

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

**FACULTE DE TECHNOLOGIE DEPARTEMENT
DE GENIE MECANIQUE**

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Faculté : Génie mécanique

Spécialité : ELECTOMECHANIQUE

THEME :

Réalisation d'un séchoir électrique active

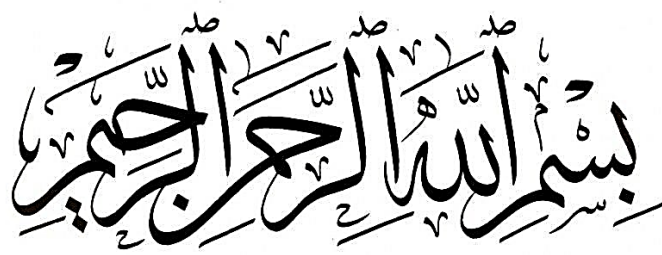
Encadré par:

– **Dr. LAOUNI Abdeldjalil**

Présenté par :

- **NAOUI Abdessattar**
- **MESSAI Ahmed Yakoub**
- **GHODBANE Fares**
- **LABIDI Abdelmonem**

2021/2022



Dédicaces

Je dédie ce travail :

- ✚ A mon cher père et ma chère mère.*
- ✚ A mes chers frères et sœurs.*
- ✚ A toute ma famille.*
- ✚ A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.*

NAOUI Abdessattar.

Remerciements

Nous remercions tout d'abord Dieu, de nous avoir donné l'effort et la patience pour que nous puissions aller jusqu'au bout afin que ce travail puisse être réalisé.

Nous remercions Mr LAOUNI Abdeljalil, Enseignant à l'université Hamma Lakhdar ELOUED, et notre encadreur. Qui nous a donné l'opportunité de travailler avec lui, car son expérience et ses conseils ont sans doute été nécessaires pour guider ce travail pendant la période de recherche

Nous remercions Mr ZINE ALI, Enseignant à l'université Hamma Lakhdar ELOUED, Puisque les expériences n'auraient pas pu être réalisées sans ses conseils, Nous apprécions avec gratitude ses efforts et ses conseils pour nous.

Remerciements particuliers aux titulaires du Master, promotion 2021/2022 et collègues dans le domaine de l'électromécanique.

Merci

Résumé :

Le but de ce travail est de concevoir et de construire une sécheuse électrique. Ce séchoir électrique est conçu pour être une solution alternative au séchoir solaire, qui souffre de certains inconvénients, notamment l'instabilité de la température, des nuages et du vent. Il contient principalement un élément chauffant, un capteur de température et un ventilateur. La plupart des travaux réalisés concernent la construction proprement dite du séchoir électrique, ainsi que la modélisation et le contrôle du processus thermique au moyen d'un circuit de commande électrique comprenant une carte ARDUINO. La construction du séchoir électrique est axée sur le dimensionnement et la sélection de ses composants, ainsi que sur la conception du circuit électrique permettant de contrôler les différents éléments du séchoir. Des expériences particulières ont également été menées sur certains végétaux à différentes températures pour en déterminer la cinétique. De séchage et de déterminer un modèle mathématique qui les décrit.

Mots clés : séchoir électrique, carte ARDUINO, capteur de température, capteur d'humidité, capteur de poids.

Abstract:

The purpose of this work is to design and build an electric dryer. This electric dryer is designed to be an alternative to the solar dryer, which has some drawbacks, including temperature instability, clouds and wind. It mainly contains a heating element, a temperature sensor and a fan. Most of the work carried out involves the actual construction of the electric dryer, and the modeling and control of the thermal process by means of an electrical control circuit that includes an ARDUINO card. The construction of the electric dryer is focused on the sizing and selection of its components, as well as the design of the electrical circuit to control the different elements of the dryer. Special experiments were also conducted on some vegetables at different temperatures to determine the kinetics of drying and to determine a mathematical model that describes them.

Keywords: electric dryer, ARDUINO board, temperature sensor, humidity sensor, weight sensor.

ملخص:

الغرض من هذا العمل هو تصميم وبناء مجفف كهربائي. تم تصميم هذا المجفف الكهربائي ليكون حلاً بديلاً للمجفف الشمسي الذي تعترضه بعض العيوب نذكر منها عدم استقرار درجة الحرارة والسحب والرياح. تحتوي بشكل أساسي على عنصر العملية تسخين ومستشعر درجة حرارة ومروحة. يتضمن معظم العمل الذي تم تنفيذه البناء الفعلي للمجفف الكهربائي، ونمذجة. يتركز بناء المجفف الكهربائي على تحجيم واختيار arduino عن طريق دائرة تحكم كهربائية تتضمن بطاقة الحرارة والتحكم فيها المواد المكونة له وكذلك تصميم الدائرة الكهربائية للتحكم في العناصر المختلفة للمجفف.. كما تم إجراء تجارب خاصة على بعض الخضروات ودرجات حرارة مختلفة لتحديد حركية التجفيف وتحديد نموذج رياضي يصفها.

الكلمات المفتاحية : مجفف كهربائي، لوحة ARDUINO، مستشعر درجة الحرارة، مستشعر

الرطوبة، مستشعر الوزن.

Table des matières

<i>Dédicaces</i>	i
<i>Remerciements</i>	ii
Résumé :	iii
Abstract:	iii
:ملخص	iii
INTRODUCTION GENERALE	1
INTRODUCTION GENERALE	2
CHAPITR 01 : Généralités sur le séchage et les séchoirs	3
I.1 Séchage	4
I.1.1. Introduction:.....	4
I.1.2. Historique :	4
I.1.3. Habitudes de séchage en Algérie :	4
I.1.4. L'importance du séchage :	5
I.1.5. Le principe de séchage :	5
1 1 ^{er} étape:.....	5
2 2 ^{ème} étape	6
3 3 ^{ème} étape	6
I.1.6. Domaine d'utilisation :	6
1 Industrie agroalimentaire:	6
2 Industrie papetière:.....	6
3 Industrie du bois:	6
I.1.7. Mécanisme de séchage :	7
I.1.8. Terminologie de séchage :	7
1 Humidité :.....	7
2 Taux d'humidité :.....	7
3 États de siccité :	7
4 Taux d'humidité à l'équilibre :.....	8
5 Corps hygroscopique :	8
I.1.9. Mode de séchage :	8
1 Séchage à l'air libre :.....	8
2 Séchage au soleil :.....	9
3 Séchage à l'ombre et sous abri :	9
4 Séchage par l'air chaud :.....	9
5 Séchage aux micro-ondes :.....	9
6 Séchage au four.....	10

I.1.10.	But de séchage :	10
I.1.11.	Avantages du séchage.....	11
1.	Méthode simple et généralement bon rendement	11
2.	La durée de conservation des aliments déshydratés peut être de plusieurs mois. ...	11
3.	Inactivation des enzymes responsables de la dégradation des aliments.	11
4.	La croissance des micro-organismes est inhibée en raison de la réduction de l'activité de l'eau.....	11
I.1.12.	Inconvénient du séchage.....	11
I.1.13.	Conclusion :	11
I.2	Les Séchoirs.....	12
I.2.1.	Introduction.....	12
I.2.2.	LES DEFERENTES TYPES DE SECHOIRS :.....	12
1	LES SECHOIRS SOLAIRES :.....	13
a)	Les séchoirs solaires directs :	15
▪	Type de séchoirs directs :	16
b)	Les séchoirs solaires indirects :	18
▪	Type du séchoir indirect	20
2	SECHOIRS NATURELS (TRADITIONNELS) :	23
3	LES SECHOIRS HYBRIDES :	24
a)	Séchoir hybride à convection forcée :	25
b)	Le séchoir hybride solaire – gaz :	26
4	LES SECHOIRS INDUSTRIELS :	28
➤	DIFFERENTES TYPES DE SECHOIRS INDUSTRIELS :	28
a)	Séchoir à lit fluidise:	28
b)	Séchoir à pulvérisation :	29
c)	Séchoir à flot :	31
d)	Séchoirs à lots :	33
e)	Séchoirs rotatifs :	33
I.2.3.	Conclusion :	34
CHAPITRE02 : Présentation et réalisation du séchoir électrique		35
II.1.	Introduction :	36
II.2.	Procédure de fabrication des éléments sécheurs :	36
II.2.1.	Montage du coffret :	36
II.2.1.1.	La chambre de séchage (le caisson):	36
II.2.1.2.	Un panier :	37
II.2.1.3.	La tuyère:	37
II.2.2.	Le ventilateur:	38
II.2.3.	La résistance chauffante :	38
II.3.	Réalisation des circuits électriques :	39
II.3.1.	La boîte de commande :	39
II.3.2.	Arduino :	40
II.3.2.1.	Définition du module Arduino :	40
II.3.2.2.	Pourquoi Arduino UNO ?	40
II.3.2.3.	Les différents types de l'Arduino : [34]	41
II.3.2.4.	Description générale :	44
II.3.3.	2 Module relais :	49

II.3.4.	Afficheur LCD :	50
II.3.5.	Capteur de T° et d'humidité DHT22 :	51
II.3.6.	Capteur de force avec convertisseur HX711 :	52
II.3.7.	Elément chauffant (résistance électrique) :	54
II.3.8.	Ventilateur :	55
II.3.9.	Le montage global :	56
CHAPITRE 03 : Expérimentations et résultats		57
III.1.	Introduction :	58
III.2.	Généralité sur le persil:	58
III.3.	Description et caractérisation du dispositif expérimental:	59
III.3.1.	Dispositif expérimental :	59
III.3.2.	Mise en route :	59
III.3.3.	Procédure expérimentale :	60
III.3.4.	Paramètres réglables du séchoir :	60
III.3.5.	Paramètres mesurables du séchoir :	61
III.4.	Interprétation des résultats :	61
III.4.1.	variation de la teneur moyenne en eau:	62
III.4.2.	Variation de la vitesse de séchage:	63
III.5.	Conclusion :	65
Conclusion générale.....		66
Conclusion générale.....		67
Référence:		68

Liste des figures

CHAPTER 01 : Généralités sur le séchage et les séchoirs

FIGURE. I. 1: FEMME ALGERIENNE FAITES LE PROCESSUS DE SECHAGE.....	5
FIGURE. I. 2: REPRESENTATION THEORIQUE DU PROCESSUS DE SECHAGE THERMIQUE D'UN MATERIAU ALIMENTAIRE SOLIDE (SABAREZ, 2018).....	7
FIGURE. I. 3: CLASSIFICATION DES SECHOIRS.....	12
FIGURE. I. 4:LES DEFERENTS TYPES DE SECHOIRS SOLAIRES	13
FIGURE. I. 5: DIFFERENTS TYPES DE SECHOIRS	14
FIGURE. I. 6:LE SECHOIR SOLAIRE COFFRE.....	16
FIGURE. I. 7: LE SECHOIR SOLAIRE INTEGRAL.....	17
FIGURE. I. 8: LE SECHOIR SOLAIRE COQUILLAGE A TROIS CLAIES	17
FIGURE. I. 9:LE SECHOIR SOLAIRE CABANE.....	18
FIGURE. I. 10: SECHOIR SOLAIRE INDIRECT.....	19
FIGURE. I. 11: SECHOIR SOLAIRE INDIRECT.....	19
FIGURE. I. 12: SECHOIR SOLAIRE ARMOIRE.....	20
FIGURE. I. 13 :SCHEMA DESCRIPTIVE D'UN SECHOIR MIXTE.....	21
FIGURE. I. 14 :SECHOIR SOLAIRE A CIRCULATION NATURELLE-TYPE 1.....	21
FIGURE. I. 15::SECHOIR SOLAIRE A CIRCULATION NATURELLE-TYPE 2-.....	22
FIGURE. I. 16: SECHAGE NATUREL OU AU SOLEIL.....	23
FIGURE. I. 17:SOLAIRE HYBRIDE A CONVECTION FORCEE.....	25
FIGURE. I. 18:SECHOIR SOLAIRE HYBRIDE SOLAIRE-GAZ.....	26
FIGURE. I. 21:SECHOIR SOLAIRE A CIRCULATION NATURELLE-TYPE 2-.....	27
FIGURE. I. 22: APPAREILLAGE UTILISE DANS LE SECHOIR A LIT FLUIDISE (ZHANYONG LI ET AL. 2002).	29
FIGURE. I. 23: SCHEMA SU SECHOIR A PULVERISATION (STRUMILLO ET AL. 1986, PP. 353).	30
FIGURE. I. 24: SCHEMA DU SECHOIR A FLOT (STRUMILLO ET AL. 1986, PP. 330)	32
FIGURE. I. 25: SCHEMA D'UN SECHOIR A LOTS (CHARREAU ET AL. 1991).....	33
FIGURE. I. 26: SCHEMA D'UN SECHOIR ROTATIF (CHARREAU ET AL. 1991).....	34

CHAPTER 02 : Présentation et réalisation du séchoir électrique

FIGURE. II. 1:IMAGE DE CHAMBRE DE SECHAGE.	36
FIGURE. II. 2:IMAGE DE PANIER.....	37
FIGURE. II. 3:IMAGE DE LA TUYERE.	37
FIGURE. II. 4:EXTRACTEUR DE L' AIR [33]	38
FIGURE. II. 5: RESISTANCE CHAUFFANTE.....	38
FIGURE. II. 6:IMAGE DE LA BOITE DE COMMANDE.	39
FIGURE. II. 7:ARDUINO NANO	41
FIGURE. II. 8: LILYOAP ARDUINO	42
FIGURE. II. 9: ARDUINO BLUETOOTH (BT).	42
FIGURE. II. 10:ARDUINO MEGA.	42
FIGURE. II. 11:ARDUINO UNO.....	43
FIGURE. II. 12:ARDUINO ETHERNET.	43
FIGURE. II. 13:ARDUINO LEONARDO.	44
FIGURE. II. 14:ARDUINODUE.	44
FIGURE. II. 15: LA CARTE ARDUINO UNO	45
FIGURE. II. 16: SCHEMA SIMPLIFIE DE LA CARTE ARDUINO UNO.....	46
FIGURE. II. 17:BROCHAGE DE LA CARTE ARDUINO UNO.[44]	48
FIGURE. II. 18: 2 MODULE RELAIS .[46].....	49
FIGURE. II. 19: CABLAGE 2RELAY MODUL AVEC ARDUINO [47].....	49
FIGURE. II. 20:IMAGE DE AFFICHEUR LCD.[48].....	50
FIGURE. II. 21:CABLAGE D'ARDUINO AVEC AFFICHEUR LCD.	50
FIGURE. II. 22:CAPTEUR DE T° ET D'HUMIDITE DHT22[49].....	51
FIGURE. II. 23:CABLAGE CAPTEUR DHT22 AVEC ARDUINO[50].....	51
FIGURE. II. 24:CAPTEUR DE FORCE 20KG.	52
FIGURE. II. 25: CONVERTISSEUR A/N(HX711).	52
FIGURE. II. 26: CABLAGE CAPTEUR DE FORCE ET CONVERTISSEUR AVEC ARDUINO	54
FIGURE. II. 27:CABLAGE DE RESISTANCE AVEC ARDUINO.	54
FIGURE. II. 28:CABLAGE DE VENTILATEUR AVEC ARDUINO.....	55
FIGURE. II. 29: SCHEMA DU CIRCUIT DE SIMULATION(PROTES)	56

CHAPTER 03 : Expérimentations et résultats

FIGURE. III. 1 :PERSIL.	58
FIGURE. III. 2: TABLEAU PARAMETRES DE SECHAGE.	58
FIGURE. III. 3:DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE SECHAGE.....	59
FIGURE. III. 4: PERSIL :AU DEBUT ET A LA FIN DE L'OPERATION.	62
FIGURE. III. 5:VARIATION DE TENEUR EN EAU EN FONCTION DE TEMPS (40C°).....	62
FIGURE. III. 6:VARIATION DE TENEUR EN EAU EN FONCTION DE TEMPS (60C°).....	63
FIGURE. III. 7:VARIATION DE LA VITESSE DE SECHAGE AU COURS DE TENEUR EN EAU(40C°).....	63
FIGURE. III. 8:VARIATION DE LA VITESSE DE SECHAGE AU COURS DE TENEUR EN EAU(60C°).....	64

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le monde moderne assiste à un cycle de transformation technologique et d'innovation pour améliorer le niveau de vie, comme la détérioration des produits agricoles qui inquiète les agriculteurs et les consommateurs[1]. On estime que les pertes post-récolte de produits agricoles se produisent dans le monde entre 10 et 40 %. Ces pertes sont plus élevées dans les pays en développement. Pour réduire ces pertes, nous devons utiliser différentes techniques telles que le séchage électrique, car c'est un moyen efficace de conserver les aliments et de prévenir les bactéries et les levures en éliminant l'eau.

Par conséquent, aujourd'hui, notre pays semble relever le défi de développer une technologie de séchage de plus en plus efficace. Cet ouvrage fait partie de la série intitulée : "Conception et construction de séchoirs électriques". Il s'agira de spécifier, concevoir et construire un tel séchoir.

Ce mémoire contient trois chapitres:

- Le chapitre I: Fournit des informations générales sur les séchoirs et les séchoirs et leur fonctionnement.
- Le chapitre II : est consacré à la présentation et réalisation de séchoir électrique
- Le chapitre III : Expérimentations et résultats.

CHAPITR 01 :

Généralités sur le

séchage et les

séchoirs

I.1 Séchage

I.1.1. Introduction:

Le séchage est une opération qui consiste à réduire l'activité du produit liquide à un seuil d'inhibition des réactions enzymatiques et oxydatives, ainsi que de la croissance des micro-organismes.

Le séchage est l'un des processus les plus importants dans la conservation de nombreux aliments, et c'est souvent la dernière étape de la fabrication du produit (généralement après l'évaporation). C'est un procédé de séparation thermique qui consiste à retirer tout ou partie du liquide que l'on boit, dit "humide", pour faire évaporer ce solvant. Le produit final est dit « sec » même s'il contient de l'humidité résiduelle.[2, 3]

I.1.2. Historique :

Le séchage est une technique très ancienne utilisée pour conserver les produits agricoles et les produits alimentaires (céréales, graines, fourrages, viandes et poissons séchés, jambon, figes, noix, tabac, etc.), ou pour produire des matériaux (adobe sec, céramique, poterie cuite), Bois, etc.) Avant production, ou pour les textiles (lavage, teinture, etc.) et le cuir. Pour ces applications traditionnelles, le séchage dit "naturel" de l'air ambiant est encore largement utilisé, séchage dit "artificiel" de l'apport d'énergie, qui n'est qu'une technique complémentaire permettant une plus grande régularité face au danger. Conditions climatiques, ou proposer de nouveaux services (lait en poudre ou café dit "instantané", pâtes stabilité de conservation, etc.). [4]

I.1.3. Habitudes de séchage en Algérie :

Le séchage des produits agricoles est l'une des applications potentielles les plus importantes dans la région algérienne. Les agriculteurs et les citoyens sèchent leurs récoltes sur des tapis, pavés ou sur le terrain, les exposant ainsi au soleil en les répandant en couches minces. Cependant l'expérience de l'Algérie dans l'étude du séchage solaire est récente et limitée au séchage de fruits, de légumes, de plantes médicinales et aromatique.



Figure. I. 1: Femme algérienne fait le processus de séchage.

