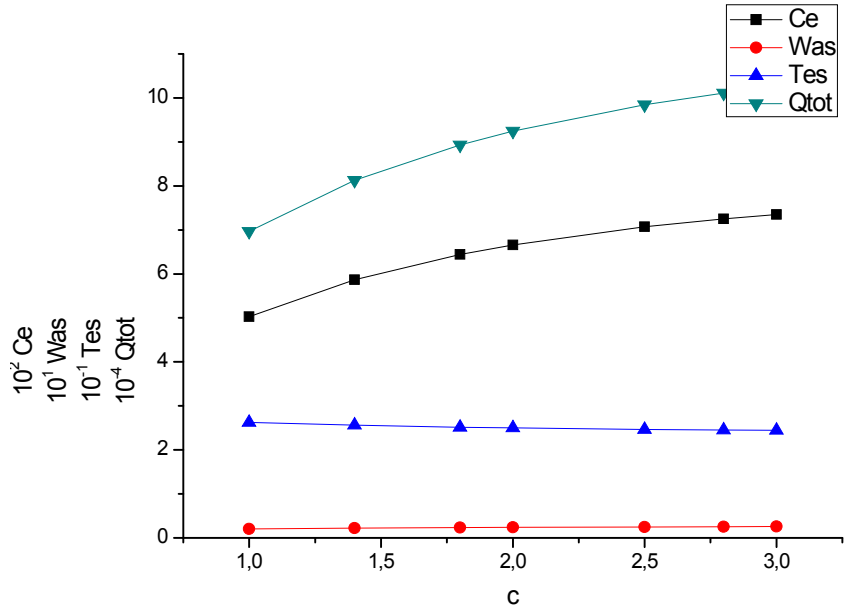


Figure 3.9 : Evolutions des Ce, Was, Tes, Qtot en fonction de c

À courants croisés

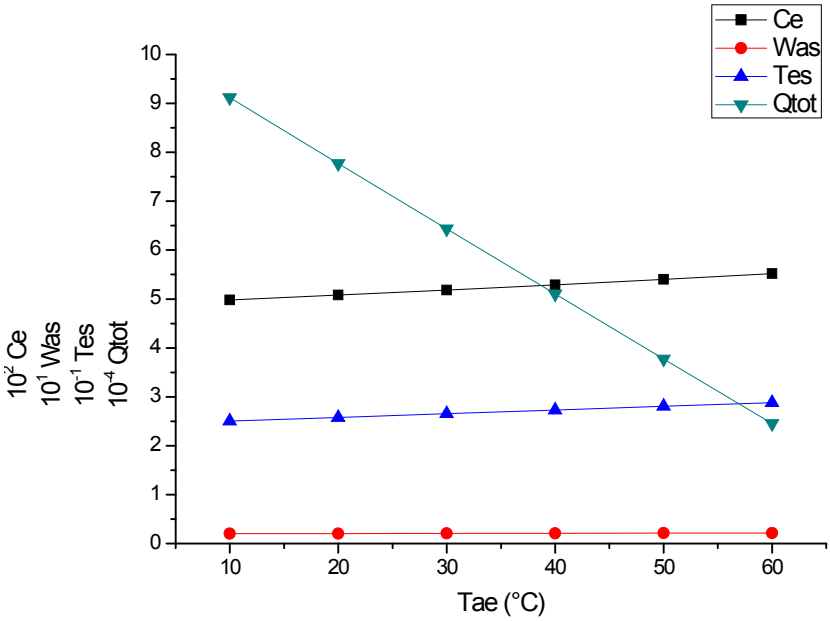


figure3.10 : Evolutions des Ce, Was, Tes, Qtot en fonction de Tae

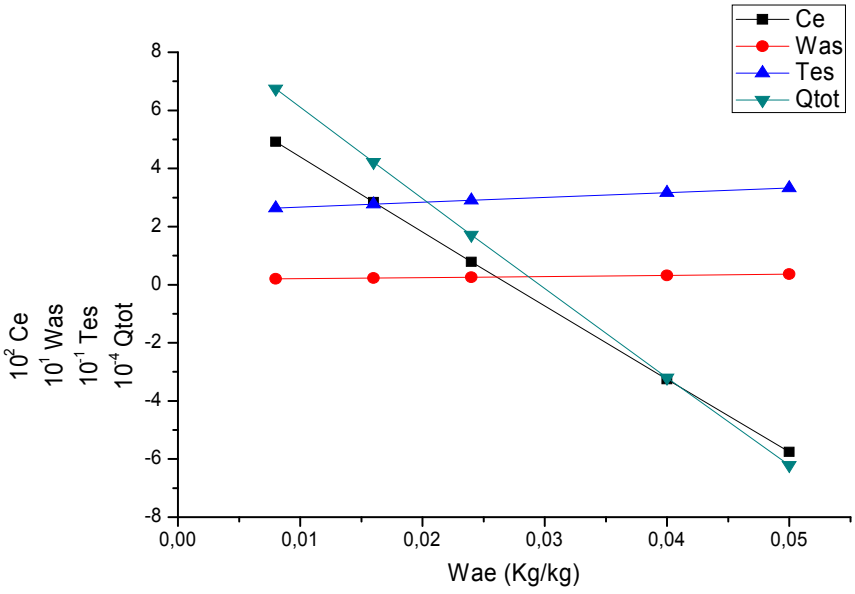


Figure3.11: Evolutions des Ce, Was, Tes, Qtot en fonction de Wae

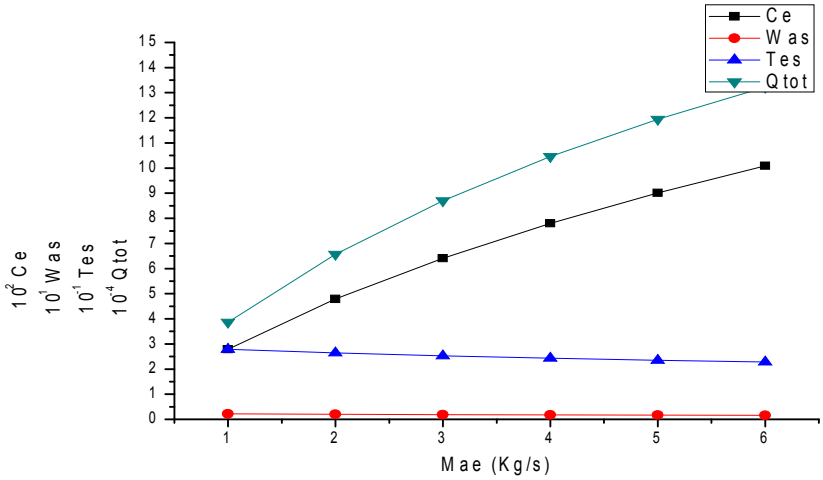


Figure3.12 : Evolutions des Ce, Was, Tes, Qtot en fonction de Mae

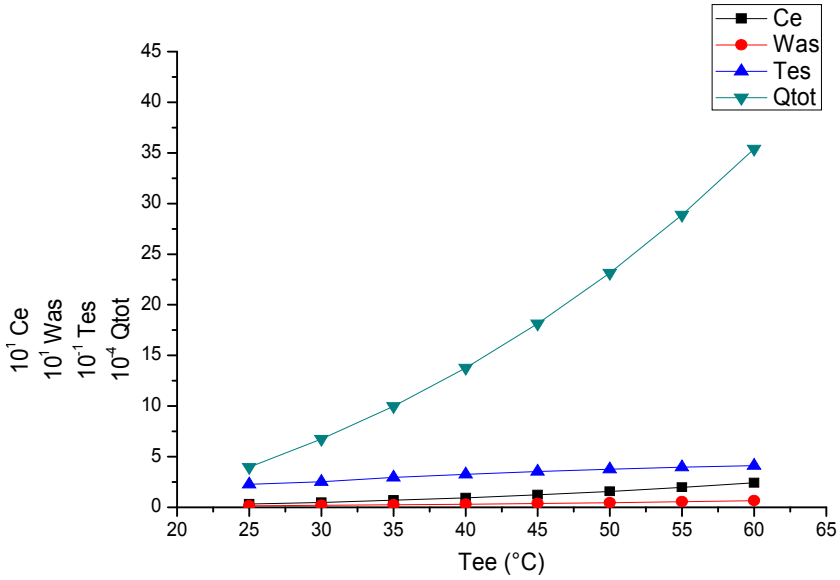


Figure3.13 : Evolutions des Ce, Was, Tes, Qtot en fonction de Tee

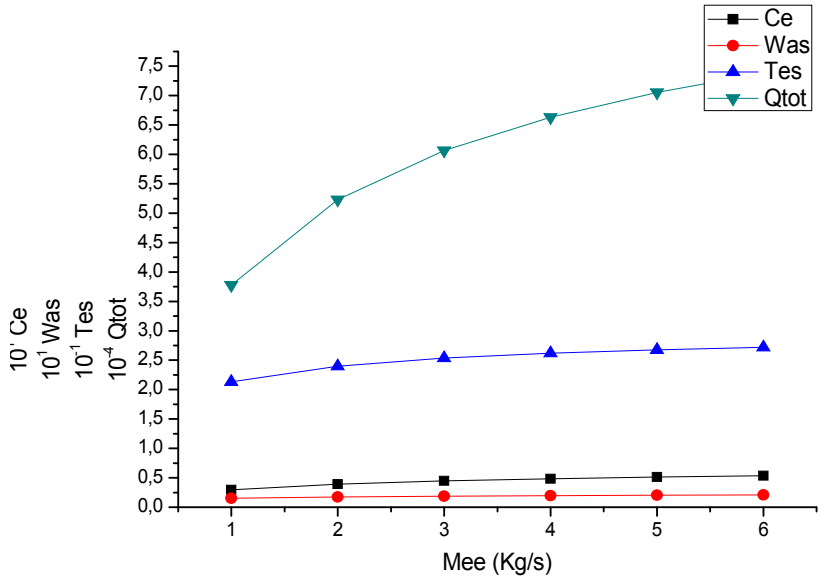


Figure3.14 : Evolutions des Ce, Was, Tes, Qtot en fonction de Mee

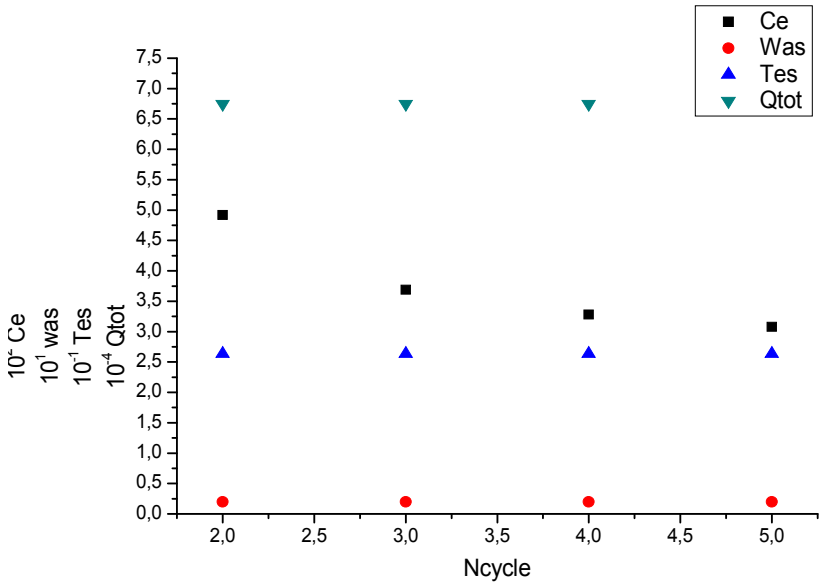


