

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A/Mira de Bejaia



Faculté de technologie
Département Electromécanique

Mémoire de Fin d'étude

En vue de l'obtention d'un diplôme master académique en
Electromécanique

Thème de projet :

Réalisation d'un déshydrateur solaire pour fruits

➤ Préparé par :

Mr: RAAD Anis

Mr:RABEHI Hicham

devant le jury :

Président :

Examineur:

Promoteur : Mr AMRI A

Promotion : 2020/2021.

Remerciements...

*Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant
et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience
d'accomplir ce modeste travail. Mes fort et sincère
remerciements à mon encadreur monsieur AMRI Athmane
pour ses précieux conseils et ses orientations
ficelées tout au long de mon projet.
Mes vifs remerciements vont également aux
membres du jury pour l'intérêt qu'ils
ont porté à mon travail en acceptant
de l'examiner et de l'enrichir par leurs propositions.
Enfin, Je tiens également à remercier
toutes les personnes qui ont participé de
près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.*

Dédicace...

Je dédie mon travail à mes très chers parents qui m'ont soutenu tout long de ma vie.

A ma mère, qui a œuvrée pour réussite par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie,

A mon père pour ses sacrifices consentis et de privations pour m'aider avancer dans la vie.

A mes sœurs

A mon binôme : Raad Anis.

A toute ma famille et mes chères amies.

Rabehi Hicham

Dédicace

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail :

A ma très chère mère, qui me donne toujours l'espoir de vivre et qui n'a jamais cessé de prier pour moi

A mon très cher père, pour ses encouragements, son soutien, surtout pour son amour et son sacrifice pour réaliser mon rêve.

A mes chers frères : KARIMA, NAWAL, AISSA

Que dieu réunisse nos chemins et que ce travail soit témoignage de ma reconnaissance et de mon amour sincère et fidèle et à sa famille.

A ma très chère famille, mes grands-parents, mes oncles, mes tantes, mes cousins, mes cousines et mes voisins.

A mes meilleurs amis chacune à son nom.

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

A mon collègue HICHEM ainsi que toute sa famille.

A toute la promo de l'électromécanique.

Que dieu vous protège.

RAAD ANIS

SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 1

Chapitre I : Conservation des aliments

I.1 Introduction 3

I.2 Méthodes de conservation des aliments 3

I.2.1 Méthodes de conservation par le froid 3

I.2.1.1 Réfrigération 3

I.2.1.2 Congélation 4

I.2.1.3 Surgélation (congélation rapide) 4

I.2.2 Méthodes physiques 4

I.2.2.1 Irradiation 4

I.2.2.2 Lumière pulsée 5

I.2.3 Méthodes chimiques 6

I.2.3.1 Fermentation 6

I.2.3.2 Acidification 6

I.2.4 Application de la chaleur 6

I.2.4.1 Pasteurisation 7

I.2.4.2 Stérilisation 7

I.2.4.3 Appertisation (ou mise en conserves) 8

I.2.5 Réduction de l'activité de l'eau 8

I.2.5.1 Réduction de l'eau par ajout d'agents 8

I.2.5.1.1 Salage 8

I.2.5.1.2 Sucre 9

I.2.5.2 Réduction de l'eau par déshydratation et fumage 10

I.2.5.2.1 Fumage 10

I.2.5.2.2 Déshydratation 10

I.3 Conclusion 10

Chapitre II : Déshydratation

II.1 Introduction 11

II.2 Définition (Déshydratation) 11

II.3 Historique 11

II.4 Intérêt de la déshydratation 11

II.5 Différentes méthodes de la déshydratation 12

II.5.1 Déshydratation mécanique 12

II.5.2	Déshydratation chimique	12
II.5.3	Déshydratation thermique.....	12
II.5.3.1	Déshydratation par ébullition.....	12
II.5.3.2	Déshydratation par entraînement	13
II.5.3.2.1	Déshydratation naturelle	13
II.5.3.2.2	Déshydratation artificielle.....	14
II.6	Domaine de déshydratation	14
II.6.1	Déshydratation dans le domaine des industriels agro-alimentaires	14
II.6.2	Déshydratation industrielle	14
II.6.2.1	Industrie du textile	14
II.6.2.2	Industrie papetière	15
II.6.2.3	Industrie du bois	15
II.6.2.4	Production de ciment	15
II.7	Différents types des déshydrateurs	15
II.7.1	Déshydrateur électrique	15
II.7.2	Déshydrateur solaire	16
II.7.3	Déshydrateur à fumer	16
II.8	Conclusion.....	17

Chapitre III : Déshydrateur solaire

III.1	Introduction	18
III.2	Différents types des déshydrateurs solaires.....	18
III.2.1	Déshydrateurs solaires directs	18
III.2.2	Déshydrateurs solaires indirects.....	19
III.2.3	Déshydrateurs solaires mixtes	20
III.2.4	Déshydrateurs solaires hybrides	21
III.3	Utilisation des déshydrateurs solaires	21
III.4	Facteurs et paramètres à prendre en compte pour le choix d'un déshydrateur solaire	22
III.5	Proposition de déshydrateur selon le climat de la région en Algérie	22
III.5.1	Climat méditerranéen (Bejaia)	22
III.5.2	Climat méditerranéen à caractère semi-aride (Oran).....	22
III.5.3	Climat désertique chaud - zone saharienne (Bordj Badji Mokhtar)	22
III.6	Rayonnement solaire	23
III.6.1	Composante de rayonnement solaire.....	23
III.6.2	Principe d'exploitation de l'énergie solaire thermique.....	25
III.6.3	Captation de rayonnement solaire	25
III.7	Capteurs solaires.....	25
III.7.1	Types des capteurs solaires	26

III.7.1.1	Capteur à concentration.....	26
III.7.1.1.1	Concentrateurs cylindro-paraboliques.....	26
III.7.1.1.2	Concentrateurs paraboliques	27
III.7.1.1.3	Système de centrale à tour (héliostat).....	27
III.7.1.2	Capteurs solaires sous vide.....	28
III.7.1.3	Capteurs plans	28
III.7.1.3.1	Principe de fonctionnement.....	29
III.7.1.3.2	Processus effet de serre	30
III.8	Constitution du capteur plan.....	30
III.8.1	Vitrage.....	30
III.8.2	Absorbeur.....	30
III.8.3	Fluide caloporteur.....	30
III.8.4	L'isolation thermique arrière et latérale	30
III.8.5	Coffre du capteur.....	30
III.9	Conclusion.....	31
Chapitre IV : Etude théorique		
IV.1	Introduction.....	32
IV.2	Modes de transferts thermiques	32
IV.2.1	Conduction	32
IV.2.2	Transfert par convection	33
IV.2.3	Transfert par Rayonnement.....	33
IV.3	Bilan thermique du capteur	34
IV.3.1	Hypothèses simplificatrices	34
IV.4	Pertes thermiques du capteur	35
IV.4.1	Perte à l'avant de capteur	35
IV.4.1.1	Perte entre la vitre et le milieu extérieur	35
IV.4.1.1.1	Par convection.....	35
IV.4.1.1.2	Par rayonnement.....	36
IV.4.1.2	Perte entre la vitre et l'absorbeur	36
IV.4.1.2.1	Par convection.....	36
IV.4.1.2.2	Pertes par rayonnement	37
IV.4.1.3	Pertes par conduction	38
IV.4.2	Perte à l'arrière de capteur	38
IV.4.3	Pertes par les faces latérales du capteur	39
IV.5	Rendement	39
IV.5.1	Rendement instantané	39
IV.6	Applications numériques.....	40
IV.6.1	Pertes à l'avant de capteur.....	40

IV.6.1.1	Perte entre la vitre et le milieu extérieur.....	40
IV.6.1.1.1	Par convection.....	40
IV.6.1.1.2	Par rayonnement.....	40
IV.6.1.2	Perte entre la vitre et l'absorbeur.....	41
IV.6.1.2.1	Par convection.....	41
IV.6.1.2.2	Pertes par rayonnement.....	41
IV.6.1.3	Pertes par conduction.....	41
IV.6.2	Pertes à l'arrière de capteur.....	41
IV.6.3	Pertes par les faces latérales du capteur.....	42
IV.7	Conclusion.....	42

Chapitre V : Expériences et interprétation des résultats

V.1	Introduction.....	43
V.2	Description de déshydrateur solaire.....	43
V.3	Caractéristiques techniques du capteur.....	45
V.4	Capteur solaire plan a air.....	45
V.5	Chambre de déshydratation.....	46
V.6	Principe et fonctionnement des déshydrateurs solaires.....	46
V.7	Description physique de déshydratation.....	47
V.7.1	Phase de mise en température (A-B).....	47
V.7.2	Phase à allure constant (B-C).....	48
V.7.3	Phase à allure décroissante (C-D).....	48
V.8	Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de déshydratation.....	48
V.8.1	Influence de la température de l'air.....	48
V.8.2	Influence de la vitesse de l'air.....	48
V.8.3	Influence de l'humidité de l'air.....	48
V.9	Teneur en eau.....	49
V.9.1	Teneur en eau à base sèche (humidité absolue).....	49
V.9.2	Teneur en eau à base humide (humidité relative).....	49
V.9.3	Activité de l'eau dans le produit.....	49
V.10	Essai sur la variation des différentes températures et de poids en fonction du temps.....	50
V.10.1	Description de l'expérience.....	50
V.10.2	Présentation du résultat.....	51
V.10.2.1	Journée du 13/06/2021 (condition normale et porte ouverte complètement).....	52
V.10.2.2	Journée du 14/06/2021 (condition normale et porte fermée).....	55
V.10.2.3	Journée du 15/06/2021 (condition normale et porte ouverte à 10 cm).....	58
V.10.2.4	Journée du 16/06/2021 (condition normale et porte ouverte à 20 cm).....	61
V.10.2.5	Journée du 21/06/2021 (capteur ouvert 1/3 et porte ouverte).....	64

V.10.2.6 Journée du 29/06/2021 (capteur ouvert (1/3) et chambre redimensionnée porte ouverte).....	67
V.10.2.7 Journée du 01/07/2021 (capteur ouvert (1/3) et chambre redimensionnée, porte et toit ouvert).....	70
V.11 Conclusion.....	73
Conclusion générale	74
Bibliographie	76

Liste des figures

Figure 1.1: Congélation.....	4
Figure 1.2 : Irradiation.....	5
Figure 1.3 : Lumière pulsée.....	5
Figure 1.4: Fermentation.....	6
Figure 1.5: Pasteurisation.....	7
Figure 1.6: Stérilisation.....	7
Figure 1.7: Appertisation.....	8
Figure 1.8: Salage.....	9
Figure 1.9: Saumurage.....	9
Figure 2.1 : Déshydrateur électrique.....	16
Figure 2.2: Déshydrateur solaire indirect.....	16
Figure 3.1: Déshydrateur solaire direct.....	19
Figure 3.2 : Déshydrateur solaire indirect.....	20
Figure 3.3: Déshydrateur solaire hybride.....	21
Figure 3.4: Répartition de rayonnement solaire.....	24
Figure 3.5: Représentation des rayons directs, diffus, réfléchi.....	24
Figure 3.6: Concentrateurs cylindro-paraboliques.....	26
Figure 3.7: Concentrateurs paraboliques.....	27
Figure 3.8: Système de centrale à tour.....	27
Figure 3.9: Capteur solaire sous vide.....	28
Figure 3.10: Capteur solaire plan.....	29
Figure 3.11: Principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan.....	29
Figure 5.1: Photo réelle de notre déshydrateur solaire.....	43
Figure 5.2: Schématisation du déshydrateur solaire.....	44
Figure 5.3: Schématisation du capteur solaire.....	44
Figure 5.4 : Photo réelle du capteur solaire.....	45
Figure 5.5 : Photo réelle du la chambre de déshydratation.....	46
Figure 5.6 : Vitesse de déshydratation solaire.....	47
Figure 5.7 : Représente l'emplacement des quatre thermomètres.....	50
Figure 5.8 : Ouverture de la chambre.....	51
Figure 5.9 : Réduction de la section de sortie du capteur.....	51

Figure 5.10 : Variation des différentes températures en fonction de temps de la journée 13/06/2021	53
Figure 5.11 : Comparaison entre la diminution de poids à air libre par rapport à la chambre en fonction du temps de la journée 13/06/2021.	54
Figure 5.12 : Variation des différentes températures en fonction du temps de la journée 14/06/2021	56
Figure 5.13 : Comparaison entre la diminution de poids à air libre par rapport à la chambre en fonction du temps de la journée 14/06/2021.	57
Figure 5.14 : Variation des différentes températures en fonction du temps de la journée 15/06/2021	59
Figure 5.15 : Comparaison entre la diminution de poids à air libre par rapport à la chambre en fonction du temps de la journée 15/06/2021.	60
Figure 5.16 : Variation des différentes températures en fonction du temps de la journée 16/06/2021	62
Figure 5.17 : Comparaison entre la diminution de poids à air libre par rapport à la chambre en fonction du temps de la journée 16/06/2021.	63
Figure 5.18 : Variation des différentes températures en fonction du temps de la journée 21/06/2021	65
Figure 5.19 : Comparaison entre la diminution de poids à air libre par rapport à la chambre en fonction du temps de la journée 21/06/2021.	66
Figure 5.20 : Variation des différentes températures en fonction du temps de la journée 29/06/2021	68
Figure 5.21 : Comparaison entre la diminution de poids à air libre par rapport à la chambre en fonction du temps de la journée 29/06/2021.	69
Figure 5.22 : Variation des différentes températures en fonction du temps de la journée 01/07/2021	71
Figure 5.23 : Comparaison entre la diminution de poids à air libre par rapport à la chambre en fonction du temps de la journée 01/07/2021.	72

Liste des tableaux

Tableau 3.1: Répartition spectrale du rayonnement thermique.....	23
Tableau 5.1 : Caractéristique technique de capteur.	45
Tableau 5.2 : Variation des différentes températures en fonction de temps de la journée (13/06/2021)..	52
Tableau 5.3 : Variation des différents poids en (g) en fonction de temps de déshydratation..... (13/06/2021).....	52
Tableau 5.4 : Variation des différents poids en (%) en fonction de temps de déshydratation..... (13/06/2021).....	52
Tableau 5.5 : Variation des différentes températures en fonction du temps de la journée (14/06/2021)..	55
Tableau 5.6 : Variation des différents poids en (g) en fonction du temps de déshydratation..... (14/06/2021).....	55
Tableau 5.7 : Variation des différents poids en (%) en fonction du temps de déshydratation..... (14/06/2021).....	55
Tableau 5.8 : Variation des différentes températures en fonction du temps de la journée (15/06/2021)..	58
Tableau 5.9 : Variation des différents poids en (g) en fonction du temps de déshydratation..... (15/06/2021).....	58
Tableau 5.10 : Variation des différents poids en (%) en fonction du temps de déshydratation..... (15/06/2021).....	58
Tableau 5.11 : Variation des différentes températures en fonction du temps de la journée..... (16/06/2021).....	61
Tableau 5.12 : Variation des différents poids en (g) en fonction du temps de déshydratation..... (16/06/2021).....	61
Tableau 5.13 : Variation des différents poids en (%) en fonction du temps de déshydratation..... (16/06/2021).....	61
Tableau 5.14 : Variation des différentes températures en fonction du temps de la journée..... (21/06/2021).....	64
Tableau 5.15 : Variation des différents poids en (g) en fonction du temps de déshydratation..... (21/06/2021).....	64
Tableau 5.16 : Variation des différents poids en (%) en fonction du temps de déshydratation..... (21/06/2021).....	64
Tableau 5.17 : Variation des différentes températures en fonction du temps de la journée..... (29/06/2021).....	67

Tableau 5.18 : Variation des différents poids en (g) en fonction du temps de déshydratation.....	
(29/06/2021).....	67
Tableau 5.19 : Variation des différents poids en (g) en fonction du temps de déshydratation.....	
(29/06/2021).....	67
Tableau 5.20 : Variation des différentes températures en fonction du temps de la journée.....	
(01/07/2021).....	70
Tableau 5.21 : Variation des différentes températures en fonction du temps de déshydratation.....	
(01/07/2021).....	70
Tableau 5.22 : variation des différentes températures en fonction du temps de déshydratation.....	
(01/07/2021).....	70

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'être humain a toujours essayé de trouver des méthodes qui lui permettent de conserver des légumes, des fruits et aussi des viandes, aujourd'hui la technologie alimentaire permet d'appliquer la science et de la technique en vue de l'utilisation efficace et effective des aliments pour développer au maximum les disponibilités, telles que la conservation.

On peut conserver un aliment par plusieurs méthodes parmi elles on trouve ce qu'on appelle la déshydratation solaire, cette technique s'appuie principalement sur la disponibilité de l'énergie solaire. L'Algérie occupe une position stratégique importante ou elle dispose d'une capacité solaire très importante. En effet, la durée d'ensoleillement est égale respectivement 2650 heures par an au Nord et 3500 heures par an au Sud. L'irradiation solaire journalière reçue sur une surface horizontale est environ 5 kWh/m² au Nord et supérieure à 7 kWh/ m² dans le Sud. [1]

Le soleil est une source d'énergie renouvelable gratuite elle permet de déshydrater facilement les fruits et les légumes, d'une façon simple et peu coûteuse. En utilisant des techniques différentes, ce qui permet de conserver les aliments par la réduction de leur teneur en eau tout en les exposant au rayon de soleil d'une manière ou d'une autre selon la nécessité, bien sûr tout en assurant de bonnes conditions hygiéniques.

A l'époque les gens utilisent la déshydratation traditionnelle qui est réalisée à air libre cette technique est maintenue au jour d'aujourd'hui dans certaines régions dans le but de préserver les denrées alimentaires, telles que les fruits, les légumes, la viande et le poisson, etc.

Cette méthode est contrôlée par des facteurs externes telle que : la température ambiante, la vitesse de vent, l'humidité relative, le rayonnement solaire, la pluie, les insectes c'est-à-dire cela ne permet pas d'avoir la qualité estimée (grande perte dans la qualité de produit) en plus de ça le temps de déshydratation est incontrôlable.

Par rapport à ce fait les ingénieurs, et les chercheurs ont proposé des dispositifs avec des techniques différentes permettant de déshydrater les denrées alimentaires (déshydrateur direct, indirect, mixte, hybride) afin d'améliorer le rendement de déshydratation.

Par conséquent notre travail consiste sur l'étude, la conception et la réalisation d'un déshydrateur solaire pour fruit à capteur plan au sein de l'université d'Abderrahmane Mira Bejaia.

Après la conception de notre dispositif nous avons dessiné une feuille de route où on a pris en considération les moindre détails concernant le dimensionnement de notre système, cela nous a permis de réaliser notre déshydrateur au niveau du laboratoire de génie électrique (haute tension) au sein de l'université de Bejaia.

Introduction générale

Ce travail comporte cinq chapitres :

Le premier chapitre présente les différentes méthodes de conservation des aliments d'un point de vue général.

Le deuxième chapitre donne un aperçu des différentes méthodes de déshydratation, qui se manifeste principalement dans trois modes : mécanique, chimique et thermique.

Le troisième chapitre est destiné à la déshydratation solaire d'une manière très précise, en citant les différents déshydrateurs solaires, le rayonnement, et les capteurs, tout en s'appuyant sur le déshydrateur solaire indirect à capteur plan à air.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude théorique des différents modes de transferts thermiques (conduction, convection, rayonnement) qui intervient sur notre capteur solaire.

Le 5eme chapitre comprend la conception et la réalisation de notre déshydrateur solaire au sein de l'université de Bejaia, ainsi l'interprétation des résultats de la déshydratation solaire indirect de la tomate par comparaison avec la déshydratation traditionnelle.

Le mémoire se termine par une conclusion générale qui rassemble l'ensemble des résultats trouvés dans notre travail.

*CHAPITRE I : GENERALITE
SUR LA CONSERVATION
DES ALIMENT*

I.1 Introduction

Depuis l'antiquité l'homme a toujours cherché des techniques pour la conservation des aliments. Cela était, et est encore, une question de survie, rien n'a vraiment changé malgré les siècles passés, seules les techniques de conservation des aliments se sont améliorées et diversifiées. Parmi ces techniques de conservation on trouve : la conservation par le froid, par la chaleur, par des méthodes chimiques et physiques et enfin par la réduction de l'activité de l'eau, chaque technique de conservation a pour but de préserver l'aliment et de ralentir ou de stopper sa détérioration, dans ce chapitre on va parler d'une manière générale sur la conservation des aliments.

La conservation est définie comme une méthode utilisée pour préserver un état existant ou pour empêcher une altération susceptible d'être provoqué par des facteurs : [2]

- ❖ Chimique (oxydation),
- ❖ Physique (température, lumière),
- ❖ Biologique (microorganisme).

I.2 Méthodes de conservation des aliments

Il existe plusieurs techniques qui permettent d'augmenter la durée de vie des aliments et parmi ces techniques on trouve :

I.2.1 Méthodes de conservation par le froid

Les basses températures retardent ou empêchent la détérioration des aliments. Ces techniques de froid sont basées en partie sur une diminution de l'activité de l'eau dans l'aliment, les aliments ont ainsi une durée de vie plus longue, mais les micro-organismes ne sont pas détruits et qu'à tout moment (lors d'un retour à une température favorable à leur développement) ils peuvent proliférer, et on distingue : [3]

I.2.1.1 Réfrigération

C'est le refroidissement par un moyen artificiel, d'un produit alimentaire, sans que soit atteint son point de congélation, utilisant le froid proche de zéro (niveau auquel l'eau du produit ne se congèle pas) et permettant des conservations limitées, cette technique impose une chaîne du froid contraignante. Elle est cependant très utilisée et se développe par l'apparition de produits élaborés dont la qualité est synonyme de traitement thermique modéré entraînant une conservation au froid. Elle s'effectue dans un réfrigérateur ou une chambre froide. [3]

I.2.1.2 Congélation

La congélation consiste à entreposer les aliments à des températures inférieures au point de congélation, généralement -18°C , elle est utilisée pour la conservation des aliments à long terme (4 à 24 mois), ce qui stoppe l'activité microbienne d'un aliment. [2]



Figure 1.1: Congélation.