Le but du séchage est de réduire la teneur en eau des aliments à une valeur résiduelle qui inhibe la croissance de tous les micro-organismes. Cette valeur permet de stocker le produit dans des conditions ambiantes.

I.1.4. L'importance du séchage :

Le séchage est l'un des principaux moyens de conservation des denrées périssables. En effet, en éliminant l'humidité, l'action des micro-organismes (levures, moisissures, bactéries) responsables de la pourriture est inhibée. C'est aussi une étape nécessaire pour congeler certains produits, car l'élimination de l'humidité réduit leur poids et leur volume. En conclusion, le séchage améliore la conservation des produits, facilite le transport des produits, réduit le risque de perte de produit après récolte, et surtout élargit la commercialisation de ces produits en les rendant disponibles toute l'année .[5]

I.1.5. Le principe de séchage :

Le séchage implique deux types de transfert : le transfert d'énergie thermique, du milieu vers le liquide à évaporer, et le transfert de masse, de l'intérieur du solide vers sa surface puis vers la phase gazeuse. La vitesse de séchage est directement liée à ces deux transferts.[6, 7].

Le séchage peut être décomposé en 3 phases :

1 1^{er} étape:

La vitesse de séchage est constante et le liquide sur la surface solide est évaporé. Pour cette étape, seules les conditions extérieures (surface de contact, pression partielle du liquide, température, volatilité du liquide) ont un impact significatif. Le transfert de chaleur se produit entre la phase gazeuse et la surface liquide, tandis que le transfert de masse se produit de la même manière, mais dans des directions opposées.

2 2^{ème} étape

La vitesse diminue avec le temps à mesure que la quantité de liquide a diminué au point où des zones sèches apparaissent sur la surface solide. En raison du transfert de masse et de chaleur à travers l'interface gaz-liquide, et à mesure que celle-ci diminue, la vitesse diminue proportionnellement.

3 3^{ème} étape

La vitesse de séchage diminue encore avec le temps car la surface du solide est sèche et le liquide doit migrer de l'intérieur du solide vers sa surface. La chaleur est conduite à travers la surface du solide et du solide au liquide situé dans le vide. La force motrice limitant est généralement la conduction thermique à travers le solide.

I.1.6. Domaine d'utilisation :

Le séchage industriel est aujourd'hui très répandu dans les industries chimiques ou des matériaux. Cette technologie a de multiples usages dans la vie quotidienne des pays en développement [4] :

1 Industrie agroalimentaire:

La plupart de nos consommables sont séchés. On constate que cette dernière est une étape nécessaire à la production et à la conservation des produits alimentaires [7], tels que : les légumes et fruits secs (figues, raisins), les pâtes, certains produits en poudre (cacao, lait, café...) et donc céréales, thé, conservation de types d'épices...

2 Industrie papetière:

Le papier est obtenu en séchant la pâte sur des rouleaux rotatifs chauffés [4].

3 Industrie du bois:

Le bois fraîchement abattu et scié contient un degré d'humidité élevé et ne peut donc pas être utilisé immédiatement dans de bonnes conditions, sinon il sera affecté par les changements de taille et de forme du bois.[4].

I.1.7. Mécanisme de séchage :

Le phénomène de transport qui se produit lors du séchage thermique des matières alimentaires solides est illustré à la (Figure 1). Dans le séchage à l'air convectif des matières alimentaires, deux mécanismes de transport différents se produisent simultanément, notamment le transfert de chaleur de la zone de séchage vers la matière alimentaire et le transfert d'eau (sous forme liquide ou vapeur) de l'intérieur du produit solide vers celle-ci. surface, et s'écoule finalement dans l'air par évaporation.[8]

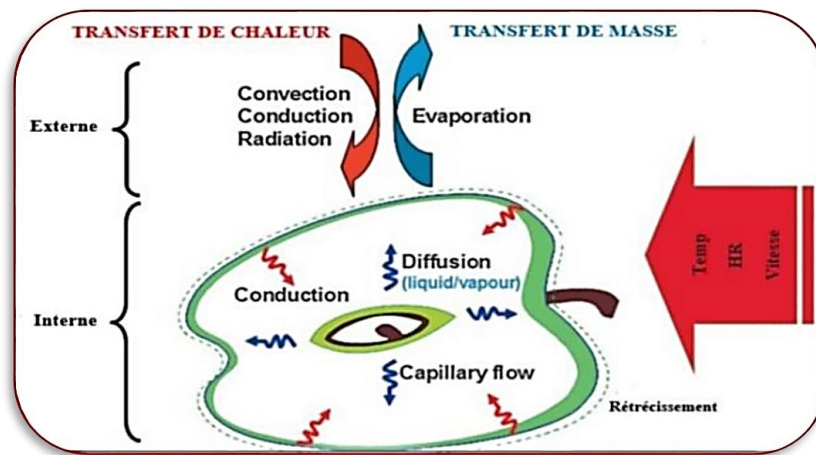


Figure. I. 2: Représentation théorique du processus de séchage thermique d'un matériau alimentaire solide (Sabarez, 2018).

I.1.8. Terminologie de séchage :

1 Humidité :

Le terme désigne des liquides contenus dans des solides, des liquides ou des pâtes et qui doivent être éliminés lors du séchage.

2 Taux d'humidité :

C'est la masse de liquide par unité de masse du matériau à sécher. Bien que l'on fasse souvent référence à des matériaux humides, la teneur en humidité par rapport aux matériaux anhydres est préférée.

3 États de siccité :

Un objet anhydre est un objet sans humidité.

L'objet sec ou séché correspond plus généralement au produit, tel qu'il est obtenu à la sortie du séchoir.

Dans ce dernier cas, le taux d'humidité n'est pas nécessairement nul.

4 Taux d'humidité à l'équilibre :

Un objet humide est placé dans une enceinte volumineuse à humidité relative et température constantes, dont le taux d'humidité est stabilisé à une valeur dite d'équilibre, qui dépend de la nature de l'humidité et du produit qui l'imprègne, mais aussi de la pression partielle et la température.

5 Corps hygroscopique :

Un produit est dit hygroscopique lorsque la pression de vapeur de l'humidité contenue dans le produit est inférieure à la pression de vapeur de l'humidité considérée comme pure et à la même température que le produit, c'est-à-dire inférieure à la pression de vapeur de la vapeur saturée.

Lorsque la pression de vapeur (P_{vp}) dégagée par le produit est inférieure à la pression de vapeur saturante (P_{vs}), le produit est entré dans le domaine de l'hygroscopicité, et une partie de son eau "eau liée" est fixée par la substance. Plus la teneur en eau du produit est faible, plus la pression de vapeur qu'il émet est faible et plus l'activité de l'eau (a_w) est faible.

On définit l'activité de l'eau dans le corps humide (a_w) par la relation suivante :

$$A_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} \quad (1)$$

Pour le séchage, quelle que soit la teneur en humidité du produit et l'activité de l'eau, l'humidité relative de l'air (Φ) doit toujours être inférieure à l'eau active ($\Phi < a_w$) de sorte que $P_{vp} > P_v$ (pression de vapeur d'air dans l'enceinte). [9].

1.1.9. Mode de séchage :

Il existe plusieurs façons de sécher ou de conserver les plantes. Certaines plantes conviennent à une ou plusieurs méthodes de séchage et doivent être testées selon les méthodes et les variétés disponibles.

1 Séchage à l'air libre :

Le séchage à l'air est la méthode la plus courante et la plus simple.

2 Séchage au soleil :

Méthode économique, elle est utilisée dans les pays aux climats chauds et aux médicaments peu vulnérables. Elle a des inconvénients : la lumière UV peut agir photo-chimiquement et altérer certains principes actifs. De plus, cette méthode n'est pas adaptée aux médicaments contenant des principes actifs volatils.

3 Séchage à l'ombre et sous abri :

Les plantes sont étalées sur des supports ou suspendues en grappes dans un hangar ou un séchoir bien ventilé. Cette méthode est longue et encore manuelle.

4 Séchage par l'air chaud :

C'est la procédure la plus courante car elle a l'avantage d'être rapide et permet d'opérer dans des conditions bien définies, variables d'un médicament à l'autre. Habituellement, le séchage doit être fait. Parmi les autres procédés utilisés : on peut citer le séchage sous vide :

Chaud, peu de gens pratiquent.

A froid, il s'agit de lyophilisation ou lyophilisation : c'est le séchage par sublimation directe de l'eau des plantes préalablement congelées. Intéressant est la souche antibiotique, qui est chère et produit des résultats irréguliers sur les plantes médicinales.

5 Séchage aux micro-ondes :

Le moyen le plus rapide de sécher les légumes est aux micro-ondes. Cependant, il est préférable de faire des tests préliminaires pour déterminer le temps de séchage exact.

1. Placez les légumes sur quatre serviettes en papier aux micro-ondes. Couvrir avec deux autres serviettes.

2. Micro-ondes les légumes pendant 1 minute.

3. Vérifiez la sécheresse.

4. Feuilles 2 à 5 minutes, pétales 2 à 3 minutes. Une fois le processus développé, le temps de séchage est enregistré pour référence.

6 Séchage au four

Le séchage des plantes dans un four chaud utilise presque la même technique que le séchage par micro-ondes.

1. Placer les légumes sur une plaque à pâtisserie.
2. Réglez le four à basse température. Mettez la plaque dans le four avec la porte du four entrouverte.

Surveillez régulièrement les plantes. Le séchage peut prendre de quelques minutes à quelques heures, selon la plante choisie[10].

I.1.10. But de séchage :

- L'utilisation du séchage dans les industries agroalimentaire a de multiples buts .Prolonger la durée de conservation des produits (viande, poisson, fruits, graines, pâtes, épices, thé, champignons)[11].
- Fabrication d'ingrédients ou d'additifs pour la transformation secondaire, également appelés aliments intermédiaires, tels que les légumes pour les soupes, les oignons pour les plats cuisinés, les fruits pour la pâtisserie, les épaississants, les arômes et les colorants [12].
- Inhiber de l'activité des microorganismes, des enzymes ou des ferments de la matière[13].
- Diminuer la masse et le volume des aliments pour réduire leurs encombrements et faciliter leurs **emballages et transports**[14].
- Réduire les coûts de conditionnement, de stockage, de manipulation et de transport, prolonger la disponibilité en dehors des saisons et fournit un éventail de produits pour les consommateurs[15].
- Inhiber d'une part les enzymes responsables de la dégradation des poly phénols telles que, le poly-phénol oxydases et d'autre part il empêche la prolifération bactérienne. [16]
- Transformer les aliments en une forme plus facile à stocker, emballer, transporter et utiliser, comme la conversion de liquides tels que le lait ou les extraits de café en poudres sèches (produits instantanés) qui peuvent être reconstitués en ajoutant de l'eau [17].
- Fournir des aliments idéaux tels que différentes saveurs et textures, etc. Créer un nouvel aliment (par exemple, des raisins aux raisins secs).[17] .

I.1.11. Avantages du séchage

- 1.** Méthode simple et généralement bon rendement
- 2.** La durée de conservation des aliments déshydratés peut être de plusieurs mois.
- 3.** Inactivation des enzymes responsables de la dégradation des aliments.
- 4.** La croissance des micro-organismes est inhibée en raison de la réduction de l'activité de l'eau.

I.1.12. Inconvénient du séchage

Comme tout traitement thermique, le séchage entraîne notamment des pertes d'arômes, de vitamines et de pigments, des réactions de brunissement, un durcissement superficiel, des modifications irréversibles de la texture et de la capacité de réhydratation, des pertes de constituants volatils, des modifications de la répartition de l'humidité dans le produit. le séchage présente moins d'inconvénients que d'autres procédés de conservation (mise en conserve, congélation ou traitement aseptique).

I.1.13. Conclusion :

Ce chapitre a permis de mener une étude approfondie sur le séchage, ses propriétés, ses domaines d'utilisation, et son rôle dans la conservation des aliments.

I.2 Les Séchoirs

I.2.1. Introduction

Il existe de nombreux types de séchoirs et ils sont classés de différentes manières selon le point de vue adopté, par exemple, la texture du produit peut être retenue comme norme (tableau 2-1), elle détermine son traitement et la manière dont il assure sa compatibilité avec le chauffage Contact air sec sur les surfaces.

Produits	Séchoirs
Pompa blés (liquide, pâtes, fluides, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • A dispersion • A billes • A cylindre chauffants
Pâteux	<ul style="list-style-type: none"> • A cylindres chauffants • A bandes...
Pulvérulents susceptibles d'être émiétés (morceaux de légumes, pulpes, céréales, luzerne, amidon etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • A tapis • A cylindre rotatifs • A descente par gravité • A lit fluidisé • A transfert pneumatique
En morceaux de l'ordre du cm (fruits, légumes, saucissons, fromage, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Discontinue • A claies • A chariots

Figure. I. 3: Classification des séchoirs

I.2.2. LES DEFERENTES TYPES DE SECHOIRS :

- Les séchoirs solaires :
- Séchoirs naturels (traditionnels)
- Les séchoirs hybrides
- Les séchoirs mixtes
- Les séchoirs industriels.

1 LES SECHOIRS SOLAIRES :

Les séchoirs solaires sont généralement divisés en plusieurs catégories selon le mode de chauffage ou le mode de fonctionnement [18]:

- Les séchoirs solaires directs.
- Les séchoirs solaires indirects.
- Les séchoirs solaires hybrides.
- Les séchoirs solaires mixtes.

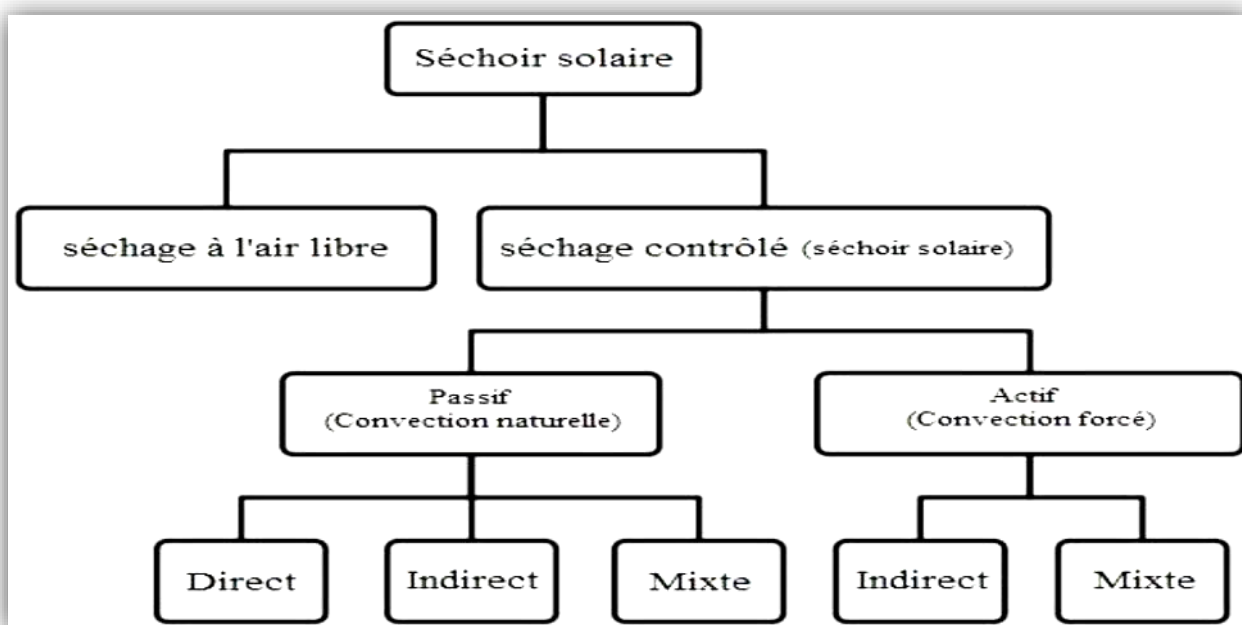


Figure. I. 4:Les différents types de séchoirs solaires

➤ **DIFFERENTES TYPES DE SECHOIRS SOLAIRE :**

D'une manière générale, les systèmes de séchage solaire sont divisés en deux catégories selon leur mode de chauffage et leur consommation d'énergie solaire, à savoir :

- Systèmes de séchage solaires actifs (souvent appelés séchoirs hybrides).
- Systèmes de séchage solaire passif (souvent appelés séchoirs solaires, avec circulation naturelle de l'air de séchage).

Selon le type de séchoir et la façon dont l'énergie solaire est utilisée, trois sous-classes différentes peuvent être identifiées pour les deux systèmes de séchage (actif et passif), à savoir [19]:

- ✓ Les séchoirs solaires de type direct,
- ✓ Les séchoirs solaires de type indirect,
- ✓ Les séchoirs solaires de mode mixte.

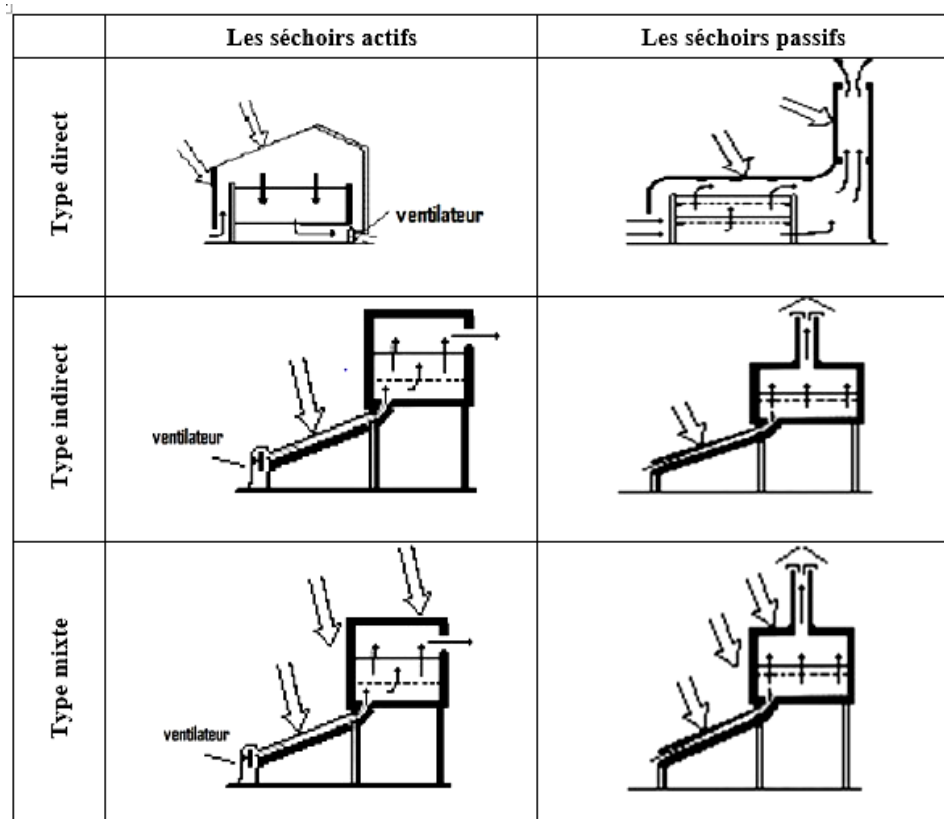


Figure. I. 5: Différents types de séchoirs

a) Les séchoirs solaires directs :

Les séchoirs solaires directs sont des appareils simples à utiliser et à construire. Ils offrent un large éventail de possibilités de conception : des séchoirs à caissons avec plateaux adaptés aux petits lots aux séchoirs à cabines pouvant traiter de gros volumes[20].

