

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE

MASTER

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : ENERGÉTIQUE

PAR :

ALOUI KENZA

HADIBI KARIM

Thème

**Etude d'une installation de séchage et de refroidissement de sucre
3500T CEVITAL-Bejaia-**

Soutenu le 28/06/2018 devant le jury composé de:

Mr. HAMTACHE

Président

Mr. SAHI

Rapporteur

Mr. BENSLIMANE

Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2017-2018

Remerciements

Pour le bon Dieu, de nous avoir donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à remercier en premier lieu nos parents, pour leur soutien inconditionnel tout au long de notre parcours.

Nos remerciements vont aussi à notre promoteur **Mr SAHL. A** pour ces conseils précieux et pour nous avoir constamment aidés.

Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury pour l'intérêt porté à ce thème, et pour avoir accepté de juger et d'évaluer notre travail.

Nous tenons aussi à remercier profondément les enseignants du département de Génie Mécanique pour leurs efforts à nous transmettre le savoir.

Nous sommes très reconnaissants envers les ingénieurs de la raffinerie de sucre du complexe CEVITAL, notre encadreur **Mr CHARFA Toufik** pour sa disponibilité et son aide et aussi **M^r MAHTOUT** et **M^r SAYAD F** pour leur collaboration pendant notre stage pratique.

Enfin ; que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire, trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance.

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Ma très chère aimable et honorable mère, ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études, je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour, puisse dieu te préserver et t'accorde sante et longue vie.

À mon cher père, aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi, ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation ;

À mes adorables frères : Atmane, Mohand, et Bilal.

À ma très cher sœur Lila et son mari Saïd.

À toutes ma familles : oncles, tantes, cousines et cousins.

À Mr Sayad et sa famille pour leur aide.

À mes chers amis (es) Samia, Sabrina, Hayat et Warda.

À mon binôme Karim pour sa patience et son soutien

À mes chers enseignants pour leur disponibilité et pour avoir mis à notre disposition leurs compétences et connaissances scientifique

À mes amis(es) de l'association AAI

À toute la promo **énergétique** 2018

À toute personne ayant contribué de près et de loin à la réalisation de ce travail

Kenza

Dédicace :

Je dédie ce travail à :

*A mes parents, en témoignage de mon profond estime et
dévouement, ce travail est le fruit de vos sacrifices.*

À mes frères et sœurs et à toute la famille.

*À mes chers amis (es) pour l'ambiance amicale et studieuse
qu'ils ont toujours créée, je n'oublier jamais votre soutien.*

À mes enseignants chacun en son nom pour leur disponibilité

À sassah

À ma binôme Kenza

*A toute la promo **énergétique** 2018*

Karim

Nomenclature

Symboles	Définition	Unité
C_p	Capacité thermique massique à pression constante	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
D	Diamètre	m
H	Enthalpie massique	$kJ.kg^{-1}$
H^s	Enthalpie spécifique	$kJ.kg_{as}^{-1}$
Ψ	Humidité relative	%
h	Coefficient d'échange superficiel	$W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$
K	Coefficient de transmission linéique	$W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$
m_e	Masse de l'eau	kg
m_p	Masse totale du produit humide	kg
m_s	Masse de la matière sèche	kg
\dot{m}_{as}	Débit massique de l'air sec	$kg.s^{-1}$
\dot{m}_e	Débit massique de l'eau	$kg.s^{-1}$
$\dot{m}_{e,tam}$	Débit massique de l'eau à extraire du sucre	$kg.s^{-1}$
\dot{m}_{sh}	Débit massique du sucre humide	$kg.s^{-1}$
\dot{m}_{ss}	Débit massique du sucre sèche	$kg.s^{-1}$
\dot{m}_{R134a}	Débit du fluide frigorigène	$kg.s^{-1}$
P	Pression atmosphérique	Pa
P_v	Pression partielle de la vapeur d'eau	Pa
P_{vs}	Pression de la vapeur saturante	Pa
P_n	Emission de chaleur linéique des tubes non calorifugés	$W.m^{-1}$
P_c	Emission de chaleur linéique des tubes calorifugés	$W.m^{-1}$
l_v	Longueur de la tuyauterie horizontale	m
l_{th}	Longueur de la tuyauterie verticale égale	m
D_{te}	Diamètre extérieur du tube	m
RK_i	résistance thermique de la couche i	$\frac{m.^{\circ}C}{W}$
\dot{Q}_{bf}	Puissance nécessaire à la batterie froide	kW

Nomenclature

\dot{Q}_{bc}	La puissance calorifique à apporter à l'air	kW
\dot{Q}_{af}	Puissance absorbée par l'air de refroidissement	kW
Q_c	Puissance calorifique à apporté	kW
Q_f	Puissance de la batterie froide	kW
\dot{Q}'_f	Puissance frigorifique a apporté	kW
Q_u	Puissance utile à l'évaporation de l'eau contenue dans le sucre	kW
Q_k	Puissance du condenseur	kW
W_{ef}	Travail effectifs du compresseur	kJ/kg
\dot{W}_{ef}	Puissance effective du compresseur	kW
q_v	Débit volumique	$m^3 \cdot s^{-1}$
RQ	Réduction en chaleur perdu	%
r^s	Humidité spécifique de l'air	Kg_e / Kg_{as}
S	Section des conduites	m^2
T	Température	K
v	Volume massique	$m^3 \cdot kg^{-1}$
V^s	Volume spécifique de l'air sec	$m^3 \cdot Kg_{as}^{-1}$
w	Vitesse de circulation du fluide	$m \cdot s^{-1}$
x	Teneur en eau du sucre	kg_e / kg_{as}
U	Vitesse de fluidisation	m/s

Symboles grecs		
η_{is}	%	Rendement isentropique
η_{ef}	%	Rendement effectif
τ		Taux de compression
θ	°C	Température
Indices		
a, s	Air sec	
a, h	Air humide	
ch	Calorifuges horizontaux	
cv	Calorifuges verticaux	
e, tam	Entrée de tambour	
s, tam	Sortie du tambour	
nv	Non calorifugés verticaux	
nh	Non calorifugés horizontaux	

Nomenclature

<i>sh</i>	Sucre humide
<i>ss</i>	Sucre sèche
e, lit	Entrée de lit fluidisé
s, lit	Sortie de lit fluidisé
1	entrée
2	Sortie

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Remerciement

Dédicaces

Nomenclature

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction

générale : 1

CHAPITRE I : Généralité sur la raffinerie du sucre CEVITAL

I.1	Introduction :.....	3
I.2	Présentation générale de Cevital :.....	3
I.3	Unités de production :.....	3
I.4	Processus de raffinage du sucre.....	4
I.4.1.	Section 1 : affinage et fonte :.....	4
I.4.2.	Section 2 : carbonatation :.....	4
I.4.3.	Section 3 : filtration :.....	4
I.4.4.	Section 4 : Décoloration :.....	4
I.4.5.	Section 5 : Concentration :.....	5
I.4.6.	Section 6 : Cristallisation haut produit :.....	5
I.4.7.	Section 7 : Séchage :.....	5
I.4.8.	Section 8 : Cristallisation bas produit :.....	5
I.4.9.	Section 9 : Utilité :.....	6
I.3.10.	Section 10 : Maturation et conditionnement :.....	6
I.5	Description de fonctionnement de l'installation :.....	7
I.5.1	Composants de l'installation de séchage et de refroidissement de sucre blanc :	7
I.5.2	Le chemin du sucre :.....	9
I.5.3	Le chemin de l'air.....	11
I.5.4	Dépoussiérage de l'air de rejet et le système d'aspiration.....	13
I.5.5	Production de l'eau froide :.....	14
I.5.6	Circuit de l'eau de refroidissement :.....	14
I.6	Position de problème :.....	15

SOMMAIRE

I.7	Conclusion :.....	15
CHAPITRE II Généralité sur le séchage traitement d'air et le froid industriel		
II.1	Introduction :.....	16
II.2	Généralité sur le séchage :.....	16
II.2.1	Définition du séchage :.....	16
II.2.2	But de séchage :.....	16
II.2.3	Type de séchage :.....	17
II.2.3.1	Séchage mécanique :.....	17
II.2.3.2	Séchage chimique :.....	17
II.2.3.3	Séchage thermique :.....	17
II.2.3.3.1	Séchage par convection :.....	17
II.2.3.3.2	Séchage par conduction :.....	18
II.2.3.3.3	Séchage par rayonnement :.....	18
II.2.4	Mode de séchage thermique :.....	18
II.2.4.1	Séchage par ébullition :.....	18
II.2.4.2	Séchage par entrainement :.....	18
II.2.5	Domaines d'utilisation :.....	19
II.2.6	Classification des sécheurs :.....	19
II.2.6.1	Sécheurs compatibles avec les produits humides à l'état solide.....	20
II.2.6.1.1	Sécheur tunnel à tapis :.....	20
II.2.6.1.2	Sécheur à tambour :.....	20
II.2.6.1.3	Sécheur à lit fluidisé :.....	21
II.2.6.1.4	Sécheur pneumatique :.....	22
II.2.6.1.5	Sécheur à disques ou à vis.....	22
II.2.6.2	Sécheurs compatibles avec les produits humides à l'état liquide.....	23
II.2.6.2.1	Sécheur cylindre :.....	23
II.2.6.2.2	Sécheur à pulvérisation :.....	24
II.2.6.3	Sécheurs développés pour les produits humides à l'état pâteux.....	24
II.2.6.3.1	Sécheur à palettes :.....	24
II.2.6.3.2	Sécheur à couche mince :.....	25
II.2.6.3.3	Sécheur pneumatique compact :.....	25
II.2.5	Choix de procédé de séchage :.....	26

SOMMAIRE

II.3	Généralités sur l'air humide :	26
II.3.1	Propriétés et grandeurs de l'air humide :	27
II.3.1.1	Loi des gaz parfaits :	27
II.3.1.2	Loi de Dalton :	27
II.3.1.3	Masse et pression de l'air humide	27
II.3.1.4	Température de l'air humide :	28
II.3.2	Humidité relative et Humidité spécifique :	28
II.3.2.1	Humidité relative φ :	28
II.3.2.2	Humidité spécifique r^s :	29
II.3.3	Enthalpie massique et spécifique	29
II.3.3.1	Enthalpie massique de l'air sec a la température θ :	29
II.3.3.2	Enthalpie massique de la vapeur d'eau a la température θ :	29
II.3.3.3	Enthalpie de l'air humide a la température θ :	29
II.3.3.4	Enthalpie spécifique de l'air humide a la température θ :	30
II.3.4	Volume spécifique :	30
II.3.5	Diagramme de l'air humide :	30
II.3.5.1	But de diagramme de l'air humide :	31
II.3.5.2	Diagramme de CARRIER :	31
II.3.5.3	Diagramme de MOLIÈRE :	32
II.3.6	Conditionnement de l'air :	32
II.3.6.1	Centrale de traitement d'air :	33
II.4	Généralités sur le froid :	35
II.4.1	Machine frigorifique a compression mécanique :	35
II.4.2	Éléments et principe de fonctionnement :	35
II.4.3	Cycle frigorifique :	36
II.4.3.1	Cycle idéal de Carnot :	37
II.4.3.2	Cycle frigorifique de référence:	37
II.4.3.2.1	Principaux points du cycle :	37
II.4.4	Critères thermodynamiques :	38
II.5	Conclusion :	38
CHAPITRE III : Etude de l'installation de séchage		
III.1	Introduction :	39
III.2	Procès de calcul :	39

SOMMAIRE

III.3	Hypothèses de calculs :	41
III.4	Caractéristiques de sucre :	41
III.4.1	Teneur en eau du sucre :	41
III.4.2	Flux d'enthalpie de sucre :	42
III.5	Dimensionnement de l'installation :	42
III.5.1	Séchage de sucre :	43
III.5.1.1	Calcul du débit de sucre humide :	43
III.5.1.2	Débit de l'eau à extraire de sucre :	44
III.5.1.3	Enthalpie du sucre :	45
III.5.1.4	Puissance nécessaire pour évaporer l'eau (puissance utile) :	45
III.5.2	Caractéristique de l'air :	46
III.5.2.1	Air de séchage :	46
III.5.2.1.1	Batterie chaude :	46
III.5.2.1.1.1	Bilans massiques :	47
III.5.2.1.1.1	Puissance calorifique a la batterie chaude :	47
III.5.2.1.2	Air dans le tambour :	48
III.5.2.1.2.1	Bilans massiques:	48
III.5.2.1.2.2	Calcul de la puissance de chauffage :	49
III.5.2.2	Air de refroidissement :	50
III.5.2.2.1	Opération de refroidissement de l'air humide avec déshumidification :	50
III.5.2.2.1.1	bilans massique :	51
III.5.2.2.1.2	Puissance calorifique à la batterie froide :	51
III.5.2.2.2	Echauffement de l'air avec une batterie chaude :	52
III.5.2.2.2.1	Bilans massiques :	53
III.5.2.2.2.2	Puissance calorifique a la batterie chaude :	53
III.5.2.2.3	Air à lit fluidisé :	53
III.5.2.2.3.1	Bilans de l'air de refroidissement :	54
III.5.2.2.3.2	Puissance absorbée par l'air de refroidissement :	55
III.5.3	Etude de l'installation frigorifique :	55
III.5.3.1	Cycle frigorifique :	56
III.5.3.2	Performances thermodynamique de groupe frigorifique :	57
III.5.3.2.1	Calculer la puissance totale de groupe frigorifique :	57
III.5.3.2.2	Calcul de débit de fluide frigorigène :	58

SOMMAIRE

III.5.3.2.3	Etude de compresseur	58
III.5.3.2.4	Etude des canalisations	60
III.5.3.2.5	Calcul du coefficient de performance	61
III.5.4	Déperdition et apport thermique de l'installation.....	61
III.5.4.1	Cas des tubes nus :.....	61
III.5.4.2	Cas des tubes isolés	61
III.5.4.3	Calcul des déperditions thermiques des conduites d'alimentation :.....	62
III.5.4.3.1	Conduite principale.....	62
III.5.4.3.2	Conduite secondaire.....	62
III.5.4.4	Apport thermique des conduites d'alimentation.....	63
III.5.4.4.1	Conduite aéraulique	63
III.5.4.4.2	Conduite hydraulique.....	64
III.5.4.5	Déperdition thermique du sécheur à tambour.....	66
III.5.4.5.1	Puissance frigorifique consommée au niveau de l'installation :.....	66
III.5.4.5.2	Puissance de chaleur consommée au niveau de l'installation :.....	66
III.5.4.5.3	Pertes par les parois du séchoir.....	66
III.5.4.5.4	Consommation thermique totale.....	67
III.5.5	Calcul de la consommation énergétique massique :	67
III.6	Tableau récapitulatif.....	67
III.7	Conclusion :.....	68
	Conclusion générale	69

Liste des Figure et Tableaux

Liste des Figure

Figure I.1	Processus de raffinage de sucre.....	6
Figure I.2	Chemin du sucre pendant le séchage du sucre.....	10
Figure I.3	Chemin du sucre pendant le refroidissement du sucre.....	11
Figure I.4	Conditionnement de l'air de refroidissement et de l'air de séchage.....	12
Figure I.5	Production de l'eau froide.....	14
Figure II.1	Sécheur tunnel à tapis	20
Figure II.2	Sécheur à tambour	21
Figure II.3	Sécheur à lit fluidisé.....	21
Figure II.4	Sécheur pneumatique	22
Figure II.5	Sécheur pneumatique	23
Figure II.6	Sécheur cylindre.....	24
Figure II.7	Configuration géométrique d'un sécheur pulvérisation.....	24
Figure II.8	Sécheur à palettes Naratherm.....	25
Figure II.9	Sécheur à couche mince	25
Figure II.10	Sécheur pneumatique compact	26
Figure II.11	Diagramme Carrier.....	31
Figure II.12	Diagramme de MOLLIER.....	32
Figure II.13	Batterie chaude alimentée en eau.....	34
Figure II.14	Batterie froide alimenté en eau.....	34
Figure II.15	Représentation d'un ventilateur centrifuge.....	35
Figure II.16	Schéma d'un simple système frigorifique à compression.....	37
Figure II.17	Exemple d'un cycle de Carnot : représentation P-h et T-s.....	37
Figure II.18	Cycle frigorifique de référence.....	38
Figure III.1	Principe de séchage du sucre.....	44
Figure III.2	Refroidissement de l'air avec déshumidification.....	51
Figure III.3	Echauffement de l'air à humidité spécifique constante.....	53

Liste des tableaux

Tableau III.1	Caractéristique de sucre.....	43
Tableau III.2	Caractéristique de sucre.....	43
Tableau III.3	Principaux point de cycle.....	57
Tableau III.4	Emission de chaleur des canalisations.....	59

Introduction générale

Introduction générale :

Le séchage est une étape d'une importance capitale dans des divers domaines, surtout dans l'industrie agro-alimentaire. Elle sert à éliminer l'humidité présente dans un corps humide d'une façon partielle ou complète selon nos besoins, et pour cela beaucoup de technologie existent et le choix se fait par rapport au produit à sécher.

La compréhension des différents phénomènes mis en jeu lors du séchage de sucre nous mène principalement à étudier le sécheur en question qui peut faire objet de calcul théorique en utilisant des applications et des équations régissant dans chaque domaine qui rentre en jeu lors de séchage telle que le conditionnement d'air et la production de froid.

Durant le calcul du sécheur de sucre, nous établirons des bilans de matière basés sur la conservation de la matière sèche, et des bilans thermiques qui vont nous permettre de calculer les grandeurs les plus caractéristiques de cette opération.

Le conditionnement d'air joue le principal rôle dans le séchage, les différents diagrammes et règles existantes dans le domaine nous permettent de comprendre le traitement que subisse l'air pour le préparer pour répondre à certaines exigences très précises lors du séchage du sucre.

L'industrie agro-alimentaire est le secteur industriel où la plus grande utilisation de froid est constatée, l'étude des systèmes de production de froid est basée sur l'utilisation des cycles frigorifique à compression et à changement de phase de fluide frigorigène

Notre travail consiste à étudier les différents éléments de l'installation de séchage et de refroidissement du sucre de CEVITAL pour une production de 3500 T/h, et pour atteindre ces objectifs on a consacré trois chapitres répartis comme suit:

Le premier chapitre est sous forme d'une présentation de l'entreprise de CEVITAL, et la description de l'installation de séchage de sucre et le chemin parcouru le sucre durant son séchage et l'air de séchage.

Le deuxième chapitre se compose de trois parties, la première représente des généralités sur séchage et ces diverses technologies, puis la deuxième partie sur les caractéristiques de traitement d'air, et la dernière partie sur les généralités du froid industriel.

Le troisième chapitre est consacré à la détermination des paramètres qui règnent dans l'installation de séchage et de refroidissement : les caractéristiques de l'air de séchage et de refroidissement, les caractéristiques de sucre avant et après le séchage, les puissances

Introduction générale

thermiques et énergétiques, les déperditions observées dans notre installation et la cinétique de séchage.

Au final, nous clôturons notre travail par une conclusion générale où on précise l'intérêt de notre étude et on présente des perspectives pour l'installation.

Chapitre I :

Généralité sur la raffinerie du sucre

CEVITAL

I.1 Introduction :

Ce chapitre est dans le but de présenter le complexe CeVital et ces différents unités de production, par la suite nous passerons a la présentation des différentes phases de la raffinerie du sucre; et finalement nous allons parler sur la description de l'installation de séchage de la raffinerie du sucre 3500T/J (la section 7).

I.2 Présentation générale de Cevital :

CeVital est un groupe familial de plusieurs sociétés, crée par des fonds privés en 1998, implanté eau sein du port de Bejaia (Algérie), CeVital est composée de plusieurs unités de production telles que : raffinerie d'huile, raffinerie de sucre, margarinerie, unité de conditionnement d'eau minérale, unité de fabrication et de conditionnement Son complexe de production s'étend sur une surface de 131758m² dont la superficie est de 78386.19m² Grace à cet emplacement stratégique, le complexe occupe une place important dans l'économie locale et nationale.

CeVital offre des produits de qualité supérieure à des prix compétitifs, grâce à son savoir faire, ses unités de production ultramodernes, son contrôle strict de qualité et son réseau de distribution. Elle couvre les besoins nationaux et a permis de faire passer l'Algérie du stade d'importateur à celui d'exportateur pour les huiles, les margarines et le sucre de boisson rafraichissante ; Ses produits se vendent aujourd'hui dans plusieurs pays, notamment en Europe, au Maghreb, au Moyen Orient et en Afrique de l'Ouest.[1]

I.3 Unités de production :

CeVital est la troisième plus grande entreprise algérienne après Sonatrach et Naftal.

Ce dernier est présent dans plusieurs secteurs, il se spécialise dans l'industrie agroalimentaire.

Il comporte aujourd'hui plusieurs unités de production dont : [1]

- La raffinerie d'huile, avec une capacité de production de 1800tonnes/jour.
- La margarinerie et graisse végétales, avec une production de 1600tonnes/jour.
- Deux raffineries du sucre, avec une capacité de production 500tonnes/jour :
 - ❖ Une raffinerie de sucre d'une capacité de production de 3000tonnes/jour.
 - ❖ Une raffinerie de sucre d'une capacité de production de 2000tonnes/jour.
- Et une unité de production du sucre liquide, avec une capacité de production de6000tonnes/jour.

I.4 Processus de raffinage du sucre

Le sucre est un produit alimentaire, il est produit industriellement de la canne à sucre, cette dernière est cultivé dans les régions tropicales et subtropicales. La canne à sucre contient jusqu'à 16 % de saccharose dans ses tiges, dont jusqu'à 96 % peut être extrait lors d'un processus industriel. [2]

La raffinerie de sucre est composée de plusieurs ateliers appelés sections ou le sucre roux de canne subi des traitements et des transformations qui vont l'épurer afin de fabriquer du sucre blanc [3]

I.4.1. Section 1 : affinage et refonte :

L'affinage consiste à enlever les couches d'impuretés présentes à la surface des cristaux du sucre brut. Après pesage le sucre roux est mélangé avec une quantité (d'eau au démarrage) de liqueur d'affinage saturé en sucre puis malaxé pour permettre la diffusion des impuretés superficielles sans provoquer la refonte des cristaux. La séparation du sucre et de l'égout d'affinage se fait par centrifugation dans uneessoreuse discontinue.

Le sucre affiné obtenu est ensuite refondu à l'eau dans un refondu de façon à obtenir un sirop. L'égout contenant les impuretés est traité dans le process pour extraire le sucre résiduel.

I.4.2. Section 2 : carbonatation :

La carbonatation est une multitude de réactions chimiques qui permet la décoloration du sirop à la refonte. Il sera traité par une solution de chaux (lait de chaux), le mélange (sirop de refonte/lait de chaux) barbotera avec du gaz carbonique qui insolubilise la chaux en carbonate de calcium, afin de piéger les impuretés présentes dans le sucre.

I.4.3. Section 3 : filtration :

Le sirop issu de la carbonatation contient une suspension de carbonate de calcium. Cette dernière est séparée par une filtration sur des filtres autonettoyants à bougies en étoile, le sirop filtré et envoyé vers la décoloration, la boue résultante passera par un filtre presse pour récupérer le sucre résiduel, sous forme de petit jus. Les boues (ou écumes) sont évacuées et utilisées pour l'amendement du sol (engrais).

I.4.4. Section 4 : Décoloration :

La décoloration par l'intermédiaire d'une résine échangeuse d'ions décolorante, cette étape pousse la décoloration du sucre au maximum. C'est une technologie récente au raffinage.

Les résines échangeuses d'ions sont régénérées après saturation par le passage de saumure. Une station de Nato-filtration est utilisée ensuite pour épurer au maximum les rejets

de la régénération (pigments) et permettre le recyclage de la saumure, permet d'enlever les pigments colorants résiduels.

I.4.5. Section 5 : Concentration :

Cette opération consiste à ramener la concentration du sirop décoloré à un Brix de 70 %, par l'évaporation d'une certaine quantité d'eau introduite par l'opération précédente. Cette opération facilitera la cristallisation du sucre. Elle est la partie la plus délicate du process de fabrication.

I.4.6. Section 6 : Cristallisation haut produit :

La Cristallisation est une opération qui a une forte incidence sur l'ensemble de l'équilibre énergétique de l'usine. Le sirop est concentré dans des bacs spéciaux appelés cuites. Elle est réalisée en faisant l'opération de grainage en introduisant une semence de telle sorte que les particules du sirop se fixent autour, quand les cristaux atteignent la taille voulue et que les cuites arrivent à leur volume maximal, le produit est déchargé dans un malaxeur qui sera ensuite centrifugé par desessoreuses séparant les cristaux et le sirop.

I.4.7. Section 7 : Séchage :

Depuis l'atelier des centrifugeuses le sucre humide est acheminé vers le sécheur/refroidisseur à tambour pour éliminer son humidité et le refroidir.

Dans la partie avant du sécheur à tambour, le sucre est séché à contre-courant avec l'air de séchage. L'intérieur du tambour est garni de pelles permettant de remonter le sucre et de le laisser tomber en pluie sur toute la section du tambour au cours de sa rotation. Le sucre sèche en contact intense avec l'air de séchage.

La partie arrière du tambour est principalement destinée au refroidissement du sucre séché par l'introduction d'air froid à l'extrémité finale du tambour.

I.4.8. Section 8 : Cristallisation bas produit :

C'est une étape de récupération de sucre contenu encore dans les égouts provenant des cuites haute pureté, elle se fait en trois étapes :

Lors de l'affinage, la séparation du sucre et la liqueur d'affinage nous donne un sirop appelé égout d'affinage composé d'un égout riche, réutilisé comme liqueur d'affinage, et d'un égout pauvre, envoyé vers cette section pour son épuisement en sucre.

L'étape A nous donne un sucre pouvant être réutilisé comme sucre roux.

L'étape B et C ne sont que des moyens d'épuisement supplémentaires. L'égout final obtenu après l'étape C contient une quantité de non sucre équivalente à la quantité de sucre non cristallisable appelée mëlasse, et commercialisée pour diverses utilisations telles que :

- La production d'alcool.
- La fabrication de levure boulangère.
- L'introduction dans l'alimentation du bétail.

I.4.9. Section 9 : Utilité :

Elle comporte tous les besoins en vapeur, gaz carbonique, et réseau du vide de la raffinerie, d'où aussi son appellation « Utilité » Elle est constitué de :

- ✚ un poste de livraison d'électricité haute tension (60 KV) alimenté par SONALGAZ et de transformateurs en moyenne tension (30 KV) pour distribution vers les différentes sous stations de transformation.
- ✚ Une sous station pour la raffinerie de sucre, de transformation 30 KV/400V équipée de trois transformateurs
- ✚ Différents équipements nécessaire au fonctionnement de la raffinerie.
- ✚ Une station de production d'air comprimé.

I.3.10. Section 10 : maturation et conditionnement :

Après séchage, le sucre est tamisé, classé et pesé puis dirigé vers les ateliers de conditionnement ou il peut être directement ensaché ou conservé en vrac.