I.2.1.3 Surgélation (congélation rapide)

C'est une technique industrielle permet d'exposer l'aliment à des températures plus basses que la congélation .il s'agit d'un refroidissement brutal (-30°C) permettant ainsi de le garder par la formation de petits cristaux de glace, les surgelés se conservent à -18°C pendant plusieurs mois. Ce procédé permet de bloquer l'activité microbienne. [4]

I.2.2 Méthodes physiques

I.2.2.1 Irradiation

L'irradiation ou l'ionisation est un traitement physique des aliments avec une radiation ionisante à forte énergie utilisés pour prolonger la durée de vie des produits alimentaires et/ou pour réduire les risques pour la santé associés à certains produits dus à la présence des micro-organismes. L'irradiation est le plus souvent utilisée pour le traitement des aliments solides (viandes, fruits de mer, épices), séchés ou frais. [3]



Figure 1.2 : Irradiation.

I.2.2.2 Lumière pulsée

Le traitement par lumière pulsée est un procédé athermique innovant de préservation des aliments qui utilise la technologie de la puissance pulsée pour inactiver les microorganismes en les soumettant aux flashes intenses de lumière blanche de large spectre pendant des temps très courts (10^{-6} à 10^{-10} seconde). Ce système de traitement comporte un condensateur qui stocke l'énergie pendant une période relativement longue et qui se décharge sur une ou plusieurs lampes à xénon. La lampe émet des impulsions lumineuses qui sont focalisées sur la surface de traitement pendant un temps très court de quelques centaines de microsecondes. Selon les équipements, des réflecteurs permettent à la lumière d'atteindre toutes les surfaces du produit. [5]

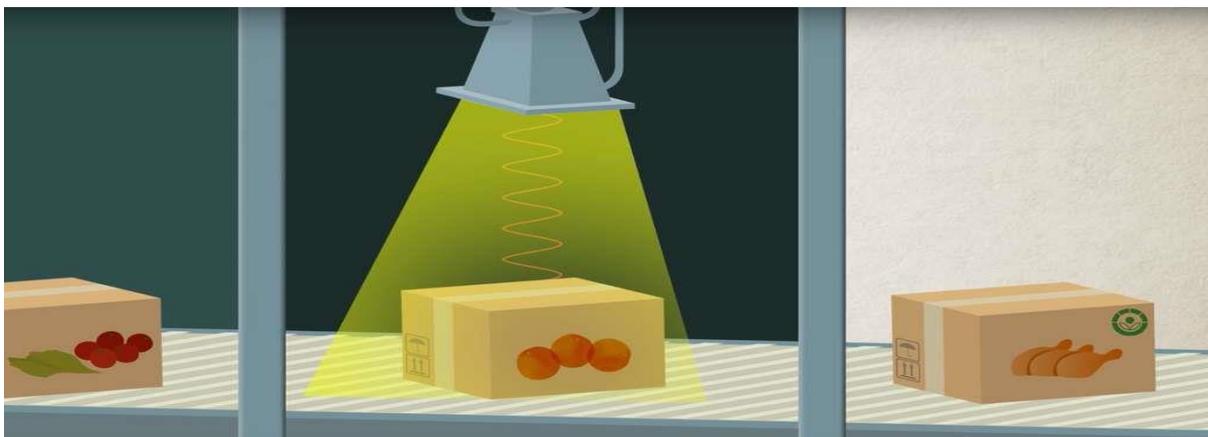


Figure 1.3 : Lumière pulsée.

I.2.3 Méthodes chimiques

Parmi les techniques de conservation chimique des aliments on trouve :

I.2.3.1 Fermentation

La fermentation est la transformation naturelle d'un ou plusieurs ingrédients alimentaires sous l'action de levures, ou de bactéries. Les plus importantes transformations de denrées alimentaires par la fermentation sont au nombre de trois : [6]

- ❖ La fermentation alcoolique (vin),
- ❖ la fermentation lactique (choucroute, cornichons, fromages),
- ❖ la fermentation acétique (vinaigre).



Figure 1.4: Fermentation.

I.2.3.2 Acidification

L'acidification est une étape essentielle de la fabrication du yaourt, du fromage mais aussi du saucisson sec qui conduit à la coagulation acide des protéines du produit. Elle est obtenue par l'action des bactéries lactiques (qui produisent naturellement de l'acide lactique ; on parle alors de fermentation lactique), ou par l'addition directe d'un acidifiant (la glucono-delta-lactone). [7]

I.2.4 Application de la chaleur

Le traitement des aliments par la chaleur (ou traitement thermique) est aujourd'hui la plus importante technique de conservation de longue durée. Il a pour objectif de détruire totalement ou partiellement les enzymes et les microorganismes.

L'effet d'un traitement thermique est lié au couple temps/température. De manière générale, plus la température est élevée et plus la durée est longue, plus l'effet sera important.

Cependant, il faut aussi tenir compte de la résistance thermique des micro-organismes et des enzymes et qui sont très variables. Selon l'objectif recherché, on distingue plusieurs techniques de conservation des aliments par traitement thermique comme la stérilisation, la pasteurisation, l'appertisation.

I.2.4.1 Pasteurisation

La pasteurisation, ou débactérisation thermo contrôlée, est un procédé de conservation des aliments qui consiste alors à porter la température d'un produit à 75°C pendant 15 secondes et de le refroidir rapidement, ce qui permet d'éliminer les micro-organismes.[7]

Exemple d'utilisation : jus de fruits, jambon.



Figure 1.5: Pasteurisation.

I.2.4.2 Stérilisation

La stérilisation par la chaleur consiste à exposer les aliments à une température, généralement supérieure à 100°C, pendant une durée suffisante pour inhiber les enzymes et détruire la totalité des microorganismes, y compris les bactéries. La stérilisation permet ainsi de donner au produit une longue durée de conservation à température ambiante (exemples lait stérilisé, conserves...). [7]



Figure 1.6: Stérilisation.

I.2.4.3 Appertisation (ou mise en conserves)

L'appertisation ou la mise en conserve consiste à chauffer les aliments dans des contenants étanches (bocaux de verre, boîtes métalliques ou autres) pour les stériliser. Ce procédé de conservation des aliments a été mis au point en 1810 par Nicolas Appert, un industriel français. L'appertisation se fait en général dans un appareil appelé autoclave. [7]



Figure 1.7: Appertisation.

I.2.5 Réduction de l'activité de l'eau [1]

On peut réduire l'activité de l'eau d'un aliment par deux méthodes différentes. La 1^{re} indirecte par ajout d'agents dépresses, la 2^{ème} directe par déshydratation ou fumage.

I.2.5.1 Réduction de l'eau par ajout d'agents

L'activité de l'eau dépend de la nature et de la quantité des substances en solution dans la phase aqueuse de la denrée alimentaire, les dépresses les plus utilisés en industrie agroalimentaire sont:

I.2.5.1.1 Salage

Vis à soumettre la denrée alimentaire à l'action de sel qui exerce un contrôle sur la croissance de la plupart des micro-organismes, en les empêchant de se développer complètement. Il existe deux façons de saler un aliment : [8]

❖ **Salage à sec** : Le sel est directement répandu à la surface de l'aliment.

Exemple : généralement on utilise le salage à sec pour la fromagerie, la charcuterie et pour certaines espèces de poissons.



Figure 1.8: Salage.

❖ Saumurage

Consiste à plonger des aliments (charcuteries, fromages, poissons, condiments, etc.), dans une préparation composée de sel, d'eau, de divers ingrédients (aromates, sucres, etc.) et éventuellement d'additifs autorisés. [8]

Exemple : on utilise le saumurage pour les viandes, les poissons et les légumes.



Figure 1.9: Saumurage.

I.2.5.1.2 Sucre

Le sucre est un élément ayant tendance à absorber l'humidité. En effet, chaque molécule de sucre est capable de fixer plusieurs molécules d'eau. La différence avec le sel est que la conservation par le sucre ne peut se faire qu'à chaud. L'aliment doit perdre une partie de l'eau qu'il contient par évaporation tandis que le sucre, une fois dissous, se lie aux molécules d'eau

et les rend ainsi indisponibles aux développements des micro-organismes. La conservation par le sucre est essentiellement utilisée pour les fruits confits et les confitures. [9]

I.2.5.2 Réduction de l'eau par déshydratation et fumage

I.2.5.2.1 Fumage

Le fumage permet également de conserver la viande et le poisson crus. Son effet de conservation est la conséquence du séchage du produit par évaporation de l'eau. Les particules de fumée absorbées par le poisson ou la viande ont un effet de conservation moins importante toutefois que l'effet de séchage. Ces particules de fumée freinent surtout le développement bactérien à la surface du produit. En outre, elles ont un effet favorable sur la saveur et la couleur du produit. [10]

I.2.5.2.2 Déshydratation

La diminution de la teneur en eau dans certains aliments les rend plus résistants à l'attaque de certains corps ennemis, plus particulièrement les microorganismes. Le soleil peut être utilisé pour la déshydratation, mais il existe aussi des appareils spécialisés pour traiter certains aliments tels que les viandes, le lait etc.

Parmi les plus anciens procédés, la déshydratation est employée pour les fruits, les légumes, les viandes, les poissons... Il permet une longue conservation par l'absence de l'eau indispensable au développement des microbes qui altèrent l'aliment. [3]

I.3 Conclusion

A l'issue de ce chapitre, nous avons donné la définition de la conservation des aliments, juste après nous avons défini les différentes méthodes de conservation, en expliquant leur utilité et leurs principes et domaine de fonctionnement, parmi ces techniques on trouve la déshydratation qui sera bien étudiée dans le prochain chapitre.

CHAPITRE II :
DIFFERENTES METHODES
DE DESHYDRATATION

II.1 Introduction

La déshydratation est l'une des plus anciennes techniques de conservation des aliments utilisés par l'homme depuis des siècles. Cette opération permet de conserver les aliments pendant plusieurs mois en utilisant plusieurs méthodes. Par rapport aux aliments frais, les produits déshydratés sont plus légers et pratiques pour le stockage et le transport. Cette méthode ne nécessite pas d'équipement spécial.

II.2 Définition (Déshydratation)

La déshydratation est une opération consistant à retirer une partie du solvant d'un corps, le produit final dit « sec » étant obtenu sous une forme solide de taille variable, éventuellement de « solide divisé » ou de poudre. Le produit passe ainsi d'un état initial dit « humide », selon le cas solide ou liquide, jusqu'à un état final dit « solide sec », même s'il contient encore une teneur en eau (ou solvant) résiduelle.

Le solvant considéré est le plus souvent l'eau, les mêmes principes pouvant s'appliquer à d'autres solvants organiques, mais en prenant les propriétés associées à ce solvant (chaleur latente de vaporisation, isothermes de sorption, etc.). Le mélange de plusieurs solvants est un cas plus complexe. [11]

II.3 Historique

La déshydratation est une technique très anciennement utilisée pour la conservation des produits alimentaires. A l'époque les gens déshydrataient les fruits, les racines, la viande en l'exposant au soleil, ils avaient appris que la déshydratation des aliments leur permettait de survivre durant les durs hivers.

Pour ces applications traditionnelles, on fait encore beaucoup appel à la déshydratation par l'air ambiant dit « naturel », la déshydratation dit « artificiel » avec apport d'énergie, n'étant qu'une technique complémentaire apportant une plus grande régularité face aux aléas climatiques, ou bien apportant de nouveaux services (lait sec ou café dits « instantanés », pâtes alimentaires sèches à longue conservation, etc.). [11]

II.4 Intérêt de la déshydratation

La déshydratation permet de :

- ❖ Faciliter la conservation par la diminution de l'activité de l'eau,
- ❖ D'alléger le produit,

- ❖ modifie le produit dans sa forme, sa texture, son goût, ses qualités, ce qui est souvent considéré comme un inconvénient,
- ❖ D'éliminer un liquide imprégnant un solide par :
 - par évaporation à l'ébullition, favorisée en travaillant sous vide,
 - par évaporation et entraînement à l'aide d'un gaz, généralement de l'air.

II.5 Différentes méthodes de la déshydratation

II.5.1 Déshydratation mécanique

C'est faire débarrasser le liquide d'un constituant par des forces mécaniques (décantation, pressage ou centrifugation,). Certains processus peuvent se réaliser par simple transfert de quantité de mouvement. L'élimination d'eau par la déshydratation mécanique permet d'éliminer qu'une partie de l'eau libre des produits traités. [12]

II.5.2 Déshydratation chimique

Cette méthode consiste à transférer le liquide à éliminer dans la phase gazeuse (absorption, réfrigération ou par vaporisation). On utilise des produits déshydratants (osmotique, chlorure de calcium) qui sont des inorganiques qui fixent l'eau lorsqu'ils sont ajoutés au liquide humide. Pour effectuer la déshydratation, on ajoute au liquide une petite quantité de desséchant et on agite ; si les cristaux ont tendance à s'agglomérer et à coller aux parois, il faut en ajouter de nouveau. On laisse agir le desséchant quelques minutes puis on filtre pour récupérer la phase organique sèche. [13]

II.5.3 Déshydratation thermique

Il s'agit d'une opération de séparation thermique qui consiste à retirer tout ou une partie d'un liquide imprégnant un corps dit « humide ». Le produit final est un solide dit « sec »

La déshydratation thermique se divise en deux types :

II.5.3.1 Déshydratation par ébullition [14]

Dans ce cas, le mode de déshydratation utilisé pour évaporer l'eau du matériau est l'ébullition. L'ébullition se produira lorsque la température du matériau est à une valeur telle que la pression de vapeur d'eau en équilibre avec ce matériau P_v , est égale à la pression totale ambiante P_t .

$$P_v = P_t$$

Selon cette définition, la température d'ébullition $T_{éb}$ dépend de la pression totale et l'activité de l'eau.

II.5.3.2 Déshydratation par entraînement

Lors du placement de produits humides dans un courant d'air assez chaud et sec il s'établit un écart de température et de pression partielle d'eau tel que :

- Le gaz fournit au produit l'énergie nécessaire à l'élimination de l'eau,
- L'eau s'évapore sous l'effet du gradient de pression partielle sans ébullition de l'eau, la vapeur d'eau est transférée par la diffusion et la convection du produit dans le milieu ambiant et est alors ensuite emportée (entraînée) par le gaz.

La température de surface du produit est toujours inférieure ou égale à la température de surface de l'air, et il est donc bien inférieur au point d'ébullition de l'eau, la déshydratation par "entraînement" peuvent être divisée en deux catégories : [14]

II.5.3.2.1 Déshydratation naturelle

Les méthodes de la déshydratation naturelle utilisent les effets déshydratants de la chaleur solaire ou de l'air sec, sans faire appel à des sources de chaleur. Ce type de déshydratation est pratiqué dans les régions à climat sec dans lesquelles la saison des pluies excède rarement quatre mois, le reste de l'année, le ciel est dégagé, les températures sont élevées, l'hygrométrie de l'air relativement basse. cette technique est simple, naturelle et donne un goût agréable aux fruits et légumes. Mais elle réduit souvent la quantité de vitamines. Sauf dans le cas des fruits et des champignons déshydraté à faible température. [15]

Avantages et inconvénients

Ce type de déshydratation traditionnel présent l'avantage d'être simple, de ne nécessiter ni installation coûteuse, ni source d'énergie, donc d'être bon marché, mais il n'est pas sans inconvénient :

- Il est parfois insuffisant, en effet, la vitesse de déshydratation dépend du pouvoir desséchant de l'air ainsi que de l'humidité ambiante et il arrive que les graines déshydrate trop lentement, or il n'ait pas souhaitable que cette opération s'éternise,
- Il peut aussi être trop rapide, ce qui peut provoquer des décolorations, des plissements du grain et un phénomène de cémentation,
- Une déshydratation de longue durée,
- Il exige des manipulations fréquentes et quotidiennes, dans le cas de riz.

II.5.3.2.2 Déshydratation artificielle [16]

Ce type de déshydratation est plus moderne en le comparant à la déshydratation naturelle, il permet de réduire considérablement la durée de déshydratation et d'atteindre l'humidité souhaitée des matériaux. On trouve plusieurs méthodes de déshydratation qu'on utilise dans l'industrie citant :

- Déshydratation par l'air chaud,
- Déshydratation à la vapeur surchauffée,
- Déshydratation par pompe à chaleur,
- Déshydratation par chambre chaude,
- Déshydratation sous vide.

II.6 Domaine de déshydratation

la déshydratation intervient dans des diversités domaine et par exemple : agricole, industriels, artisanaux...[17]

II.6.1 Déshydratation dans le domaine des industriels agro-alimentaires

Une grande partie des aliments que nous consommons ont subi une opération de déshydratation, et ce dernier peut être une étape nécessaire à la production du produit ou joue un rôle important dans la conservation des aliments. On peut citer par exemple : [17]

- Viande fumée : saucisson, jambon,ect,
- Fromages : déshydratation dans une ambiance contrôlée,
- Sucre cristallisé est obtenu par évaporation,
- Légumes (pois, poivron...) et fruits secs (pruneaux, raisins, abricots, figes...),
- Jus de fruits sont préparés à partir d'un concentré obtenu par vaporisation,
- Café, cacao, riz et autres céréales, feuilles de thé, épice, certains biscuits apéritifs.

Actuellement, il existe plus de 200 types de déshydrateurs industriels dans le secteur alimentaire.

II.6.2 Déshydratation industrielle [18]

II.6.2.1 Industrie du textile

L'industrie textile est l'une des industries manufacturières les plus compliquées. Il utilise divers substrats, les processus, les mécanismes et les composants, ainsi que les différentes

méthodes de production de tissu et processus de finition, y compris la préparation, la teinture, de la chimie / finition mécanique, et le revêtement.

II.6.2.2 Industrie papetière

Le papier est obtenu par déshydratation de la pâte à papier sur des rouleaux rotatifs chauffés.

II.6.2.3 Industrie du bois

L'une des applications les plus importantes du déshydratation est l'industrie du bois. Par exemple, lorsque le bois est utilisé dans un but précis, comme pour les meubles ou le carburant, il doit être déshydraté parce que la quantité d'eau présente dans le bois vert engendre des problèmes potentiels, tels que le rétrécissement et les changements dans les formes, où les bois seront difficiles à brûler.

II.6.2.4 Production de ciment

Dans le processus de fabrication du ciment, les matières premières sont combinées avec précision pour produire du ciment portland. Dans le procédé de fabrication du ciment sec, dans lequel le mélange brut est presque sec, il existe environ 20% d'humidité (en masse) dans le mélange.

II.7 Différents types des déshydrateurs

II.7.1 Déshydrateur électrique

Le petit modèle à plateaux est constitué tout d'abord d'une base dans laquelle l'air est aspiré, chauffé à la température voulue, puis soufflé dans les étages supérieurs. Ces étages sont des plateaux de plastiques dans lesquels on place les aliments à déshydrater et dont le fond est un grillage criblé de trous, ce qui permet à l'air de circuler partout. Enfin, par-dessus les plateaux empilés, on place un couvercle assurant l'étanchéité nécessaire à la ventilation et au maintien de la température. De plus gros modèles, servant à l'industrie et aux restaurateurs, ressemblent à de grands fours rectangulaires dans lesquels s'insèrent les plateaux. [19]



Figure 2.1 : Déshydrateur électrique.

II.7.2 Déshydrateur solaire

C'est un dispositif qui recueille la chaleur des rayons du soleil, dotée de trous d'aération, qui permettent une circulation d'air sec à travers des étagères sur lesquels sont placés les aliments à déshydrater. Ils sont classés généralement selon le mode de chauffage ou leurs modes de leur fonctionnement, en plusieurs catégories : [20]

- Déshydrateurs solaires directes,
- Déshydrateurs solaires indirecte,
- Déshydrateurs solaire hybrides,
- Déshydrateurs solaires mixtes.



Figure 2.2: Déshydrateur solaire indirect.

II.7.3 Déshydrateur à fumer

Les déshydrateurs à fumer sont tout simplement des appareils qui permettant de fumer les aliments ils peuvent fonctionner avec de la sciure, de charbon ou avec de gaz ils sont appelé

les fumoirs. Il s'agit de chambre en acier inoxydable dans lesquelles on place les aliments puis on fait circuler la fumer en provenance d'un dispositif extérieur. [20]

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé et donné un aperçu sur les différentes techniques de déshydratation, en citant leurs avantages, inconvénients et leurs domaines d'utilisation, ainsi que les différents types de déshydrateur. Le prochain chapitre sera consacré au déshydrateur solaire.

CHAPITRE III: LA DESHYDRATATION SOLAIRE

III.1 Introduction

L'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable disponible presque dans tous les coins du monde, elle est considérée comme le carburant d'un déshydrateur solaire. Ce dernier capte les rayons solaires pour déshydrater les aliments disposés à l'intérieur de la chambre de déshydratation.

Il existe une grande variété des déshydrateurs solaires dans le monde entier, on peut les classer généralement selon le mode de leur fonctionnement, leurs rendements et leur coût, ces dispositifs sont constitué d'une partie principale indispensable pour leur fonctionnement appelé capteur.

Dans ce chapitre nous parlerons sur les types des déshydrateurs solaires, le rayonnement et les capteurs solaires.