• Principe de fonctionnement :

Les rayons du soleil frappent directement le produit. Les séchoirs solaires directs sont constitués d'une seule pièce qui agit à la fois comme chambre de séchage et comme capteur solaire.

Le fond de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter l'absorption de chaleur, et une feuille de plastique transparent ou de polyéthylène est généralement utilisée pour le toit, mais d'autres matériaux plus coûteux tels que le verre ou des plastiques spéciaux (polyéthylène agricole) peuvent également être utilisés.

Avantage :

- Meilleure protection contre la poussière, les insectes, les animaux et la pluie que le séchage conventionnel.
- Ne nécessite pas de main-d'œuvre qualifiée.
- Possibilités de conception exceptionnelles.

Inconvénients :

- Détérioration due à la lumière directe du soleil, dommages aux vitamines A et C, flétrissement, décoloration [21] .
- Le matériau en polyéthylène est fragile et doit être remplacé régulièrement.
- Des températures relativement élevées à l'intérieur du séchoir, combinées à l'exposition au soleil, peuvent entraîner la destruction des nutriments [22] .
- Faible débit d'air, ce qui limite la vitesse de séchage et augmente les risques moles.

- **Type de séchoirs directs :**

- ❖ **La boîte de séchage ou séchoir coffre**

Les séchoirs à caissons sont de simples séchoirs faciles à fabriquer par des artisans, en utilisant des matériaux disponibles localement, généralement pour la conservation des fruits, des légumes, du poisson et de la viande.[23].

Dans un sèche-boîte, l'air entre par des trous dans le fond de la boîte (Figure 3.1) et sort par des trous situés dans la partie supérieure de chaque côté. Le fond et les parois du caisson sont peints en noir pour mieux capter le rayonnement solaire. Des panneaux en plastique ou en verre sont utilisés comme toit et des portes sur le panneau arrière peuvent réguler la température.

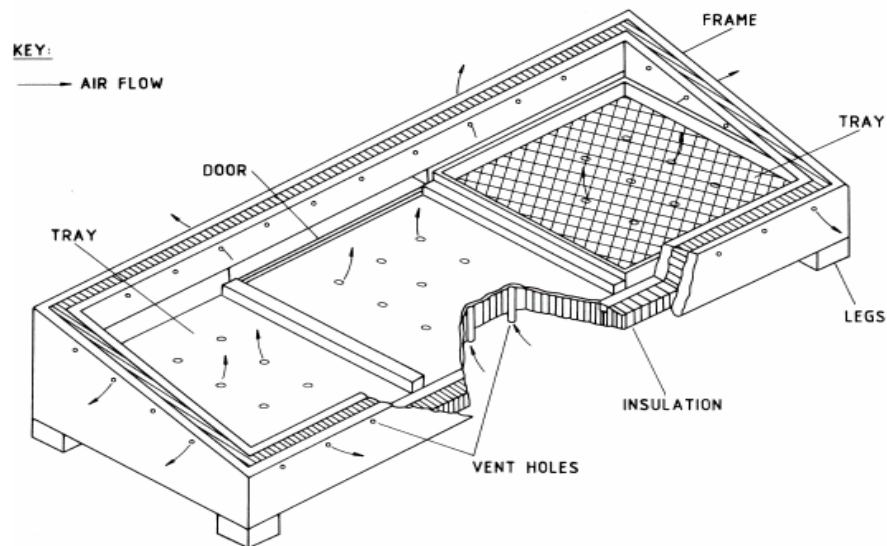


Figure. I. 6:Le séchoir solaire coffre

- ❖ **Le séchoir intégral à convection naturelle**

Un séchoir tout-en-un (Fig. 1.4) est un séchoir direct dans lequel le produit est placé dans une chambre de séchage à parois transparentes et le rayonnement solaire est dirigé sur le produit. L'exposition directe au rayonnement solaire augmente la maturité de la couleur appropriée des fruits verts et permet la dégradation de la chlorophylle dans les tissus[24].

Pour certaines variétés de raisins et de dattes, l'exposition aux radiations est considérée comme nécessaire pour le développement de la couleur souhaitée du produit séché. [24].

Le séchoir est équipé par une cheminée solaire qui peut être utilisée pour augmenter la force de flottabilité imposée au courant d'air et donc fournir un flux important d'air et une vitesse de séchage plus grande.

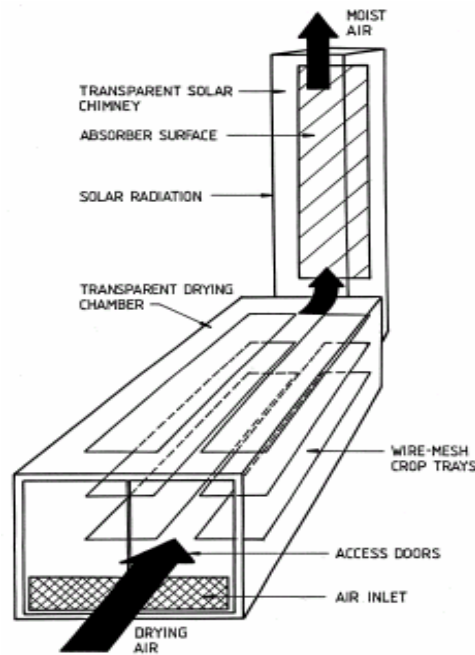


Figure. I. 7: Le séchoir solaire intégral.

❖ **Le séchoir solaire "coquillage"**

Le séchoir coquillage est un séchoir solaire direct à convection naturelle pour usage propre et vente locale. Principalement utilisé par les familles, les coopératives et les groupes de femmes.

Ce type de séchoir est constitué de deux cônes métalliques reliés par des charnières, les panneaux peints en noir assurent une bonne captation du rayonnement solaire, et les panneaux supérieur et inférieur sont perforés pour permettre la circulation de l'air. L'efficacité du séchoir dépend des conditions climatiques.

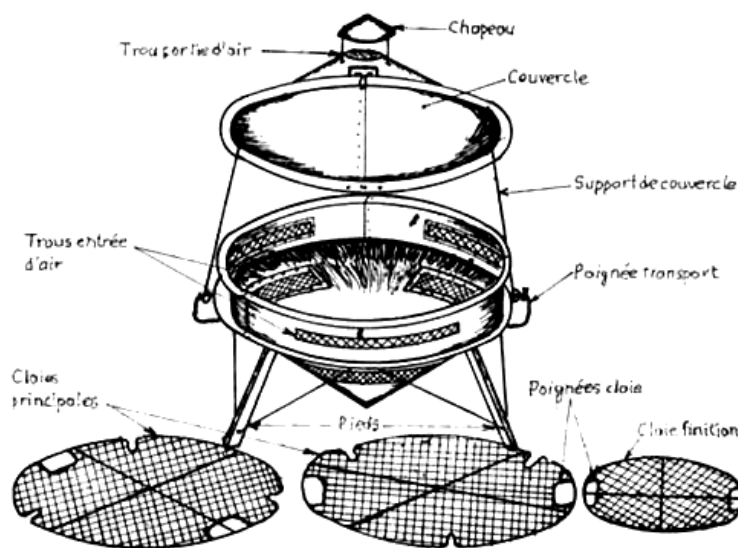


Figure. I. 8: Le séchoir solaire coquillage à trois cloies

❖ **Le séchoir cabane**

Le séchoir cabane dispose d'une capacité de traitement de 35 kg de produit frais avec une surface de 7 m² [25]. Les produits sont placés dans des séchoirs sur des claies surélevées du sol. Une toile plastique capte l'énergie solaire, une porte permet d'entrer dans la tente et de remplir les étagères, et la partie supérieure est équipée d'une sortie d'air. Les caractéristiques de ce séchoir sont un bon effet insectifuge, un équipement amovible en saison des pluies, une construction et un fonctionnement simples, les inconvénients de ce séchoir sont : le coût est assez élevé, il a besoin d'une grande surface en polyéthylène et d'une résistance au vent, de sorte que si l'emplacement Choisit mal, ces modèles sont fragiles.[25].

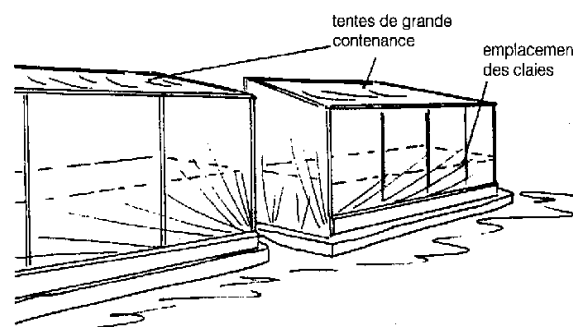


Figure. I. 9:Le séchoir solaire cabane.

b) Les séchoirs solaires indirects :

Les aliments à sécher ne doivent pas être exposés à la lumière directe du soleil. Selon l'importance de la quantité à sécher, ils sont disposés dans des enceintes ou sur des étagères dans le local.

L'air frais entre dans la chambre de séchage après avoir traversé un capteur d'air ou autre préchauffeur, qui le chauffe en fonction du débit utilisé.

Le séchage solaire indirect permet de sécher les fruits et les plantes au soleil sans que les rayons du soleil n'atteignent directement ce qui est séché, préservant ainsi la couleur, le goût et les propriétés (vitamines, nutriments) du fruit ou de la plante.

Dans ce cas, le séchoir se compose de deux parties.

- Un composant composé de capteurs solaires pour le préchauffage de l'air de séchage.
- Forme la deuxième partie de la chambre de séchage

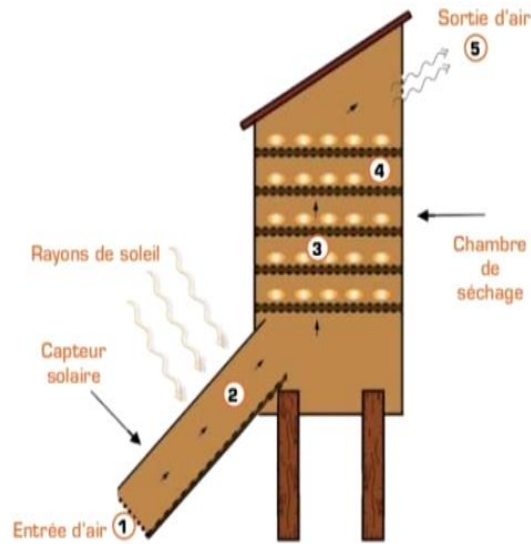
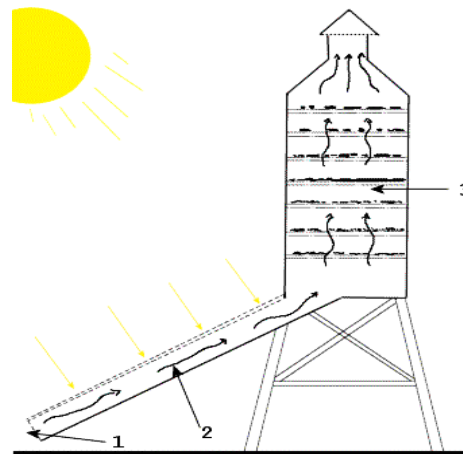


Figure. I. 10: Séchoir solaire indirect.

• **Principe de fonctionnement :**

Un séchoir solaire indirect comprend les éléments suivants : un collecteur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur, une chambre de séchage contenant le produit et une cheminée. L'air pénètre dans le capteur, il est chauffé et sa température augmente. L'air chaud monte dans la chambre de séchage par convection naturelle. Le temps de séchage varie selon les conditions climatiques.[25].



1. Entrée d'air
2. Partie exposée aux rayons du soleil, sous une vitre.
3. Claie.
4. Cheminée.

Figure. I. 11: Séchoir solaire indirect.

Avantage :

- N'exposez pas le produit à la lumière directe du soleil. Il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritive (en particulier les vitamines A et C).
- Ce type de séchoir peut être fabriqué localement à moindre coût[26].
- Ils n'ont pas besoin d'électricité ou de combustibles fossiles pour fonctionner [27].

Inconvénient :

- La vitesse de séchage est très variable selon les conditions climatiques et la conception du séchoir.
- Le matériau en polyéthylène est fragile et doit être remplacé régulièrement.

- **Type du séchoir indirect**

- ❖ **Le séchoir armoire :**

Le collecteur capte l'énergie solaire. L'air chaud monte dans la chambre de séchage et les produits sont placés sur des étagères empilées.

Un sèche-linge (Figure 3.6) se compose d'un capteur solaire avec un intérieur noirci et d'une chambre de séchage contenant des étagères empilées. Les collecteurs sont recouverts de feuilles de plastique translucide qui assurent la production d'air chaud. La chambre de séchage protège le produit des rayons du soleil tout en conservant sa qualité.

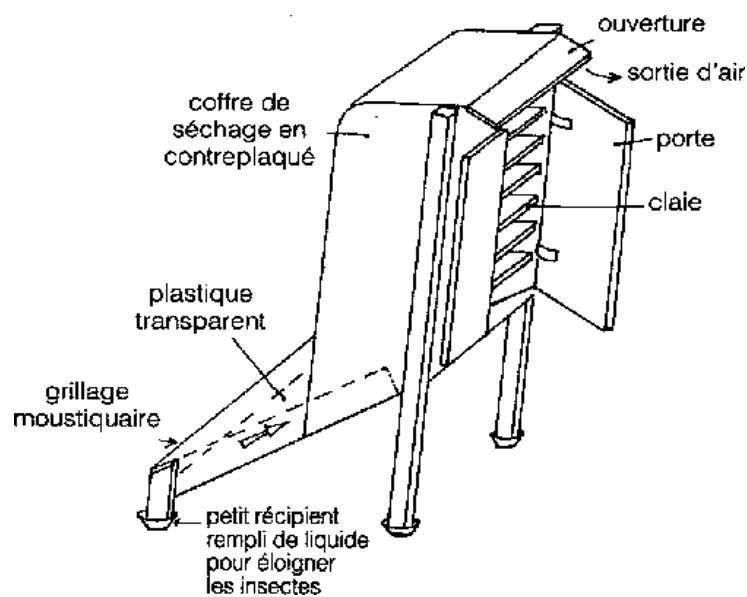


Figure. I. 12: séchoir solaire armoire.

❖ Les séchoirs solaires mixtes

Ces sécheurs combinent les caractéristiques des sécheurs directs et indirects. Dans ce type de séchoir, l'effet combiné du rayonnement solaire direct sur le produit à sécher et le capteur solaire est de fournir la chaleur nécessaire au processus de séchage.

Les séchoirs hybrides à circulation naturelle (Fig. I.14) ont la même configuration structurelle que les séchoirs indirects (capteurs solaires, chambre de séchage et cheminée), mais avec des panneaux de verre sur les murs afin que le rayonnement solaire frappe directement le produit comme une pièce monobloc. sècheuse[24].

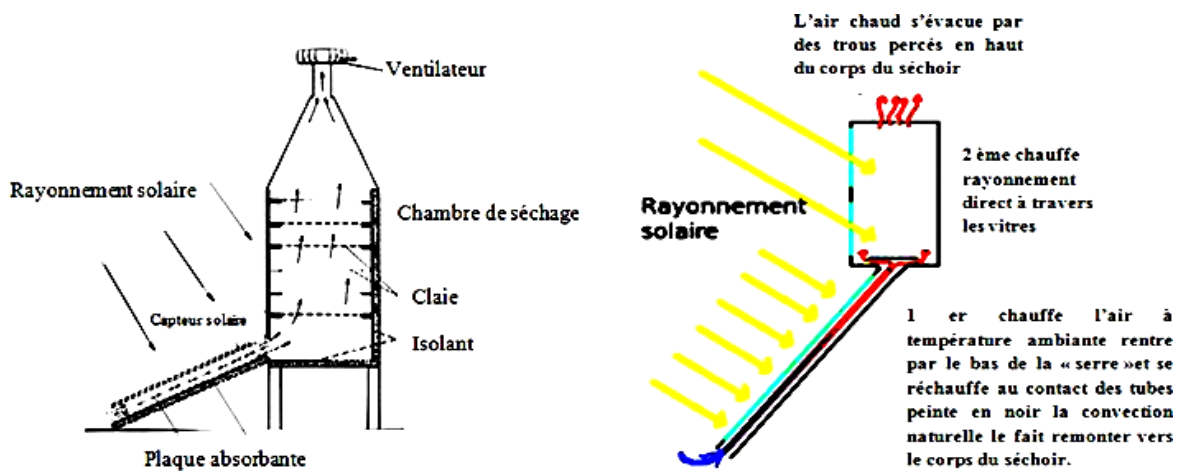


Figure. I. 13 :Schéma descriptive d'un séchoir mixte.

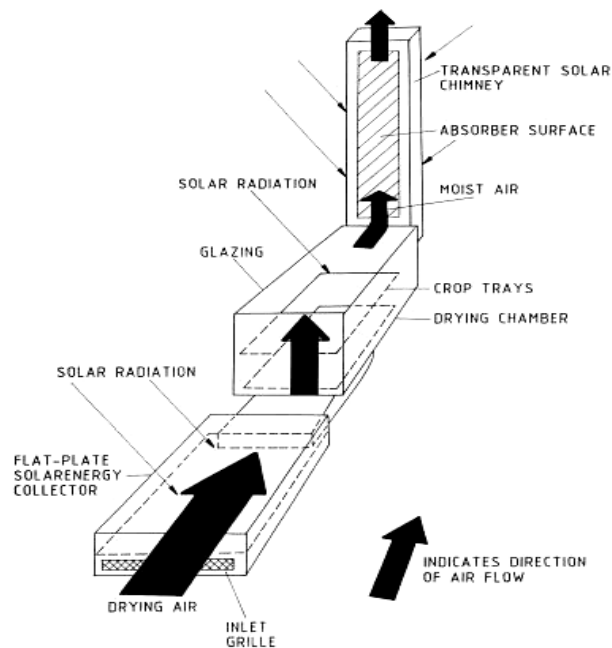


Figure. I. 14 :Séchoir solaire à circulation naturelle-type 1

Une autre conception (Figure I.15) consiste en un collecteur d'air et une cheminée en granit (utilisée comme absorbeur d'énergie et stockage) recouverte de feuilles de verre. La chambre de séchage contient trois étagères empilées, les murs sont en contreplaqué et la surface supérieure est recouverte de verre. La cheminée solaire est de forme cylindrique et en tôle galvanisée avec un capuchon métallique pour la protection contre la pluie[24].

