الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Mécanique



Projet de fin d'étude

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

Filière : électromécanique

Spécialité : mécatronique

THEME

Développement d'un système de séchage Intelligent

Présenté par :

- **BELAISSA Yahia**
- **GACEM Mohamed Abdelghani**

Encadré par :

- **Dr. REBHI Redha**
- **Mr. CHEDLI Samir**

2020/2021

Dédicace

Ma mère la source et l'espoir !

Mon père le repère et l'exemplaire !

A vous je dédis ce modeste mémoire pour

Avoir m'ont encouragé et poussé à atteindre l'idéal, m'ont soutenu tout au long de mes études.

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents et toute ma famille,

Mes Amis.

Je dédie enfin ce mémoire à toute personne ayant contribué de près ou de loin à sa concrétisation

REMERCIEMENTS

On remercie Allah qui nous a aidés et nous a donné la Patience, le courage et la force d'achever ce travail.

Nous tenons à remercier en cette occasion tout le corps professoral et administratif de la faculté de génie mécanique de l'université yahia fares de Médéa pour la richesse et la qualité de leurs enseignements et qui déploient de grands efforts actualisée.

Nous tenons à remercier sincèrement notre encadreur Mr REBHI Ridha pour nous avoir encadré et dirigé ce travaille qui a été disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Un grand merci à Mr CHADLI Samir notre co-encadreur, pour son aide, son soutien, ses encouragements, et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance et notre gratitude à tous nos enseignant(e)s qui nous ont accompagnés(e)s durant notre formation et nos familles et nos ami(e)s pour leurs aides considérables.

A tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Yahia

Abdelghani

ملخص

في هذا العمل قمنا بتصميم وبناء مجفف شمسي غير مباشر للخضار والفواكه وخاصة الطماطم في ولاية المدية، وتمت عملية التصميم باستخدام برنامج صوليدووركس.

لمراقبة درجة الحرارة والرطوبة في هذا النظام، استخدمنا لوحة اردوينو نانو، وأجهزة استشعار درجة الحرارة والرطوبة، واللوازم الإلكترونية، مجتمعة في لوحة إلكترونية واحدة.

تتيح لوحة اردوينو نانو إنشاء رابط جيد بين نظام التجفيف والهاتف الذكي (بلوتوث) لعرض جميع البيانات في الوقت الفعلي.

وأخيرًا، تم عرض النتائج على شكل منحنيات لتسهيل القراءة والتحليل والمناقشة.

الكلمات المفتاحية: أردوينو نانو، مستشعر درجة الحرارة و الرطوبة، مجفف شمسي غير مباشر، صوليدووركس، بلوتوث.

Résumé

Dans ce travail, nous avons conçu et réalisé un séchoir solaire indirect pour les légumes et les fruits, notamment les tomates, dans l'état de Médéa. Le processus de conception a été réalisé à l'aide du logiciel Solidworks.

Pour surveiller la température et l'humidité dans ce système, nous avons utilisé une carte nano Arduino, des capteurs de température et d'humidité et des fournitures électroniques, combinés en une seule carte électronique.

La carte Arduino Nano permet d'établir une bonne liaison bluetouth entre le système de séchage et le Smartphone afin d'afficher toutes les données en temps réel.

Enfin, les résultats ont été présentés sous forme des courbes pour faciliter la lecture, l'analyse et la discussion.

Mots clés : Arduino Nano, capteur de température et d'humidité, séchoir solaire indirect, tomate, bluetooth.

Abstract

In this work, we designed and built an indirect solar dryer for vegetables and fruits, especially tomatoes, in the state of Medea. The design process was carried out using Solidworks software.

To monitor the temperature and humidity in this system, we used an Arduino Nano board, temperature and humidity sensors, and electronic supplies, combined into a single electronic board.

The Arduino Nano board makes it possible to establish a good bluetouth link between the drying system and the smatphone in order to display all the data in real time.

Finally, the results were presented in the form of curves to facilitate reading, analysis and discussion.

Keywords: Arduino Nano, temperature and humidity sensor, indirect solar dryer, tomato, bluetooth.

Liste des figures

Figure I.1 : Cinétique de séchage 7
Figure I.2 : Principe de séchage à l'air libre 11
Figure I.3 : Le principe d'un échoir solaire direct 12
Figure I.4 : Le principe d'un échoir solaire indirect 13
Figure I.5 : Séchoir solaire hybride 14
Figure I.6 : Le principe d'un séchoir solaire mixte 15
Figure II.1 : Schéma descriptif du système de séchage solaire 23
Figure II.2 : Système de séchage solaire 23
Figure II.3 : Schéma descriptif d'Unité de Production d'air Chaud 24
Figure II.4 : Unité de Production d'air Chaud 24
Figure II.5 : Schéma descriptif de la Chambre de Séchage 25
Figure II.6 : La Chambre de Séchage 25
Figure II.7 : Information sur SolidWorks 26
Figure II.8 : Interface graphique de l'Unité de Production d'air Chaud sous-SolidWorks 27
Figure II.9 : Interface graphique de la Chambre de Séchage en 3D sous-SolidWorks 27
Figure II.10 : Interface graphique de la porte en 3D sous-SolidWorks 28
Figure II.11 : Interface graphique des claies en 3D sous-SolidWorks 28
Figure II.12 : Interface graphique du Verre en 3D sous-SolidWorks 28
Figure II.13 : Les composants avant assemblage 29
Figure II.14 : L'assemblage final 30
Figure II.15 : Mise en plan de l'unité de production 31
Figure II.16 : Mise en plan de chambre de séchage 32
Figure II.17 : Mise en plan de porte 33
Figure II.18 : Mise en plan des Claies 34
Figure II.19 : Mise en plan du Verre 35
Figure III.1 : Schéma synoptique de la carte de mesure 39
Figure III.2 : La carte Arduino Nano 40
Figure III.3 : Microcontrôleur ATMega328 41

Figure III.4 : Brochage du microcontrôleur Atmega328 41
Figure III.5 : Description des Entrées /Sorties de la carte Arduino Nano 42
Figure III.6 : Brochage de l'Arduino Nano 42
Figure III.7 : Afficheurs LCD alphanumérique à interface parallèle 45
Figure III.8 : Interface I2C d'un module LCD 45
Figure III.9 : Montage du Module I2C avec l'afficheur LCD 46
Figure III.10 : Le port de connexion de la carte 46
Figure III.11 : Module Adaptateur de carte SD 47
Figure III.12 : Module Bluetooth de type HC-05 48
Figure III.13 : L'encodeur rotatif 49
Figure III.14 : La sonde DHT 22 49
Figure III.15 : La sonde DHT11 49
Figure III.16 : Schéma électrique 51
Figure III.17 : Interface principale du logiciel EAGLE 52
Figure III.18 : Circuit imprimé «coté soudure». 53
Figure III.19 : Photo de la carte de mesure 53
Figure III.20 : présentation de logiciel Arduino Nano 54
Figure III.21 : Le choix de la carte a utilisée 54
Figure III.22 : Le port de programmation de la carte 55
Figure III.23 : Les étapes de téléchargement du code 56
Figure III.24 : Téléchargement de la librairie en format zip 57
Figure III.25 : Rajout d'une librairie par l'interface Arduino 57
Figure III.26 : Menu principale 58
Figure III.27 : Option D'affichage 58
Figure III.28 : Option Paramètres 59
Figure III.29 : Option Data 59
Figure IV.1: Nettoyage du produit 61
Figure IV.2 : Triage du produit 61
Figure IV.3 : Découpage avec épaisseurs de 2cm 61
Figure IV.4 : Découpage avec épaisseurs de 1cm 61

Figure IV.5 : Tranches de tomates disposées sur les claies du dispositif de séchage 61
Figure IV.6 : Evolution des températures expérimentales pour la journée du 21/05/2021. 62
Figure IV.7 : Evolution des températures moyenne pour la journée du 21/05/2021..... 62
Figure IV.8 : Evolution des températures expérimentales pour la journée du 22/05/2021. 63
Figure IV.9 : Evolution des températures moyenne pour la journée du 22/05/2021..... 63
Figure IV.10 : Evolution des l'humidité relative pour la journée du 21/05/2021. 64
Figure IV.11 : Evolution des l'humidité relative pour la journée du 22/05/2021. 65
Figure IV.12 : Evolution des températures expérimentales pour la journée du 28/05/2021. ... 66
Figure IV.13 : Evolution des températures moyenne pour la journée du 28/05/2021. 66
Figure IV.14 : Evolution des températures expérimentales pour la journée du 29/05/2021 67
Figure IV.15 : Evolution des températures moyenne pour la journée du 29/05/2021...67
Figure IV.16 : Evolution des températures expérimentales pour la journée du 30/05/2021 68
Figure IV.17 : Evolution des températures moyenne pour la journée du 30/05/2021 68
Figure IV.18 : Evolution des l'humidité relative pour la journée du 28/05/2021..... 69
Figure IV.19 : Evolution des l'humidité relative pour la journée du 29/05/2021..... 69
Figure IV.20 : Evolution des l'humidité relative pour la journée du 30/05/2021. 70
Figure IV.21 : Aspect final des lamelles de tomate séchées (Ep = 1cm) 71
Figure IV.22 : Aspect final des lamelles de tomate séchées (Ep = 2cm) 71

Liste de tableaux

Tableau I.1 : Données de fonctionnement des séchoirs inventorié 10
Tableau I.2 : structure de quelques séchoirs solaire 15
Tableau I.3 : Caractéristiques des produits séchés 17
Tableau III.1 : Caractéristiques de la carte Arduino Nano 40
Tableau III.2 : Brochage de la carte Arduino 43
Tableau III.3 : comparaison entre le capteur DHT11 et DHT22 50

Sommaire

Listes des figures I
Liste des tableaux IV
Introduction Générale 1
Chapitre I : Généralité sur le séchage
I.1. introduction 4
I.2. Définition de séchage 4
I.3. Le principe de séchage 5
I.4. Les processus de séchage 5
I.4.1. Par conduction 5
I.4.2. Par convection 5
I.4.3. Par les rayonnements 6
I.4.4. Par perte diélectrique 6
I.4.5. Par lyophilisation 6
I.5. Cinétique du séchage 6
I.5.1. Période de mise en température (Période 0) 6
I.5.2. Période à vitesse constant 7
I.5.3. Période de ralentissement 7
I.6. Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage 7
I.6.1. Influence de la température de l'air 7
I.6.2. Influence de la vitesse de l'air 8
I.6.3. Influence de l'humidité de l'air 8
I.7. Vitesse de séchage 8
I.8. Différents méthodes du séchage 9
I.8.1. Séchage mécanique 9
I.8.2. Séchage chimique 9
I.8.3. Séchage thermique 9
I.9. Caractéristiques de l'air de séchage. 9
I.9.1. Humidité. 9
I.9.2. Humidité absolue 9
I.9.3. Humidité relative. 10

I.9.4. Température de l'air de séchage 10
I.10. Différentes types de séchoirs solaires 11
I.10.1. Les Séchoirs naturels 11
I.10.2. Les séchoirs solaires directs 11
I.10.2.1. Principe de fonctionnement 12
I.10.2.2. Avantages 12
I.10.2.3. Inconvénients 12
I.10.3. Les séchoirs solaires indirects 12
I.10.3.1. Principe de fonctionnement 13
I.10.3.2. Avantages 13
I.10.3.3. Inconvénients 13
I.10.4. Les séchoirs hybrides 13
I.10.4.1. Avantages 14
I.10.4.2. Inconvénients 14
I.10.5. Les séchoirs mixtes 14
I.11. Les déférents types de structure de séchoirs solaire 15
I.12. Produits séchés 16
I.12.1. Types de produits séchés 16
I.12.2. La charge surfacique du produit en eau 16
I.13. Conclusion 18
Chapitre II : Conception d'une maquette.
II.1. Introduction 20
II.2. La conception assistée par ordinateur (CAO) 20
II.2.1. définition. 20
II.2.2. Historique 20
II.2.3. L'informatique et l'aide à la conception 21
II.2.4. La CAO et la mécanique 22
II.3. Système de Séchage Solaire Indirect 22
II.3.1. Unité de Production d'air Chaud. 23
II.3.2. Chambre de Séchage. 24
II.4. Logiciel utilisé 25
II.4.1. Solidworks 25
II.4.2. Historique 25