Figure3.15 : Evolutions des Ce, Was, Tes, Qtot en fonction de Ncycle

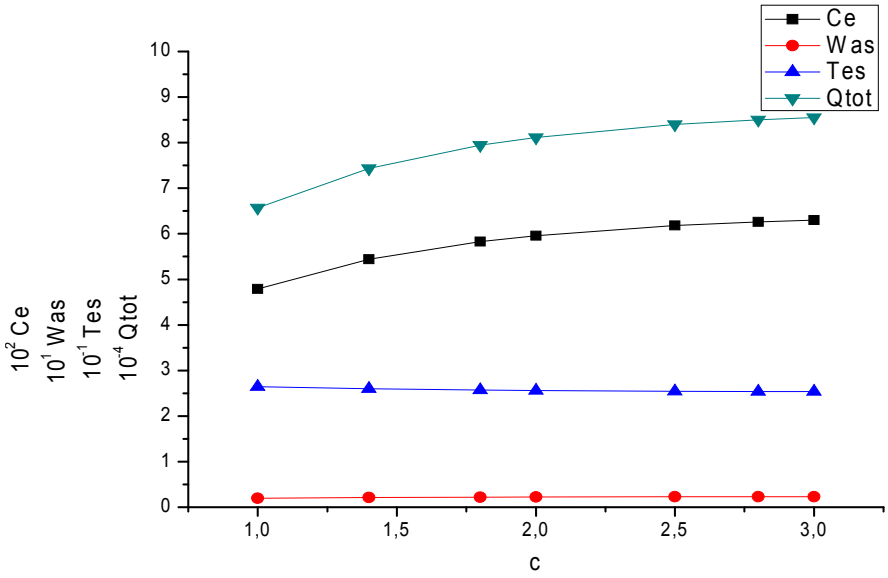


Figure3.16 : Evolutions des Ce, Was, Tes, Qtot en fonction de c

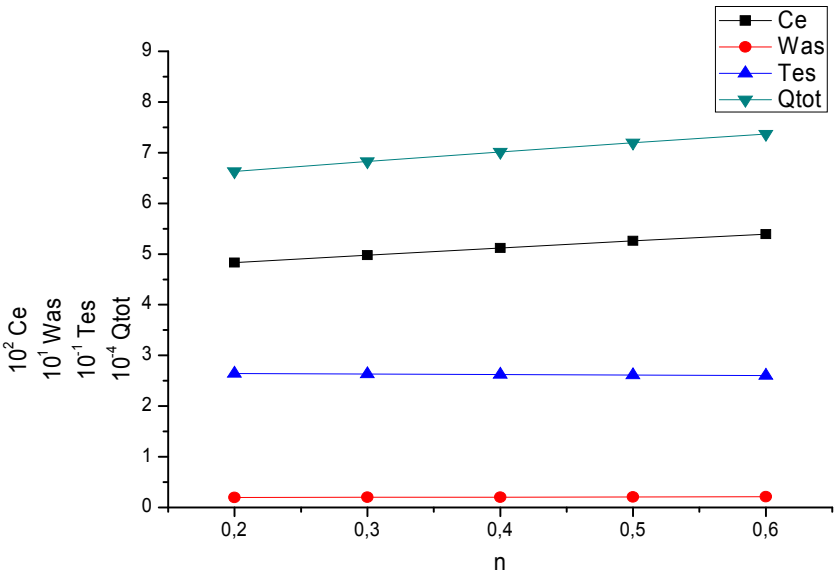


Figure3.17 : Evolutions des Ce, Was, Tes, Qtot en fonction de n

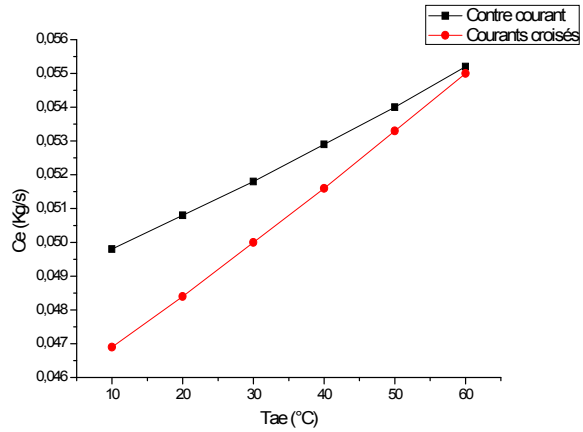


Figure 3.18 : Evolution de Ce en fonction de Tae

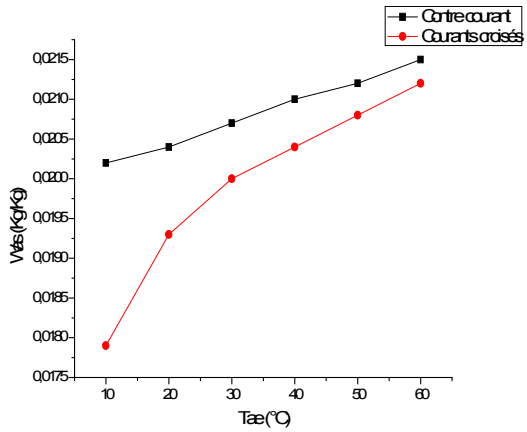


Figure 3.19 : Évolution de Was en fonction deTae

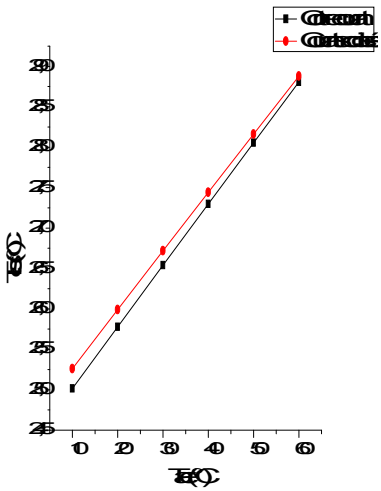


Figure 3.20 Evolution de Tes en fonction deTae

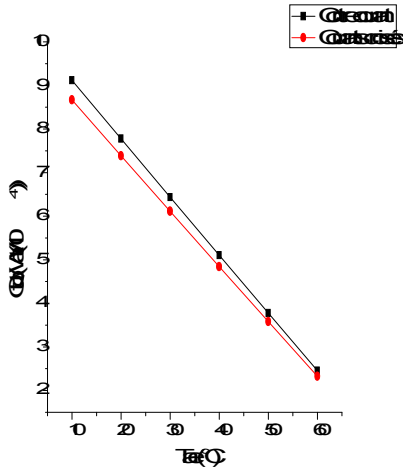


Figure 3.21 : Evolution de Qtot en fonction de Tae

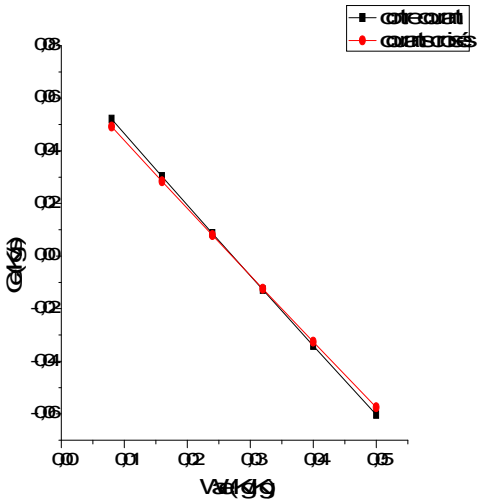


Figure 3.22 : Evolution de Ce en fonction de Wae