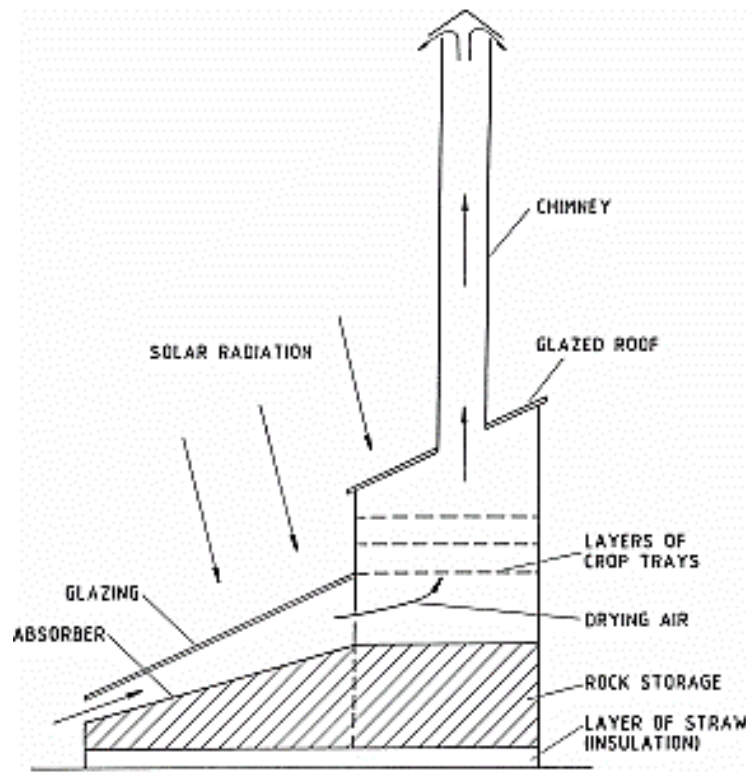


Figure. I. 15::Séchoir solaire à circulation naturelle-type 2-

2 SECHOIRS NATURELS (TRADITIONNELS) :

Le séchage naturel est le séchage direct, et c'est la méthode la plus ancienne et la plus simple à l'air libre. Ils utilisent directement le soleil et l'air, et leurs effets ne sont ni particulièrement favorisés ni contrôlés. Le produit est distribué sur une étagère ou un coussin, dans un berceau ou à même le sol. L'orientation de la crèche est perpendiculaire au vent dominant. Ces séchoirs sont très peu coûteux, mais nécessitent une intervention humaine régulière et constante : protéger ou récupérer le produit en cas de pluie, mélanger fréquemment pour éviter la surchauffe des couches supérieures, et homogénéiser le produit pour sécher les couches inférieures. Ce type de séchoir est souvent traditionnel dans les communautés paysannes pour faire face au stockage temporaire des produits en attente de vente ou de consommation.

Cependant, il présente des inconvénients :

- Perte de produit fortement séché ou avarié.
- Pendant le processus de séchage, l'exposition directe au soleil peut détruire les vitamines A et C,
- Dégradation due aux intempéries et aux ravageurs (insectes, rats, poussière). Par exemple, le séchage du poisson sur le sable peut entraîner jusqu'à 50 % de pertes dues au développement larvaire.
- Temps de séchage long.
- Une humidité précise n'est pas possible.
- Attaque de champignons et d'insectes (ex. bois).
- Toutes ces raisons poussent les professionnels à se tourner vers le séchage manuel.

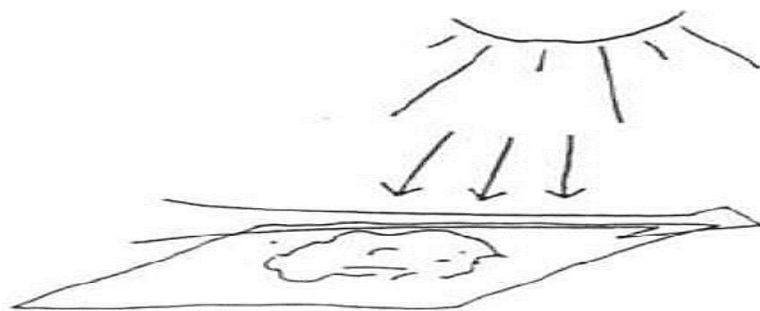


Figure. I. 16: Séchage naturel ou au soleil.

3 LES SECHOIRS HYBRIDES :

La recherche porte sur les séchoirs hybrides qui consomment de l'énergie supplémentaire : fioul, électricité, bois, gaz naturel... L'apport d'énergie supplémentaire peut être situé à deux endroits différents dans le séchoir[25]:

- Utilisez des brûleurs à gaz, une résistance électrique, du bois de chauffage pour maintenir une température constante dans la sécheuse. Dans ce cas, l'énergie solaire devient secondaire, elle préchauffe juste l'air.

- Les ventilateurs électriques augmentent la circulation de l'air, l'énergie solaire reste une source de chaleur, mais le séchoir a plus de puissance d'évaporation grâce à une meilleure ventilation.

Avantage :

- Affranchissement lié aux conditions météorologiques.
- Meilleur contrôle du séchage [28]
- Par rapport à d'autres types de séchoirs solaires, le rendement est fortement augmenté car l'unité peut fonctionner la nuit ou pendant la saison des pluies si nécessaire.

Inconvénients :

- Coûts de production et d'investissement élevés.
- Nécessite un approvisionnement local en carburant, électricité, pièces de rechange.
- Personnel d'entretien qualifié.

➤ **DIFFERENTES TYPES DES SECHOIRS HYBRIDES :**

a) **Séchoir hybride à convection forcée :**

• **Principe de fonctionnement :**

Le toit du bâtiment sert de capteur, et les ventilateurs assurent une circulation d'air importante, permettant au produit de sécher très rapidement.

• **Description technique :**

L'air est aspiré de l'intérieur du bâtiment par des ventilateurs et passe à travers des capteurs solaires sur le toit du bâtiment. L'air chauffé entre dans la chambre de séchage et les fruits sont placés sur des étagères empilées.

Avantage :

- Séchoir très performant.
- Facilement aménageable dans un bâtiment

Inconvénients :

- Nécessité de grandes quantités de fruits régulièrement sur l'année pour être rentable.

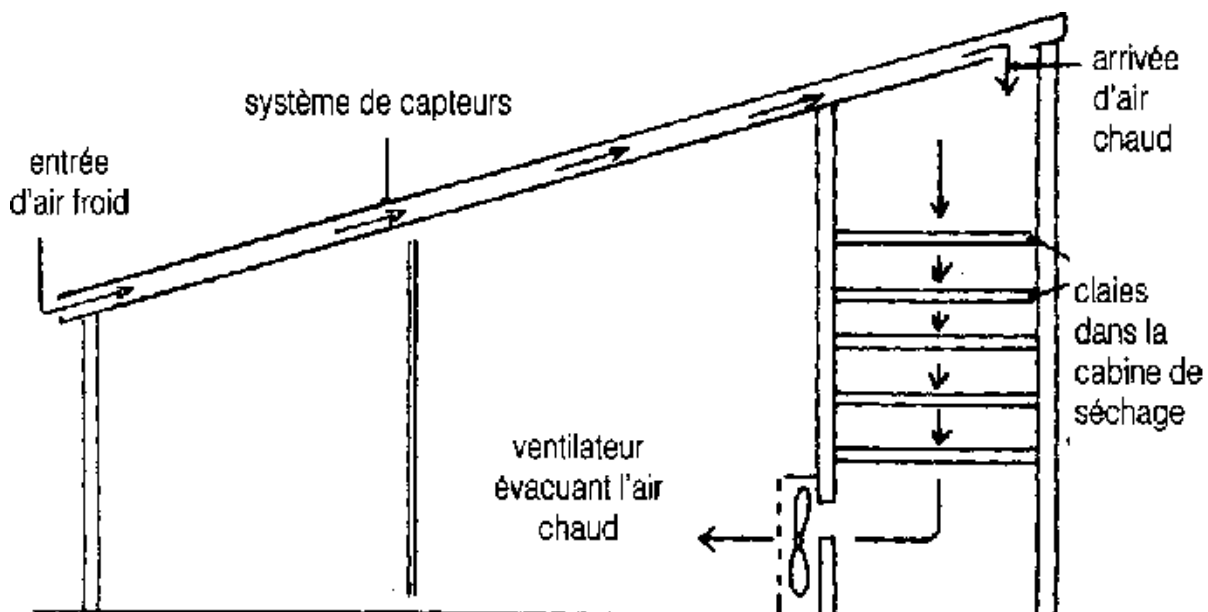


Figure. I. 17:solaire hybride à convection forcée.

b) Le séchoir hybride solaire – gaz :**• Principe de fonctionnement :**

Des capteurs solaires permettent de préchauffer l'air. Si la température est insuffisante, allumez le brûleur à gaz pour obtenir la température désirée. Par conséquent, le produit sèche quelles que soient les conditions climatiques.

• Description technique :

La circulation de l'air s'effectue par convection naturelle du capteur solaire vers l'armoire. Quelles que soient les conditions climatiques, le brûleur à gaz atteint la température nécessaire pour sécher correctement le produit.

Avantage :

- a. Séchage rapide et d'excellente qualité.
- b. Contrôle de température.
- c. Très grande productivité.

Inconvénient :

- a. Coût très élevé de l'investissement
- b. Nécessité d'avoir un marché important pour pouvoir écouler les produits.

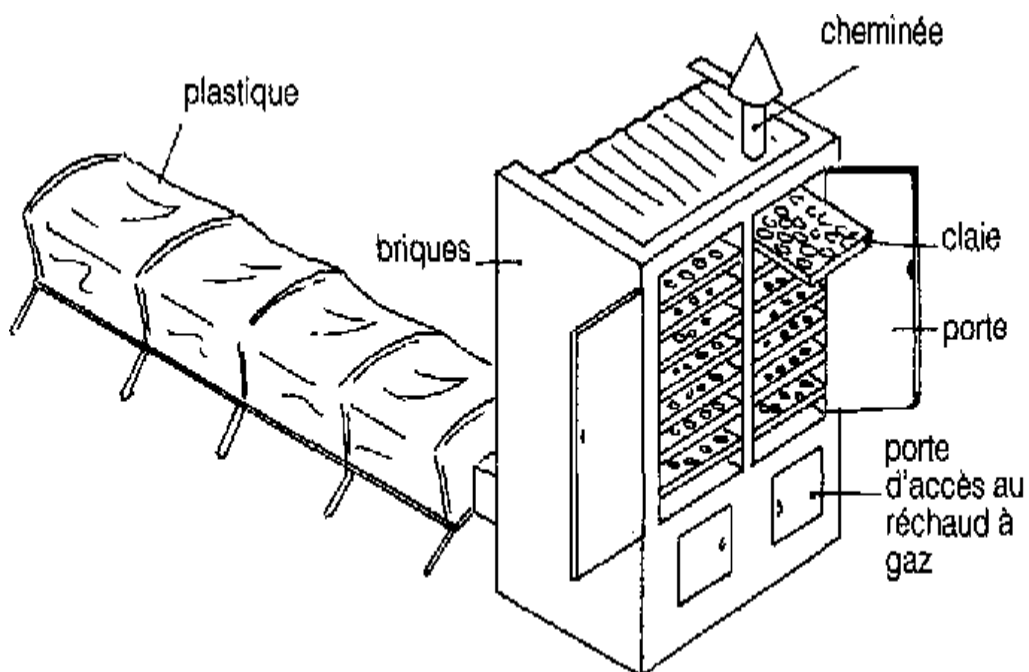


Figure. I. 18: Séchoir solaire hybride solaire-gaz.

Une autre conception (Figure I.21) consiste en un collecteur d'air et une cheminée en granit (utilisée comme absorbeur d'énergie et stockage) recouverte de feuilles de verre. La chambre de séchage contient trois étagères empilées, les murs sont en contreplaqué et la surface supérieure est recouverte de verre. La cheminée solaire est de forme cylindrique et en tôle galvanisée avec un capuchon métallique pour la protection contre la pluie[24].

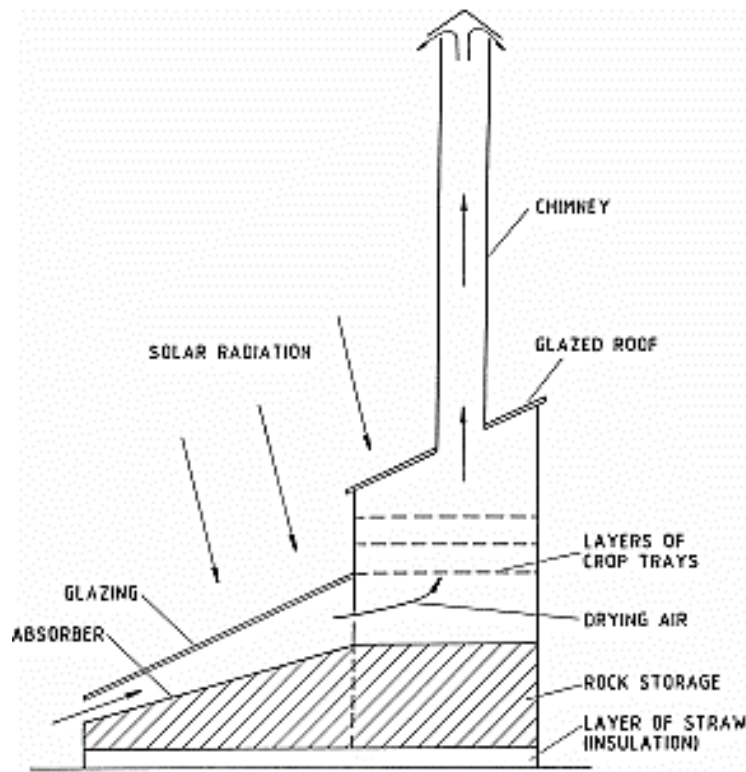


Figure. I. 19: Séchoir solaire à circulation naturelle-type 2-

4 LES SECHOIRS INDUSTRIELS :

Le séchage est un processus essentiel dans de nombreux domaines industriels, ce qui a conduit au développement de plusieurs types de séchoirs industriels. [29] présente les travaux de recherche et développement menés sur les séchoirs industriels, ainsi que leurs tendances d'utilisation récentes et futures. Il existe essentiellement trois types de sécheurs industriels : à lit fluidisé, à pulvérisation et à flotteur..[29].

➤ DIFFERENTES TYPES DE SECHOIRS INDUSTRIELS :

a) Séchoir à lit fluidise:

Le sécheur à lit fluidisé est principalement composé des pièces suivantes :

- Suppresseur
- Élément chauffant
- une rangée
- Plusieurs éléments pour réguler et mesurer la pression, la vitesse et la température.
- Enregistreur de résultats

La Figure (I.22) montre un diagramme schématisé d'un sécheur à lit fluidisé

L'air ambiant est chauffé dans l'élément chauffant, et après avoir été aspiré par le suppresneur, l'air chauffé est introduit dans le bas de la colonne représentant la chambre de séchage. Si le produit à sécher est en suspension, alors chaque particule est entourée d'air chaud.[30]

Les produits à sécher par ce type de séchoir sont des produits à structure granulaire tels que les produits plastiques et plusieurs aliments.

Une vitesse élevée, un transfert de chaleur uniforme et une durée relativement courte sont quelques-uns des avantages des sécheurs à lit fluidisé. Le coût de l'énergie utilisée est l'un de ses inconvénients. Compte tenu de la nature du produit à sécher dans ce type de séchoir, des modèles de diffusion sont souvent utilisés pour simuler l'évolution de la teneur en humidité du produit dans le temps.

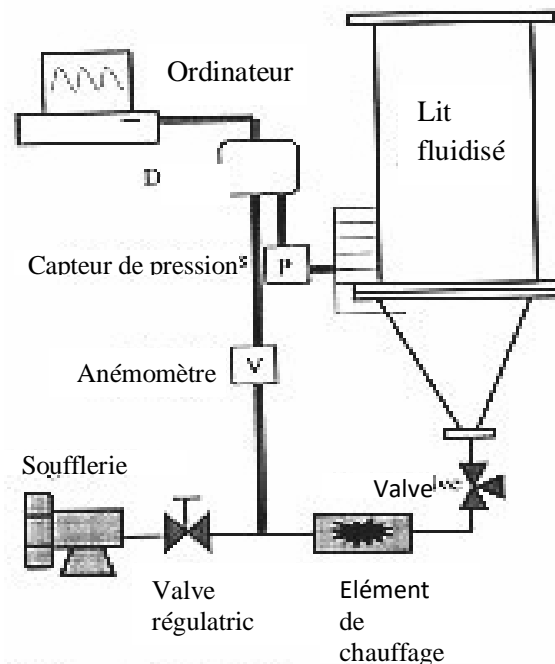


Figure. I. 20: Appareillage utilisé dans le séchoir à lit fluidisé (Zhanyong Li et al. 2002).

b) Séchoir à pulvérisation :

Le séchage par pulvérisation est l'une des techniques les plus récentes utilisées. Le procédé est basé sur le principe du séchage par convection. Le produit humide est introduit dans la chambre de séchage avec de l'air chaud, et à travers l'atomiseur (situé dans la chambre de séchage), l'humidité du produit est rapidement évaporée et réduite. Ainsi, un produit sec est obtenu sous forme de poudre, de granulés ou d'agglomérats.

La Figure (I.23) présente un schéma simplifié d'un sécheur par pulvérisation.

Ce type de sécheur est largement utilisé dans les industries chimiques, pharmaceutiques, céramiques et autres. Il présente de nombreux avantages tels que :

- Temps de séchage court
- Bonne qualité sèche
- Les produits avec une humidité initiale élevée peuvent être séchés et les produits peuvent avoir une humidité suffisamment faible à la fin du processus
- Peut sécher des produits visqueux et non amorphes

- Les séchoirs sont peu coûteux à entretenir, ont une longue durée de vie et peuvent automatiser les séchoirs.

Cependant, ses inconvénients incluent:

- Cotes d'installation
- énergie consommée
- Coût élevé des nébuliseurs complexes
- Petites quantités de produit à sécher [31].

Les conditions non stationnaires de transfert de chaleur et de masse dans les sécheurs par pulvérisation et la complexité du système dynamique des fluides signifient que les calculs pour ce type de sécheur n'ont pas de relations précises.

Des relations empiriques et des simplifications sont ensuite proposées, telles que la fixation de conditions fixes de transfert de chaleur et de masse, puis l'utilisation d'extrapolations.

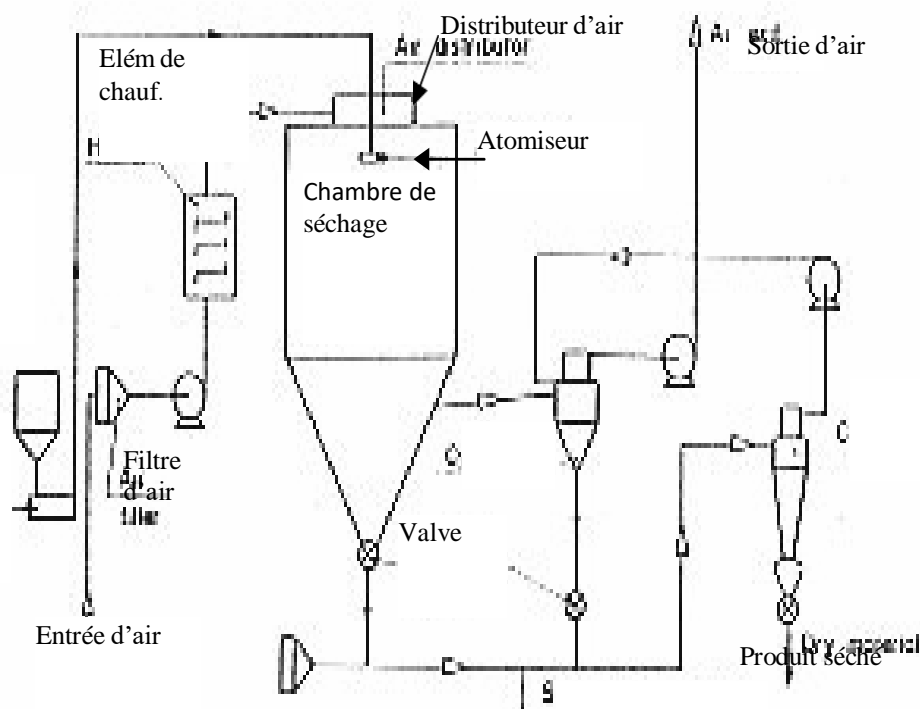


Figure. I. 21: Schéma su séchoir à pulvérisation (Strumillo et al. 1986, pp. 353).

c) Séchoir à flot :

Composition du séchoir :

- Suppresseur
- Élément chauffant
- un tube
- Collecteur de produit sec

La Figure (I.24) montre ce type de séchoir.

