

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique
Université Djilali Bounaama Khemis-Miliana

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Technologie
Filière : Génie Mécanique
Spécialité: énergétique



Mémoire de fin d'études

En vu de l'obtention de diplôme de Master en Génie Mécanique,
Option: énergétique

Thème

*Etude de conception d'un système de séchage à bande
transporteuse - Influence des paramètres de séchage sur le
produit séché.*

Date de dépôt : 14/10/2020

Présenté par :

- **LALIAOUI Ahmed.**
- **ZOBIR Abdelheq.**

Encadré par :

Pr M.HEMIS.

Promotion 2020

*Au nom de D.F.U, le Clément Le Miséricordieux, Le
Tout Puissant.*

*Louanges à ALLAH Seigneur des mondes, qui nous
a permis de réaliser ce travail, ainsi que ses innombrables bienfaits.*

*A notre Prophète Mohamed, Salut et Paix sur Lui et à
Toute sa famille et ses Compagnons et à ceux qui le suivent
jusqu'au jour du Jugement.*

À tous les membres de nos familles.

À nos collègues et nos amis.

*À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet
soit possible.*

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Dr HEMIS Mohamed d'avoir accepté l'encadrement de ce travail, et pour nous avoir permis d'effectuer ce mémoire de Master dans de très bonnes et très agréables conditions. Et surtout pour son sérieux, ses compétences, sa gentillesse et son sens du devoir.

Nos remerciements s'adressent également à tous les membres du jury d'avoir accepté de venir juger notre travail. Merci mes dames et messieurs les membres du jury pour le temps consacré à sa lecture et son examination.

Nos remerciements s'adressent également à nos collègues et camarades ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Résumé :

Une étude de conception et de dimensionnement d'une ligne de séchage des pâtes alimentaires a été étudiée, qui peut également être utilisée dans le séchage d'autres produits alimentaires. L'objectif principal de ce travail est de calculer et dimensionner les différents composants du système étudié en fonction des paramètres d'entrée du produit et de l'air de séchage. Le séchoir étudié doit être capable de traiter 360 kg/h de pâtes avec une teneur en humidité de 50% à 5% en seulement 10 minutes de séchage et ceci en exposant le produit à un débit calculé d'air chaud à une température d'environ 55 ° C et une humidité relative inférieure à 10%. Grâce à l'étude analytique, il a été observé que la vitesse du convoyeur a un effet significatif sur la qualité finale du produit ; et une vitesse élevée de la bande transporteuse entraîne une qualité médiocre et un produit de forte humidité. D'autre part, une vitesse de bande transporteuse faible peut provoquer un sur séchage du produit. Cette étude nous a permis de comprendre le processus de calcul des systèmes de séchage industriels destinés au séchage des pâtes.

Mots-clés : Chaîne de séchage ; dimensionnement ; pâtes alimentaires; séchage air chaud; convection forcée.

Abstract

A design and sizing study of a pasta drying line was studied, which can also be used in the drying of other food products. The main objective of this work is to calculate and size the different components of the studied system according to the input parameters of the product and the drying air. The studied dryer must be able to process 360 kg / h of pasta with moisture content (MC) of 50% to 5% in just ten minutes of drying and this by exposing the product to a calculated flow rate of hot air at a temperature of around 55 ° C and a relative humidity of less than 10%. Through the analytical study, it was observed that the speed of the conveyor has a significant effect on the final quality of the product; high speed of the conveyor belt results in poor quality and a product of high humidity; on the other hand, a low conveyor belt speed can cause the product to dry excessively. This study allowed us to understand the calculation process of industrial drying systems for pasta drying.

Keywords: Drying line; sizing; Pasta; hot air drying; forced convection.

ملخص :

تم القيام بدراسة تصميم لخط تجفيف العجائن ، والذي يمكن استخدامه أيضًا في تجفيف المنتجات الغذائية الأخرى. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة وتحديد المكونات المختلفة للنظام وفقًا لمعايير إدخال المنتج وهواء التجفيف. يجب أن يكون المجفف المدروس قادرًا على معالجة 360 كغ / سا من المعكرونة بمحتوى رطوبة من 50٪ إلى 5٪ في 10 دقائق فقط من التجفيف وهذا عن طريق تعريض المنتج لتدفق محسوب من الهواء الساخن عند درجة حرارة تبلغ حوالي 55 درجة مئوية ورطوبة نسبية أقل من 10٪. من خلال الدراسة التحليلية ، لوحظ أن سرعة الناقل لها تأثير كبير على الجودة النهائية للمنتج ؛ ينتج عن السرعة العالية للحزام الناقل منتج ذو جودة رديئة ورطوبة عالية ؛ من ناحية أخرى ، يمكن أن تتسبب سرعة حزام النقل المنخفضة في جفاف المنتج بشكل مفرط. سمحت لنا هذه الدراسة بفهم عملية حساب أنظمة التجفيف الصناعية لتجفيف العجائن.

الكلمات الرئيسية: خط التجفيف، دراسة ابعاد، عجائن، الهواء الساخن، تجفيف الحراري الجبر.

Introduction.....	17
Chapitre I : Généralités sur le séchage des produits alimentaires	
I.1. définition du séchage.....	20
I.2. Domaines d'utilisations du séchage	20
I.2.1. Industrie agroalimentaire	20
I.2.2. Industrie papetière	20
I.2.3. Industrie du bois.....	21
I.3. Avantage et inconvénient du séchage	21
I.4. Les modes de séchage	21
I.4.1. Séchage par conduction	22
I.4.2. Séchage par convection	22
I.4.3. Séchage par rayonnement	22
I.4.4. Séchage par perte diélectrique	22
I.5. Technologies de séchage	22
I.5.1. Le séchage sous rayonnement solaire.....	23
I.5.2. Le séchage par séchoir solaire direct et indirect.....	24
I.5.3. Séchage convectif dit à l'air chaud.....	24
I.5.4. Le séchage par microonde.....	25
I.5.5. La lyophilisation.....	26
I.6. Choix du procédé de séchage.....	27
I.7. Mécanisme de séchage	27

I.8. Cinétique de séchage	28
I.9. Période de séchage.....	29
I.10. Influence des paramètres de l’air sur la cinétique de séchage.....	31
I.10.1. Influence de la température de l'air	31
I.10.2. Influence de la vitesse de l'air.....	31
I.10.3. Influence de l'humidité de l'air.....	32
I.11. Equipement d’une ligne de séchage des pâtes.....	32
I.11.1. La bande transporteuse.....	33
I.11.2. Le moteur électrique.....	34
I.11.3. Soufflerie d’air.....	34
I.11.4. Diffuseur d’air.....	35
I.11.5. Système de chauffage.....	35
I.11.6. Système de régulation.....	36
Chapitre II : Transfert de chaleur et de masse dans un milieu poreux	
II.1. Introduction.....	38
II.2. Caractéristiques de l’air de séchage.....	38
II.2.1. Humidité absolue	38
II.2.2. Humidité relative	39
II.2.3. Degré de saturation.....	39
II.2.4. Températures caractéristiques de l’air humide.....	39
II.3. Caractéristiques des solides humides	40
II.3.1. Teneur en eau à base sèche.....	40
II.3.2. Teneur en eau à base humide.....	40

II.3.3. Hygroscopicité.....	40
II.3.4. Porosité volumique d'un produit	41
II.4. Description du solide humide.....	41
II.5. Flux de chaleur	42
II.5.1. Expression de flux de chaleur par convection	42
II.5.2. Flux de chaleur lié à un débit massique	43
II.5.3. Calcul du flux de chaleur	44
II.6. Définition des coefficients de transfert de chaleur et de masse.....	44
II.7. Processus de transfert de chaleur et de matière	46
II.7.1. Transfert externe.....	46
II.7.2. Transfert interne	47
II.7.2.1. Transfert de chaleur.....	47
II.7.2.2. Transfert de matière	48
II.7.3. Phénomènes limitant	49
II.7.3. Transferts d'eau en séchage.....	49
II.8. Conclusion.....	51
Chapitre III : Conception et dimensionnement de l'installation étudiée	
III.1.Introduction	53
III.2.Le rôle de la convection dans le séchage.....	53
III.3. Calcul et dimensionnement.....	53
III.3.1.Détermination de caractéristique de l'air séchage.....	53
III.3.2. caractéristiques géométriques du tapis roulant	57

III.3.3. Calcul du débit d'air soufflé.....	57
III.3.4.Calcul de la puissance du moteur de tapis roulant.....	58
III.3.4.1.Calcul de la vitesse angulaire (ω).....	59
III.3.4.2.calcul de nombre des tours de convoyeur (Ntr1).....	59
III.3.4.3.Détermination de la masse totale.....	59
III.3.4.4.calcul du couple moteur (C).....	60
III.3.5. Calcul de diamètre de diffuseur d'air.....	61
III.3.6. Calcul de la puissance du système de chauffage.....	63
III.4. Coefficients de transfert de chaleur et de masse.....	65
III.4.1. Coefficients de transfert de chaleur (h_c).....	65
III.4.2. Coefficients de transfert de masse (k_m).....	66
III.5.Programmation et Installation de system de régulation.....	67
III.5.1 Connexion de la carte Arduino aux différents organes du système de séchage	67
III.5.2 Partie programmation.....	68
III.5.3 Affichage sous Moniteur série ou sur Excel	69
III.5.4.Régulation du système de chauffage de l'air.....	70
III.6.Conclusion.....	71
Chapitre IV : Etude économique	
IV.1. Introduction	73
IV.2.1.Le convoyeur (tapis roulant à bande transporteuse, moteur électrique)	73
IV.2. Estimation des coûts.....	73
IV.2.2.Soufflerie d'air (air blower)	75
IV.2.3.System de chauffage d'air.....	76

IV.2.4.Système de régulation.....	77
IV.2.5.Les diffuseurs d'air chaud.....	78
IV.6. Devis estimatif	79
VI.7. Conclusion.....	80
Conclusion générale	82
Bibliographie.....	84

Figure I.1	Le séchage au soleil de tomate	23
Figure I.2	Schéma descriptif d'un séchoir solaire indirect	24
Figure I.3	Étuve universelle ventilée modèle XU112	25
Figure I.4	Principe du séchage par micro-onde	25
Figure I.5	lyophilisateur de production	26
Figure I.6	Courbes dévolution type au cours du temps de la teneur en eau du produit (a), de la vitesse de séchage (b) et de la température du produit (c)	28
Figure I.7	Exemple d'une ligne de production de pâtes sèche	32
Figure I.8	Schéma de base d'un convoyeur à bande	33
Figure I.9	Exemple d'un moteur électrique	34
Figure I.10	Exemple de souffleur électrique	35
Figure I.11	Exemple de diffuseur d'air plafonnier	35
Figure I.12	Tige à gaine métallique	35
Figure II.1	Volume de control	41
Figure II.2	Volume de contrôle macroscopique	41
Figure II.3	Représentation schématique d'un solide humide	42
Figure II.4	Schéma du transfert de chaleur convectif.	43
Figure II.5	Schéma traduisant les niveaux de température et d'humidité générant des flux de chaleur et de matière lors d'un séchage par convection d'air	46
Figure III.1	Diagramme de l'air humide	54
Figure III.2	Caractéristiques de l'air et du produit avant et après le séchage	55
Figure III.3	Schéma synoptique de placement de diffuseurs sur la chaîne de séchage	57
Figure III.4	Schéma de la ligne de séchage	63
Figure III.5	Schéma d'installation des résistances électrique de système de chauffage	64
Figure III.6	Affichage du résultat sur EXCEL	69
Figure III.7	Schéma de régulation du système de chauffage par l'utilisation carte Arduino-Uno, capteurs dht11 et relais	70
Figure.IV.1	Photo réelle du convoyeur	74
Figure.IV.2	Photo réelle du souffleur d'air choisie	75

Figure.IV.3	Photo réelle du système de chauffage choisis	76
Figure.IV.4	Photo réelle du système de régulation choisis	78
Figure.IV.5	Photo réelle du diffuseur choisi	79

Tableau III.1	Caractéristiques de l'air dans les différentes phases de séchage	53
Tableau III.2	Ordre de grandeur du coefficient de transfert de chaleur par convection	66
Tableau IV.1	Caractéristiques des convoyeurs	73
Tableau IV.2	Caractéristiques des souffleurs d'air	75
Tableau IV.3	Caractéristiques des chauffages	76
Tableau IV.4	Caractéristiques des régulateurs	77
Tableau IV.5	Détails sur le constructeur Hongrui des diffuseurs	78
Tableau IV.6	Devis totale	79

Symbole	Grandeurs	Unités
h	Enthalpie	Kj/kg
Cs	Chaleur sensible	Kj/kg
CL	Chaleur latente	Kj/kg
Mve	Masse de vapeur ou humidité absolue de l'air initiale	kg d'eau /kg as
CL,vp	Chaleur latent de vapeur d'eau	Kj/kg
Cp,ve	Capacité thermique à pression constante de la vapeur d'eau	Kj/kg
Mas	Masse sèche d'air	kg
Cp,as	Capacité thermique de l'air sec	kJ /kg.K
Vt	Vitesse de tapis roulant	m/s
\dot{m}_p	Débit de produit	Kg/h
MS	Pourcentage de matière sèche dans le produit	%
\dot{m}_a	Débit massique d'air	kg/m ³
P	Puissance électrique	kW
C	Couple de moteur	mN
ω	Vitesse angulaire	rd/s
V	Vitesse linéaire du convoyeur	m/s
r	rayon du tambour de convoyeur	m
N _{tr1}	Nombre des tours de convoyeur	tr/mn
M _{totale}	Masse totale de produit sur le convoyeur et la bande	Kg

Nomenclature

Fh	Force horizontale	N
Cfd	Coefficient de frottement dynamique	-
\dot{m}_{diff}	Débit d'air de diffuseur	m ³ /s
Q _{chauffage}	Quantité de chaleur mise en œuvre de chauffage	kJ
Q _{vaporisation}	Quantité de chaleur mise en œuvre de vaporisation	kJ
C	Capacité calorifique d'eau	kJ/kg.K
Lv	Chaleur latente de vaporisation	kJ /kg
Q _{tot}	Quantité de chaleur totale (chauffage, vaporisation)	m ³
Qa	Quantité d'air	m ³
φ	Flux de chaleur	W
Re	Nombre de Reynolds	-
Pr	Nombre de Prandtl	-
Nu	Nombre de Nusselt	-
\dot{m}	Débit massique d'air de séchage	Kg/s
Cp	Capacité calorifique de l'air à la température de séchage	J/kg k
h _c	Coefficient de transfert thermique	W/m ² .C
S	Surface d'échange	m ²
k _m	Coefficients de transfert de masse	m/s
h _{abe}	Humidité absolue d'air à l'entrée	kg eau/ kgAS
h _{abs}	humidité absolue d'air à la sortie	kg eau/ kgAS
T _{a,i}	Température d'air à l'entrée	K

Nomenclature

R	Constant des gaz parfaits	J/ mol· K
P_{vsat}	Pression de saturation de vapeur d'eau	kPa
$P_{v,a}$	Pression de vapeur d'eau	kPa

v

Introduction générale

Le séchage des produits agroalimentaires est un processus de transformation et de conservation largement utilisé par l'homme, qui remonte à la période paléolithique. Le séchage peut être classé en deux types : naturel et industriel, le séchage naturel est largement pratiqué dans la plupart des pays africains. Cependant, la qualité bactériologique des productions artisanales laisse souvent à désirer, sans tenir compte du fait qu'un conditionnement peu fiable conduit souvent à une détérioration rapide des produits séchés. De plus, dans la plupart des pays d'Afrique du Nord, il n'y a pas de véritables canaux de distribution, et donc chacun vend où il veut et où il veut. Pourtant, le séchage reste l'une des activités les moins chères pour la conservation des produits agricoles.