Le sucre acheminé vers les silos pour y être stocké durant 48 heures, ou l'air conditionné élimine l'humidité résiduelle et assure sa maturité, il est ensuite conditionné.

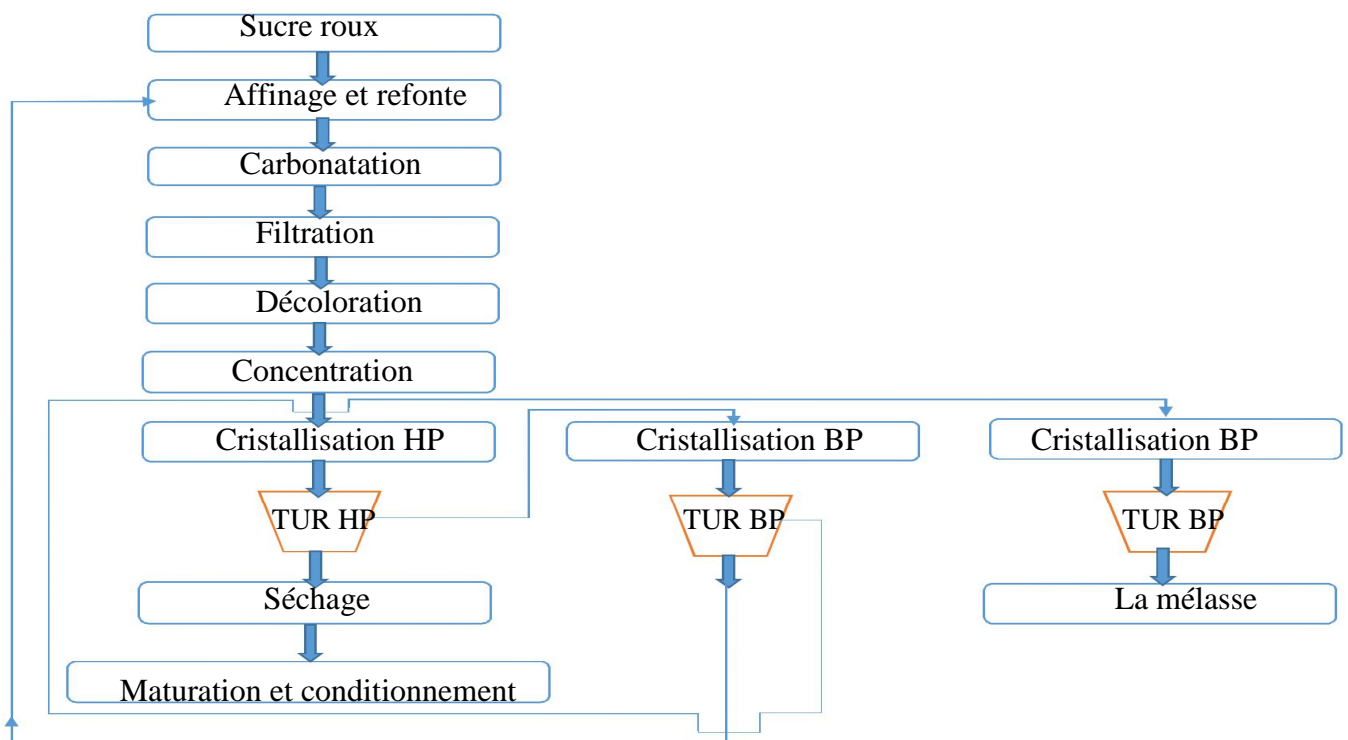


Figure I.1 Processus de raffinage de sucre

I.5 Description de fonctionnement de l'installation :

A la fin de l'opération de centrifugation le sucre humide et chaud est acheminé vers le sécheur/refroidisseur à tambour, pour le sécher et le refroidir. La raffinerie de sucre CEVITAL utilise des installations de séchage et de refroidissement qui est dimensionné par la société (BMA), elles comprennent essentiellement les éléments suivants (Annexe A) [4] :

- Un sécheur a tambour (4*13m) qui assure le séchage des cristaux du sucre.
- Un refroidisseur à lit fluidisé (fcp14/7/7) qui assure le refroidissement de sucre.
- Un groupe frigorifique (York) qui sert a refroidir l'eau utilisée dans le refroidisseur a lit fluidisé et pour le traitement de l'air de refroidissement.
- Un système de traitement de l'air.

I.5.1 Composants de l'installation de séchage et de refroidissement de sucre blanc :

L'installation de séchage et de refroidissement de sucre blanc comprend les composants suivants:

Position	Description	Agent
H 01	Transporteur à vis	Sucre
H 02	Transporteur à vis	Sucre
T 03	Sécheur à tambour	Sucre
H 04	Transporteur à vis	Sucre
X 05	Ecluse à roue cellulaire	Sucre
H 06	Elévateur à godets	Sucre
F 07	Machine tamisant	Sucre
X 08	Ecluse à roue cellulaire	Sucre
T09	Refroidisseur à lit fluidisé	Sucre
X 10	Ecluse à roue cellulaire	Sucre
F 11.1	Jalousie contre les intempéries	Air
F 11.2	Jalousie contre les intempéries	Air
F 11.3	Jalousie contre les intempéries	Air
P.12	Pompe centrifuge	Eau froide
W12	Echangeur thermique	Air
X 12	Soupape à trois voies	Eau froide

Position	Description	Agent
W13	Echangeur thermique	Air
F 14	Filtre à air	Air
V15.1	Ventilateur radial	Air
X 15.1	Vanne papillon	Air
V15.2	Ventilateur axial	Air
F 16	Laveur humide	Air
V.17	Ventilateur radial	Air
X 17.1	Vanne papillon	Air
X 17.2	Vanne papillon	Air
X 17.3	Vanne papillon	Air
X 17.4	Vanne papillon	Air
X 18	Amortisseur de bruit	Air
B 19.1	Récepteur tampon	Eau de refroidissement
P 19.1	Pompe centrifuge	Eau froide
X 19.1	Soupape à trois voies	Eau froide
P 19.2	Pompe centrifuge	Eau de refroidissement
X 21	Canaux de liaison	Air
W22	Echangeur thermique	Eau de refroidissement
V 23	Ventilateur axial	Air
X 24	Canaux de liaison	Air
X 24.1	Cheminée antidéflagrante	Air
X 24.2	Cheminée antidéflagrante	Air
W 25.1	Machine frigorifique refroidie à air	Eau de refroidissement
W25.2	Machine frigorifique refroidie à air	Eau de refroidissement
H 40	Elévateur à godets	Sucre
H 41	Transporteur à bande	Sucre
H 42	Transporteur à vis	Sucre
H 43	Bac	Sucre dissout
H 44	Bac	Condensats
H 45	Soupape à trois voies	Condensats

Le schéma de tuyautage et d'instrumentation P & I de l'installation de séchage et de refroidissement est représenté dans L'annexe(B).

I.5.2 Chemin du sucre :

Le sucre humide venant de la station de centrifugeuses est amené à la vis d'alimentation en sucre humide H01 en passant par les chemins de transport.

Le transporteur à vis H01 transporte le sucre humide à l'entrée de la vis d'alimentation H02 qui assure le transport du sucre humide dans la zone d'entrée du sécheur tambour T03. Afin d'homogénéiser l'alimentation en sucre humide, le transporteur à vis H02 est partiellement équipé de rubans hélicoïdaux.

Au-dessous de la zone d'entrée de la vis d'alimentation en sucre humide H02 se trouvent un clapet d'évacuation automatique ainsi qu'un clapet d'évacuation à ouvrir manuellement.

Ces clapets servent à l'extraction et à l'inspection du transporteur à vis et à l'évacuation du produit de mauvaise qualité.

Dans le sécheur à tambour T03, le sucre est séché en contre-courant par rapport à l'air de séchage. Pendant la rotation du tambour, les pales de levage installées à l'intérieur du sécheur à tambour transportent le sucre vers le haut, assurant qu'il tombe en pluie formant un rideau sur toute la section transversale du tambour.

Le sucre est séché grâce au contact intensif avec l'air de séchage. A l'extrémité du tambour, dans le caisson de décharge de sucre, le sucre séché tombe dans la vis de sucre sec H04 pour être amené, en passant par l'écluse à roue cellulaire X05, à la décharge de sucre.

Le sucre séché et à refroidir arrive à l'élévateur à godets H06. Les grugeons sont séparés dans la machine tamisante H07 monté en aval. L'écluse à roue cellulaire X09 conduit le sucre chaud au refroidisseur à lit fluidisé.

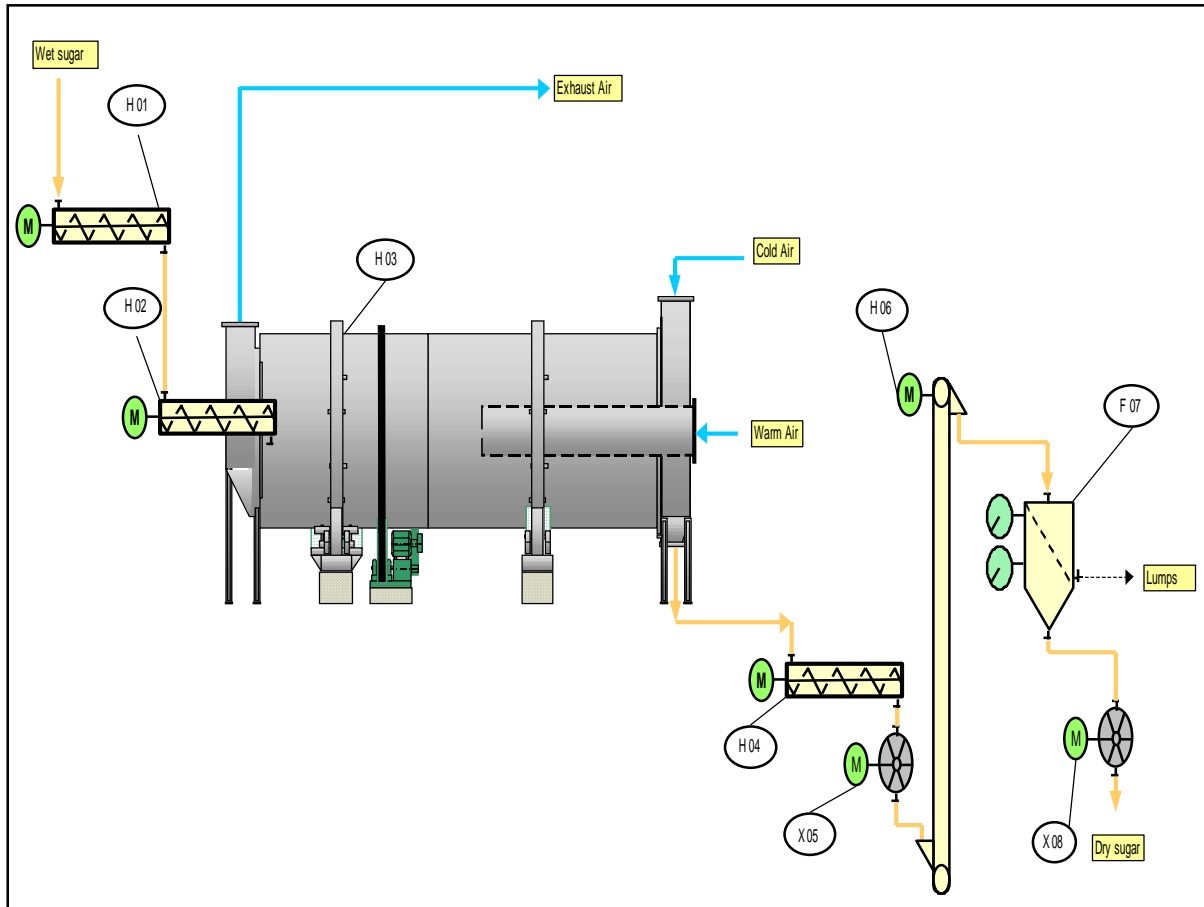


Figure I.2 Le chemin du sucre pendant le séchage du sucre

Dans le refroidisseur à lit fluidisé le sucre est fluidisé par l'air de refroidissement et passe à travers les zones de refroidissement. Le refroidissement du sucre se fait à air ainsi que par les paquets de tubes intégrés et fonctionnant avec de l'eau de refroidissement. Le débit du sucre fluidisé est déterminé en fonction de la pression différentielle de la couche de sucre.

La durée de séjour du sucre à refroidir résulte du débit de sucre et de la hauteur du lit fluidisé. A l'extrémité de la dernière zone de refroidissement, en passant par l'écluse à roue cellulaire X10 disposée à la sortie, le sucre refroidi est extrait du refroidisseur. L'élévateur à godets H40 et le transporteur à bande H41 transportent le sucre séché et refroidi vers son lieu de destination.

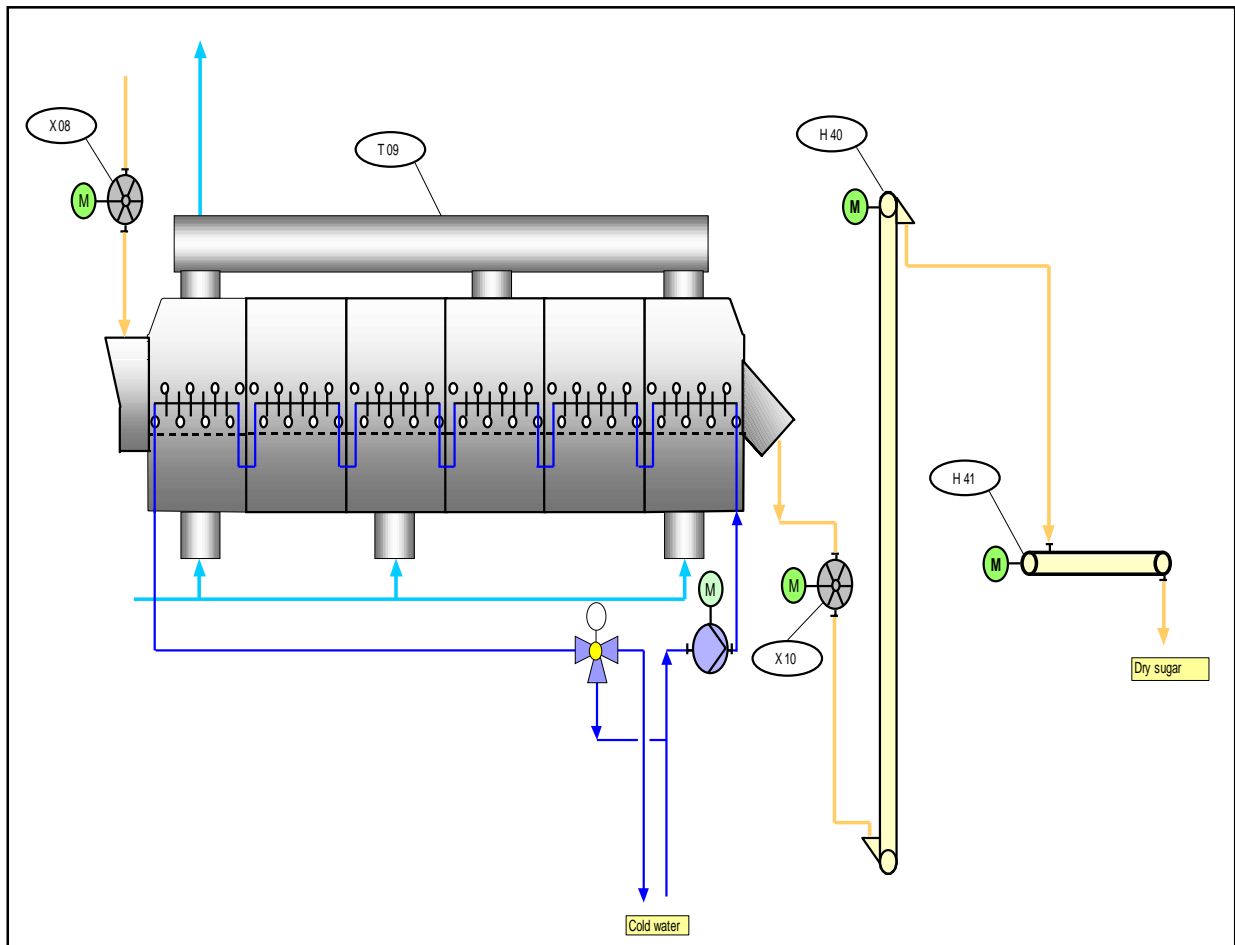


Figure I.3 Le chemin du sucre pendant le refroidissement du sucre

I.5.3 Chemin de l'air

Le séchage et le refroidissement du sucre se font sous l'influence de l'air ambiant. L'air ambiant est aspiré à l'extérieur et passe à travers les jalousies contre les intempéries F11.

Le filtre à air F14 élimine les grosses particules comprises dans l'air.

Le ventilateur V15 refoule l'air de refroidissement aspiré dans le refroidisseur à lit fluidisé. L'air de refroidissement conditionné est amené dans les compartiments distributeurs d'air du refroidisseur à lit fluidisé, passe à travers le fond distributeur du refroidisseur à lit fluidisé et fluidise ensuite le sucre à refroidir.

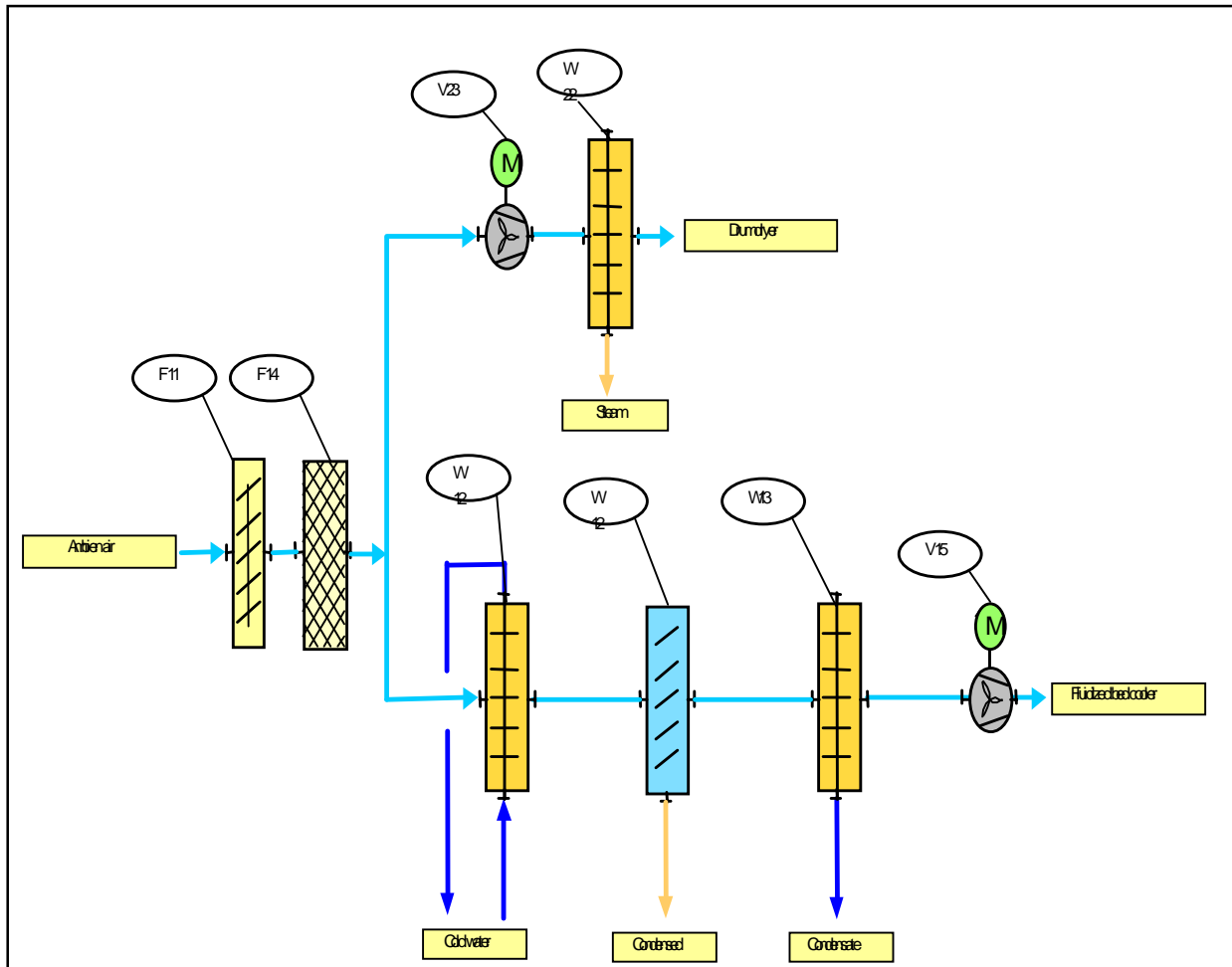


Figure I.4 Conditionnement de l'air de refroidissement et de l'air de séchage

Dans le lit fluidisé, l'air de refroidissement est guidé en courant croisé par rapport au courant de sucre. Grâce à la transmission calorifique intensive dans le lit fluidisé, l'air de refroidissement absorbe la chaleur de la surface de sucre qu'il contourne et refroidit le sucre. L'air de refroidissement chauffé passe dans le refroidisseur à lit fluidiser vers le haut. Ce faisant, l'élargissement de la section transversale du caisson refroidisseur provoque une réduction de la vitesse de l'air. De ce fait, quelques particules de sucre qui, à la suite des turbulences dans le lit fluidisé, sont évacuées du lit fluidisé avec l'air de refroidissement, retombent dans le lit fluidisé. En raison de l'élargissement de la section transversale au-dessus du lit fluidisé, il est possible de réduire, en fonction de la répartition granulométrique du sucre amené, la sortie des poussières comprises dans le courant du produit.

La quantité d'air qui passe à travers le refroidisseur à lit fluidisé est réglée au niveau du ventilateur V15 par le régulateur à volets X15.1 de celui-ci et en fonction du débit volumique de l'air de refroidissement.

Ensuite, l'air de rejet du refroidisseur est conduit sous forme d'air de séchage dans le caisson de décharge du sécheur.

L'air de séchage pour le sécheur à tambour est injecté dans la section de séchage en passant par le tube central et mélangé dans le distributeur d'air incorporé avec l'air de refroidissement.

Le ventilateur V23 refoule l'air dans le sécheur à tambour. La température nécessaire au séchage est produite dans les échangeurs thermiques W22.

Dans le sécheur à tambour, l'air de séchage absorbe l'humidité et les poussières de sucre se produisant pendant l'opération de séchage du sucre. De la chaleur est extraite de l'air de séchage qui se refroidit.

L'air de séchage est aspiré par le dépoussiéreur F16 et ensuite conduit vers l'extérieur en passant à travers le caisson d'entrée de sucre. L'acheminement de l'air de séchage se fait par le ventilateur d'air de rejet V17 disposé côté gaz purifié. Le silencieux à coulisse X18 monté en aval du ventilateur réduit les bruits d'échappement au niveau de la sortie vers l'extérieur.

I.5.4 Dépoussiérage de l'air de rejet et le système d'aspiration

Le dépoussiérage de l'air de rejet se fait par un laveur humide F16 qui sépare les poussières de sucre de l'air de rejet.

Le système d'aspiration comprend le laveur humide F16, le ventilateur V17, la vanne papillon X17.4, la cheminée de décharge d'explosions et quelques vannes papillon au niveau des points d'aspiration. Pour des raisons de la protection antidéflagrante, il est très important d'aspirer les poussières qui se sont produites au niveau des équipements, comme par exemple les élévateurs à godets et les machines tamisant, pour les nettoyer et ensuite les évacuer vers l'extérieur.

Pendant la mise en service de l'installation, régler les points d'aspiration et leurs vannes papillon de sorte que le débit volumique aspiré au niveau des points d'aspiration soit suffisant et la vitesse de l'air soit supérieur à 18 m/s. Grâce à cette vitesse d'air élevée, les poussières de sucre sont entièrement éliminées du système de tuyauterie.

En raison du débit volumique restreint par le laveur humide F16, il convient de limiter les

débits volumiques différents des divers zones (air de rejet sécheur tambour, air de rejet refroidisseur à lit fluidisé et système d'aspiration) en régler soigneusement les vannes papillon automatiques X 17.1, X 17.3 et X 17.4 ainsi que les vannes papillon manuels.

I.5.5 Production de l'eau froide :

L'eau froide pour les tubes de refroidissement du refroidisseur à lit fluidisé ainsi que l'eau froide pour le pré-refroidisseur nécessaire au conditionnement d'air est produite dans les machines frigorifiques W 25 (.1 - .2). Etant donné que les machines frigorifiques fonctionnent par étapes, les variations de température de l'eau froide sont compensées dans le bac tampon B19.1. Le bac tampon est divisé par une cloison pour ainsi former un côté froid et un côté chaud. Le côté chaud alimente la machine frigorifique et le côté froid assure l'aller vers le refroidisseur à lit fluidisé.

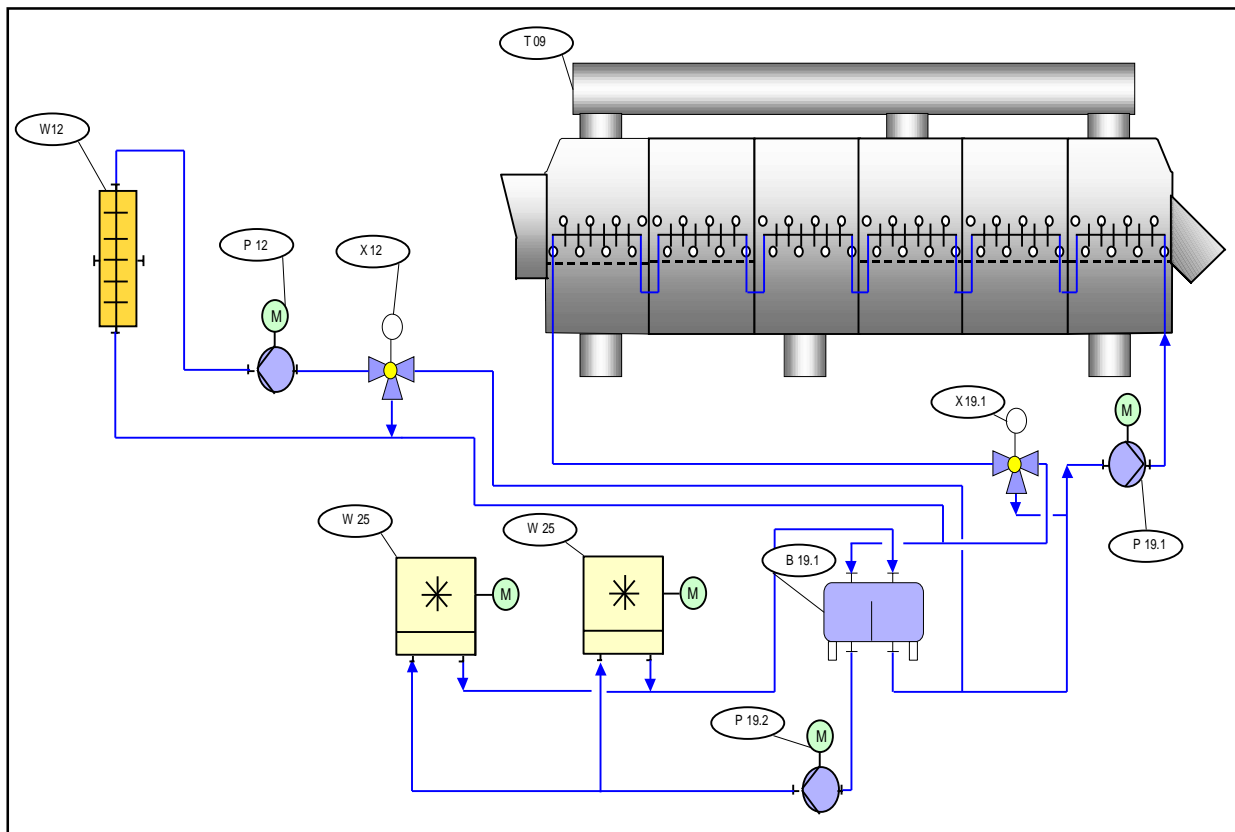


Figure I.5 Production de l'eau froide

I.5.6 Circuit de l'eau de refroidissement :

Le refroidissement des machines frigorifique est assuré par de l'air extérieur passant à travers les machines. La chaleur de l'agent frigorifique est donc cédée à l'air environnant. La

température maximale de l'air extérieur ne doit pas dépasser 36 °C. A température extérieure plus élevée, la pression dans le circuit de l'agent frigorigère augmente et la machine frigorigère est déconnectée par un dispositif de sécurité.