Le séchage a lieu dans des tubes verticaux, où le produit et l'air ambiant (après avoir été aspirés par le suppresseur et montés en température par des éléments chauffants) sont introduits. Cependant, la vitesse de l'air chauffé est supérieure à la vitesse du produit.

Dans ce type de sécheur, le temps de séjour du produit est compris entre 0,5 et 4 secondes. Cela conduit parfois à recourir à des systèmes de recyclage des produits, et la quantité de ces recyclages varie d'un produit à l'autre.[31].

Les avantages de ce sèche-linge incluent :

- Temps de contact très court entre le produit et l'air chaud
- Haute température disponible à l'entrée du sécheur
- Peut être utilisé comme moyen de transporter des produits d'un endroit à un autre
- Relativement peu d'espace pour installer le sèche-linge
- Ses commandes sont très simples
- Coûts d'installation et d'entretien relativement faibles par rapport aux autres types de séchoirs

Cependant, l'entretien de tels séchoirs est difficile et doit être fait régulièrement, ce qui peut être un inconvénient. De plus, le fluide chauffé doit être de l'air pour éviter tout contact avec le produit à sécher et tout problème de circulation du fluide.

Généralement, ce qui doit être séché est un produit antiadhésif, cristallin, non poreux et de petit diamètre. Pour être un ordre de grandeur, pour sécher un produit d'un diamètre de 1 à 2 mm, il faut une vitesse d'air d'environ 25 m/s.

Schweitzer (1979) a ajouté les séchoirs discontinus et les séchoirs rotatifs à cette classification.

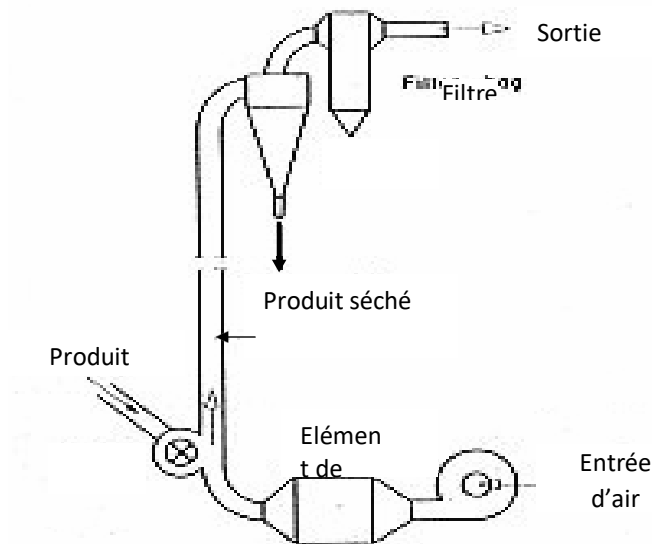


Figure. I. 22: Schéma du séchoir à flot (Strumillo et al. 1986, pp. 330)

d) Séchoirs à lots :

Ces séchoirs conviennent au séchage d'une grande variété de produits. Figure (I.25). C'est le représentant du séchoir discontinu.

Le suppresseur sert à aspirer l'air ambiant réchauffé par l'élément chauffant. Un ventilateur est généralement utilisé pour répartir uniformément l'air chaud dans la chambre de séchage. Selon la nature du produit à sécher, le temps de séchage peut aller de quelques heures à quelques jours.

La modélisation consiste à utiliser le sécheur et les équations de transfert de chaleur et de masse pour le produit à sécher.[32].

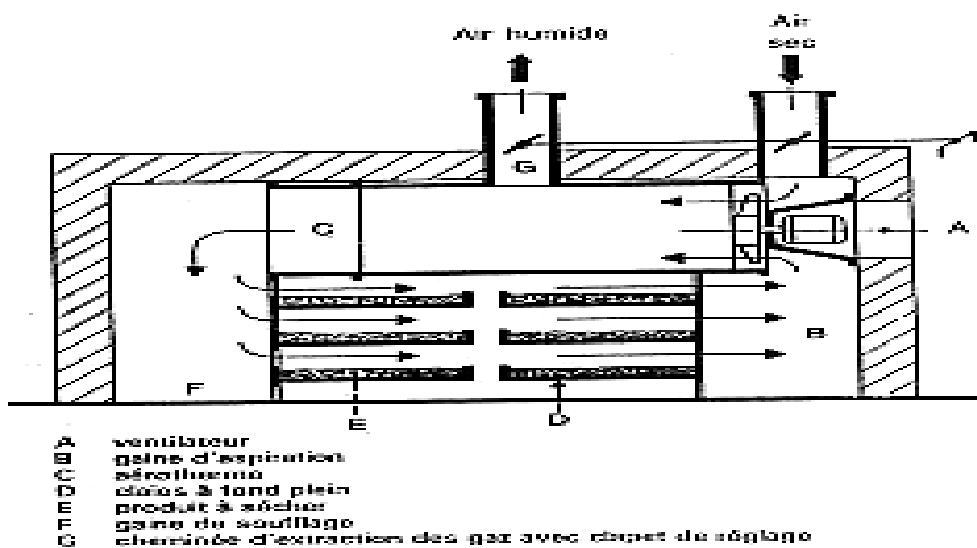


Figure. I. 23: Schéma d'un séchoir à lots (Charreau et al. 1991).

e) Séchoirs rotatifs :

Des produits non collant, relativement de petites dimensions, sont séchés dans ce séchoir. Il est constitué d'un cylindre rotatif incliné ce qui met le produit en mouvement, de l'air chaud est injecté dans le même sens du mouvement du produit ou à contre-courant. Il est illustré dans la figure (I.26)[32].

Parmi les séchoirs qui opèrent dans des conditions d'air asséchant variables les séchoirs solaires d'où la nécessité de faire une étude sur de tels modèles de séchoirs [32].

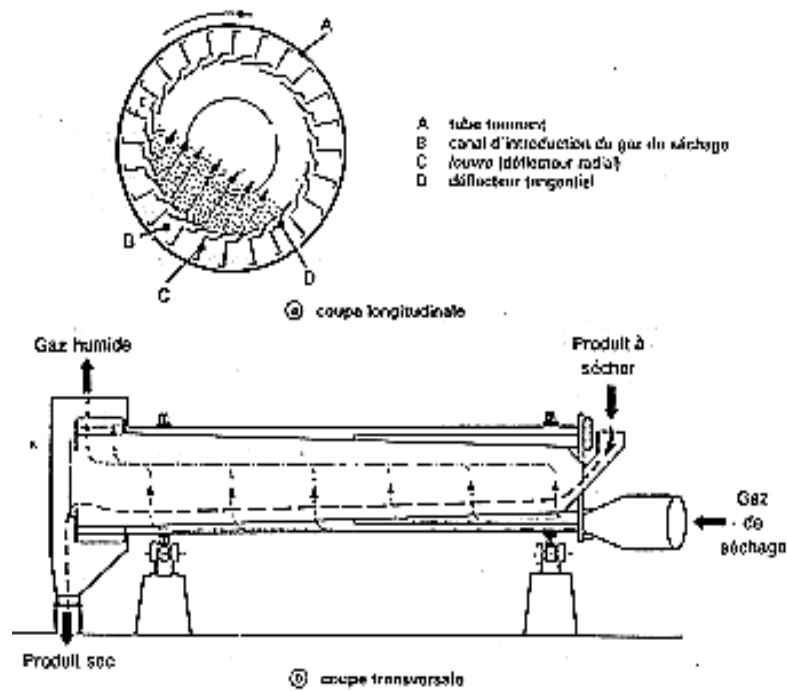


Figure. I. 24: Schéma d'un séchoir rotatif (Charreau et al. 1991).

1.2.3. Conclusion :

A travers le premier chapitre, nous avons pu connaître le processus de séchage et ses caractéristiques, et identifier les différents types de séchoirs, leurs méthodes de travail, et les caractéristiques de chaque type.

CHAPITRE02 :

Présentation et

réalisation du

séchoir électrique

II.1. Introduction :

Ce chapitre se consacrera à la présentation complète du séchoir électrique ainsi qu'à l'analyse de ses différents constituants. Cette étape permettra d'avoir une idée du fonctionnement du séchoir électrique. Aussi, cela nous permettra plus loin de développer des logiques de commande pour contrôler notre système :

II.2. Procédure de fabrication des éléments sécheurs :

Le séchoir est conçu comme suit :

II.2.1. Montage du coffret :

II.2.1.1. La chambre de séchage (le caisson):

C'est l'espace dans lequel s'effectue l'échange entre l'air et le produit à sécher ; Il mesure 0,90 m de haut, 0,35m de long et 0,35 m de large. Ses parois extérieures sont en bois (MDF) d'une épaisseur de 3 cm.



Figure. II. 1:Image de chambre de séchage.

II.2.1.2. Un panier :

Les paniers sont en fer résistant à la chaleur et sont grillagés pour contenir les échantillons à sécher. Le panier est monté sur une balance électronique pour suivre l'évolution instantanée de sa masse. La distance entre la crémaillère et la résistance est suffisante pour permettre une bonne circulation de l'air.



Figure. II. 2:Image de panier

II.2.1.3. La tuyère:

Il garantit que l'air usé chargé d'humidité est collecté et qu'une partie de l'air est évacuée à l'extérieur et l'autre partie est recyclée.



Figure. II. 3:Image de la tuyère.

II.2.2. Le ventilateur:

Il est boulonné sur un plan orthogonal à l'axe de l'ouverture réservée à l'entrée d'air, sur une patte de fixation appropriée.

Il s'agit d'un ventilateur placé à l'entrée du diffuseur et relié à un variateur électronique de vitesse pour permettre à la vitesse de l'air de séchage de varier entre 0 et 2 m/s.



Figure. II. 4:extracteur de l'air [33] .

II.2.3. La résistance chauffante :

L'élément chauffant joue un rôle important dans le système de séchage. Généralement, le système de chauffage est une résistance électrique qui convertit l'énergie électrique en chaleur.



Figure. II. 5: résistance chauffante.

II.3. Réalisation des circuits électriques :

II.3.1. La boîte de commande :

Il contient l'Arduino UNO (La régulation est automatique), qui effectue les calculs nécessaires au bon fonctionnement du système à partir des données collectées par les capteurs ; le boîtier convertit et transmet toutes les données au logiciel de traitement informatisé, lui permettant, suivant les données des consignes arrêtées par l'utilisateur, de :

Choisir le type de régulation pour être :

Manuelle : On fixe le temps nécessaire au séchage complet du produit et on attend l'arrêt planifié.

Automatique : Le processeur rompt le fonctionnement du système dès que les conditions sur le poids final du produit ou sur l'humidité de l'air à la sortie sont satisfaites.

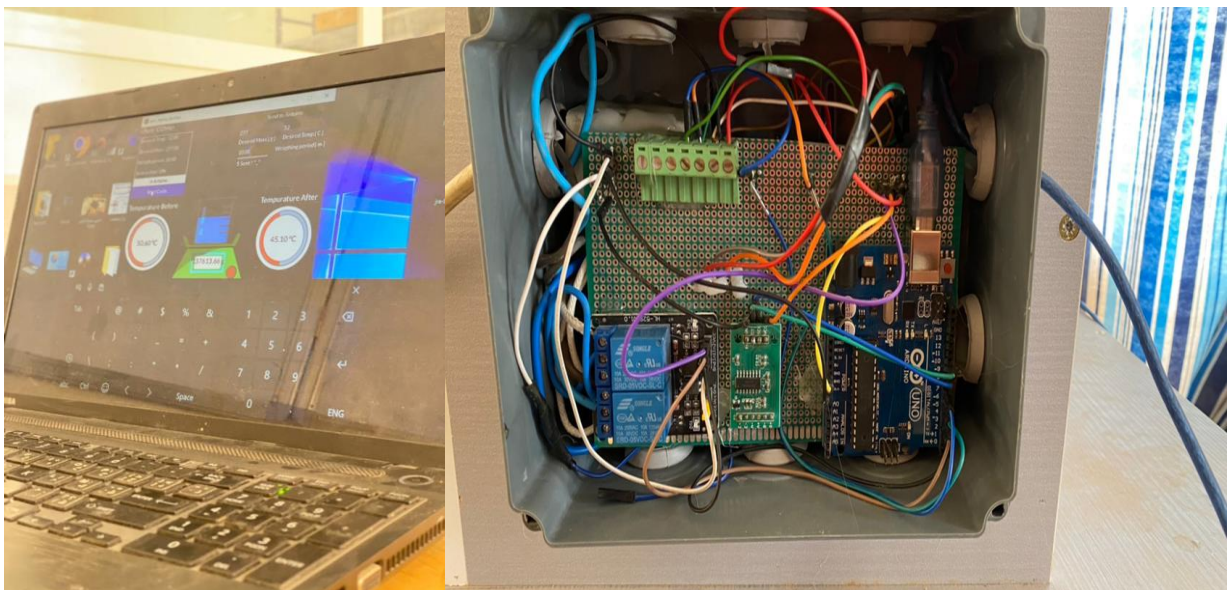


Figure. II. 6:Image de la boîte de commande.

II.3.2. Arduino :

II.3.2.1. Définition du module Arduino :

Le module Arduino est un circuit imprimé matériel libre (plate-forme de contrôle), le plan de la carte elle-même est publié sous licence libre, mais certains composants de la carte ne le sont pas : comme le microcontrôleur et les composants complémentaires.

Les microcontrôleurs sont programmés pour analyser et générer des signaux électriques pour effectuer diverses tâches. Arduino est utilisé dans de nombreuses applications telles que l'électrotechnique industrielle et embarquée (domotique, contrôle de robots, contrôle de moteurs et réalisation de jeux de lumière, communication avec des ordinateurs, contrôle d'appareils mobiles).

Chaque module Arduino dispose d'un régulateur +5 V et d'un oscillateur quadruple 16 MHz (ou d'un résonateur céramique sur certains modèles). Pour programmer cette carte nous utilisons le logiciel Arduino IDE.[34]

II.3.2.2. Pourquoi Arduino UNO ?

Il existe de nombreuses cartes électroniques qui ont des plates-formes basées sur des microcontrôleurs qui peuvent être utilisées pour programmer des appareils électroniques. Tous ces outils prennent des détails de programmation complexes et les intègrent dans des mises en page faciles à utiliser. De même, le système Arduino simplifie l'utilisation des microcontrôleurs tout en offrant les avantages suivants pour les intéressés :

- « Pas cher »
- Environnement de programmation clair et simple.
- Multiplate forme : fonctionne sous Windows, Macintosh et Linux.
- Nombreuses bibliothèques disponibles avec diverses fonctions implémentées.
- Logiciel et matériel open source et extensible.
- Nombreux conseils, tutoriaux et exemples en ligne (forums, site perso, etc.).

- Existence de « Shield » (boucliers en français).

II.3.2.3. Les différents types de l'Arduino : [34]

Les modules originaux des différentes versions de l'Arduino sont fabriqués par la société italienne Smart Project, mais il existe d'autres marques conçues par la société américaine SparkFun Electronics.

Plusieurs versions des cartes Arduino ont été produites et vendues dans le monde, on peut citer :

- 1) **ARDUINO NANO:** Version ARDUINO plus petite alimentée par port USB et utilisant un microcontrôleur CMS de type ATmega168 (avant la version 3) ou ATmega328 (version 3.0). [35]



Figure. II. 7:ARDUINO NANO

- 2) **LILYOAP ARDUINO:** La conception minimaliste permet des applications portables utilisant le type SMT ATmega168.[36]

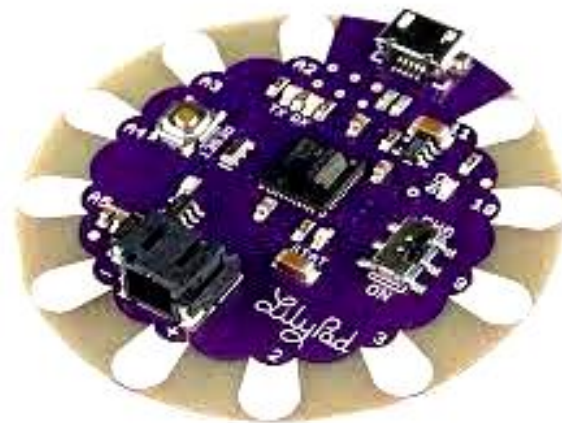


Figure. II. 8: LILYOAP ARDUINO

- 3) **ARDUINO BLUETOOTH (BT):** Connectez-vous via Bluetooth et utilisez ATmega328 pour la programmation.[37]



Figure. II. 9: ARDUINO BLUETOOTH (BT).

- 4) **ARDUINO MEGA:** Équipé d'un CMS de type ATmega1280 avec E/S et mémoire supplémentaires : 128 ko Flash, 8 ko SRAM, 4 ko EEPROM.[38]

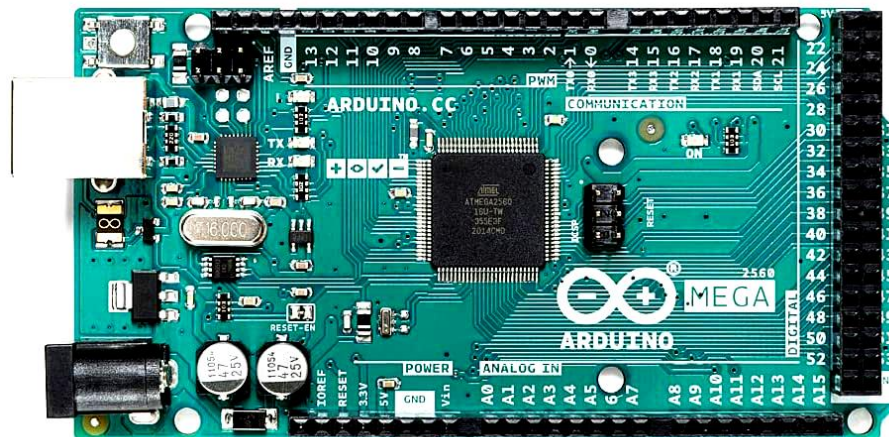


Figure. II. 10:ARDUINO MEGA.

5) **ARDUINO UNO:** utilise un ATmega328 comme les derniers modèles de DUEMILANOVE, mais alors que ce dernier utilisait une puce FTDI pour la programmation via un connecteur USB, l'UNO utilise une puce ATmega8U2 programmé comme un convertisseur série.[39]



Figure. II. 11:ARDUINO UNO.

6) **ARDUINO ETHERNET:** est une carte ARDUINO UNO avec une puce Wiznet W5100 intégrée pour ajouter une connexion Ethernet intégrée.[40]



Figure. II. 12:ARDUINO ETHERNET.