Le séchage, qu'il soit traditionnel ou moderne, a pour objet de réduire, fortement les diverses réactions participantes à la décomposition normale du produit. Pour ce faire, il faut donc extraire une part importante de l'eau contenue dans le produit ; cette eau est éliminée par évaporation dans l'air environnant, pour ce faire, il faut de l'énergie thermique en provenance du soleil, d'électricité ou du gaz. Grâce à cette énergie, l'eau migre à la surface du produit où elle sera entraînée vers l'air extérieur.

L'objectif de ce travail consiste à faire une étude théorique d'une ligne de séchage à bande transporteuse industrielle contrôlée par un système de régulation d'air chaud destinée au séchage des pâtes, dont l'objectif est de déterminer les paramètres d'entrée et de sortie de l'air et des pâtes afin de bien dimensionner les différents organes du système étudié :

- La vitesse de déplacement et la surface d'échange.
- Le débit d'air soufflé ainsi que ces caractéristiques thermodynamiques.
- Le nombre et le dimensionnement des diffuseurs d'air chaud à utiliser.
- La puissance du système de chauffage utilisé dans le chauffage d'air.
- L'installation du système de régulation pour le contrôle des paramètres de séchage.

Le présent travail comporte donc, quatre chapitres :

Le premier chapitre présente des généralités concernant les technologies et modes de séchage, étude de la cinétique et phases de séchage .etc.

Le deuxième chapitre a été consacré à l'établissement de différentes équations mathématiques gouvernantes le transfert de chaleur et de masse.

Le chapitre 3 a été réservé pour la conception et le dimensionnement de la ligne de séchage.

Le chapitre 4 a été réservé à une étude économique où un devis estimatif détaillé des couts de fabrication de la chaine à bande transporteuse.

Chapitre I
Généralités sur le
séchage des produits
alimentaires

I.1. Définition du séchage

Le séchage est une opération primordiale dans une chaîne de production de produits alimentaires surtout les pâtes, les purées et les légumes secs, il consiste à extraire généralement un liquide d'un produit humide que ce soit par vaporisation de l'eau libre sinon par entraînement de l'eau en utilisant l'air chaud. En effet, l'objectif de sécher un aliment est de baisser sa teneur en eau à des valeurs qui lui permettent d'être utilisé sous autres formes sinon de le stocker sein pour une durée de conservation bien déterminer.

I.2. Domaines d'utilisations du séchage

I.2.1. Industrie agroalimentaire :

Les produits agroalimentaires qui se trouvent sur le marché, la plus part ont subi au moins une opération de transformation, parmi ces traitements : le séchage à des fins de réduction du taux d'humidité, il s'agit d'une étape obligatoire après un lavage du produit, pour le but de transformer un produit d'un état frais à un état dit sec très demander sur le marché ; et voici ci-dessous quelques exemples de produits nécessitant un séchage :

- les légumes (petit pois, poivron...) et fruits secs (pruneaux, raisins, abricots, figes...etc.),
- jus de fruits se préparent à partir d'un concentré obtenu par vaporisation de jus frais liquide,
- café, cacao, riz et autres céréales, thé, épices, certains biscuits. [10]

I.2.2. Industrie papetière :

Pour ce type d'industrie, le papier est obtenu en séchant la pâte de papier sur des rouleaux rotatifs chauffés plusieurs fois, car ce type d'industrie nécessite plusieurs traitements et un nombre important de lavage du produit avant un traitement final.

I.2.3. Industrie du bois :

Le bois qui vient d'être abattu et scié contient un taux d'humidité élevé empêchant son exploitation immédiate pour cette raison il doit être exposé à des opérations de séchage pour réduire son humidité.

I.3. Avantage et inconvénient du séchage :

Les avantages du séchage sont très nombreux, les principaux sont :

- une simplicité de la méthode de séchage avec un rendement satisfaisant,
- Une durée de conservation longue et sûre pour les aliments secs qui peut aller jusqu'au plusieurs mois,
- La désactivation des enzymes responsables de la dégradation des aliments,
- L'inhibition de la croissance des micro-organismes grâce à la réduction de l'activité de l'eau,
- Réduction des coûts financiers et environnementaux liés au transport de marchandises grâce à la réduction massive. [5]

Les inconvénients du séchage thermique sont comme suit:

Le séchage peut entraîner en particulier des pertes d'arômes, de vitamines et de pigments, des réactions de brunissement, des durcissements superficiels, des modifications irréversibles de texture et donc de capacité à la réhydratation, des pertes de constituants volatils et la modification de la répartition de l'humidité dans le produit. [5]

I.4. Les modes de séchage

Les modes de séchage sont divisés en trois types, ils sont classés sur la base du mode de transfert de chaleur, par convection, par conduction ou par rayonnement.

I.4.1. Séchage par conduction :

Le procédé d'échange thermique ici est obtenu par contact direct avec le produit à sécher et une paroi métallique chauffée par un fluide caloporteur (eau, air ou une huile) à cause du bon transfert de chaleur dans ces procédés. Cette technique est souvent adoptée dans le séchage des liquides tels que le lait, le savon, les pommades et le gel...etc.[13]

I.4.2. Séchage par convection :

Le séchage par convection est le mode de séchage le plus employé dans l'industrie alimentaire, l'échange thermique est réalisé grâce à un contact direct entre le solide humide à sécher et l'air de séchage de température élevée. Le transfert d'énergie se fait directement du fluide de séchage (air chaud) vers le produit humide et le transfert de masse se fait par entrainement de la surface du produit vers l'air de séchage.

I.4.3. Séchage par rayonnement :

Les rayonnements quelques soit leur nature, naturelle ou industrielle permettent le séchage des produits si on l'exploite bien. La génération du rayonnement se fait soit par des dispositifs électriques (microondes) soit par élévation de la température d'un émetteur infrarouge sinon par des systèmes UV. [04]

I.4.4. Séchage par perte diélectrique :

Le séchage par perte diélectrique est basé sur le chauffage par l'électricité des substances non conductrices (diélectriques). Lorsqu'un matériau isolant est placé dans un champ électrique, ces molécules se polarisent.[13]

I.5. Technologies de séchage

Le séchage est l'une des opérations de transfert de chaleur et de masse pour laquelle il est nécessaire de fournir de l'énergie thermique. Plusieurs types de séchoirs et méthodes de séchage ont été adaptés à différentes situations vue leurs utilisations facile et pratique, où les paramètres opératoires des procédés classiques de séchage peuvent être aisément contrôlés. Ces procédés dits classiques sont le séchage au soleil ou séchage à l'air libre sous les rayonnements solaires et

le séchage à l'air chaud. Il existe aussi d'autres modes de séchage qui sont définis ci-dessous. [10]

I.5.1. Le séchage sous rayonnement solaire :

Le séchage au soleil s'est largement développé ces dernières années dans les zones arides ou semi-arides tels que ceux du Nord Afrique. Il présente des conditions climatiques optimales : une saison sèche avec un fort ensoleillement, une faible pluviométrie, une hygrométrie peu élevée. Le séchage s'effectue sur des nattes, sur des rochers plats, ou bien sur les toits des maisons. Ce système présente deux principaux avantages pour les communautés : peu de travail et pas d'investissement. Mais, très souvent, les résultats obtenus sont médiocres car les produits sont pollués de sable et de poussière. Ils subissent les attaques des oiseaux, des insectes et des prédateurs. Les pertes du produit sont ainsi importantes et peuvent aller jusqu'à 30% du produit initial. De plus, les produits s'abîment, sèchent trop ou pas assez, ce qui conduit à une dégradation de la qualité du produit. [10]



Figure I.1. Le séchage au soleil de tomate

I.5.2. Le séchage par séchoir solaire direct et indirect :

Les séchoirs solaires sont divisés en deux catégories, des séchoirs directs et des séchoirs indirects et parfois des séchoirs hybrides. Le principe de fonctionnement de ces appareils dépend de la méthode de collecte de l'énergie et de sa conversion en énergie thermique utile pour le séchage. De nombreuses études expérimentales ont été menées sur les processus de séchage solaire pour divers légumes et fruits, tels que les raisins, les abricots, le poivron vert, les haricots verts ou la courge, la pistache, le poivron rouge et la poire.[5]

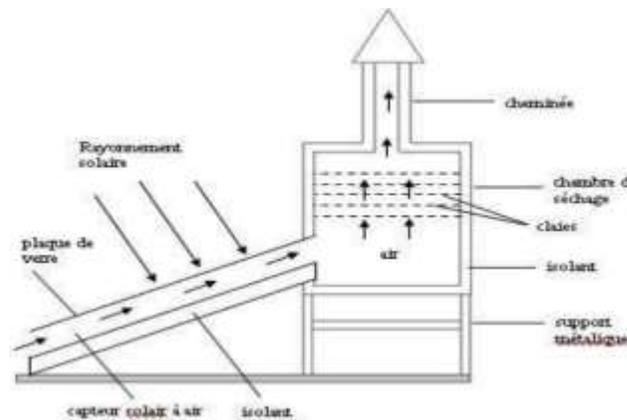


Figure I.2.Schéma descriptif d'un séchoir solaire indirect. [5]

I.5.3. Séchage convectif dit à l'air chaud :

L'air est chauffé puis mis en contact avec le produit à sécher pour faciliter le transfert de chaleur et de masse. Deux aspects importants du transfert de masse auront lieu, le transfert d'eau du cœur de produit vers sa surface puis le transfert de la vapeur d'eau de la surface vers l'air de séchage sous influence de différence de pression entre la surface du produit et l'air ambiant.

Pour obtenir des produits déshydratés de bonne qualité à coût raisonnable, la déshydratation doit être dans les normes souhaitées. Quatre facteurs influencent la vitesse de séchage sont : le temps de séchage, les propriétés physiques des aliments, la porosité et la géométrie, l'agencement géométrique des produits par rapport au flux d'air, les propriétés

physiques de l'air (température, humidité, vitesse) et les caractéristiques de conception du séchoir (courants croisés, co-courant, contre-courant, lit fluidisé, pneumatique, etc.).[5]



Figure I.3.Étuve universelle ventilée modèle XU112 [5]

I.5.4. Le séchage par microonde :

Le séchage par microonde se rapporte à l'utilisation d'ondes électromagnétiques afin de produire de la chaleur dans un produit humide. Le fonctionnement d'un four à microonde est simple, l'énergie électrique apportée alimente le magnétron qui convertit l'énergie électrique en champ électromagnétique et par un guide d'onde (tube rectangulaire en métal), les ondes produites sont dirigées vers l'agitateur d'onde et pénètrent dans l'enceinte métallique où se trouve l'aliment à chauffer sur une plaque tournante, ce qui permet au produit alimentaire d'être exposé aux ondes qui pénètrent l'aliment pour atteindre les molécules d'eau.[10]

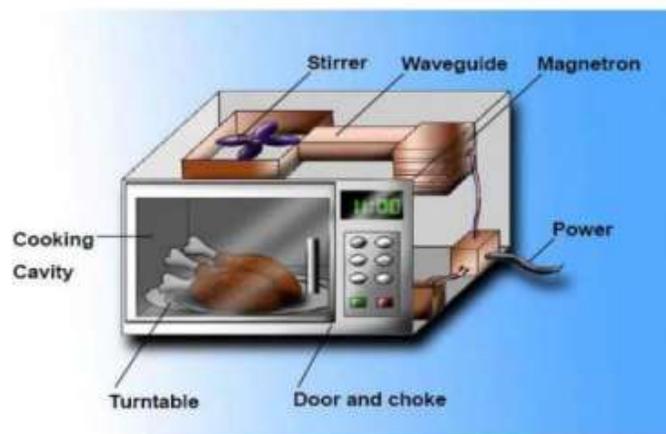


Figure I.4. Principe du séchage par micro-onde[10]

I.5.5. La lyophilisation :

La lyophilisation est un procédé de conservation permettant de préserver des denrées alimentaires périssables et des substances biologiques et chimiques dites fragiles. La lyophilisation concerne un produit qui est préalablement congelé, de telle sorte que l'eau puisse passer directement de l'état solide (glace) vers la phase vapeur sans l'étape de fusion, ce changement d'état étant appelé sublimation. La période de sublimation est suivie d'une période de séchage par désorption d'une fraction d'eau liée, à une température de plus en plus élevée. En atmosphère de vapeur d'eau pure et sous vide, ce procédé obéit à des principes comparables à l'ébullition, mais ce séchage peut aussi se faire en présence d'un certain taux de gaz incondensables dans l'atmosphère autour du produit, tel que la pression de vapeur dans le gaz externe soit seulement une pression partielle. [10]



Figure I.5.lyophilisateur de production [10]

- **Les avantages de ce procédé sont:**
 - Une préservation de la structure initiale du produit;
 - La conservation du produit pendant plusieurs années sous vide et dans un emballage opaque sans perte de vitamines et sans modification des caractéristiques
 - La conservation à température ambiante;

- La réhydratation instantanée avec de l'eau froide ou chaude grâce à la structure poreuse.

- **Les inconvénients sont comme suit :**

- La méthode adoptée est coûteuse.
- La nécessité d'un emballage étanche.
- Le procédé est applicable uniquement aux aliments en poudre ou en petits morceaux car sinon la durée de séchage et la consommation de l'énergie sont trop importantes. [5]

I.6. Choix du procédé de séchage

Les types de séchoirs utilisés pour sécher un produit sont basés sur le choix de l'appareil qui se fait alors en fonction de certains facteurs :

- La nature du produit (liquide, solide, pâte).
- Le taux d'humidité finale et initiale.
- Débit de produit exigé.
- Sensibilité de produit vis-à-vis à la chaleur.
- Sécurité de l'opération (toxicité, inflammabilité).[6]

I.7. Mécanisme de séchage

Pour sécher un produit, il suffit de le ventiler par un air suffisamment chaud et sec. Un échange de chaleur et d'humidité se produit entre cet air et le produit humide. L'air chaud transmet une partie de sa chaleur au produit qui développe une pression partielle en eau à sa surface supérieure à la pression partielle de l'eau dans l'air utilisé pour le séchage. Cette différence de pression entraîne un transfert de matière de la surface du solide vers l'air de séchage. Il existe donc deux facteurs importants pour contrôler les processus de séchage :

1. Le transfert de chaleur pour fournir la chaleur latente de vaporisation nécessaire.
2. Le mouvement de l'eau ou de la vapeur d'eau à travers le produit humide pour l'extraire des produits.

Bien sécher, c'est pouvoir maîtriser trois paramètres fondamentaux :

- L'énergie thermique apportée qui chauffe le produit et provoque la migration de l'eau vers la surface et sa transformation en vapeur d'eau.