II.4.3. Fonctionnement 26
II.5. Conception des composants du système de séchage 26
II.5.1. Présentation de l'Unité de Production d'air Chaud en 3D sous-SolidWorks 26
II.5.2. Présentation de la Chambre de Séchage en 3D sous-SolidWorks 27
II.5.3. Présentation de la porte en 3D sous-SolidWorks 28
II.5.4. Présentation des claies en 3D sous-SolidWorks 28
II.2.5. Présentation du verre en 3D sous-SolidWorks 28
II.6. Assemblage des composants 29
II.7. Mise en plan 30
II.7.1. Mise en plan de chaque pièce 31
II.7.1.1. Mise en plan de l'unité de production 31
II.7.1.2. Mise en plan de chambre de séchage 32
II.7.1.3. Mise en plan de porte 33
II.7.1.4. Mise en plan des Claies 34
II.7.1.5. Mise en plan du Verre 35
II.8. Conclusion 36
Chapitre III : Système de mesure de la température et de l'humidité.
III.1. Introduction. 38
III.2. Partie Hardware 38
III.2.1. Schéma synoptique général 38
III.2.2. Bloc de gestion et de traitement 39
III.2.2.1. La Carte Arduino Nano 39
III.2.2.2. Caractéristiques de la carte Arduino Nano 40
III.2.2.3. Microcontrôleur ATMega328 40
III.2.2.4. Les entrées / sorties de la carte Arduino Nano 42
III.2.3. Bloc d'alimentation 44
III.2.4. Bloc d'affichage 44
III.2.4.1. L'afficheur LCD (Liquide Crystal Display) 44
III.2.4.2. Définition de l'interface I2C 45
III.2.4.3. Objectif de l'installation de l'afficheur LCD 16x4 avec interface I2C 45
III.2.5. Bloc horloge temps réel 46
III.2.6. Bloc de stockage de données 47
III.2.7. Bloc de communication Bluetooth 48
III.2.8. Bloc de commande 48

III.2.9. Capteur de température et d'humidité 49
III.2.10. Présentation du Schéma électrique de la carte de mesure 50
III.2.11. Développement du circuit imprimé (PCB) 52
III.3. Partie SOFTWARE 54
III.3.1. l'environnement de la programmation 54
III.3.2. Structure générale d'un programme 54
III.3.3. Transfert du programme 54
III.3.4. Description du programme 55
III.3.5. Les étapes de création d'un programme 55
III.3.6. Bibliothèques Arduino 56
III.3.7. Menu de la carte 58
III.3.7.1. Le menu principal 58
III.4. Conclusion 59
Chapitre IV : Résultats et discussions
IV.1. Introduction 61
IV.2. Préparation des Échantillons 61
IV.3. Expérience n⁰1 62
IV.3.1.Variation de la température de différents éléments du séchoir 62
IV.3.2.Variation de la l'humidité relative de différents éléments du séchoir 64
IV.4. Expérience n⁰2 65
IV.4.1. Variation de la température de différents éléments du séchoir 65
IV.4.2. Variation de la l'humidité relative de différents éléments du séchoir 69
IV.5. Influence de la taille du produit sur la qualité du produit séché 71
IV.6.Conclusion 72
Conclusion générale 73
BIBLIOGRAPHIE
ANNEXES

Introdution Générale

Le séchage est une opération importante dans les domaines agro-alimentaire et industriel, il consiste à éliminer totalement ou partiellement l'eau d'un produit humide. Le séchage direct au soleil est la méthode la plus utilisée dans la plupart des pays en voie de développement, pour préserver les produits agro-alimentaires [**5**]. Pendant le séchage par cette méthode, des pertes considérables, en qualités, et en quantités, peuvent se produire en raison de diverses influences telles que les oiseaux, les insectes, les micro-organismes, les poussières, les pluies etc. L'utilisation des séchoirs solaires dans les pays en voie de développement peut réduire les pertes et améliorer la qualité du produit sec [**10**].

Ce travail présente les résultats d'une étude expérimentale du séchage solaire indirect d'un produit agro-alimentaire (la tomate) à Médéa, Algérie. Ce type de séchoir est peut coûteux, simple à réaliser et adapté au séchage des produits agro-alimentaires. Le choix de la tomate est justifié par sa disponibilité irrégulière: abondance au printemps et en été due à une surproduction et rareté en automne et en hiver, où son prix dépasse largement celui des autres fruits. Sa grande consommation est connue, surtout en Algérie, dans les salades et les autres préparations de tous les jours.

Pour rendre ce système conçu plus intelligent, nous avons surveillé le séchage solaire indirect à distance à l'aide d'un capteur de température et d'humidité et d'une carte électronique programmable, Arduino Nano, qui ont été personnellement programmés afin de lire les informations obtenues et de créer des courbes à partir des résultats expérimentaux.

Notre projet consiste à faire le control d’un système de séchage solaire indirect par une carte électronique arduino Nano.

Dans ce sens, notre modeste travail est organisé en quatre chapitres :

- ✓ Le premier chapitre présente des Généralités sur le séchage.
- ✓ Dans le deuxième chapitre, présente la Conception d’une maquette par un solidworks.
- ✓ Le troisième chapitre présent le matériel et logiciel utiliser pour mesurer la température et humidité dans le système de séchage solaire indirect (carte arduino Nano, les capteurs DHT 22, afficheur LCD …etc).
- ✓ Le quatrième chapitre traitera des résultats de séchage de produit agroalimentaire (tomate).

Chapitre I

Généralité sur le séchage

I.1. Introduction:

Le séchage est, soit un moyen de conservation, soit une étape dans la transformation de certains produits. Il est utilisé dans le monde rural et dans le monde industriel à travers l'agro-alimentaire.

Les séchoirs qui fonctionnent avec des combustibles fossiles nécessitent et consomment beaucoup d'énergie. Le prix du pétrole va grandissant ces dernières années et va apparemment continuer sa flambée, il est donc important de développer un système de séchage gratuit en énergie. Le séchage solaire est parmi les applications de séchage, basé sur l'énergie du rayonnement solaire. Cette dernière présente une source d'énergie gratuite et inépuisable.

Les séchoirs solaires sont faciles à construire avec des outils et des matériaux localement disponibles qui peuvent fonctionner par convection naturelle ou forcée.

Le séchage nécessite de l'énergie et de la chaleur dépendant de l'humidité relative de l'air, de la température de séchage, des spécificités du produit concerné (épaisseur, superficie, et résistance à l'air), et de la teneur en eau de l'élément à sécher. Le fonctionnement du séchoir dépendra directement de la quantité d'irradiation te de l'humidité relative du lieu d'utilisation.

I.2. Définition de séchage :

Nous appelons séchage, l'opération ayant pour but d'éliminer partiellement ou totalement l'eau d'un corps humide par évaporation de cette eau.

Le corps humide en jeu peut être solide ou liquide, mais le produit final est solide, ce qui distingue le séchage de la concentration d'un liquide par évaporation, cas dans lequel le produit final est un liquide concentré.

Au cours du séchage, l'eau contenue dans le matériau disparaît peu à peu dans l'air ambiant sous l'action de deux phénomènes : l'évaporation de l'eau et sa diffusion à l'intérieur du matériau [**2**].

Ces phénomènes sont sous la dépendance des caractéristiques du gaz (air ou vapeur surchauffée) environnant à savoir

- ✓ Sa température.
- ✓ Son humidité relative.

- ✓ Sa vitesse.
- ✓ Sa pression.
- ✓ Débit.

L'évaporation de l'eau est un phénomène qui nécessite de la chaleur et qui est d'autant plus intense que la température du matériau est élevée [**1**].

I.3. Le principe de séchage:

Le séchage implique deux types de transferts: le transfert d'énergie thermique, de l'environnement vers le liquide à évaporer, et le transfert de masse, de l'intérieur du solide vers sa surface et ensuite le passage en phase gazeuse. La vitesse du séchage est directement liée à ces deux modes de transfert [**6**].

I.4. Les processus de séchage :

I.4.1. Par conduction :

Le produit à sécher se trouve en contact avec une paroi solide portée à une température élevée par chauffage (fumées, vapeurs d'eau...). La conduction à travers la paroi et la matière entraîne une augmentation de la température du composé à sécher : le liquide se vaporise donc par évaporation ou par ébullition s'il atteint sa température d'ébullition**.** Le flux thermique dans ce mode de transfert est représenté par la loi de FOURIE [**9**] :

$$\Phi = -\lambda\, S\, \frac{dT}{dx} \qquad \text{(I.1)}$$

Avec :

Φ: flux thermique.

λ:Conductivité thermique de la pellicule de produit (W/m.K).

$\frac{dT}{dx}$: Gradient de température entre la paroi chaude et le produi.

I.4.2. Par convection :

C'est le mode de séchage le plus utilisé dans l'industrie chimique, l'échange thermique est réalisé grâce à un contact direct entre le solide humide et le gaz caloporteur.

Ce type de transfert est exprimé par la loi de NEWTON suivante [**9**] :

$$\Phi = h\, S\ (T_a - T_s) \qquad \text{(I.2)}$$

Avec :

Φ : La quantité de chaleur transférée par unité du temps (W).

S : La surface d'échange (m²).

$(T_a - T_s)$: L'écart entre la température de l'air de séchage et la température superficielle du produit à sécher (K).

h : Le coefficient d'échange par convection (W/m².K).

I.4.3. Par les rayonnements :

Les techniques d'énergies radiantes (Ultra-violet, Infra rouge, Haute fréquence, Micro-onde) permettent d'assurer, lorsque le produit le permet, un séchage de très bonne qualité et de réduire considérablement les dépenses liées au poste énergie [**9**].

I.4.4. Par perte diélectrique :

Le séchage par perte diélectrique est basé sur le chauffage par l'électricité des substances non conductrices (diélectriques). Lorsqu'un matériau isolant est placé dans un champ électrique, ces molécules se polarisé. Lorsque la polarité des électrodes est inversée [**1**].

I.4.5. Par lyophilisation :

La lyophilisation est une opération de déshydratation à basse température qui consiste à éliminer par sublimation, la majeure partie de l'eau contenue dans un produit. Elle autorise une conservation à long terme grâce à l'abaissement de l'eau du produit [**1**].

I.5. Cinétique de séchage :

On étudie la cinétique de séchage des différents produits par des courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps, au celle donnant la vitesse de séchage (−dX/dT) en fonction de X. Ces courbes sont généralement obtenues pour différents conditions expérimentales (températures, vitesse de l'air asséchant, hygrométrie…). Elles caractérisent le comportement global du produit à sécher au cours du temps. Sur la courbe schématique présentée à la Figure (I.1), on peut distinguer trois phases :

I.5.1. Période de mise en température (Période 0) :

L'humidité du produit dans cette période varie mais pas sensiblement et la température du produit varie (croit ou décroît) jusqu'à la température humide correspondant à l'environnement séchant (zone A-B). Cette période est courte et n'apparaît véritablement que si les produits sont de grande taille, ou si la différence de température entre l'air et le produit est important [**4**].

I.5.2. Période à vitesse constant :

Durant cette période, la vitesse de séchage reste à peu près constante pour la plupart des produits. L'humidité se déplace vers la surface à l'état liquide principalement sous l'effet des forces capillaires, l'équilibre entre la diffusion dans la couche limite (à l'interface air matériau) et les mécanismes de transfert d'humidité interne au sein du produit vers la surface est établi, la température reste uniforme dans le produit car le flux de chaleur échangé avec l'air chaud est entièrement utilisé pour la vaporisation de l'eau à la surface, cette période s'achève lorsque les forces capillaires ne peuvent plus soutenir la vaporisation l'eau de surface, et couvre généralement une grande partie du temps de séchage [**4**].

I.5.3. Période de ralentissement :

Pendant cette phase, les forces capillaires ne sont plus suffisantes pour acheminer l'eau vers la surface du produit. La vitesse de séchage ne peut plus être maintenue constante et elle commence à décroître [**4**].