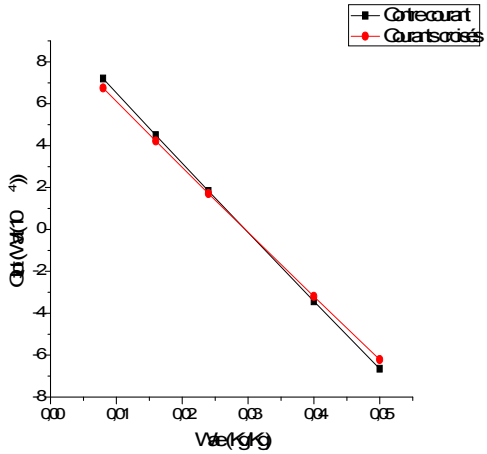


Figure 3.23 : Evolution de Qtot en fonction de Wae

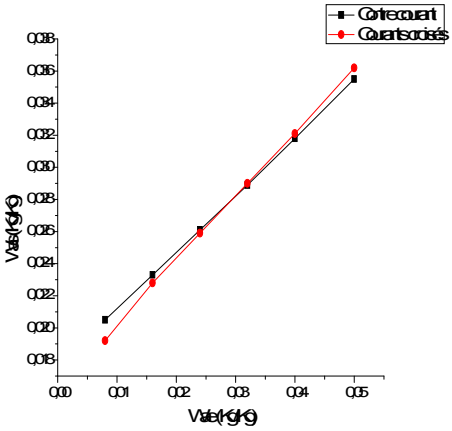


Figure 3.24 : Evolution de Was en fonction de Wae

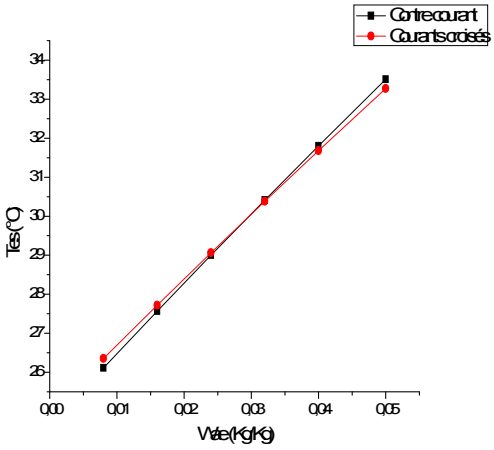


Figure3.25 : Evolution de Tes en fonction de Wae

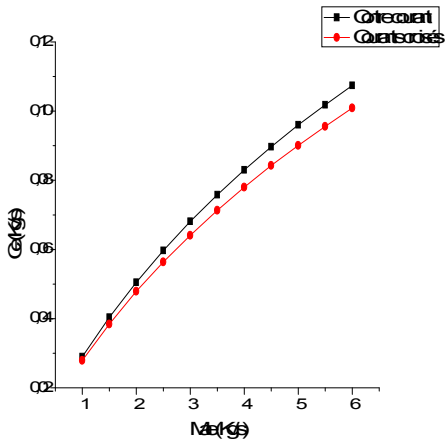


Figure3.26 : Evolution de Ce en fonction de Mae

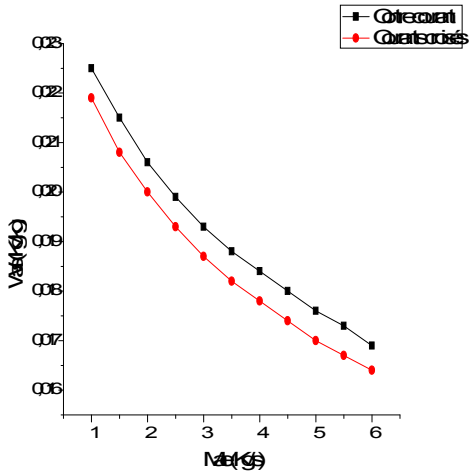


Figure 3.27 : Evolution de Was en fonction de Mae

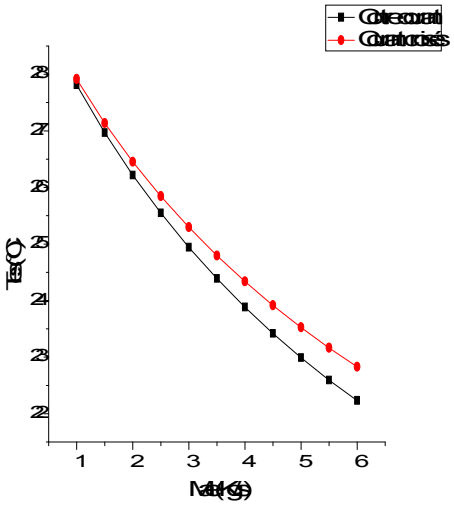


Figure 3.28 : Evolution de Tes en fonction de Mae

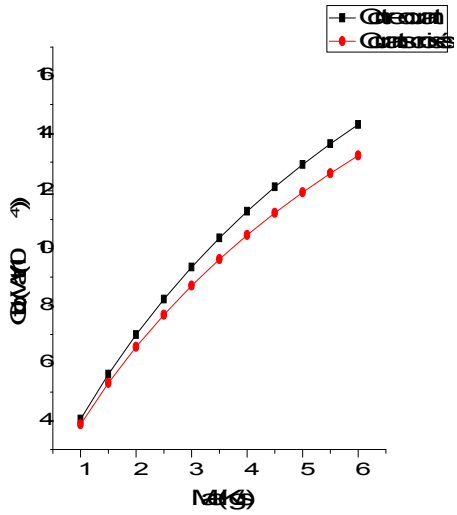


Figure 3.29 : Evolution de Qtot en fonction de Mae

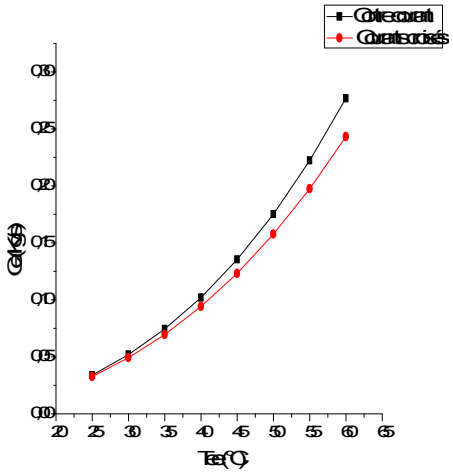


Figure 3.30 : Evolution de Ce en fonction de Tee