- La capacité de l'air environnant (appelé aussi air d'entraînement) à absorber la vapeur d'eau dégagée par le produit. Cette capacité dépend du pourcentage de vapeur d'eau déjà contenue dans l'air avant son arrivée dans le séchoir et de la température à laquelle il a été porté;

- La vitesse de cet air au niveau du produit qui, surtout en début de séchage, doit être élevée (jusqu'à une certaine limite) de manière à accélérer l'entraînement de la vapeur d'eau.

Pour éviter le pourrissement du produit, il faut sécher rapidement mais pas trop vite ni à trop haute température.[2]

I.8. Cinétique de séchage

Le meilleur moyen de caractériser le comportement au séchage d'un produit consiste à mesurer expérimentalement sa cinétique de séchage. Dans le cas d'un produit solide séché par entraînement, l'expérience de base consiste à placer le produit en question dans un courant d'air parfaitement maîtrisé (température, humidité, vitesse) et à enregistrer l'évolution de sa masse au cours du temps, par des pesées à intervalles de temps réguliers. D'autres techniques sont envisageables (analyse de l'humidité de l'air sortant notamment) qui ont été décrites et analysées par Kemp et al. [15]

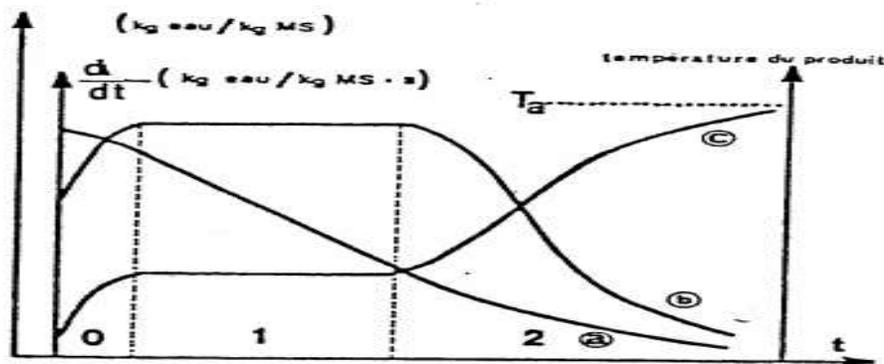


Figure 1.6. Courbes d'évolution type au cours du temps de la teneur en eau du produit (a), de la vitesse de séchage (b) et de la température du produit (c) [14]

I.9. Période de séchage

La vaporisation de l'eau s'effectue en surface du produit. Le transfert de l'eau de l'intérieur vers la surface du produit conditionne fortement la vitesse de séchage et explique la forme des courbes d'évolution en fonction du temps. De ce fait, pour comprendre les phénomènes de migration de l'eau dans les produits humides, on doit considérer simultanément les transferts de masse et de chaleur dans toutes les phases (solides, vapeur et liquide), qui tiennent tour à tour un rôle prépondérant.

Sur **la figure 1.6**, on peut distinguer plusieurs phases dans le phénomène de séchage. La courbe (a) présente l'évolution de la teneur en eau (rapport de la masse d'eau contenue dans le produit et de la masse sec) d'un produit soumis à un séchage convectif. On y distingue trois phases, également visibles sur la courbe (b) donnant la vitesse de séchage en fonction du temps et la courbe (c) illustrant l'évolution de la température du produit en fonction du temps.[14]

Les trois phases de séchage sont:

Phase 0 : période de mise en température :

Quand un produit à une température de surface T_s est brassé par un courant d'air chaud, des échanges de chaleur et de matière ont lieu entre le produit et l'air asséchant. Pour être emportées sous forme de vapeur les quantités d'eau contenues dans le produit exigent un apport correspondant de l'énergie de vaporisation.

L'excès de chaleur fournie par l'air amène le produit à s'échauffer davantage ce qui aboutit à un équilibre du bilan de chaleur. Si par contre, la température de surface du produit est trop élevée, le déficit énergétique entraînerait un refroidissement du produit.

La période de mise en température est courte et n'apparaît véritablement que si les produits sont de grande taille, ou si la différence de température entre l'air et le produit est importante ; ce qui explique le peu d'intérêt manifesté par les chercheurs dans l'étude de cette phase.

Phase 1 : période à vitesse de séchage constante :

Cette phase n'existe que si une pellicule d'eau libre existe en surface du produit. L'activité de l'eau à la surface du produit (a_{ws}) est alors égale à 1 et le séchage consiste en une évaporation

isenthalpique de l'eau. La température de surface du produit correspond à la température humide de l'air asséchant. C'est la température à laquelle le flux de chaleur amené par l'air est égal au flux thermique nécessaire à l'évaporation de l'eau. La vitesse de séchage dépend uniquement des conditions externes telles que l'humidité de l'air, sa température sèche et sa vitesse de circulation

Phase 2 : Période de ralentissement :

Cette période est caractérisée par une diminution de la vitesse de séchage. Le ralentissement de la vitesse de séchage est dû aux contraintes de migration de l'eau de l'intérieur du produit vers sa surface. Plusieurs phénomènes et propriétés sont à prendre en considération :

- **disparition de l'eau libre en surface de produit** : ce phénomène correspond au début du ralentissement de l'allure de séchage. En admettant que la migration de l'eau libre et de l'eau liée contenues dans le produit s'effectue consécutivement sous forme liquide et vapeur, il faut envisager l'existence d'un front de vaporisation qui s'enfonce progressivement à l'intérieur du produit.

- **l'épaisseur du produit** : si cette épaisseur est de plus en plus croissante, cela signifie que la vapeur d'eau doit traverser un parcours plus long expliquant ainsi et en grande partie le ralentissement de l'allure de séchage.

- **la diffusivité de l'eau dans le produit** : elle varie avec la teneur du produit en eau. Plus ce dernier est sec, moins il devient perméable à l'eau.

- **disparition de l'eau libre en surface de produit** : ce phénomène correspond au début du ralentissement de l'allure de séchage. En admettant que la migration de l'eau libre et de l'eau liée contenues dans le produit s'effectue consécutivement sous forme liquide et vapeur, il faut envisager l'existence d'un front de vaporisation qui s'enfonce progressivement à l'intérieur du produit.

- **la résistance mécanique de parois cellulaires intactes** : les parois cellulaires intactes empêchent la vapeur d'eau de passer en grande quantité à l'extérieur du produit.

- **le croutage** : certains composés solubles notamment les sucres et les sels accompagnent l'eau évaporée pendant la période à allure constante (phase 1) et cristallisent à la surface. Ce phénomène appelé croutage est à l'origine de fortes concentrations en surface de ces composés

solubles qui bouchent les pores du produit. L'accumulation et l'assèchement de ces solutés imperméabilisent la surface du produit.

Cette phase dépend essentiellement des propriétés du produit et de diffusion de l'eau dans le produit, l'influence des conditions d'écoulement de l'air asséchant est secondaire.

I.10. Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage

I.10.1. Influence de la température de l'air :

La température de l'air de séchage a une influence majeure sur la vitesse de séchage d'un produit humide. Cette influence est due à l'ajout de chaleur au produit qui augmente avec l'augmentation de la température de l'air. L'effet de la température de l'air de séchage a été étudié par de nombreux chercheurs, par exemple pour le cacao (Ndukwu, 2009), les haricots verts (Doymaz, 2005) ... etc. Ces auteurs ont constaté que le temps de séchage diminuait avec l'augmentation de la température de séchage. [8]

I.10.2. Influence de la vitesse de l'air :

La vitesse de l'air de séchage agit positivement sur la cinétique de séchage surtout au début de cette opération. Cependant, pour des produits dont la cinétique de séchage est contrôlée par la migration interne de l'eau, l'influence de la vitesse d'air devient très faible.

Les résultats des auteurs peuvent être classés en trois groupes selon la description qu'ils font de l'influence de la vitesse de l'air sur la cinétique de séchage :

- Le premier groupe indique que l'influence de la vitesse de l'air sur la cinétique de séchage est très faible.
- Le deuxième groupe constate que la vitesse d'air influence sur la vitesse de séchage : quand on augmente la vitesse, le temps de séchage est diminué et la vitesse de séchage est augmentée. Tandis que, le troisième groupe constate également que la vitesse d'air influence sur la vitesse de séchage. Cependant, la vitesse d'air atteint une valeur limite (en fonction du produit à sécher) au-delà de laquelle il n'y a plus d'influence sur le temps de séchage. [8]

I.10.3. Influence de l'humidité de l'air :

32

Une diminution de l'humidité relative entraîne une diminution du temps de séchage et comme résultat une accélération du processus de séchage.

I.11. Equipement d'une ligne de séchage des pâtes

Ci-dessous un exemple d'une lignes de séchage des pâtes, un tel dispositif est composé de **(Figure I.7)** :

- d'un tapis roulant où est placé le produit à sécher,
- d'un moteur électrique pour motoriser le tapis roulant.
- d'un système de chauffage de l'air pour augmenter la température de l'air ambiant.
- d'un system de diffusion d'air chaud (diffuseurs + tuyau).
- d'un système de régulation pour contrôler la température de l'air de séchage, son humidité et sa vitesse.



Figure .1.7. Exemple d'une ligne de production de pates sèche. [16]

I.11.1. La bande transporteuse (Tapis roulant):

Le convoyeur est un système de manutention automatique qui permet de déplacer des produits finis ou semi finis d'un point à un autre par le mécanisme de transmission de puissance. Cette dernière est transmise d'un arbre moteur vers un ou plusieurs arbres récepteurs par l'intermédiaire de courroies ou de chaînes. Le produit étant placés sur une bande ou sur une tôle qui se déplace d'une manière uniforme dans un circuit fermé. La vitesse de déplacement est relative à la vitesse de rotation du moteur et peut être contrôlée selon la volonté de l'opérateur en tenant compte des paramètres de productivité et de cadence de production. En effet, un convoyeur à bande se compose :

- D'un tambour de commande et de sa moto réductrice,
- D'un rouleau d'extrémité,
- D'un châssis porteur avec une sole de glissement qui assure le soutien de la bande,
- D'une bande transporteuse. [17]

Le schéma ci-dessous illustre les principaux éléments d'un convoyeur à bande :

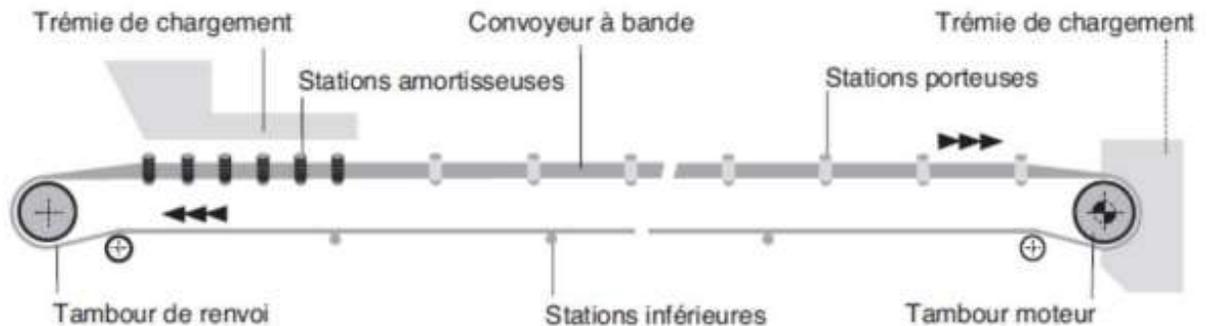


Figure. I.8. Schéma de base d'un convoyeur à bande. [19]

I.11.2. Le moteur électrique :

Le tapis roulant fonctionne sous l'effet d'un système motorisé (le moteur électrique transforme donc l'énergie électrique en énergie mécanique) dimensionné en fonction des besoins de ce dernier pour développer la force nécessaire pour déplacer le produit transporté sur le tapis roulant. .



Figure I.9. Exemple d'un moteur électrique

I.11.3. Soufflerie d'air :

Le processus de séchage dans n'importe quels système nécessite un élément de soufflage qui doit fournir le flux d'air nécessaire pour assurer un séchage complet du produit traité, cet appareil est appelé soufflerie. Les dimensions de la soufflerie sont fonction du débit massique d'air soufflé, du réseau de distribution de type et nombre de diffuseurs utilisés.



Figure I.10. Exemple de souffleur électrique

I.11.4. Diffuseur d'air :

Le diffuseur d'air est matérialisé par une grille le plus souvent en inox qui peut être ronde, carrée, rectangulaire. Il est employé pour laisser pénétrer l'air chauffé et distribuer uniformément le fluide de séchage sur la bande transporteuse ou est disposé le produit à sécher (dans notre cas des pâtes).



Figure I.11. Exemple de diffuseur d'air plafonnier

I.11.5. Système de chauffage :

Le système de chauffage peut être un générateur d'air chaud, un genre de chaudière à gaz ou chaudière électrique sinon un simple système de forme rectangulaire qui contient plusieurs résistances qui convertissent l'électricité en chaleur par effet de Joule, les tiges servent à chauffer l'air qui provient de la soufflerie d'air. Le système de chauffage quel que soit son type est lié à un système de régulation qui offre un contrôle de température et qui gère les conditions de séchage durant le dit processus de traitement.



Figure I.12. Tige à gaine métallique

I.11.6. Système de régulation :

Les résistances responsables au chauffage de l'air sont reliées à un système de régulation de puissance (carte *Arduino Uno* munie de capteurs de température et d'humidité dht11 et dh22). Les capteurs sont distribués sur plusieurs points du séchoir afin de contrôler d'une manière convenable la température de l'air.

Dans notre le (figure **III.11**), la carte Arduino communique avec le PC avec une vitesse de 9600Hz. Les capteurs dht11 envoient des signaux numériques via des ports (COM1, COM2 ou COM3) qui vont être traités en utilisant un programme JAVA, ce qui va conduire à prendre une décision d'enclencher ou déclencher la résistance électrique responsable de la régulation de température d'air. Une fois la température atteint une valeur de consigne choisie ici égale 55C, le contacteur coupe le courant à l'une des résistances utilisés dans le système de chauffage afin d'ajuster la température de l'air, ce système fonctionne comme un régulateur ON/OFF.

Il est a noté que la carte d'acquisition Arduino ainsi l'ensemble des instruments de mesures sont reliés à un PC via un câble USB pour enregistrer les valeurs acquises sur un fichier Excel.