La pompe P19.3 conduit l'eau froide des machines frigorigères W25 vers le bac tampon B19.1. La pompe P 19.1 fait passer l'eau froide à travers les tubes de refroidissement du refroidisseur à lit fluidisé. La température d'aller vers les tubes de refroidissement est réglée à l'aide de la soupape à trois voies X19.1 par addition de l'eau de retour.

La pompe P12 assure le refoulement de l'eau froide à travers les tubes de refroidissement du pré-refroidisseur W12. La température d'aller vers le pré-refroidisseur est réglée à l'aide de la soupape à trois voies X12 par addition de l'eau de retour.

I.6 Position de problème :

La raffinerie 3000T de CEVITAL inclue une installation de séchage qui traite un débit qui arrive jusqu'à 125T/h, et pour répondre au besoin du marché l'entreprise a augmentée le débit de séchage à 3500 T/jour.

Le sécheur tambour/refroidisseur est conçu pour pouvoir supporter une augmentation de débit, cette augmentation mène avec elle une élévation dans la consommation de l'installation soit en puissance frigorigère utilisée, puissance calorifique...etc., la question qui se pose alors est bien la suivante :

« Pour cette augmentation de débit de sucre à sécher, quels sont nos besoin en air de séchage et quels sont les caractéristiques de cet air, quels sont nos besoin en énergies calorifiques et frigorigères demandés par l'installation pour assurer le séchage du sucre ? Quelle vitesse de fluidisation faut-il employé pour ne pas causer des détériorations physiques du sucre ? »

Notre travail consiste à étudier les éléments de l'installation de séchage du sucre à 3500T/jour et déterminer chaque caractéristique inclus dans l'installation de séchage

I.7 Conclusion :

Après avoir fait une présentation générale de l'entreprise CeVital, ainsi qu'une description du fonctionnement de l'installation de séchage et de refroidissement de la raffinerie du sucre 3500T existante, il est important de citer les différentes technologies de séchage et de Traitement d'air existantes et faire une description générale sur le froid, a fin de bien mener notre projet et résoudre la problématique qui nous a été posée, ce qui sera l'objet de notre étude dans le prochain chapitre.

Chapitre II :

**Généralité sur le séchage, traitement
d'air et le froid industriel**

II.1 Introduction :

Ce chapitre est fait à base de trois parties qui influencent l'installation qui fait objet d'étude, la première englobe le séchage et ces différentes utilisations, technologies et utilités... puis une deuxième partie sur le traitement d'air et ces caractéristiques ; la troisième sur le froid industriel.

II.2 Généralité sur le séchage :

II.2.1 Définition du séchage :

Le séchage est une opération qui a une grande importance dans les processus industriels de fabrication liés à plusieurs domaines tel que l'agroalimentaire et souvent elle représente la dernière opération du procédé de fabrication d'un produit, et c'est une opération consistant à retirer une partie du solvant d'un corps, par vaporisation de ce solvant, le produit final dit « Sec » étant obtenu sous une forme solide de taille variable, éventuellement de « solide divisé » ou de poudre. Le produit passe ainsi d'un état initial dit « humide », selon le cas solide ou liquide, jusqu'à un état final dit « solide sec », même s'il contient encore une teneur en eau (ou solvant) résiduelle. [5,6]

II.2.2 But de séchage :

Le séchage est un procédé très ancien de conservation des produits agricoles et alimentaires. Il permet de convertir des denrées périssables en produits stabilisés, par abaissement de l'activité de l'eau.

L'utilisation du séchage a de multiples buts :

- accroître la durée de conservation des produits (viandes, poissons, Fruits, épices, thé, champignons, ...).
- stabiliser les produits agricoles (maïs, luzerne, riz, lait, ...) et amortir le caractère saisonnier de certaines activités.
- Le séchage permet de réduire considérablement la masse et le volume des produits, ce qui facilite leur transport, stockage et manutention.
- Il sert aussi à donner une présentation, une structure ou une fonctionnalité particulière au produit (café instantané, flocons de purée de pomme de terre, ...).

À ce titre, l'opération de séchage peut être considérée comme une opération de formulation ou de texturation, qui, lorsqu'elle est convenablement conduite, est capable de fournir des produits nouveaux, faciles d'emploi. [5,7]

II.2.3 Type de séchage :

La technique de séchage dépend du produit qu'on veut sécher, trois types de séchage peuvent être distingués:

II.2.3.1 Séchage mécanique :

Les forces utilisées sont purement mécaniques pour l'élimination du liquide comme la décantation et filtration, centrifugation, compression

Cette élimination d'eau par voie mécanique caractérise essentiellement par trois points l'opposant nettement aux techniques faisant appel aux transferts de chaleur:

- Caractères limités (ne permettent d'éliminer qu'une partie de l'eau libre des produits traités).
- Faible sélectivité.
- Faible consommation d'énergie

II.2.3.2 Séchage chimique :

Les procédés chimiques, par l'utilisation des produits déshydratants (acide sulfurique H₂SO₄, acide phosphorique H₃PO₄)

II.2.3.3 Séchage thermique :

Il s'agit d'un apport d'énergie thermique pour la vaporisation de l'eau contenue dans le produit. [8] Parmi les techniques d'élimination d'eau par voie thermique.

II.2.3.3.1 Séchage par convection :

C'est le mode de transfert le plus utilisé car il permet un transfert simultané de chaleur et de masse (vapeur issue du produit). Le fluide sécheur utilisé habituellement est l'air chaud. Cependant, le séchage à la vapeur d'eau surchauffée permet d'obtenir des gains importants d'énergie. Au contact du produit à sécher, cette vapeur qui n'est pas saturée en eau se désurchauffe en cédant une partie de sa chaleur sensible, évaporant ainsi l'eau contenue dans le produit. Ce procédé ne convient pas aux produits sensibles à une très grande chaleur, mais se révèle avantageux pour ceux qui sont gorgés d'eau ou sensibles à l'oxydation. En effet, il est possible de récupérer l'énergie de la vapeur issue du produit sur le séchoir lui-même ou en dehors du séchoir. Il a en outre l'avantage de ne pas produire de gaz à effet de serre et son utilisation élimine les risques de feu et d'explosions.

II.2.3.3.2 Séchage par conduction :

Le transfert thermique vers le produit se fait dans ce cas par contact du produit avec une paroi chauffée extérieurement à l'enceinte de séchage. L'air qui traverse les appareils n'a alors

comme rôle que celui d'évacuer les buées issues de la vaporisation de l'eau contenue dans le produit.

II.2.3.3.3 Séchage par rayonnement :

Dans ce mode de séchage, l'énergie nécessaire à l'évaporation est transmise par rayonnement d'une surface chaude sur le produit à traiter.

L'intérêt du système réside dans le flux de chaleur transmissible, celui-ci étant plus élevé que la surface rayonnante à une température élevée.

Ce procédé de séchage est très efficace pour l'élimination de l'eau. [9,10]

II.2.4 Mode de séchage thermique :

Deux mécanismes peuvent être utilisés pour évaporer l'eau d'un produit: l'ébullition ou l'entraînement.

II.2.4.1 Séchage par ébullition :

L'ébullition a lieu lorsque la température du produit est élevée (par conduction sur une surface chaude, par rayonnement, par de la vapeur d'eau surchauffée, par immersion dans de l'huile chaude) à une valeur telle que la pression de vapeur d'eau de ce produit est égale à la pression totale ambiante : $P = P_t$

Il découle de cette définition que :

- la température d'ébullition dépend de la pression totale (elle est plus basse sous vide qu'à pression atmosphérique) et de l'activité de l'eau du produit (elle augmente lorsque l'activité de l'eau diminue)
- le gaz en contact avec la surface du produit est de la vapeur d'eau pure ; cette propriété permet de sécher des produits oxydables en l'absence d'oxygène de l'air ou d'éliminer un solvant volatil, combustible en présence d'air, par ébullition dans une enceinte fermée

II.2.4.2 Séchage par entraînement :

Lorsqu'un corps humide est placé dans un courant de l'air ou gaz suffisamment chaud et sec, il s'établit un écart de température et de pression partielle tel que :

- le gaz apporte au produit une partie au moins de l'énergie nécessaire à la vaporisation ;
- l'eau est évaporée sans ébullition sous l'effet du gradient de pression partielle d'eau. La vapeur d'eau est transférée par conduction et convection du produit dans le milieu ambiant et est ensuite entraînée par le gaz. [11]

II.2.5 Domaines d'utilisation :

Le séchage industriel est de nos jours très couramment utilisé dans les industries chimiques et/ou des matériaux. Citons les applications suivantes : [6]

- ✓ séchage du papier, sa fabrication passant par une étape de pulpe humide, séchage des éponges cellulosiques dites « végétales », des latex... ;
- ✓ séchage des matériaux de construction : bois, briques, tuiles et céramiques avant cuisson, carreaux et plaques de plâtre après moulage, isolants thermiques, pigments, colles... issus de procédés humides
- ✓ séchage de produits chimiques obtenus à l'état solide, suite à des réactions en milieu liquide, par précipitation, cristallisation, concentration, etc. : engrais granules, lessives granulées, NaCl, soude, sels minéraux, silice colloïdale..., sachant que leur distribution sous forme liquide reste souvent une option
- ✓ séchage de matières actives pharmaceutiques généralement en poudres, issues de processus humides
- ✓ séchage de textiles, après lavage, après teinture...
- ✓ séchage de boues d'épuration, et/ou de sous-produits industriels...
- ✓ mise en forme de poudres, granulation humide (engrais, lessives...).

Le séchage « artificiel » avec apport d'énergie est actuellement très utilisé dans l'agriculture et/ou l'industrie alimentaire, pour la fabrication de nombreux ingrédients (amidon, maltodextrines, sucre, lait en poudre, soupes sèches, boissons dites instantanées, pulpes de sucreries, alimentation pour animaux d'élevage et de compagnie...), ou comme une transformation connexe accompagnant d'autres opérations (cuisson, congélation, torréfaction, stockage à température ordinaire, broyage,...).

II.2.6 Classification des sécheurs :

Le nombre très important de produits à sécher (forme, état initial ...) a pour conséquence l'existence dans l'industrie de nombreux procédés industriels (dispositifs, type d'énergie ...), Les divers types de séchoirs industriels peuvent se regrouper de différentes manières : [10,12]

- solides divisés (granuleux, fibreux, pulvérulents)
- solides compacts ou en plaques
- produits pâteux
- enfin produits liquides

Les critères dont le sécheur industriel se classifie :

- mode de fonctionnement,
- mode d'apport de l'énergie (convection, conduction, rayonnement)
- temps de séjour

II.2.6.1 Sécheurs compatibles avec les produits humides à l'état solide

II.2.6.1.1 Sécheur tunnel à tapis :

Le produit est déposé en couche mince sur le support mobile, est convoyé dans une Enceinte fixe et chauffé par convection forcée. Le support est un tapis, en tôles métalliques pleines ou perforées ou en toile tissée, mis en mouvement par une roue d'entraînement.

La répartition homogène du flux d'air sur la surface de produit conditionnel a qualité du, l'apport de chaleur le plus fréquemment rencontré correspond à un écoulement à courant croisés de produit et de fluide caloporteur. [12]

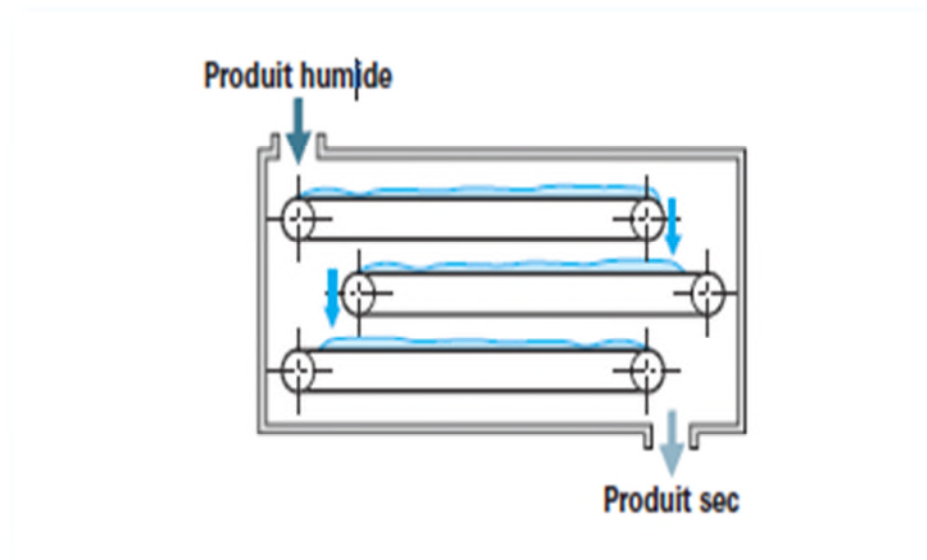


Figure II.1 Sécheur tunnel à tapis

II.2.6.1.2 Sécheur à tambour :

Ces sécheurs [13, 14, 15, 16] sont constitués d'une enveloppe cylindrique légèrement inclinée par rapport à l'horizontale ($-5^\circ < \varphi < 0^\circ$), qui repose et roule sur deux stations de trains porteurs par l'intermédiaire de deux anneaux dits de bandage. Le diamètre du cylindre est généralement compris entre 0,3 et 3 m et la longueur varie de 4 à plus de 10 fois le diamètre.

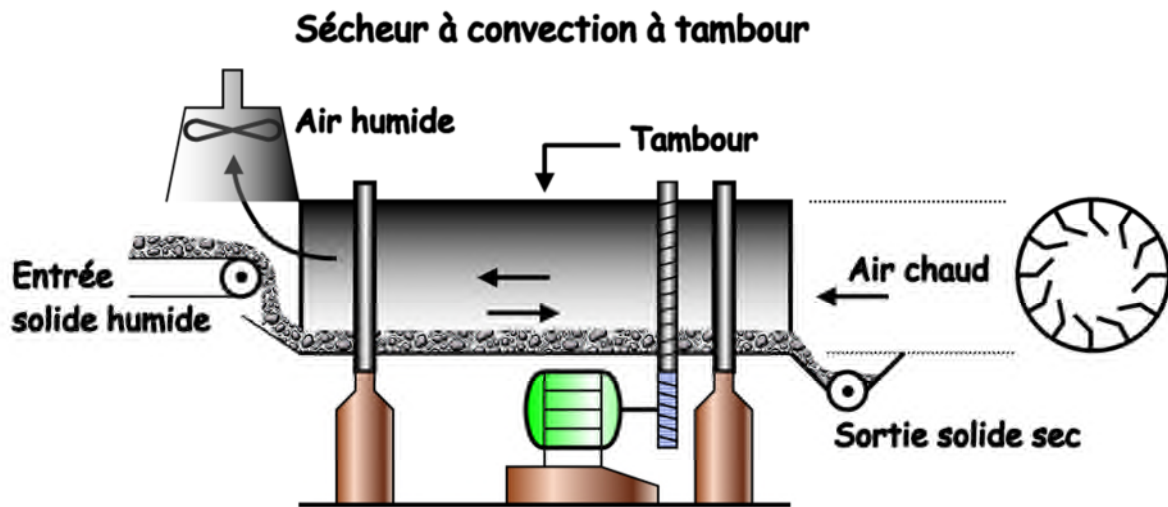


Figure II.2 Sécheur à tambour

II.2.6.1.3 Sécheur à lit fluidisé :

Le produit humide passe sur une couche poreuse, l'air chaud traverse cette plaque ainsi que la couche de produit. Le coefficient de transmission de chaleur est très élevé, permettant un séjour très bref du produit humide. [17]

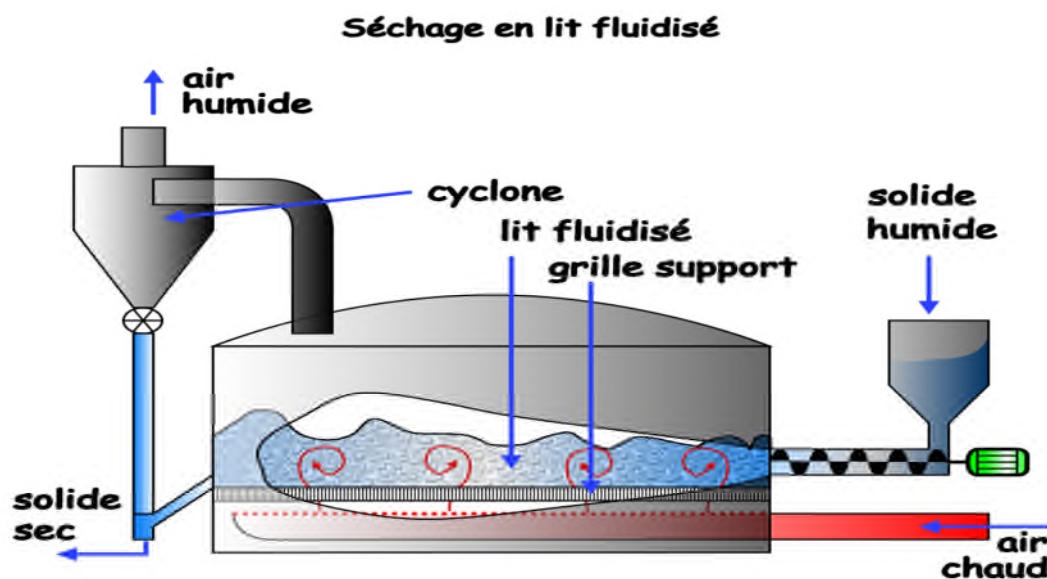


Figure II.3 Sécheur à lit fluidisé

II.2.6.1.4 Sécheur pneumatique :

Ces sécheurs assurent simultanément le transport et le séchage du matériau par la circulation à co-courant d'un fluide caloporteur (généralement de l'air) à haute température, qui entraîne les particules vers la sortie de l'installation. La vitesse du gaz doit ainsi être supérieure à la

vitesse terminale de chute des particules les plus lourdes. Dans sa configuration la plus simple, le sécheur pneumatique (figure II.4) se compose d'un dispositif de chauffage du fluide caloporteur, d'un dispositif d'alimentation et de dispersion du produit dans le col d'un venturi, d'une longue conduite de séchage verticale, circulaire et de section uniforme, d'une combinaison de dispositifs de séparation gaz/solide (le plus souvent un cyclone et un laveur humide), d'un ventilateur extracteur positionné entre les deux séparateurs et, enfin, d'un collecteur pour le produit sec.

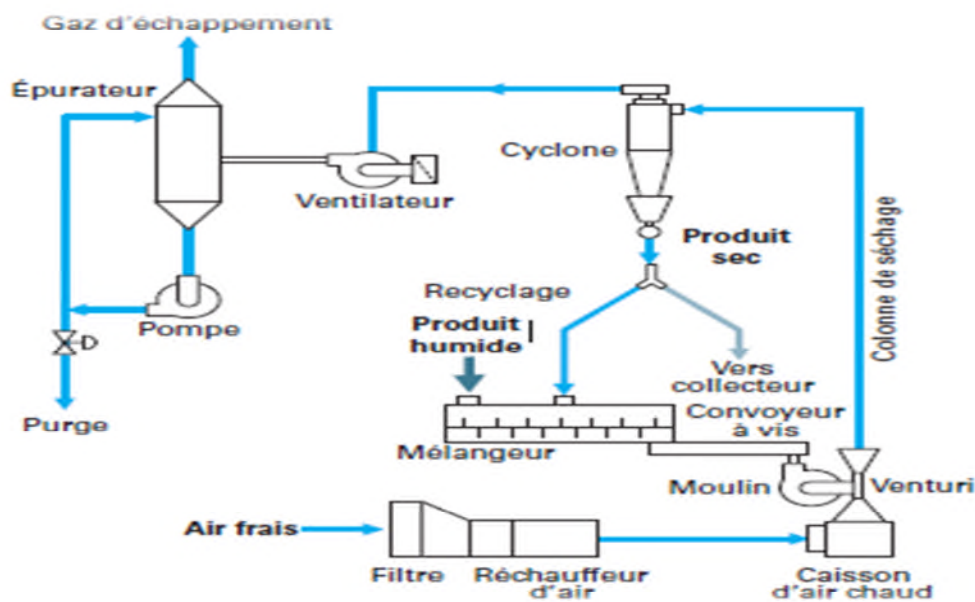


Figure II.4 Sécheur pneumatique

II.2.6.1.5 Sécheur à disques ou à vis

Entrent dans cette catégorie les sécheurs chauffés par contact (figure II.5) dans lesquels le produit est transporté mécaniquement sans subir de cisaillement intense. L'élément caractéristique d'un sécheur à disques est le rotor. Il est composé d'un ensemble de disques creux montés sur un arbre central également creux. La géométrie des disques varie sensiblement selon les constructeurs : canaux concentriques, disques circulaires, disques segmentés. Parfois, il n'est même plus guère possible de parler de disques, ces éléments étant remplacés par des faisceaux tubulaires concentriques pour augmenter la surface d'échange. Le rotor, contenu dans un stator horizontal, est supporté par deux paliers de roulement, habituellement situés à l'extérieur du carter. Des racloirs, montés sur le stator, plongent entre les disques jusqu'à l'arbre, empêchant ainsi le produit de s'agglomérer autour du rotor. Des sabots ou de larges pâles, fixes ou orientables, montées aux extrémités des disques. [12]

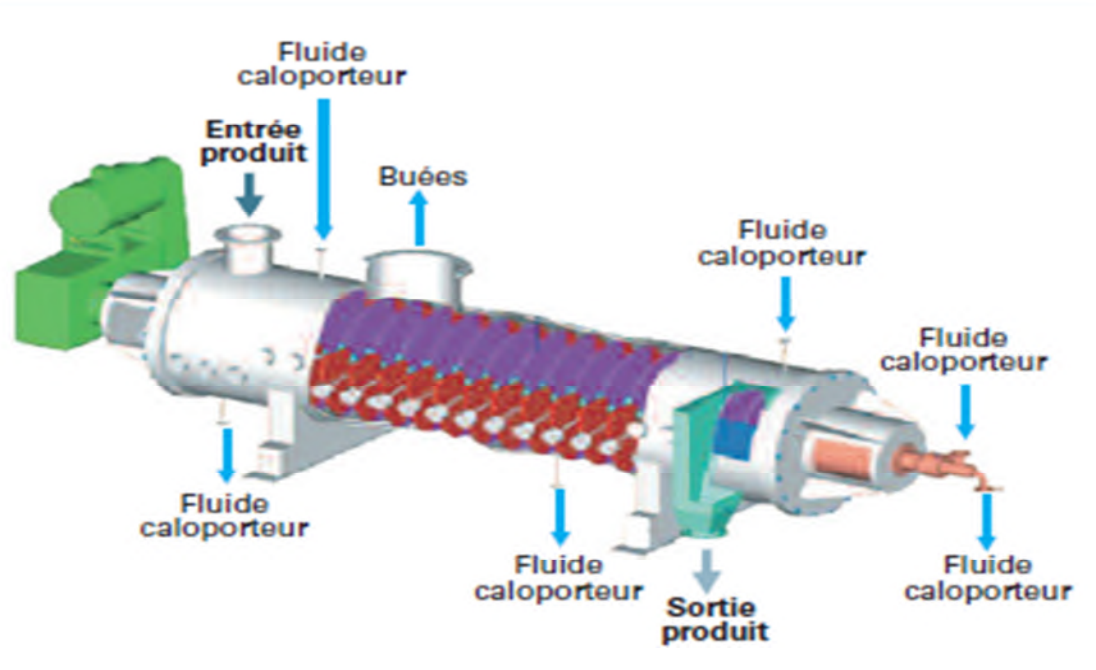


Figure II.5 Sécheur pneumatique

II.2.6.2 Sécheurs compatibles avec les produits humides à l'état liquide

II.2.6.2.1 Sécheur cylindre :

Dans sa version la plus simple et la plus courante, l'installation (figure II.6) est composée d'un cylindre creux en fonte. Le produit humide, liquide ou pâteux, est encollé en couche mince et uniforme sur la paroi externe du cylindre horizontal, en rotation autour de son axe et chauffé intérieurement avec de la vapeur saturée. La vapeur, introduite à l'intérieur du se condense au contact de la paroi froide en libérant la chaleur latente de condensation. Cette énergie est ensuite transférée au produit par conduction à travers la paroi du cylindre. Les condensats ruissellent le long de la paroi intérieure et s'accumulent en partie basse, où ils sont repris par un siphon et évacués vers l'extérieur par un purgeur. Au cours de la rotation du cylindre, le produit est séché et transporté jusqu'à une lame raclante fixe, qui le décolle de la paroi. Le produit sec obtenu se présente sous la forme d'une poudre ou d'un film. Dans une version plus ancienne mais encore utilisée, l'installation comportait deux cylindres laminant, tournant en sens inverse. [18, 19]

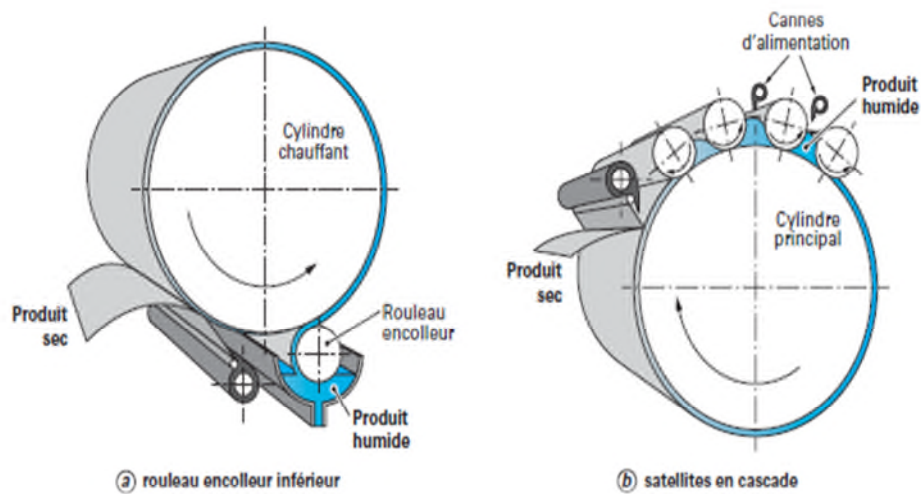


Figure II.6 Sécheur cylindre

II.2.6.2.2 Sécheur à pulvérisation :

Ces sécheurs, également appelés atomiseurs, sont composés d'une tour cylindro-conique, généralement verticale, dans laquelle s'effectue le séchage. Cette chambre est reliée au circuit d'alimentation du produit liquide par l'intermédiaire d'un organe de pulvérisation et à un circuit d'air chaud. À pression atmosphérique, les températures sont généralement comprises entre 160 et 900 °C. [20, 21]

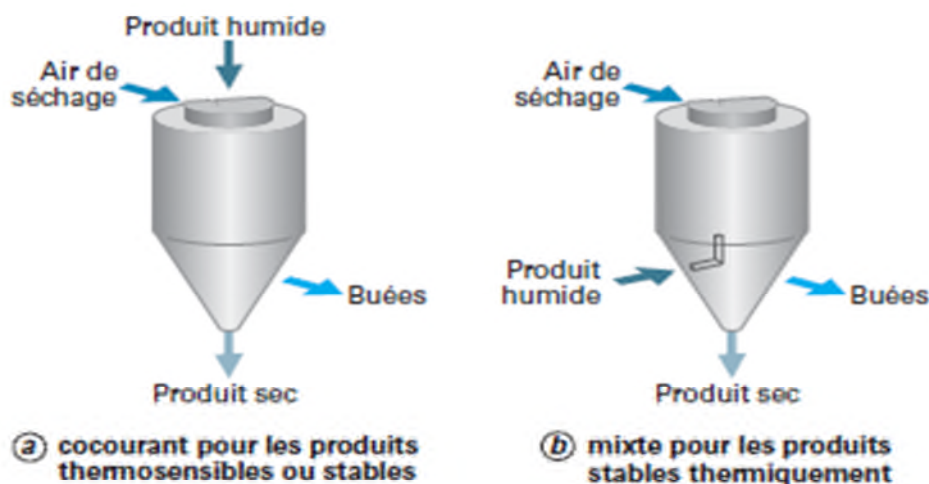


Figure II.7 configuration géométrique d'un sécheur pulvérisation

II.2.6.3 Sécheurs développés pour les produits humides à l'état pâteux

II.2.6.3.1 Sécheur à palettes :

Ces équipements ont été développés pour sécher des produits pâteux, visqueux, formant des croûtes ou des mottes sans recirculation du produit sec en tête de l'installation.