III.2 Différents types des déshydrateurs solaires

Les déshydrateurs solaires sont classés généralement selon le mode de chauffage ou le mode de leur fonctionnement en plusieurs catégories :

- ❖ Déshydrateurs solaires directs,
- ❖ Déshydrateurs solaires indirects,
- ❖ Déshydrateurs solaires hybrides,
- ❖ Déshydrateurs solaires mixtes.

III.2.1 Déshydrateurs solaires directs

Les rayons solaires frappent directement les produits. Les déshydrateurs solaires directs se composent d'une seule pièce qui fait office à la fois de chambre de déshydratation et de capteur solaire. Le fond de la chambre de déshydratation est peint en noir pour augmenter la capacité d'absorption de chaleur, une feuille de plastique ou polyéthylène transparent sert généralement de toit mais on peut également utiliser d'autres matériaux plus chers comme le verre ou les Plastiques spéciaux (polyéthylènes agricoles). Il est simple à réaliser, Il nécessite par exemple une boîte en bois ou en carton, troué en bas et en haut pour laisser l'air froid entrer par le bas et l'air chaud sortir par le haut. Cette boîte contient les claies où seront déshydratés les aliments, elle est recouverte d'une vitre pour augmenter l'effet de serre. [21]



Figure 3.1: Déshydrateur solaire direct.

Avantages [22]

- ❖ Les produits sont mieux protégés contre les poussières, des mouches, et la pluie par rapport à la déshydratation traditionnelle,
- ❖ Pas besoin de main-d'œuvre qualifié,
- ❖ Grandes possibilités de conception.

Inconvénients [22]

- ❖ Dégradation de la qualité par exposition directe au soleil, destruction de la vitamine A et C, décoloration,
- ❖ Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement,
- ❖ Température relativement élevée dans le déshydrateur qui contribue avec l'exposition au soleil.

III.2.2 Déshydrateurs solaires indirects

Les produits à déshydrater ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Le déshydrateur solaire indirect se compose principalement de deux parties : un capteur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur, une chambre de déshydratation qui contient le produit à déshydraté qui est disposé sur des claies. L'air est chauffé et monte dans le capteur par convection naturelle (sa température augmente), où un transfert de chaleur de l'air vers le produit et un transfert de masse du produit vers l'air se produisent au cours du parcours du fluide caloporteur. La déshydratation solaire indirecte permet de déshydrater les fruits, les

plantes grâce au soleil sans que les rayons du soleil atteignent directement les produits, de sorte que la couleur, le goût et les propriétés des fruits ou des plantes (vitamines, nutriments) sont préservés. [23]



Figure 3.2 : Déshydrateur solaire indirect.

Avantages [24]

- ❖ Le produit n'est pas exposé directement au soleil. Il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C),
- ❖ Possibilité de construire ce type de déshydrateurs localement, avec un coût réduit,
- ❖ Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles.

Inconvénient [24]

- ❖ Rapidité de déshydratation très variable suivant les conditions climatiques et la conception du déshydrateur.

III.2.3 Déshydrateurs solaires mixtes

Ces déshydrateurs combinent les principes des méthodes de déshydratation directes et indirectes, la chaleur nécessaire à la déshydratation est fournie par l'action combinée du rayonnement solaire frappant directement les produits et de l'air préchauffé dans des capteurs. Pour ces dispositifs, les surfaces supérieures de la chambre de déshydratation et du capteur sont couvertes par des vitres transparentes. [25]

III.2.4 Déshydrateurs solaires hybrides

Ces déshydrateurs utilisent, en plus de l'énergie solaire, une énergie d'appoint (fuel, électricité, bois, etc.) pour assurer un niveau élevé de chauffage de l'air ou pour assurer la ventilation. L'énergie solaire sert souvent, dans ce cas de préchauffage de l'air. Ces systèmes, plus coûteux, sont généralement réservés à des applications à grande échelle, ou à des applications commerciales pour lesquelles la qualité et le débit du produit fini ne peuvent pas dépendre des conditions climatiques. [26]



Figure 3.3: Déshydrateur solaire hybride.

Avantages

- ❖ Affranchissement par rapport aux conditions climatiques,
- ❖ Meilleur contrôle de la déshydratation,
- ❖ Forte augmentation de la production par rapport aux autres types des déshydrateurs solaires, car le dispositif peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin.

Inconvénients

- ❖ Coût de production et d'investissement élevé,
- ❖ Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, pièce de rechange.

III.3 Utilisation des déshydrateurs solaires

- ❖ Installer les déshydrateurs dans un endroit bien ensoleillé,
- ❖ Laver les aliments avant la déshydratation,
- ❖ Découper les aliments en petits morceaux pour faciliter la déshydratation,
- ❖ Conserver les aliments déshydratés de préférence dans un lieu sec et frais.

III.4 Facteurs et paramètres à prendre en compte pour le choix d'un déshydrateur solaire

- ❖ Nature des produits à déshydrater,
- ❖ Quantité de produits requise (destinés à une production en petite, moyenne ou grande quantité),
- ❖ Conditions climatiques (on distingue trois cas : températures élevées et l'air sec, ensoleillement important et humidité élevée, les conditions climatiques défavorables pour la déshydratation),
- ❖ Entretien exigé,
- ❖ Durée de vie du matériel,
- ❖ Taille du capteur,
- ❖ Capacité de la chambre de déshydratation.

III.5 Proposition de déshydrateur selon le climat de la région en Algérie

L'Algérie est le pays le plus grand en Afrique en termes de superficie, son climat varie d'une région à une autre selon la zone géographique. Pour cela on doit assurer les conditions climatiques favorables pour la déshydratation selon chaque zone en utilisant un déshydrateur convenable et on distingue : [27]

III.5.1 Climat méditerranéen (Bejaia)

Reçoit en moyenne annuelle 686.6 mm par an de pluie. Sa température moyenne annuelle est de 23.1°C, ici nous encourageons l'usage des déshydrateurs hybrides pour favoriser la déshydratation rapide des produits.

III.5.2 Climat méditerranéen à caractère semi-aride (Oran)

Reçoit en moyenne annuelle 326.8 mm par an de pluie. Sa température moyenne annuelle est de 23.48°C. Ici nous encourageons l'usage des déshydrateurs indirect, mixte, ou hybrides selon les besoins climatiques.

III.5.3 Climat désertique chaud - zone saharienne (Bordj Badji Mokhtar)

Reçoit en moyenne annuelle 38,1 mm par an de pluie. Sa température moyenne annuelle est de 35.99°C, ici nous encourageons l'usage des déshydrateurs indirect. Dans cette zone, les déshydrateurs directs ne sont pas à conseiller pour la déshydratation des fruits et légumes puisque nous voulons des produits déshydratés ayant conservé leur goût et leur coloration.

III.6 Rayonnement solaire

Le rayonnement est le transfert d'énergie par ondes électromagnétiques. Le rayonnement se produit directement de la source vers l'extérieur dans toutes les directions. Ces ondes n'ont pas besoin d'un milieu matériel pour se propager, elles peuvent traverser l'espace interplanétaire et atteindre la terre depuis le soleil. La longueur d'onde et la fréquence des ondes électromagnétiques sont importantes pour déterminer leur énergie, leur visibilité et leur pouvoir de pénétration. Toutes les ondes électromagnétiques se déplacent dans le vide à une vitesse de 299, 792 km. [28]

Longueur d'onde (μm)	0-0,38	0,38-0,78	0,78
Pourcentage (%)	6,4	48	45,6
Energie (W/m ²)	87	656	623

Tableau 3.1: Répartition spectrale du rayonnement thermique. [4]

III.6.1 Composante de rayonnement solaire

Le rayonnement qui nous parvient du soleil est émis par sa surface extérieure dont la température est d'environ 6000 (K). A une telle température, 40% de l'énergie est émise dans le domaine visible, c'est-à-dire dans une gamme de longueur d'onde allant de 0,3 (μm) (violet-bleu) à 0,7 (μm) (rouge). La décomposition du rayonnement solaire peut être réalisée en projetant un faisceau lumineux sur un prisme de verre ou sur un réseau de diffraction.

Tout un éventail de couleurs apparaît, du bleu au rouge en passant par le vert et le jaune, chacune de ces couleurs est associée à un rayonnement d'une certaine longueur d'onde. William Herschell (vers 1800) qui étudiait le rayonnement solaire, avait placé un thermomètre derrière un tel prisme. Il s'aperçut qu'il indiquait une élévation de température (et donc qu'il recevait de l'énergie) non seulement dans le domaine visible mais également dans la région au-delà du rouge.

Ce fut la découverte du rayonnement infrarouge qui représente 50% du rayonnement émis par le soleil. Les 10% restants du rayonnement solaire total sont émis à l'opposé du domaine visible, à des longueurs d'onde plus petites que celles du violet (l'ultra-violet). [28]

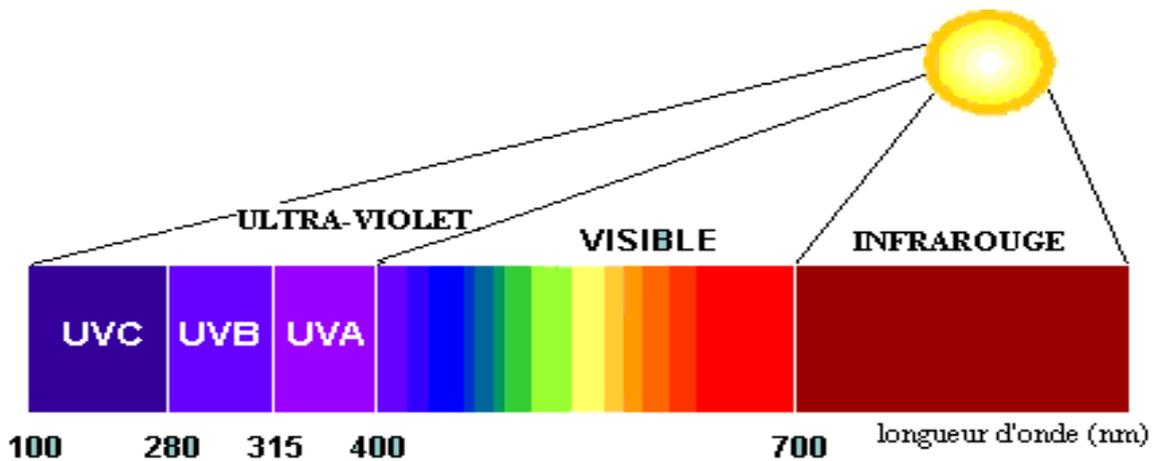


Figure 3.4: Répartition de rayonnement solaire.

Le rayonnement solaire au sol se divise en plusieurs rayonnements, directs, diffus, réfléchis et globale. [28]

❖ Rayonnement solaire direct

Le rayonnement direct est le rayonnement reçu directement du soleil sans avoir dispersé par l'atmosphère. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre.

❖ Rayonnement solaire diffus

C'est une partie du rayonnement du soleil qui a subi de multiples réflexions (dispersion) par les molécules et les aérosols de l'atmosphère pour un observateur au sol, le rayonnement diffus est un ensemble des directions rayonnées.

❖ Rayonnement solaire réfléchi

C'est le rayonnement qui provient du sol par suite à la réflexion. Cette composante dépend de la nature du sol et de sa couleur.



Figure 3.5: Représentation des rayons directs, diffus, réfléchi.

❖ Rayonnement solaire global

Le rayonnement global est la somme des rayonnements diffus et directs.

III.6.2 Principe d'exploitation de l'énergie solaire thermique

Les technologies actuelles permettent de convertir l'énergie solaire sous deux formes : en énergie thermique (chaleur) ou en électricité.

Dans notre cas on s'intéresse à l'énergie thermique et son principe d'exploitation. Les photons excitent des atomes (composant le matériau du capteur solaire) en leur transmettant une part de leur énergie, face à ce gain d'énergie, les atomes s'agitent et s'échauffent. [29]

III.6.3 Captation de rayonnement solaire

Le captage de l'énergie solaire se fait par plusieurs types de capteurs existents (plans, à concentration, à tubes sous vide). Leur utilisation dépendra de la quantité de chaleur qu'on souhaite produire, le type d'installation qu'ils doivent intégrer (centrales, maisons...), et la région dans laquelle on se trouve.

Le rôle de ses capteurs consiste à capter l'énergie solaire au travers d'une surface absorbante, transférer l'énergie dans un fluide et limiter les pertes thermiques. Le rendement moyen des technologies actuelles de capteurs est environ 60-70% de l'énergie reçue est transformé en chaleur. [29]

III.7 Capteurs solaires [30]

Le capteur solaire est l'élément de base pour la transformation de l'énergie solaire en chaleur, cette transformation est obtenue à l'aide des collecteurs thermiques, et sera le plus souvent constitué de :

- ❖ Un absorbeur,
- ❖ Une isolation thermique,
- ❖ Une couverture transparente,
- ❖ Un cadre.

Le capteur solaire fait le lien entre le rayonnement solaire et le consommateur de chaleur. Il a pour tâche de convertir le plus efficacement possible la lumière en chaleur. L'inconvénient majeur des capteurs solaires est leur rendement de conversion. En effet, une grande partie de l'éclairement ne se transforme pas en énergie (électrique ou thermique), le

capteur doit être pourvu d'une isolation thermique afin de réduire ces pertes. On peut classer les capteurs solaires selon la température (les capteurs à faible température, moyenne température, haute température) suivant ce classement il existe essentiellement trois types des capteurs solaires thermiques : [30]

- ❖ Capteur à concentration,
- ❖ Capteur à tube sous vide,
- ❖ Capteur plan.

III.7.1 Types des capteurs solaires

Il existe plusieurs types de capteur solaire chacun entre eux à ses propres caractéristiques adaptés à des usages spécifiques. On peut les classer comme suit :

III.7.1.1 Capteur à concentration

L'utilisation de ces capteurs est limitée durant l'année car ils ont besoin du rayonnement solaire direct (lorsque le soleil est visible). Ces concentrateurs solaires utilisent des surfaces réfléchissantes (miroirs) paraboliques, cylindro-paraboliques et des systèmes de centrale à tour pour concentrer les rayons solaires. Naturellement, ces concentrateurs doivent suivre le mouvement du soleil. [31]

III.7.1.1.1 Concentrateurs cylindro-paraboliques

Comme son nom l'indique, ce système utilise une série de longs réflecteurs cylindriques en forme de parabole. La parabole concentre la lumière sur un tube récepteur situé le long de la ligne locale du réflecteur. Les températures du récepteur peuvent atteindre 400°C et peuvent produire de la vapeur afin de produire de l'électricité. Habituellement, mais pas toujours, les réflecteurs suivent le soleil à mesure qu'il se détache durant la journée. [31]



Figure 3.6: Concentrateurs cylindro-paraboliques.

III.7.1.1.2 Concentrateurs paraboliques

Ces capteurs utilisent des miroirs paraboliques pour concentrer le rayonnement solaire dans le foyer où se trouve le récepteur (absorbeurs) qui capte la chaleur solaire ainsi concentrée. Le récepteur contient un fluide qui, lorsque les rayons du soleil le frappent, atteint une température de 750°C à 1000°C . Ce fluide très chaud est ensuite utilisé pour produire de l'électricité dans un petit moteur fixé au récepteur. Le réflecteur parabolique suit aussi le mouvement de soleil. [31]



Figure 3.7: Concentrateurs paraboliques.

III.7.1.1.3 Système de centrale à tour (héliostat)

Une centrale à tour utilise un certain nombre de grands miroirs plats qui suivent le mouvement du soleil et qui concentrent la lumière sur un grand absorbeur situé au sommet d'une tour. Le système pompe un fluide, soit une huile synthétique à haute température ou du sel fondu, dans l'absorbeur où il est chauffé jusqu'à 550°C et ensuite utilisé pour produire de l'électricité. [31]

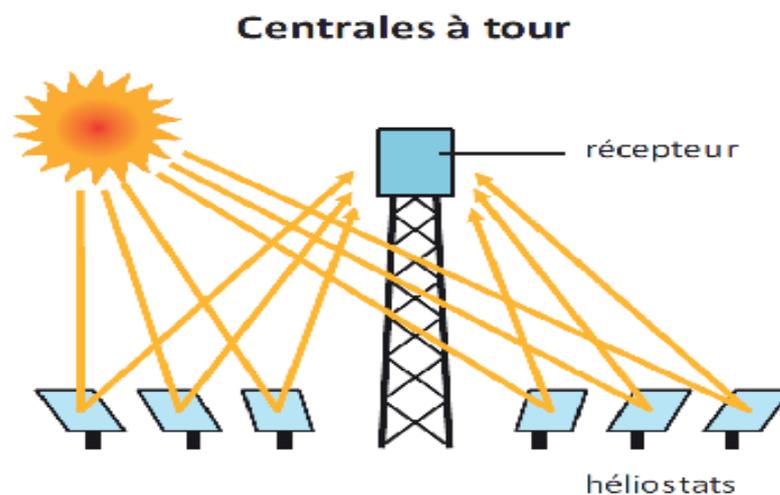


Figure 3.8: Système de centrale à tour.

III.7.1.2 Capteurs solaires sous vide

Un capteur solaire "sous vide" est composé d'une série de tubes transparents en verre de 5 à 15 cm de diamètre. Dans chaque tube il y a un absorbeur pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour permettre le transfert de l'énergie thermique. Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de l'absorbeur, celui-ci reçoit un traitement sélectif pour empêcher le rayonnement. Ainsi, on peut réaliser des capteurs solaires performants sans une isolation thermique ou un coffre de protection. La fabrication des tubes et l'assemblage des capteurs sont simplifiés, car il n'y a pas de soudures verre-métal. Par contre, les tubes thermos sont particulièrement fragiles au point de liaison avec le collecteur, où les parties extérieures et intérieures de chaque tube se rejoignent. En général, la pression dans l'espace vide est inférieure à 1Pa, ainsi les déperditions thermiques convectives de l'absorbeur sont quasiment éliminées. Ces capteurs peuvent atteindre des températures élevées et les tubes sont inclinables, ce qui permet une utilisation en façade ou sur une toiture insuffisamment inclinée pour utiliser des capteurs plans. On note d'autres avantages par rapport aux capteurs plans notamment : [32]

- ❖ Des températures de fonctionnement plus élevées,
- ❖ Des déperditions réduites grâce à une excellente isolation thermique.



Figure 3.9: Capteur solaire sous vide.

III.7.1.3 Capteurs plans

Un capteur solaire plan est un type d'échangeur de chaleur particulier qui transforme l'énergie solaire rayonnante en chaleur en utilisant l'effet de serre. La conception du capteur dépendra de la quantité d'énergie demandée par le système à chauffer et du fluide caloporteur disponible. Les capteurs solaires sont généralement composés d'une couverture transparente,

d'un absorbeur métallique noirci, d'une ou plusieurs conduites et d'un isolant, et on distingue deux types de capteurs plans : [33]

- ❖ capteur plan à air,
- ❖ capteur plan à eau.

Dans notre mémoire on s'intéresse au capteur plan à air.

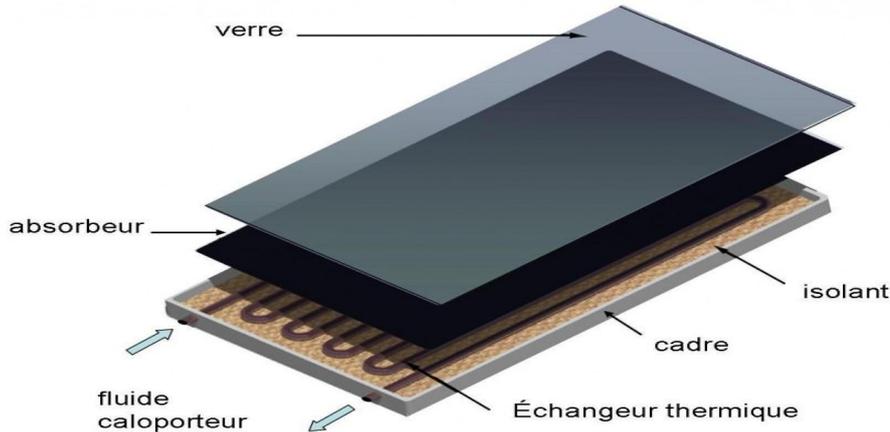


Figure 3.10: Capteur solaire plan.

III.7.1.3.1 Principe de fonctionnement

Le principe de capteur solaire à air est basé sur la réalisation de l'effet de serre, il repose sur le fait que le verre transmet la quasi-totalité du rayonnement solaire dont les longueurs d'onde sont grandes. Lorsque le flux solaire traverse la vitre, il chauffe la plaque placée derrière ; celle-ci émet à son tour un rayonnement thermique de grandes longueurs d'onde qui ne peut pas traverser la vitre, il se trouve donc piégé à l'intérieur du capteur, c'est-à-dire : la conversion rayonnement-chaaleur s'effectue en surface de l'absorbeur, les photons qui le frappent sont absorbés par la matière et augmentent l'agitation des molécules, et donc la température du matériau exposé au rayonnement va s'élever. Cette énergie accumulée par l'absorbeur est cédée aux fluides caloporteurs (air) au contact thermique.

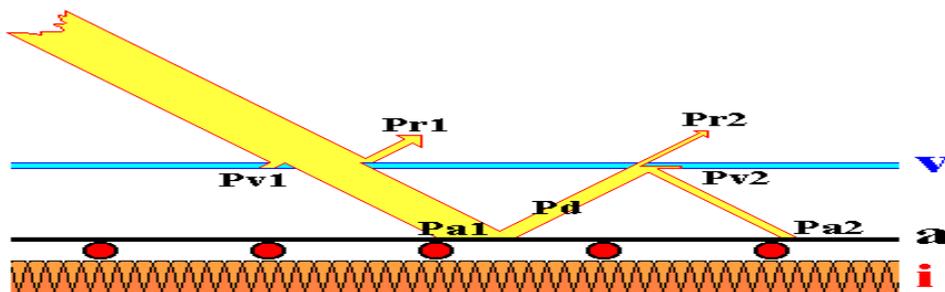


Figure 3.11: Principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan.