- 7) **ARDUINO LEONARDO:** est une version basse coût de l'ARDUINO UNO à base d'un ATmega32U4. [41]

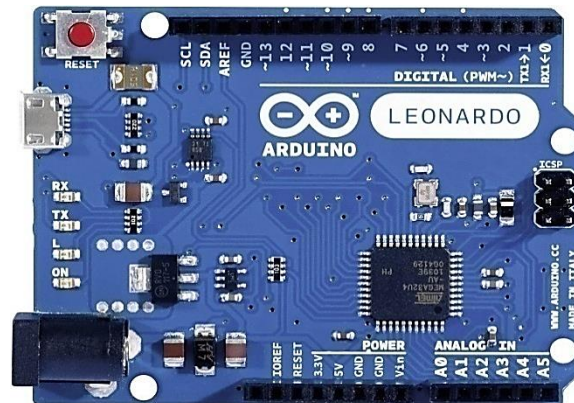


Figure. II. 13:ARDUINO LEONARDO.

- 8) **ARDUINO DUE:** est une évolution de l'ARDUINO Mega2560 avec un microcontrôleur AtmelSAM3X 32 bits (ARM Cortex-M3 32 bits). [42]

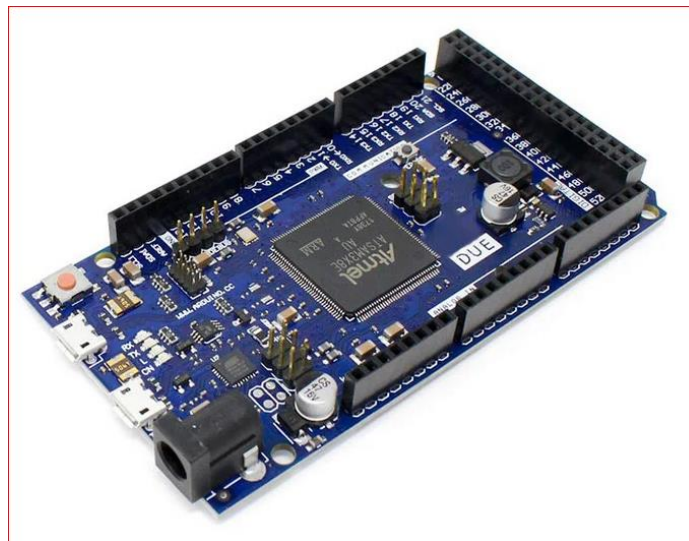


Figure. II. 14:ARDUINODUE.

II.3.2.4. Description générale :

Le modèle UNO de la société ARDUINO est une carte électronique avec le microcontrôleur ATMEL de référence ATmega328 en son cœur. Le microcontrôleur ATmega328 est un microcontrôleur 8 bits de la famille AVR programmable en langage C.

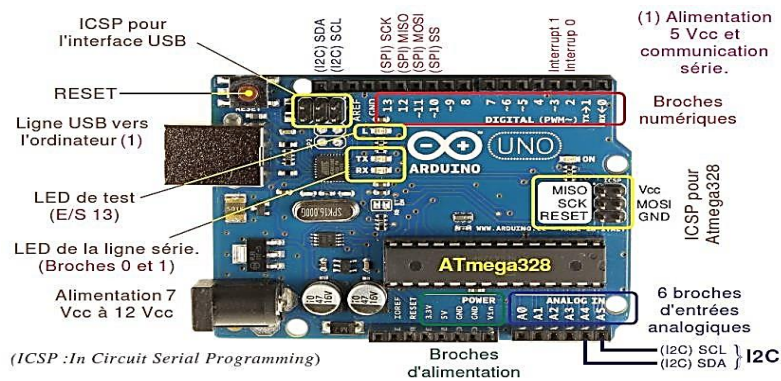


Figure. II. 15: La carte Arduino UNO

1) Caractéristiques techniques de la carte Arduino UNO

- Microcontrôleur : ATmega328.
- Tension de fonctionnement : 5V.
- Tension d'alimentation (recommandée) : 7-12V.
- Tension d'alimentation (limites) : 6-20V.
- Broches E/S numériques : 14 (dont 6 disposent d'une sortie PWM).
- Broches d'entrées analogiques : 6 (utilisables en broches E/S numériques).
- Intensité maxi disponible par broche E/S (5V) : 40 mA (ATTENTION : 200mA cumulés pour l'ensemble des broches E/S).
- Intensité maxi disponible pour la sortie 3.3V : 50 mA.
- Intensité maxi disponible pour la sortie 5V: Fonction de l'alimentation utilisée - 500mA max si port USB utilisé seul.
- Mémoire Programme Flash : 32 KB (ATmega328) dont 0.5 KB sont utilisés par le bootloader.
- Mémoire SRAM (mémoire volatile) : 2 KB (ATmega328).
- Mémoire EEPROM (mémoire non volatile) : 1 KB (ATmega328).
- Vitesse d'horloge : 16 MHz.

2) Schéma simplifié de la carte Arduino UNO :

Le microcontrôleur utilisé sur la carte Arduino UNO rassemble sur une puce plusieurs éléments complexes dans un espace réduit dont la programmation peut être réalisée en langage C.

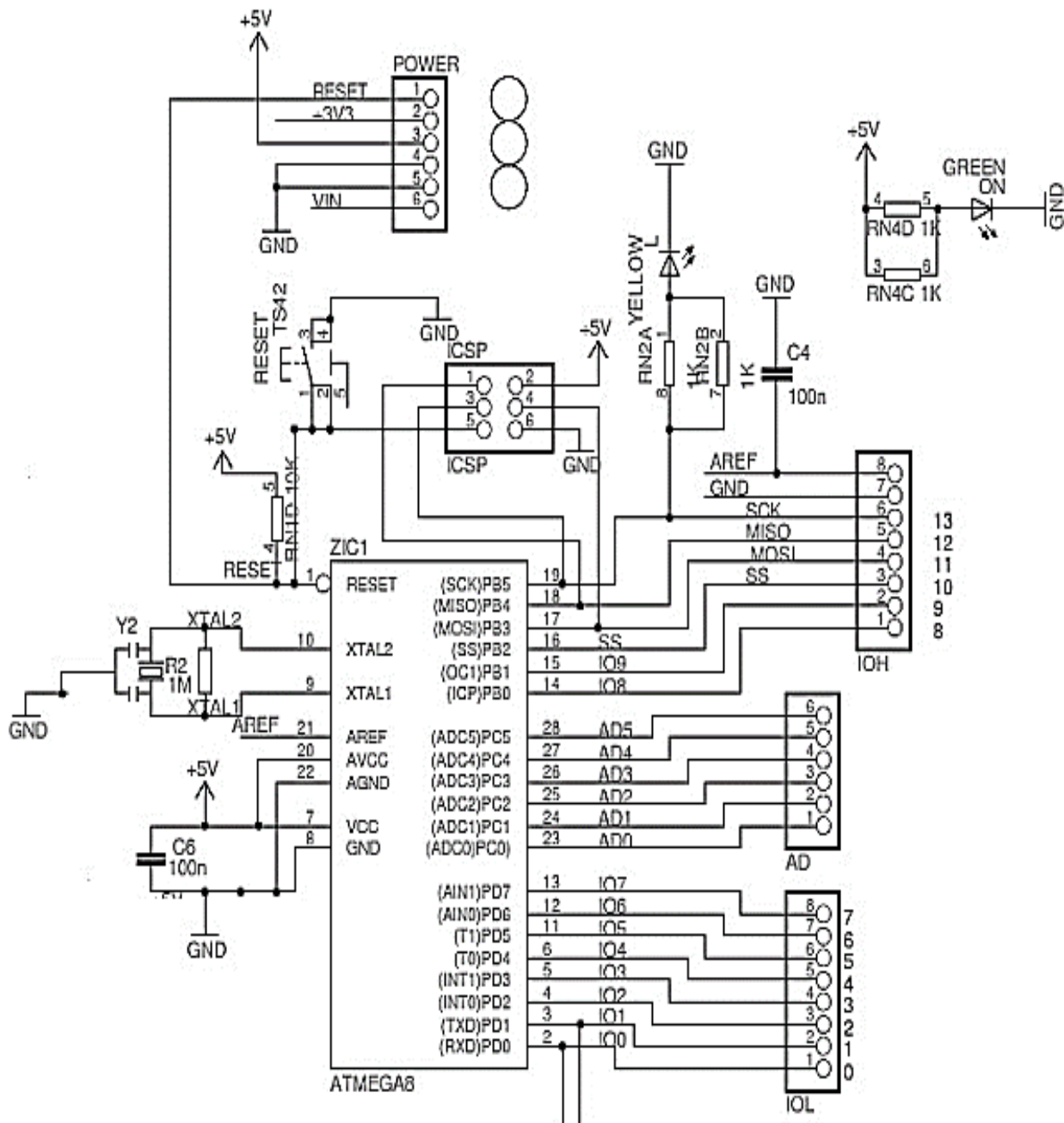


Figure. II. 16: Schéma simplifié de la carte Arduino UNO

[43]

Le ATMEL ATmega328 est un microcontrôleur ATMEL de la famille AVR 8bits, il se

caractérisé par :

- **FLASH** : mémoire programme de 32 Ko
- **SRAM** : données (volatiles) de 2 Ko
- **EEPROM** : données (non volatiles) de 1 Ko
- **Digital I/O (entrées-sorties Tout Ou Rien)** : 3 ports PortB, PortC, PortD (soit 23 broches en tout I/O).
- **Timers/Counters** : Timer 0 et Timer 2 (comptage 8 bits), Timer1 (comptage 16 bits) Chaque timer peut être utilisé pour générer deux signaux PWM. (6 broches OCxA/OCxB)
- **Plusieurs broches multi-fonctions** : certaines broches peuvent avoir plusieurs fonctions différentes choisies par programmation.
- **PWM** : 6 broches OC0A(PD6), OC0B(PD5), OC1A(PB1), OC1B(PB3), OC2A(PB3), OC2B(PD3)
- **Analog to Digital Converter (résolution 10 bits)** : 6 entrées multiplexées ADC0(PC0) à ADC5(PC5)
- **Gestion bus I2C (TWI Two Wire Interface)** : le bus est exploité via les broches SDA(PC5)/SCL(PC4).
- **Port série (USART)** : émission/réception série via les broches TXD(PD1)/RXD(PD0)
- **Comparateur Analogique** : broches AIN0(PD6) et AIN1 (PD7) peut déclencher interruption Watch dog Timer programmable.
- Gestion d'interruptions (24 sources possibles) : en résumé
- Interruptions liées aux entrées INT0 (PD2) et INT1 (PD3)
- Interruptions sur changement d'état des broches PCINT0 à PCINT23
- Interruptions liées aux Timers 0, 1 et 2 (plusieurs causes configurables)
- Interruption liée au comparateur analogique

- Interruption de fin de conversion ADC
- Interruptions du port série USART
- Interruption du bus TWI (I2C).

3) Brochage de la carte Arduino UNO :

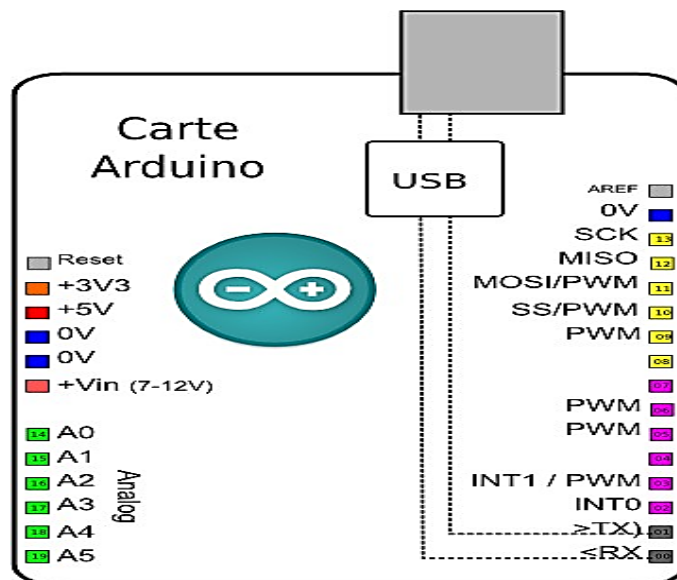


Figure. II. 17:Brochage de la carte Arduino UNO.[44]

4) Alimentation de la carte ARDUINO UNO :

La carte Arduino UNO peut être alimentée via une connexion USB ou une alimentation externe. La puissance est automatiquement sélectionnée.

L'alimentation externe peut provenir d'un adaptateur AC-DC ou d'une batterie. L'adaptateur peut être connecté en branchant une fiche de 2,1 mm dans la prise d'alimentation de la carte ou à partir d'une batterie connectée aux broches GND et Vin.

Le processeur peut fonctionner sur une alimentation externe de 6 à 20 V. Cependant, si la tension est inférieure à 7 V, la broche 5 V peut fournir moins de 5 V et le processeur peut devenir instable. Si la tension est supérieure à 12V, le régulateur peut surchauffer et endommager la carte. La plage recommandée est de 7 à 12 volts.[45]

II.3.3. 2 Module relais :

Ce module contient deux relais isolés électriquement de l'entrée de commande. Les relais peuvent être utilisés pour commuter des charges de tension et de courant plus élevées qu'un microcontrôleur ne peut traditionnellement accomplir.

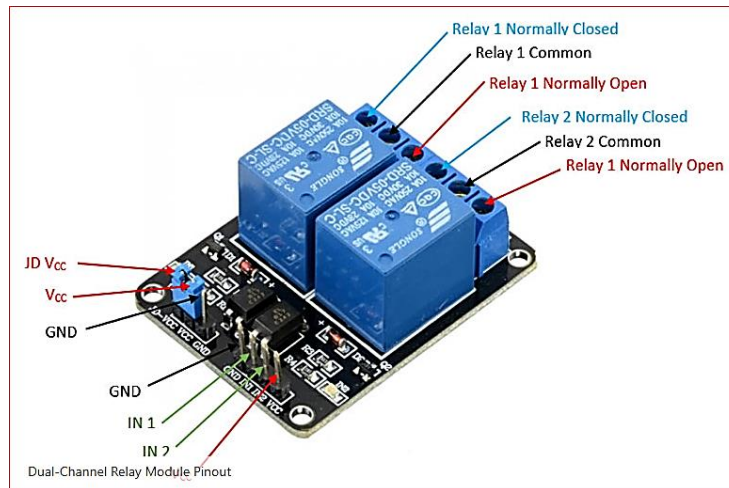


Figure. II. 18: 2 Module relais .[46]

II.3.3.1. Les caractéristiques :

- 1) Alimenté à partir de 5V
- 2) Canaux
- 3) Peut être utilisé comme Normalement Ouvert (NO) ou Normalement Fermé (NC)
- 4) Entrées opto-isolées

II.3.3.2. Câblage avec Arduino :

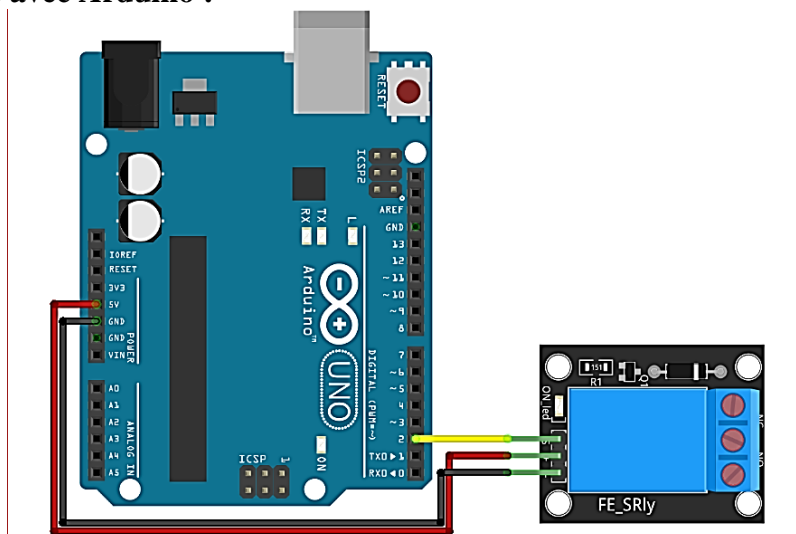


Figure. II. 19: Câblage 2relay modul avec Arduino [47].

II.3.5. Capteur de T° et d'humidité DHT22 :

Le capteur DHT22 est un capteur de température et d'humidité à sortie numérique sérielle. La liaison entre la carte Arduino et le capteur est assurée par un microcontrôleur 8 bits intégré dans le corps du DHT22. Une bibliothèque permet la communication entre le capteur et la carte ARDUINO.

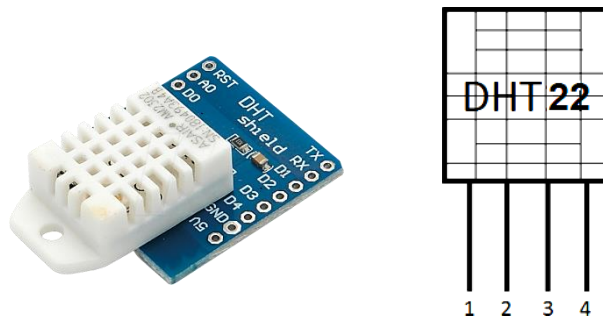


Figure. II. 22:Capteur de T° et d'humidité DHT22[49].

II.3.5.1. Caractéristiques : [49]

- Humidité (relative%) : 0 à 100 %
- Précision (humidité) : +/- 2%
- Température : -40°C à +150°C
- Précision (température) : +/- 0,5°C
- Fréquence mesure : 1/2 Hz (2 mesure par seconde)
- Tension d'alimentation : 3 à 5 volts
- Consommation : 0.5 mA en nominal / 2.5 mA maximum.

II.3.5.2. Câblage avec Arduino :

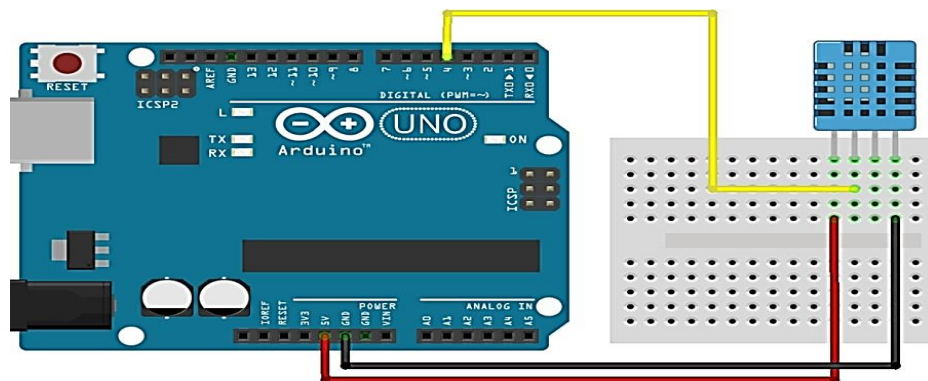


Figure. II. 23:Câblage capteur DHT22 avec Arduino[50].

II.3.6. Capteur de force avec convertisseur HX711 :

Ce module est capable de convertir le poids ou force de flexion appliquée par un objet, en une valeur analogique grâce à sa structure et aux résistances élastiques en lui. Il est capable de mesure des poids dans les limites de 20kg avec précision, un amplificateur est nécessaire pour amplifier les valeurs analogiques obtenu afin de les traiter à l'aide d'un microcontrôleur comme Arduino ou Raspberry.