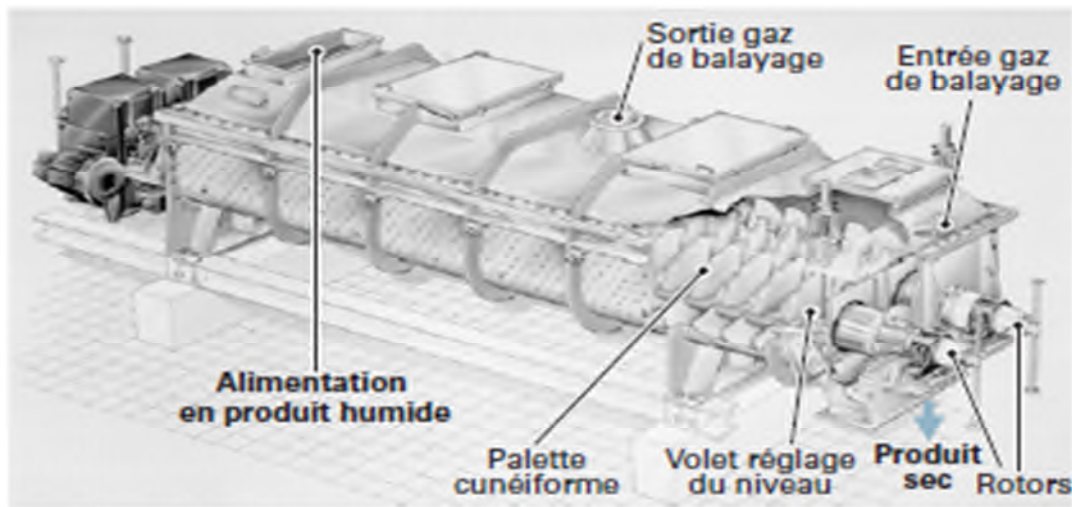


Figure II.8 Sécheur à palettes Naratherm

II.2.6.3.2 Sécheur à couche mince :

Les sécheurs à couche mince horizontaux sont utilisés pour le séchage des produits difficiles. Ils comportent un corps cylindrique horizontal muni d'une double enveloppe, dans laquelle circule la vapeur d'eau surchauffée sous une pression de 6 à 8 bars. Le principe de fonctionnement consiste à projeter le produit pâteux, introduit latéralement, contre l'enveloppe cylindrique à l'aide de pâles pendulaires fixées sur un rotor tournant à grande vitesse. Ce qui permet d'atteindre des coefficients d'échange de chaleur paroi/produit très élevés. [12]

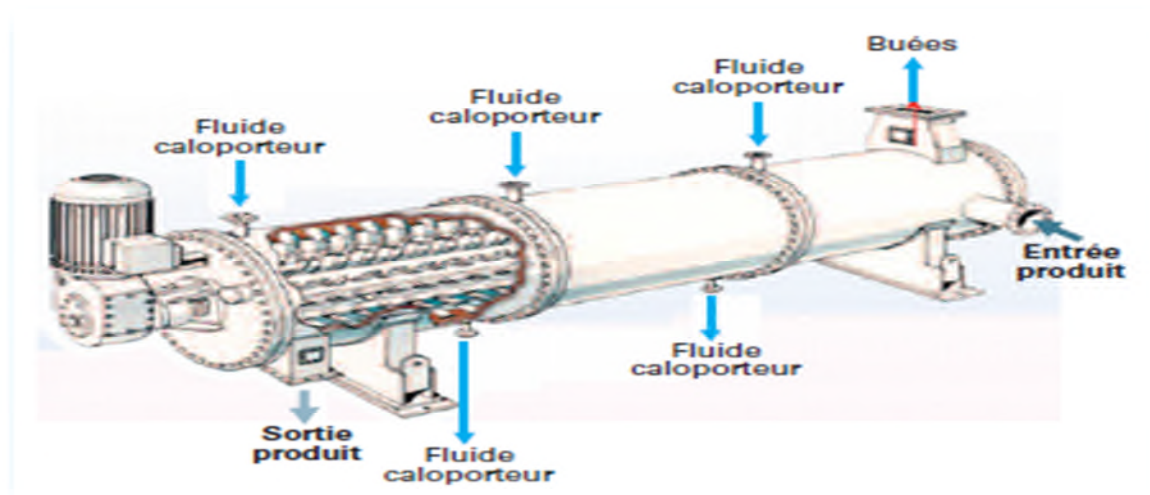


Figure II.9 Sécheur à couche mince

II.2.6.3.3 Sécheur pneumatique compact :

Les sécheurs pneumatiques compacts se présentent sous la forme d'une chambre cylindrique verticale avec un fond conique [8], d'un distributeur d'air à entrée tangentielle et d'un rotor

tournant à grande vitesse positionné en bas de la chambre. Le produit humide, homogénéisé par agitation mécanique dans le bac d'alimentation et soutiré en continu et à débit constant, tombe par gravité au-dessus du rotor.

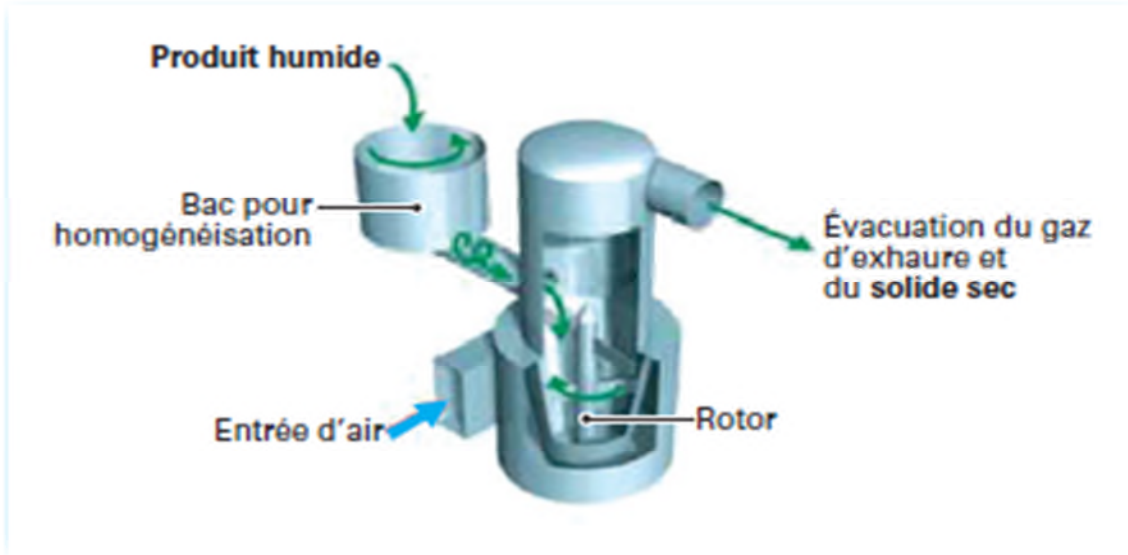


Figure II.10 Sécheur pneumatique compact

II.2.5 Choix de procédé de séchage :

Il existe des différents types de séchage, donc le choix de type qu'il faut utiliser sur un produit s'impose et dépend de :

- Nature du produit : solide, liquide, cristaux.
- Taux d'humidité existante et voulue et la nature d'humidité
- Débit du produit exigé.
- Capacité thermique du produit
- Paramètres relatifs aux produits et à la sécurité.

II.3 Généralités sur l'air humide :

L'air est un mélange gazeux d'une rare complexité, Sa pression et sa température varient constamment en un même point, sa composition même subit des changements dans l'espace et dans le temps en fonction des corps.

Dans ce mélange une vapeur condensable joue un rôle particulièrement important, l'eau accompagne l'air toujours sous la forme de vapeur, très souvent sous ses formes condensées, eau liquide ou glace, conférant à l'air humide des propriétés particulières que l'on s'attache à utiliser ou contre lesquelles on cherche à se défendre.

Quel que soit l'air ambiant il contient une certaine quantité d'eau présente sous forme vapeur.[22]

II.3.1 : Propriétés et grandeurs de l'air humide :

Hypothèse simplificatrice pour les calculs : l'air sec et la vapeur d'eau se comportent comme des gaz parfaits

II.3.1.1 : Loi des gaz parfaits :

Nous allons considérer tous ce qui suit que l'air sec, la vapeur d'eau, et l'air humide comme des gaz parfait, et suivent l'équation caractéristique des gaz parfaits : $PV = rT$

II.3.1.2 : Loi de Dalton :

La pression totale de l'air (pression atmosphérique) est la somme des pressions partielles de chaque gaze qui constitue le mélange (air sec + vapeur d'eau).

$$P = P_a + P_v \quad (\text{II.1})$$

Lorsque l'air est saturé en vapeur d'eau, la pression des vapeurs atteint le maximal, c'est la pression de saturation, elle est donné par la relation :

$$\log P_{s,e} = \frac{7,625 \cdot \theta}{241,0 \cdot \theta} + 2,7877$$

II.3.1.3 : Masse et pression de l'air humide

- **L'air sec :**

$$P_a V_a^* = r_a T$$

Avec P_a (Pa) : pression de l'air sec V_a^* (m^3/kg) : volume massique de l'air sec

$$\text{Avec une masse volumique : } m_a = \frac{1}{V_a^*} = \frac{P_a}{r_a T}$$

$$r_a = 287,05 \text{ J/kg} \cdot$$

$$\text{Soit : } m_a = \frac{P_a}{287,05 T} \left[\frac{\text{kg}_{a,s}}{\text{m}^3} \right]$$

✓ Bilan de conservation massique de l'air sec:

$$\dot{m}_{a,1} = \dot{m}_{a,2} = \dot{m}_a \frac{\text{kg}_{a,s}}{\text{s}} \quad (\text{II.2})$$

- **La vapeur d'eau :**

$$P_v V_v^* = r_v T$$

$$\text{Avec une masse volumique : } m_v = \frac{1}{V_v^*} = \frac{P_v}{r_v T}$$

$$\text{Et } r_v = 461,51 \text{ [J/kg] } \cdot$$

$$\text{Soit } m_v = \frac{P_v}{461,51 T} \left[\frac{\text{kg}_e}{\text{m}^3} \right] \quad (\text{II.3})$$

✓ Bilan de conservation massique de l'eau :

$$\dot{m}_{a,1} \cdot r_1^s = \dot{m}_{a,2} \cdot r_2^s = 0 \left[\frac{\text{kg}_e}{\text{s}} \right] \quad (\text{II.4})$$

Par conséquent,

$$r_1^s = r_2^s = r^s \frac{\text{kg}_{a,s}}{\text{kg}_e}$$

II.3.1.4 : Température de l'air humide :

- **Température sèche :**

Appelle aussi température usuelle ou bulbe sec, c'est la température obtenu grâce a un thermomètre ordinaire placé a l'ambre, et a l'abrie des rayonnements thermique.

- **Température humide :**

C'est la température indiquée par un thermomètre dans le bulbe thermique est recouvert d'une mince couche d'eau (au moyen par exemple, d'une mèche textile entourant le bulbe et imbibée d'eau distillée.

Pour ce faire, il faut que la vitesse de circulation de l'air sur le bulbe soit suffisamment grande pour que les échanges de chaleur et de masse soient suffisamment intenses.

Le groupement d'un thermomètre à bulbe sec et d'un thermomètre a bulbe humide, ventilé, constitue ce qu'on nomme un psychomètre.

- **Température de rosée :**

Elle est définie comme étant, la température a partir de laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air humide commence a ce condensé.

Lorsque l'air humide est mis en contact avec une surface froide, la vapeur contenue dans l'air humide commence à se condenser, l'air se refroidit, son humidité relative va augmenter jusqu'à atteindre la valeur de 100%.

II.3.2 : Humidité relative / Humidité spécifique :

II.3.2.1 : Humidité relative Ψ :

C'est le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air P_v , et la pression de saturation de cette vapeur d'eau à une température θ donnée $P_{s,\theta}$. Elle nous renseigne sur le pourcentage de vapeur d'eau contenu dans l'air par rapport à la quantité de vapeur d'eau maximale que l'air saturée pourrait contenir, elle est donnée par la relation suivante :

$$\Psi = \frac{P_v}{P_{s,\theta}} .$$

II.3.2.2 : Humidité spécifique r^s :

Appelle aussi teneur en humidité ou humidité absolue, c'est le rapport entre la masse de vapeur d'eau associée à 1 kg d'air sec contenue dans un volume d'air humide.

D'après les relations : (II.1),(II.2), (II.3), (II.4), on a :

$$r^s = \frac{m_v}{m_a} \left[\frac{kg_e}{kg_{as}} \right] r^s = 0,062 \cdot (P_v / (P - P_a)) \frac{kg_e}{kg_{a,s}}$$

II.3.3 : Enthalpie massique et spécifique**II.3.3.1 : Enthalpie massique de l'air sec a la température θ :**

Elle représente la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1kg d'air sec pour élever sa température de 0°C a $\theta^\circ\text{C}$.

$$H_{as} = \theta \cdot C_{pas}$$

$$C_{pa} = 1,9327 \cdot 10^{-10} \cdot \theta^4 - 7,9999 \cdot 10^{-7} \cdot \theta^3 + 1,1407 \cdot 10^{-3} \cdot \theta^2 - 0,4489 \cdot \theta + 1057,5$$

II.3.3.2 : Enthalpie massique de la vapeur d'eau a la température θ :

Elle représente la quantité de chaleur totale qu'il faut fournir à 1 kg d'eau à l'état liquide pour passer à l'état vapeur à la température θ_v .

$$H_v^* = \theta \cdot C_{pv} + L_v$$

$$\Rightarrow H_v^* = 1,8266\theta + 2500,8 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_v} \right]$$

Avec : $C_{pv} = 1,8266 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{kg.K}} \right]$ valeur moyenne de la chaleur massique de l'eau entre - 20°C et 50°C

$L_v = 2500,8 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{kg.K}} \right]$ Valeur de la chaleur latente de changement de phase.

II.3.3.3 : Enthalpie de l'air humide a la température θ :

Un volume V d'air humide contient une masse de vapeur m_v et une masse d'air sec m_a :

$$m = m_v + m_a$$

L'enthalpie de cette masse est :

$$H = m_v \cdot H_v^* + m_a \cdot H_a^* \text{ [kJ]}$$

$$H = m_a \left(H_a^* + \frac{m_v}{m_a} \cdot H_v^* \right)$$

$$\text{Avec : } r^s = \frac{m_v}{m_a} \Rightarrow H = m_a (H_a^* + r^s \cdot H_v^*)$$

II.3.3.4 Enthalpie spécifique de l'air humide a la température θ :

Il représente la quantité de la chaleur (sensible+latente) contenue dans l'air humide renfermant une masse d'air sec de 1kg.

$$H^s = \frac{H}{m_a} = H_a^* + r^s \cdot H_v^*$$

Avec : $H_a^* = 1,006 \cdot \theta$

$$H_v^* = 2500,8 + 1,8266 \cdot \theta$$

$$\Rightarrow H^s = 1,000\theta + r^s(2500,8 + 1,8266\theta) \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}} \right] .$$

II.3.4 Volume spécifique :

C'est le volume occupé par 1Kg d'air sec accompagné des quelques grammes de vapeur qui lui sont mélangés. On le note V_s en $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{\text{as}}} \right]$

Le volume spécifique de l'air augmente avec la température (car l'air se dilate en s'échauffant), et il augmente aussi avec la teneur en humidité (car la vapeur d'eau est moins dense que l'air sec).

Le volume spécifique est donné par la relation :

$$V^s = \frac{461,24 \cdot (0,622 + r^s) T}{P_{at}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{\text{as}}} \right]$$

II.3.5 : Diagramme de l'air humide :

Pour effectuer les calculs des équipements de climatisation on calcule les caractéristiques de l'air humide et on les groupées sous forme graphique dans des diagrammes de l'air humide [22]

Ce dernier est utilisé pour représenter graphiquement l'état de l'air et ses évolutions dans le système de climatisation, ils permettent de reproduire graphiquement les évolutions de l'air au cours de cycle de réfrigération, de chauffage, d'humidification..., ou bien au cours d'un cycle complet de climatisation qui comprend toutes les opérations élémentaires. Ils sont donc d'un usage courant en réfrigération, climatisation et chauffage industriel.

De nombreux types de diagramme ont été proposés, actuellement deux représentations seulement sont vraiment utilisées :

Le diagramme de Carrier : (θ, r^s) qui donne la température en fonction de l'humidité spécifique ; c'est le plus couramment employé dans le monde.

Le diagramme de Mollier : (r^s, H^s) à axes obliques qui donne l'humidité spécifique en

fonction de l'enthalpie spécifique, surtout employé en Europe Centrale et dans les pays de l'Est ; dans la littérature russe, il est souvent connu sous le nom de diagramme de Ramzine.

Ces représentations sont sensiblement équivalentes.

II.3.5.1 : Le but de diagramme de l'air humide :

- Il permet de connaître tous les paramètres d'un état de l'air, et tous les paramètres de l'état final.
- Les quantités d'humidités absolues à fournir ou à soustraire pour passer d'un état initial à l'état final.
- Les quantités d'énergies à fournir ou à soustraire.
- Il permet à partir de la connaissance de deux paramètres de déterminer sans calculer les autres caractéristiques du mélange.

II.3.5.2 : Diagramme de CARRIER :

Le diagramme de carrier (figure II.11), en coordonnées (θ, r_s) est construit pour une certaine valeur de pression totale P de l'air humide et une certaine altitude.

Chaque point du plan représenté un mélange air-vapeur d'eau dont la température et l'humidité spécifique sont les coordonnées du point.

Les principales caractéristiques de l'air sur ce diagramme :

- Humidité absolue r^s : les lignes d'humidité absolue constantes sont des horizontales, parallèles à l'axe des abscisses.
- Enthalpie H : Les isenthalpes sont des droites parallèles décroissantes.
- Température sèche : les isothermes sont des droites verticales.
- Volume massique : sont représentés par des droites parallèles plus oblique que celles de l'enthalpie.

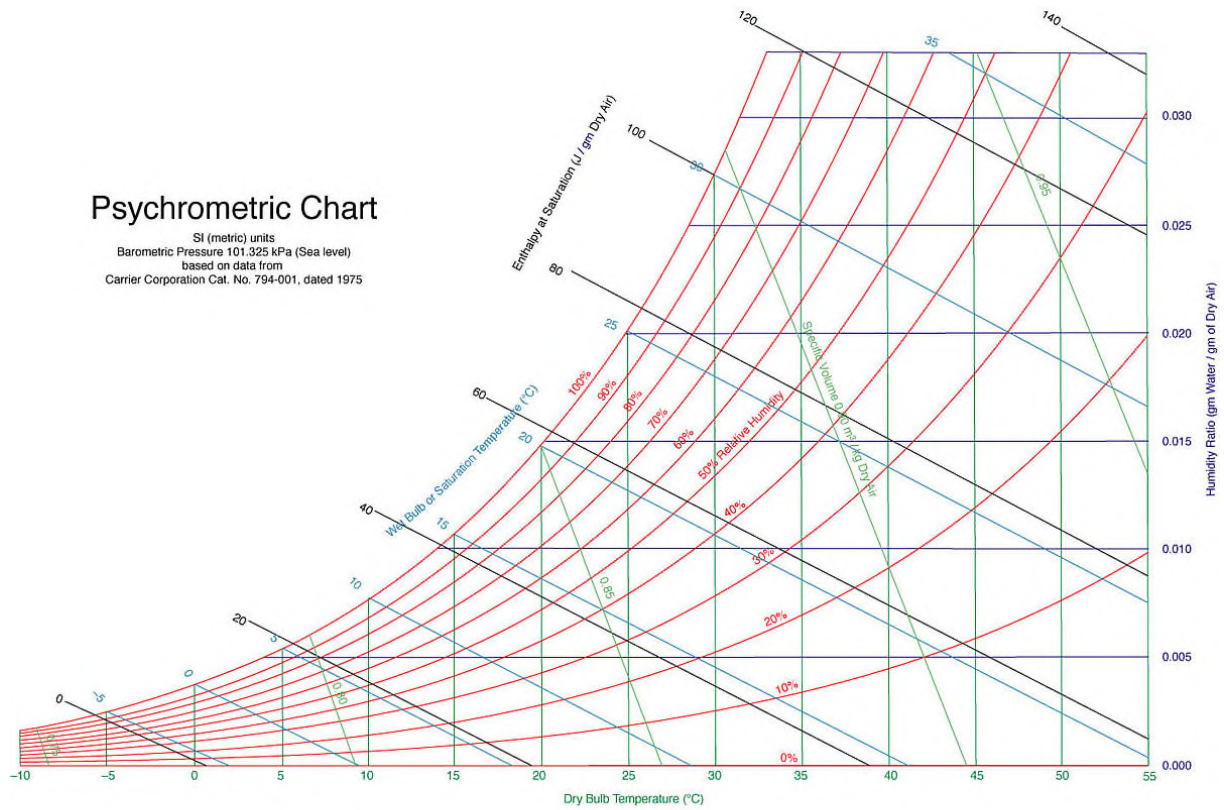


Figure II.11 Diagramme Carrier

II.3.5.3 : Diagramme de MOLIER :

Le diagramme de Mollier-Ramzine, sur lequel l'enthalpie H (exprimée en kJ/kg d'air sec) est portée en ordonnées et le taux d'humidité absolue H_a (exprimé en kg d'eau/kg d'air sec) en abscisses. Les températures apparaissent sous la forme d'isothermes. Les axes sont obliques et l'inclinaison de l'axe des abscisses est choisie de manière à ce que l'isotherme à 0°C soit perpendiculaire à l'axe des ordonnées. L'humidité relative apparaît sur des courbes iso-humidité relative (**Figure II.12**). Les caractéristiques thermodynamiques de l'air humide à pression atmosphérique sont établies en considérant 1 kg d'air sec contenant H_a kg d'eau.