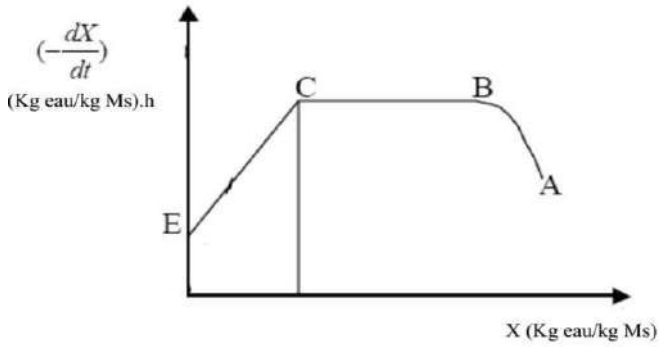


Figure I.1. Cinétique de séchage.

I.6. Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage :

I.6.1. Influence de la température de l'air :

La température de l'air asséchant influe considérablement sur la vitesse de séchage. Cette influence est due à l'apport de chaleur au produit qui croit avec la température de l'air. Elle est aussi due à la température du produit qui est d'autant plus importante que la température de l'air élevée. Par conséquent, les vitesses de diffusion de l'eau dans le produit augmentent avec la température [**3**].

I.6.2. Influence de la vitesse de l'air :

La vitesse de l'air agit positivement sur la cinétique de séchage surtout au début de l'opération. Cependant, pour des produits dont la cinétique de séchage est contrôlée par la migration interne de l'eau, l'influence de la vitesse de séchage de l'air devient très faible [**3**].

I.6.3. Influence de l'humidité de l'air :

La teneur en eau de l'air, joue un rôle important sur le comportement des cinétiques de séchage de certains produits. De même que pour la vitesse de l'air, cette influence est plus importante au début de séchage et diminue lorsque la température de l'air augmente [**3**].

I.7. Vitesse de séchage [1] :

La vitesse de séchage est définit comme le rapport entre la quantité d'eau évaporé de solide a séché par unité de temps et de masse de solide sec, ou toute simplement la limite du quotient de la différence de teneur ''Δm'' par l'intervalle de temps ''Δt'', c'est la grandeur qui caractérise pratiquement l'allure du transfert

La vitesse de séchage est fonction de très nombreux paramètres dont les plus importants sont :

- La nature, la porosité, la forme et l'humidité du produit.
- La température, l'humidité et la vitesse du l'air.

$$Vs = \frac{-dM_v}{S_s \,.dt} = \frac{M_s.dx}{S_s.dt} \qquad (I.3)$$

$$M_v = M_s.dX \qquad (I.4)$$

$$dX = X_e - X_s \qquad (I.5)$$

M_v: La masse d'eau évaporée.

M_s: La masse de produit sec.

dX: La variation de la teneur en eau de produit à sécher.

S_s: La surface de séchage

X_e: Teneur en eau de produit à l'entrée.

X_s: Teneur en eau de produit à la sortie.

I.8. Différents méthodes du séchage [4]:

I.8.1. Séchage mécanique :

C'est l'élimination du liquide par des forces purement mécaniques (pressage, Centrifugation, compression, décantation et filtration).

I.8.2. Séchage chimique :

C'est un procédé basé sur l'utilisation de produits déshydratants (osmotique) (chlorure de calcium,...) pour extraire l'eau.

I.8.3. Séchage thermique :

Ce type d'opération est essentiellement un transfert de masse nécessitant au préalable une «activation» de l'eau par une certaine quantité d'énergie apportée par un transfert de chaleur.

Les deux transferts se dédoublent en une phase externe et une phase interne :

- Transfert de chaleur interne, de la source de chaleur vers la surface du produit.
- Transfert de chaleur interne, de la surface vers le cœur du produit.
- Transfert de masse interne, du cœur vers la surface du produit.
- Transfert de masse externe de la surface du produit vers le milieu extérieur.

I.9. Caractéristiques de l'air de séchage :

I.9.1. Humidité :

Ce terme désigne le liquide contenu dans le corps solide, liquide ou pâteux, et devant être éliminé au cours du séchage.

I.9.2. Humidité absolue :

On appelle humidité absolue ou spécifique, ou teneur en humidité, ou plus simplement humidité d'un gaz, la masse d'humidité mélangée à un kilogramme de gaz sec, cette humidité que nous désignerons par Ha est donnée par la relation suivante [**3**] :

$$H_a = M_a/M_e \quad (kg_v.kg_{as}) \qquad \text{(I. 6)}$$

I.9.3. Humidité relative :

L'humidité relative ou degré hygrométrique est le rapport de la pression partielle de la vapeur dans le mélange à sa pression de saturation dans le même mélange, pris à la même

L'humidité relative ou degré hygrométrique est le rapport de la pression partielle de la vapeur dans le mélange température : $H_r = \frac{Pv}{Ps(t)}.100$ $\% 0 \geq H_r \geq 100\ \%$ (1. 7)

I.9.4. Température de l'air de séchage :

Les séchoirs solaires : la température de l'air varie entre 45°*C* et 55°*C* avec des maxima de 70°*C* (tableau I.1). Les plus hautes températures sont atteintes dans les régions ayant un fort ensoleillement, et avec des séchoirs munis d'une bonne isolation (cas de l'armoire indirect) et d'une grande surface de capteur [**7**].

Facteurs	**Dispositifs de séchage à l'air libre**	**Armoire directe**	**Serre**	**Armoire indirecte**
Energie	Exposition solaire directe Surface variable	Exposition solaire directe	Exposition solaire directe	Exposition solaire indirecte
Produits séchés	C : maïs, sorgho, mil, sésame T : manioc L:gombo, piment	L : oignon, choux, tomate, piment, gombo	L : oignon, choux tomate, gombo F : noix de coco	L : oignon, choux, tomate, piment F : noix de coco
Forme de Présentation des produits	graine, tranche, pièce	feuilles, tranche, pièce	feuilles, tranche, pièce	feuilles, tranche, pièce
Durée d'un cycle de séchage	Quelques jours	1 à 3 jours	1 à 3 jours	2 à 3 jours
Température maximale de l'air de séchage (°*C*)	Température ambiante (28 à35)	50	50	55

Tableau I.1 : Données de fonctionnement des séchoirs inventorié **[7].**

I.10. Différentes types de séchoirs solaires [4] :

I.10.1. Les Séchoirs naturels :

Ils utilisent directement le soleil et l'air, où les produits sont répartis sur des claies ou des nattes, dans des cribs, ou disposé même au sol. (Le principe de séchage à l'air libre est simple, le rayonnement solaire tombe sur la surface de la culture et une partie de l'énergie est réfléchie vers l'environnement (Figure. I.2).

Ces séchoirs sont très bon marché, mais nécessite une intervention humaine régulière, protection ou ramassage du produit en cas de pluie, malaxage fréquent, pour éviter la surchauffe de la couche supérieure et homogénéiser le produit pour permettre à la couche inférieure de sécher.

Ce type de séchoir est souvent traditionnel dans les communautés paysannes, pour répondre aux problèmes de la conservation temporaire du produit, en attendant la vente ou la consommation.

Il présente cependant, des inconvénients, qui sont : pertes du produit mal séché ou gâchés lors de remuage, destruction de vitamines A et C, par l'exposition directe au soleil, dégradation par les intempéries et les nuisibles (insectes, rats, poussières).

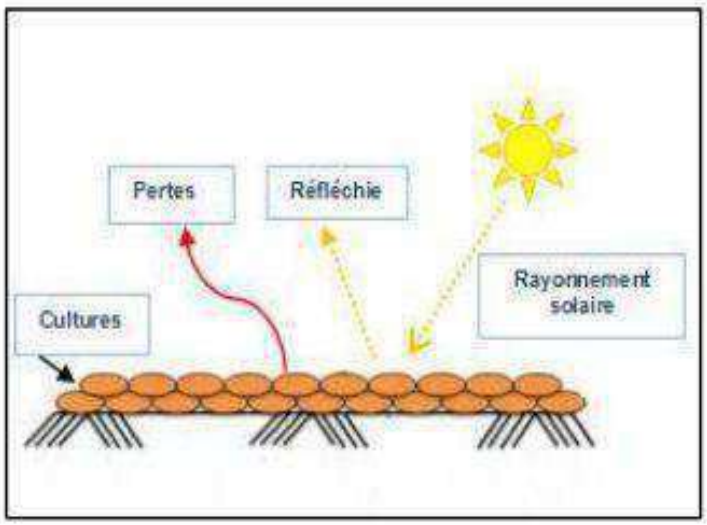


Figure I.2. Principe de séchage à l'air libre **[8].**

I.10.2. Les séchoirs solaires directs :

Les séchoirs solaires directs sont des dispositifs simples à utiliser et à construire. Ils offrent de large possibilités de conception : du séchoir coffre à plateau et adapté à la petite production, au séchoir cabane qui permet de traiter de grandes quantités.

I.10.2.1. Principe de fonctionnement :

Les rayons solaires frappent directement les produits. Le séchoir solaire direct se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois de chambre de séchage et de collecteur solaire Le fond de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter la capacité d'absorption de chaleur, une feuille de plastique ou polyéthylène transparent sert généralement de toit mais en peut également utiliser d'autres matériaux plus chères comme le verre ou les plastiques spéciaux (polyéthylènes agricoles).

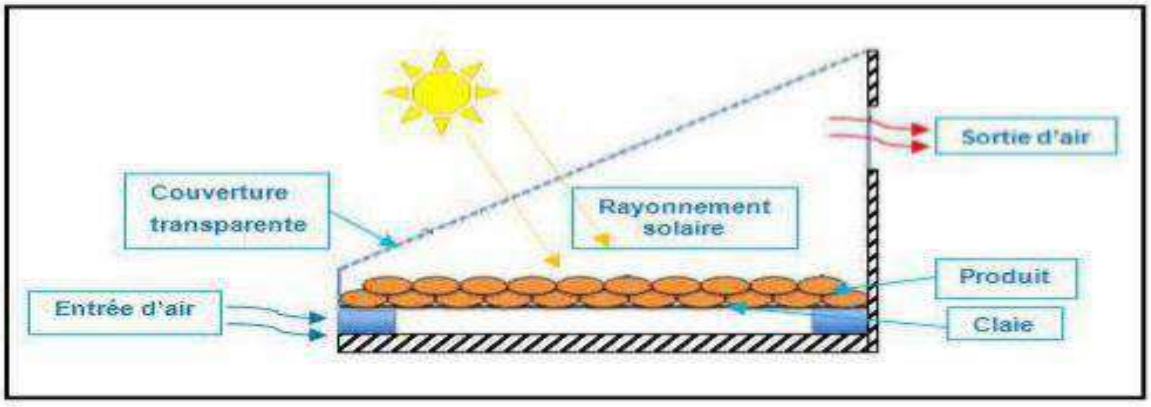


Figure I.3. Le principe d'un échoir solaire direct **[8].**

I.10.2.2. Avantages :

- Meilleure protection contre les poussières, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel.
- Pas besoin de main-d'œuvre qualifié.
- Grandes possibilités de conception.

I.10.2.3. Inconvénients :

- dégradation de la qualité par exposition direct au soleil, destruction de la vitamine A et C, flétrissement, décoloration.
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.
- Température relativement élevée dans le séchoir qui contribue avec l'exposition au soleil à la destruction des nutriments.
- Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risque de moisissure.

I.10.3. Les séchoirs solaires indirects:

Ces systèmes sont plus performants que les séchoirs directs, ils présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : sa couleur, sont aspect, sa valeur nutritive. Ils sont donc particulièrement adaptés au séchage des produits alimentaires.

I.10.3.1. Principe de fonctionnement :

Le séchoir solaire indirect se compose de parties : un collecteur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur, une chambre de séchage qui contient le produit et une cheminée (figure I-4). L'air pénètre dans le collecteur; il est chauffé, sa température augmente. L'air chaud monte par convection naturelle jusqu'à la chambre de séchage. La durée de séchage est très variable selon les conditions climatiques.