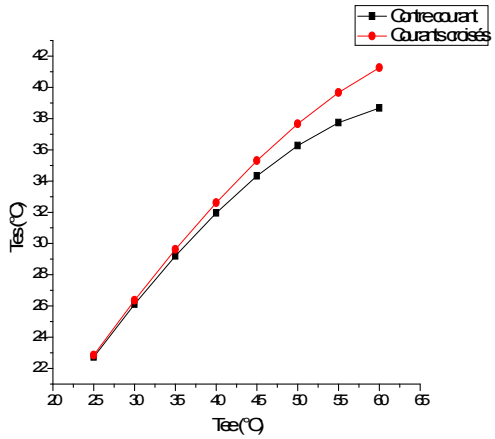


Figure 3.31 : Evolution de Tes en fonction de Tee

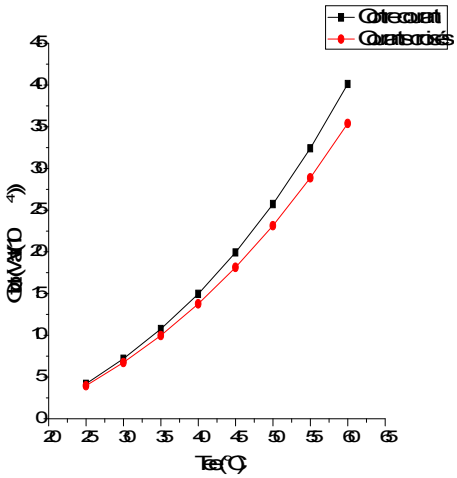


Figure 3 .32 : Evolution de Qtot en fonction de Tee

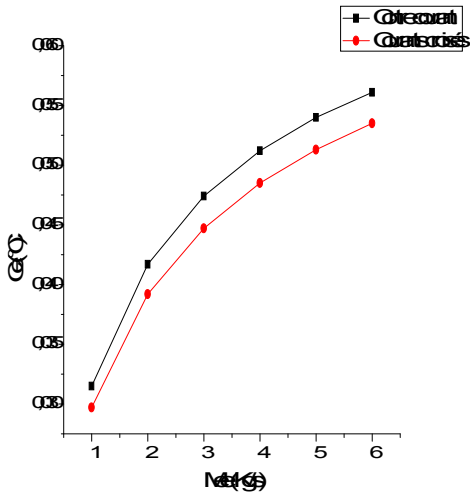


Figure 3.33 : Evolution de Ce en fonction de Mee

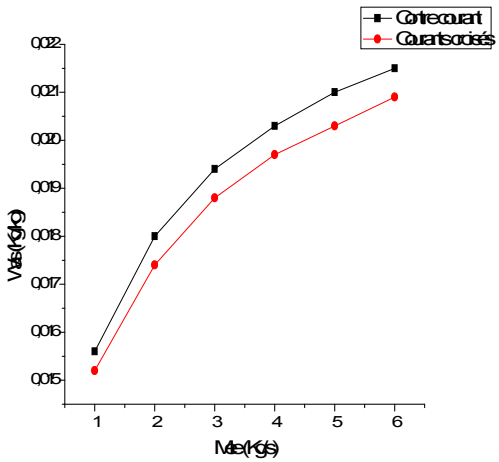


Figure 3.34 : Evolution de Was en fonction de Mee

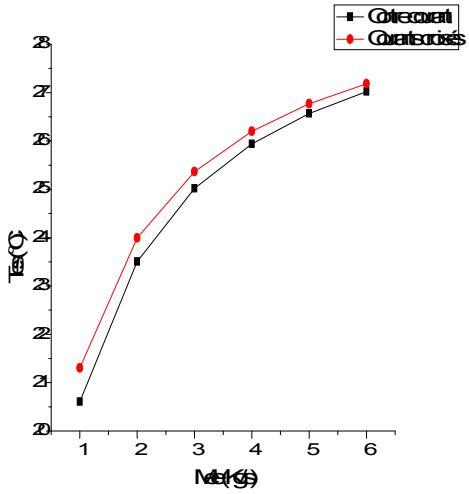


Figure 3.35 : Evolution de Tes en fonction de Mee

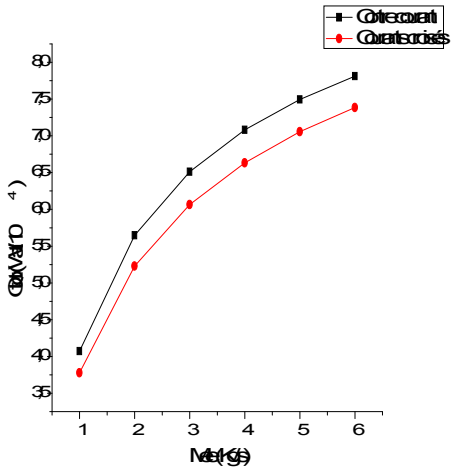


Figure 3.36 : Evolution de Qtot en fonction de Mee

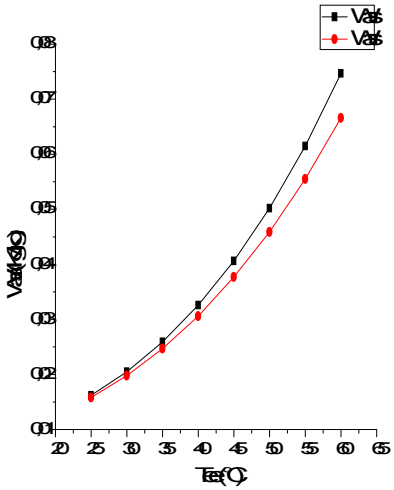


Figure 3.37 : Evolution de Qtot en fonction de Tee

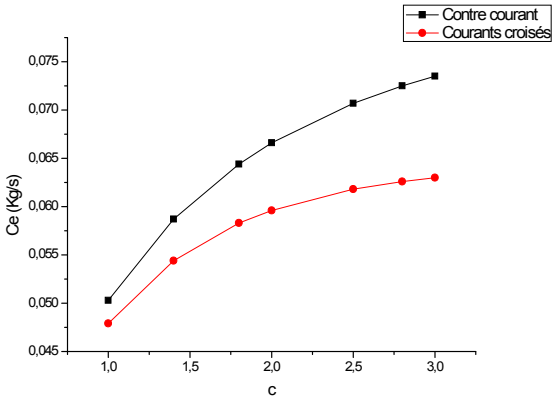


Figure 3.38 : Evolution de Ce en fonction de c