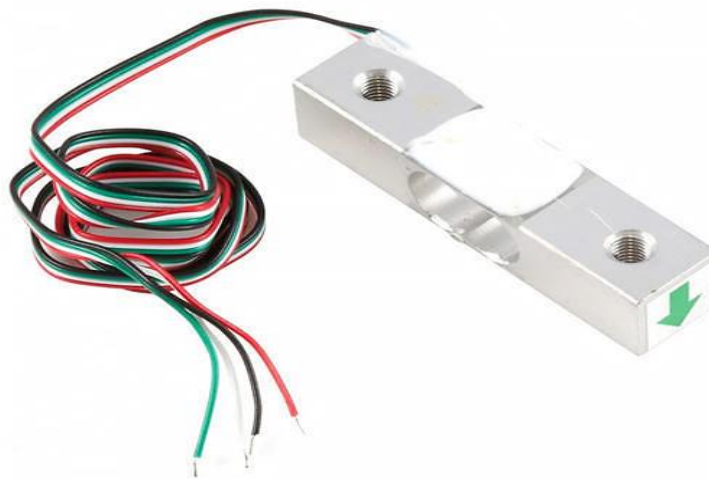


Figure. II. 24:Capteur de force 20Kg.

Ce module utilise un convertisseur ADC analogique-numérique HX711 de précision 24 bits. Par exemple, il est conçu pour mettre en œuvre des balances de haute précision et dispose de deux entrées analogiques. Le gain interne de 128 est programmable. Le module peut être configuré comme un pont de mesure de pression ou de poids.

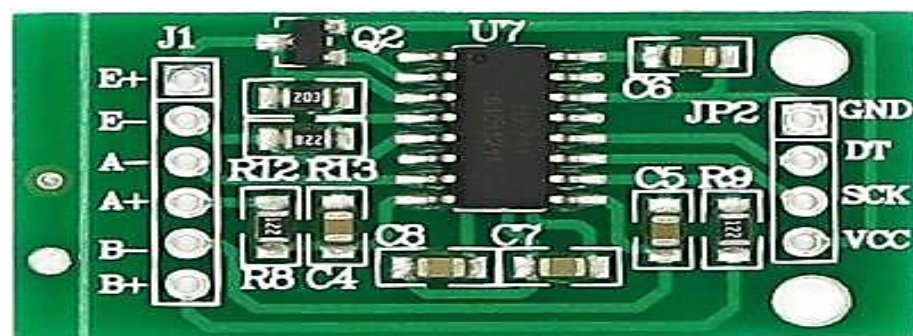


Figure. II. 25: convertisseur A/N(HX711).

II.3.6.1. Caractéristiques :

▪ Pour le capteur de force[51]

- Alimentation: 5 Vcc.
- Plage de mesure: 0 à 20 kg.
- Précision: 0,5 % de la pleine échelle.
- Brochage:
- Rouge: + 5Vcc / Noir: GND/ Vert: +/ Blanc: -
- Température de fonctionnement: -10 à +40 °C
- Dimensions: 56 ×13×13 mm.

▪ Pour le convertisseur HX711

- Circuit intégré HX711
- 2 canaux d'entrée.
- Le gain est modifiable : 32 64 ou 128.
- Taille 40 × 20 mm
- Un régulateur de tension alimente le pont de mesure et le convertisseur ADC.
- Le circuit comporte un oscillateur et n'a pas besoin de composants externes.
- Reset lors de la mise sous tension.
- Interface série facile d'utilisation sans programmation.
- Data rate modifiable de 10 SPS ou 80 SPS (échantillons par seconde).
- Compatible 50 ou 60 Hz
- Consommation de courant de moins de 1,5 mA en utilisation normale, 1uA en veille.
- Tension d'alimentation de 2.6 à 5.5 V.

II.3.6.2. Câblage avec Arduino :

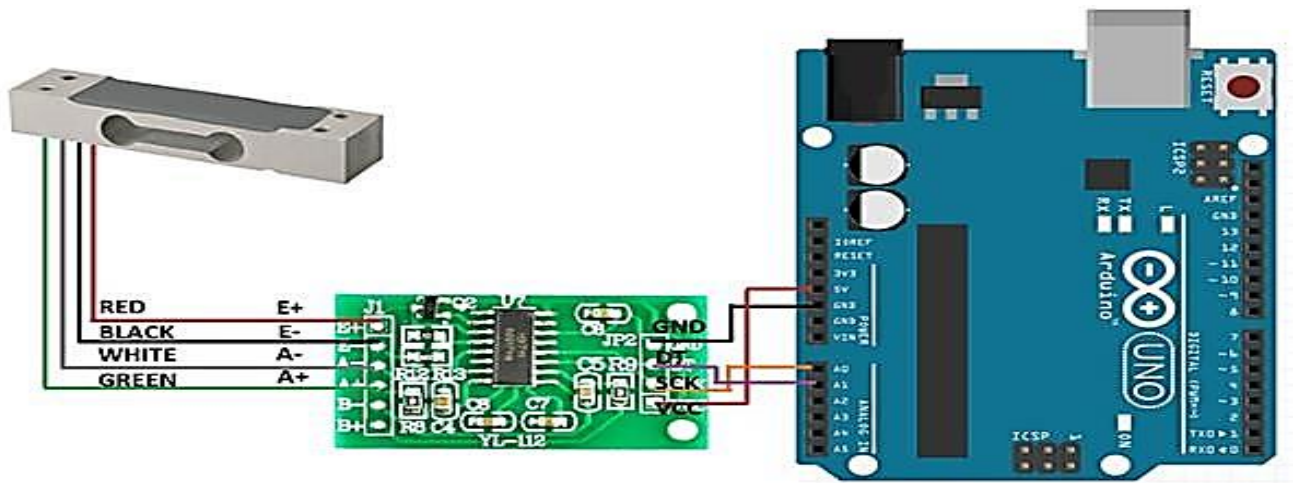


Figure. II. 26: Câblage capteur de force et convertisseur avec Arduino

II.3.7. Élément chauffant (résistance électrique) :

II.3.7.1. Caractéristiques :

1. L'intensité de la chaleur : N'excédant pas 30W/cm2 (conseillé)
2. Puissance ; Dépend de la dimension
3. Isolation (à froid)
4. Min Ohmios 500 Watts minimum
5. Tolérance de puissance (w) ; 5% - 10%
6. Température de fonctionnement ; 750 °C max.

II.3.7.2. Câblage avec Arduino :

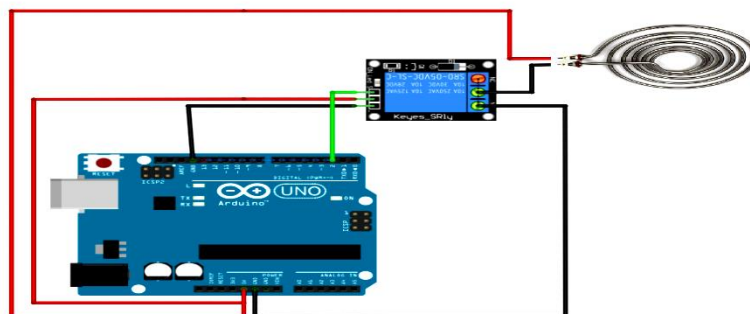


Figure. II. 27: Câblage de resistance avec Arduino.

II.3.8. Ventilateur :

II.3.8.1. Caractéristiques :[52]

- Tension de service: 5 Vcc
- Courant consommé: 0,085 A
- Débit d'air: 5,1 m³/h
- Vitesse de rotation: 9800 tr/min
- Niveau sonore: 16 dB
- Dimensions: 25 x 25 x 10 mm
- Température d'utilisation: -10° C à +70° C.

II.3.8.2. Câblage avec Arduino :

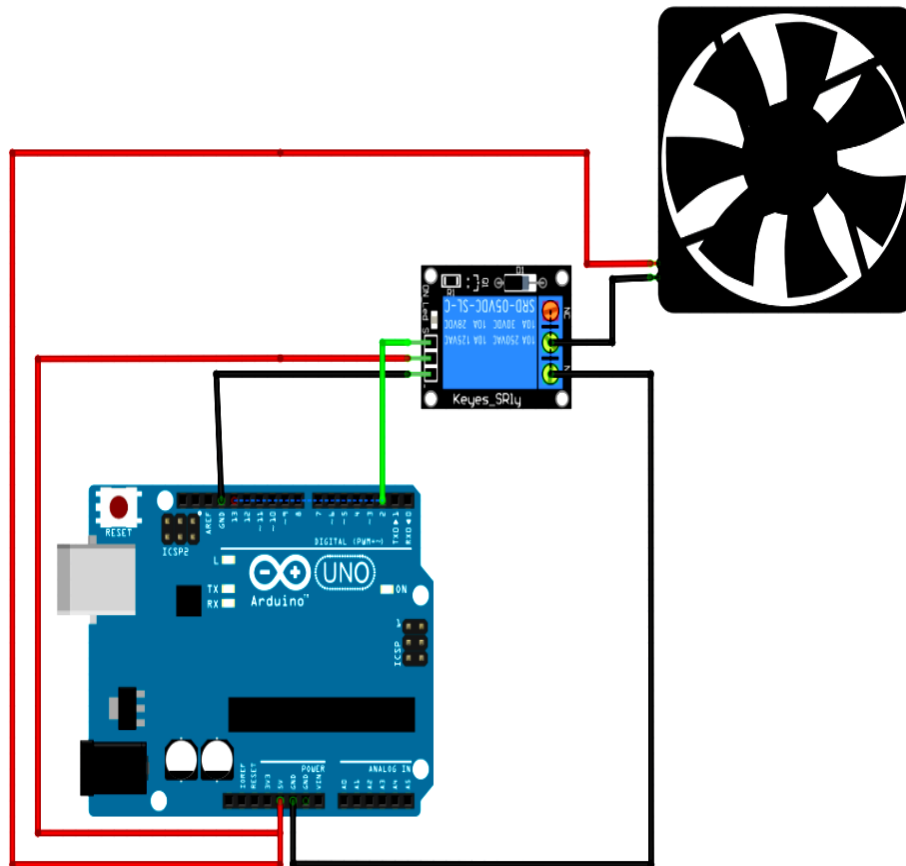


Figure. II. 28:Câblage de ventilateur avec Arduino

II.3.9. Le montage global :

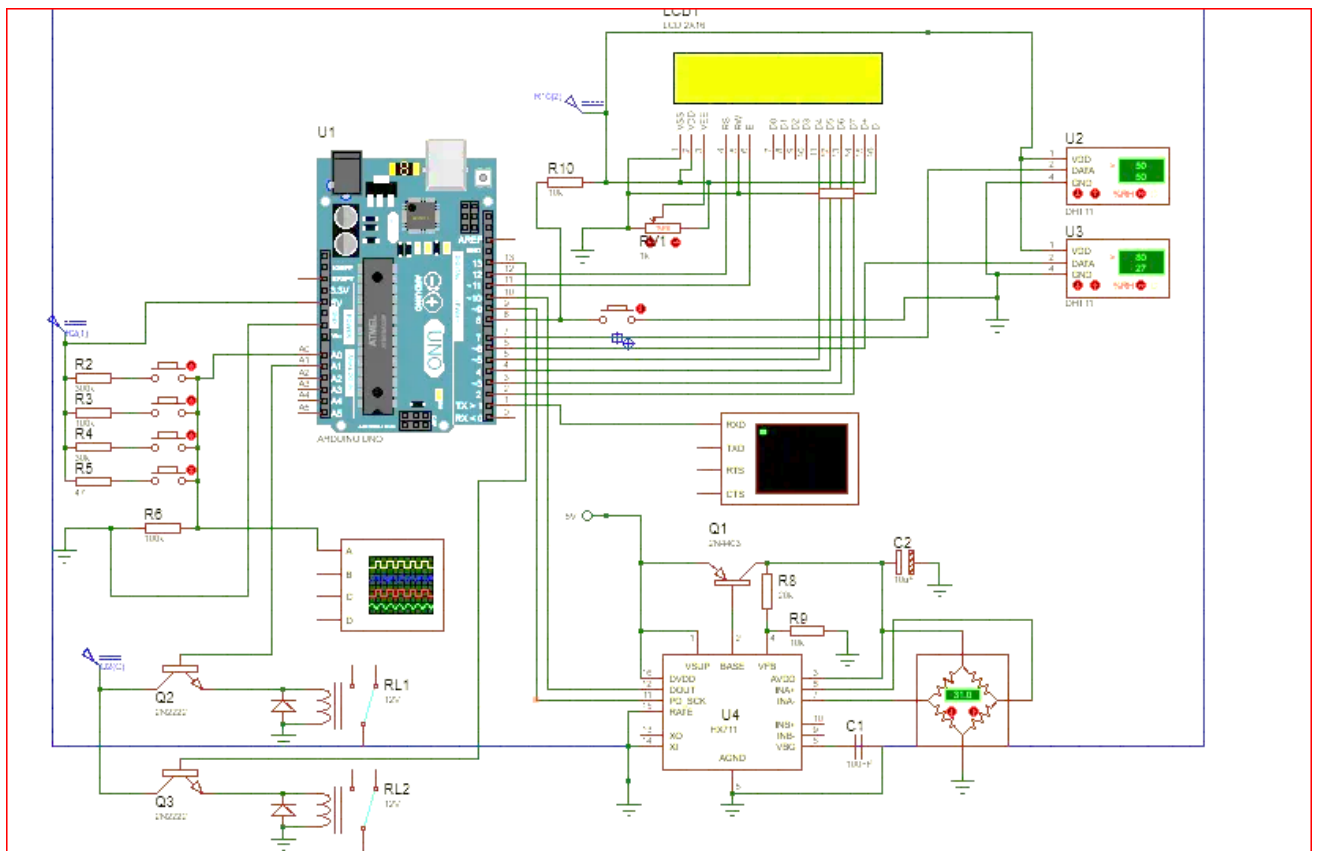


Figure. II. 29: Schéma du circuit de simulation(protos)

CHAPITRE 03 :

Expérimentations et

résultats

III.1. Introduction :

Afin de vérifier la sensibilité du séchoir aux paramètres de fonctionnement et d'étudier la possibilité d'économie d'énergie par des expérimentations, compte tenu des contraintes sévères du séchage, nous avons réalisé le premier test à l'aide d'une étuve de séchage sur un banc d'essai pour mesurer l'impact de l'économie d'énergie. Effets de la température et de la vitesse du vent sur la cinétique de séchage. Nous avons d'abord déterminé la teneur en humidité initiale des variétés de persil.

III.2. Généralité sur le persil:

Le persil est une plante bisannuelle de 25 à 80 cm de haut, très aromatique lorsqu'il est froissé, avec une odeur caractéristique. Tiges côtelées, feuilles glabres. Les feuilles vert brillant sont doublement divisées, en particulier les feuilles basales, les feuilles supérieures n'ayant généralement que trois lobes allongés étroits. Les fleurs sont jaune-vert et bordées de blanc lorsqu'elles sont épanouies, regroupées en ombelles composées de huit à vingt rayons. Les ombellules ont un involucre multibroche. Le type de racine pivotante allongée est assez développé. Il est de couleur jaune pâle et a une forte odeur aromatique.



Figure. III. 1 :persil.

▪ Paramètres de séchage:

Teneur en eau initial	85 %
Teneur en eau finale recommandée	16 %
Température maximal	40/60°C
Rapport de séchage	1/10

Figure. III. 2: Tableau Paramètres de séchage.

III.3. Description et caractérisation du dispositif expérimental:

III.3.1. Dispositif expérimental :

Il s'agit d'un séchoir à convection forcée à air chaud qui comprend :

- Une boîte de coffret en Bois avec porte vitrée
- Une résistance montée sur un cadre.
- Un jeu de capteur de température et d'humidité.
- Un coffret de commande électronique muni d'un programme informatique de gestion de paramètres.

L'expérimentateur peut régler les paramètres de température et de vitesse de l'air convectif en fonction des propriétés du produit et des conditions requises pour l'expérience. Quant aux données expérimentales, elles sont collectées par le micro-ordinateur via l'interface.

Quant aux étagères, elles sont disposées sur un système de support réglable à volonté en fonction de la taille de l'échantillon à sécher.

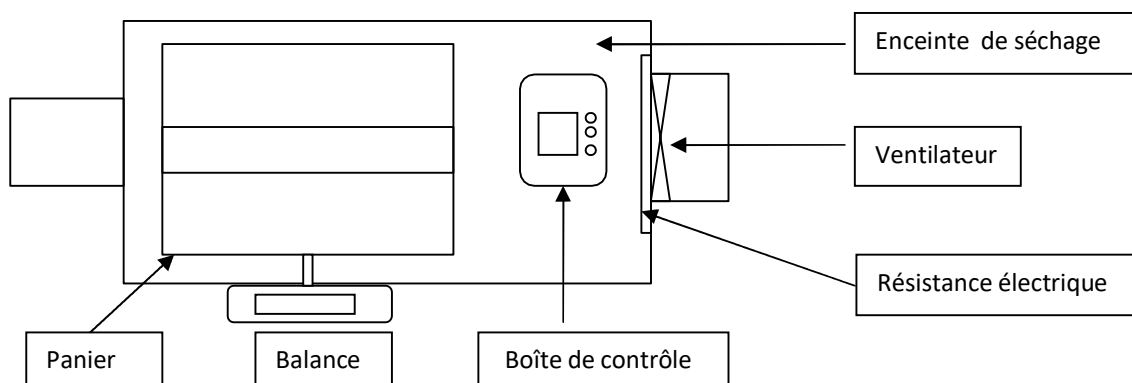


Figure. III. 3:dispositif expérimental de séchage

III.3.2. Mise en route :

Le système est contrôlé automatiquement par le processeur et la mise en route est relativement simple. Il suffit d'activer le disjoncteur du secteur. L'affichage monté sur le boîtier de commande s'allume immédiatement. Le menu s'agrandit et nous invite à saisir les paramètres de température et d'humidité dans la première option. Deuxièmement, nous pouvons choisir le mode de contrôle et de régulation, c'est-à-dire manuel ou automatique (voir la section mise en œuvre). Troisièmement, pour

sa part, les mesures de température, d'humidité et de pression de l'environnement chauffé de l'extérieur peuvent être évaluées ; le capteur est amovible.

Il suffit de placer l'échantillon, d'utiliser les trois touches pour effectuer les réglages nécessaires et le système démarre l'opération de séchage avec l'option sélectionnée.

III.3.3.Procédure expérimentale :

- Vérifiez que l'ordinateur est en marche pour la collecte et l'affichage des données ;
- Une fois le produit posé sur le panier et posé sur le banc d'essai, son poids initial s'affiche sur la balance. La base d'un séchage uniforme n'est pas de compacter le produit sur l'étagère;
- Mettez l'appareil sous tension en laissant l'interrupteur actif.
- Utilisez le boîtier de commande pour régler la température en réglant la température de l'air de séchage (par exemple 50°C) et en allumant le chauffage de l'air.
- Enregistrez la température et l'humidité de l'air de séchage.
- Nous pesons la masse du produit à sécher toutes les heures afin de suivre la cinétique de séchage jusqu'à ce que la masse devienne constante. Pour cela, nous utilisons une balance avec une sensibilité d'affichage numérique de 1/10.