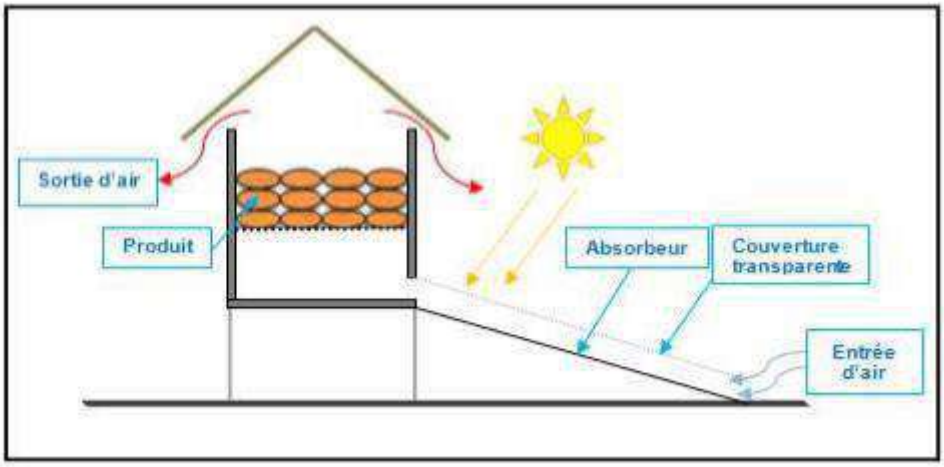


Figure I.4. Le principe d'un échoir solaire indirect **[8].**

I.10.3.2. Avantages :

- 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 des séchoirs localement, avec un coût réduit.
- Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles .

I.10.3.3. Inconvénient :

- Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir.
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.

I.10.4. Les séchoirs hybrides :

Les recherches se sont orientées vers les séchoirs hybrides utilisant une énergie d'appoint : fuel, électricité, bois, gaz ... l'apport d'énergie supplémentaire peut se situer à deux endroits différents du séchoir :

- ✓ Maintenir la température constante dans le séchoir par un brûleur à gaz, une résistance électrique, un feu du bois. Dans ce cas l'énergie solaire devient secondaire, elle permet simplement de préchauffer l'air.

- ✓ Augmentation de la circulation de l'air par des ventilateurs électriques, ici l'énergie solaire reste la source de chaleur mais le séchoir a une capacité d'évaporation plus importante grâce à une meilleure ventilation.

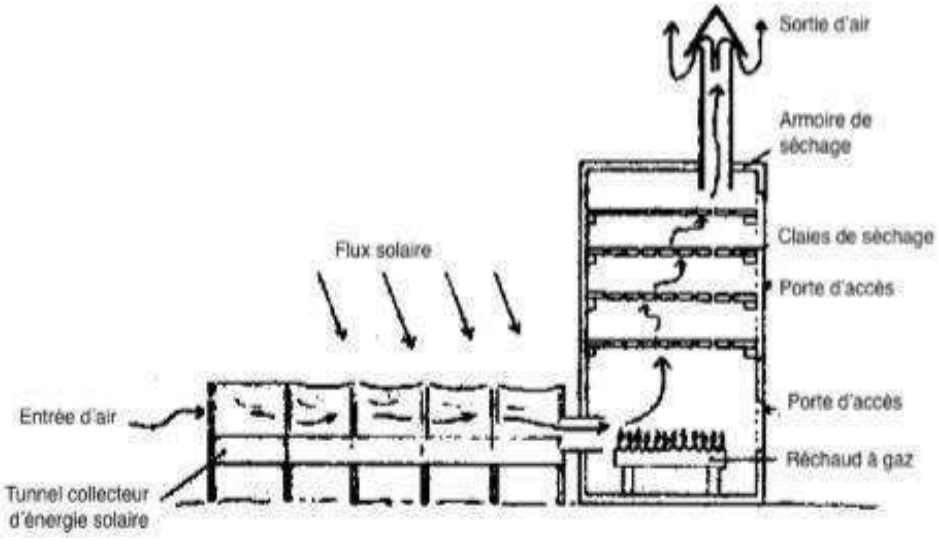


Figure I.5. Séchoir solaire hybride [**8**].

I.10.4.1. Avantages :

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

I.10.4.2. Inconvénients :

- Coût de production et d'investissement élevé.
- Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, pièce de rechange.
- Personnel qualifié pour la maintenance.

I.10.5. Les séchoirs mixtes :

Ces séchoirs combinent les dispositifs des séchoirs directs et indirects. Dans ce type de séchoirs, l'action combinée du rayonnement solaire direct sur le produit à sécher et le capteur solaire est de fournir la chaleur nécessaire pour le processus de séchage. Un séchoir mixte à circulation naturelle (figure I.6) aurait les mêmes dispositifs structurant qu'un séchoir indirect (capteur solaire, chambre de séchage, et une cheminé) mais les parois sont équipées par des plaques de verre de sorte que le rayonnement solaire empiète directement sur le produit comme le séchoir intégral.

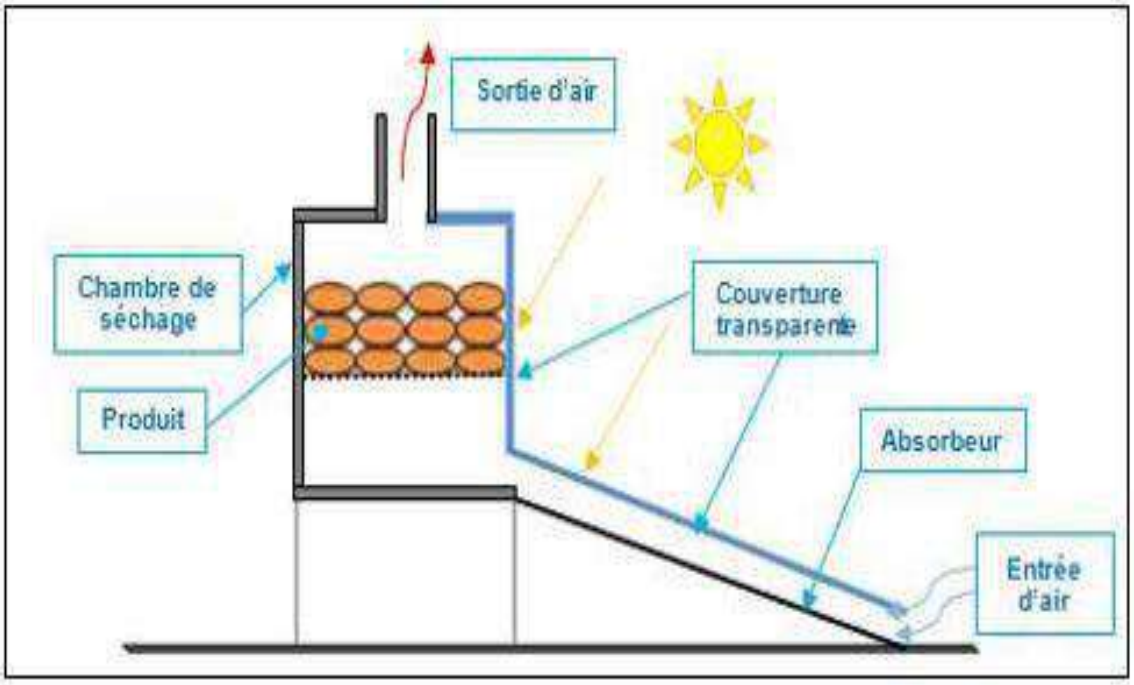


Figure I.6. Le principe d'un séchoir solaire mixte **[8].**

I.11. Les déférents types de structure de séchoirs solaire :

Pour améliorer l'efficacité de la dessiccation, il faut employer une sorte de structure qui capte la radiation solaire. Plusieurs types de séchoirs solaires ont été mis au point et sont illustrés ci-dessous **[4].**

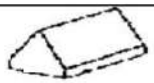
Dessiccation solaire	**description des types de séchoirs**	
Armoire directe	la chambre de séchage est émaillée et on n'emploie pas de collecteur solaire séparé.	
Armoire indirecte	Le collecteur solaire est séparé de la chambre de séchage.	
Tunnel direct	En général une structure avec un cadre en cerceau recouvert d'une ou deux épaisseurs de film plastique.	
Tunnel bas	Séchoir direct semblable à ci-dessus mais construit près du sol, en général ne peut contenir qu'une seule couche de produit.	
Tente	Séchoir direct avec un cadre droit plutôt que courbé.	
Bac	Séchoir indirect avec courant d'air forcé.	

Tableau I.2 : structure de quelques séchoirs solaire [**4**].

I.12. Produits séchés :

I.12.1. Types de produits séchés :

Le tableau (I.3) présente les différents produits séchés et leurs caractéristiques: les teneurs en eau initiales, les teneurs en eau finales en base sèche et les températures maximales auxquelles les produits peuvent être séchés. Les produits sont classés en céréales, tubercules, légumes et fruits selon la classification utilisée par la FAO. La cyanobactérie *Spiruline* est identifiée ici comme étant une légume de par sa teneur en eau très élevée La teneur en eau initiale des produits séchés varie en base sèche de 30% pour les céréales (maïs, mil, riz, etc.) à 1900% pour la tomate. La teneur en sucre varie de 0 à 27% pour la banane. Les différents composants des produits entraînent des comportements variés des produits au cours du processus de séchage : le brunissement enzymatique ou non, le croûtage et la décoloration. Ils peuvent provenir de l'exposition au rayonnement, {la chaleur, etc. Les épaisseurs données dans le tableau 2.10 indiquent la hauteur moyenne de la couche de produit **[7]**.

I.12.2. La charge surfacique du produit en eau :

Lors de l'enquête, nous avons constaté qu'en séchage solaire direct, sont transformés principalement des produits à teneur en eau initiale faible (céréales, légumineuses) et des légumes feuilles. Cette spécificité peut être attribuée à une charge surfacique en eau faible. Elle ne peut être obtenue avec les autres produits qu'en les parant en pièces très fines (formats non-traditionnels). La combinaison d'une charge surfacique en eau faible avec l'énergie solaire peu concentrée, permet d'avoir une teneur en eau assez faible après la première journée de séchage et limite ainsi les dégradations. La sensibilité des opérateurs à la perte de produit est importante quel que soit le type de séchoir **[7]**.

Produits séchés	**Teneur en eau initiale** (%)	**Teneur en eau finale** (%)	**Teneur en Sucre (g/100g)**	**Température maximale de séchage (°C)**
Céréales				
maïs	32 - 54%	14 - 18%	3,64	60
riz	32%	12%	0,13	50
sorgho, mil	27%	16%		60
Tubercules				
igname	233 - 400%	11 – 16%	5,8 – 7,2	65
manioc	163 - 233%	11 – 20%	3,9	65
Fruits				
ananas	400 - 567%	14 - 11%	6,4 - 14	65
banane	257 - 400%	14 - 18%	14,8 - 27	70
Légumes				
choux	400%	5%	2,8-3	60-65
carotte	233%	5%	6,7	75
tomate	1900%	8%	2,8 – 3,5	50-60
piment, poivron	245 - 567%	5-15%	2,2 – 4,7	70

Tableau I.3. Caractéristiques des produits séchés **[7]**.

I.13. Conclusion :

Le séchage est une opération unitaire mettant en jeu un transfert de matière (le liquide imprégnant le solide passe à l'état de vapeur dans une phase gazeuse) et un transfert thermique (une fourniture de chaleur permet le changement de phase du liquide). La vaporisation pourra s'effectuer par ébullition ou par évaporation.

Chapitre II

Conception d'une maquette

II.1. Introduction :

La croissante compétitivité existante dans le monde chaque fois plus complexe. Cela nous amène toujours à faire les choses plus rapidement et avec une plus grande valeur ajoutée. Il ne suffit pas de créer des solutions techniques répondant aux besoins des clients, mais il faut en plus que les solutions soient données avec la vitesse requise par le marché et qu'elles soient les plus performantes possible [11]. La conception mécanique est au cœur de la pratique professionnelle d'un ingénieur. Sur la base du cahier des charges, l'objectif du concepteur est d'atteindre rapidement et efficacement l'avant-projet optimisé. Dans ce chapitre, nous voulons présenter une conception d'un système de séchage solaire indirect utilisant le logiciel solidworks.