Chapitre II

**Transfert de chaleur
et de masse dans un
milieu poreux**

II.1. Introduction

Au cours du séchage, la vapeur d'eau est générée dans le produit ou à la surface du produit puis transférée vers l'atmosphère loin de la surface d'échange. Le transfert de matière vers la surface a lieu en phase liquide ou/et en phase vapeur. Le changement d'état (liquide – vapeur) nécessite un apport d'énergie. Quatre étapes auront lieu :

- Un transfert de chaleur du milieu extérieur vers la surface du produit,
- Un transfert de chaleur au sein du produit,
- Un transfert de la matière (eau liquide et/ou vapeur) interne vers la surface d'échange,
- Et enfin, le transport de l'eau sous forme vapeur vers le milieu extérieur. [11]

Pour faciliter la compréhension de ces processus, certains auteurs les classent en deux catégories : transfert externe entre le milieu extérieur et la surface d'échange et transfert interne entre la surface d'échange et le cœur du produit. [5]

II.2. Caractéristiques de l'air de séchage

II.2.1. Humidité absolue :

L'humidité absolue est appelée aussi teneur en eau ou d'humidité, c'est la masse d'eau mélangée à un kilogramme de gaz sec, cette humidité désignée souvent par H_{ab} est donnée par la relation ci-dessous : [13]

$$H_a = \frac{M_a}{M_e} \quad \text{(II.1)}$$

Où

M_a et M_e sont les masses de vapeur d'eau et d'air sec contenues dans un même volume d'air humide. Qui peut être écrite en fonction de la pression totale et la pression partielle de la vapeur [3] :

$$H_a = 0.622 \left[\frac{P_v}{P - P_v} \right] \quad \text{(II.2)}$$

II.2.2. Humidité relative :

L'humidité relative est le rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau P_v et la pression de vapeur saturante P_s pour une température et un volume d'air donnés comme elle peut être calculée en divisant l'humidité absolue par l'humidité absolue à la saturation : [3]

$$\mathbf{Hr = \frac{P_v}{P_s} \quad \text{ou} \quad \frac{Ha}{Ha_{sat}}} \quad \mathbf{(II.3)}$$

II.2.3. Degré de saturation :

Soit H_a la valeur de l'humidité absolue d'un l'air pour une certaine température et H_{a_sat} est la valeur de l'humidité absolue de l'air saturé pour la même température ; on appelle degré de saturation de l'air, le rapport :

$$\mathbf{\psi = \frac{Ha}{Ha_{sat}}} \quad \mathbf{(II.4)}$$

Dans le cas où P_v et P_s sont petits devant P (cas de l'air humide sous pression atmosphérique et pour des températures peu élevées), on écrit :[1]

$$\mathbf{\psi = \frac{Ha}{Ha_{sat}} = \frac{P_v}{P_s}} \quad \mathbf{(II.5)}$$

II.2.4. Températures caractéristiques de l'air humide :

La chaleur transférer au milieu à sécher est apportée par un fluide caloporteur chaud qui assure aussi le transport de vapeur à l'extérieur de la chambre de séchage. On distingue quatre températures : [9]

a) Température dite de bulbe sec :

La température sèche ou La température de bulbe sec est celle indiquée par un thermomètre dont l'élément sensible est un bulbe sec, le thermomètre étant placé dans l'air. [9]

b) Température de bulbe humide :

Il s'agit de la température d'équilibre évaporatoire dynamique indiquée par un thermomètre dont le bulbe est entouré d'une mèche ou de coton humidifiée appelée température de bulbe humide Th . [7]

c) Température de rosée T_r :

40

C'est la température à laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air humide, la pression de saturation de la vapeur est constante si la température ne varie pas. [9]

d) Température de saturation adiabatique :

La température de saturation adiabatique correspond à la température atteinte par le gaz vecteur sortant, saturé en vapeur du liquide, d'une enceinte adiabatique contenant le liquide à la température T. [9]

II.3. Caractéristiques des solides humides

II.3.1. Teneur en eau à base sèche :

Teneur en eau appelée aussi humidité absolue d'un solide, s'exprime par (kg eau/kg matière sèche) [3] :

$$X = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (\text{II.6})$$

II.3.2. Teneur en eau à base humide :

Appelé aussi humidité relative d'un solide ou teneur en eau à base humide, est exprimée par la masse du liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse humide [kg eau/kg base humide] [3] :

$$X_r = \frac{M_h - M_s}{M_h} \quad (\text{II.7})$$

II.3.3. Hygroscopicité :

Un produit est dit hygroscopique lorsqu'il absorbe et retient facilement l'humidité de l'air et non hygroscopique lorsqu'il ne fixe pas naturellement les molécules d'eau présentes sous forme de vapeur dans l'air. [6]

II.3.4. Porosité volumique d'un produit :

La porosité volumique ε (Figure II.1) est définie par le volume du vide par le volume total du produit :

$$\varepsilon = \frac{V_{vide}}{V_{total}}, 0 < \varepsilon < 1 \tag{II.8}$$

Le rapport entre le volume intrinsèque du produit et le volume apparent du produit vaut donc $1 - \varepsilon$



Figure II.1. Volume de control

La notion de porosité est aussi nécessaire au niveau du séchoir, en particulier pour des produits en amas (Figure II.2). La définition est équivalente.

$$\varepsilon = \frac{\text{Volumes de l'amas} - \text{volumes du produit}}{\text{Volumes de l'amas}} \tag{II.9}$$

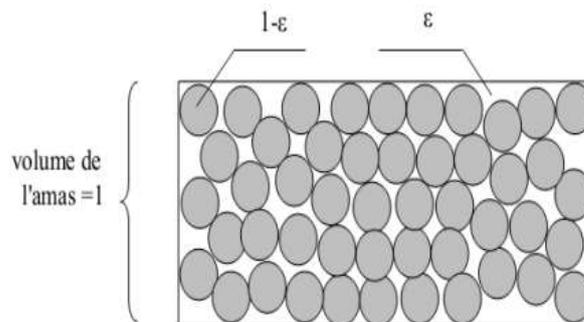


Figure II.2. Volume de contrôle macroscopique

II.4. Description du solide humide

Le solide a un film d'eau adhérent à sa surface externe par des forces superficielles. Une couche limite à la périphérie du solide est constituée par de l'air saturé en eau, c'est-à-dire de l'air contenant de la vapeur d'eau à une pression partielle égale à la tension de vapeur

d'une eau qui serait seule présente dans une enceinte, à la même température. C'est la valeur maximale que peut prendre la tension de vapeur d'eau à cette température. L'eau peut aussi se retrouver localisée à la surface ou au fond des pores : les forces qui la retiennent sont alors beaucoup plus fortes et ont trait à des phénomènes complexes de capillarité. Plus les pores sont de petites tailles, plus ces forces sont intenses. [9]

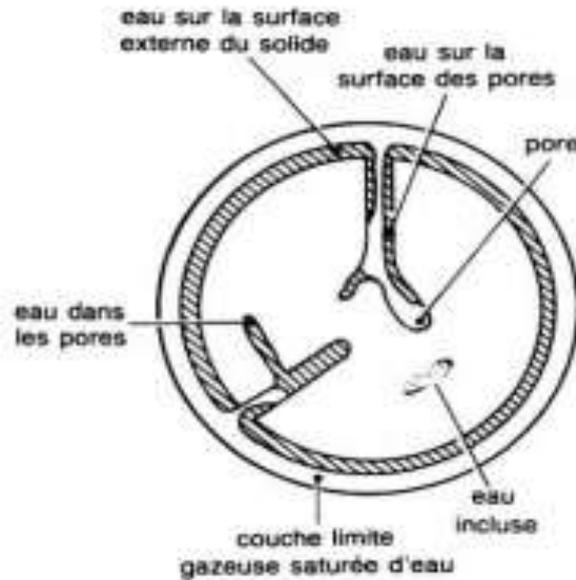


Figure II.3. Représentation schématique d'un solide humide [12]

II.5. Flux de chaleur

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur :

$$\varphi = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt} \quad \text{(II.10)}$$

Où S est l'aire de la surface (m²).

On appelle flux de chaleur ($\varphi = \frac{dQ}{dt}$) la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps.

II.5.1. Expression de flux de chaleur par convection :

Il s'agit de transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide. Quelle que soit le type de convection (libre ou forcée) et quel que

soit le régime d'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent), le flux de chaleur ϕ est donné par la relation de Newton :

$$\phi = hc S (T_p - T_f) \quad \text{(II.11)}$$

Avec :

- ϕ : Flux de chaleur transmis par convection (W)
- h_c : Coefficient de transfert de chaleur par convection ($\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)
- T_p : Température de surface du solide ($^\circ\text{C}$)
- T_f : Température du fluide loin de la surface du solide ($^\circ\text{C}$)
- S : Aire de la surface de contact solide/fluide (m^2).

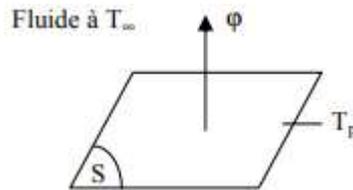


Figure II.4 : Schéma du transfert de chaleur convectif. [21]

Remarque : La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection (hc) est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide.

II.5.2. Flux de chaleur lié à un débit massique :

Lorsqu'un débit massique \dot{m} de matière entre dans le système à la température T_1 et en ressort à la température T_2 , on doit considérer un flux de chaleur entrant correspondant :

$$\phi = \dot{m} C_p (T_1 - T_2) \quad \text{(II.12)}$$

Avec :

- ϕ : Flux de chaleur entrant dans le système (W)
- \dot{m} : Débit massique (kg.s^{-1})
- C_p : Chaleur spécifique ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
- T_1, T_2 Températures d'entrée et de sortie (K)

II.5.3. Calcule du flux de chaleur :

Le problème majeur à résoudre avant le calcul du flux de chaleur consiste à déterminer le coefficient de transfert de chaleur par convection h_c qui dépend d'un nombre important de paramètres : caractéristiques du fluide, de l'écoulement, de la température, de la forme de la surface d'échange, etc.

Le calcul d'un flux de chaleur transmis par convection forcée s'effectue donc de la manière suivante :

1. Calcul des nombres adimensionnels de Reynolds et de Prandtl, ces deux nombre adimensionnels se calcule en utilisant respectivement les formules suivantes :

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} ; Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda}$$

2. Suivant la valeur de Re et la configuration \rightarrow choix de la corrélation.

3. Calcul de nombre de Nusselt Nu par application de cette corrélation.

$$Nu = f(Re, Pr)$$

4. Calcul de $hc = \frac{\lambda Nu}{D}$ et de $\phi = hc S (T_p - T_f)$

Avec :

- ρ : la masse volumique ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).
- V : la vitesse (m/s).
- D : la dimension caractéristique de la géométrie considérée (m).
- μ : la viscosité dynamique (Pa.s).

II.6. Définition des coefficients de transfert de chaleur et de masse

Un tel procédé de séchage fait l'objet une modélisation mathématique basé sur les phénomènes de transferts de chaleur et de masse par convection. Qui peuvent être étudiés à l'échelle du matériau seul, contrôlés par des conditions adéquates dans les laboratoires de recherche comme dans les installations industrielles. Par conséquent dans des séchoirs de types très variés où les conditions de températures, humidités, vitesses sont très variables en

temps et en espace. Pour cela une maîtrise entre l'agent sécheur et la surface du produit à sécher et nécessaire.[20]

Les échanges entre l'air balayant la serre et le produit humide sont caractérisés par un transfert couplé de chaleur et de masse. Le transfert de chaleur sensible est dû à l'écart de température entre l'air et la surface des produits a séché.

L'expression [II.11] permet de définir le coefficient de transfert de chaleur sensible, h_c ($W/m^2 \cdot K$) caractérise ce flux de chaleur et qui dépend des propriétés de l'écoulement d'air.

Le gradient de concentration en vapeur d'eau existant entre les boues humides et l'air constitue la force motrice du transfert de masse. Le coefficient de transfert de masse, km (m/s) permet de caractériser le transfert de masse décrit par l'équation [II.13] :

$$\dot{m}_v = km (Cs - Ca)S \quad (II.13)$$

La concentration volumique de vapeur est directement liée à la pression partielle. En considérant le mélange air vapeur comme un gaz parfait, l'expression [II.12] s'écrit également

$$\dot{m}_v = S \cdot km \cdot \rho_v \frac{(p_{sat}(Ts) - p_{v,a})}{rT} \quad (II.14)$$

Le transfert de masse s'accompagne d'un transfert de chaleur latente exprimée comme suit :

$$Q_{lat} = Lv \frac{Km}{rT} (p_{sat}(Ts) - p_{v,a}) \quad (II.15)$$

Les aires où s'effectuent les transferts de chaleur et de masse sont respectivement la couche limite thermique et la couche limite de diffusion.

Qui correspondent à la variation progressive de la température T_s à T_a , et pour l'autre, à la zone dans laquelle la concentration de vapeur d'eau varie progressivement de C_s à C_a .

Les coefficients d'échange h_c et km permettent de caractériser de façon globale ces échanges à travers des couches limites. Ils dépendent des propriétés physiques des fluides, de la nature de l'écoulement et des caractéristiques de la surface d'échange. Dans le cas où P_{sat} , T_s et $P_{v,a}$ sont petits devant la pression totale (pression atmosphérique), les équations décrivant les transferts de chaleur et de masse, ainsi que leur conditions aux limites sont de

formes analogues. Les nombres de Nusselt (Nu) et le nombre de Sherwood (Sh) caractérisent respectivement les échanges de chaleur et de masse. [20]

II.7. Processus de transfert de chaleur et de matière

II.7.1. Transfert externe :

L'opération de séchage nécessite un transfert de matière (vapeur d'eau) de la surface d'échange vers le milieu extérieur. L'établissement et le maintien d'un gradient de pression partielle de vapeur d'eau de la surface d'échange vers le milieu environnant sont ainsi essentiels. Ce processus doit être étroitement couplé au transfert de chaleur en vue de maintenir la surface d'échange du matériau à une température assurant la meilleure pression partielle de vapeur d'eau, ainsi que de fournir le débit de chaleur nécessaire au changement de phase (liquide- vapeur ou solide-vapeur dans la lyophilisation).

La chaleur est transférée vers la surface par convection, par contact ou par rayonnement. Les cas du chauffage par micro-ondes est spécifique d'un chauffage dit volumique. Dans le séchage par convection, le débit de transfert de chaleur vers la surface dépend de la différence de température, de la surface d'échange et du coefficient de convection généralement forcée. Ce dernier dépend principalement de la vitesse de l'air

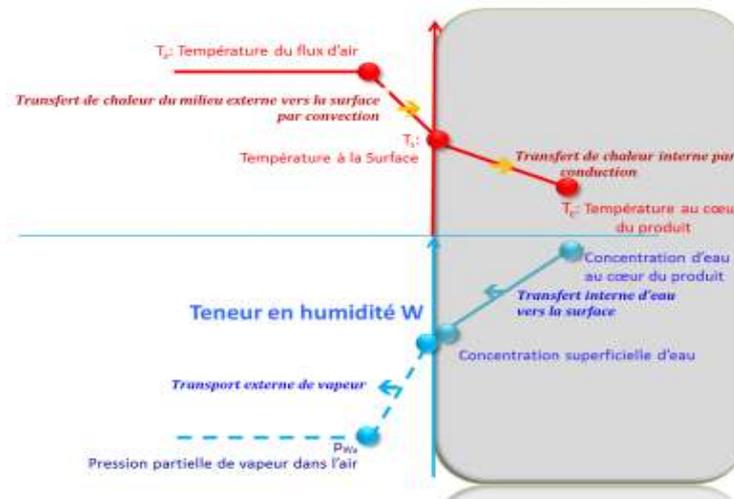


Figure II.5. Schéma traduisant les niveaux de température et d'humidité générant des flux de chaleur et de matière lors d'un séchage par convection d'air [5]

L'air en contact avec la surface du produit forme une couche d'autant plus mince que la vitesse du flux d'air est importante. Au sein de cette couche, sont instaurés deux flux opposés de chaleur et de matière, cet ensemble de flux se traduit par les relations (Eq.II.11) et (Eq.II.14) :

- La température humide peut être atteinte avec l'équilibre du système :

$$\dot{Q} = \dot{m}_v L \quad (\text{II.16})$$

- La température humide T_s est donnée par :

$$T_s = T_{air} - \frac{L}{h} k \rho_v \frac{(p_{ws} - p_{wa})}{P_{totale}} \quad (\text{II.17})$$

Le taux de séchage, quand l'opération est contrôlée par des processus externes, est \dot{m}_v . Il évolue généralement avec le niveau de température et l'activité d'eau à la surface d'échange, définissant la pression partielle de vapeur d'eau P_{wa} . Il dépend également de la valeur de la surface d'échange qui diminue généralement en raison du phénomène de retrait. [5]

II.7.2. Transfert interne :

II.7.2.1. Transfert de chaleur :

L'opération de séchage est assurée par les transferts internes, l'intensification est concrétisée par la variation de la température au sein du corps à l'inférieure bien qu'à l'extérieure, elle doit être limitée afin de préserver la qualité chimique (ou biochimique) du produit, texturale (couleur, forme...), aromatique et gustative du corps. Le débit de chaleur assure le changement de phase d'eau en vapeur, en partie à la surface ou au sein de la matière.