III.3.4.Paramètres réglables du séchoir :

- **Température de l'air de séchage:**

La température de l'air du système de ventilation est régulée par l'action de résistances chauffantes, qui sont connectées à l'alimentation et aux relais de commutation. Le processeur principal permet de réguler la température de l'air jusqu'à 100°C.

- **Un temps de cycle du processus de séchage :**

Nous le contrôlons en définissant une heure spécifique dans le programme sur l'ordinateur ; Lorsque le temps spécifié s'est écoulé, le processus de séchage s'arrête.

- **Masse finale recommandé :**

Lorsque le poids de l'échantillon atteint moins que le poids spécifié sur le programme, le processus de séchage s'arrête.

III.3.5. Paramètres mesurables du séchoir :

- L'humidité et la température de l'air d'asséchant :

C'est l'humidité et la température de l'air chaud, entraîné par un mouvement de convection forcée. Ils sont mesurés à l'aide de capteurs électroniques attachés à des câbles relativement longs qui peuvent être déplacés autour de la chambre de séchage.

- Perte de masse du produit :

Il est contrôlé manuellement par la balance électrique illustrée ci-dessus.

III.4. Interprétation des résultats :

Les données expérimentales sont présentées sous forme de graphique, comme le montre la figure ci-dessous. De plus, nous approchons les points expérimentaux avec une ligne de tendance logarithmique : Variation de teneur en eau en fonction de temps:

$$X(t) = A + \log(B t) \quad \text{où } B > 0$$

Avec : t est temps de séchage en min.

Le coefficient de détermination R² est proche de 1. Par conséquent, on peut conclure que la loi d'évolution du séchage des persils avec le temps est non linéaire.

La courbe d'humidité tend vers une ligne horizontale en fin de séchage. C'est-à-dire que la résistance au transfert de masse augmente à mesure que l'humidité du produit diminue. Le produit aura un apport de chaleur sans modification significative de sa teneur en humidité.

Il est à noter qu'après l'augmentation rapide de la vitesse de séchage associée à une augmentation de la température, une phase dans laquelle la vitesse diminue de manière quasi linéaire, suivie d'une phase qui débute lorsque le produit atteint une valeur d'humidité proche de 40%, nous entrons dans la région hygroscopique. L'humidité résiduelle existe sous forme liée et le taux de séchage chute considérablement. Ces courbes montrent clairement le comportement hygroscopique des persils.



Figure. III. 4: persil :au début et à la fin de l'opération.

III.4.1.variation de la teneur moyenne en eau:

- Le cas de 40C°:

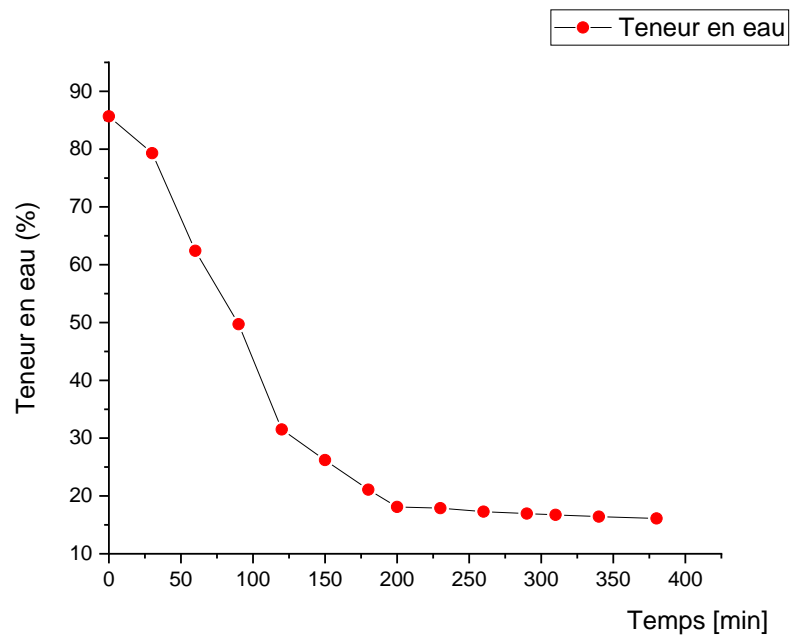


Figure. III. 5:Variation de teneur en eau en fonction de temps (40C°).

- Le cas de 60°C°:

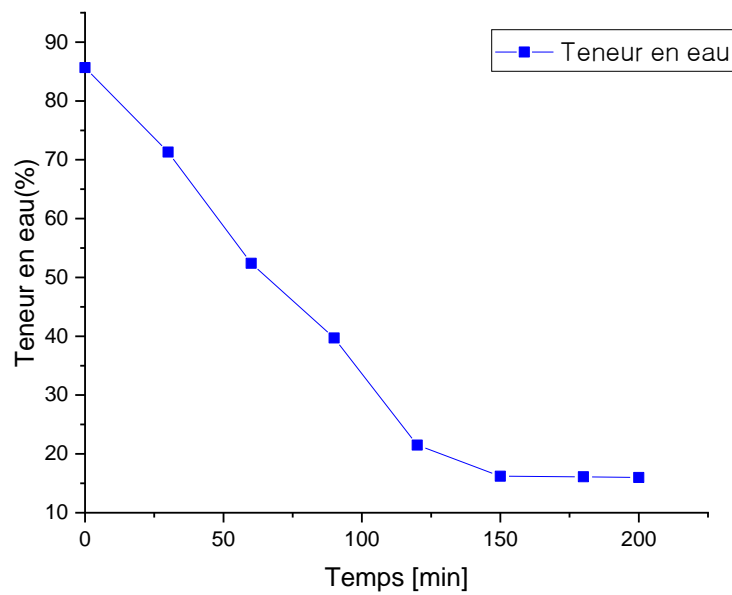


Figure. III. 6:Variation de teneur en eau en fonction de temps (60°C°).

III.4.2. Variation de la vitesse de séchage:

- Le cas de 40°C°:

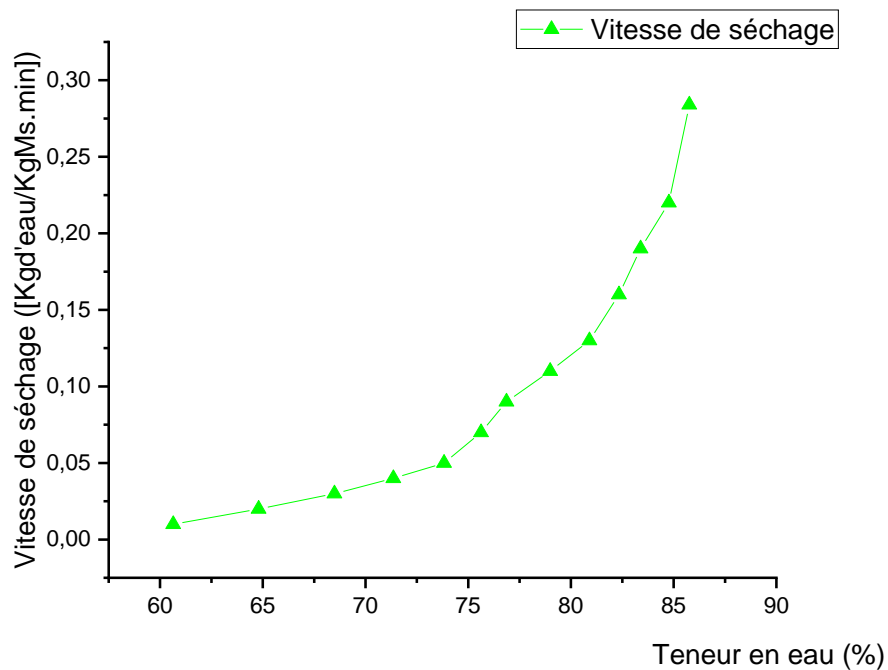


Figure. III. 7:Variation de la vitesse de séchage au cours de teneur en eau(40°C°)

- Le cas de 60C°:

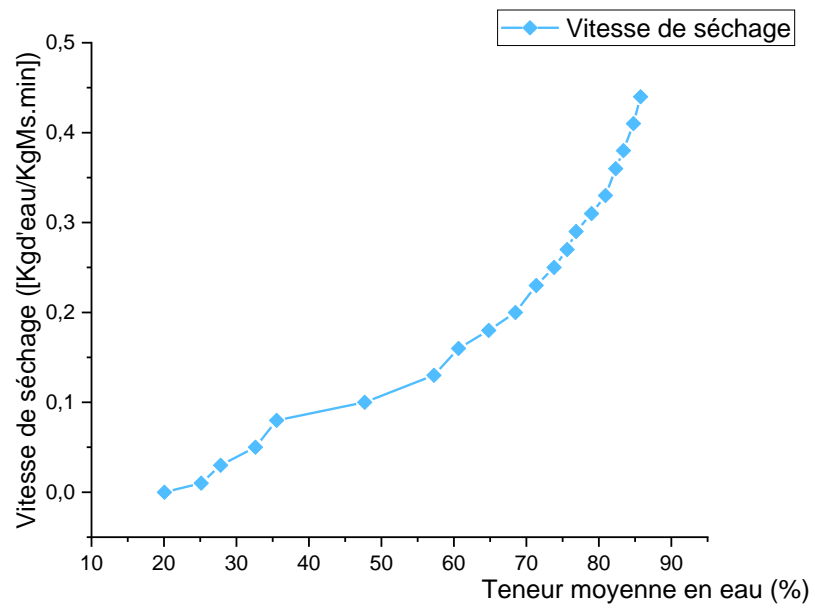


Figure. III. 8:Variation de la vitesse de séchage au cours de teneur en eau(60C°)

III.5. Conclusion :

Ce chapitre montre la procédure expérimentale à suivre pour arriver à des résultats satisfaisants. L'étude des conditions externes du séchage sur le produit à sécher est limitée à l'effet de la température et de la vitesse de l'air. Le séchage se traduit par la diminution de l'humidité contenue à l'intérieur du produit, comme le montrent les courbes obtenues.

L'augmentation du débit d'air et de la température permet d'accroître les échanges thermiques et massiques et par conséquent d'élever la température du produit à sécher et surtout les quantités d'eau évaporées.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette réalisation se veut un premier pas vers une meilleure compréhension du phénomène de séchage. Nous choisissons nos équipements en fonction des fonctionnalités requises, du coût des équipements, des contraintes techniques et de la complexité de mise en œuvre. La réalisation de ce séchoir nous donne également l'opportunité de travailler dans plusieurs domaines à la fois, notamment la programmation, l'électronique, la gestion de l'énergie et la mécanique.

Nous avons commencé par une étude théorique du principe de séchage, puis nous avons choisi un appareil qui doit être capable de sécher des produits dans des situations où cette opération doit affecter en même temps son produit pendant une durée assez longue. Ce sont autant de facteurs limitants qui ont contribué à cette conception, notamment un système de soufflage et de chauffage électrique de l'air pour des vitesses de séchage raisonnables pour accélérer le traitement des légumes et éviter leur dégradation, et un boîtier de contrôle pour automatiser entièrement l'opération de séchage. Les résultats obtenus sont globalement satisfaisants, et de nombreux tests de fonctionnement ont été réalisés, les résultats sont tous concluants ; le séchage s'effectue automatiquement jusqu'au bout, donnant de très bons légumes séchés. C'est la cible principale assignée à notre mémoire. Cela ne nous empêche pas de continuer à étudier le phénomène de séchage et d'étudier l'effet de paramètres tels que la température de séchage ou la charge du séchoir sur le temps de séchage.

Cela nécessite d'équiper le séchoir de moyens de mesure et de contrôle de la température et de la vitesse du vent. Des expérimentations d'abord sur le four nous ont permis d'obtenir des courbes de séchage caractéristiques indispensables avant même la conception de notre appareil. Les prochaines étapes sont :

- Déterminer les meilleures conditions pour son fonctionnement
- Comprendre le comportement de nos produits.
- Comprendre comment des paramètres tels que la température et le poids du produit affectent le temps de séchage

Enfin, cette étude montre son application à un projet de terrain pour sécher différents produits consommés et séchés. Car le séchage est le meilleur moyen d'éviter la dégradation de certains produits récoltés à très haute valeur.

Référence:

1. Laouini, A., et al. *Realization of a Solar Dryer Assisted by a Parabolic Dish Concentrator*. in *Defect and Diffusion Forum*. 2021. Trans Tech Publ.
2. Chalal, N., A. Belhamri, and L. Bennamoun, *Etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect*. Revue des énergies renouvelables, 2008.
3. Boughali, S., *Etude et optimisation du sechage solaire des produits agro-alimentaires dans les zones arides et desertiques*. 2010, Université de Batna 2.
4. Bensedik, A., *Modélisation et simulation du séchage de la figue par des séchoirs solaires indirects fonctionnant en convection forcée*. Mémoire de magister. Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, 2011.
5. Sabah, M., *Recherche et Développement*.
6. Roquebert, M., *Les moisissures: nature, biologie et contamination*. Documentation Muséum d'Histoire Naturelle, Laboratoire de Cryptogamie, 1997.
7. Cruz, J., et al., *Conservation des graines en régions chaudes (2 éd'n)*. Coll. Minist. Fr Coop et Dév. Techniques rurales en Afrique, CEEMAT/CIRAD: Montpellier, 1988. **545**.
8. Sablani, S.S. and S. Rahman, *Fundamentals of food dehydration*, in *Food drying: Science and technology*. 2008, DEStech Publications, Inc., Pennsylvania, USA. p. 1-42.
9. Dagueneat, M., *Les séchoirs solaires*. 1985.
10. Harzoune, M., *Alain Lorne La Route brûlée (Préface de Gilles Perrault)*, Phébus, 1996. *Hommes & Migrations*, 1997. **1210**(1): p. 171-171.
11. Alibas, I., *Microwave, air and combined microwave–air-drying parameters of pumpkin slices*. *LWT-food science and technology*, 2007. **40**(8): p. 1445-1451.
12. Bonazzi, C. and J.-J. Bimbenet, *Séchage des produits alimentaires: Appareils et applications*. Techniques de l'ingénieur. Agroalimentaire, 2008. **2**(F3002).
13. Bozin, B., et al., *Phenolics as antioxidants in garlic (Allium sativum L., Alliaceae)*. *Food chemistry*, 2008. **111**(4): p. 925-929.
14. Lewicki, P.P., *Effect of pre-drying treatment, drying and rehydration on plant tissue properties: A review*. *International Journal of Food Properties*, 1998. **1**(1): p. 1-22.
15. Moses, J., et al., *Novel drying techniques for the food industry*. *Food Engineering Reviews*, 2014. **6**(3): p. 43-55.

16. Sacilik, K., *Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (Cucurbita pepo L.)*. Journal of food engineering, 2007. **79**(1): p. 23-30.
17. Berk, Z., *Food process engineering and technology*. 2018: Academic press.
18. Communay, P.-H., *Héliothermique: le gisement solaire, méthodes et calculs*. 2002: Groupe de recherche et d'édition.
19. LABED, A., *Contribution à l'étude des échanges convectifs en régime transitoire dans les Capteurs Solaires Plans à air; Application au Séchage des produits agro-alimentaires*. 2012, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA.
20. HOUHOU, H., *Etude théorique et expérimentale du séchage solaire de certains produits agro-alimentaires*. 2012, Université Mohamed Khider–Biskra.
21. Madhlopa, A., S. Jones, and J.K. Saka, *A solar air heater with composite–absorber systems for food dehydration*. Renewable energy, 2002. **27**(1): p. 27-37.
22. Lahsasni, S., et al., *Thin layer convective solar drying and mathematical modeling of prickly pear peel (Opuntia ficus indica)*. Energy, 2004. **29**(2): p. 211-224.
23. Pangavhane, D. and R. Sawhney, *Review of research and development work on solar dryers for grape drying*. Energy conversion and management, 2002. **43**(1): p. 45-61.
24. Ekechukwu, O.V. and B. Norton, *Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology*. Energy conversion and management, 1999. **40**(6): p. 615-655.
25. Dudez, P., A. Thémelin, and M. Reynes, *Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes: expériences et procédés*. 1996: Édition du Gret.
26. Bala, B., et al., *Solar drying of pineapple using solar tunnel drier*. Renewable Energy, 2003. **28**(2): p. 183-190.
27. Simate, I., *Optimization of mixed-mode and indirect-mode natural convection solar dryers*. Renewable energy, 2003. **28**(3): p. 435-453.
28. Pangavhane, D.R., R. Sawhney, and P. Sarsavadia, *Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer*. Energy, 2002. **27**(6): p. 579-590.
29. Mujumdar, A.S. *Role of IDS in promoting innovation and global R&D effort in drying technologies*. in *Proceedings of the 14th International Drying Symposium*. 2004. S. Paulo Brasil.
30. Li, Z., et al. *Fluidization Characteristics in a Fluidized bed of Dissimilar Particles*. in *13th International Drying Symposium (IDS)*. Beijing, China, v. A. 2002.
31. Strumillo, C. and T. Kudra, *Drying: principles, applications and design*. Switzerland. 1986, Gordon and Breach Science Publishers.

32. Charreau, A. and R. Cavallé, *Opérations unitaires. Séchage. II. Appareillage et choix d'un procédé*. Techniques de l'ingénieur. Génie des procédés, 1991. 2(J2482): p. J2482. 1-J2482. 18.
33. <https://www.tutoduino.fr/tutoriels/controler-ventilateur-brushless-arduino/>.
34. <https://www.positron-libre.com/electronique/arduino/arduino.php>.
35. <https://www.docs.arduino.cc/hardware/nano>.
36. <https://www.docs.arduino.cc/retired/getting-started-guides/ArduinoLilyPad>.
37. <https://www.docs.arduino.cc/retired/boards/arduino-BT>.
38. <https://www.docs.arduino.cc/hardware/mega-2560>.
39. <https://www.docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>.
40. <https://www.docs.arduino.cc/retired/getting-started-guides/ArduinoEthernetShield>.
41. <https://www.docs.arduino.cc/retired/getting-started-guides/ArduinoLeonardoMicro>.
42. <https://www.docs.arduino.cc/hardware/duo>.
43. Beille, B.C.B.P.A.B., *Carte ARDUINO UNOMicrocontrôleur ATmega328*. 2019-2020 p. 3/29.
44. http://www.mon-club-elec.fr/pmwiki_reference_arduino/pmwiki.php?n=Main.MaterielUno.
45. Tavernier, C., *Arduino: Applications avancées: Claviers tactiles, télécommande par Internet, géolocalisation, applications sans fil*. 2012: Dunod.
46. <https://www.components101.com/switches/5v-dual-channel-relay-module-pinout-features-applications-working-datasheet>.
47. <https://www.aranacorp.com/fr/utilisation-dun-module-relais-avec-arduino/>.
48. http://www.wikidebrouillard.org/wiki/Item:Afficheur_LCD.
49. <https://www.gotronic.fr/art-capteur-de-t-et-d-humidite-dht22-20719.htm>.
50. <http://nagashur.com/blog/2013/06/18/lire-la-valeur-dune-sonde-de-temperature-et-d%E2%80%99hygrometrie-dht11/>.
51. <http://french.strain-gaugeloadcell.com/sale-11396630-fl-25kg-load-cell-for-weighing-scale-aluminum-alloy-industrial-load-cells.html>.
52. <https://www.gotronic.fr/art-mf25100v2-28490.htm>.