II.2. La conception assistée par ordinateur (CAO) :

II.2.1. définition :

La conception assistée par ordinateur ou CAO (en anglais, computer aided design ou CAD) comprend l'ensemble des logiciels et des techniques de modélisation géométrique permettant de concevoir, de tester virtuellement – à l'aide d'un ordinateur et des techniques de simulation numérique – et de réaliser des produits manufacturés et les outils pour les fabriquer.

On confond souvent CAO et DAO (dessin assisté par ordinateur) : la CAO n'a pas pour fonction première l'édition du dessin. Il s'agit d'un outil informatique souvent lié à un métier, fonctionnant en langage dit objet, et permettant l'organisation virtuelle de fonctions techniques. Cela permet ensuite la simulation de comportement de l'objet conçu, l'édition éventuelle d'un plan ou d'un schéma étant automatique et accessoire. En DAO, un trait est un trait et le logiciel ne permet pas l'interprétation technique de l'ensemble [12].

II.2.2. Historique :

Les débuts de la conception technique moderne sont issus des développements de la géométrie descriptive qui a commencé au 16ème et 17ème siècle. Les méthodes de dessins techniques se sont améliorées avec l'introduction des machines à dessiner, mais la création de dessins d'ingénierie a en réalité très peu changé depuis la seconde guerre mondiale. Dans les années 1950, le développement de l'informatique en temps réel a énormément progressé conjointement aux commandes numériques des machines-outils et à l'automatisation de la conception technique. Mais ce travail est le fruit de deux personnes en particulier, Patrick Hanratty et Ivan Sutherland, qui ont largement participé au développement de ce que nous appelons aujourd'hui la CAD ou Conception Assistée par Ordinateur. Les Pères de la CAO

Patrick J. Hanratty sont largement crédités comme «Le Père de CAD". En 1957, il développe pour la société General Electric un programme PRONTO (Program for Numerical Tooling Operations) et le premier langage de programmation de contrôle numérique. Quant à Yvan Sutherland, il présente en 1963 sa thèse de doctorat intitulée « Sketchpad » dans laquelle il développe le précurseur des programmes de conception assistée par ordinateur. Ce premier programme a comme caractéristique d'utiliser un crayon optique pour manipuler des objets affichés sur un écran cathodique. C'est le début de l'interface graphique et de la modélisation 3D. Les années 1960 et 1970 ont apporté d'autres développements et plusieurs sociétés voient le jour afin de commercialiser les premiers programmes de CAO : Evans & Sutherland, Appliquons, Computer vision ou encore M&S Computing. Avec l'émergence des stations de travail UNIX au début des années 80, les systèmes de CAO se développent énormément et sont surtout utilisés par l'aérospatiale, le secteur automobile et les indus.

L'introduction du premier Personal Computer par IBM, en 1981, ouvre la voie à l'utilisation à grande échelle de la Conception Assistée par Ordinateur. L'année suivante, un groupe de programmeurs créent Autodesk, et en 1983 ils réalisent AutoCAD, le premier programme de CAD importante pour l'IBM PC [13].

II.2.3. L'informatique et l'aide à la conception :

Tout système technique est l'association de fonctions. L'agencement de ces fonctions, leurs interactions, les incompatibilités éventuelles font partie du savoir de l'ingénieur. Lorsque le système est affecté d'un nombre trop grand de paramètres, il devient difficile de tout contrôler. La CAO permet de concevoir des systèmes dont la complexité dépasse la capacité de l'être humain comme en micro ou nanoélectronique. La conception virtuelle permet l'appréciation globale du comportement de l'objet créé avant même que celui-ci n'existe. En CAO, on ne dessine pas, on construit virtuellement un objet capable de réagir dans son espace non réel selon des lois régies par le logiciel. Le résultat, appelé maquette numérique constitue alors un véritable prototype évolutif. Chaque corps de métier peut disposer d'un outil CAO.

En mécanique, on peut concevoir une pièce où chaque forme répond à un besoin de fonctionnement ainsi qu'un mécanisme regroupant plusieurs pièces. En électronique, on peut assembler des composants (résistances, capacités, éléments de logique…) simulables : on pourra par exemple « construire » un nouveau micro-processeur regroupant plusieurs millions de transistors (3,1 pour le Pentium). D'une certaine façon, la PAO s'inscrit dans cet ensemble d'outils d'aide à la conception (création de documents) [14].

II.2.4. La CAO et la mécanique :

Le domaine de la mécanique est historiquement l'un des premiers à s'être doté, dans les années 1960, de logiciels de CAO. Elle permet au concepteur d'exprimer et de modéliser un grand nombre de contraintes (fonctionnalités, matériaux, capacité d'assemblage, fabrication, etc.) pendant la phase de conception d'un ensemble mécanique. Les logiciels correspondants sont utilisés lors d'une ou plusieurs phases du développement (ex: spécifications produit/procès, esquisses, dimensionnement, analyses cinématiques, analyses dynamiques, préparation de la fabrication, ...).

Les logiciels modernes permettent une conception directe en trois dimensions et sont surtout intéressants pour les fonctionnalités. Ces logiciels aident non seulement à la création des pièces mécaniques, ou à la mise en œuvre de leur fabrication, mais aussi à la simulation de leur comportement, et donc à la validation des solutions retenues.

Une fois la création terminée, l'exécution automatique de plans, respectant les conventions de représentation et visuellement corrects est facile. Le passage en mode 2D n'est plus ressort du dessinateur à la différence avec le dessin assisté par ordinateur qui demande de maîtriser à la fois, et en même temps, le fond (ce qu'on veut représenter) et la forme (le trait sur le plan), notions qui sont indépendantes pour le logiciel. La réalisation de plans techniques permettant la compréhension du fonctionnement reste toujours plus laborieuse.

Exemples de logiciels de CAO pour la mécanique :

- Free CAD, de Juergen Riegel, logiciel multiplateforme (Linux/Windows) distribué sous licence libre
- SOLID EDGE - Siemens PLM
- PythonOCC
- TopSolid
- SpaceClaim LTX
- SolidWorks
- AutoCAD [15].

II.3. Système de Séchage Solaire Indirect:

Il est constitué de l'unité de production d'air chaud ou capteur plan et de la chambre de séchage.

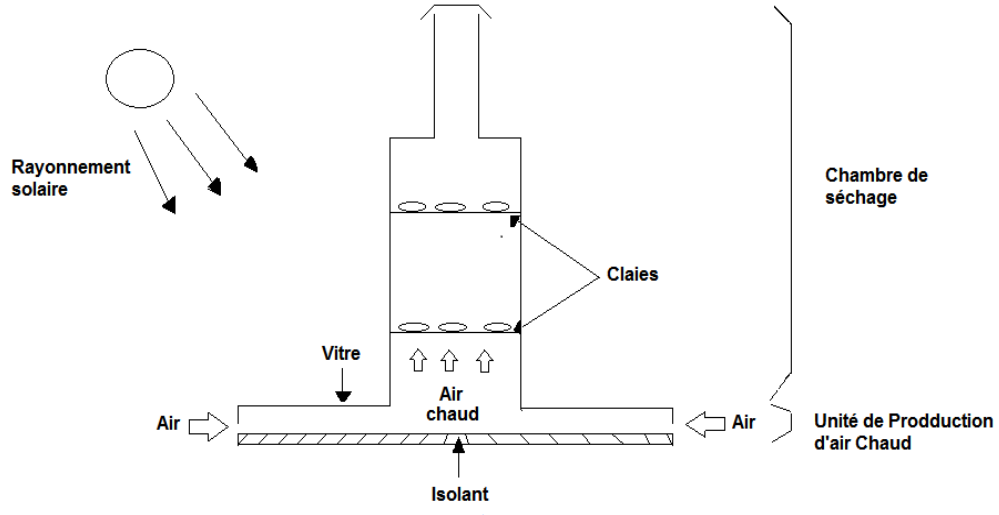


Figure II.1. Schéma descriptif du système de séchage solaire.



Figure II.2. Système de séchage solaire.

II.3.1. Unité de Production d'air Chaud :

L'unité de production d'énergie est un capteur plan à air (figure2.3), soumis au rayonnement solaire. Encore appelée collecteur, sous forme carré de longueur latérale de 93 cm elle est constituée d'une vitre et L'absorbeur, d'une lame d'air d'épaisseur 8cm, entre l'absorbeur et le cadre de la vitre qui a une épaisseur de 2cm.

L'absorbeur est constitué d'une tôle galvanisée, peinte en noir. En dessous de l'absorbeur, se trouve une matrice de 2 cm d'épaisseur et constituée de copeaux de bois. Cette matrice joue le rôle d'isolation thermique. Le vitrage est en verre ordinaire d'épaisseur 5 mm.

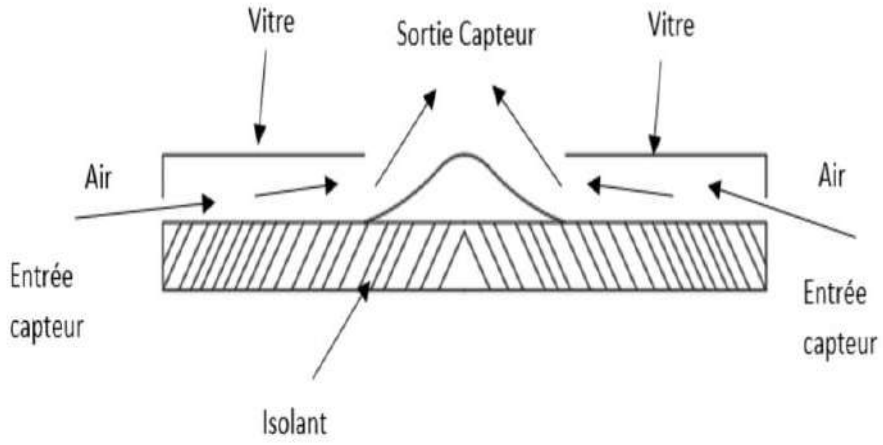


Figure II.3. Schéma descriptif d'Unité de Production d'air Chaud.

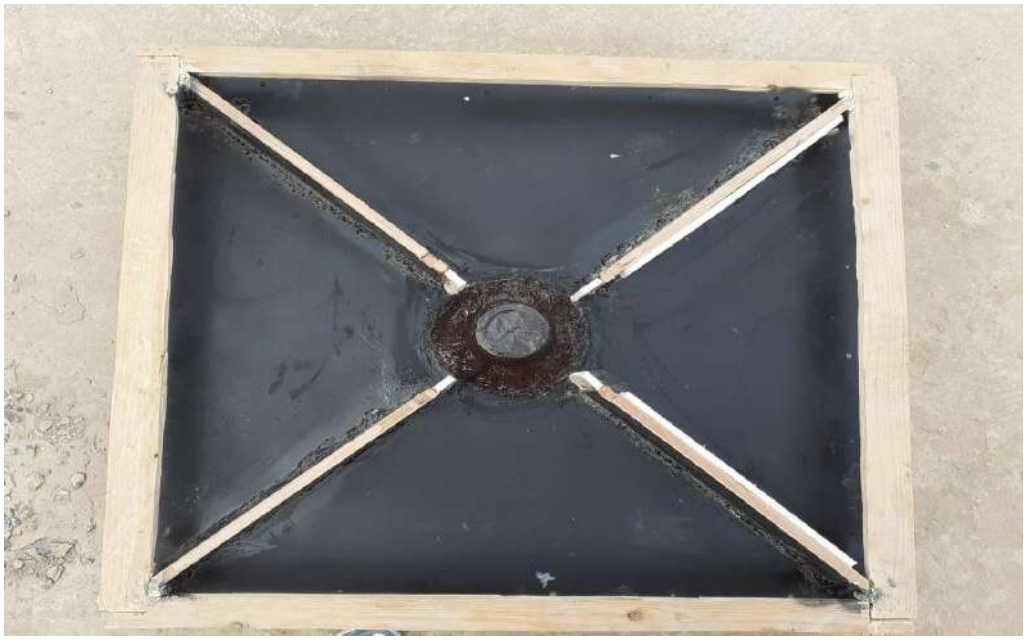


Figure II.4. Unité de Production d'air Chaud.