Dans de nombreux cas, le corps considéré est un milieu poreux au sein duquel les transferts couplés de chaleur et de matière interviennent d'une façon spécifique. La présence des pores contenant du gaz et permettant d'établir le lieu d'évaporation et de condensation de l'eau renforce le débit de chaleur ; le phénomène peut être traduit par un transfert de type similaire à conduction de *Fourier* avec une conductivité effective

Une partie de ce débit de chaleur est utilisée pour évaporer l'eau au sein des pores en question, alors qu'une partie, considérée rapidement comme négligeable, sert à modifier la température de la matière (solide et eau).

La conductivité thermique effective dépend de la structure et de la teneur en eau du produit. Ainsi, au cours du séchage, la diminution de la teneur en eau induit une diminution de la conductivité thermique, alors que l'augmentation de la compacité de la structure en raison du phénomène de retrait l'augmente. [5]

II.7.2.2. Transfert de matière :

Au sein d'un milieu poreux, l'eau est transférée sous forme de liquide et/ou vapeur selon divers mécanismes citant :

a) Diffusion classique :

L'eau liquide est transférée par diffusion dite classique, capillarité, osmose à travers de nombreuses parois cellulaires. Ces processus ont lieu quand la température du produit est inférieure à la température d'ébullition avec une diffusivité effective D_{eff} en adoptant la formulation d'Allaf (1982), on pourra écrire :

$$\frac{\rho_w}{\rho_s} (\vec{v}_w - \vec{v}_s) = -D_{eff} \vec{\nabla} \left(\frac{\rho_w}{\rho_s} \right) \quad \text{(II.18)}$$

b) Transfert de vapeur :

Quand l'évaporation aura lieu dans le volume du produit, le transfert de vapeur d'eau peut intervenir dès le début de l'opération mais il ne doit devenir prépondérant qu'au cours des dernières étapes du séchage. Ce transfert est souvent réalisé par diffusion ; le lien entre la température et le niveau de pression partielle est alors à la base de la situation paradoxale

c) Cas de génération :

D'une pression totale (au sein du produit) supérieure à la pression extérieure Dans un milieu chauffé par micro-ondes, par vapeur d'eau surchauffée ou lors d'une opération de

déshydratation par détentes successives (DDS), le transfert de vapeur peut être géré par le gradient de pression totale ou par une permutation de type Darcy :

$$\rho_v V_v = -\frac{K}{v_v} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (\text{II.19})$$

d) Diffusion de Knudsen :

Dans le cas de très faible pression totale, comme la lyophilisation, les molécules ne peuvent pas entrer en collision entre elles mais plutôt avec les parois du récipient. [5]

II.7.3. Phénomènes limitant :

La vitesse à laquelle s'effectue le séchage est liée à l'allure des transferts internes et externes de matière et de chaleur. Ces transferts correspondent à des mécanismes que l'on peut considérer comme disposés en parallèle ou en série. Dans ce dernier cas, c'est le mécanisme le plus lent qui constitue l'étape limitant et qui détermine la vitesse du procédé. Lors du séchage par entraînement d'un produit biologique, c'est le plus souvent le transfert interne de matière qui correspond au phénomène limitant. Dans le cas d'un séchage par ébullition, c'est plutôt l'allure du transfert de chaleur qui limite la vitesse de séchage. [15]

II.7.3. Transferts d'eau en séchage :

Les corps à sécher sont constitués par une matrice continue, éventuellement interrompue localement, dans le cas d'un solide, par des pores pouvant déboucher à la surface de celui-ci. L'humidité peut se localiser aussi bien à la surface externe du produit que dans les pores ou au sein même de la matière (figure II.3). Le séchage peut être décrit comme un transfert d'eau couplé à un transfert de chaleur, dans un matériau poreux non saturé. Dans les produits biologiques le transfert interne d'eau est souvent le phénomène limitant. La taille des pores et la distribution des rayons des pores.

Dans le produit, influent sur le caractère hygroscopique du produit (plus les pores sont petits, plus le caractère hygroscopique est important).

La vaporisation de l'eau nécessite un apport énergétique de source extérieure au produit à sécher, qui provoque la migration de l'eau vers le milieu ambiant. La vitesse de ce transfert de matière varie au cours du temps. Elle dépend des conditions ambiantes

(température, humidité relative, vitesse des gaz en contact avec le produit), mais aussi de la nature même du solide et de l'eau.

Les difficultés sont plus complexes dans les aliments solides que dans les liquides. Le transfert de masse implique un transfert d'une variété de composants avec la phase et en interphase par diffusion moléculaire naturelle ou par convection forcée. La masse est transférée par gradient de concentration ou de pression partielle [12].

II.8. Conclusion

La recherche bibliographique menée dans ce chapitre permet de mieux comprendre le concept de processus de transfert de chaleur et de masse en expliquant comment calculé les caractéristiques de l'air (humidité relative, humidité absolue, degré de saturation etc.) ainsi que les différentes équations de calcul de flux de chaleur et les formules de calcul des coefficients de transfert de chaleur et de masse.

Chapitre III
Conception et
dimensionnement de
l'installation étudiée

III.1.Introduction

Dans les procédés industriels, l'utilisation de la convection forcée à air chaud pour le séchage est la plus courante. Il existe deux types de séchage par convection: à flux transversal (de bas en haut ou de haut en bas) et / ou à air léchant ou à flux d'air horizontal. Cette étude ne s'intéresse qu'au séchage à air traversant, une attention sera donc portée aux résultats pour ce type de séchage. Ce chapitre vise à:La détermination des caractéristiques thermodynamiques de l'air de séchage avant et après le contact air-produit ;

- Le calcul du débit d'air soufflé ;
- Calcul et dimensionnement de la chaîne de séchage (tapis roulant, moteur électrique, générateur d'air chaud, diffuseur et système de contrôle) ;

III.2.Le rôle de la convection dans le séchage

La quantité d'eau évaporée en surface ainsi que l'efficacité du séchage dépendent de l'intensité des échanges de chaleur convectifs et de masse qui varient en fonction du régime d'écoulement, du débit d'air soufflé et de l'état de l'interface pâtes-air. Lors du séchage, la texture du matériau se modifie notamment par l'apparition de crevasses et de fissures, ce qui se traduit par une modification de la surface du matériau et par conséquent par une modification des coefficients d'échange avec l'environnement.[20]

III.3. Calcul et dimensionnement

III.3.1.Détermination des caractéristiques de l'air (avant et après le séchage) :

Tableau III.1. Caractéristiques de l'air dans les différentes phases de séchage

P1 (air ambiant)		P2 (air chaud avant séchage)		P3 (air chaud après séchage)	
Température (bulbe sec)	20,0°C	Température (bulbe sec)	55,0°C	Température (bulbe sec)	40,0°C
Température (bulbe humide)	15,8°C	Température (bulbe humide)	26,2°C	Température (bulbe humide)	26,0°C
Point de condensation	13,3°C	Point de condensation	13,3°C	Point de condensation	20,8°C
Humidité relative	65,2%	Humidité relative	9,7%	Humidité relative	33,2%
Humidité absolue	0,0095kg/kg	Humidité absolue	0,0095kg/kg	Humidité absolue	0,0154kg/kg
Enthalpie	44,2kJ/kg	Enthalpie	80,1kJ/kg	Enthalpie	80,0kJ/kg
Densité	1,197kg/m ³	Densité	1,070kg/m ³	Densité	1,117kg/m ³
Volume spécifique	0,843m ³ /kg	Volume spécifique	0,944m ³ /kg	Volume spécifique	0,909m ³ /kg
Pression	101325,0Pa	Pression	101325,0Pa	Pression	101325,0Pa
Débit d'air	5400m ³ /h	Débit d'air	5400m ³ /h	Débit d'air	5400m ³ /h

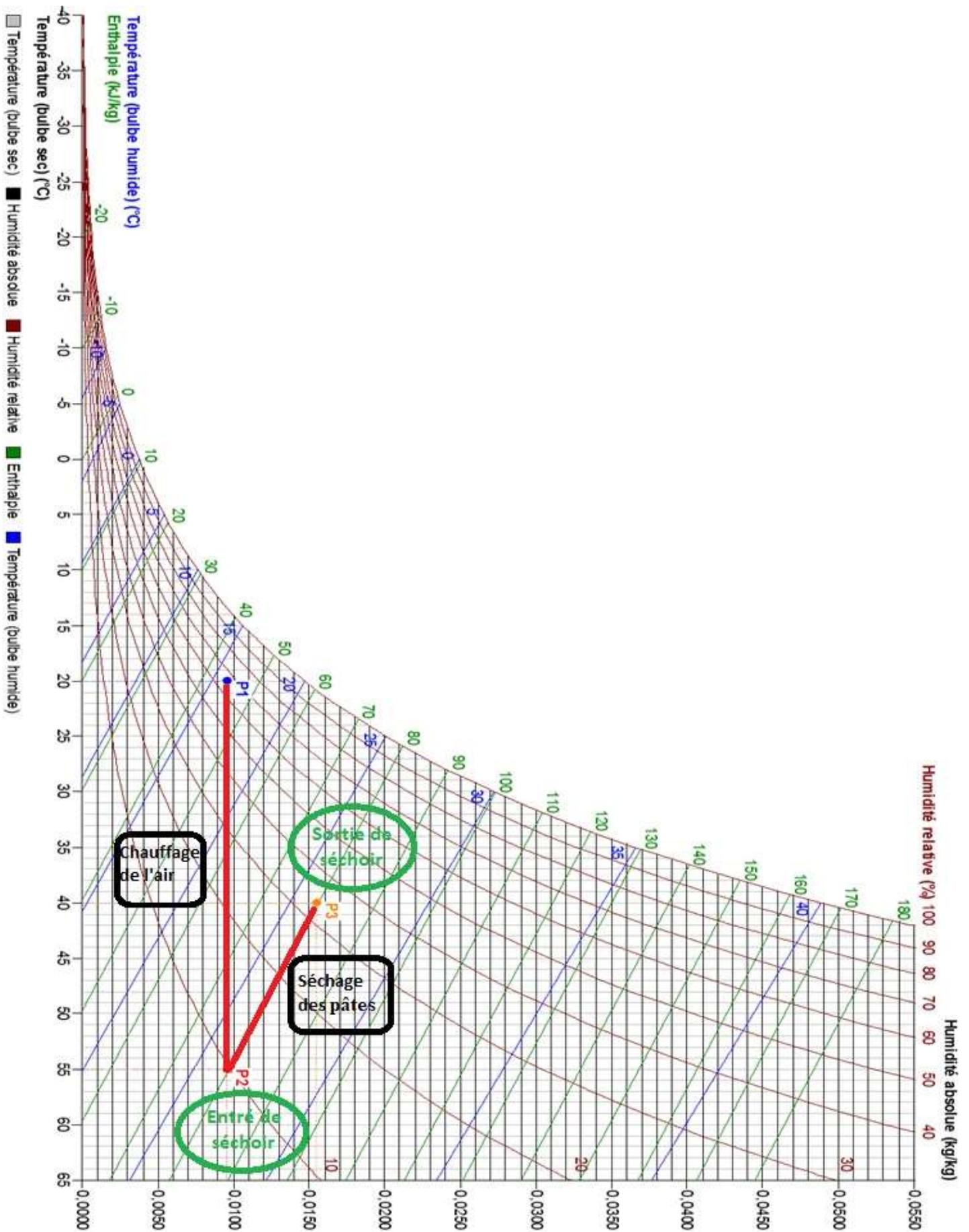


Figure III.1. Diagramme de l'air humide

A partir du diagramme de l'air humide les caractéristiques ci-dessous des points 1, 2 et 3 ont été déterminées (**tableau III.1**) :

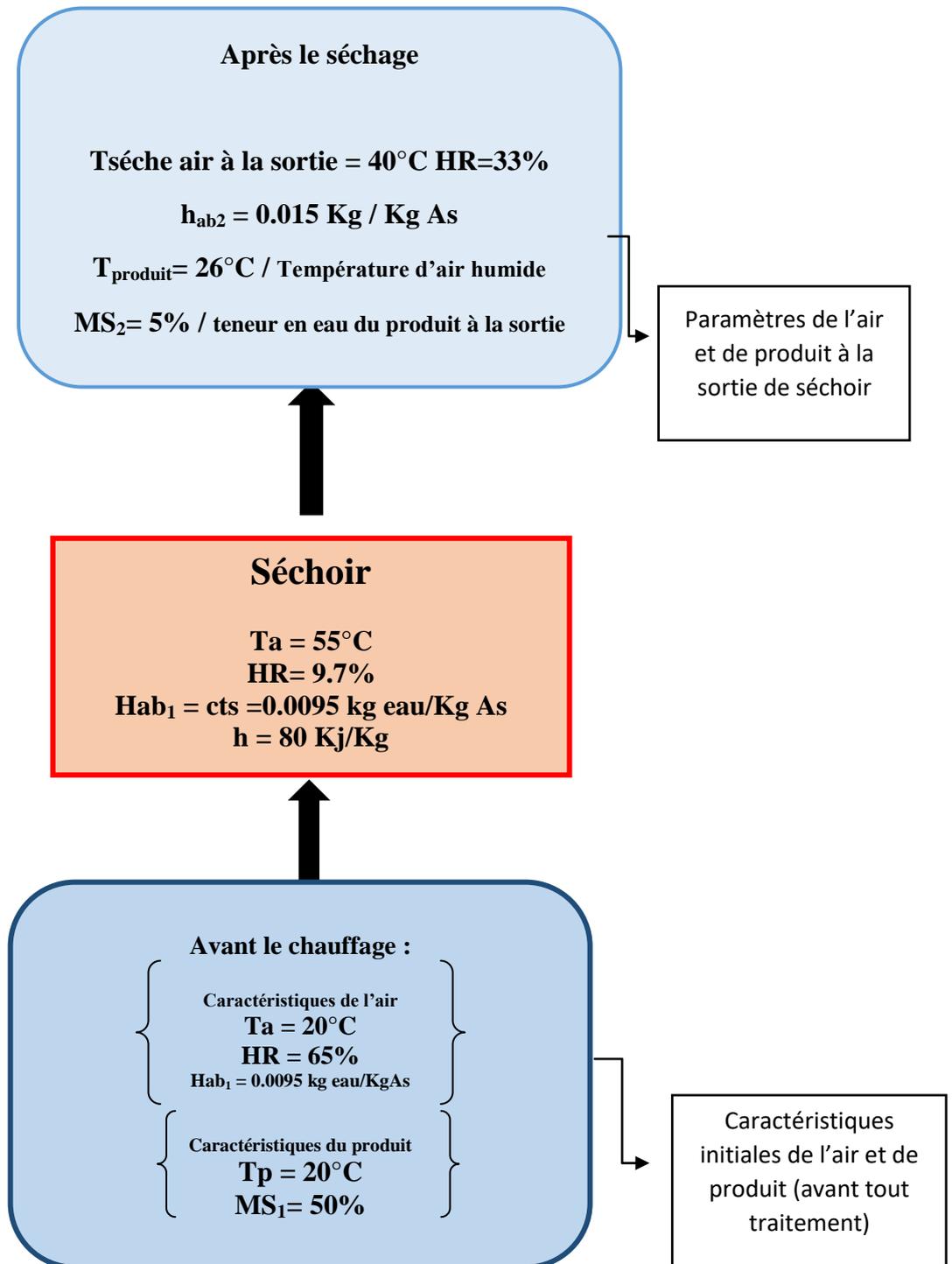


Figure III.2. Caractéristiques de l'air et du produit avant et après le séchage

Enthalpie de l'air de séchage

L'enthalpie d'un système est une mesure de l'énergie du système disponible sous forme de chaleur à pression constante (1bar), plus précisément durant le séchage, l'enthalpie est l'énergie emportée par l'air sous forme de chaleur sensible et chaleur latente. Par exemple pour passer d'un 1kg d'eau de l'état liquide à l'état vapeur, il faut fournir une quantité d'énergie supplémentaire correspondant à ce que l'on appelle la chaleur latente de vaporisation de l'eau qui correspond à 2250 kJ/kg.