III.7.1.3.2 Processus effet de serre

Le soleil émet en continu un rayonnement (un mélange de lumière visible, de lumière infrarouge et de lumière ultraviolette) qui se propage dans l'espace. Une partie du rayonnement solaire qui traverse l'atmosphère terrestre est absorbée par la surface terrestre. En retour, celui-ci émet un rayonnement infrarouge (chaleur) dans l'espace. Cependant, une partie du rayonnement infrarouge est réfléchi vers la surface de la terre par certains gaz appelés "gaz à effet de serre», dans l'atmosphère les principaux gaz à effet de serre sont la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane, l'ozone et le protoxyde d'azote. Dans une serre, le sol sombre absorbe tout le rayonnement du spectre, ce qui le réchauffe, la vitre transparente qui recouvre la serre piège le rayonnement calorifique qui se dégage du sol (effet de serre). C'est ce qui se passe dans le déshydrateur solaire. [34]

III.8 Constitution du capteur plan

III.8.1 Vitrage

La vitre solaire avec une grande transmission lumineuse, optimise les rendements solaires et résiste aux intempéries. [35]

III.8.2 Absorbeur

Feuille métallique noire qui capte la chaleur du rayonnement solaire, il assure deux fonctions : absorber la plus grande partie du rayonnement solaire possible, transmettre la chaleur produite vers le fluide caloporteur (air) avec un minimum de pertes. [35]

III.8.3 Fluide caloporteur

Pour évacuer la chaleur stockée par la plaque absorbante on utilise généralement comme fluide caloporteur soit de l'air, soit de l'eau. [36] Dans notre cas on utilise l'air.

III.8.4 L'isolation thermique arrière et latérale

Le produit utilisé doit pouvoir résister à la température de fonctionnements. [35]

III.8.5 Coffre du capteur

C'est une structure sous forme de cadre qui consolide l'ensemble (on dépose là-bas les aliments à déshydrater).

III.9 Conclusion

Dans cette partie nous avons exposé les différents types des déshydrateurs solaires qui existent aujourd'hui ; leurs principes de fonctionnement, leurs avantages, inconvénients ainsi que les différents types des capteurs solaires, et nous avons donné un aperçu sur l'énergie solaire, sa captation, et enfin l'exploitation de cette énergie pour la déshydratation.

*CHAPITRE IV: ETUDE
THEORIQUE*

IV.1 Introduction

Le capteur solaire plan est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie transportée par les radiations solaires, la convertir en énergie calorifique et la transmettre à un fluide caloporteur.

Par définition, un transfert de chaleur ou transfert thermique entre deux corps est une interaction énergétique qui résulte d'une différence de températures entre eux. On distingue habituellement trois modes de transfert de chaleur :

1. Conduction thermique,
2. Rayonnement,
3. Convection.

Ces trois modes sont régis par des lois spécifiques qu'on va utiliser pour obtenir un bilan thermique de la résultante des pertes thermique du capteur plan à air.

IV.2 Modes de transferts thermiques

IV.2.1 Conduction [37]

Le flux thermique est donné par la formule suivante :

$$\Phi_{1 \rightarrow 2} = \lambda S \frac{T_1 - T_2}{e} \quad (1)$$

Qui peut s'écrire :

$$\Phi_{1 \rightarrow 2} = \frac{T_1 - T_2}{R_{th}}$$

Avec : $R_{th} = \frac{e}{\lambda S}$

Φ : Flux thermique en watt (W).

λ : Conductivité thermique λ du matériau en (W.m⁻¹. °K⁻¹).

R_{th} : Résistance thermique de conduction en Kelvin par watt (°K/W).

e : Épaisseur de la paroi en mètre (m).

S : Les deux surfaces d'aire en mètre carré (m²).

T_1 : Température de la face 1 en kelvin (°k).

T_2 : Température de la face 2 en kelvin (°k).

IV.2.2 Transfert par convection

La convection est le mode de transfert d'énergie entre une surface solide et l'adjacent liquide ou gaz qui est en mouvement, elle implique les effets combinés de la conduction et le mouvement du fluide. Plus le mouvement du fluide est rapide, plus le transfert de chaleur par convection est important. La convection est appelée forcée si le liquide est forcé de s'écouler sur la surface par des moyens extérieurs tels qu'un ventilateur, une pompe ou le vent. Alors, qu'elle est appelée convection naturelle (ou libre) si le mouvement du fluide est dû par les forces de flottabilité qui sont induites par les différences de densité due à la variation de la température dans le fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton : [37]

$$\Phi = h \times S (T_p - T_f) \quad (2)$$

Avec :

Φ : Flux de chaleur par convection (W).

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection (W/m²°C).

T_p : Température de surface de solide (°C).

T_f : Température du fluide loin de la surface du solide (°C).

s : Aire de la surface de contact solide /fluide (m²).

La valeur de coefficient de transfert de chaleur par convection (h) est en fonction de la nature de fluide, de sa température, et de sa vitesse.

IV.2.3 Transfert par Rayonnement

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide), dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant et dans ce cas nous avons la relation : [37]

$$\Phi = \sigma \varepsilon_p s (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (3)$$

Avec :

Φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W).

σ : Constant de STEPHAN-BOLTZMAN ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{k}^4$).

ε_p : Facteur d'émission de la surface.

T_p : Température de la surface ($^\circ\text{k}$).

T_∞ : Température de milieu environnant la surface ($^\circ\text{k}$).

s : Aire de la surface (m^2)

IV.3 Bilan thermique du capteur

Les capteurs solaires fonctionnent dans les états équilibrés (régime thermique établi), dans ces conditions, les performances d'un capteur solaire sont décrites par le bilan énergétique global suivant :

$$\Phi_{sa} = \Phi_u + \Phi_p + \Phi_{st}$$

Avec

Φ_{sa} : Flux solaire absorbé.

Φ_u : Flux utile récupéré par le fluide caloporteur.

Φ_p : Flux perdu par le capteur.

Φ_{st} : Flux stocké sous forme de chaleur vive dans les différents éléments du capteur lorsque le régime est permanent.

IV.3.1 Hypothèses simplificatrices

Pour simplifier l'étude de transfert de chaleur dans le capteur solaire à air, on a adopté les hypothèses suivantes :

- ❖ Régime est permanent,
- ❖ Poussière et les masques sur le capteur sont négligeables,
- ❖ Pertes thermiques vers l'avant et l'arrière se font vers la même température ambiante,
- ❖ Capteur est uniformément irradié,

- ❖ Puissance absorbée par la vitre est négligeable,
- ❖ Pertes par rayonnement de la face arrière ainsi que de la surface latérale du capteur sont négligeables devant les autres modes d'échange thermique,
- ❖ Couverture est nette de toute poussière et saleté,
- ❖ Effet d'ombre est négligeable,
- ❖ Ecoulement est unidirectionnel,
- ❖ Température d'entrée de l'air et température ambiante confondues.

Dans le cas du régime permanent et pour les capteurs à air, la quantité d'énergie stockée dans les différentes parties du capteur solaire est négligeable. Ce qui conduit à :

$$\Phi_{sa} = \Phi_u + \Phi_p$$

IV.4 Pertes thermiques du capteur

Nous diviserons le flux perdu par capteur en trois parties :

$$\Phi_p = \Phi_{pav} + \Phi_{par} + \Phi_{tat}$$

Φ_{pav} : Flux perdu à l'avant du capteur.

Φ_{par} : Flux perdu à l'arrière du capteur.

Φ_{tat} : Flux perdu par les faces latérales du capteur.

IV.4.1 Perte à l'avant de capteur

On s'intéresse au calcul des pertes à l'avant de capteur pour celle-ci on divise notre travail en 3 parties :

IV.4.1.1 Perte entre la vitre et le milieu extérieur

IV.4.1.1.1 Par convection

$$\Phi_{pav1cv} = h_{vit-me}^{cv} \times S (T_v - T_{am}) \quad (4)$$

Avec :

T_v : Température de la vitre.

T_{am} : Température de l'air ambiant.

$h_{\text{vite-me}}^{\text{cv}}$: Coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'air ambiant. [38] Il est dû à la vitesse de vent.

$$h_{\text{vite-me}}^{\text{cv}} = 1.27 \times [(T_v - T_{\text{am}}) \times \cos \beta]^{1/3} + 2.658 V_v$$

V_v : Vitesse de vent.

IV.4.1.1.2 Par rayonnement

$$\Phi_{\text{pav1r}} = \sigma \times S \times \epsilon_v (T_v^4 - T_{\text{cl}}^4) \quad (5)$$

Avec :

ϵ_v : Emissivité de verre.

T_v : Température de la vitre.

T_{cl} : Température équivalence du ciel est donnée par relation de **SWINBANK**. [38]

$$T_{\text{cl}} = 0.0552 \times T_{\text{am}}^{3/2}$$

Donc l'équation totale de la convection et rayonnement sera :

$$\Phi_{\text{pav1}} = \sigma \times S \times \epsilon_v (T_v^4 - T_{\text{cl}}^4) + h_{\text{vite-me}}^{\text{cv}} \times S (T_v - T_{\text{am}})$$

IV.4.1.2 Perte entre la vitre et l'absorbeur

IV.4.1.2.1 Par convection

$$\Phi_{\text{pav2cv}} = h_{\text{vit-abs}}^{\text{cv}} \times S (T_{\text{ab}} - T_v) \quad (6)$$

Avec :

T_{ab} : Température de l'absorbeur.

$h_{\text{vit-abs}}^{\text{cv}}$: Coefficient d'échange de chaleur par convection entre la vitre et l'absorbeur.

Ce coefficient est difficile à calculer. La méthode de calcul la plus utilisée est celle de **HOLLANDS ET AL(1976)**. [39]

$$h_{\text{vit-abs}}^{\text{cv}} = N_u \cdot \frac{\lambda_{\text{air}}}{L}$$

Avec :

λ_{air} : Conductivité thermique de l'air.

N_u : Nombre de Nusselt. [39]

L : Distance entre la vitre et la plaque absorbante.

$$N_u = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708(\sin 1.8\beta)^{1.6}}{R_a \cos \beta} \right] \left[1 - \frac{1708}{R_a \cos \beta} \right]^+ + \left[\left(\frac{R_a \cos \beta}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]^+$$

Avec :

$$R_a = \frac{g(T_p - T_v)L^3 P_r}{\nu^2 T_{v-a}} \quad \text{Nombre de **Rayleigh** .}$$

$$P_r = \frac{\nu}{a} \quad \text{Nombre de **Prandtl** .}$$

T_{v-a} : Température de l'air entre la vitre et l'absorbeur.

β : Angle d'inclination du capteur.

Il est signalé que les termes ayant un composant (+) sont pris égaux à zéro s'ils sont négatifs.

IV.4.1.2.2 Pertes par rayonnement [39]

$$\Phi_{pav2r} = \frac{\sigma \times S (T_{ab}^4 - T_v^4)}{\frac{1}{\epsilon_v} + \frac{1}{\epsilon_p} - 1} \quad (7)$$

Avec :

ϵ_v : Emissivité de verre.

ϵ_p : Emissivité de l'absorbeur.

Donc l'équation totale de la convection et rayonnement sera :

$$\Phi_{pav2} = h_{vit_abs}^{cv} \times S (T_{ab} - T_v) + \frac{\sigma \times S (T_{ab}^4 - T_v^4)}{\frac{1}{\epsilon_v} + \frac{1}{\epsilon_p} - 1}$$

IV.4.1.3 Pertes par conduction

$$\Phi_{pav3cd} = \lambda S \frac{T_1 - T_2}{e} = \frac{T_1 - T_2}{R_{th}}$$

Avec :

$$R_{th} = \frac{\lambda S}{e}$$

λ : Conductivité thermique de l'isolant.

e : Epaisseur de l'isolant.

IV.4.2 Perte à l'arrière de capteur [40]

Les pertes à l'arrière de capteur sont :

$$\Phi_{par} = \frac{S(T_{ab} - T_{am})}{\frac{e_1}{\lambda} + \frac{1}{h_{ar-me}^{cv}}} = \frac{S(T_{ab} - T_{am})}{R_3}$$

Avec :

λ : Conductivité thermique de l'isolant.

e_1 : Epaisseur de l'isolant sur la face arrière.

h_{ar-me}^{cv} : Coefficient de transfert par convection entre la face arrière du capteur et le milieu externe.

On néglige la résistance par convection devant celle due à l'isolation, on aura :

$$\Phi_{par} = \frac{S(T_{ab} - T_{am})}{\frac{e_1}{\lambda}} = \frac{S(T_{ab} - T_{am})}{R_3}$$

Avec :

$$R_3 = \frac{e_1}{\lambda}$$

IV.4.3 Pertes par les faces latérales du capteur [40]

Les pertes par les faces latérales du capteur sont :

$$\Phi_{lat} = \frac{s(T_{ab} - T_{am})}{\left(\frac{e_2}{\lambda} + \frac{1}{h_{lat}^{cv}}\right) \left(\frac{s}{s_{lat}}\right)}$$

Avec :

e_2 : Epaisseur de l'isolant sur ses faces latérales.

S_{lat} : La surface latérale du capteur.

On néglige la résistance par convection latérale donc :

$$\Phi_{lat} = \frac{s(T_{ab} - T_{am})}{\left(\frac{e_2}{\lambda}\right)\left(\frac{s}{S_{lat}}\right)} = \frac{s(T_{ab} - T_{am})}{R_{lat}}$$

Avec :

$$R_{lat} = \left(\frac{e_2}{\lambda}\right)\left(\frac{s}{S_{lat}}\right)$$

IV.5 Rendement

Le rendement durant la journée n'est pas constant donc on peut prendre en mesure un rendement instantané à l'instant (t).

IV.5.1 Rendement instantané

D'après l'analyse de **Hottel**, **Willier**, **Wortz** et **Bliss**, ce rendement est défini comme étant le rapport entre l'énergie utile réellement extraite du système et la quantité du rayonnement frappant toute la surface de capteur. [40]

$$\eta_{inst} = \frac{\Phi_u}{G_i \cdot A_c}$$

Avec :

A_c : La surface du capteur.

G_i : Rayonnement solaire incident.

IV.6 Applications numériques

Dans cette partie, nous allons effectuer quelques calculs sur diverses pertes liées à notre capteur solaire, pour cela on a près comme titre d'exemple la journée 01/07/2021.

IV.6.1 Pertes à l'avant de capteur

On s'intéresse au calcul des pertes à l'avant de capteur pour celle-ci on devise notre travail en 3 parties :

IV.6.1.1 Perte entre la vitre et le milieu extérieur

IV.6.1.1.1 Par convection

D'après l'équation (4) on a :

$$\Phi_{\text{pav1cv}} = 5.09 \times 0.483 \times (36 - 34)$$

$$\Phi_{\text{pav1cv}} = 4.91 \text{ W}$$

IV.6.1.1.2 Par rayonnement

D'après l'équation (5) on a :

$$\Phi_{\text{pav1r}} = 5.67 \times 10^{-8} \times 0.483 \times 0.82 \times (36^4 - 10.94^4)$$

$$\Phi_{\text{pav1r}} = 0.037 \text{ W}$$

$$\varepsilon_v = 0.82$$

Perte totale entre la vitre et le milieu extérieur

$$P_T = 4.91 + 0.037$$

$$P_T = 4.947 \text{ W}$$

IV.6.1.2 Perte entre la vitre et l'absorbeur

IV.6.1.2.1 Par convection

D'après l'équation (6) on a :

$$\Phi_{\text{pav2cv}} = 0.357 \times 0.483 \times (46 - 36)$$

$$\Phi_{\text{pav2cv}} = 1.72 \text{ W}$$

$$\lambda_{\text{air}} = 0.025$$

$$Nu = 1$$

IV.6.1.2.2 Pertes par rayonnement

D'après l'équation (7) on a :

$$\Phi_{\text{pav2r}} = \frac{5.67 \times 10^{-8} \times 0.483 \times (46^4 - 36^4)}{\frac{1}{0.82} + \frac{1}{0.87} - 1}$$

$$\Phi_{\text{pav2r}} = 0.055 \text{ W}$$

$$\varepsilon_p : 0.87$$

Perte totale entre la vitre et l'absorbeur

$$P_T = 1.72 + 0.055$$

$$P_T = 1.77 \text{ W}$$

IV.6.1.3 Pertes par conduction

La surface de contact entre le capteur et la chambre est très petite, par conséquent les pertes par conduction sont négligeables.

IV.6.2 Pertes à l'arrière de capteur

$$\Phi_{\text{par}} = \frac{0.06 \times 0.483 \times 8}{1.5 \times 10^{-2}}$$

$$\Phi_{\text{par}} = 15.45 \text{ W}$$

IV.6.3 Pertes par les faces latérales du capteur

$$\Phi_{lat} = \frac{0.06 \times 0.0483 \times 10 \times 2}{1.5 \times 10^{-2}}$$

$$\Phi_{lat} = 3.86 \text{ W}$$

IV.7 Conclusion

Après avoir rappelé les différentes équations de transfert thermique (conduction, convection, rayonnement) ainsi que les lois qui les régissent, nous avons appliqué les formules pour déterminer les différentes pertes.

*Chapitre V : Expériences et
interprétation des résultats*

V.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons le déshydrateur solaire indirect réalisé à l'Université Abderrahmane Mira Bejaia, dont la taille a été obtenue avec l'aide de notre promoteur. Dans la première partie nous avons présenté le déshydrateur solaire indirect conçu. Dans la seconde partie, nous avons procédé à des expériences pendant plusieurs jours. Les résultats obtenus sont mis sur des graphes, en considérant les différents paramètres qui interviennent lors des expériences de déshydratation en l'occurrence les températures en différents points du capteur, pour l'humidité et la vitesse du vent, nous avons pris celles qui sont données par les services de météorologie.

Dans ces expériences de plusieurs jours sous différents climats, nous avons déshydraté des tomates, en mesurant le poids et en même temps nous avons mesuré à chaque heure la température ambiante, celle du capteur et celle dans la chambre de déshydratation.

Après, nous avons entamé une étude comparative entre la déshydratation à l'aide de notre déshydrateur et celle à l'air libre.

V.2 Description de déshydrateur solaire

Le déshydrateur solaire est principalement composé de deux parties : un capteur solaire à air plan qui utilise l'effet de serre pour convertir le rayonnement solaire capté en chaleur, et une chambre de déshydratation contenant les produits (fruit et légume) humides à déshydrater. Le choix de la taille et du matériau du déshydrateur solaire est lié à la disponibilité matérielle et aux exigences techniques de la déshydratation. Le dispositif est réalisé au sein de l'université A/Mira (Haute tension) avec l'aide de notre promoteur.



Figure 5.1: Photo réelle de notre déshydrateur solaire.

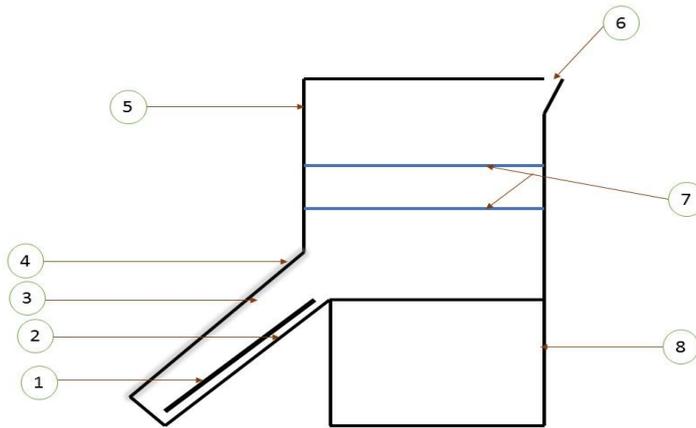


Figure 5.2: Schématisation du déshydrateur solaire.

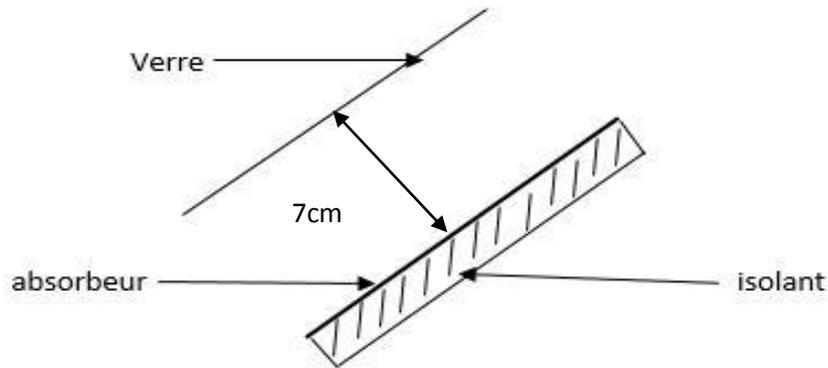


Figure 5.3: Schématisation du capteur solaire.

Composants de déshydrateur :

- 1) Absorbeur (plaque métallique).
- 2) Isolant (plaque en bois)
- 3) Couverture en verre ordinaire de 4 mm d'épaisseur
- 4) Capteur solaire plan.
- 5) Chambre de déshydratation.
- 6) Ouverture sert à évacuer l'air dans la chambre.
- 7) Claies.
- 8) Support de la chambre.