II.3.2. Chambre de Séchage :

La chambre de séchage (figure5-6) est de forme cylindrique de diamètre 30 cm et de hauteur 1m et portant à son sommet une cheminée. Les parois extérieures sont en tôle galvanisée. 02 claies de formes circulaires en grillage non galvanisé et distantes de 20 cm servent de support pour le produit à sécher. La première claie est située à 32 cm de l'absorbeur.

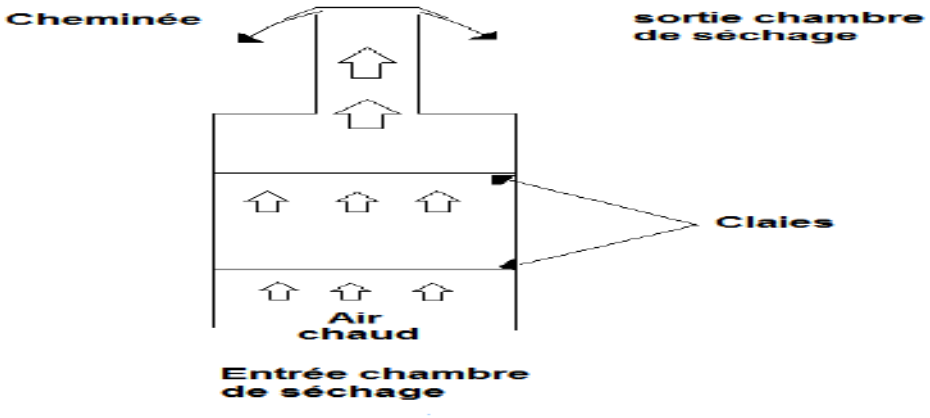


Figure II.5. Schéma descriptif de la Chambre de Séchage.



Figure II.6. La Chambre de Séchage

II.4. Logiciel utilisé :

II.4.1. Solidworks :

Le logiciel de CAO SolidWorks est une application de conception mécanique 3D paramétrique qui permet aux concepteurs d'esquisser rapidement des idées, d'expérimenter des fonctions et des cotes afin de produire des modèles et des mises en plan précises.

II.4.2. Historique :

Créé en 1993 par l'éditeur américain éponyme, SolidWorks est racheté le 24 juin 1997 par la société Dassault Systèmes3. Parmi les plus grandes organisations utilisant SolidWorks, on peut citer Franckie, Équipement d'emballage MMC, AREVA, Patek Philippe, Mega Bloks, Axiome, ME2C, SACMO, Le Boulch, Robert Renaud, Lorenz Baumer4 , l'Opéra de Paris4, Jtekt4, GTT4 et le Ministère de l'Éducation nationale français.



Figure II.7. Information sur SolidWorks.

II.4.3. Fonctionnement :

SolidWorks est un modeleur 3D utilisant la conception paramétrique. Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers sont en relation. Toute modification à quelque niveau que ce soit est répercutée vers tous les fichiers concernés.

Un dossier complet contenant l'ensemble des relatifs à un même système constitue une maquette numérique. De nombreux logiciels viennent compléter l'éditeur SolidWorks. Des utilitaires orientés métiers (tôlerie, bois, BTP...), mais aussi des applications de simulation mécanique ou d'image de synthèse travaillent à partir des éléments de la maquette virtuelle.

II.5. Conception des composants du système de séchage :

Le mode pièce c'est une représentation 3D d'un simple composant de conception. Les pièces sont les éléments de base de tous les modèles SOLIDWORKS. Tous les assemblages et les mises en plan créés sont constitués de pièces. Pour choisir le mode Pièce on appuie sur pièce dans la fenêtre principale de logiciel SolidWorks.

II.5.1. Présentation de l'Unité de Production d'air Chaud en 3D sous-SolidWorks :

Pour dessiner toutes les pièces, toutes les règles de SolidWorks doivent être respectées, la première étant c'est le choix de Plan de face et on appuie sur esquisse.

Et pour cette pièce (Unité de Production) tout d'abord, nous dessinons un carré de 93 cm de côté, Ensuite, nous effectuons diverses opérations sur ce Carré comme (Basse/Bossage

extrudé –Enlève de matière extrudé-Géométrie de référence……) afin d'obtenir enfin le résultat dans l'image.

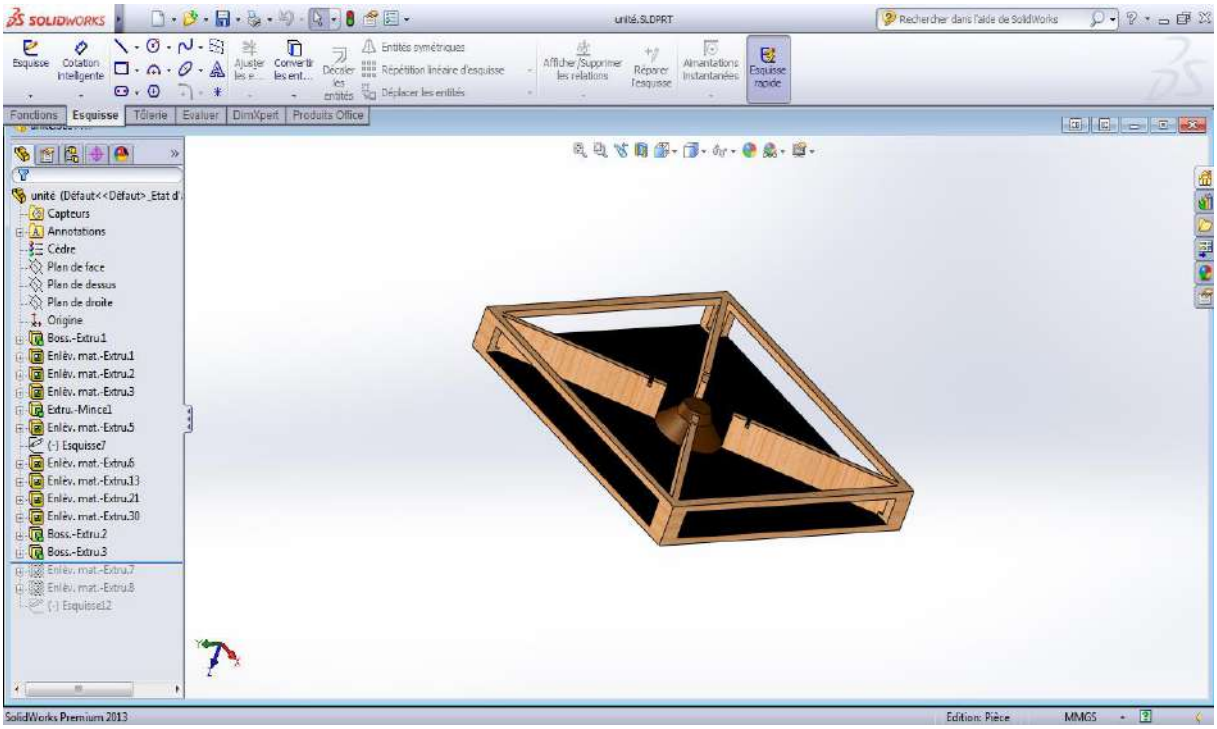


Figure II.8. Interface graphique de l'Unité de Production d'air Chaud sous-SolidWorks.

II.5.2. Présentation de la Chambre de Séchage en 3D sous-SolidWorks :

Pour dessiner cette pièce on respecte toutes les règles précédentes avec un changement dans les formes géométriques.

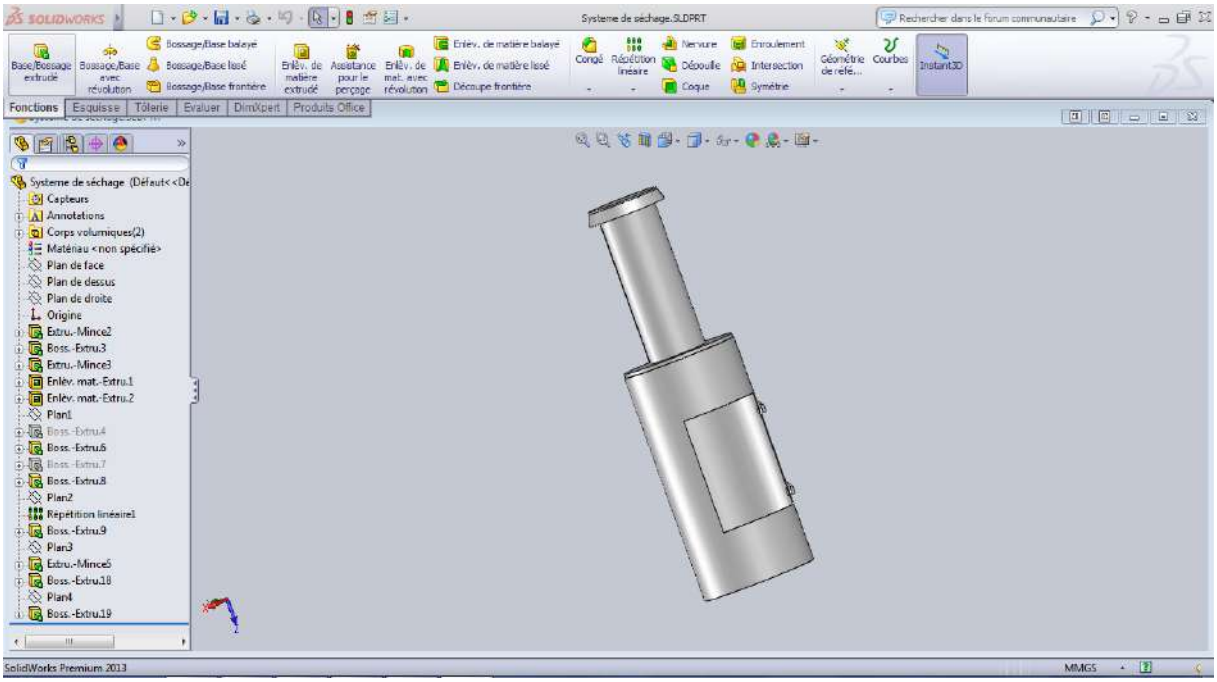


Figure II.9. Interface graphique de la Chambre de Séchage en 3D sous-SolidWorks.

II.5.3. Présentation de la porte en 3D sous-SolidWorks :

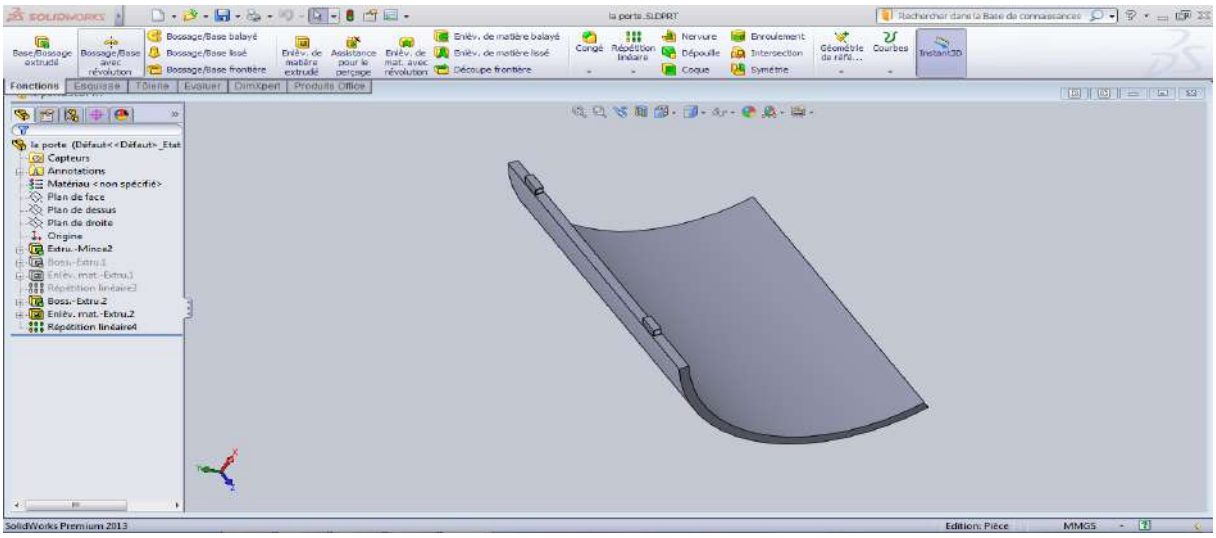


Figure II.10. Interface graphique de la porte en 3D sous-SolidWorks.