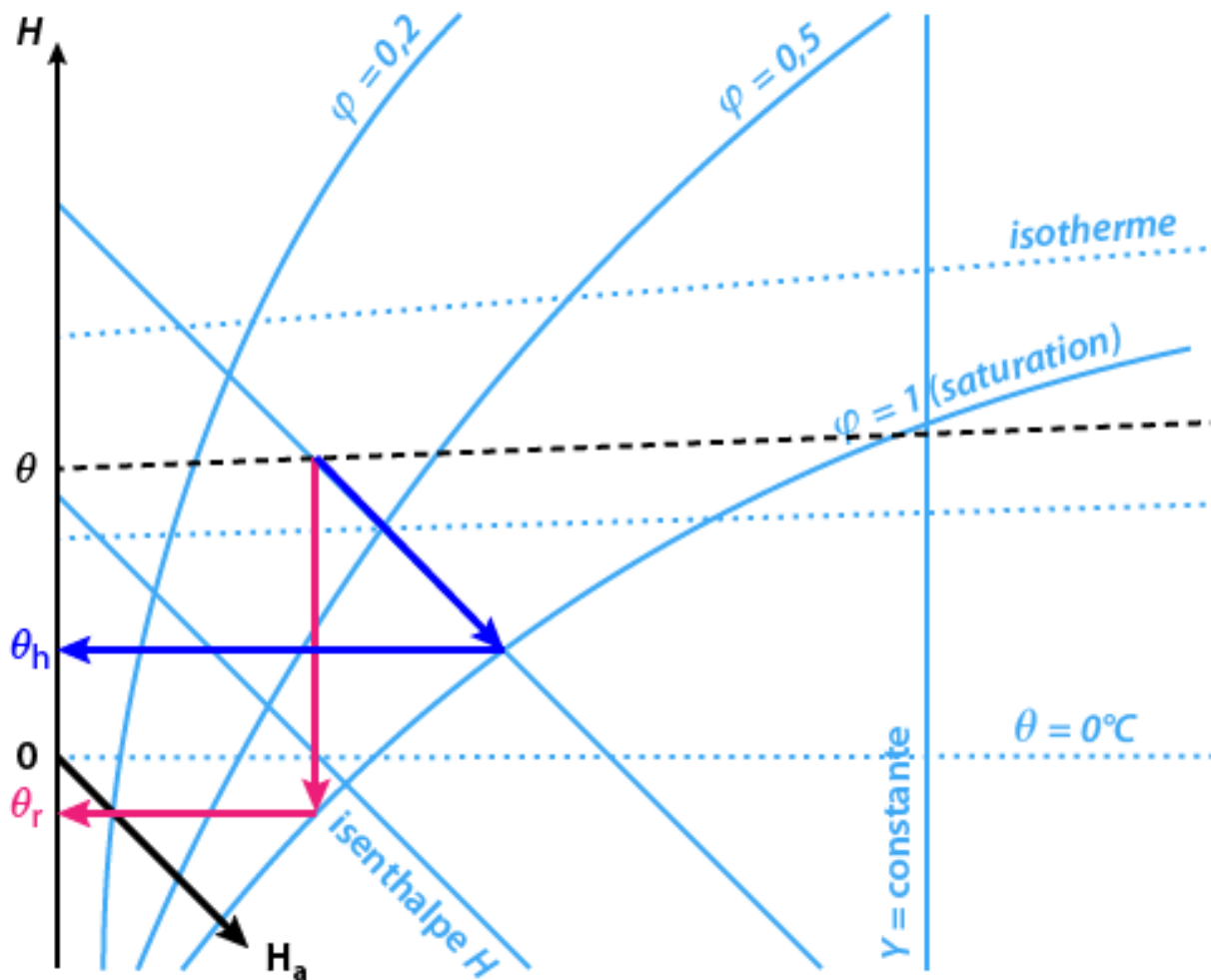


Figure II.12 Représentation schématique du diagramme de Mollier-Ramzine

II.3.6 : Conditionnement de l'air :

Le conditionnement d'air représente l'ensemble des traitements appliqués à l'air ambiant pour obtenir des caractéristiques précises de température et d'hygrométrie liées à l'activité ; à un procès; aux conditions de conservation des produits entreposés.

Les paramètres pris en compte varient avec le type d'activité : propreté de l'air (impuretés, odeurs) ; température ; humidité ; charges internes fortes (sensible, latente)

Le conditionnement d'air s'applique : [23]

- à l'industrie de précision (microélectronique, avionique, optique, horlogerie, automobile, peinture, chimie fine...)

- à la biologie (agroalimentaire, pharmacie, cosmétique, biotechnologie, domaine hospitalier...);
- aux laboratoires (recherche, mesure...);
- aux procès (séchage, déshumidification de piscine...);
- aux locaux particuliers (téléphonie, ordinateurs...).

II.3.6.1 Centrale de traitement d'air :

➤ Caisson de mélange

Le caisson de mélange standard est généralement utilisé pour réaliser le mélange de l'air neuf avec l'air recyclé. [24]

➤ Caisson de filtration

Le filtre consiste à éliminer d'un fluide gazeux tout ou partie des particules ou aérosols qu'il contient, en les retenant sur une couche poreuse appelée (média filtrant).

L'opération de filtration n'a aucune action sur les caractéristiques thermiques de l'air. Elle n'apparaît pas sur le diagramme de l'air humide. Elle crée une chute de pression sur l'air. Elle fait cependant partie intégrante d'une centrale de traitement d'air.

➤ Batterie chaude

La batterie chaude assure le préchauffage ou le chauffage de l'air à l'aide d'un fluide chaud qui peut être de l'eau, de l'eau surchauffée, de la vapeur, la condensation d'un fluide frigorigène ou des résistances électriques. Durant l'opération de chauffage, l'humidité absolue, ou teneur en humidité w , reste constante. En revanche, l'humidité relative e (en %) diminue.

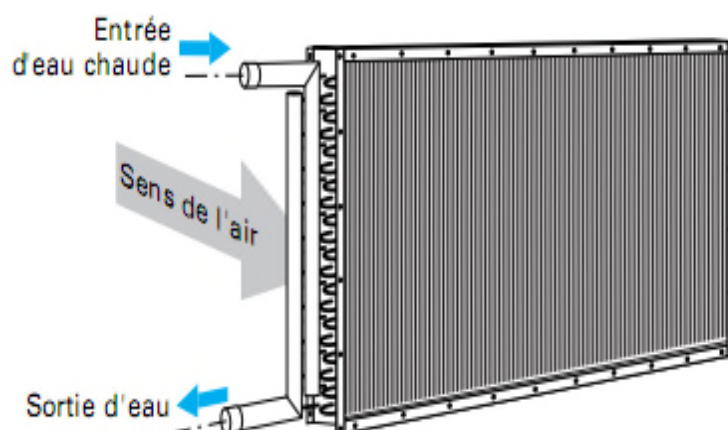


Figure II.13 Batterie chaude alimentée en eau

➤ Batterie froide

La batterie froide assure le refroidissement de l'air, avec ou sans déshumidification, à l'aide d'un fluide froid qui peut être de l'eau glacée ou par évaporation d'un fluide frigorigène (batterie à détente directe).

Durant l'opération de refroidissement sans déshumidification, l'humidité absolue ou teneur en humidité reste constante. En revanche, l'humidité relative (en %) augmente.

Durant l'opération de refroidissement avec déshumidification, l'humidité absolue diminue, l'humidité relative (en %) augmente.

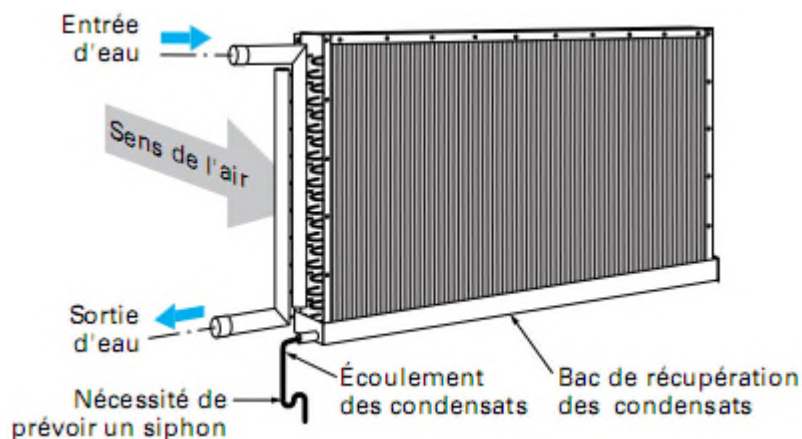


Figure II.14 Batterie froide alimentée en eau

➤ Humidificateur

L'humidificateur sert à augmenter la teneur en eau de l'air traité, c'est-à-dire à augmenter l'humidité absolue. Pour qu'il y ait humidification, il faut un contact étroit et intensif entre l'air et la source d'humidité.

Cette source d'humidité peut être : de l'eau ou de la vapeur.

➤ Caisson de bypass

Le caisson de bypass permet de limiter ou de faire varier la quantité d'air admise sur l'organe traitant. Il peut être monté sur une batterie chaude, une batterie froide ou un humidificateur. Il permet de moduler le débit traité et il économise l'énergie.

➤ Le Ventilateur

Le ventilateur se compose de deux éléments principaux : la roue et la volute ou l'enveloppe. (Figure II.15)

Il assure l'écoulement continu de l'air dans la centrale de traitement d'air, dans le réseau de distribution et de reprise d'air.

On distingue deux types de ventilateurs les plus utilisés, selon les besoins de l'installation :

- Les ventilateurs centrifuges: Ils permettent de véhiculer de l'air chargé de poussières, en fournissant des débits importants avec des pressions totales importantes.
- Les ventilateurs hélicoïdaux : Ils permettent de fournir de gros débits avec des pressions totales faibles.

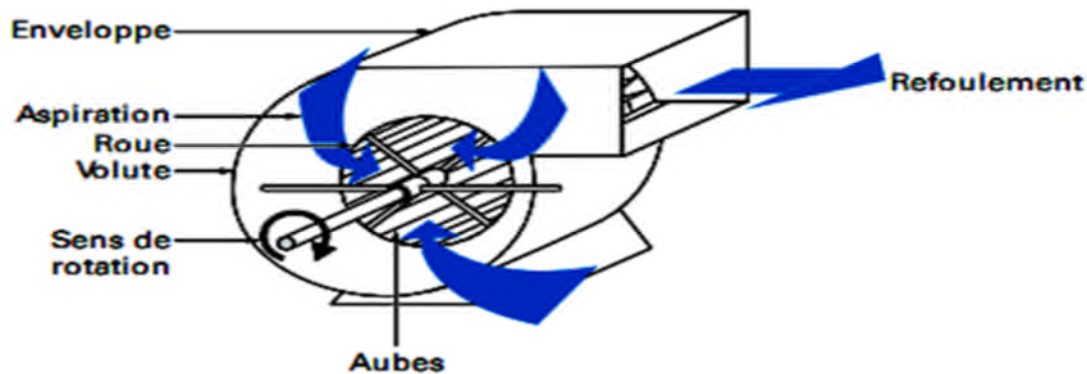


Figure II.15 Représentation d'un ventilateur centrifuge

II.4 Généralités sur le froid :

On peut définir la production de froid comme la mise en œuvre d'une suite de transformations thermodynamiques permettant d'extraire de la chaleur d'un milieu (source froide) pour abaisser et/ou maintenir sa température en dessous de la température ambiante. Ces transformations sont subies par une substance active (le frigorigène), qui prélève de la chaleur à la source froide, en rejette dans la source chaude et à laquelle on doit apporter de l'énergie en compensation. [25]

II.4.1 Machine frigorifique à compression mécanique :

Les machines les plus courantes fonctionnent en vaporisant le fluide frigorigène dans la chambre froide. C'est précisément au cours de cette opération que la chaleur est absorbée.

II.4.2 Eléments et principe de fonctionnement :

Le circuit frigorifique est constitué de quatre éléments principaux; compresseur, condenseur, Détendeur, évaporateur.

- ✓ **Compresseur** : Il permet de porter la pression du fluide frigorigène de la pression d'évaporation P_0 à la pression de condensation P_c
- ✓ **Condenseur** : C'est un échangeur de chaleur, il permet d'évacuer les calories absorbées à l'évaporateur et produites pendant la phase de compression. Lors de cet échange de chaleur, le fluide frigorigène passe de l'état gazeux à l'état liquide.

- ✓ **Evaporateur** : Le frigorigène se vaporise dans cet échangeur. La vapeur sortant peut être saturante ou plus souvent légèrement surchauffée. L'évaporation est effectuée à pression sortante (si l'on néglige les pertes de pression dans l'échangeur).
- ✓ **Détendeur** : Il alimente l'évaporateur avec un fluide à basse pression. Le fluide y subit une détente de la pression de condensation à la pression d'évaporation.

Par définition, les cycles frigorifiques à fluides liquéfiables reposent sur l'utilisation de l'évaporation comme principe de production de froid. Quelque soit le cycle frigorifique à fluides liquéfiables, le fluide frigorigène décrit dans la machine un cycle thermodynamique caractérisé par une succession de transformations. [26]

Le compresseur aspire en 1 à l'état de vapeur sèche le fluide frigorigère et le comprime en augmentant la pression et la température. En 2, la vapeur comprimée pénètre dans un échangeur de chaleur (le condenseur) où elle se condense en abandonnant sa chaleur latente Q_c . Le condensât sous pression, détendu de 3 à 4 dans le détendeur est envoyé en état de mélange diphasique dans le deuxième échangeur de chaleur de l'installation (l'évaporateur), où il prélève la chaleur Q_f et il s'évapore.

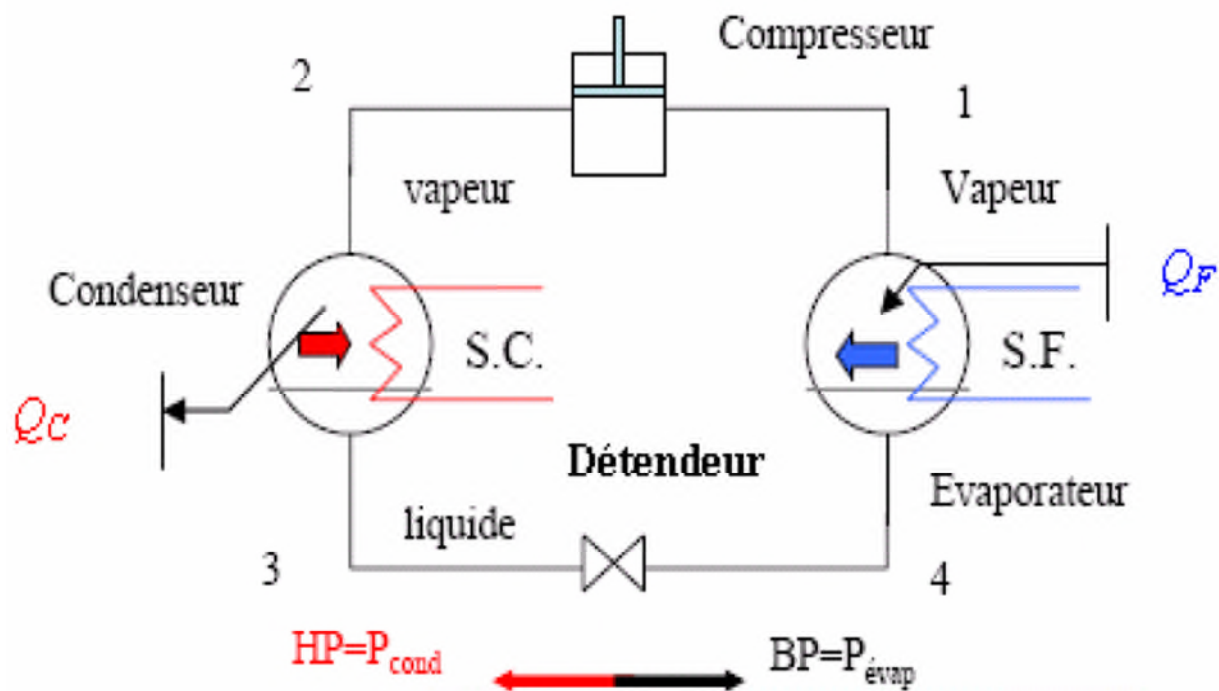


Figure II.16 Schéma d'un simple système frigorifique à compression

II.4.3 Cycle frigorifique :

Les diagrammes principalement utilisés par les frigoristes sont :

1. Le diagramme température-entropie T - S

2. Le diagramme pression-enthalpie (sous la forme $\ln(P) - H$)

II.4.3.1 Cycle idéal de Carnot :

Le cycle de Carnot est un cycle idéal réversible entre deux sources de chaleur, il est composé de deux isothermes et de deux isentropes (adiabatique réversible) [27]

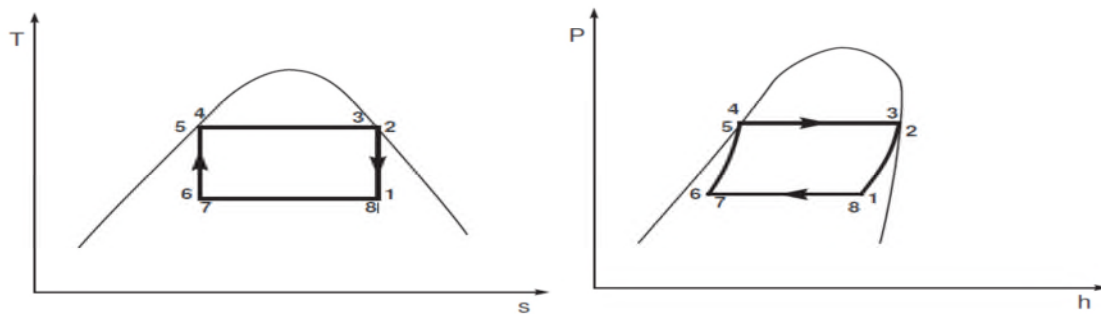


Figure II.17 Exemple d'un cycle de Carnot : représentation P-h et T-s

II.4.3.2 Cycle frigorifique de référence: (figure II.18)

Les différentes évolutions du fluide frigorigène dans la machine frigorifique sont représentées sur le diagramme enthalpique (h) en fonction de la pression (log P), il s'agit du cycle frigorifique de la machine communément appelée cycle de référence ou cycle pratique par les frigoristes. [28]

Le cycle frigorifique de référence permet l'étude et le dimensionnement des machines frigorifique avec une précision plus ou moins acceptable.

II.4.3.2.1 Principaux points du cycle :

- Entre 1 et 2 : compression des vapeurs de FF (fluide frigorigène) qui passent d'un niveau de basse pression (BP) à un niveau de haute pression (HP).
- Entre 2 et 3 : désurchauffe des vapeurs de FF (HP).
- Entre 3 et 4 : condensation des vapeurs de FF (HP) qui deviennent du FF liquide (HP).
- Entre 4 et 5 : sous refroidissement du FF liquide (HP).
- Entre 5 et 6 : détente du FF liquide (HP) qui devient un mélange de liquide (BP) et d'une faible quantité de vapeurs (BP).
- Entre 6 et 7 : évaporation du FF liquide (BP) qui devient des vapeurs de FF (BP).
- Entre 7 et 1 : surchauffe des vapeurs de FF (BP).

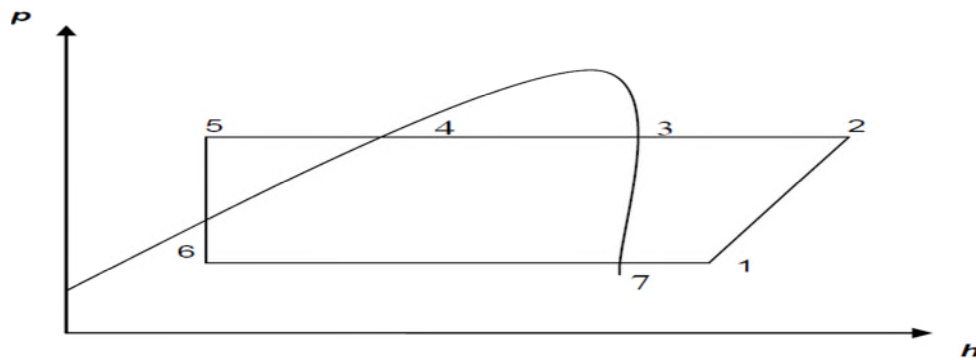


Figure II.18 Le cycle frigorifique de référence

II.4.4 Les critères thermodynamiques : [26]

Le coefficient de performance (COP), dépend fortement du choix du fluide. D'autres paramètres thermodynamiques (autres que le COP) doivent également pris en compte. Ce sont:

- La pression au condenseur (HP) : celle-ci ne doit pas excéder certaines valeurs pour des raisons de conception mécanique des composants (compresseur et condenseur)
- La pression à l'évaporateur (BP) : on évite généralement des basses pressions inférieures à la pression atmosphérique pour limiter les risques d'entrée d'air dans le circuit frigorifique
- La température de refoulement au compresseur : cette température est généralement très supérieure à la température de condensation du fluide ; la surchauffe de la vapeur est dépendante du fluide frigorigène retenu et de la technologie utilisée
- Le taux de compression (rapport HP/BP) : il admet des valeurs comprises entre 2 et 5 dans les installations courantes ; un taux de compression excessif génère une dégradation du rendement volumique et du rendement indiqué du compresseur, il génère aussi une température de refoulement excessive.

II.5 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons montré les différentes techniques de séchage et leurs domaines d'utilisation, ainsi que les caractéristiques de l'air humide et les opérations permettant sont traitement et nous avons fait un aperçu sur le froid en général.

Chapitre III :

Etude de l'installation de séchage

III.1 Introduction :

Ce chapitre a pour but d'étudier les étapes nécessaires pour obtenir un sucre sec qui arrive à l'entrée du séchoir avec une humidité très élevée, ce dernier est traité par un sécheur à tambour/lit fluidisé qui le déshumidifie et le refroidit pour le stocker.

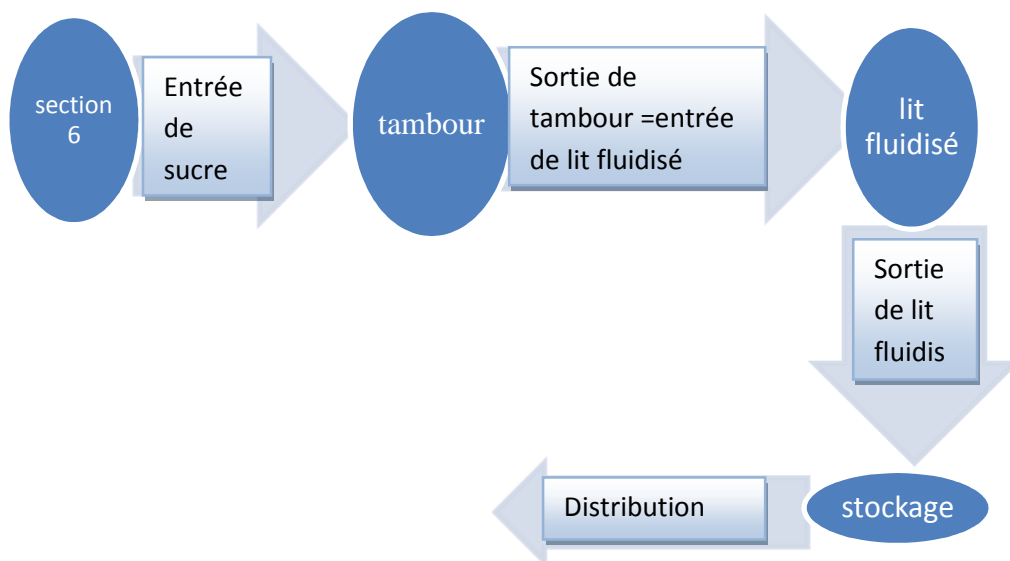
Dans cette étude nous allons établir des calculs pour déterminer les caractéristiques de sucre à sécher, l'air de séchage, l'air de refroidissement et les différents débits aux bornes de séchoir, ainsi que les différentes pertes et apports thermiques dans l'installation de séchage.

III.2 Procès de calcul :

Pour mieux comprendre le déroulement des calculs nous allons présenter le processus de calculs des caractéristiques de sucre et de l'air, les pertes et les apports thermiques de l'installation.

a) caractéristiques de sucre :

Après le passage de sucre par la section (6) (centrifugation), il se dirige vers la section (7) (séchage) qui contient deux éléments principaux (tambour et lit fluidisé), où le sucre subit des changements de température et d'humidité, ce processus est représenté dans la figure suivante :



b) traitement d'air :

Dans cette partie de calcul on détermine les caractéristiques de l'air pour chaque point de l'installation

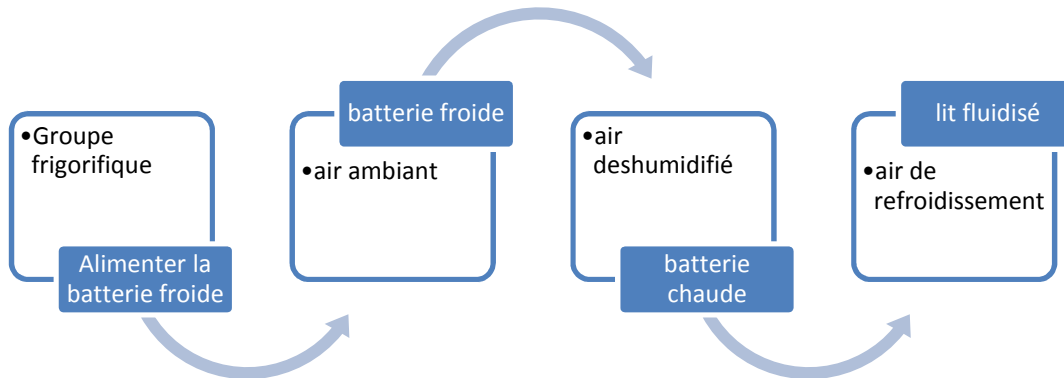
- l'air de séchage :

Les caractéristiques de l'air ambiant (température et humidité) ne permettent pas de sécher le sucre, ce qui fait intervenir une batterie chaude pour fournir un air sec et chaud à l'entrée de tambour



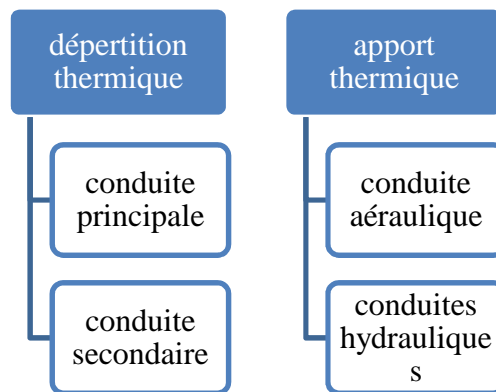
• **l'air de refroidissement :**

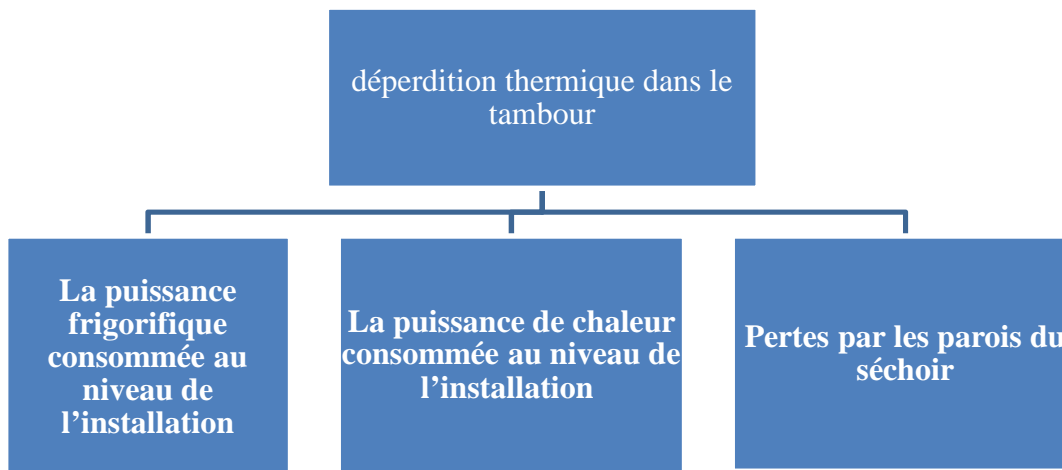
L'air traité par une batterie froide et une batterie chaude arrive à l'entrée de lit fluidisé préparé en matière de température et d'humidité



• **les pertes et les apports thermiques :**

Des pertes et apports observés dans l'installation de séchage se résument dans les figures ci-dessous





III.3 Hypothèses de calculs :

Au cours des calculs qui suit, nous allons s'appuyer sur des hypothèses simplificatrices suivantes :

Au cours du séchage on suppose que, seul l'eau quitte le produit et que le débit de la matière sèche se conserve entre l'entrée et la sortie en régime permanent (les débits massiques sont constants et indépendants du temps). [29]

- La vaporisation de l'eau contenue dans le sucre s'effectue sans ébullition, l'énergie de surchauffe sous forme de chaleur est fournie par le sucre qui entre dans le sécheur avec une température supérieure à celle de vaporisation de l'eau sous la pression qui règne à l'intérieur du tambour. [6]
- Pour un débit de 145,83 T/h les températures de fonctionnement pour le sécheur et le refroidisseur restent les mêmes qu'en fonctionnement sous un débit de 125T/h.
- Les grains de sucre sont supposés sphériques.
- A la fluidisation, la masse des grains par unité de surface équilibre la chute de pression à la traversée de la couche. Les vitesses de fluidisation ne seront pas alors très grandes.