$\text{L'enthalpie } h = \text{Chaleur sensible} + \text{Chaleur latente}$
--

La chaleur sensible peut être déterminée que ce soit du diagramme de l'air humide (en mettant l'humidité absolue du système nulle c'est-à-dire 0 g d'eau/kg air sec), de là en tire la chaleur sensible emportée par l'air de température connue.

$h = 80 \text{ kJ/kg}$ déterminer du diagramme ci-dessus.

Chaleur sensible = CS = 55Kj/Kg

Donc : la chaleur latente de ce air = CL = 80 – 55= 25Kj/Kg

Enutilisant la méthode numérique on obtient :

$$h = M_{ve} \cdot CL_{,vp} + (M_{ve} \cdot Cp_{,ve} + M_{,as} \cdot Cp_{,as}) T \quad \text{(III.1)}$$

Chaleur latente

Chaleur sensible

- M_{ve} : masse de vapeur ou humidité absolue de l'air initiale (kg d'eau /kg as)
- $CL_{,vp}$: Chaleur latent de vapeur d'eau (Kj/Kg).

$$CL_{,vp} = 2500Kj/Kg$$

- $Cp_{,ve}$: Capacité thermique à pression constante de la vapeur d'eau (kj/kg).

$$Cp_{,ve} = 2.02 \text{ kj/kg}$$

- M_{as} : Masse sèche d'air (kj/kg K)
- $Cp_{,as}$:Capacité thermique de l'air sec (kj/kg K)

$$Cp_{,as} = 1 \text{ kj/kg K}$$

- T : Température d'air (°C).

$$h = 0.0095 \times 2500 + (0.0095 \times 2.0 + 1) \times 55$$

$$h = 24 + 56 = 80 \text{ kJ / kg}$$

Donc :

- CL = 24 kJ/kg
- CS = 56 kJ/kg

III.3.2. Caractéristiques géométriques du tapis roulant :

- le tapis roulant est d'une longueur de 20m et de 50 cm de largeur ;
- le diamètre des tombeurs de convoyeur est de diamètre de 10 cm ;
- durée de séchage est fixée à 10 minutes pour que le produit sort sec du système ;
- la vitesse du tapis est déterminée des données précédentes soit :

Vitesse du tapis égale = distance parcourue / temps de séchage

$$V_t = 2000 / 600 = 3.33 \text{ cm/s}$$

- Le nombre de diffuseur d'air utilisé est proposé 20 diffuseurs avec 1m entre diffuseur et diffuseur où le premier se place à 50cm du point 0 du tapis et le dernier se place 50 cm de l'autre extrémité.

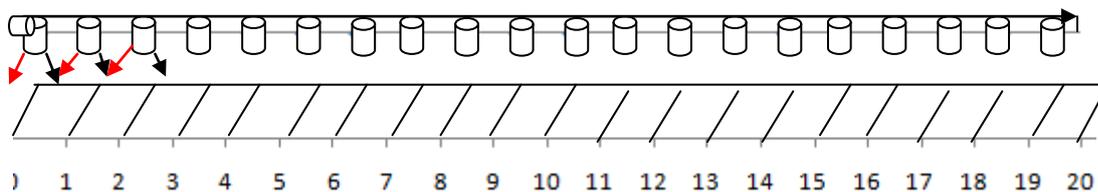


Figure III.3. Schéma synoptique de placement de diffuseurs sur la chaîne de séchage

III.3.3. Calcul du débit d'air soufflé :

On désire sécher un produit dont sa teneur en eau est égale à 50%, jusqu'au environ 5% de teneur en eau, le débit de produit à traiter a été choisi égale à 360 kg/h soit $360 / 60 = 6 \text{ kg/min}$ soit 60 kg/10 minutes .

Remarque : le produit à sécher reste 10 minutes sur le tapis roulant (bande transporteuse).

En supposant que durant le séchage, il n'y a pas de pertes de chaleur à travers les parois du séchoir utilisé, le régime est stationnaire et en négligeant les pertes de matière.

$$\dot{m}_{p1}.MS1 = \dot{m}_{p2}.MS2 \quad \text{(III.2)}$$

- \dot{m}_{p1} et \dot{m}_{p2} sont les débits de produit à l'entrée et à la sortie.
- MS1 et MS2 sont le pourcentage de matière sèche dans le produit avant et après le séchage.

D'où : $60 \times 0.5 = 0.95 \times \dot{m}_{p2} \rightarrow \dot{m}_{p2} = 31.57 \text{ kg/h}$

En utilisant le diagramme de l'air humide :

$$h_{ab2} = 0.015 \text{ Kg/Kg As}$$

En appliquant le bilan matière :

$$\dot{m}_a \times (H_{a2} - H_{a1}) = \dot{m}_{pMS} \times (X_1 - X_2) \quad \text{(III.3)}$$

Avec $\dot{m}_{pMS} = 60 \times 0.5 = 30 \text{ kg/h}$

$$X_1 = 50/50 = 1 \text{ kg d'eau/kg ms}$$

$$X_2 = 5/95 = 0.052 \text{ kg d'eau/kg ms}$$

En appliquant la formule [3.3] :

$$\dot{m}_a = 30 \times (1 - 0.052) / (0.015 - 0.0095) = 5170 \text{ kg d'air/h} \approx 5400 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (avec } \rho_{\text{air}} = 0.96 \text{ kg/m}^3\text{)}.$$

III.3.4. Calcul de la puissance du moteur de tapis roulant :

La puissance du moteur est calculée en fonction des caractéristiques du tapis roulant et de produit à sécher :

Dimensionnement du tapis roulant :

- 20 m de longueur et 0.5 m de largeur.
- Diamètre des tombeurs : 0.1 m.
- Vitesse de déplacement : 3.33 cm/s, 0.033 m/s.

Données à propos du produit à sécher (Pâtes alimentaires) :

- Débit de 360 Kg/h.
- Masse volumique de 700 Kg/m³.

$$P = C \cdot \omega \quad \text{(III.4)}$$

Avec :

P : puissance électrique (kW).

C : Couple de moteur (mN).

ω : vitesse angulaire (rd/s).

Pour calculer la puissance du moteur, il faut tout d'abord déterminer la vitesse angulaire et le couple moteur :

III.3.4.1. Calcule de la vitesse angulaire (ω) :

$$V = r \cdot \omega \quad \text{(III.5)}$$

V : vitesse linéaire du convoyeur (m/s)

r : rayon du tambour de convoyeur (m)

$$\omega = v/r$$

$$\omega = 0.033/0.05$$

$$\omega = 0.66 \text{ rd/s}$$

III.3.4.2. calcule de nombre des tours de convoyeur (N_{tr1}) :

$$\omega = \frac{2\pi N_{tr1}}{60} \quad \text{(III.6)}$$

$$N_{tr1} = \frac{60 \cdot \omega}{2\pi}$$

$$N_{tr1} = \frac{60 \cdot 0.66}{2\pi}$$

$$N_{tr1} = 6.30 \text{ tr/mn}$$

III.3.4.3. Détermination de la masse totale :

M_{totale} = masse de produit sur le convoyeur + la masse de la bande de convoyeur

La bande du moteur dépend de son épaisseur et sa composition, donc les fournisseurs donnent un poids / mètre de la bande, donc notre bande a un poids de 2 kg / m

$$\rho_{produit} = m_{produit} / v_{produit} ; \text{ donc : } m = \rho_{produit} \cdot v_{produit}$$

$$V_{\text{produit}} = 0,03 \times 20 \times 0,5$$

$$V_{\text{produit}} = 0.3 \text{ m}^3$$

Alors : $m = 700 \times 0.3 = 210 \text{ kg}$

$$M_{\text{totale}} = 210 + (2 \times 20 \times 2)$$

$$M_{\text{totale}} = 210 + 80$$

$$M_{\text{totale}} = 290 \text{ kg}$$

III.3.4.4. calcul du couple moteur (C):

Pour atteindre une vitesse de déplacement de tapis roulant qui nous avons calculée précédemment (0.033 m/s) le moteur prendra une période d'accélération fixe de 3 s, et pour cela nous allons avoir 2 couple moteur, un couple pendant l'accélération et un couple pendant la marche normale de convoyeur.

- **Pendant l'accélération :**

$$C = F \cdot r \tag{III.7}$$

$$F_{h1} = M_{\text{totale}}(a + g \cdot C_{fd}) \tag{III.8}$$

Avec :

a : accélération (m/s^2).

$$a = v/t = 0.033/3 = 0.11 \text{ m/s}^2$$

g : la pesanteur (m/s^2).

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

F_h : la force horizontale (N)

C_{fd} : coefficient de frottement dynamique

$$C_{fd} = 0.07$$

$$F_{h1} = 290 \times (3.3 \times 10^{-3} + 9.8 \times 0,07)$$

$$F_{h1} = 202 \text{ N}$$

Donc :

$$C_1 = 200 \times 0.05$$

$$C_1 = 10 \text{ mN}$$

- **Pendant la marche normale :**

$$F_h = M_{\text{totale}} \cdot g \cdot C_{fd}$$

(III.9)

$$F_h = 290 \times 9.8 \times 0.07$$

$$F_h = 198 \text{ N}$$

Donc :

$$C_2 = 198 \times 0.05$$

$$C_2 = 9.9 \text{ mN}$$

Après la détermination des différents paramètres nécessaires on va calculer la puissance maximale du moteur pendant la période d'accélération et pendant la phase normale en utilisant la formule [3.4]:

$$P_1 = C \cdot \omega$$

$$P_1 = 10 \times 0.66$$

$$P_1 = 6.6 \text{ kW}$$

$$P_2 = 9.9 \times 0.66$$

$$P_2 = 6.5 \text{ kW}$$

Remarque : les puissances pendant l'accélération et la phase normale sont presque les mêmes donc un moteur de 7 kW est capable de motoriser le convoyeur.

III.3.5. Calcul de diamètre de diffuseur d'air :

Le débit volumique égale $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ si on divise ce débit par le nombre de diffuseurs disponible sur la chaîne de séchage (20 diffuseurs) on obtient :

$$\dot{m}_{\text{diff}} = 1.5/20 = 0.075 \text{ m}^3/\text{s}$$

La vitesse de soufflage a été fixée égale 1.5 m/s d'où cela nous permet de calculer la section de la canalisation de soufflage :

$$\dot{m}_{\text{diff}} = \text{Vitesse} \times \text{Section} \quad \text{(III.10)}$$

$$\dot{m}_{\text{diff}} = V \cdot S$$

Ce qui permet de déterminer :

$$S = \dot{m}_{\text{diff}} / V$$

$$S = 0.075 / 1.5 \text{ d'où } S = 0.05 \text{ m}^2$$

De cette dernière valeur de section de canalisation on calcule le diamètre du tuyau du diffuseur, soit :

$$S = \pi D^2 / 4 \quad \text{(III.11)}$$

$$\text{D'où } : D = \sqrt{4S/\pi}$$

$$D = 0.25 \text{ m}$$

D= 0.25 m soit 25 cm de diamètre

Solution par une deuxième méthode de calcul :

- **Résolution du problème :**

Pour transformer 28.5 litres d'eau liquide à 20°C en vapeur saturante à pression atmosphérique, il faut créer une différence de pression partielle entre l'eau liée qui réside à l'intérieur du produit humide et sa surface supposée humide. Les quantités de chaleur mises en œuvre sont :

- Pour le chauffage du liquide :

$$Q_{\text{chauffage}} = mC\Delta T \quad \text{(III.12)}$$

$$Q_{\text{chauffage}} = 28.5 \times 4.18 \times (55 - 20)$$

$$Q_{\text{chauffage}} = 4170 \text{ kJ}$$

C : Capacité calorifique d'eau (4186 J/kg.K = 4.18 kJ/kg.K).

- Pour la vaporisation :

$$Q_{\text{vaporisation}} = mLv \quad \text{(III.13)}$$

$$Q_{\text{vaporisation}} = 28.5 \cdot (2495 - 2,346 \times 55)$$

$$Q_{\text{vaporisation}} = 67431 \text{ kJ}$$

L_v : Chaleur latente de vaporisation ($L_v = 2495 - 2,346 \cdot \theta \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; $0^\circ\text{C} < \theta < 100^\circ\text{C}$)

- Soit au total :

$$Q_{\text{tot}} = 4170 + 67431 = 71607 \text{ kJ}$$

Un kilogramme d'air de température 55°C transporte une énergie de 80 kJ/kg ; Cela veut dire que notre produit nécessite une quantité d'air de :

$$Q_a = 71607 / 80 = 895 \text{ kg d'air} \approx 900 \text{ m}^3 \text{ d'air chaud}$$

Sur dix minutes de séchage sous une température de 55°C , le débit d'air soufflé doit être égal :

$$\dot{m}_a = Q_a / t = 900 / 600 = 1.5 \text{ m}^3/\text{s}$$

La chaîne de production contient 20 diffuseurs, d'où le débit d'air de chaque diffuseur est égale à :

$$\dot{m}_{\text{diff}} = \dot{m}_a / 20 = 1.5 / 20 = 0.075 \text{ m}^3/\text{s}$$

La vitesse de soufflage a été fixée égale 1.5 m/s d'où cela nous permet de calculer la section de la canalisation de soufflage donc le diamètre de diffuseur est 25 cm en utilisant le même calcul précédent.