V.3 Caractéristiques techniques du capteur

Les caractéristiques techniques du capteur sont présentées dans le tableau suivant :

Couverture	Verre ordinaire de 4mm d'épaisseur, Démentions (70cm*41.5cm).
Absorbeur	Plaque en acier de 1.5 cm d'épaisseur, Démentions (68cm*58cm).
Isolant thermique	Plaque en bois de 1.5 cm d'épaisseur.
Distance entre le verre et l'absorbeur	7 cm
Angle d'inclinaison du capteur	45°

Tableau 5.1 : Caractéristique technique de capteur.

V.4 Capteur solaire plan a air

La figure 5.4 est une photographie d'un capteur solaire plan à air d'une taille de 700×690 mm, qui est utilisé pour chauffer l'air entre l'absorbeur et le verre. Les parois avant et latérales sont isolées avec du verre de 4 mm et du bois de 1.5 cm respectivement. L'absorbeur est une plaque métallique (1.5 cm d'épaisseur) recouverte de noir mat (non réfléchissant), qui peut transmettre l'énergie captée à l'air, tout en évitant la conduction, la convection et la perte de rayonnement de divers composants périphériques vers l'extérieur. La distance entre l'absorbeur et le vitrage est de 7 cm.



Figure 5.4 : Photo réelle du capteur solaire.

V.5 Chambre de déshydratation

La figure 5.5 montre une chambre de déshydratation de forme parallélépipède rectangle d'une dimension totale de (550 * 700 * 900 mm). Elle est faite en bois de 1.5 cm d'épaisseur et posée sur un support à 55 cm du sol. Elle contient (05) étagère à l'intérieur, chacun à une dimension de (50* 63cm). Cette chambre est utilisée pour déshydrater les aliments, d'autre part nous avons laissé une ouverture tout en bas de la paroi arrière de la pièce pour évacuer l'air qui sort du capteur. Dont le rôle est d'aspirer l'air chaud chargé d'humidité par le capteur solaire introduit au sommet de la cheminée à fin d'assurer l'évacuation de l'air humide.



Figure 5.5 : Photo réelle du la chambre de déshydratation.

V.6 Principe et fonctionnement des déshydrateurs solaires

Le déshydrateur indirect se compose de deux parties essentielles un capteur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur et une chambre de déshydratation qui contient le produit.

Le capteur solaire plan à air est composé d'une plaque noircie qui capte le rayonnement solaire qui augmentera sa température, l'air ambiant entre par le bas et se réchauffe lorsqu'il entre en contact avec la plaque noire, de ce fait l'air chaud monte et pénètre par convection naturelle jusqu'à atteindre la chambre de déshydratation, où sont placés les aliments à déshydrater sur des étagères, la durée de déshydratation est très variable selon les conditions climatiques.

La circulation de l'air (entrée basse, sortie haute) crée un courant d'air qui est très important pour que ces systèmes maintiennent la déshydratation et non le four. Ces systèmes permettent de déshydrater les aliments dans des meilleures conditions sanitaires que les

méthodes traditionnelles (à air libre), éliminant ainsi les dépôts de poussière et le passage d'insectes.

V.7 Description physique de déshydratation

Il existe plusieurs scènes pendant le processus de déshydratation. Toutes ne peuvent pas être observées systématiquement. Si elles sont identifiables, on distingue : [41]

- ❖ Phase transitoire de mise en température du produit à déshydrater (AB),
- ❖ Phase à vitesse de déshydratation constante (BC),
- ❖ Phase à vitesse de déshydratation décroissante (CD).

"C" : Point critique de déshydratation.

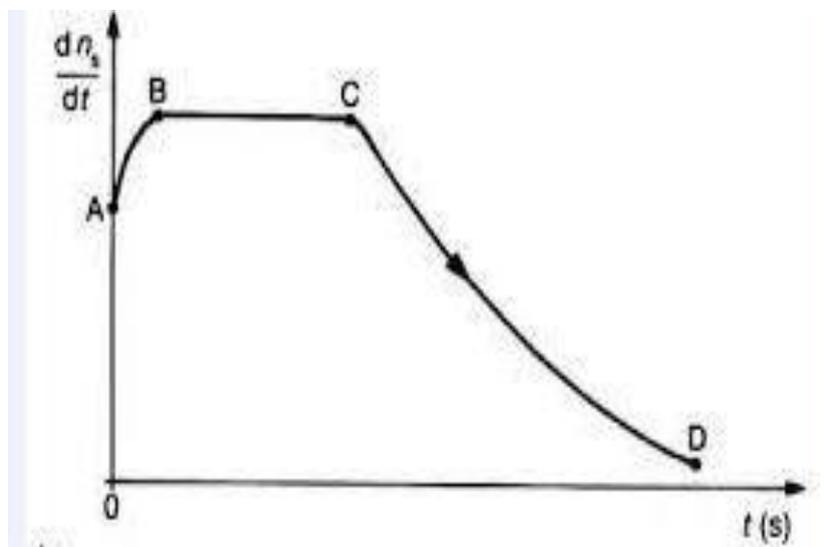


Figure 5.6 : Vitesse de déshydratation solaire.

V.7.1 Phase de mise en température (A-B)

Le produit à déshydraté est froid ou dans l'état initial (au départ), la pression de la vapeur est également faible par conséquent, le transfert de masse est très lent. D'autre part, le gradient de température entre l'air chaud et la surface froide du produit est trop élevé, d'où un transfert de chaleur très actif.

La chaleur transférée à la surface du produit dépasse évidemment la chaleur emportée par la petite quantité d'eau évaporée, de sorte que l'excès de chaleur ne chauffe que la surface du produit. Cela entraînera la chute et l'arrêt du gradient de température une fois que nous aurons atteint l'équilibre en régime permanent.

V.7.2 Phase à allure constant (B-C)

Par conséquent, le transfert de chaleur et le transfert de masse atteignent un équilibre stable et la caractéristique de cette étape est une capacité d'évaporation constante. Cela signifie que lors de la déshydratation à vitesse constante, la température de la surface du produit ne dépend que des caractéristiques de l'air, notamment sa température, sa vitesse et son humidité.

V.7.3 Phase à allure décroissante (C-D)

D'une part, après élimination de l'eau libre, le gradient de pression de la vapeur d'eau diminue, l'allure de transfert de l'eau diminue simultanément. D'autre part, l'eau migre de plus en plus difficilement et c'est le transfert de masse interne qui devient limitant. Durant cette phase, des dépôts de soluté bloquent les pores et des phénomènes de croûtage aient lieu.

V.8 Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de déshydratation

V.8.1 Influence de la température de l'air

La température de l'air de déshydratation a une grande influence sur la vitesse de déshydratation. Cet effet est dû à l'augmentation de l'apport de chaleur dans le produit à mesure que la température de l'air augmente. Cela est également dû à la température du produit, qui est plus importante que la température élevée de l'air. Par conséquent, le taux de diffusion de l'eau dans le produit augmente avec la température. [42]

V.8.2 Influence de la vitesse de l'air

La vitesse de l'air influe positivement sur la cinétique de déshydratation, notamment en début d'opération. Cependant, les produits dont la cinétique de déshydratation est contrôlée par les mouvements internes de l'eau, l'effet de la vitesse de déshydratation à l'air devient très faible. [42]

V.8.3 Influence de l'humidité de l'air

La teneur en eau de l'air joue un rôle important dans la cinétique de déshydratation de certains produits. Comme la vitesse de l'air, cet effet est plus important au début de la déshydratation et diminue à mesure que la température de l'air augmente. [42]

V.9 Teneur en eau

La teneur en eau d'un matériau où l'humidité absolue est définie par la masse quantité d'eau contenue dans un produit, exprimée en pourcentage de la masse sèche de ce produit. Cette valeur est importante pour tous les produits vendus au poids. [42]

V.9.1 Teneur en eau à base sèche (humidité absolue)

L'humidité absolue d'un solide, appelé aussi teneur en eau à base sèche, se définit comme la masse d'eau contenue dans le produit par rapport à la masse sèche de ce produit. [42]

V.9.2 Teneur en eau à base humide (humidité relative)

L'humidité relative d'un solide, appelé aussi titre en eau à base humide, se définit comme la masse d'eau contenue dans le produit par rapport à la masse humide de ce produit. [43]

V.9.3 Activité de l'eau dans le produit

L'activité de l'eau dans le produit (A_w) est une grandeur liée à l'humidité du produit.

G. Lewis & M. Randall, 1923, G. Scott, 1957, M. Loncin, 1961, ont défini l'activité de l'eau a_w dans le produit par le rapport de la pression partielle de la vapeur d'eau à la surface du produit (P_{vp}) à la pression de vapeur de l'air saturé (P_{vs}). [42]

$$a_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}}$$

Avec :

p_{vp} : Pression de la vapeur d'eau à la surface du produit.

p_{vs} : Pression de la vapeur d'eau dans l'air saturé.

Ces deux pressions sont fortement dépendantes de la température, tandis que leur rapport est beaucoup moins. Dans le même ordre d'idées, ils justifient que l'humidité relative (Hr) d'une atmosphère (un nombre sans dimension compris entre 0 et 100) est donnée par l'expression :

$$Hr(\%) = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} \times 100$$

L'activité de l'eau dans le produit est donc directement liée à l'humidité relative d'équilibre au-dessus d'un produit par la relation :

$$a_w = \frac{p_{vp}}{p_{vs}} = \frac{\text{HrE}(\%)}{100}$$

V.10 Essai sur la variation des différentes températures et de poids en fonction du temps

V.10.1 Description de l'expérience

Nous avons équipé notre déshydrateur d'un multimètre et de quatre thermocouples pour mesurer les différentes températures, nous avons donc mis le premier thermocouple sur la partie supérieure du capteur pour mesurer sa température, l'autre sur la partie inférieure du capteur, et le troisième à l'intérieur de la chambre, la température est également mesurée, et enfin la température ambiante est mesurée sur un support par le quatrième thermocouple.

La vitesse du vent et l'humidité sont tirées du site Web de prévisions météorologiques de Bejaia.

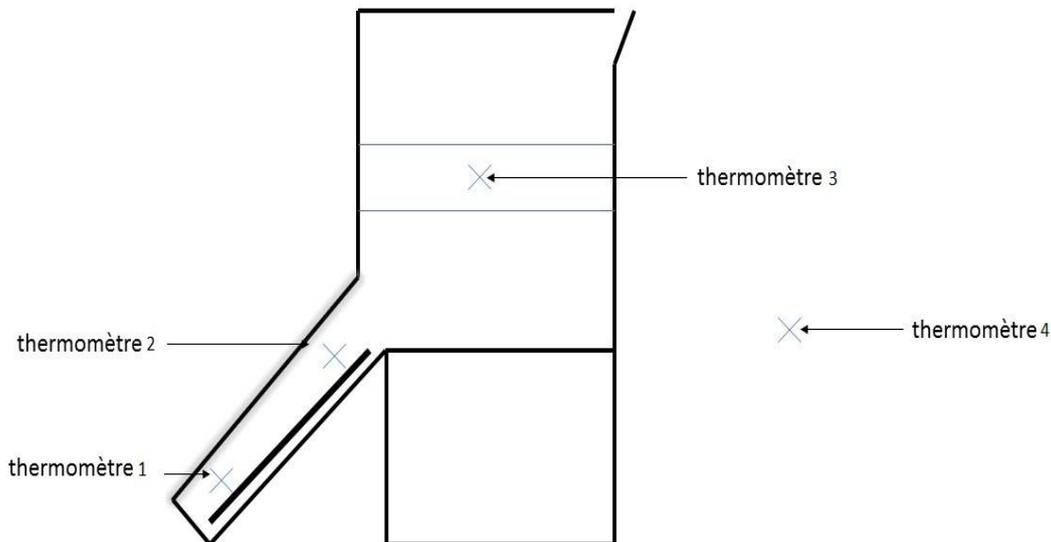


Figure 5.7 : Représente l'emplacement des quatre thermomètres.

V.10.2 Présentation du résultat

Sur la base de notre expérience, nous avons pris des mesures sur 7 jours différents, afin de dessiner différentes courbes d'ajustement, nous avons utilisé Excel.

La première partie de l'expérience a été réalisée à différentes ouvertures de la porte (entièrement ouverte, 10 cm, 20 cm et complètement fermée).

Dans la deuxième partie de l'expérience, nous avons réduit la sortie d'air du capteur pour obtenir une meilleure circulation d'air. Et nous avons également ajusté la taille de la chambre

La tomate est coupée en tranche d'égalles épaisseurs.

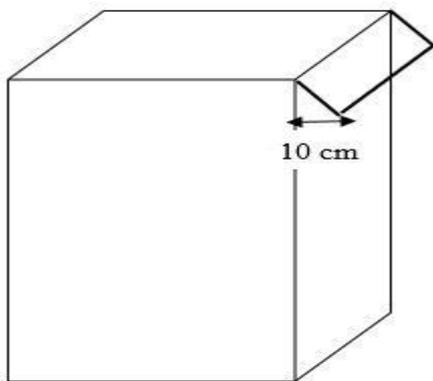


Figure 5.8 : Ouverture de la chambre.

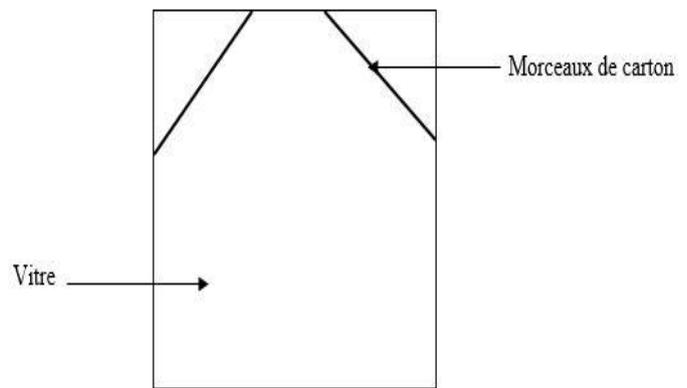


Figure 5.9 : Réduction de la section de sortie du capteur.

V.10.2.1 Journée du 13/06/2021 (condition normale et porte ouverte complètement)

Heure	09 :00	10 :00	11 :00	12 :00	13 :00	14 :00	15 :00	16 :00
Température ambiante (°C)	26.5	27	29.5	31	30	32	30	29
Température dans la chambre (°C)	24	28	32	32.5	31.5	34	31.5	30.5
Température dans la partie supérieure du capteur (°C)	26.5	30	33	33.5	33	36	32	31.5
Température dans la partie inférieure du capteur (°C)	26	27.5	30	32	30.5	33	30	29.5

Tableau 5.2 : Variation des différentes températures en fonction de temps de la journée (13/06/2021).

Heure(h)	09 :00	10 :00	11 :00	12 :00	13 :00	14 :00	15 :00	16 :00
Poids à l'air libre(g)	/	250	214	176	142	108	93	70
Poids dans la chambre(g)	/	250	220	191	166	139	120	90

Tableau 5.3 : Variation des différents poids en (g) en fonction de temps de déshydratation (13/06/2021).

Heure(h)	09 :00	10 :00	11 :00	12 :00	13 :00	14 :00	15 :00	16 :00
Poids à l'air libre(%)	/	100	85.6	70.4	56.8	43.2	36.8	28
Poids dans la chambre(%)	/	100	88	76.4	66.4	55.6	48	36

Tableau 5.4 : Variation des différents poids en (%) en fonction de temps de déshydratation (13/06/2021).

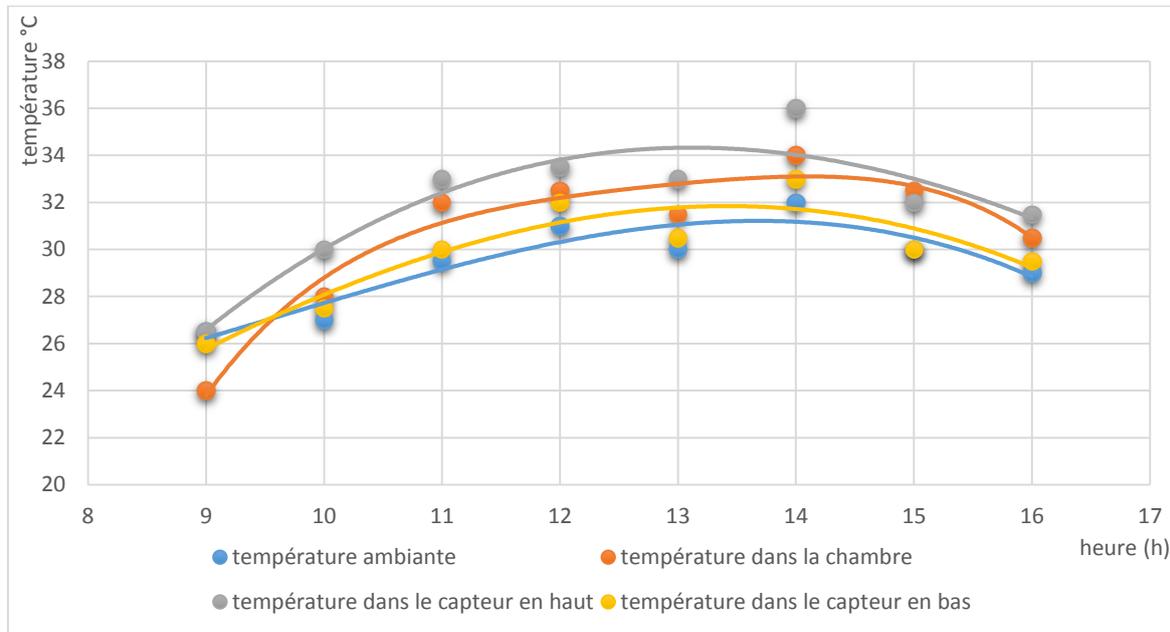


Figure 5.10 : Variation des différentes températures en fonction de temps de la journée 13/06/2021.

Interprétation du résultat

La journée est ensoleillée avec une vitesse de vent de 5 km/h, l'humidité est de 78%, notre déshydrateur est orienté vers le sud-est, essai dans les démentions réelles du déshydrateur avec porte ouverte.

La température ambiante : varie entre 26.5°C et 32°C, avec une moyenne de 29.25°C et la température dans la chambre de déshydratation varie de 28°C à 34°C avec une moyenne de 31°C.

D'après le diagramme de température, nous remarquons que la température dans la chambre de déshydratation est directement liée à celle du capteur, car lorsque la température du capteur augmente, celle dans la chambre de déshydratation augmente également, et lorsque la température du capteur diminue, elle est également réduite dans la chambre de déshydratation mais, on observe un DT très faible (varie entre 1°C et 2.5°C) ce qui n'est pas suffisant. D'autre part, la température du capteur n'est pas seulement liée à la température ambiante, car bien que cette dernière reste la même entre deux mesures (13h, 15h) la température du capteur change (augmentera ou diminuera) dans certaines mesures, nous en déduisons donc que le capteur est lié à deux facteurs, l'intensité des rayons du soleil et la vitesse du vent.

Remarque

DT varie entre 1°C et 2.5°C.

DT : Différence entre la température ambiante et celle de la chambre.

Comparaison entre la déshydratation à l'air libre et avec capteur

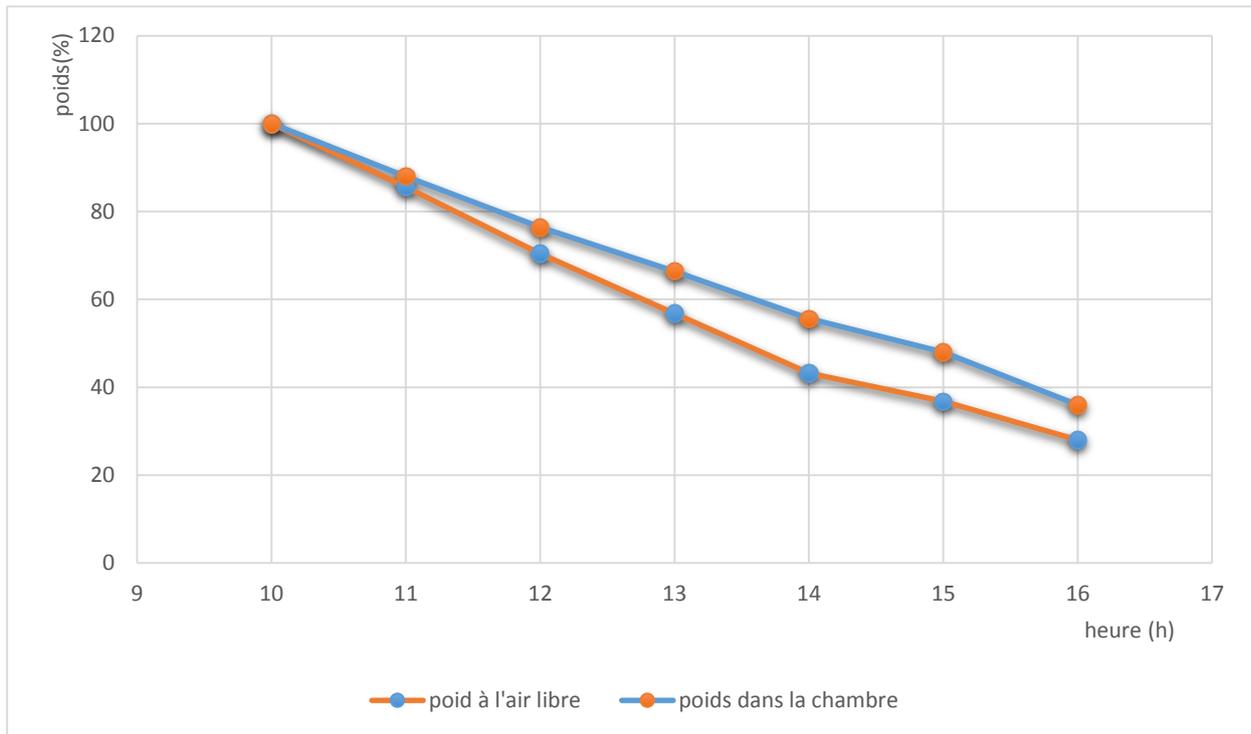


Figure 5.11 : Comparaison entre la diminution de poids à air libre par rapport à la chambre en fonction du temps de la journée 13/06/2021.