[32]

III.4 Caractéristiques de sucre :

III.4.1 Teneur en eau du sucre :

L'état de siccité d'un produit est caractérisé par sa teneur en eau. Celle-ci peut être exprimée par rapport à la masse totale de produit par rapport à la masse de matière sèche.

- Soit la masse de matière sèche contenue dans l'échantillon

$$\text{Teneur en eau } S = \left(\frac{m_e}{m_s} \right) \cdot 100 = \left[\frac{m_p - m_s}{m_s} \right] \cdot 100 \quad (\text{III.1})$$

m_e : Masse d'eau

m_s : Masse de la matière sèche

- Soit (m_p) la masse totale de la matière humide
- Humidité: $W = \left(\frac{m_e}{m_p}\right) \cdot 100 = \left[\left(\frac{m_p - m_s}{m_p}\right)\right] \cdot 100$

$$\text{Soit : } W = \frac{(100.S)}{(S+100)} \quad (\text{III.2})$$

La teneur en eau du sucre x est exprimée en $\left[\frac{\text{kg}_e}{\text{kg}_s}\right]$ par la formule suivante :

$$x = \frac{S}{100} \Rightarrow x = \frac{m_e}{m_s} \left[\frac{\text{kg}_e}{\text{kg}_s}\right] \quad (\text{III.3})$$

III.4.2 Flux d'enthalpie de sucre :

Le flux d'enthalpie de sucre \emptyset est donné par la relation suivante :

$$\emptyset = \dot{m} \cdot H[\text{kW}] \quad (\text{III.4})$$

H : Enthalpie massique

L'enthalpie massique $H_p \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_p}\right]$ de produit humide donc entrant ou sortant avec son eau se déduit de sa température θ_p et de son C_p qui varie avec la teneur en eau X_p du moment. [33] ($C_p=4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) et de la matière sèche ($C_p=0,3 * 4,18 \text{ kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), soit exprimée en fonction de d'humidité W (équation (III.5)) ou de la teneur en eau x (équations (III.6)) avec θ_p en $^\circ\text{C}$:

$$H_p = C_p \cdot \theta_p \approx [4,18 \cdot W + 0,3 \cdot 4,18 \cdot (1 - W)] \cdot \theta_p \quad (\text{III.5})$$

$$H_p = 4,18 \cdot [0,7 \cdot W + 0,3] \cdot \theta_p$$

$$H_p = C_p \cdot \theta_p \approx \frac{1}{(1+x)} \cdot [4,18 \cdot x + 0,3 \cdot 4,18 \cdot 1] \cdot \theta_p \quad (\text{III.6})$$

$$H_p = 4,18 \cdot \left[\frac{x + 0,3}{1 + x}\right] \cdot \theta_p$$

III.5 Dimensionnement de l'installation :

Avant d'entamer les calculs, il est indispensable d'exposer nos différentes données obtenues durant la période de stage [3, 2], qui vont être présenté sous forme des tableaux de la façon suivante :

Propriétés de sucre :

Les températures et les humidités de sucre avant et après le séchage sont rapportées sur le tableau III.1

	Entrée	Sortie
Température $^\circ\text{C}$	53,2	25,3
Humidité %	0,30	0,02

Tableau III.1 Caractéristique de sucre

Propriétés de l'air :

Les températures et les humidités de l'air de séchage et de refroidissement sont rapportées sur le tableau III.2

	Température °C	Humidité %
L'air humide	25	80
Entrée de Tambour	97	100
Sortie de tambour	75	%
Entrée de lit fluidisé	23	56,71
Sortie de lit fluidisé	48	64

Tableau III.2 Caractéristique de l'air

III.5.1 Séchage de sucre :

Pour calculer les différentes grandeurs caractérisant le séchage du sucre, nous établissons des bilans massiques et thermiques sur les entrées et sorties de l'air et du sucre. Les chemins suivis par le sucre et l'air de séchage ainsi que les variables utiles sont définies sur la figure III.1

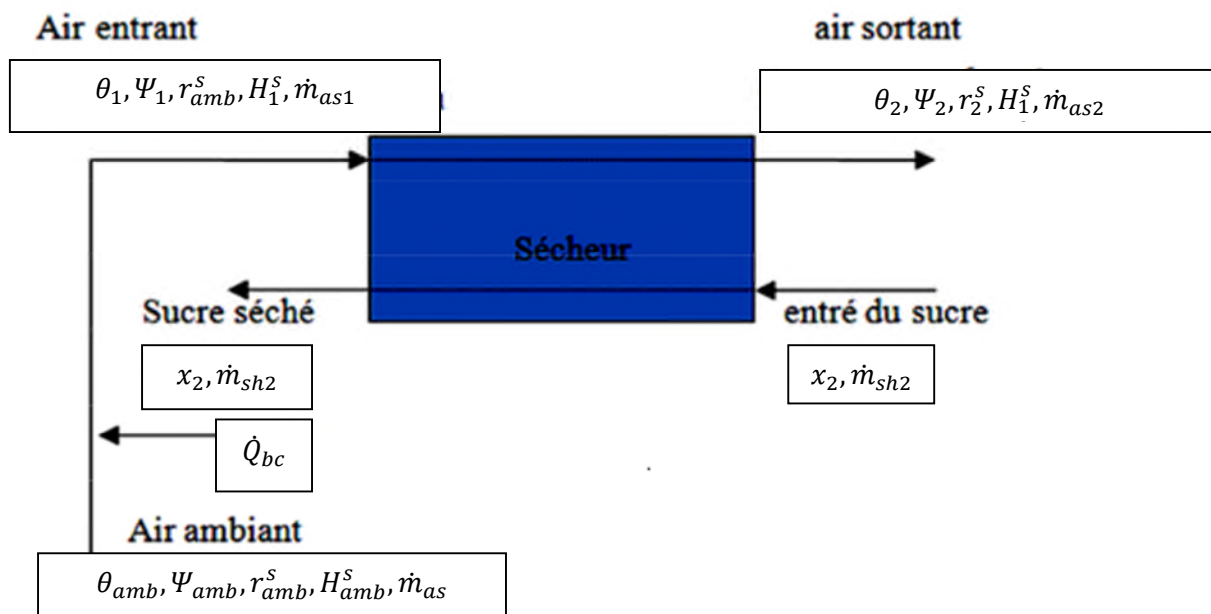


Figure III.1 Principe de séchage du sucre

III.5.1.1 Calcul du débit de sucre humide :

Le sécheur/refroidisseur à tambour présente une capacité de production de sucre de 145.83 t/h soit 40.51 kg/s, pour déterminer le débit de fonctionnement en chaque étape nous utilisons un bilan de masse basé sur la conservation de la matière sèche en chaque étape.

On note :

$$x_{s,1} = \frac{0.30}{100} = 0.003 \left[\frac{\text{Kge}}{\text{Kgs}} \right] \text{Teneur de sucre à l'entrée du sécheur.}$$

$$x_{s,2} = \frac{0.02}{100} = 0.0002 \left[\frac{\text{Kge}}{\text{Kgs}} \right] \text{Teneur de sucre à la fin de l'opération de séchage}$$

Le débit massique de sucre à la sortie du séchoir

$$\dot{m}_{sh2} = 40.51 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{S}} \right]$$

Le débit massique de sucre à l'entrée du séchoir

La conservation de la matière sèche nous donne :

$$\dot{m}_{ss1} = \dot{m}_{ss2} = \dot{m}_s \Rightarrow \dot{m}_{sh1} - \dot{m}_{e1} = \dot{m}_{sh2} - \dot{m}_{e2}$$

$$\dot{m}_{sh1} = \dot{m}_{sh2} \left(\frac{1 - x_{s,2}}{1 - x_{s,1}} \right)$$

$$\dot{m}_{sh,1} = 40.51 \left(\frac{1 - 0.0002}{1 - 0.003} \right)$$

$$\dot{m}_{sh,1} = 40.62 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{S}} \right]$$

III.5.1.2 Débit de l'eau à extraire de sucre :

On détermine les débits massiques de l'eau introduit et sortant de sécheur ainsi que le débit de l'eau extrait

Le débit massique de l'eau à l'entrée de sécheur :

$$x_{s,1} = \frac{\dot{m}_{e1}}{\dot{m}_{ss1}} \Rightarrow \dot{m}_{e1} = \dot{m}_{ss1} \cdot x_{s,1}$$

$$\dot{m}_{e1} = \frac{\dot{m}_{sh,1}}{1 + x_{s,1}} \cdot x_{s,1}$$

$$\dot{m}_{e1} = \frac{40.62}{1 + 0.003} \cdot 0.003$$

$$\dot{m}_{e1} = 0.1215 \text{ [kg/S]}$$

Le débit massique de l'eau à la sortie de sécheur :

$$x_{s,2} = \frac{\dot{m}_{e2}}{\dot{m}_{ss2}} \Rightarrow \dot{m}_{e2} = \dot{m}_{ss2} \cdot x_{s,2}$$

$$\dot{m}_{e2} = \frac{\dot{m}_{sh,2}}{1 + x_{s,2}} \cdot x_{s,2}$$

$$\dot{m}_{e2} = \frac{40.51}{1 + 0.0002} \cdot 0.0002 \text{ [kg/S]}$$

$$\dot{m}_{e2} = 8,1004 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{kg}}{\text{S}} \right] = 29,1614 \text{ [kg/h]}$$

Le débit de l'eau à extraire de sucre :

La conservation de la matière sèche nous donne :

$$\frac{\dot{m}_{sh,1}}{1 + x_{s,1}} = \frac{\dot{m}_{sh,2}}{1 + x_{s,2}}$$

$$\dot{m}_{e,sucre} = \dot{m}_{e1} - \dot{m}_{e2}$$

$$\text{On aura : } \dot{m}_{e,sucre} = \frac{\dot{m}_{sh,1}}{1+x_{s,1}} \cdot x_{s,1} - \frac{\dot{m}_{sh,2}}{1+x_{s,2}} \cdot x_{s,2}$$

$$\dot{m}_{e,sucre} = \dot{m}_{sh,1} \cdot \left(\frac{x_{s,1} - x_{s,2}}{1 + x_{s,1}} \right)$$

$$\dot{m}_{e,sucre} = 40.62 * \left(\frac{0.003 - 0.0002}{1 + 0.003} \right)$$

$$\dot{m}_{e,sucre} = 0.1134 \left[\frac{\text{kg}}{\text{S}} \right] = 408.2249 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

III.5.1.3 Enthalpie du sucre :

L'enthalpie de sucre est donnée par l'équation (III.6)

$$H_s = 4,18 \cdot \left(\frac{x_s + 0,3}{1 + x_s} \right) \cdot \theta_s$$

Entrée de sécheur :

$$\text{Pour } \theta_{s1} = 53.2^\circ\text{C} \text{ Et } x_{s1} = 0.003$$

$$H_{s1} = 4,18 \cdot \left(\frac{x_{s1} + 0,3}{1 + x_{s1}} \right) \cdot \theta_{s1}$$

$$H_{s1} = 4,18 \left(\frac{0.003 + 0,3}{1 + 0.003} \right) 53.2$$

$$H_{s1} = 67.1784 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$$

Sortie de sécheur :

$$\text{Pour } \theta_{s2} = 25.3^\circ\text{C} \text{ Et } x_{s2} = 0.0002$$

$$H_{s2} = 4,18 \left(\frac{x_{s2} + 0,3}{1 + x_{s2}} \right) \theta_{s2}$$

$$H_{s2} = 4,18 \left(\frac{0.0002 + 0,3}{1 + 0.0002} \right) 25.3$$

$$H_{s2} = 31.7410 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$$

III.5.1.4 Puissance nécessaire pour évaporer l'eau (puissance utile) :

Pour calculer la puissance utile pour évaporer l'eau extrait de sucre on utilise l'équation suivante (III.1) :

$$\dot{Q}_u = (\dot{m}_{sh1} \cdot H_{s1}) - (\dot{m}_{sh2} \cdot H_{s2}) \text{ (III.1)}$$

$$\dot{Q}_u = (40.62 * 67.1784) - (40.51 * 31.7410)$$

$$\dot{Q}_u = 1442.959 \text{ KW} = 1.443 \text{ MW}$$

III.5.2 Caractéristique de l'air :**III.5.2.1 Air de séchage :**

L'air utilisé pour le séchage est aspiré de l'extérieur avec une température de 25°C et une humidité relative $\Psi=80\%$ (condition défavorable) [3], ce qui fait un traitement d'air s'impose pour garantir le bon déroulement de séchage

III.5.2.1.1 Batterie chaude :

Dans un échangeur de chaleur (batterie chaude) l'air ambiant se réchauffe jusqu'à une température $\theta=97^\circ\text{C}$ [2, 3], avec une humidité spécifique constante.

- **A l'entrée de la batterie chaude :**

En utilisant le diagramme de CARRIE pour déterminer les caractéristiques de l'air ambiant on obtient

Pour $\theta_1 = 25^\circ\text{C}$ ET $\Psi = 80\%$

$$H_{a \text{ amb}}^s = 65.83 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{kg}_{\text{as}}} \right]$$

$$r^s = 15.97 \left[\frac{\text{g}_e}{\text{kg}_{\text{as}}} \right] = 0.01597 \left[\frac{\text{kg}_e}{\text{kg}_{\text{as}}} \right]$$

$$V^s = 0.8659 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{\text{as}}} \right]$$

- **A la sortie de la batterie chaude :**

$$\theta = 97^\circ\text{C} \text{ ET } r_1^s = r_2^s = r^s = 0.01597 \left[\frac{\text{kg}_e}{\text{kg}_{\text{as}}} \right]$$

Dans cette étape on ne peut pas utiliser le diagramme de CARRIER Pour déterminer les différentes caractéristiques de l'air, alors on utilise les formules suivantes :

$$H^s = 1,000\theta + r^s(2500,8 + 1,8266\theta) \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{a,s}}} \right]$$

$$V^s = \frac{461,24 \cdot (0,622 + r^s) T}{P_{at}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{\text{as}}} \right]$$

$$H_2^s = 1,000 * 97 + 0,01597(2500,8 + 1,8266 * 97) \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{as}}} \right]$$

$$H_2^s = 139,7673 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{kg}_{\text{as}}} \right]$$

$$V_2^s = \frac{461,24 * (0,622 + 0,01597) * (273,15 + 97)}{101325} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{\text{as}}} \right]$$

$$V_2^s = 1,0749 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{\text{as}}} \right]$$

III.5.2.1.1.1 Bilans massiques :**✚ Bilan massique de l'air sec :**

Conservation de la masse d'air sec :

$$\dot{m}_{a,1} - \dot{m}_{a,2} = 0$$

$$\dot{m}_{a,1} = \dot{m}_{a,2} = \dot{m}_a$$

$\dot{m}_{a,1}$: Débit massique de l'air sec a l'entrée

$\dot{m}_{a,2}$: Débit massique de l'air sec a la sortie

$$\text{D'où : } \dot{m}_a = \frac{q_v}{(1+r^s).V^s}$$

Pour un débit volumique de l'air humide donné qu'égal à :

$$q_v = 1631 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \text{ Soit } q_v = 67,9583 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

$$\text{Et } r_1^s = r^s = 0.01597 \left[\frac{\text{Kg}_e}{\text{Kg}_{as}} \right] ; V_1^s = V^s = 1,0749 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{as}} \right]$$

$$\dot{m}_a = \frac{67,9583}{(1 + 0.01597) * 1,0749} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

$$\dot{m}_a = 62,2401 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

✚ Bilan massique de l'eau :

$$r_1^s = r_2^s = r^s$$

$$\text{Avec } r^s = \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}_a} \Rightarrow \dot{m}_e = \dot{m}_a \cdot r^s$$

$$\dot{m}_a \cdot r^s = \dot{m}_{a,1} \cdot r_1^s = \dot{m}_{a,2} \cdot r_2^s$$

$$\text{D'où } \dot{m}_e = \dot{m}_{e1} = \dot{m}_{e2}$$

$$\dot{m}_e = 62,2401 * 0.01597$$

$$\dot{m}_e = 0,9940 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

III.5.2.1.1.1 Puissance calorifique a la batterie chaude :**➤ Bilan d'énergie :**

$$\dot{m}_{a,1} \cdot H_1^s + \dot{Q}_{bc} - \dot{m}_{a,2} \cdot H_2^s = 0$$

$$\dot{Q}_{bc} = \dot{m}_a \cdot (H_2^s - H_1^s)$$

$$\dot{Q}_{bc} = 62,2401(139,7673 - 65.83)$$

$$\dot{Q}_{bc} = 4601,8724[\text{kW}]$$

\dot{Q}_{bc} : La puissance calorifique à apporter à l'air pour obtenir sa température.

III.5.2.1.2 Air dans le tambour

L'air sec arrive à l'entrée de tambour avec une température $\theta_{1,tam} = 97^\circ\text{C}$ et une humidité spécifique $r_{1,tam}^s = r^s = 0.01597 \left[\frac{\text{kg}_e}{\text{kg}_{as}} \right]$, cet air sert à déshumidifier le sucre qui arrive au niveau de tambour avec une humidité $x_{s,1} = 0.003 \left[\frac{\text{kg}_e}{\text{kg}_s} \right]$

➤ Entrée du tambour :

Pour : $\theta_{1,tam} = 97^\circ\text{C}$ $E_{tr,1,tam}^s = r^s = 15.97 \left[\frac{\text{g}_e}{\text{kg}_s} \right] = 0.01597 \left[\frac{\text{kg}_e}{\text{kg}_{as}} \right]$

$$H_{1,tam}^s = 139,7673 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{as}} \right]$$

$$V_{1,tam}^s = 1,0749 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{as}} \right]$$

➤ Sortie de tambour :

$\theta_{2,tam} = \theta_{eq\theta} = 75^\circ\text{C}$ et $H_{1,tam}^s = H_{2,tam}^s = 139,7673 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{as}} \right]$ [34]

$$r_{2,tam}^s = \frac{H^s - 1.006\theta}{(2500.8 + 1.8266\theta)} \left[\frac{\text{g}_e}{\text{kg}_{as}} \right]$$

$$r_{2,tam}^s = \frac{139,7673 - 75 * 1.006}{(2500.8 + 1.8266 * 75)} \left[\frac{\text{g}_e}{\text{kg}_{as}} \right]$$

$$r_{2,tam}^s = 0,02438 \left[\frac{\text{g}_e}{\text{kg}_{as}} \right]$$

$$V^s = \frac{461,24 \cdot (0,622 + r^s) T}{P_{at}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{as}} \right]$$

$$V_{2,tam}^s = \frac{461,24 * (0,622 + 0,02438) * (273,15 + 75)}{101325} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{as}} \right]$$

$$V_{2,tamb}^s = 1,02439 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{as}} \right]$$

III.5.2.1.2.1 Bilans massiques:

Les bilans s'écrivent sur la base des débits constants de matière sèche et de l'air sec, on exprime que l'eau que perd le produit est gagnée par l'air.

➤ Bilan massique de l'air sec :

La conservation du débit de l'air sec donne

$$\dot{m}_{as1} - \dot{m}_{as2} = 0 \Rightarrow \dot{m}_{as1} = \dot{m}_{as2} = \dot{m}_{as} = 62,2401$$

➤ Bilan massique de l'eau :

$$\dot{m}_{as,1} \cdot r_1^s - \dot{m}_{as,2} r_2^s + \dot{m}_{e,tam} = 0$$

$$\Rightarrow \dot{m}_{e,tam} = \dot{m}_{as} * (r_2^s - r_1^s)$$

$$\dot{m}_{e,tam} = 62,2401 * (0,02438 - 0,01597)$$

$$\dot{m}_{e,tam} = 0,5234 \left[\frac{\text{kg}}{\text{S}} \right] = 1884,3813 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

➤ **Débit volumique :**

Conservation de la masse d'air sec :

$$\dot{m}_{a,1} - \dot{m}_{a,2} = 0$$

$$\dot{m}_{a,1} = \dot{m}_{a,2} = \dot{m}_a$$

$\dot{m}_{a,1}$: Débit massique de l'air sec a l'entrée

$\dot{m}_{a,2}$: Débit massique de l'air sec a la sortie

$$\text{D'où : } \dot{m}_a = \frac{q_v}{(1+r^s).V^s}$$

Le débit volumique de l'air de séchage est donné par la relation :

$$q_v = \dot{m}_{as} \cdot (1 + r^s) \cdot V^s$$

➤ A l'entrée de tambour

$$q_{v,1} = \dot{m}_{as} \cdot (1 + r_1^s) \cdot V_1^s$$

$$q_{v,1} = 62,2401 * (1 + 0,01597) * 1,0749$$

$$q_{v,1} = 67,9703 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{S}} \right]$$

➤ A la sortie de tambour :

$$q_{v,2} = \dot{m}_{as} \cdot (1 + r_2^s) \cdot V_2^s$$

$$q_{v,2} = 62,2401 * (1 + 0,02438) * 1,02439$$

$$q_{v,2} = 65,3125 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{S}} \right]$$

Le débit volumique moyen :

$$q_{moy} = \frac{q_{v1} + q_{v2}}{2}$$

$$q_{moy} = \frac{67,9703 + 65,3125}{2}$$

$$q_{moy} = 66,6414 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{S}} \right]$$

III.5.2.1.2.2 Calcul de la puissance de chauffage :

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{as} \cdot (H_1^s - H_{a,amb}^s)$$

$$\dot{Q}_c = 62,2401 * (139,7673 - 65,83)$$

$$\dot{Q}_c = 4601,8677[\text{kW}]$$

III.5.2.2 Air de refroidissement

III.5.2.2.1 Opération de refroidissement de l'air humide avec déshumidification

Cette opération a pour but de réduire la teneur en eau de l'air humide, ce dernier quitte la batterie froide à une température inférieure à la température de rosé, l'établissement des bilans thermique et massique de l'air nous permet de déterminer la puissance frigorifique nécessaire à la batterie froide.

La figure (III.2) explique le principe de refroidissement de l'air avec déshumidification.

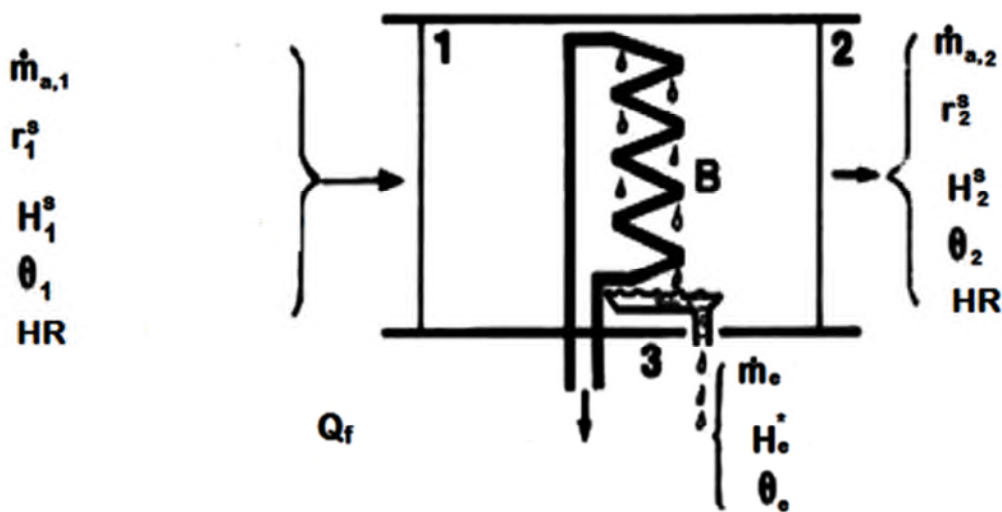


Figure III.2 Refroidissement de l'air avec déshumidification

- Air à l'entrée de la batterie froide :

Pour $\Psi = 80\%$ et $\theta_2 = 25^\circ\text{C}$

$$r_1^s = 15.97 \left[\frac{\text{g}_e}{\text{kg}_{\text{gas}}} \right] = 0.01597 \left[\frac{\text{kg}_e}{\text{kg}_{\text{gas}}} \right]$$

$$H_1^s = 65.83 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{gas}}} \right]$$

$$V_1^s = 0.8659 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{\text{gas}}} \right]$$

- Air à la sortie de la batterie froide :

Pour $\Psi = 100\%$ et $\theta_2 = 14^\circ\text{C}$

D'après le diagramme de carrier :

$$r_2^s = 0.00998 \frac{\text{kg}_e}{\text{kg}_s} = 9.98 \frac{\text{g}_e}{\text{kg}_s}$$

$$H_2^s = 39.31 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{as}}}$$

$$V_2^s = 0.8261 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{\text{as}}}$$

III.5.2.2.1.1 bilans massique :

✚ Bilan massique de l'air sec :

Conservation de la masse d'air sec :

$$\dot{m}_{a,1} - \dot{m}_{a,2} = 0$$

$$\dot{m}_{a,1} = \dot{m}_{a,2} = \dot{m}_a$$

$\dot{m}_{a,1}$: Débit massique de l'air sec a l'entrée

$\dot{m}_{a,2}$: Débit massique de l'air sec a la sortie

$$\text{D'où : } \dot{m}_a = \frac{q_v}{(1+r^s).V^s}$$

Pour un débit volumique de l'air humide donné qu'égal a :

$$q_v = 84 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \text{ Soit } q_v = 1.4 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

$$\text{Et } r_1^s = r^s = 0.01597 \left[\frac{\text{kg}_e}{\text{kg}_{\text{as}}} \right] ; V_1^s = V^s = 0.8659 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{\text{as}}} \right]$$

$$\dot{m}_a = \frac{1.4}{(1 + 0.01597) * 0.8659} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

$$\dot{m}_a = 1.5914 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

➤ Bilan massique de l'eau :

$$\dot{m}_{a,1} \cdot r_1^s - \dot{m}_e - \dot{m}_{a,2} \cdot r_2^s$$

$$\dot{m}_e = \dot{m}_a \cdot (r_1^s - r_2^s)$$

$$\dot{m}_e = 1.5914(0.01597 - 0.00998)$$

$$\dot{m}_e = 0.00955 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

III.5.2.2.1.2 Puissance calorifique à la batterie froide :

➤ Bilan énergétique :

$$\dot{m}_{a,1} \cdot H_1^s - \dot{m}_e \cdot H_e^* - \dot{Q}_{\text{bf}} - \dot{m}_{a,2} \cdot H_2^s = 0$$

$$\dot{Q}_{\text{bf}} = \dot{m}_a \cdot (H_1^s - H_2^s) - \dot{m}_e \cdot H_e^* [\text{kW}]$$

$$H_e^* = 4,194 \cdot \theta_e$$

$$\theta_e < \theta_{\text{rosé}} \text{ Dans ce cas } \theta_e = 10^\circ\text{C}$$

$$H_e^* = 4.194 * 10 = 41.94 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$$\dot{Q}_{bf} = 1.5914(65.83 - 39.31) - 0.00955 * 41.94$$

$$\dot{Q}_{bf} = 41.8034[\text{kW}]$$

H_e^* : Enthalpie massique de l'eau

\dot{Q}_{bf} : Puissance nécessaire à la batterie froide

III.5.2.2.2 Echauffement de l'air avec une batterie chaude :

L'air humide est acheminé vers une batterie chaude pour assure les températures de fonctionnement de lit fluidisé (refroidisseur) qu'est égale à 23°C [3], cette opération se déroule à un taux de l'humidité spécifique constant.