Donc, pour sécher 360 kg de pâtes par heure de $M_{\text{produit_sec}} = 50\%$ à 95% de teneur en matière sèche on aura besoin d'une soufflerie d'air qui peut fournir un débit d'air d'environ $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ avec un système de chauffage de l'air puissant pour augmenter la température d'air de 20°C à une température optimale de 55°C .

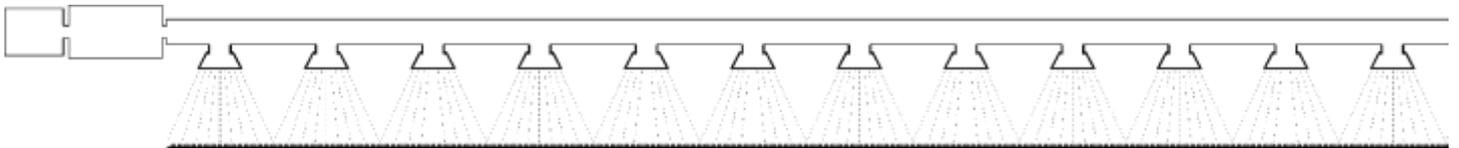


Figure III.4. Schéma de la ligne de séchage.

III.3.6. Calcul de la puissance du système de chauffage :

Le calcul de la puissance de chauffage nécessaire pour chauffer l'air de séchage de la température 20°C jusqu'à une température maximale de séchage (55°C) sous un débit d'air de fonctionnement 1.5m³/s, en utilisant la formule (II.12) de Flux de chaleur lié à un débit massique :

$$\varphi = \dot{m} C_p \Delta T$$

- φ : Flux de chaleur (W)
- \dot{m} : Débit massique d'air de séchage (Kg/s)
- C_p : Capacité calorifique de l'air à la température de séchage (J/kg k)
- ΔT : Différence de température entre le soufflage et l'extraction (en k)

$$\Delta T = T_s - T_e$$

- T_e : Température de l'air ambiant, k
 - T_s : Température maximale de séchage des produits agroalimentaire, prise égale à 55°C
- où 328k

Lors du calcul, la température de l'air ambiant a été prise égale 20°C :

A.N. $\varphi = 1.5 \times 960 \times (55 - 20) \approx 50400 \text{ W}$

$$\varphi \approx 50400 \text{ Watt soit } 50 \text{ kw}$$

Le system de chauffage à installer doit être capable de fournir une puissance de 50 kw pour élever la température de l'air de 20 à 55°C nécessaire au séchage des pattes.

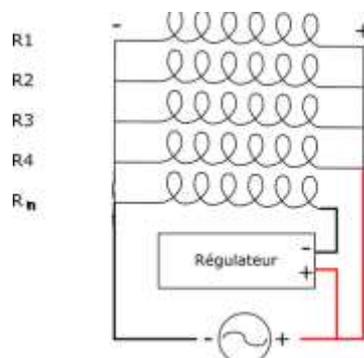


Figure III.5. Schéma d'installation des résistances électrique de système de chauffage

III.4. Coefficients de transfert de chaleur et de masse

III.4.1. Coefficients de transfert de chaleur (h_c)

Toute tentative de conception et d'amélioration d'un séchoir nécessite une compréhension préalable des échanges existants entre l'agent sécheur et la surface du produit à sécher. L'échange convectif sensible entre l'air et les pâtes aboutit à un transfert de chaleur de l'air vers les pâtes, proportionnel à l'écart de température. Mathématiquement, on définit de la manière suivante le coefficient de transfert thermique (ici pour un cas de transfert thermique surfacique).

Le coefficient de transfert de chaleur permet de quantifier un transfert de chaleur réalisé par un phénomène de convection au sein d'un fluide en mouvement, le calcul du coefficient d'échange est en fonction de l'expression de flux de chaleur par convection

(II.11):

$$h_c = \frac{\varphi}{S \cdot \Delta T}$$
$$h_c = \frac{50400}{0.5 \times 20 \times (55 - 20)}$$
$$h_c = 144 \text{ W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Avec :

- h_c : coefficient de transfert thermique, exprimé en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$;
- φ : Flux de chaleur, en (W) ;
- S : surface d'échange, en mètres carrés (m^2) ;
- ΔT : différence de température de part et d'autre de la surface d'échange, en kelvins ou en degrés Celsius (K ou $^\circ\text{C}$) ;

Remarque : Plus ce coefficient est grand, plus le transfert thermique est facile.

Tableau III.2. Ordre de grandeur du coefficient de transfert de chaleur par convection.[21]

Configuration	h (Wm ⁻² °C ⁻¹)
<u>Convection naturelle</u>	
Dans un gaz	2-10
Dans un liquide	100-1000
<u>Convection forcée</u>	
<u>Avec un gaz</u>	10-200
Avec un liquide	100-5000
<u>Ebullition de l'eau</u>	
Dans un récipient	2500-35000
En écoulement dans un tube	5000-100000
<u>Condensation de l'eau sous 1 atm</u>	
Sur une surface verticale	1000-11000
A l'extérieur de tubes horizontaux	10000-25000

III.4.2. Coefficients de transfert de masse (k_m)

En considérant le mélange air-vapeur comme un gaz parfait, L'écart de pression partielle entre l'eau à saturation et l'air humide aboutit à un transfert de chaleur latente par évaporation décrit par l'équation 3.10 pour un volume élémentaire d'air.

$$k_m S \frac{(P_{vsat} - P_{v,a})}{RT_{a,i}} = \dot{m}_a (h_{abe} - h_{abs}) \quad \text{(III.14)}$$

Avec :

S : surface de contact (m²).

h_{abe} : humidité absolue d'air à l'entrée (kg eau/ kgAS).

h_{abs} : humidité absolue d'air à la sortie (kg eau/ kgAS).

ṁ_a : Débit massique de l'air de séchage (kg/s).

T_{a,i} : Température d'air à l'entrée (K)

R : constant des gaz parfaits (8.31 J mol⁻¹ K⁻¹).

P_{vsat} : Pression de saturation de vapeur d'eau (kPa).

P_{v,a} : Pression de vapeur d'eau (kPa).

P_{vsat} et P_{v,a} sont déterminés d'après le diagramme de l'air humide.

$$k_m = \frac{\dot{m}_a (h_{abe} - h_{abs})}{S \frac{(P_{vsat} - P_{v,a})}{RT \cdot a,i}}$$

A.N :

$$k_m = \frac{1 \times (0.015 - 0.0095)}{0.5 \times \frac{(25038 - 1500)}{8.31 \times (55 + 273.15)}}$$
$$k_m = 1.3 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

III.5. Programmation et Installation de system de régulation

Pour acquérir les résultats d'une mesure de température, d'humidité ou de pression .etc. il est indispensable d'utiliser une carte d'acquisition (PID, Arduino, ou autre type de cartes). Ici notre choix est tombé sur une carte ArduinoUno, vue sa facilité d'utilisation et sa simplicité. Pour commencer, il faut tout d'abord télécharger l'interface graphique de l'Arduino sur le PC ; par la suite, il est très important de télécharger la bibliothèque de l'Arduino (Librairies), cette bibliothèques contient tous les drivers des appareils qui peuvent être connectés à la carte Arduino (capteurs de différents types).

Prenant à titre d'exemple les capteurs de température et d'humidité (DHT) ; dont il existe plusieurs types tels que dht11, dht21 et le dht22, où le plus précis de ces trois est celui dht22. Là, on a choisi le DHT 11 au lieu de DHT 22 qui est à la base le plus précise à cause de raison suivant :

- Prix rentable, le DHT 22 est 2 fois plus cher.
- Plus disponible sur le marché.
- Vu à sa fréquence de mesure (le DHT 11 fait 1 mesure par seconde au lieu de 2 mesures par seconde pour le DHT22) , ce différence de rapidité de mesure peut protéger les appareils connecter d'endommager.

III.5.1 Connexion de la carte Arduino aux différents organes du système de séchage :

Pour réguler le système étudié, on a utilisé une carte Arduino Uno et des capteurs de température et d'humidité (dht11) ; le raccordement de ces derniers avec la carte Arduino a été fait comme suit :

Le fil (-) du capteur a été raccordé au port GND de la carte Arduino,

Le fil (+) du capteur a été raccordé au port +5v de la carte Arduino,

Le Signal du capteur a été raccordé à un port numérique d'entrée de notre choix de 0 à

12.

III.5.2 Partie programmation :

Pour pouvoir introduire des signaux numériques ou analogiques à la carte Arduino (signal entrée data) et pour pouvoir contrôler (output data ou signal de sortie) générateur d'air chaud, le moteur du tapis roulant, et le moteur du souffleur et bien sûr autres systèmes, là, il faut utiliser un programme qui peut faire toutes ces tâches au même temps et sans la moindre erreur.

Sur un programme Arduino (script), plusieurs instructions ont été introduites pour un fonctionnement correcte du programme, dont voici quelques-unes :

➤ **Serial.begin(9600)** ; // cette commande représente la vitesse de communication entre l'Arduino et le PC, là il faut bien choisir la vitesse exacte de communication sinon ça va pas marcher.

➤ La commande **Serial.print()** (" affiche le texte entre crochets") ;

➤ La commande **Serial.println(x)** ; //affiche la valeur de la variable x et saute à la ligne suivante

➤ La commande **delay(3000)** ; //réexécution tout les 3 secondes ou bien 3000ms les instructions dans la section voidloop(){

Example:

```
#include<SimpleDHT.h>
// for DHT11,
// VCC: 5V or 3V est le plus (+)
// GND: GND est le moins (-)
// DATA: 12 est le signal entrée numérique
int pinDHT11 = 12;
int pinRelais = 3; //variable de pin pour le Relais
SimpleDHT11 dht11(pinDHT11);

void setup() {
  pinMode(pinRelais, OUTPUT); //pin en mode OUTPUT
  Serial.begin(9600); // vitesse de communication entre l'arduino et le pc

  Serial.println("CLEARDATA"); // on efface les données déjà présentes, s'il y a lieu
  Serial.println("LABEL,Time,Temperature_C,Humidity_%"); // titre des colonnes, dans Excel
}

void loop() {
  // startworking...
  Serial.println("_____");
```

```

Serial.println("Result DHT11...");

// readwithoutsamples.
bytetemperature = 0;
bytehumidity = 0;
interr = SimpleDHTErrSuccess;
if ((err = dht11.read(&temperature, &humidity, NULL)) != SimpleDHTErrSuccess) {
Serial.print("Read DHT11 failed, err="); Serial.println(err);delay(1000);
return;
}
//affichage via moniteurserie
Serial.print("Temperature: ");
Serial.print((int)temperature); Serial.println(" °C, ");
Serial.print("Humidity : ");
Serial.print((int)humidity); Serial.println(" %");
// affichage via Excel
intValeur_Temperature = (temperature); // lecture de la pin 12
intValeur_Humidity = (humidity); // lecture de la pin 12
Serial.print("DATA,TIME,"); // envoi du temps et la mesure à Excel
Serial.print(Valeur_Temperature);
Serial.print(",");
Serial.println(Valeur_Humidity);
if (temperature< (28 - 1)) digitalWrite(pinRelais, HIGH), Serial.print("relais on ");
if (temperature> (26 + 1)) digitalWrite(pinRelais, LOW), Serial.print("relais off ");
// DHT11 sampling rate is 1HZ.
delay(3000);
}
    
```

III.5.3 Affichage sous Moniteur série ou sur Excel :

L’affichage sur le moniteur série se fait en exécutant tout simplement le programme sur Arduino ; les résultats de mesures s’affichent en cliquant sur l’icône Moniteur série.

Pour afficher les mêmes résultats sur Excel, on utilise le fichier **PLX-DAQ**

Quand on exécute, la fenêtre Excel ci-dessous apparaitre, ce qui nous aide à afficher les résultats dans des tableaux, courbes ou histogrammes :

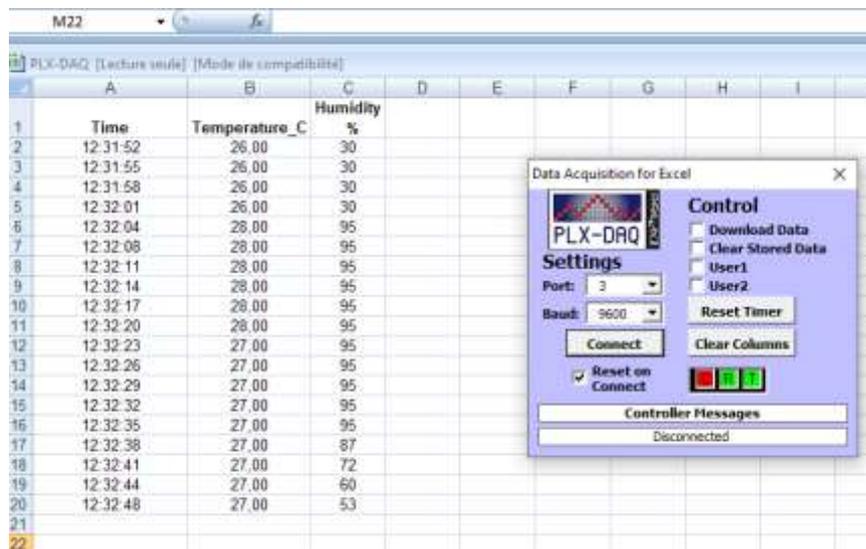


Figure III.6. Affichage des résultat sur EXCEL

III.5.4.Régulation du système de chauffage de l'air :

• **Contrôler un relais via l'Arduino :**

Il est a noté que, par le contrôle de l'allumage et de l'extinction d'un relais, on peut contrôler n'importe quel organe raccordé à la carte Arduino et c'est pour cela on a utilisé plusieurs relais pour contrôler notre système.

La technique de connexion des relais à la carte Arduino est la suivante :

- PIN 3 par exemple comme signal de sortie de la carte Arduino se raccorde avec celui du relais1 ;
- Le 5v de la carte avec le (+) de l'Arduino ;
- Et le GND de la carte Arduino avec GND du relais.