Interprétation du résultat

D'après ce diagramme que nous avons obtenu à partir de l'étude comparative entre la tomate mise à l'air libre et celle mise dans la chambre de déshydratation, on remarque que la tomate qu'on a mis à l'extérieur perd 72% de son poids, et la tomate qu'on a mis à l'intérieur perd 64%.

Pour cela nous pouvons conclure que le taux de déshydratation à l'air libre est plus rapide par rapport à notre modèle (la différence est de 8%), donc à titre d'hypothèse, nous pensons que le DT (différence de température) entre la température ambiante et celle de la chambre n'est pas suffisante.

V.10.2.2 Journée du 14/06/2021 (condition normale et porte fermée)

Heure	09 :00	10 :00	11 :00	12 :00	13 :00	14 :00	15 :00	16 :00
Température ambiante (°C)	25.5	29	31	30	31	28	26	23
Température dans la chambre (°C)	23	34	35.5	36	36.5	32.5	31	30
Température dans la partie supérieure du capteur (°C)	25.5	32	34	34	36	30	29	26.5
Température dans la partie inférieure du capteur (°C)	25.5	29	30	31	33	29	27	25

Tableau 5.5 : Variation des différentes températures en fonction du temps de la journée (14/06/2021).

Heure(h)	09 :00	10 :00	11 :00	12 :00	13 :00	14 :00	15 :00	16 :00
Poids à l'air libre(g)	/	250	176	144	115	92	71	55
Poids dans la chambre(g)	/	250	194	171	154	137	116	102

Tableau 5.6 : Variation des différents poids en (g) en fonction du temps de déshydratation (14/06/2021).

Heure	09 :00	10 :00	11 :00	12 :00	13 :00	14 :00	15 :00	16 :00
Poids à l'air libre(%)	/	100	70.4	57.6	46	36.8	28.4	22
Poids dans la chambre(%)	/	100	77.6	68.4	61.6	54.8	46.4	40.8

Tableau 5.7 : Variation des différents poids en (%) en fonction du temps de déshydratation (14/06/2021).

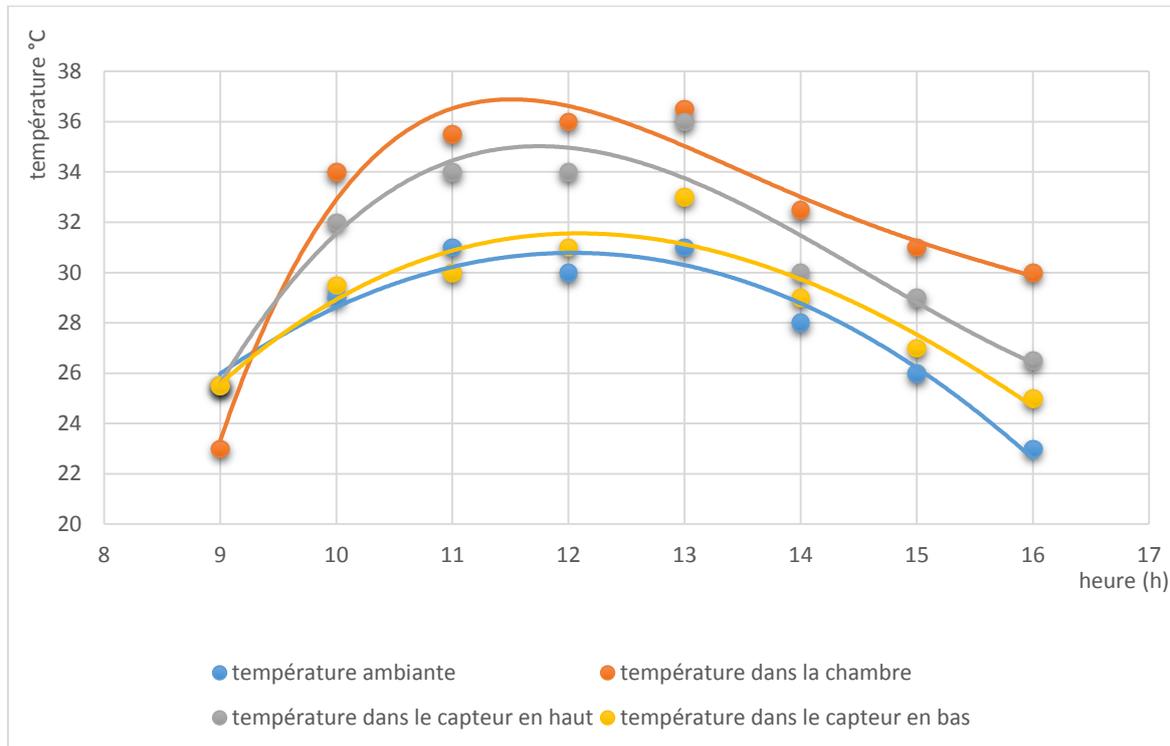


Figure 5.12 : Variation des différentes températures en fonction du temps de la journée 14/06/2021.

Interprétation du résultat

La journée est nuageuse avec une vitesse de vent de 13km/h, l'humidité est de 65%, notre déshydrateur est orienté vers sud-est, essai dans les démentions réelles de déshydrateur avec porte fermée.

La température ambiante : varie de 23°C à 31°C, avec une moyenne de 25.625°C et la température dans la chambre de déshydratation varie de 30°C à 36.5°C avec une moyenne de 33.25°C.

D'après le diagramme de température, nous remarquons que lorsque l'expérience a commencé à 9 heures du matin, la température dans la chambre était de 23 °C et celle sur capteur et le thermocouple qui mesure la température ambiante étaient de 25,5 °C. Ensuite de 10h à 13h, nous avons remarqué que la température ambiante augmentait progressivement de 29°C à 31°C, entraînant une augmentation significative de la température sur le capteur (une marge acceptable), ceci et avec l'effet porte fermée nous amène à avoir une augmentation observable de température dans la chambre de déshydratation par rapport au cas précédent (DT varie entre 4.5°C et 7°C). A partir de 14h, les différentes températures ont commencé à baisser car la température ambiante a commencé à baisser.

Remarque

DT varie entre 4.5°C et 7°C.

DT : Différence entre la température ambiante et celle de la chambre.

On peut voir qu'après avoir fermé la porte, DT s'est amélioré.

Comparaison entre la déshydratation à l'air libre et avec capteur

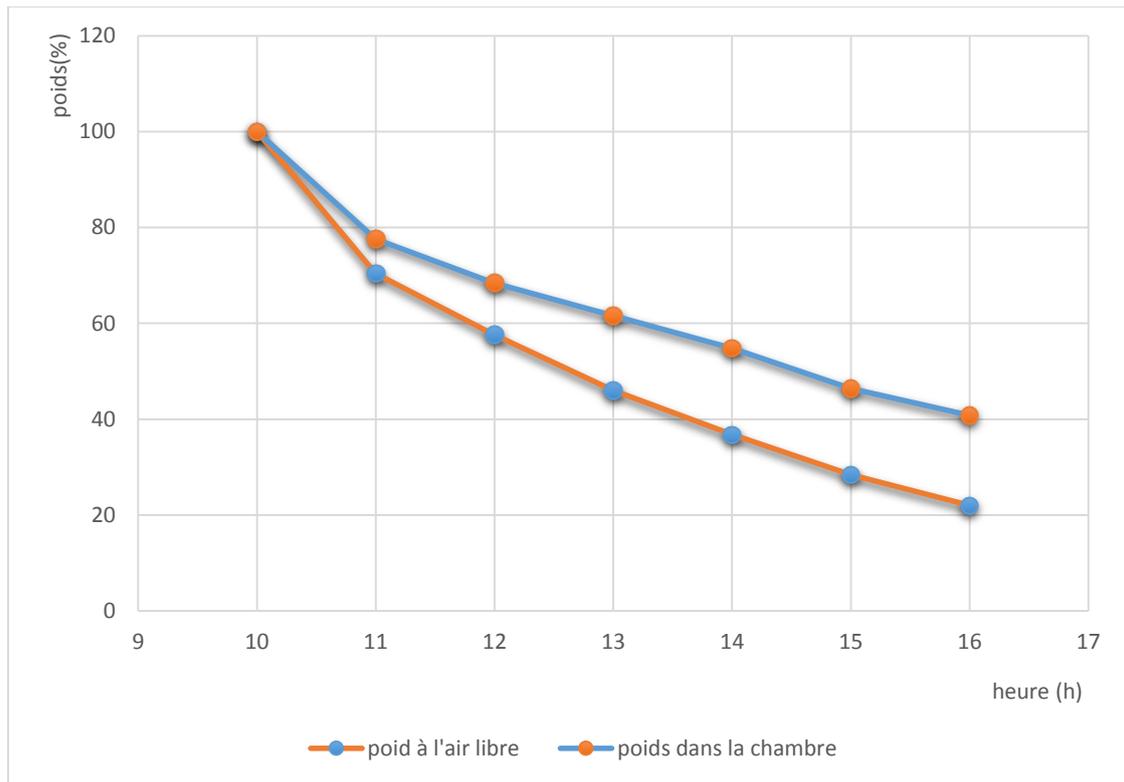


Figure 5.13 : Comparaison entre la diminution de poids à air libre par rapport à la chambre en fonction du temps de la journée 14/06/2021.

Interprétation du résultat

D'après ce diagramme que nous avons obtenu à partir de l'étude comparative entre la tomate mise à l'air libre et celle dans la chambre de déshydratation on remarque que la tomate qu'on a mis à l'extérieur perd 78% de son poids, et celle qu'on a mis à l'intérieur perd 59.2%.

A partir de là, nous pouvons conclure que le taux de déshydratation à l'air libre est plus rapide par rapport à notre modèle (la différence est de 18.8%), donc à titre d'hypothèse, Nous pensons que l'humidité dans la chambre de déshydratation est très élevée car la porte est fermée et donc la tomate sera saturée.

V.10.2.3 Journée du 15/06/2021 (condition normale et porte ouverte à 10 cm)

Heure	09 :00	10 :00	11 :00	12 :00	13 :00	14 :00	15 :00	16 :00
Température ambiante (°C)	/	27.5	23	27	29	26	25	23
Température dans la chambre (°C)	/	23	26	31	33.5	30	28.5	27
Température dans la partie supérieure du capteur (°C)	/	27	25	30	30	29	28	27
Température dans la partie inférieure du capteur (°C)	/	27	24	28	29	28.5	26	24

Tableau 5.8 : Variation des différentes températures en fonction du temps de la journée (15/06/2021).

Heure(h)	09 :00	10 :00	11 :00	12 :00	13 :00	14 :00	15 :00	16 :00
Poids à l'air libre(g)	/	260	237	194	162	132	100	64
Poids dans la chambre(g)	/	260	245	210	178	142	114	100

Tableau 5.9 : Variation des différents poids en (g) en fonction du temps de déshydratation (15/06/2021).

Heure	09 :00	10 :00	11 :00	12 :00	13 :00	14 :00	15 :00	16 :00
Poids à l'air libre(%)	/	100	91.15	74.6	62.3	50.76	38.4	24.6
Poids dans la chambre(%)	/	100	94.23	80.76	68.46	54.61	43.84	38.46

Tableau 5.10 : Variation des différents poids en (%) en fonction du temps de déshydratation (15/06/2021).

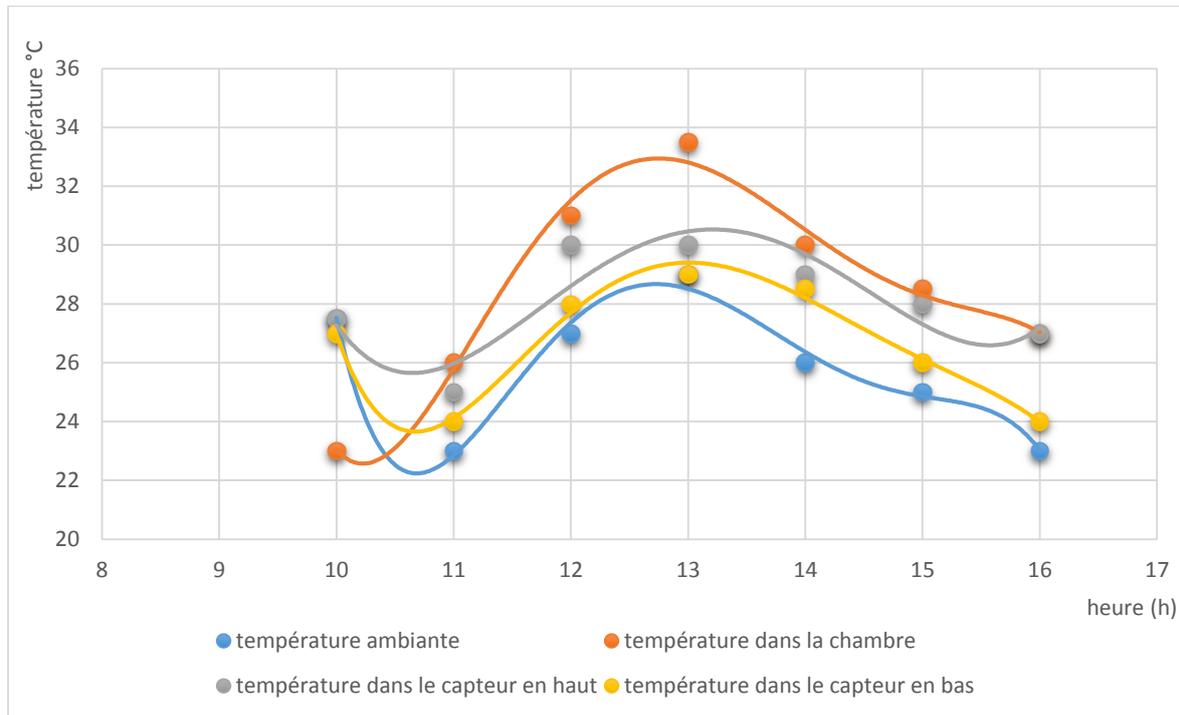


Figure 5.14 : Variation des différentes températures en fonction du temps de la journée 15/06/2021.

Interprétation du résultat

La journée est nuageuse avec une vitesse de vent de 5km/h, l'humidité est de 45%, notre déshydrateur est orienté vers sud-est, essai dans les démentions réelles de déshydrateur avec porte fermée (10cm).

La température ambiante : varie de 23°C à 29°C, avec une moyenne de 26°C et la température dans la chambre de déshydratation varie de 26°C à 33.5°C avec une moyenne de 29.75°C.

D'après le diagramme de température, nous remarquons que la température ambiante est un peu basse tout au long de la journée (par rapport à des conditions climatiques instables), cela affecte directement la température du capteur, ce qui affecte celle dans la chambre de déshydratation, où on a enregistré une moyenne de 29.75°C durant la journée.

Remarque

DT varie entre 3°C et 4.5°C.

DT : Déférénce entre la température ambiante et celle de chambre.

On peut voir qu'après avoir ouvert la porte (10cm), DT s'est baissé un peu par rapport à celle de porte fermée.

Comparaison entre la déshydratation à l'air libre et avec capteur

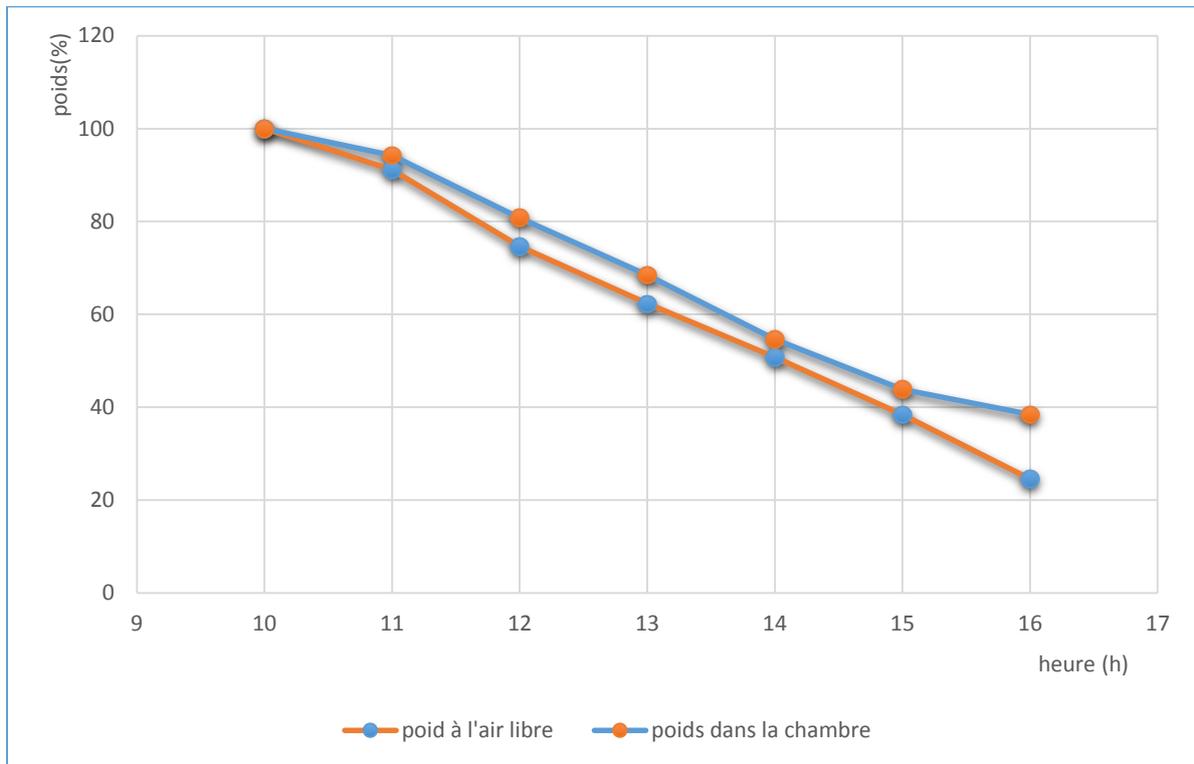


Figure 5.15 : Comparaison entre la diminution de poids à air libre par rapport à la chambre en fonction du temps de la journée 15/06/2021.

Interprétation du résultat

D'après ce diagramme que nous avons obtenu à partir de l'étude comparative entre la tomate mis à l'air libre et celle dans la chambre de déshydratation on remarque que la tomate qu'on a mis à l'extérieur perd 75.4% de son poids, et celle qu'on a mis à l'intérieur perd 61.54%.

Pour cela nous pouvons conclure que le taux de déshydratation à l'air libre est plus rapide par rapport à notre modèle (la différence est de 13.86%), on constate qu'il y a une amélioration par rapport au cas précédent (porte fermée), donc à titre d'hypothèse, Nous pensons que l'humidité dans la chambre de déshydratation est toujours élevée car la porte est ouverte juste de (10cm) et donc la tomate sera un peu saturée.

V.10.2.4 Journée du 16/06/2021 (condition normale et porte ouverte à 20 cm)

Heure	09 :00	10 :00	11 :00	12 :00	13 :00	14 :00	15 :00	16 :00
Température ambiante (°C)	26.5	29	27	28	32	34	29	27
Température dans la chambre (°C)	23	33	30.5	32	35	36.5	32.5	31
Température dans la partie supérieure du capteur (°C)	26	32.5	30	31	34	36	32	31
Température dans la partie inférieure du capteur (°C)	26.5	31	28	30	33	35	30	28.5

Tableau 5.11 : Variation des différentes températures en fonction du temps de la journée (16/06/2021).

Heure(h)	09 :00	10 :00	11 :00	12 :00	13 :00	14 :00	15 :00	16 :00
Poids à l'air libre(g)	/	222	180	139	89	60	41	32
Poids dans la chambre(g)	/	222	186	157	130	106	82	56

Tableau 5.12 : Variation des différents poids en (g) en fonction du temps de déshydratation (16/06/2021).

Heure(h)	09 :00	10 :00	11 :00	12 :00	13 :00	14 :00	15 :00	16 :00
Poids à l'air libre(%)	/	100	81.08	62.61	40.09	27.02	18.46	14.41
Poids dans la chambre(%)	/	100	83.78	70.72	58.55	47.74	36.93	25.22

Tableau 5.13 : Variation des différents poids en (%) en fonction du temps de déshydratation (16/06/2021).