II.5.4. Présentation des claies en 3D sous-SolidWorks :

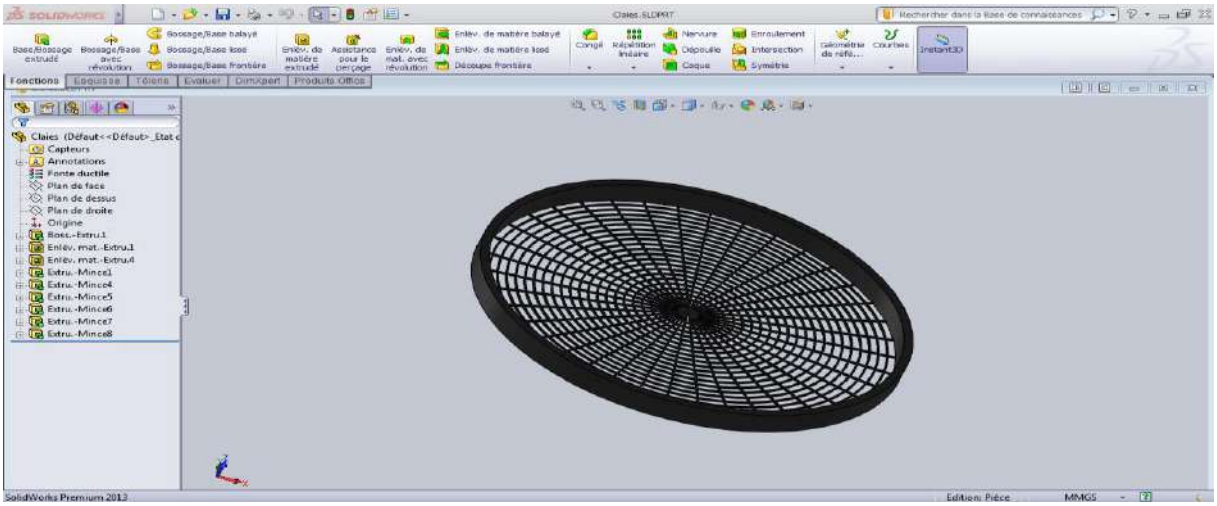


Figure II 11. Interface graphique des claies en 3D sous-SolidWorks.

II.5.5. Présentation du verre en 3D sous-SolidWorks :

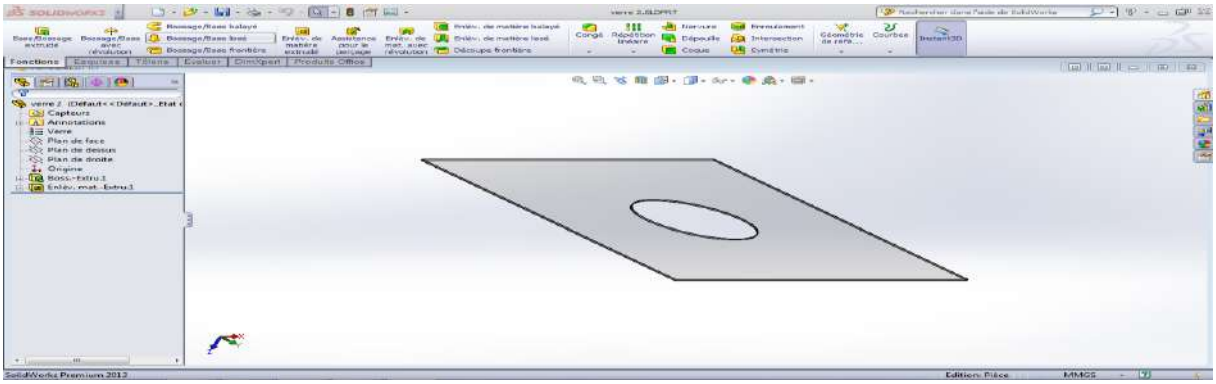


Figure II.12. Interface graphique du Verre en 3D sous-SolidWorks**.**

II.6. Assemblage des composants :

L'Assemblage c'est une composition 3D de pièce ou d'autres assemblage**,** Les différentes étapes d'assemblage sont présentées comme suite :

Pour créer une nouvelle mise en plan:

1- Cliquez sur Nouveau dans la barre d'outils.

2- Dans la boîte de dialogue, sélectionnez Assemblage, puis cliquez sur OK.

3- Dans le PropertyManager cliquez sur Parcourir et sélectionnez les pièces, puis cliquez sur ouvrir.

4- Pour faire L'Assemblage des pièces Utilisé l'options Contrainte, puis cliquez sur OK

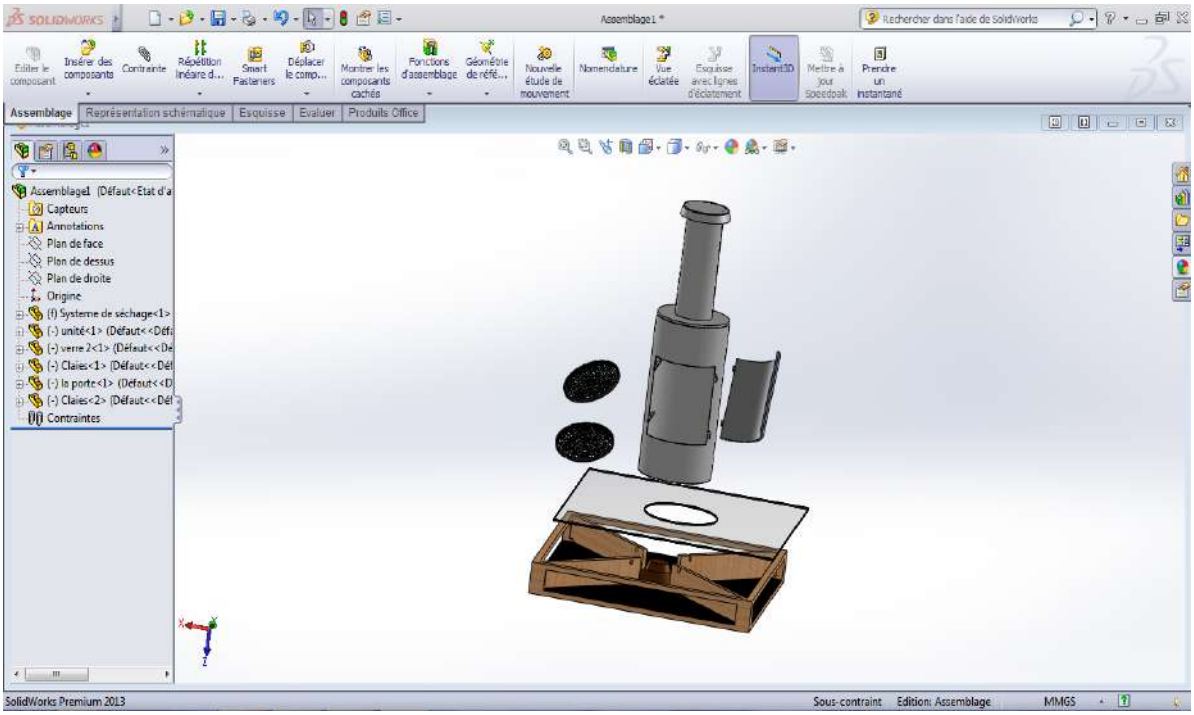


Figure II.13. Les composants avant assemblage.

Pour rassembler l'unité de production et la chambre de séchage on appuie sur les surfaces ou bien les arrêtes en contact dans les éléments ensuit choisir les Contraintes et valider et faire rapprocher.

Et pour assembler les claies avec le reste du système, nous répétons les mêmes étapes précédentes, En prenant soin de garder une distance de 20 cm entre les deux claies.

Après avoir effectué les étapes précédentes, nous obtenons l'assemblage final dans l'image suivante:

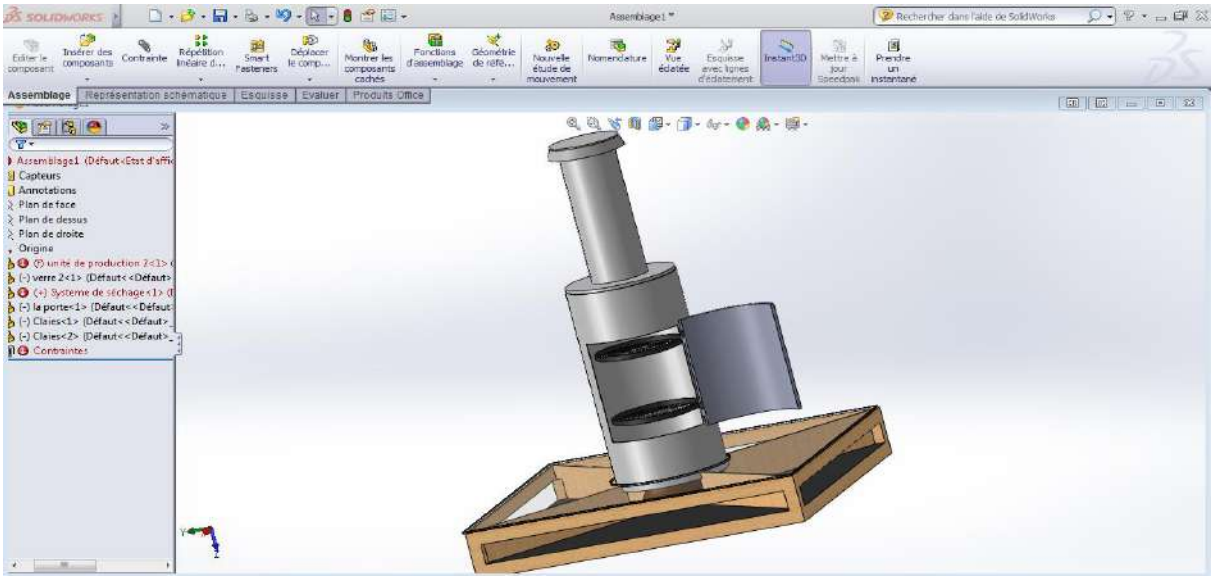


Figure II.14. L'assemblage final.

II.7. Mise en plan :

Les mises en plan c'est une étude 2D consistent en une ou plusieurs vues générées à partir d'une pièce ou d'un assemblage. La pièce ou l'assemblage doit être enregistré avant de créer la mise en plan associée.

Pour créer une mise en plan directement depuis le document de pièce ou d'assemblage:

1- Cliquez sur Créer une mise en plan à partir de la pièce/assemblage (barre d'outils Standard ou menu déroulant Nouveau).

2- Sélectionnez des options dans Taille/Format du fond de plan, puis cliquez sur OK.

3- Faites glisser les vues de la Palette de vues vers la feuille de mise en plan et définissez les options dans le PropertyManager.

Pour créer une nouvelle mise en plan:

1- Cliquez sur Nouveau dans la barre d'outils.