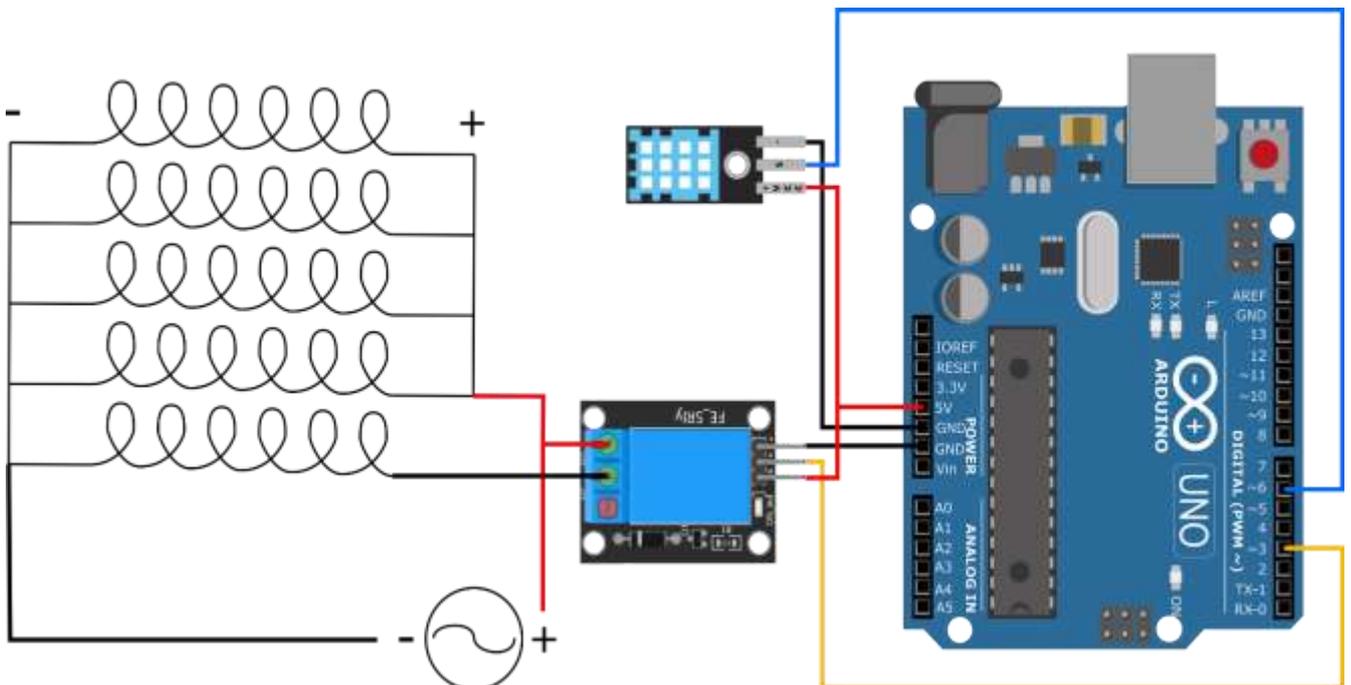


Figure III.7.Schéma de régulation du système de chauffage par l'utilisation carte Arduino-Uno, capteurs dht11 et relais

III.6. Conclusion

La méthode adoptée dans le calcul des différents paramètres nous a permis de dimensionner l'installation de séchage à bande transporteuse destinée au séchage des pâtes. La régulation des paramètres de l'air soufflé a été faite en utilisant une carte Arduino connectée à des capteurs d'humidités et de température (DHT11), et dont le tout est connecté à un PC équipé de programme responsable de l'acquisition et du contrôle des paramètres de l'air, du produit et du tapis roulant.

Chapitre IV

Etude économique

IV.1. Introduction

Le budget d'un projet est un élément important dans l'étude d'un projet puisque les résultats économiques auront un impact sur la conception et sur la réalisation du projet. Ce chapitre est consacré à une estimation détaillée de la ligne de séchage à bande transporteuse dimensionner sur la base des informations disponibles (puissance, prix, commodité, disponibilité etc.) afin de choisir les bons composants pour de meilleur dimensionnement.

IV.2. Estimation des coûts

Afin d'estimer les coûts des différents organes et composants de la ligne de séchage étudié, nous avons effectué des recherches sur Internet dans le but de trouver des fabricants et des fournisseurs pour acquérir les informations requises.

IV.2.1. Le convoyeur (tapis roulant à bande transporteuse, moteur électrique) :

Pour choisir le convoyeur, nous avons visité un site web très connu qui nous a permis de trouver les différentes informations concernant les composants dimensionnés (**Tableau IV.1**):

Tableau IV.1. Caractéristiques des convoyeurs

Marque	MAXSEN	JiaBao	YUPACK	YUPACK
Application industrielle	usine de fabrication, produit alimentaire et boissons	Manipulation du matériel alimentaire	Produit alimentaire	Produit alimentaire
Structure	Transporteur à band	Transporteur à band	Transporteur à band	Transporteur à chaîne
Dimensions	Personnalisé	Personnalisé	Personnalisé	Personnalisé
Matériel (Fonctionnalité)	Acier au carbone (résistance à la chaleur)	Aluminium (résistance à la chaleur)	Aluminium (résistance à la chaleur)	Aluminium
Voltage (V)	110/220/380/personnalisé	220/personnalisé	220/380	personnalisé
Puissance (kW)	0.4-22	personnalisé	0.4 - 22	0.4 - 22

Chapitre 4 : Etude économique

Prix (DZD)	77579.30/38660.35	129256.92/51702.77	12925.69/646362.41	10341.80/31025.40
Garantie (mois)	24	24	12	12

D'après le tableau ci-dessus, le convoyeur le plus compatible à notre système est ce du constructeur SHANGHAI MAXSEN MACHINERY.CO grâce à ces caractéristiques :

- Application industriel et structure compatible à notre usage,
- Un dimensionnement personnalisé,
- Résistance à la chaleur,
- Voltage et puissance compatible avec notre dimensionnement,
- prix rentable et une garantie de 24 mois.

MAX SEN



Figure.IV.1. Photo réelle du convoyeur

IV.2.2.Soufflerie d'air (air blower) :

La soufflante à choisir doit pouvoir fournir un débit d'air de 5400 m³ / h, cela sera possible en sélectionnant la plus adaptée dans le tableau ci-dessous:

Tableau IV.2. Caractéristiques des souffleurs d'air.

Marque	HONGTENG	LUOMEI	Shangu
Application industrielle	Ventilateur industriel	Ventilateur industriel	Ventilateur industriel, équipement d'aération pour étang à poissons
Débit d'air (m ³ /h)	26-24900	1050/1250	36-11000
Voltage (V)	220/380/415/440/480/600/660	345-415/600-720	380-450/660/6000/10000
Puissance (kw)	0.75 - 200	12.5	0.75-280
Prix (DZD)	25595.95- 1020631.19	155268.44 – 168207.47	111236.02 – 180952.55



Figure IV.2. Photo réelle du souffleur d'air choisie

IV.2.3. System de chauffage d'air :

Le système de chauffage choisi doit être en mesure de fournir l'énergie nécessaire pour élever la température de l'air à la température de consigne choisie pour le séchage des pâtes.

Tableau IV.3. Caractéristiques des chauffages

Marque	Heater leader	BEST
Source d'énergie	Electricité	Electricité
Voltage (V)	380/personnalisé	380
Puissance (kw)	60	20-30-60
Prix (DZD)	103494.76	129368.45
Garantie (mois)	18	12

**Figure.IV.3. Photo réelle du système de chauffage choisis**

IV.2.4. Système de régulation :

De la même manière, le système de régulation de température a été choisi, c'est-à-dire à partir du tableau ci-dessous; Là, il est nécessaire que le système de contrôle de température soit capable de réguler la température rapidement et en respectant la température la plus élevée et la plus basse. Le temps de réponse des appareils de mesure doit être très court; et l'actionneur doit être rapide et très efficace.

Tableau IV.4. Caractéristiques des régulateurs.

Marque	TINKO	snake	IBS
Numéro de modèle	HRTC-12A	PK/J	DX-TTC-24P
Mode de contrôle	Auto-PID / Manuel	Auto-PID / Manuel	Auto-PID / Manuel
Sortie de contrôle	PWM /SSR	PWM /SSR	PWM /SSR
Type de capteur	Thermocouple J / K	Thermocouple J / K /E	Thermocouple J / K
Contrôle de la température(°C)	0 / 450	0 / 400	50 / 537
Précision	±0.1	±0.1	±0.5
Prix (DZD)	194052.67 – 178407.33	16806.49 – 15901.52	28441.75

**Figure IV.4. Photo réelle du système de régulation choisis****IV.2.5. Les diffuseurs d'air chaud :**

Dans le chapitre précédent nous avons calculé le nombre, la section, le diamètre des conduits des diffuseurs ainsi que le débit volumique à la sortie du diffuseur. Nous aurons besoin d'au moins 20 diffuseurs en acier inoxydable pour cela, nous avons fait une recherche sur le marché pour trouver le meilleur choix. D'après cette recherche, le constructeur HONGRUI selon notre choix et le meilleur diffuseur.

Tableau IV.5. Détails sur le constructeur Hongrui des diffuseurs

Marque	Hongrui
Matériel	Acier inoxydable
Dimensions	Personnalisé
Type	Systèmes HVAC
Nom du produit	Bouche d'aération
Couleur	Personnalisé
Prix (DZD)	323.584 -2329.81



Figure IV.5. Photo réelle du diffuseur choisi

IV.6. Devis estimatif

Après avoir trouvé les prix des différents composants compatibles avec notre ligne de séchage, nous avons établi un devis final:

Tableau IV.6. Devis totale

Organe	Marque	Prix U/ (DZD)	Q	Prix (DZD)
Convoyeur	MAXSEN	64500.00	1	64500.00
Soufflerie d'air	Shangu	129000.00	1	129000.00
Système de régulation	snake	16683.00	1	16683.00
Système de chauffage d'air	Heater leader	103200.00	1	103200.00
Diffuseur d'air	Hongrui	1935.00	20	38700.00
Total				352083.00

VI.7. Conclusion

De cette étude économique nous constatons que la ligne de séchage ne coûtera que 35 millions de cents environ, un montant qui peut être abordable ou bien à la portée de quiconque souhaite investir dans ce type d'industrie alimentaire.

Conclusion générale et perspective

Le séchage a été et depuis longtemps un moyen rentable et efficace de valorisation de produits alimentaires, en particulier les pâtes, les purées et les légumineuses, en réduisant leurs teneurs en eau en utilisant de l'air chaud caractéristiques thermodynamiques optimales; car le bon séchage permet sans aucun doute une bonne conservation des produits séchés. Les sècheurs à convection forcée s'adaptent bien à ce type de séchage et ils offrent des performances très satisfaisantes.

Dans ce travail, une étude de conception d'un système de séchage à bande transporteuse contrôlé par un système de régulation pour le séchage des produits céréaliers (pâtes) a été présentée. Il est à noter que durant le dimensionnement du système de séchage étudié, nous avons respecté la teneur finale en eau du produit de 5% pour les pâtes, ce qui permet de le conserver longtemps ; Et aussi la température de séchage optimale de 55 ° C a été aussi respectée et pour laquelle le produit ne se détériore pas et peut se conserver en toute sécurité et avec de bonne qualité nutritionnelle (couleur, goût, odeur et huiles essentielles, etc.).

La ligne de séchage a été dimensionnée pour sécher une quantité de pâtes de 360 kg / h à l'aide d'une bande transporteuse de 20 m de longueur et 10 m² de surface de tapis roulant qui se déplace à une vitesse de 3,3 cm / s; le débit d'air utilisé a été trouvé égal 5400 m³ / h tout en respectant une température de séchage de 55 ° C avec une vitesse d'air de 1,5 m / s (la vitesse de l'air a été fixée à une valeur maximale de 1,5 m / s afin de ne pas fluidifier le produit).

Une estimation des coûts des différents composants de la ligne de séchage des pâtes a également été faite dans le dernier chapitre de cette étude. Il est à noter que le système de chauffage de l'air peut être un générateur d'air chaud (chaudière à gaz de 55kW de puissance) mieux qu'être composé de résistances électriques de puissance 55kW.

La réalisation de cette ligne de séchage des pâtes reste pour nous la seule perspective de cette étude.

Bibliographie

- 1- HOUHOU, Hatem. Etude théorique et expérimentale du séchage solaire de certains produits agro-alimentaires. Diss. Université Mohamed Khider–Biskra, 2012.
- 2- BERROUKECHE , Ratmi ,and BAOUIA, Ahmed Rami. "Etude expérimentale comparative entre les deux séchoirs solaires parabolique et cylindro-parabolique." Diss.Université Echahid Hamma Lakhdar d’El-Oued,2019.
- 3- N.Chouchane, and A. MoummI. étude du séchage des produit à haute teneur en eau application au piment vert.diss. Université Mohamed Khider-Biskra, 2015.
- 4- KHALDI, Souheyla. Etude numérique du comportement thermique d’un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d’énergie. Diss. Bourgogne Franche-Comté, 2018.
- 5- NGUYEN, Thu Ha. Étude expérimentale et modélisation du procédé de séchage des végétaux. Diss. Université de Bretagne Sud, 2015.
- 6- BEN RAMDANE, Slimane. valorisation de la pâtes de tomate par le procédé de séchage solaire direct. université kasdi merbah ouargla ,2011.
- 7- LEONARD, Angélique. Etude du séchage convectif de boues de station d’épuration- Suivi de la texture par microtomographie à rayons X. Diss. Université de Liège, Liège, Belgique, 2003.
- 8- Haffar, Abdelouahed, and Massiv Amghar. Etude de la performance d’un concentrateur cylindro-prabolique en vue de son utilisation dans un procédé de séchage. Diss.
- 9- DEGLA, Adnane, and Rima Sioued. "Séchage solaire des dattes Deglet-Nour: Simulation numérique, 2015.
- 10- SAF,Anisa,and REDDAM,souad.etude de cas :séchage de deux matrices végétales par étuve.diss.2018
- 11- DJENOUBI,Nadia.Etude cinétique et optimisation multicritères du couplage déshydratation imprégnation par immersion : séchage convectif de la poire, la pomme et l'abricot. Diss. 2012.

- 12- BOUSSALIA, A. "Contribution à l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux". Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Magister en Génie Climatique, Alger (2010).
- 13- KANOUNE, Brahim, and Abdeslam TRITIBA. Etude et amélioration de l'efficacité énergétique d'un séchoir solaire direct à convection naturelle. Diss.
- 14- BOUMEDIENE, Touati. ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DU SECHAGE SOLAIRE DES FEUILLES DE LA MENTHE VERTE (MENTHA VIRIDIS). Diss. 2008.
- 15- BONAZZI, Catherine, and Jean-Jacques BIMBENET. "Séchage des produits alimentaires principes." Techniques de l'ingénieur. Agroalimentaire 2.F3000 (2003): F3000-1.
- 16- Equipement et lignes pour pâtes sèches, sur « <http://italpast.it/fr/52-equipement-lignes-pour-pates-seches.html> » consulté le 22/07/2020 à 17 h 25.
- 17- LATRECHE, Kaddour, and BOUMAGOUDA. Loubna. CONCEPTION D'UN CONVOYEUR A BANDE. Diss. 2016.
- 18- CHEKKAF, Zakariya, and GHEZOUANI Moustafa. Etude, analyse et synthèse d'un convoyeur A BANDES (CAS SCIBS Beni saf). Diss.
- 19- NOUIBAT, Khalil, and ARSLANE Mohamed. Étude d'un convoyeur à bande : cas de la Cimenterie LAFARGE Hammam Dalaa (M'sila). Diss. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA, 2019.
- 20- SLIM, Rayan. Étude et conception d'un procédé de séchage combiné de boues de stations d'épuration par énergie solaire et pompe à chaleur. Diss. 2007.
- 21- JANNOT, Yves. "cours de TRANSFERT THERMIQUE, 2002." Table des matières TABLE DES MATIERES.
- 22- ZWEIFEL, C., Handschin, S., Escher, F., & Conde-Petit, B. (2003). Influence of high-temperature drying on structural and textural properties of durum wheat pasta. *Cereal Chemistry*, 80(2), 159-167.