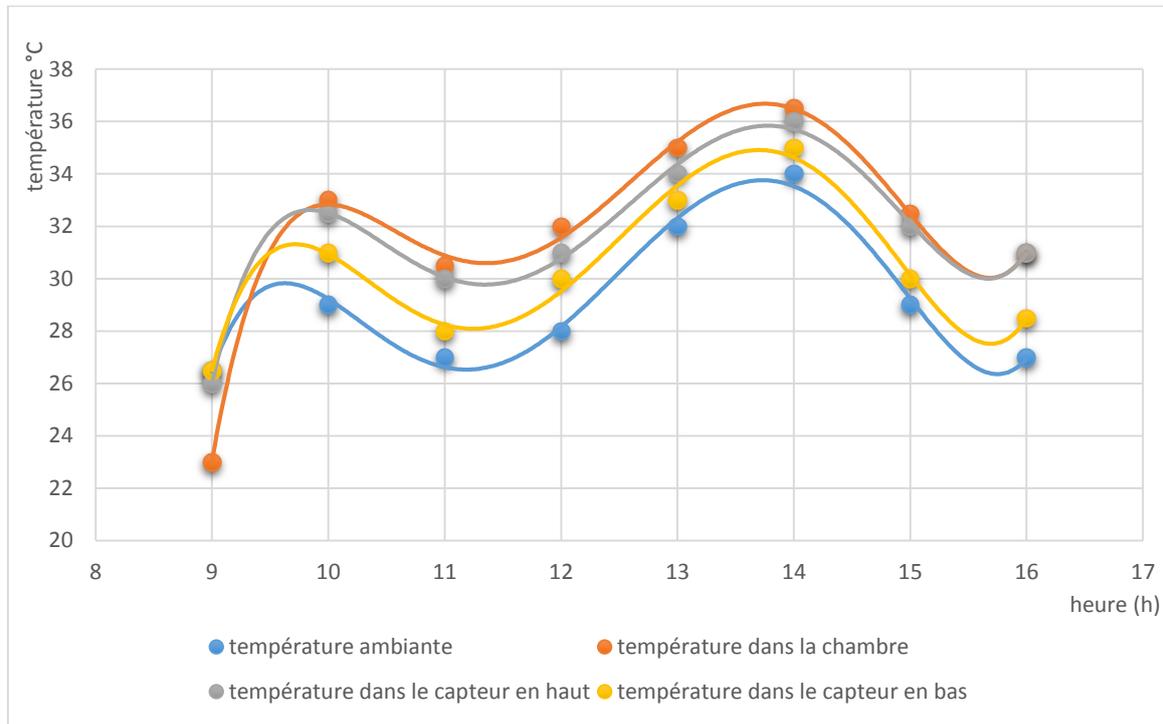


Figure 5.16 : Variation des différentes températures en fonction du temps de la journée 16/06/2021.

Interprétation du résultat

La journée est ensoleillée avec un intervalle nuageux avec une vitesse de vent de 14km/h, l'humidité est de 29%, notre déshydrateur est orienté vers sud-est, essai dans les démentions réelles de déshydrateur avec porte fermée (20cm).

La température ambiante : varie de 27°C à 34°C, avec une moyenne de 30.5°C et la température dans la chambre de déshydratation varie de 30.5°C à 35°C avec une moyenne de 32.75°C.

D'après le diagramme de température, nous remarquons que la température ambiante est un peu faible durant la matinée (de 9h à 12h), et à partir de 13h on observe une augmentation notable jusqu'à elle atteint sa valeur pic (34°C) à 14h, ensuite elle commence à diminuer, également on constate que les températures dans le capteur sont proportionnelles à celles de la chambre de déshydratation.

Remarque

DT varie entre 2.5°C et 4°C.

DT : c'est la différence entre la température ambiante et celle de chambre.

On peut voir qu'après avoir ouvert la porte (20cm), DT s'est baissé un peu par rapport à celle de porte ouverte (10cm).

Comparaison entre la déshydratation à l'air libre et avec capteur

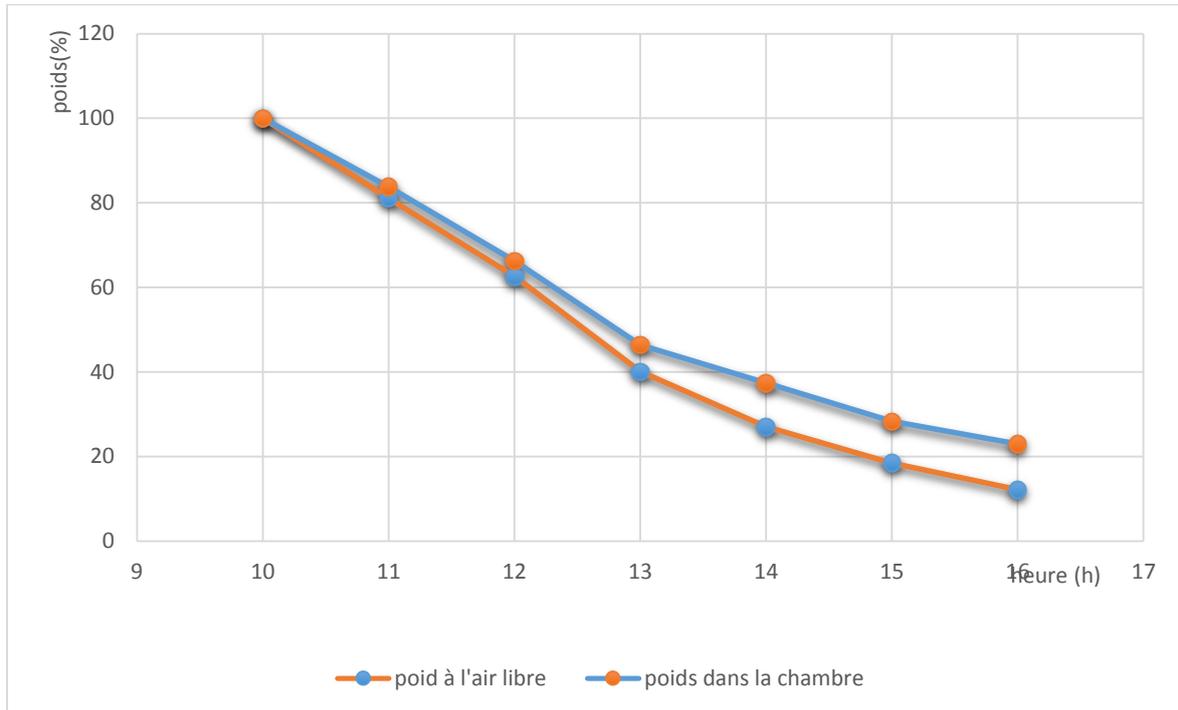


Figure 5.17 : Comparaison entre la diminution de poids à air libre par rapport à la chambre en fonction du temps de la journée 16/06/2021.

Interprétation du résultat

D'après ce diagramme que nous avons obtenu à partir de l'étude comparative entre la tomate mis à l'air libre et celle dans la chambre de déshydratation, on remarque que la tomate qu'on a mis à l'extérieur perd 87.84% de son poids, et la tomate qu'on a mis à l'intérieur perd 77.03%.

Pour cela, nous pouvons conclure que le taux de déshydratation à l'air libre est plus rapide par rapport à notre modèle (la différence est de 10.81%), on constate qu'il y a une amélioration par rapport aux cas précédents (porte ouverte 10cm et porte carrément fermée), par conte le 1^{er} essai (porte ouverte) est mieux, donc pour les prochains essais on maintient la porte ouverte et on essaie d'améliorer le DT avec d'autres astuces.

V.10.2.5 Journée du 21/06/2021 (capteur ouvert 1/3 et porte ouverte)

Heure	09 :00	10 :00	11 :00	12 :00	13 :00	14 :00	15 :00	16 :00
Température ambiante (°C)	24	25	26.5	30	32	31	29	25
Température dans la chambre (°C)	22	35	36	39.5	41	39	36	33
Température dans la partie supérieure du capteur (°C)	24	37	38	41	43	40	38	34
Température dans la partie inférieure du capteur (°C)	24.5	31	31.5	39	40	38	34	32

Tableau 5.14 : Variation des différentes températures en fonction du temps de la journée (21/06/2021).

Heure(h)	09 :00	10 :00	11 :00	12 :00	13 :00	14 :00	15 :00	16 :00
Poids à l'air libre(g)	/	125	106	90	76	59	47	36
Poids dans la chambre(g)	/	125	108	94	83	71	56	44

Tableau 5.15 : Variation des différents poids en (g) en fonction du temps de déshydratation (21/06/2021).

Heure	09 :00	10 :00	11 :00	12 :00	13 :00	14 :00	15 :00	16 :00
Poids à l'air libre(%)	/	100	84.8	72	60.8	47.2	37.6	28.8
Poids dans la chambre(%)	/	100	86.4	75.2	66.4	56.8	44.8	35.2

Tableau 5.16 : Variation des différents poids en (%) en fonction du temps de déshydratation (21/06/2021).

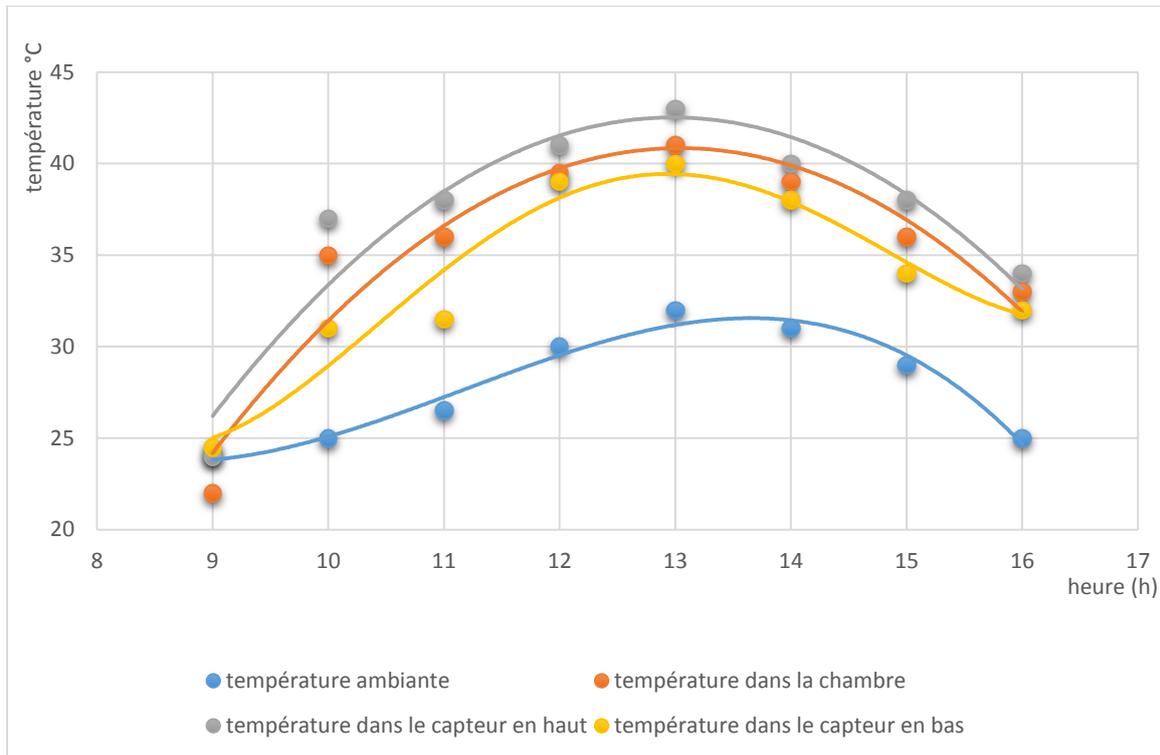


Figure 5.18 : Variation des différentes températures en fonction du temps de la journée 21/06/2021.

Interprétation du résultat

La journée est ensoleillée avec une vitesse du vent de 11km/h, l'humidité est de 63%, notre déshydrateur est orienté vers sud-est, essai avec capteur ouvert (1/3) et porte ouverte.

La température ambiante : varie de 24°C à 32°C, avec une moyenne de 28°C et celle dans la chambre de déshydratation varie de 33°C à 41°C avec une moyenne de 37°C.

D'après le diagramme des températures, nous avons remarqué qu'au début de l'expérience à 9 heures du matin, la température dans la chambre était de 22°C, et celle sur le capteur et le thermocouple qui mesure la température ambiante était de 24°C à 24,5°C. Puis de 10h à 13h, nous avons remarqué que la température ambiante augmentait progressivement de 25°C jusqu'à atteindre 32°C, ce qui provoque une augmentation significative de celle sur le capteur (environ 12°C de marge), cela conduit à une augmentation notable de celle dans la chambre avec une marge d'environ de 9.5°C par rapport à la température ambiante. A partir de 14h, les différentes températures ont commencé à baisser au moment où la température ambiante a commencé à baisser.

Remarque

DT varie entre 7°C à 10°C

DT : c'est la différence entre la température ambiante et celle de la chambre.

On peut voir qu'après avoir fermé la sortie de capteur de (2/3), DT s'est augmenté par rapport à celle des 4 premiers essais.

Comparaison entre la déshydratation à l'air libre et avec capteur

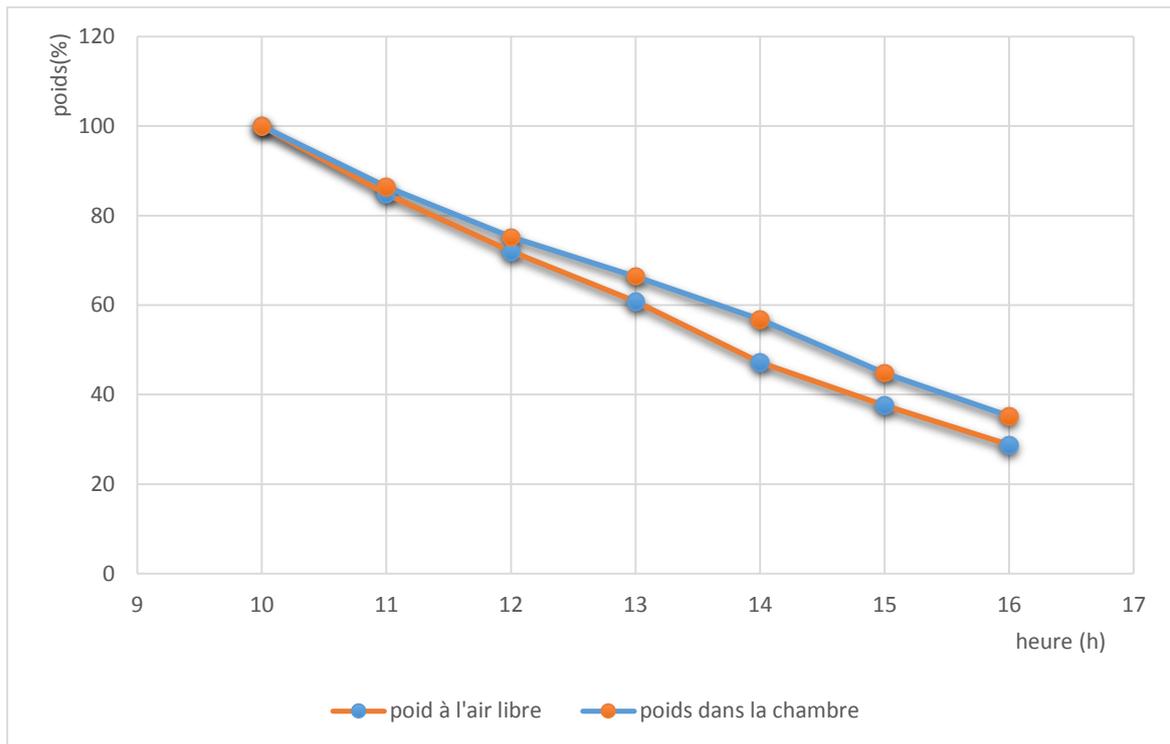


Figure 5.19 : Comparaison entre la diminution de poids à air libre par rapport à la chambre en fonction du temps de la journée 21/06/2021.

Interprétation du résultat

D'après ce diagramme que nous avons obtenu à partir de l'étude comparative entre la tomate mis à l'air libre et celle dans la chambre de déshydratation on remarque que la tomate qu'on a mis à l'extérieur perd 71.2% de son poids, et la celle qu'on a mis à l'intérieur perd 64.8%.

Pour cela nous pouvons conclure que le taux de déshydratation à l'air libre est plus rapide par rapport à notre modèle (la différence est de 6.4%), on constate qu'il y a une amélioration par rapport aux cas précédents.

V.10.2.6 Journée du 29/06/2021 (capteur ouvert (1/3) et chambre redimensionnée porte ouverte)

Heure	09 :00	10 :00	11 :00	12 :00	13 :00	14 :00	15 :00	16 :00
Température ambiante (°C)	25	27	29	29.5	30.5	31	29	28
Température dans la chambre (°C)	22	32.5	34	36	38.5	38	34	33.5
Température dans la partie supérieure du capteur (°C)	25.5	35	37	39	41	42.5	35.5	36
Température dans la partie inférieure du capteur (°C)	25	32	31	35	36	37	30	29.5

Tableau 5.17 : Variation des différentes températures en fonction du temps de la journée (29/06/2021).

Heure(h)	09 :00	10 :00	11 :00	12 :00	13 :00	14 :00	15 :00	16 :00
Poids à l'air libre(g)	/	180	140	90	62	49	37	26
Poids dans la chambre(g)	/	180	143	102	76	63	49	38

Tableau 5.18 : Variation des différents poids en (g) en fonction du temps de déshydratation (29/06/2021).

Heure	09 :00	10 :00	11 :00	12 :00	13 :00	14 :00	15 :00	16 :00
Poids à l'air libre(%)	/	100	77.77	50	34.44	27.22	20.55	14.44
Poids dans la chambre(%)	/	100	79.44	56.66	42.22	35	27.22	21.11

Tableau 5.19 : Variation des différents poids en (g) en fonction du temps de déshydratation (29/06/2021).

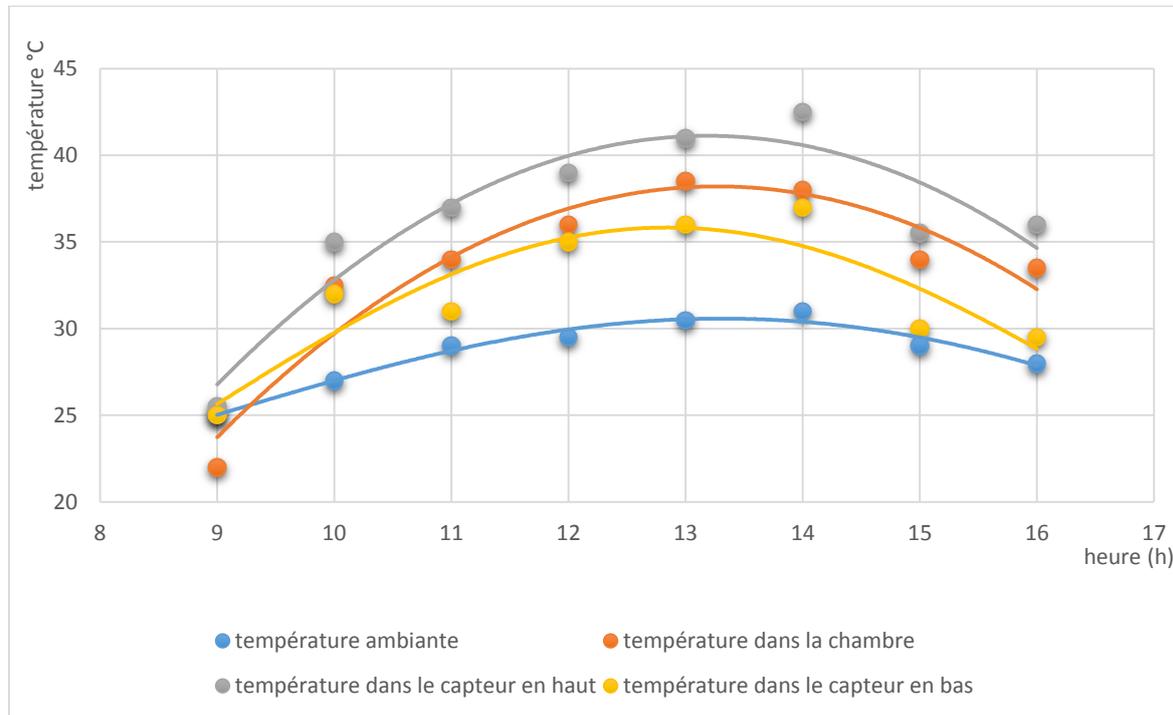


Figure 5.20 : Variation des différentes températures en fonction du temps de la journée 29/06/2021.

Interprétation du résultat

La journée est ensoleillée avec intervalle nuageux avec une vitesse de vent de 18km/h, l'humidité est de 55%, notre déshydrateur est orienté vers sud-est, essai avec capteur ouvert (1/3) avec chambre redimensionnée et porte ouverte.

La température ambiante : varie de 25°C à 31°C, avec une moyenne de 28°C et la température dans la chambre de déshydratation varie de 32.5°C à 38.5°C avec une moyenne de 35.5°C.

D'après le diagramme des températures, nous remarquons que le changement de température au début du test est faible (il est dû à la condition climatique défavorable), mais à partir de 12h elle a commencé à augmenter, où nous avons enregistré un DT important jusqu'à 14h. Ensuite à partir de 15h les différentes températures ont commencé à baisser car la température ambiante à commencer à diminuer.

Remarque

DT varie entre 5.5C° et 8.5C°.

DT : Différence entre la température ambiante et celle de la chambre.