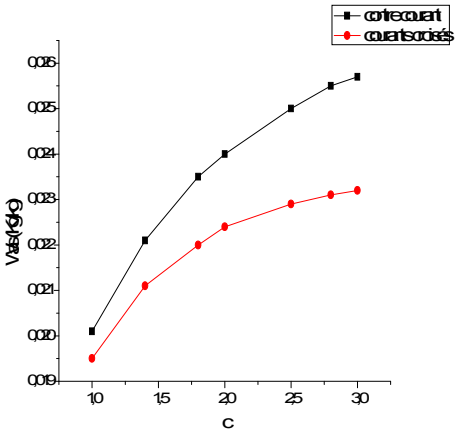


Figure 3.39 : Evolution de Was en fonction de c

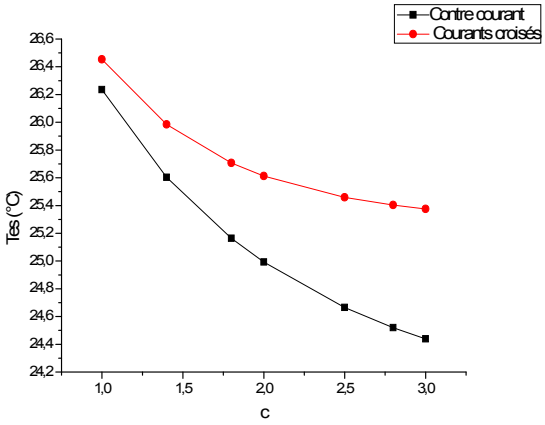


Figure 3.40 : Evolution de Tes en fonction de c

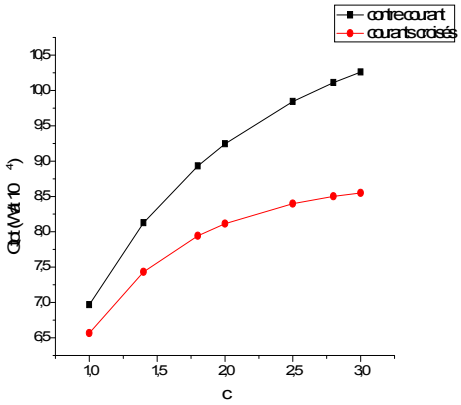


Figure 3.41 : Evolution de Qtot en fonction de c

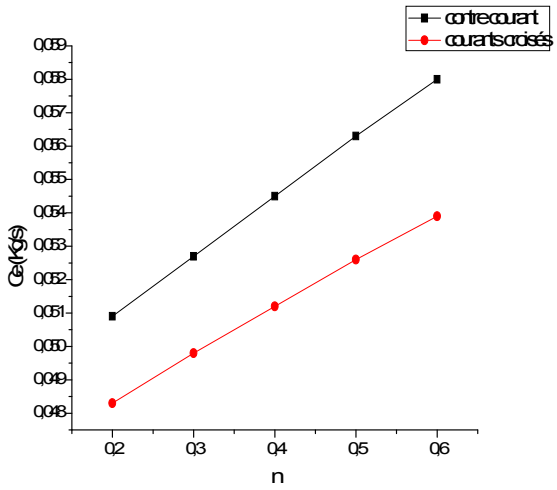


Figure 3.42 : Evolution de Ce en fonction de n

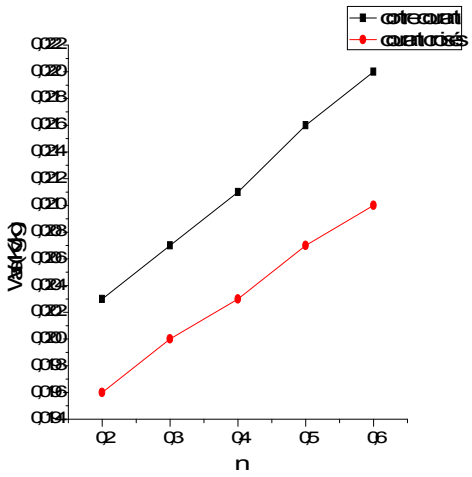


Figure 3. 43 : Evolution de Was en fonction de n

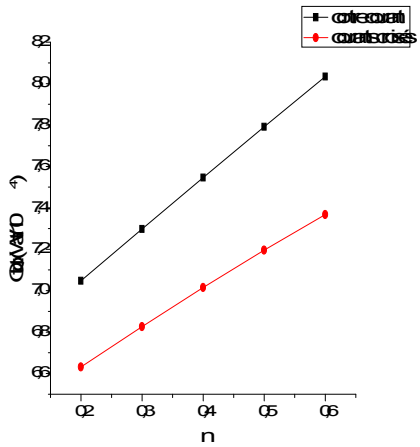


Figure 3.44 : Evolution de Tes en fonction de n

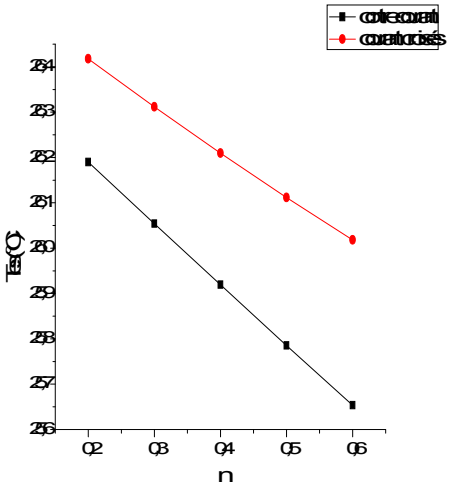


Figure 3.45 : Evolution de Qtot en fonction de n

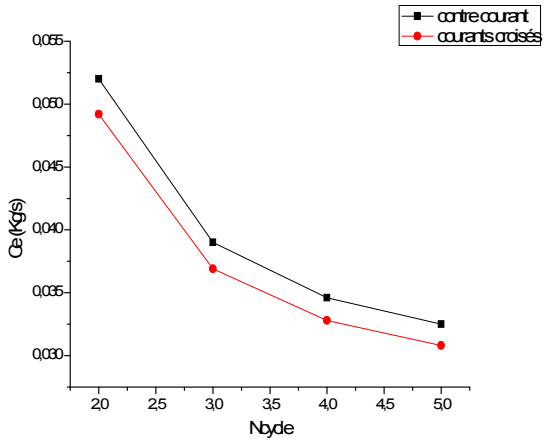


Figure 3.46 : Evolution de Ce en fonction de Ncycle