La figure (III.3) nous permet de voir le principe de cette opération ainsi que les variables utilisées lors de l'établissement des bilans massiques et thermiques afin de d'évaluer la quantité de chaleur à apporter à cet air pour qu'il soit prêt

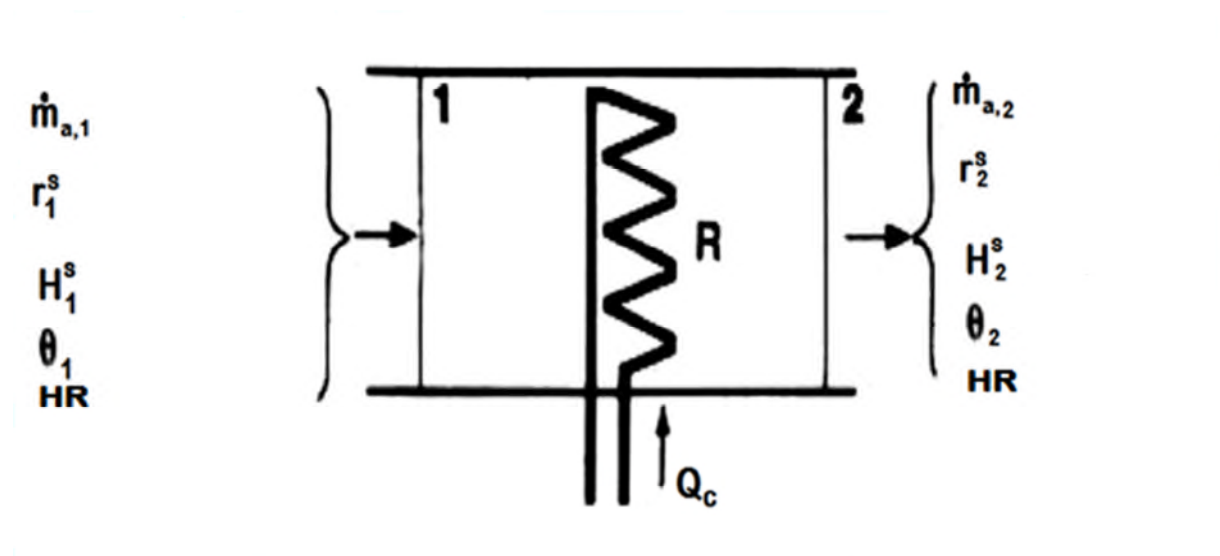


Figure.III.3 Echauffement de l'air à humidité spécifique constante

- **A l'entrée de la batterie chaude :**

Pour $\Psi = 100\%$ et $\theta_1 = 14^\circ\text{C}$

$$r_1^s = 0.00998 \frac{\text{kg}_e}{\text{kg}_s} = 9.98 \frac{\text{g}_e}{\text{kg}_s}$$

$$H_1^s = 39.31 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{as}}$$

$$V_1^s = 0.8261 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{as}}$$

- **A la sortie de la batterie chaude :**

$$\theta = 23^\circ\text{C} \quad \text{ET} \quad r_1^s = r_2^s = r^s = 0.00998 \left[\frac{\text{kg}_e}{\text{kg}_{as}} \right]$$

$$H_2^S = 48.52 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{as}}} \right]$$

$$V_2^S = 0.85 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{\text{as}}}$$

$$\Psi = 56,71\%$$

III.5.2.2.2.1 Bilans massiques :

➤ Bilan massique l'air sec :

Le débit de l'air sec se conserve

$$\dot{m}_{a,1} = \dot{m}_{a,2} = \dot{m}_a$$

$$\text{Avec } \dot{m}_{a,1} = 1.5914 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right]$$

➤ Bilan massique de l'eau :

$$r_1^S = r_2^S = r^S$$

$$\text{Avec } r^S = \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}_a} \Rightarrow \dot{m}_e = \dot{m}_a \cdot r^S$$

$$\dot{m}_a \cdot r^S = \dot{m}_{a,1} \cdot r_1^S = \dot{m}_{a,2} \cdot r_2^S$$

$$\text{D'où } \dot{m}_e = \dot{m}_{e1} = \dot{m}_{e2}$$

$$\dot{m}_e = 1.5914 * 0.00998$$

$$\dot{m}_e = 0.01588 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right]$$

III.5.2.2.2.2 La puissance calorifique a la batterie chaude :

➤ Bilan d'énergie :

$$\dot{m}_{a,1} \cdot H_1^S + \dot{Q}_{bc} - \dot{m}_{a,2} \cdot H_2^S = 0$$

$$\dot{Q}_{bch} = \dot{m}_a \cdot (H_2^S - H_1^S)$$

$$\dot{Q}_{bch} = 1.5914(48.52 - 39.31)$$

$$\dot{Q}_{bch} = 14.6568[\text{kW}]$$

\dot{Q}_{bch} : La puissance calorifique à apporter à l'air pour obtenir sa température.

III.5.2.2.3 L'air à lit fluidisé :

Cette étude est dans le but de déterminé les caractéristiques de l'air utiliser dans le lit fluidisé pour refroidir le sucre arrive de tambour

• A l'entrée de lit fluidisé :

Pour : $\theta_{1,\text{lit}} = 23^\circ\text{C}$ Et $\Psi = 56,71\%$

$$H_1^S = 48.52 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{as}}} \right]$$

$$V_1^s = 0.85 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{\text{as}}}$$

$$r_1^s = 0.00998 \left[\frac{\text{kg}_e}{\text{kg}_{\text{as}}} \right]$$

- **A la sortie de lit fluidisé :**

$$\theta_{2,\text{lit}} = 48^\circ\text{C} \quad \Psi = 64\%$$

$$r_2^s = 0.0498 \left[\frac{\text{kg}_e}{\text{kg}_s} \right]$$

$$H_2^s = 177,12 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{as}}} \right]$$

$$V_2^s = 0,98 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{\text{as}}} \right]$$

III.5.2.2.3.1 Bilans de l'air de refroidissement :

Pour déterminer les différents débits de l'air de refroidissement on procède à des bilans qui s'écrivent sur la base des débits constants de matière sèche et de l'air sec, on exprime que l'eau que perd le produit est gagnée par l'air.

- **Bilan massique de l'air sec :**

Le débit de l'air sec se conserve :

$$\dot{m}_{\text{as}1} - \dot{m}_{\text{as}2} = 0 \Rightarrow \dot{m}_{\text{as}1} = \dot{m}_{\text{as}2} = \dot{m}_{\text{as}} = \dot{m}_{\text{a,bf}}$$

$$\dot{m}_{\text{as}} = \dot{m}_{\text{a,bf}} = 1.5914 \left[\frac{\text{kg}}{\text{S}} \right]$$

- **Bilan massique de l'eau :**

$$\dot{m}_{\text{as},1} \cdot r_1^s - \dot{m}_{\text{as},2} r_2^s + \dot{m}_{\text{e,lit}} = 0$$

$$\Rightarrow \dot{m}_{\text{e,lit}} = \dot{m}_{\text{as}} * (r_2^s - r_1^s)$$

$$\dot{m}_{\text{e,lit}} = 1.5914(0,0498 - 0.00998)$$

$$\dot{m}_{\text{e,lit}} = 0,0634 \left[\frac{\text{kg}}{\text{S}} \right] = 228,1304 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

- **Débit volumique :**

Le débit volumique de l'air de séchage est donné par la relation :

$$q_v = \dot{m}_{\text{as}} \cdot (1 + r^s) \cdot V^s$$

- **Entrée de lit fluidisé :**

$$q_v = \dot{m}_{\text{as}} \cdot (1 + r_1^s) \cdot V_1^s$$

$$q_{v,1} = 1.5914(1 + 0.00998)0.85$$

$$q_{v,1} = 2,4499 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{S}} \right]$$

- **Sortie de lit fluidisé :**

$$q_{v,2} = \dot{m}_{as} \cdot (1 + r_2^s) \cdot V_2^s$$

$$q_{v,2} = 1.5914(1 + 0,0498)0,98$$

$$q_{v,2} = 1,6372 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{S}} \right]$$

- **Débit volumique moyen :**

$$q_{\text{moy}} = \frac{q_{v1} + q_{v2}}{2}$$

$$q_{\text{moy}} = \frac{2,4499 - 1,6372}{2}$$

$$q_{\text{moy}} = 0,8127 \frac{\text{m}^3}{\text{S}}$$

III.5.2.2.3 .2 Puissance absorbée par l'air de refroidissement :

$$\dot{Q}_{af} = \dot{m}_{as}(H_2^s - H_1^s)$$

$$\dot{Q}_{af} = 1.5914(177,12 - 48.52)$$

$$\dot{Q}_{af} = 204,6540 \text{ [kW]}$$

III.5.3 Etude de l'installation frigorifique :

Cette étude est dans le but d'étudier le groupe frigorifique d'eau glacée utilisant le R134a comme fluide frigorigène, ce groupe sert à garantir une température de fonctionnement de la batterie froide de l'ordre de 10°C, et aussi d'intervenir dans le procès de refroidissement du sucre.

L'étude de ce groupe se fait à l'aide de certaines notions (température d'évaporation, condensation, surchauffe, et sous-refroidissement) qui nous aident à tracer le cycle frigorifique.

- **Température d'évaporation**

La température d'évaporation se fait en adoptant un pincement ΔT en sortie d'échangeur. On retient en générale la plage de la valeur suivante de 3 à 10 °C [35]

$$\Delta T = T_{eg} - T_{ev}$$

T_{eg} : Température d'eau glacée

T_{ev} : Température d'évaporation

Dans tous les cas la température d'évaporation de fluide frigorigène doit rester au-dessus de 0 pour éviter le gèle possible de l'eau. [36]

La température à maintenir dans la batterie froide est de 10°C et on adopte un écart de température de 10°C pour avoir une température d'évaporation du fluide frigorigène $T_{ev} = 0^\circ\text{C}$

- **Température de condensation**

L'écart entre la température de condensation et celle de l'air ambiant est choisit entre 10 et 15°C. [36]

$$\Delta T = T_c - T_{am} = 10^\circ\text{C}$$

T_c : Température de condensation

T_{am} : Température ambiante

Pour une température de l'air ambiant de 25°C

$$T_c = 35^\circ\text{C}$$

- **Température de surchauffe**

De façon plus générale la température de surchauffe est comprise entre 3 et 8°C (en dessous le risque de coup de liquide de vient important, au dessus l'évaporateur n'est pas utilisé de façon satisfaisante).[35]

- **Température de sous-refroidissement**

Le sous-refroidissement du liquide en sortie du condenseur est compris entre 1 et 8°C. Il doit être dans tous les cas suffisant pour assurer l'alimentation du détendeur en fluide frigorigène liquide. On choisira donc des valeurs élevées lorsque la tuyauterie du liquide est longue. [35]

On choisit une température de sous-refroidissement de 6°C.

III.5. 3.1 Cycle frigorifique

Après avoir établie le régime de fonctionnement de la machine, le fluide frigorigène étant le R134a on peut tracer le cycle frigorifique et déterminer la performance thermodynamique de la machine.

Le cycle frigorifique (log(p)-h) est obtenu à l'aide de logiciel **Coolpack**, il est représenté dans l'annexe (c).

Principaux points de cycle

	T (°C)	P (bar)	h (kJ/kg)	v (m ³ /kg)	s (kJ/kg.K)
Point1	8	2,927	404,58	0,07183	1,749
Point2	59,232	8,876	442,58	0,02643	1,792
Point2th	46,424	8,876	428,69	0,02469	1,749
Point Cond	35	8,876	248,28	0,00394	1,166
Point3	6	8,876	208,09	X	1,029
Point4	0,010	2,927	208,09	X	1,030

Point evp	0	2,927	397,16	X	1,722
-----------	---	-------	--------	---	-------

Tableau III.3 Principaux points du cycle

III.5.3.2 Performances thermodynamique de groupe frigorifique :

III.5.3.2.1 Calculer la puissance totale de groupe frigorifique

La puissance totale de groupe frigorifique dépend de la puissance de la batterie froide, ainsi que les pertes calorifiques dans les tubes nus (non-isolés) qui se manifestent dans les canalisations assurant l'alimentation de la batterie froide ; elle est donnée par la formule suivante :

$$\dot{Q}'_f = \dot{Q}_{bf} + P_{tn}$$

P_{tn} : La déperdition totale des tuyauteries

\dot{Q}'_f : La puissance totale de groupe frigorifique

\dot{Q}_f : La puissance nécessaire a la batterie froide

Il est important de préciser que les calculs des pertes de chaleur des tubes nus se différencient de celles des tubes isolés. Les formules proposées par Roger Cadiegues (thermicien et directeur du Costic) nous aident à calculer l'émission de chaleur des tuyaux, elles sont réparties en deux catégories : soit horizontaux ou verticaux.[37]

$$\dot{P}_{tn} = \dot{P}_{nv} + \dot{P}_{nh}$$

\dot{P}_{nv} : Déperdition des tuyauteries verticales

\dot{P}_{nh} : Déperdition de tuyauteries horizontales

- **Tubes verticaux**

$$\dot{P}_{nv} = [15,3 + 0,11 \cdot T + 6,9 \cdot (|T - T_a|)^{0,25}] \cdot D_{te} \cdot (|T - T_a|) \left[\frac{W}{m} \right]$$

$$\dot{P}_{nv} = [15,3 + 0,11 \cdot 10 + 6,9(|10 - 25|)^{0,25}] \cdot 0,15(|10 - 25|)$$

$$\dot{P}_{nv} = 67,4530 \left[\frac{W}{m} \right]$$

- **Tubes horizontaux**

$$\dot{P}_{nh} = \left[15,3 + 0,11 \cdot T + 4,15 \cdot \left(\frac{|T - T_a|^{0,25}}{D_{te}} \right) \right] \cdot D_{te} \cdot (|T - T_a|) \left[\frac{W}{m} \right]$$

$$\dot{P}_{nh} = \left[15,3 + 0,11 \cdot 10 + 4,15 \cdot \left(\frac{|10 - 25|^{0,25}}{0,15} \right) \right] \cdot 0,15(|10 - 25|)$$

$$\dot{P}_{nh} = 159,4074 \left[\frac{W}{m} \right]$$

$T = 10^\circ\text{C}$: Température du tube (égale à celle du fluide) [$^\circ\text{C}$]

$T_a = 25^\circ\text{C}$: Température des locaux traversés [$^\circ\text{C}$]

$D_{te} = 0,15$: Diamètre extérieur du tube [m]

Pour obtenir l'émission de chaleur des canalisations il suffit de multiplier l'émission de chaleur linéique par les longueurs des tuyauteries, et les résultats sont présentés d'une façon respective

	l[m]	P[W]	$\dot{Q} = l \cdot \dot{P}$ [W]
Vertical (nus, vert)	30	67,4530	2023,5912 W
Horizontal (nus, horz)	35	159,4074	5579,2575 W

Tableau III.4. L'émission de chaleur des canalisations

Donc : $\dot{Q}_{tn} = \dot{Q}_{nv} + \dot{Q}_{nh}$

$$\dot{Q}_{tn} = 2023,5912 + 5579,2575$$

$$\dot{Q}_{tn} = 2,8487 \text{ [W]} = 7,6028487 \text{ [KW]}$$

Et : $\dot{Q}'_f = \dot{Q}_{bf} + \dot{Q}_{tn}$

$$\dot{Q}'_f = 41803,4 + 7602,8487$$

$$\dot{Q}'_f = 49406,2487 \text{ [W]} = 49,4062 \text{ [KW]}$$

III.5.3.2.2 Calcul de débit de fluide frigorigène :

$$\dot{Q}'_f = \dot{m}_{R134a} \cdot (h_1 - h_4)$$

$$\text{D'où : } \dot{m}_{R134a} = \frac{\dot{Q}'_f}{(h_1 - h_4)} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

$$\dot{m}_{R134a} = \frac{\dot{Q}'_f}{(h_1 - h_4)} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

$$\dot{m}_{R134a} = \frac{49,4062}{(404,58 - 208,09)}$$

$$\dot{m}_{R134a} = 0,2514 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

III.5.3.2.3 Etude de compresseur

- Travail et puissance théoriques du compresseur

$$W_{th} = (h_{2th} - h_1) \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$$W_{th} = (428,69 - 404,58)$$

$$W_{th} = 24,11 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

Donc : $\dot{W}_{th} = \dot{m}_{R134a} * W_{th}$

$$\dot{W}_{th} = 0,2514 * 24,11$$

$$\dot{W}_{th} = 6,0623[\text{kW}]$$

- **Puissance réelle du compresseur**

$$\eta_{is} = \frac{h_{2th} - h_1}{h_{2réel} - h_1} \text{ Avec } \eta_{is} = 0,75 = 75\% \text{ [38]}$$

$$h_{2réel} = \left(\frac{h_{2th} - h_1}{\eta_{is}} \right) + h_1$$

$$h_{2réel} = \frac{(428,69 - 404,58)}{0,75} + 404,58$$

$$h_{2réel} = 436,73 \text{ [KJ/Kg]}$$

$$W_{réel} = (h_{2réel} - h_1)$$

$$W_{réel} = (436,73 - 404,58)$$

$$W_{réel} = 32,15 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$$\dot{W}_{réel} = \dot{m}_{R134a} (h_{2réel} - h_1)$$

$$\dot{W}_{réel} = 0,2514(436,73 - 404,58)$$

$$\dot{W}_{réel} = 8,0839 \text{ kW}$$

- **Calcul du taux de compression**

$$\tau = \frac{P_c}{P_{ev}}$$

P_c : Pression de condensation égale à 8,876 bars

P_{ev} : Pression d'évaporation égale à 2,927 bars

$$\tau = \frac{8,876}{2,927}$$

$$\tau = 3,0325$$

- **Travail et puissance effectifs du compresseur**

$$W_{eff} = \frac{W_{th}}{\eta_{eff}}$$

$$\dot{W}_{eff} = \frac{\dot{W}_{th}}{\eta_{eff}}$$

η_{eff} : Rendement effectif du compresseur

En utilisant la relation de hausse

$$\eta_{eff} = 0,8 - 0,004(\tau - 5)^2 - \frac{0,5}{\tau - 0,3}$$

$$\eta_{eff} = 0,8 - 0,004 * (3,0325 - 5)^2 - \frac{0,5}{3,0325 - 0,3}$$

$$\eta_{eff} = 0,6015$$

$$W_{\text{eff}} = \frac{24,11}{0,6015} \quad \text{D'où } W_{\text{eff}} = 40,08 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{W}_{\text{eff}} = \frac{6,0623}{0,6015} \quad \text{D'où } \dot{W}_{\text{eff}} = 10,08 \text{KW}$$

- **Puissance du condenseur**

$$\dot{Q}_k = \dot{m}_{R134a} \cdot (h_2 - h_3)$$

$$\dot{Q}_k = 0,2514(436,73 - 248,28)$$

$$\dot{Q}_k = 47,38 \text{ kW}$$

III.5.3.2.4 Etude des canalisations

- **Canalisation d'aspiration**

Le débit volumique de fluide frigorigène à l'aspiration est donné par :

$$q_{va} = (1/v_1)\dot{m}_{R134a} = w_a * S_a \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

$$q_{vc} = \dot{m}_{R134a} \cdot \left(\frac{1}{v_1} \right)$$

$$q_{vc} = 0,2514 * 0,07183$$

$$q_{vc} = 3,4999 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

w_a : Vitesse des vapeurs aspirées comprise généralement entre 10 et 15 m/s [35]

On prend la valeur de 13m/s

$$S_a = \frac{3,4999}{13} = 0,2692 \frac{q_{va}}{w_a} \text{ cm}^2$$

- **Canalisation de refoulement**

Débit volumique de fluide au refoulement du compresseur

$$q_{vr} = \frac{\dot{m}_{R134a}}{v_2} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

$$q_{vr} = \frac{0,2514}{0,02643}$$

$$q_{vr} = 9,5119 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

v_2 : Volume massique du fluide frigorigène au point 2

$$S_r = \frac{q_{vr}}{w_r} [\text{m}^2]$$

w_r : Vitesse des vapeurs refoulées comprise entre 10 et 18m/s [35]

On prend la valeur de 11m/s

$$S_r = \frac{9,5119}{11} = 0,8647 \text{ cm}^2$$

III.5.3.2.5 Calcul du coefficient de performance

$$\text{COP} = \frac{Q'_f}{W_{\text{eff}}}$$

$$\text{COP} = \frac{49,4062}{10,08}$$

$$\text{COP} = 4,90$$

III.5.4 Déperdition et apport thermique de l'installation

Les conduites alimentant l'installation de séchage en froid et en chaleur sont exposées au transfert thermique dû au gradient de température entre le fluide qu'elles transportent et l'air qui entoure ces conduites

D'après les formules proposées par Roger Cadiergues pour le calculer de l'émission de chaleur des tuyaux, elles sont réparties en deux catégories : soit horizontaux ou verticaux

III.5.4.1 Cas des tubes nus :

L'émission de chaleur linéique des tubes nus est donnée par les expressions suivantes

- **Tubes verticaux**

$$\dot{P} = [15,3 + 0,11 \cdot T + 6,9 \cdot (|T - T_a|)^{0,25}] \cdot D_{te} \cdot (|T - T_a|) \left[\frac{W}{m} \right] \quad (\text{III.22})$$

- **Tubes horizontaux**

$$\dot{P} = \left[15,3 + 0,11 \cdot T + 4,15 \cdot \left(\frac{|T - T_a|^{0,25}}{D_{te}} \right) \right] \cdot D_{te} \cdot (|T - T_a|) \left[\frac{W}{m} \right] \quad (\text{III.23})$$

III.5.4.2 Cas des tubes isolés

L'émission de chaleur linéique des tubes isolés est donnée par l'expression suivante :

$$\dot{P} = K \cdot (|T - T_a|) \left[\frac{W}{m} \right]$$

D'où T et T_a portent les mêmes significations que le cas précédent et K : le coefficient de transmission linéique en $\left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$, avec :

$\frac{1}{K} = \frac{R'}{2\pi} + \frac{1}{\pi \cdot D_e \cdot h}$ Et $R' = \sum_i RK_i$; avec RK_i : la résistance thermique de la couche i et elle est donnée par :

$$RK_i = \frac{\ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{\lambda} \left[\frac{m \cdot ^\circ C}{W} \right]$$

On générale il n'y qu'une seule couche d'isolant, et on néglige la résistance du tube si bien que R' se calcul facilement à partir des valeurs de D_e et D_i de l'isolant.

- Cas des tubes verticaux

$$h = 4,87 + 0,035 \cdot T + 2,21 \cdot (|T - T_a|)^{0,25}$$

- Cas des tubes horizontaux

$$h = 4,87 + 0,035 \cdot T + 1,32 \cdot \left(\frac{|T - T_a|}{D_e} \right)^{0,25}$$

III.5.4.3 Calcul des déperditions thermiques des conduites d'alimentation :

III.5.4.3.1 Conduite principale

C'est la conduite qui alimente le tube central du sécheur à tambour, elle porte un diamètre de $D_e = 0,63\text{m}$, un tube horizontal de 4m et un tube vertical de 4m

- ❖ Cas des tubes horizontaux :

$$(III.23) \Rightarrow \dot{P}_1 = \left[15,3 + (0,11 \cdot 96) + 4,15 \cdot \left(\frac{|96-25|^{0,25}}{0,63} \right) \right] 0,63(|96 - 25|)$$

$$\Rightarrow \dot{P}_1 = 2012,0228 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}} \right]$$

$$\dot{Q}_{\text{hor}} = L \cdot \dot{P} \Rightarrow \dot{Q}_{\text{hor}} = 4 \cdot 2012,0228$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_{\text{hor}} = 8048,0914[\text{W}] = 8,048[\text{KW}]$$

- ❖ Cas des tubes verticaux :

$$III.22 \Rightarrow \dot{P}_2 = [15,3 + 0,11 \cdot T + 6,9 \cdot (|96 - 25|)^{0,25}] 0,63(|96 - 25|)$$

$$\Rightarrow \dot{P}_2 = 2052,6240 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}} \right]$$

$$\dot{Q}_{\text{ver}} = L \cdot \dot{P} \Rightarrow \dot{Q}_{\text{ver}} = 4 \cdot 2052,6240$$

$$\dot{Q}_{\text{ver}} = 8210,4962\text{W} = 8,210\text{KW}$$

$$\dot{Q}_{\text{principal}} = \dot{Q}_{\text{hor}} + \dot{Q}_{\text{ver}} \Rightarrow \dot{Q}_{\text{principal}} = 8048,0914 + 8210,4962$$

$$\dot{Q}_{\text{principal}} = 16258,5877\text{W} = 16,258\text{KW}$$

III.5.4.3.2 Conduites secondaires

C'est la conduite qui soutire une partie du débit d'air sortant de lit fluidisé qui se mélange avec l'air de séchage à l'entrée du tambour, elle présente un diamètre $D_e = 0,8\text{m}$, tubes horizontaux de 16m et tubes verticaux de 6m

- ❖ Cas des tubes horizontaux :

$$(III.23) \Rightarrow \dot{P} = \left[15,3 + (0,11 \cdot 45) + 4,15 \cdot \left(\frac{|45-25|^{0,25}}{0,8} \right) \right] 0,8(|45 - 25|)$$

$$\Rightarrow \dot{P} = 499,5236 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}} \right]$$

$$\dot{Q}_{\text{hor}} = L \cdot \dot{P} \Rightarrow \dot{Q}_{\text{hor}} = 16 \cdot 499,5236$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_{\text{hor}} = 7992,3781\text{W} = 7,9924[\text{KW}]$$

- ❖ Cas des tubes verticaux :

$$(III.23) \Rightarrow \dot{P} = [15,3 + (0,11 * 45) + 4,15 * (|45 - 25|^{0,25})] 0,8(|45 - 25|)$$

$$\Rightarrow \dot{P} = 557,4676 \left[\frac{W}{m} \right]$$

$$\dot{Q}_{ver} = L * \dot{P} \Rightarrow \dot{Q}_{ver} = 6 * 557,4676$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_{ver} = 3344,8055 [W] = 3,3448 [KW]$$

$$\dot{Q}_{secondaire} = \dot{Q}_{hor} + \dot{Q}_{ver} \Rightarrow \dot{Q}_{secondaire} = 7,9924 + 3,3448$$

$$\dot{Q}_{secondaire} = 11,3372 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{dép} = \dot{Q}_{principal} + \dot{Q}_{secondaire}$$

$$\dot{Q}_{dép} = 11,3372 + 16,258$$

$$\dot{Q}_{dép} = 27,5952 \text{ KW}$$

III.5.4.4 Apport thermique des conduites d'alimentation

Les conduites d'alimentations observent des apports thermiques vis-à-vis le milieu extérieur dû au gradient de température, on différencie plusieurs conduites réparties comme suit :

III.5.4.4.1 Conduite aéraulique

C'est la conduite qui alimente le lit fluidisé en air frais à une température de **23°C**, elle porte un diamètre $D_e = 0,8\text{m}$, un tube horizontal de 20m et un tube vertical de 6m

Cas des tubes horizontaux :

$$(III.23) \Rightarrow \dot{P} = \left[15,3 + (0,11 * 23) + 4,15 * \left(\frac{|23-25|^{0,25}}{0,8} \right) \right] 0,8(|23 - 25|)$$

$$\Rightarrow \dot{P} = 26,1794 \left[\frac{W}{m} \right]$$

$$\dot{Q}_{hor} = L * \dot{P} \Rightarrow \dot{Q}_{hor} = 20 * 26,1794$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_{hor} = 523,5872 \text{ W} = 0,5236 \text{ KW}$$

Cas des tubes verticaux :

$$(III.23) \Rightarrow \dot{P} = [15,3 + (0,11 * 23) + 4,15 * (|23 - 25|)^{0,25}] 0,8(|23 - 25|)$$

$$\Rightarrow \dot{P} = 41,6568 \left[\frac{W}{m} \right]$$

$$\dot{Q}_{ver} = L * \dot{P} \Rightarrow \dot{Q}_{ver} = 6 * 41,6568$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_{ver} = 249,9411 \text{ W} = 0,2499$$

$$\dot{Q}_{apport,1} = \dot{Q}_{hor} + \dot{Q}_{ver} \Rightarrow \dot{Q}_{apport,1} = 0,2499 + 0,5236$$

$$\dot{Q}_{apport,1} = 0,7735 \text{ kW}$$

III.5.4.4.2 Conduite hydraulique

Les conduites hydrauliques sont les conduites qui transportent l'eau glacée venant de l'installation frigorifique. Elles sont isolés par une couche de laine de verre de 10 cm

d'épaisseur, et de conductivité thermique $\lambda = 0,04 \left(\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right)$, maintenue par un cylindre en acier inox de 2 mm et de conductivité thermique de $\lambda = 14 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$, avec

$$D_i = 65 \text{ mm}$$

$$D_1 = 69 \text{ mm}$$

$$D_2 = 89 \text{ mm}$$

$$D_e = 93 \text{ mm}$$

Il existe deux conduites de l'eau glacée, une à une température de 6 °C, de 30 m de tubes horizontaux, de 10 m de tubes verticaux, et l'autre à 14 °C (température de rosée de l'air frais entrant dans le lit fluidisé + 3°C), de 13 m de tubes horizontaux et de 4 m de tubes verticaux.