Comparaison entre la déshydratation à l'air libre et avec capteur

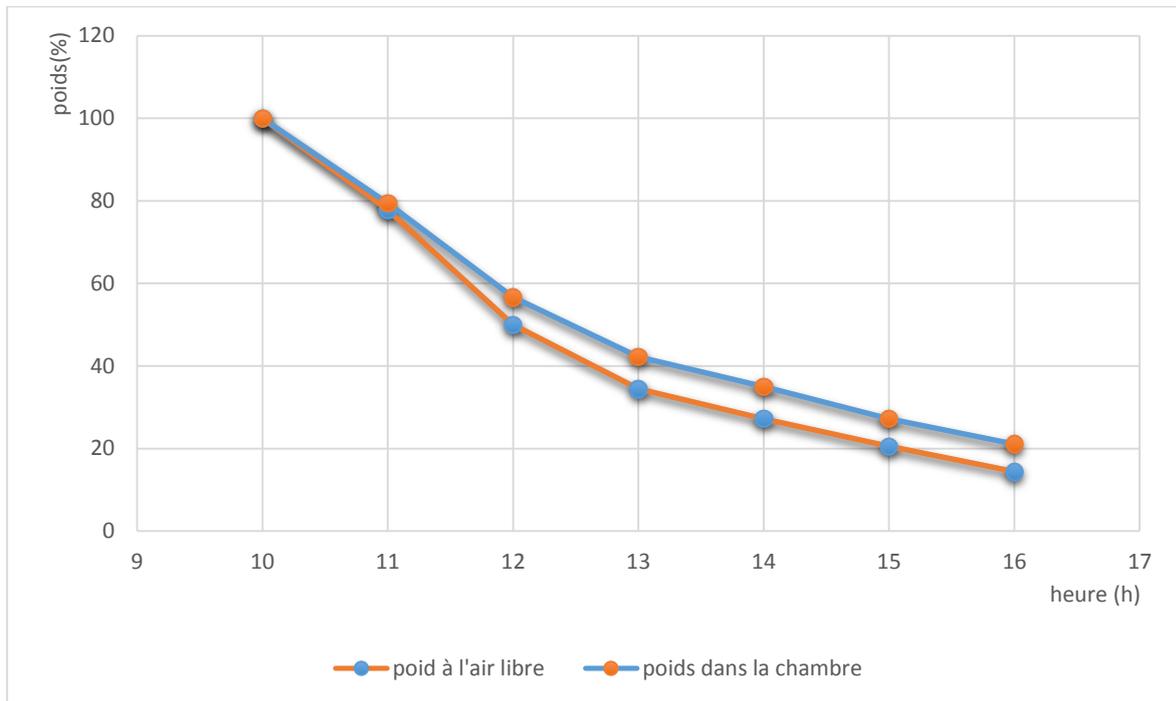


Figure 5.21 : Comparaison entre la diminution de poids à air libre par rapport à la chambre en fonction du temps de la journée 29/06/2021.

Interprétation du résultat

D'après ce diagramme que nous avons obtenu à partir de l'étude comparative entre la tomate mise à l'air libre et celle dans la chambre de déshydratation on remarque que la tomate qu'on a mise à l'extérieur perd 85.56% de son poids, et celle qu'on a mise à l'intérieur perd 78.89%.

Pour cela nous pouvons conclure que le taux de déshydratation à l'air libre est plus rapide par rapport à notre modèle (la différence est de 6.67%), et donc nous pouvons clairement constater qu'il n'existe pas une déférence flagrante par rapport au cas précédent.

V.10.2.7 Journée du 01/07/2021 (capteur ouvert (1/3) et chambre redimensionnée, porte et toit ouvert)

Heure	09 :00	10 :00	11 :00	12 :00	13 :00	14 :00	15 :00	16 :00
Température ambiante (°C)	26	28	30	32	31	34	30	28
Température dans la chambre (°C)	24	32	36.5	40.5	42	43.5	38.5	34
Température dans la partie supérieure du capteur (°C)	26.5	34	38	43	44	46	39	37
Température dans la partie inférieure du capteur (°C)	26	31	35	40	41	42	38	32

Tableau 5.20 : Variation des différentes températures en fonction du temps de la journée (01/07/2021).

Heure(h)	09 :00	10 :00	11 :00	12 :00	13 :00	14 :00	15 :00	16 :00
Poids à l'air libre(g)	/	250	193	165	146	108	76	55
Poids dans la chambre(g)	/	250	206	185	156	116	84	69

Tableau 5.21 : Variation des différentes températures en fonction du temps de déshydratation (01/07/2021).

Heure	09 :00	10 :00	11 :00	12 :00	13 :00	14 :00	15 :00	16 :00
Poids à l'air libre(%)	/	100	82.4	74	62.4	46.4	33.6	27.6
Poids dans la chambre(%)	/	100	77.2	66	58.4	43.2	30.4	22

Tableau 5.22 : variation des différentes températures en fonction du temps de déshydratation (01/07/2021).

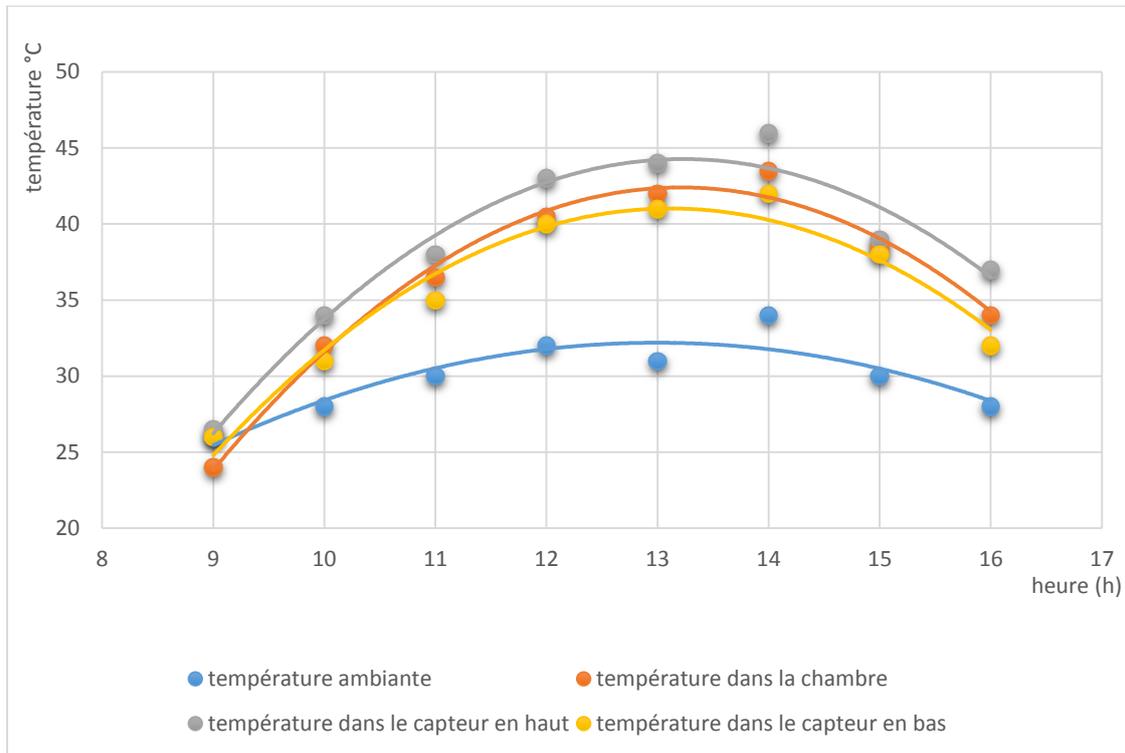


Figure 5.22 : Variation des différentes températures en fonction du temps de la journée 01/07/2021.

Interprétation du résultat

Nous nous sommes rendus compte que la chambre est trop grande par rapport au capteur, pour cela nous avons réduit le volume de la chambre en installant des parois en carton, les dimensions sont passées de (550*700*900 mm) à (350*50*65 mm).

La journée est ensoleillée avec intervalle nuageux une vitesse de vent de 14km/h, l'humidité est de 29%, notre déshydrateur est orienté vers sud-est, essai avec capteur ouvert (1/3) avec chambre redimensionnée avec porte et toit ouverts.

La température ambiante : varie de 26°C à 34°C, avec une moyenne de 30°C et la température dans la chambre de déshydratation varie de 32°C à 43.5°C avec une moyenne de 37.75°C.

D'après le diagramme de température, nous remarquons que de 9h à environ 11h la condition climatique est un peu défavorable, à partir de 12h jusqu'à 14h on remarque un DT important, ensuite à partir de 15h on observe une diminution observable dans l'ensemble des températures.

Remarque

L'élévation de température s'est améliorée, elle est passée d'environ de 6 à 11C°.

DT : Déférence entre la température ambiante et celle de la chambre.

DT meilleur par rapport à tous les essais précédents.

Comparaison entre la déshydratation à l'air libre et avec capteur

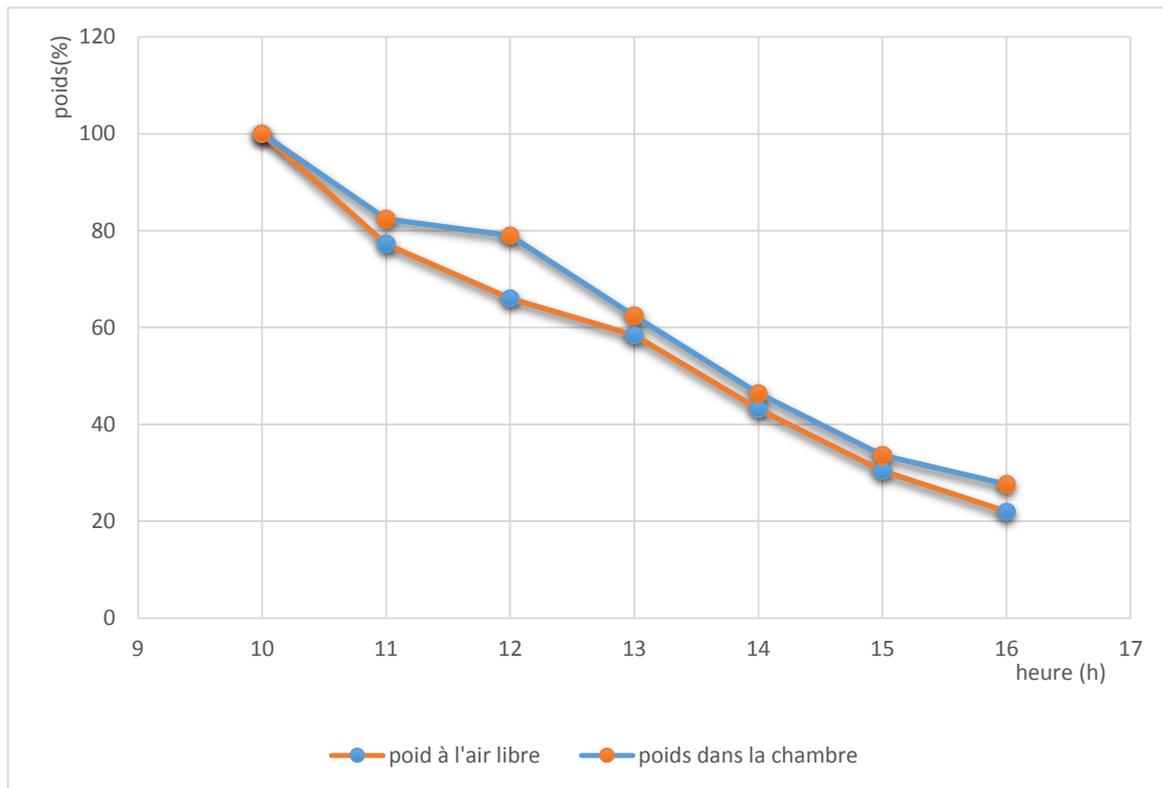


Figure 5.23 : Comparaison entre la diminution de poids à air libre par rapport à la chambre en fonction du temps de la journée 01/07/2021.

Interprétation du résultat

D'après ce diagramme que nous avons obtenu à partir de l'étude comparative entre la tomate mis à l'air libre et celle dans la chambre de déshydratation on remarque que la tomate qu'on a mis à l'extérieur perd 78% de son poids, et la celle qu'on a mis à l'intérieur perd 72.4%.

Pour cela nous pouvons conclure que le taux de déshydratation à l'air libre est plus rapide par rapport à notre modèle (la différence est de 5.6%), on constate que les résultats de ce dernier essai sont meilleurs par rapport aux tests précédents.

V.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit notre déshydrateur solaire notamment ces différentes caractéristiques techniques, et on a exposé l'influence des paramètres de l'air (température, vitesse, humidité) sur la cinétique de déshydratation. Après cela, une autre expérience est menée en parallèle à l'air libre et nous sommes arrivés à la présente conclusion :

- ❖ Déshydratation à l'air libre s'est avérée meilleure à cause des conditions climatiques c'est-à-dire la température ambiante n'est pas élevée alors que la vitesse de vent est importante.
- ❖ Synthèse de ces expériences nous montre qu'il faut réduire le volume de la chambre.
- ❖ Parois de la chambre doivent être démontable (ou mobile) pour permettre une meilleure circulation de l'air.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre étude est portée sur la conception et la réalisation d'un déshydrateur solaire spécifique à la déshydratation des produits agro-alimentaire. La conception attendue est de réaliser des expériences pratiques et d'obtenir des résultats précis.

Pour faire orner notre recherche, nous avons choisi un capteur solaire plan à air couplé à la chambre de déshydratation qui contient des produits agricoles disposés sur des étagères horizontales.

Cette recherche nous amène à étudier les phénomènes physiques qui affectent le fonctionnement des capteurs solaires (conduction, convection et rayonnement) en étudiant et en analysant diverses équations qui contrôlent les échanges thermiques pour les différents composants de déshydrateur solaire.

Après avoir réalisé notre déshydrateur solaire avec capteur plan à air au sein de l'université de Bejaia. Notre expérience était de faire déshydrater les tomates en les coupants en tranche de 10 mm d'épaisseur chacune, où on a déposé deux quantités de la tomate de même poids, une à l'intérieur de déshydrateur solaire et l'autre à l'air libre (exposé directement au soleil). Notre principe expérimental était d'enregistrer la température ambiante, celle en bas, en haut de capteur, et celle dans la chambre de déshydratation, Nous avons également mesuré le poids des tomates chaque heure durant toutes les journées expérimentales. La vitesse du vent et le taux d'humidité sont relevés sur notre station météo Algérie. Ce sont plusieurs tests et différentes méthodes que nous avons utilisé sur notre déshydrateur. Cette expérience nous amène à faire une comparaison entre la déshydratation indirecte et celle traditionnelle en comparant :

- ❖ La durée de déshydratation pour avoir une teneur d'eau finale,
- ❖ La variation de la température.

Sur la base de notre expérience, on a constaté que la vitesse de déshydratation des tomates à l'aide de notre déshydrateur est plus lente que celle déposé à l'air libre, cela est lié aux conditions climatiques de la région de Bejaia c'est-à-dire la température ambiante n'est pas élevée alors que la vitesse de vent est importante. Malheureusement il est à noter que nous ne sommes pas arrivés à étudier l'influence de l'humidité relative de l'air sur l'opération de la déshydratation. Nous avons également constaté que la qualité et la couleur des tomates déshydratées dans notre déshydrateur solaire sont meilleures que celles d'une déshydratation naturelle directement exposée au soleil, la poussière, la pluie, les insectes et le vent.

Conclusion générale

On aurait aimé procéder à d'autres expériences avec paroi de la chambre démontée, malheureusement, les conditions sanitaires, ne nous ont pas permis de le faire.

Nous espérons que d'autres expériences seront menées en vue de meilleure amélioration des paramètres techniques de l'installation.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] HAMIDAT, Abderrahmane. Le solaire thermique en Algérie: Histoire et perspectives. Bulletin des Energies renouvelables, 2012, no 22.
- [2] E Cheroual. Cours 5^{ème} année pharmacie, Université de Sétif, 2019/2020.
- [3] MAHIEDDINE, Boumendjel. Conservation des denrées alimentaires, Centre universitaire d'El-Tarf, 2005.
- [4] <http://docplayer.fr/40193042-les-methodes-de-conservation-du-xixe-siecle-a-nos-jours-ppcp-pb-rest.html>, Consulté le (16/05/2021)
- [5] ELMNASSER, Noura, GUILLOU, Sandrine, LEROI, Françoise, et al. Pulsed-light system as a novel food decontamination technology: a review. Canadian journal of microbiology, 2007, vol. 53, no 7, p. 813-821.
- [6] MONTEL, Marie-Christine, BÉRANGER, Claude, et BONNEMAIRE, Joseph. Les fermentations au service des produits de terroir, Editions Quae, 2005.
- [7] <http://genie-alimentaire.com/spip.php?mot6>, Consulté le (18/05/2021)
- [8] <https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/Publications/Vie-pratique/Fiches-pratiques/Conservation-des-aliments>, Consulté le (18/05/2021)
- [9] https://www.biolineaires.com/conservation_les_procedes_utilisant_le_sel_le_sucre_et_l_huile/, Consulté le (18/05/2021)
- [10] Brigitte Maas-van Berkel, Brigiet van den Boogaard et Corlien Heijnen. La conservation du poisson et de la viande, Première édition en français, 1994.
- [11] Vasseur J. Principes et calculs d'appareils Séchage convectif par air chaud INSA de Lyon, 2008.
- [12] [http://www.b2bplast.fr/sechage/#:~:text=S%C3%A9cheur%20m%C3%A9canique%20\(Laveur%20centrifuge20](http://www.b2bplast.fr/sechage/#:~:text=S%C3%A9cheur%20m%C3%A9canique%20(Laveur%20centrifuge20), Consulté le (26/05/2021)
- [13] <https://tice.acmontpellier.fr/ABCDORGA/Famille/SECHAGE.htm>, Consulté le (26/05/2021)
- [14] Djerroud, D. « Modélisation markovienne du séchage continu par contact avec agitation », Thèse de doctorat. Toulouse, 2010.
- [15] <https://www.ecoconso.be/fr/content/comment-faire-secher-ses-fruits-et-legumes-pour-les-conserver>, Consulté le (26/05/2021)
- [16] David bolmont et Michel fouchard. Le guide du bois et ses dérivés, Édition afnor, 2010.
- [17] D L Proctor. Techniques d'emmagasiner des grains, Edition Rome FAO, 1995.
- [18] Nasri M. « Faisabilité et adaptation des séchoirs solaires sous le climat local », Thèse de doctorat, université de Constantine, 2018.
- [19] <https://www.deshyrateur.com/les-alternatives/sechoir-solaire/>, Consulté le (29/05/2021)
- [20] Pierre Henri Communay. Hélio-thermique, le gisement solaire, méthode et calculs, Edition Saubens, 2002.

Bibliographie

- [21] Madhlope S, A Jones et D Kalenga Saka. A solar air heater with composite absorber systems for food dehydration. *Renewable Energy*, 2001. PP, 27-37.
- [22] LAHSASNI, Siham, KOUHILA, Mohammed, MAHROUZ, Mostafa, et al. Thin layer convective solar drying and mathematical modeling of prickly pear peel (*Opuntia ficus indica*). *Energy*, 2004, vol. 29, no 2, p. 211-224.
- [23] Miloud Lahbari, Hocine Benmoussa, Mohamed Bait, Rabie Belhani et Djamel Fahloul. Conception et Réalisation d'un séchoir solaire indirect, 5ème Séminaire Maghrébin sur les Sciences et les Technologies du Séchage. Ouargla, Algérie, du 22 au 24 Novembre, 2015.
- [24] SIMATE, I. N. Optimization of mixed-mode and indirect-mode natural convection solar dryers. *Renewable energy*, 2003, vol. 28, no 3, p. 435-453.
- [25] ADLANE F et MOHAMED F. « Etude numérique d'un séchoir solaire à effet de serre ». Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2021
- [26] Philippe Dudez, André Thémelin et Max Reynes. Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes, Editions du GRET, 1996.
- [27] https://fr.wikipedia.org/wiki/Climat_en_Alg%C3%A9rie, Consulté le (14/06/2021)
- [28] https://lenergie-solaire.net/D%C3%A9finitions/Le_rayonnement_solaire, Consulté le (14/06/2021)
- [29] Bernard Thonon et Philippe Malbranche. Questions de physique autour de l'énergie solaire. Séminaire « Questions de Sciences », 2012.
- [30] T, Ismail. « Etude, réalisation et simulation d'un capteur solaire ». Thèse doctorat, Université de Constantine, 2015.
- [31] DE NEYER, Paul. Energie solaire thermique. Guide des Energies Renouvelables, 2003.
- [32] Abbaz. « Optimisation des paramètres de fonctionnement d'un plancher solaire direct ». Mémoire de Master, Université de Constantine 1, 2013
- [33] AISSAOUI, Werida et SOUIADIA, Habiba. « Etude expérimentale d'un capteur solaire plan à air ». Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2019
- [34] Chalal, N. « Etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect ». Magister en génie climatique, Université de Constantine, 2007.
- [35] Merrah M. « Conception d'un capteur solaire plan (Métal-Polymère) ». Mémoire de Master, M'sila, 2013.
- [36] Aghilas B. « Etude de performances d'un capteur solaire plan à eau ». Mémoire de Master, Ecole de Lorraine et Cder de Bouzaréah, 2016.
- [37] Jannot Y. Cours transferts thermiques 2ème année. Écoles des Mines Nancy, 2008.
- [38] Mohamed El Amine SLIMANI, Madjid AMIRAT et Sofiane BAHRIA. Etude et modélisation thermoélectrique d'un capteur hybride pv/t a air, Sciences & Technologie B – N°44, Décembre 2016, pp 63-68
- [39] DUFFIE John A et BECKMAN William A. Solar engineering of thermal processes. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison. New York, 1980.

Bibliographie

- [40] D Semmar, S Betrouni et D Lafri, Etude et Réalisation d'un Capteur Solaire à Air, Rev. Energ. Ren. Physique Energétique 1998, pp, 63-68.
- [41] M Goudjal et Yacine, « Séchage solaire du raisin, variété sultanine ». Thèse de Magister, institut nationale agronomique, Alger, 2004-2005
- [42] B TOUATI. « Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte ». Thèse Doctorat, Université de Tlemcen et L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon Ecole Doctorale M.E.G.A, 2008
- [43] http://moodle.univmedea.dz/pluginfile.php/42384/mod_resource/content/1/co/chapitre2_4.html, Consulté le (23/06/2021)