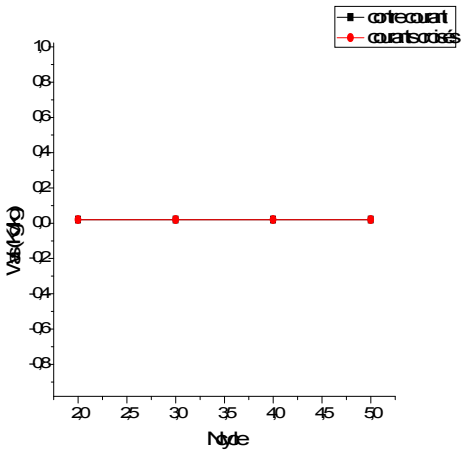


Figure 3.47 : Evolution de Was en fonction de Ncycle

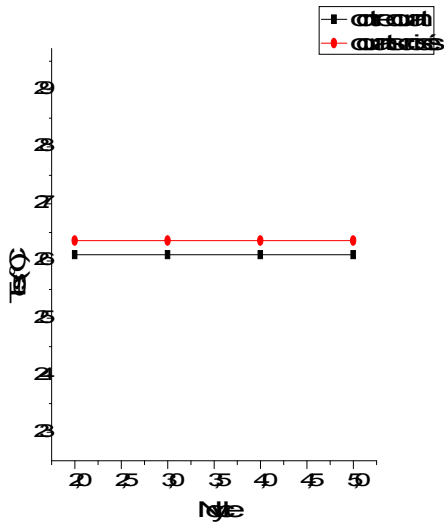


Figure 3.48 : Evolution de Tes on fonction de Ncycle

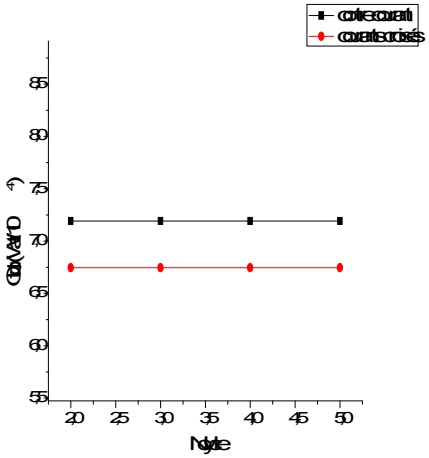


Figure 3.49 : Evalution de Qtot en fonction de Ncycle

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans cette étude consacrée au tour aérorifgérant humide ouvert. Diverses grandeurs sont sensibles au paramètre de fonctionnement. Si, on pour agir justement sur ces variations pour rechercher une tour optimale. On a noté avec les résultats du programme obtenus. Que certains n'ont aucune influence.