L'utilisation d'une couche de laine de verre a 50 mm d'épaisseur

$$R' = \sum_i RK_i = \frac{\ln\left(\frac{69}{65}\right)}{14} + \frac{\ln\left(\frac{89}{69}\right)}{0,04} + \frac{\ln\left(\frac{93}{89}\right)}{14}$$

$$R' = 6,3707 \left[\frac{m \cdot ^\circ C}{W} \right]$$

▪ **Pour T = 6°C**

• **Tubes verticaux :**

$$h = 4,87 + 0,035 \cdot T + 2,21 \cdot (|T - T_a|)^{0,25}$$

$$\Rightarrow h = 4,87 + (0,035 \cdot 6) + 2,21 \cdot (|6 - 25|)^{0,25}$$

$$h = 9,6940 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$$

$$\frac{1}{K} = \frac{R'}{2\pi} + \frac{1}{\pi \cdot D_e \cdot h} \Rightarrow K = 1 / \left(\frac{R'}{2\pi} + \frac{1}{(\pi + 0,093 \cdot h)} \right)$$

$$K = 0,7929 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$$

$$\dot{P} = K \cdot (T - T_a) \Rightarrow \dot{P} = 0,7929(|6 - 25|)$$

$$\dot{P} = 15,0644 \left[\frac{W}{m} \right]$$

$$\dot{Q}_{hor} = L \cdot \dot{P} \Rightarrow \dot{Q}_{hor} = 4 \cdot 15,0644$$

$$\dot{Q}_{hor} = 60,2575 \text{ W} = 0,0603 \text{ KW}$$

• **Tubes horizontaux :**

$$h = 4,87 + 0,035 \cdot T + 1,32 \cdot \left(\frac{|T - T_a|}{D_e} \right)^{0,25}$$

$$\Rightarrow h = 4,87 + (0,035 \cdot 6) + 1,32 \cdot \left(\frac{|6 - 25|}{0,093} \right)^{0,25}$$

$$h = 10,0705 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$$

$$\frac{1}{K} = \frac{R'}{2\pi} + \frac{1}{\pi \cdot D_e \cdot h} \Rightarrow K = \frac{1}{\frac{R'}{2\pi} + \frac{1}{(\pi + 0,093 \cdot h)}}$$

$$K = 0,7942 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$$

$$\dot{P} = K \cdot (T - T_a) \Rightarrow \dot{P} = 0,7942 (|6 - 25|)$$

$$\dot{P} = 15,0898 \left[\frac{W}{m} \right]$$

$$\dot{Q}_{ver} = L \cdot \dot{P} \Rightarrow \dot{Q}_{ver} = 13 \cdot 15,0898$$

$$\dot{Q}_{ver} = 196,1672 \text{ W} = 0,1962 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{app,2} = \dot{Q}_{hor} + \dot{Q}_{ver} \Rightarrow \dot{Q}_{app,2} = 0,1962 + 0,0603$$

$$\dot{Q}_{app,2} = 0,2564 \text{ kW}$$

- Pour $T = 14^\circ C$

- **Tubes verticaux :**

$$h = 4,87 + 0,035 \cdot T + 2,21 \cdot (|T - T_a|)^{0,25}$$

$$\Rightarrow h = 4,87 + (0,035 \cdot 14) + 2,21 \cdot (|14 - 25|)^{0,25}$$

$$h = 9,3848 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$$

$$\frac{1}{K} = \frac{R'}{2\pi} + \frac{1}{\pi \cdot D_e \cdot h} \Rightarrow K = \frac{1}{\frac{R'}{2\pi} + \frac{1}{(\pi + 0,093 \cdot h)}}$$

$$K = 0,7917 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$$

$$\dot{P} = K \cdot (T - T_a) \Rightarrow 0,7917 (|14 - 25|)$$

$$\dot{P} = 8,7092 \left[\frac{W}{m} \right]$$

$$\dot{Q}_{hor} = L \cdot \dot{P} \Rightarrow \dot{Q}_{hor} = 8,7092 \cdot 4$$

$$\dot{Q}_{hor} = 34,8369 \text{ W} = 0,03484 \text{ kW}$$

- **Tubes horizontaux :**

$$h = 4,87 + 0,035 \cdot T + 1,32 \cdot \left(\frac{|T - T_a|}{D_e} \right)^{0,25}$$

$$\Rightarrow h = 4,87 + (0,035 \cdot 14) + 1,32 \cdot \left(\frac{|14 - 25|}{0,093} \right)^{0,25}$$

$$h = 9,7131 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$$

$$\frac{1}{K} = \frac{R'}{2\pi} + \frac{1}{\pi \cdot D_e \cdot h} \Rightarrow K = \frac{1}{\frac{R'}{2\pi} + \frac{1}{(\pi+0,093 \cdot h)}}$$

$$K = 0,7929 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$$

$$\dot{P} = K \cdot (T - T_a) \Rightarrow 0,7929(|14 - 25|)$$

$$\dot{P} = 8,7223 \left[\frac{W}{m} \right]$$

$$\dot{Q}_{ver} = L \cdot \dot{P} \Rightarrow \dot{Q}_{ver} = 8,7223 \cdot 13$$

$$\dot{Q}_{ver} = 113,3890 \text{ W} = 0,1134 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{app,3} = \dot{Q}_{hor} + \dot{Q}_{ver} \Rightarrow \dot{Q}_{app,3} = 0,1134 + 0,03484$$

$$\dot{Q}_{app,3} = 0,1482 \text{ kW}$$

III.5.4.5 Déperdition thermique du sécheur à tambour

Pour quantifier les pertes thermiques du sécheur, nous allons procéder au bilan thermique et enfin calculer son rendement [39]

III.5.4.5.1 La puissance frigorifique consommée au niveau de l'installation :

$$\dot{Q}_{f \text{ total}} = \dot{Q}_f + \dot{Q}_{bf} + \dot{Q}_{app,2} + \dot{Q}_{app,3}$$

$$\dot{Q}_{f \text{ total}} = 49,4062 + 41,8034 + 0,2564 + 0,1482$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_{f \text{ total}} = 91,6142 \text{ KW}$$

III.5.4.5.2 La puissance de chaleur consommée au niveau de l'installation :

$$\dot{Q}_C \text{ total} = \dot{Q}_c + \dot{Q}_{bc} + \dot{Q}_{bch} + \dot{Q}_{dép} + \dot{Q}_{app,1s} \Rightarrow \dot{Q}_f \text{ total} = AN$$

$$\dot{Q}_C \text{ total} = 118,58 + 14,6568 + 4601,8724 + 27,5952 + 0,7735$$

$$\dot{Q}_C \text{ total} = 4763,4779 \text{ kW}$$

III.5.4.5.3 Pertes par les parois du séchoir

Si on prend un isolant de laine minérale de 5 cm d'épaisseur, avec une perte spécifique de $0,058 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$ les pertes de chaleur par surface extérieure se calcul : [40]

$$\dot{Q}_p = 0,058 \cdot \pi \cdot D \cdot L$$

D : Diamètre extérieur du cylindre égale à 4 m

D : Longueur utile = 13 m

$$\dot{Q}_p = 0,058 \cdot \pi \cdot 4 \cdot 13 \Rightarrow \dot{Q}_p = 9,475 \text{ kW}$$

III.5.4.5.4 Consommation thermique totale

Elle se calcule de la façon suivante :

$$\dot{Q}_T = \dot{Q}_C \text{ total} + \dot{Q}_f \text{ total} + \dot{Q}_u + \dot{Q}_p$$

\dot{Q}_u : La chaleur utile consommée par l'évaporation de l'eau extraire qu'évale

$$\dot{Q}_u = 1442,959[\text{KW}]$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_T = 1442,959 + 4763,4779 + 9,475 + 91,6142$$

$$\dot{Q}_T = 6307,5261 \text{ kW}$$

III.5.5 Calcul de la consommation énergétique massique :

On appelle consommation énergétique massique (CEM) d'un séchoir, la quantité de chaleur (exprimé en kJ/kg) à lui fournir pour sécher 1kg d'eau. Cette grandeur permet de comparer des séchoirs sur une base indépendante du tonnage d'eau évaporé, elle est comprise entre 4000 et 13000 pour les sécheurs par entrainement. [6, 22]

La consommation énergétique massique est donnée par la relation :

$$\text{CEM} = \frac{Q_u}{\dot{m}_{e,\text{tam}}}$$

$$\text{CEM} = \frac{1442,959}{0,1134}$$

$$\text{CEM} = 12724,506 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_e}$$

III.6 Tableau récapitulatif

	Élément	Formule	Résultat	Unité
Débit de l'eau à extraire de sucre	Séchoir	$\dot{m}_{e,\text{sucre}} = \dot{m}_{sh,1} \cdot \left(\frac{x_{s,1} - x_{s,2}}{1 + x_{s,1}} \right)$	0.1134	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{S}} \right]$
L'air de séchage	Batterie chaude	$\dot{m}_a = \frac{q_v}{(1 + r^s) \cdot V^s}$	62,2401	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{S}} \right]$
		$\dot{m}_e = \dot{m}_a \cdot r^s$	0,9940	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{S}} \right]$
		$\dot{Q}_{bc} = \dot{m}_a \cdot (H_2^s - H_1^s)$	4601,8724	
	Tambour	$\dot{m}_e = \dot{m}_a \cdot (r_1^s - r_2^s)$	0.01588	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{S}} \right]$
$\dot{Q}_{bch} = \dot{m}_a \cdot (H_2^s - H_1^s)$		14.6568	[kW]	
L'air de refroidissement	Batterie froide	$\dot{m}_a = \frac{q_v}{(1 + r^s) \cdot V^s}$ $\dot{m}_a = \dot{m}_{a,1} = \dot{m}_{a,1\text{lit}} = \dot{m}_{a,2\text{lit}}$	1.5914	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{S}} \right]$
		$\dot{m}_e = \dot{m}_a \cdot (r_1^s - r_2^s)$	0.00955	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{S}} \right]$

L'air de refroidissement	Batterie froide	$\dot{Q}_{bf} = \dot{m}_a \cdot (H_1^S - H_2^S) - \dot{m}_e \cdot H_e^*$ $\dot{m}_e = \dot{m}_a \cdot r^S$	41,8034	[kW]
	Lit fluidisé		0,0634	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$
		$\dot{Q}_{af} = \dot{m}_{as}(H_2^S - H_1^S)$	204,654	[kW]
Groupe frigorifique	puissance totale	$\dot{Q}'_f = \dot{Q}_{bf} + \dot{Q}_{tn}$	49,4062	[kW]
	Coefficient de performance	$\text{COP} = \frac{\dot{Q}'_{ff}}{\dot{W}_{\text{eff}}}$	4,90	
Puissance frigorifique consommée	$\dot{Q}_{f \text{ total}} = \dot{Q}_f + \dot{Q}_{bf} + \dot{Q}_{app,2} + \dot{Q}_{app,3}$		91,6142	[kW]
Puissance de chaleur consommée	$\dot{Q}_{C \text{ total}} = \dot{Q}_c + \dot{Q}_{bc} + \dot{Q}_{bch} + \dot{Q}_{dép} + \dot{Q}_{app,1s}$		6307,5261	[kW]
Consommation totale de l'installation	$\text{CEM} = \frac{Q_u}{\dot{m}_{e,tam}}$		12724,506	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_e}\right]$

III.7 Conclusion :

L'étude de l'installation de séchage et refroidissement du sucre, fontappel à un ensemble de connaissances dans des domaines très variés.

Ce chapitre nous a permis de calculer les différents paramètres et caractéristiques, permettant un bon fonctionnement de cette installation

Conclusion générale

Conclusion générale

En raison des exigences, température et humidité du produit souhaité à la fin de l'opération de séchage et refroidissement, cette opération est élargie de plus en plus dans le domaine de l'industrie agroalimentaire, en cherchant toujours à avoir des meilleurs résultats avec le minimum de consommation énergétique, par le choix des techniques les mieux adaptées à la réalisation de l'objectif dans le respect des normes, appuyé sur des bonnes connaissances des processus et de matériels essentiels pour un bon fonctionnement de l'installation.

Le sujet qui nous a été proposé consiste à étudier, en termes de débit et de besoin frigorifique et calorifiques, un système de séchage à tambour et un refroidisseur de sucre à lit fluidisé d'une production de 3500T/Jour.

L'étude effectuée sur l'installation de séchage et de refroidissement du sucre s'est révélé de la complexité du processus industriel, elle fait appel à un ensemble de connaissance dans des domaines très variés, en l'occurrence : traitement d'air, froid et le transfert de chaleur et de masse, tout ça nous a permis de comprendre certains phénomènes physiques et la façon de les appliqués industriellement.

Les bilans utilisés établis sur les entrées et sorties du sécheur tambour/lit fluidisé, permettent de calculer les grandeurs les plus caractéristiques de l'installation, ces caractéristiques sont fonction des mécanismes internes. Néanmoins, une étude approfondie peut être menée ultérieurement pour améliorer certains paramètres en s'intéressant à la cinétique de séchage, et surtout ainsi qu'à la diminution des pertes d'énergies lors du transport de l'air chaud et froid le long des conduites, qui assurent l'alimentation du sécheur.

Dans le cas de l'utilisation d'un système séparé de sécheur à tambour et de refroidisseur à lit fluidisé, le système devient quasiment indépendant des intempéries, ce qui demande d'assumer une hausse permanente des couts énergétique.

Enfin, nous souhaitons que notre modeste travail réalisé au sein de l'entreprise de CEVITAL serve à aider les futurs utilisateurs et source de documentation à nos prochains collègues.

Référence bibliographique :

Référence Bibliographique :

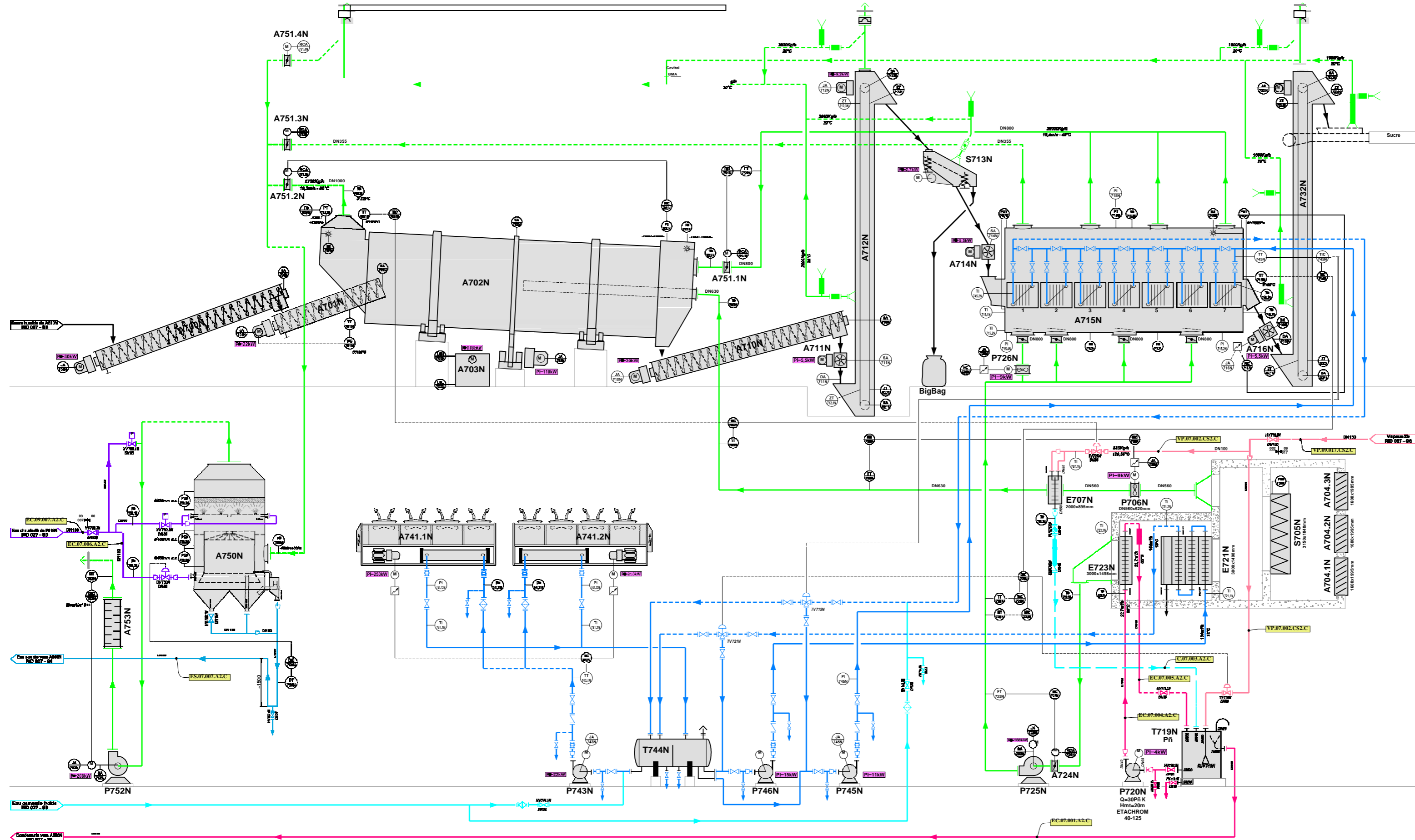
Référence Bibliographique :

- [1] A. ARZATE, Extraction et raffinage de sucre de canne (2005).
- [2] Documentation technique fournir par CeVital (MN-SS2-01).
- [3] Documentation technique CeVital- BMA (TD 3502 941).
- [4] Documentation technique CeVital ; Description de l'installation
- [5] A. CHARREAU et R. CAIVALLE, Séchage théorie et calculs. Technique de l'ingénieur.
- [6] J. VASSEUR, Séchage industriel : principe et calcul d'appareils : Séchage convectif par air chaud (partie1). Technique de l'ingénieur. (2009).
- [7] C. BONAZZI et R. CAVAILLE, Séchage des produits alimentaires-principes, Technique de l'ingénieur.
- [8] PILLET Jean-Jacques, Séminaire EFE du 11 Décembre 2008
- [9] ADEME et DABEE, Le séchage thermique, département industrie et agriculture.
- [10] A. CHARREAU et R. CAIVALLE, Séchage (Appareillage et choix d'un procédé).
- [11] C. BONAZZI et Jean-Jacques BIMBENET, Séchage des produits alimentaires.
- [12] P. ARLZBODDR, Séchage industriel –aspect pratique 2008.
- [13] MASTERS (K.). – *Spray Drying Handbook*. Éd. Longman Scientific and Technical, 5e édition, 725 p. (1991).
- [14] PERRY (R.H.) et GREEN (D.). – *Perry's Chemical Engineer's Handbook*, Éd. Mc Graw-Hill, 7e édition (1997).
- [15] VAN'T LAND (C.M.). – *Industrial Drying Equipment: Selection and Application*. Éd. DEKKER (M.) Inc., 362 p. (1991).
- [16] PERRONET (H.). – *Le sécheur rotatif*. Dans *Séchage*. Les Techniques de l'Industrie Minérale, (8), p. 43-49 (2000).
- [17] E. HUGOT, La sucrerie de cannes 3^{ème} édition.
- [18] DUPRAT (J.C.). – *Séchage en couche mince par contact sous vide*. Cahier de l'AFSIA, no 5, « Séchage par contact », p. 35-68 (1990).
- [19] VASSEUR (J.), BIMBENET (J.J.), DUPRAT (J.C.) et TOURON (B.). – Séchage sur cylindres dans les IAA : nouvelles techniques, nouvelles perspectives. Industries alimentaires et agricoles (1984).
- [20] BOURLIER (C.). – Séchage par atomisation. Séchage, Les Techniques de l'Industrie Minérale, (8), p. 50-57 (2000).

Référence Bibliographique :


- [21] MASTERS (K.). – *Current Market-Driven Spray Drying Development Activities*. Drying Technology, 22(6), p. 1351-1370 (2004).
- [22] Maxime DUMINI; Air Humide (B 2230) . Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique
- [23] A. BAILLY et M. CLEAC-RENAUD et E. RUTMAN et C. TERMANT, Traitement de l'air et climatisation : Généralité. Technique d'ingénieur.
- [24] A. BAILLY et M. CLEAC-RENAUD et E. RUTMAN et C. TERMANT, Traitement d'air et climatisation : Les composants et leurs fonctionnement. Technique de l'ingénieur.
- [25] F.Meunier et P.RIVET, Froid industriel, ISBN210-0053019Dunod, PARIS 2005.
- [26] C.MARVILLET, Usage et production de froid.
- [27] O.PERROT, Cours de machine frigorifique2010-2011, IUT de Saint-Omer Dunkerque Département génie thermique et énergie.
- [28] Magister A.BOUNOUIOUA, Modélisation d'une machine frigorifique à compression mécanique.
- [29] E. KOLLER, Aide mémoire génie chimique 3Eme édition l'usine nouvelle.
- [30] M.MATHLOUTHI, Les propriétés physique et chimique du saccharose, dossier CEDUS avec collaboration de l'université de Reins
- [31] A .CHARREAU, R.CAVALLE, séchage théories et calculs technique d'ingénieur. J2480.
- [32] J.M.COULSON and J.F.RICHARDSON, Chemical engineering, vol II, 2eme édition, Pergamon Press Oxford.
- [33] J. VASSEUR, Séchage industriel : principes et calcul d'appareils-Séchage convectif par air chaud (partie 2).
- [34] Nicole Cortial, quelques utilisations d'un diagramme psychrométrique, Nantes (44)
- [35] F. MEUNIER et P. RIVET et M.F. TERRIER, Froid industriel 2ème édition (2010)
- [36] G. XRINAT, Production de froid : Exemple de calcul de machines. Technique de l'ingénieur.
- [37] M.FRANK WHITH, Heat and Mass Transfer, Addison-Wesley,(1998) .
- [38] E.HUGOT, la sucrerie de cannes, 2eme Ed. Dunod paris, 1970.
- [39] M.A.DIAGNE, Conception d'un séchoir a cylindre rotatif pour les produits granules a basse de céréales (application au arraw).Ecole supérieur Polytechnique centre de THIES. (2003)
- [40] A.DASCALESCU, le séchage et ses applications industriels, DUNOD, Paris-1969

ANNEXES :



Indice	Date	MODIFICATION	Nom
G	10/08	ELIYI BRUNO IGARRO 3000T RQF R20200H	AB
F	11/10/17	Suppression de l'ancien A715N	A.S.
E	11/10/17	Suppression de l'ancien A716N	A.S.
D	06/05/17	ELIYI BRUNO IGARRO RQF R20200H	A.S.
C	06/03/17	ELIYI BRUNO IGARRO RQF R20200H	J.C.T.
B	13/05/15	ELIYI BRUNO IGARRO RQF R20200H	L.T.A.S.
A	01/07/15	PROJET DE CONCEPTION	B.

**CEVITAL - SPA
NOUVEAU QUAI DE BEJAIA**


 5p1pUHQFH A1042R

6h75S_17C51S7_21S/
 100E80000W
 77260 MORET SUR LOING FRANCE
 7p0
 Fact: 33(0)164786054
 E-mail: SUTRAINTE@wanadoo.fr

30DQ 1/ 027-S7

**NOUVELLE RAFFINERIE SUCRE 3000T J
SECTION 7 - SECHAGE
P.I.D.**

Client	Sans	Version	AB
Scale	1/1000	Sheet	AB
Author	A	Check	B
Design	C	Draw	D
Exec	E	Print	F
Rev	G	Final	H

R134a Ref.: D.P. Wilson & R.S. Basu, ASHRAE Transactions 1988, Vol. 94 part 2.

DTU, Department of Energy Engineering
s in [kJ/(kg K)], v in [m³/kg], T in [°C]
M.J. Skovrup & H.J.H. Knudsen - 18-06-19