Il est évident que cette étude nous permet de cerner correctement le dimensionnement des tours. Aussi, lors d'un choix concret, l'usage des résultats obtenus est d'une nécessite primordiale. En raison des limitations des paramètres de fonctionnement. On dispose donc d'un outil de travail conséquent et d'aide à la décision dans son aspect technique. D'autres facteurs complémentaires seront mis en avant pour un choix définitif.

Ce travail nous a permis de savoir la manière de calculer une tour de refroidissement. Mais aussi de voir les possibilités de choix quant à la concrétisation pour un fonctionnement correct en adaptant certaines grandeurs dépendant des variables de contrôle.

BIBLIOGRAPHIE

Sites internet d'informations consultées :

[1] www.sfen.org/comment fonctionne une centrale nucléaire

[2] www.atomenergie.ch/énergie nucléaire.

[3] www.avn.be/technologie nucléaire.

[4] www.composants des tours de refroidissement.docx.pdf

[5] www.ec.gc.ca/guide des tours de refroidissement.

[6] www.almeco.eu/fr/cooling towers /types de tours de refroidissement.

[7] www. conseils.xpair.com/tour_refroidissement_legionellose/

[8] www.lenntech.com/tour de refroidissement.

[9] wikipedia.org/wiki/Air_humide.fr

[10] www.Dimclim psychromètre-grandeurs hygrométriques (climatisation-Théories).fr

Ouvrages et articles consultés

[11] CEA-EDF, les sources froides des centrales électriques, Paris

[12] D. MARCHIO, P.STABAT, PREP_TAO, TAO tour aéroréfrigérante humide ouverte Ecole des Mines de Paris 2001

[13] Pascal Tobaly, Échangeurs de chaleur 2002