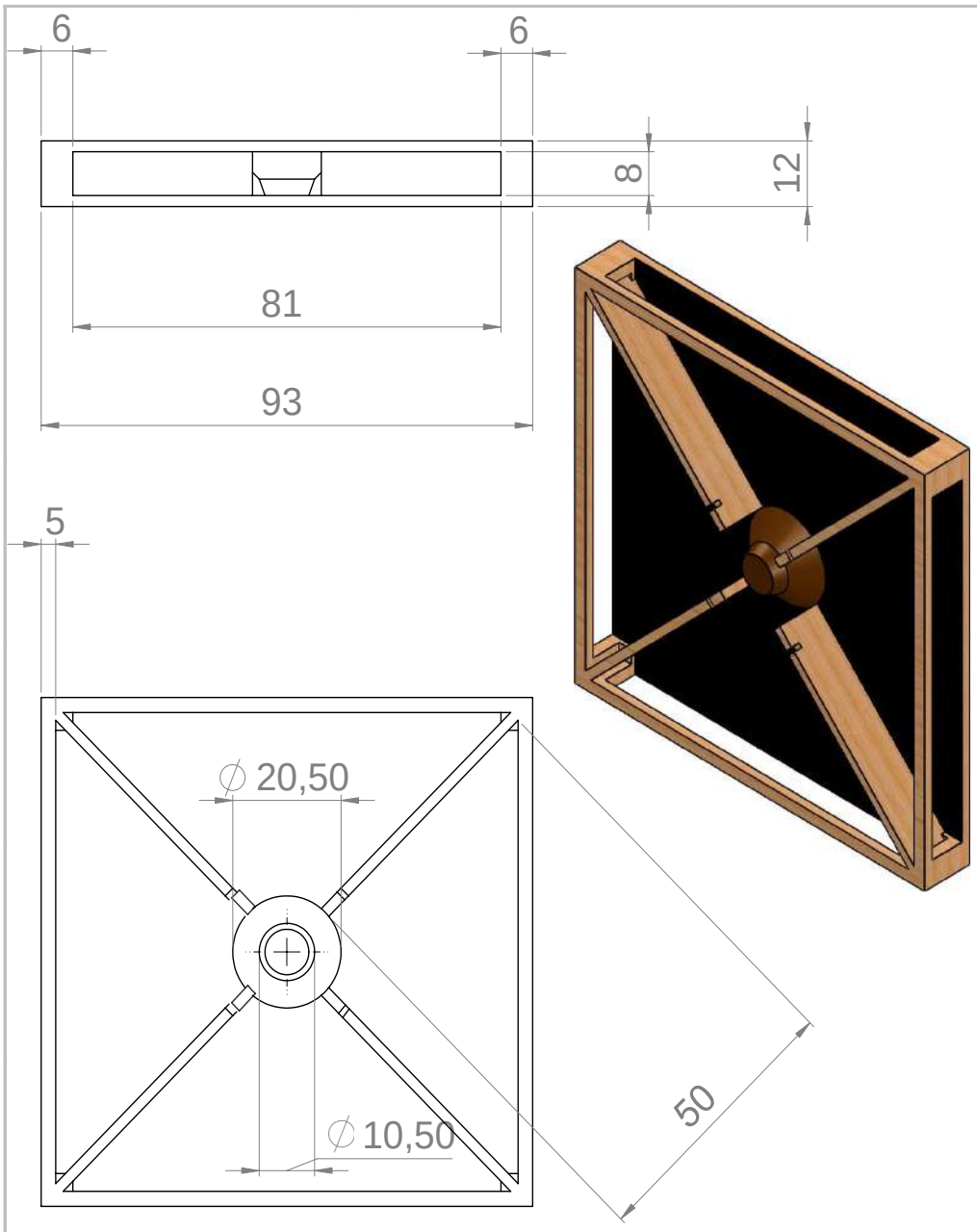
2- Dans la boîte de dialogue, sélectionnez Mise en plan, puis cliquez sur OK.

3- Sélectionnez des options dans Taille/Format du fond de plan, puis cliquez sur OK.

4- Dans le PropertyManager Vue du modèle, sélectionnez un modèle dans la liste Documents ouverts ou parcourez à la recherche d'un fichier de pièce ou d'assemblage. Définissez les options dans le PropertyManager, puis placez la vue dans la zone graphique.

II.7.1 Mise en plan de chaque pièce :

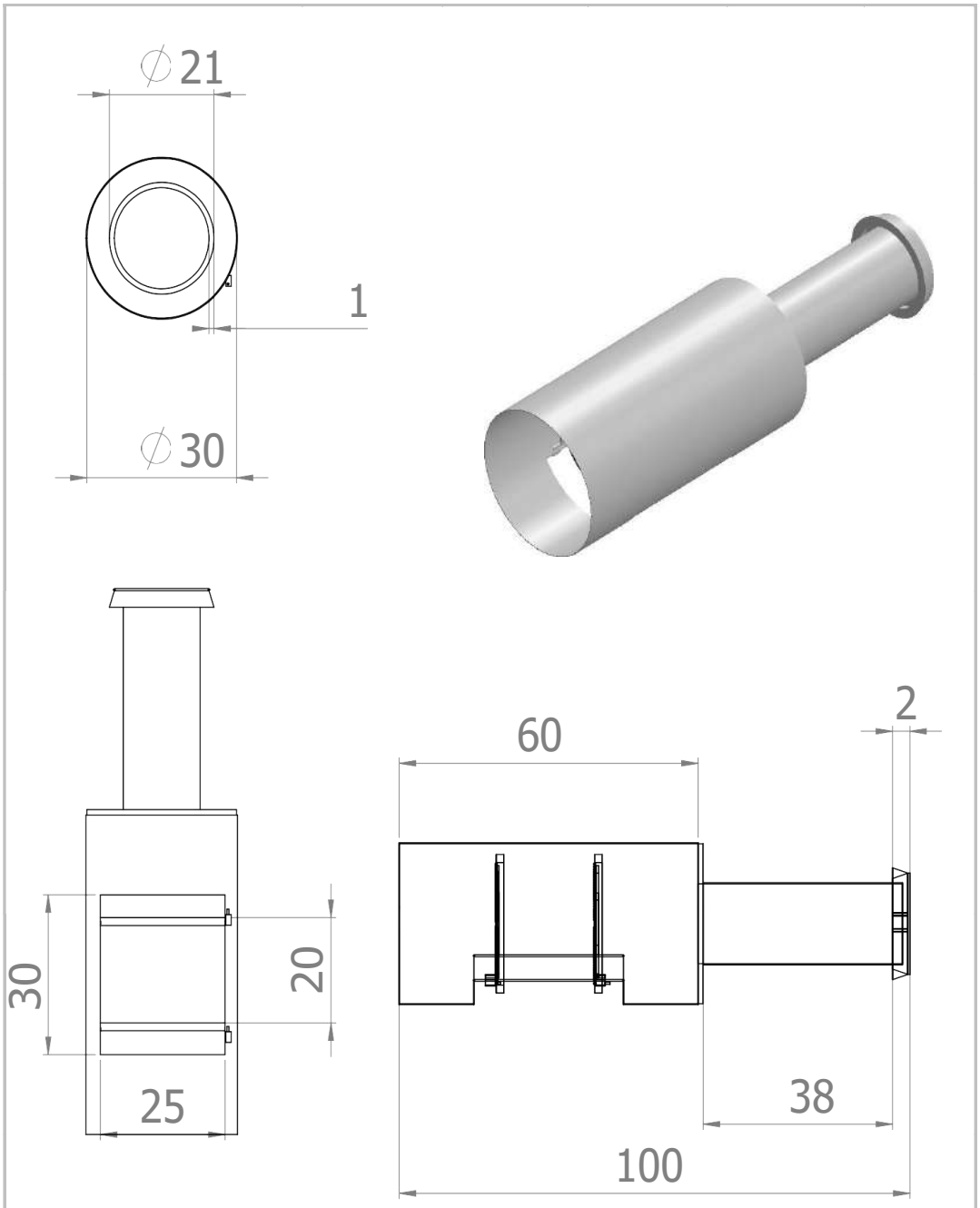
II.7.1.1. Mise en plan de l'unité de production d'air Chaud :



Nom et prénom: Gacem Abdelghani Belaissa Yahia	Matériau: 1-Bois 2- Tôle Galvanisé	Format: A4
Master 2 Mécatronique	L'unité de production d'air chaud	Echelle:1/1
Université Yahia farés Médéa	Unité: Cm	15/03/2021

Figure II.15. Mise en plan de l'unité de production.

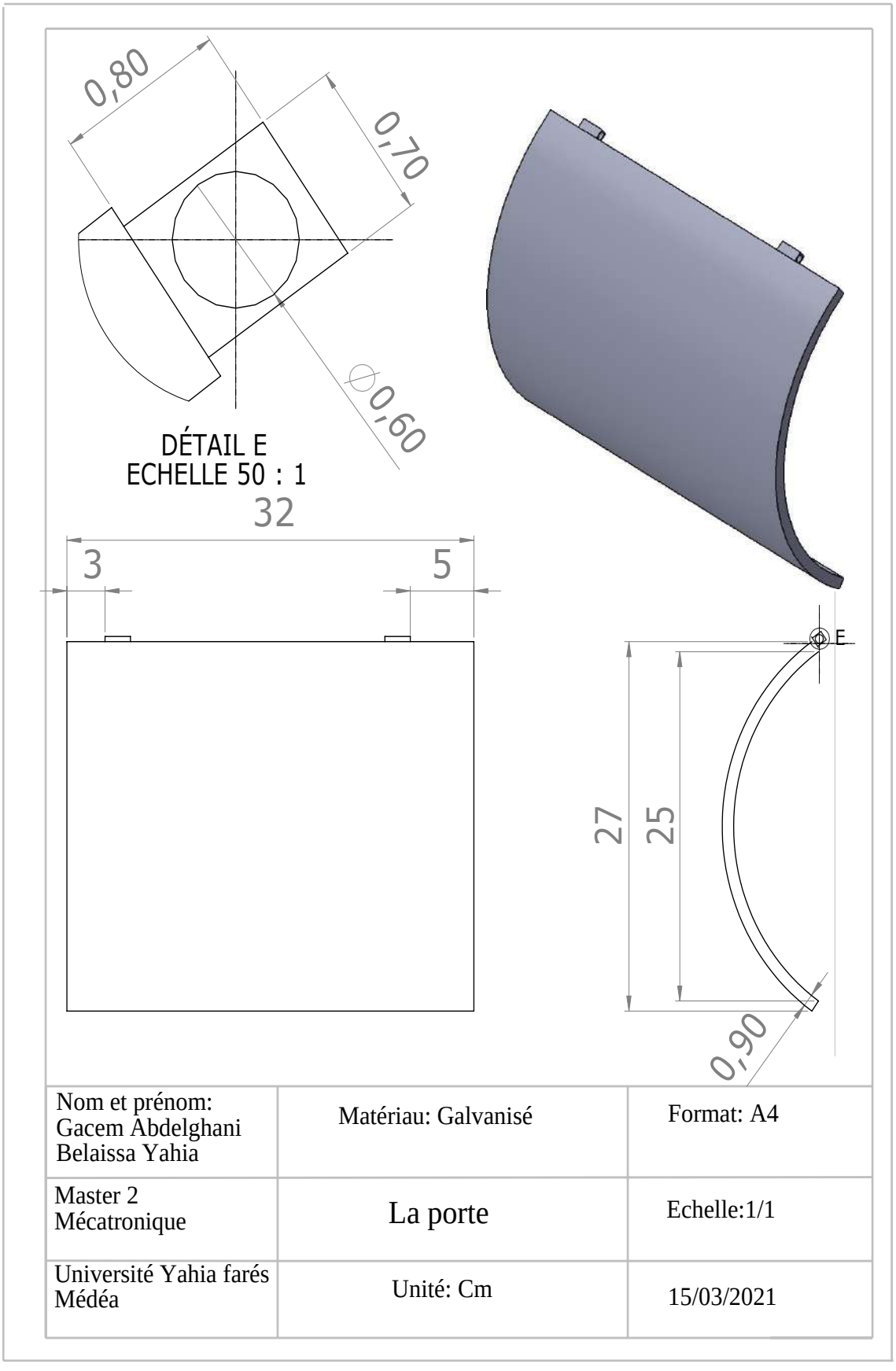
II.7.1.2. Mise en plan de chambre de séchage :



Nom é prénom: Gacem Abdelghani Belaissa Yahia	Matériau: Galvanisé	Format: A4
Master 2 Mécatronique	Chambre de séchage	Echelle:1/1
Université Yahia farés Médéa	Unité: Cm	15/03/2021

Figure II.16. Mise en plan de chambre de séchage.

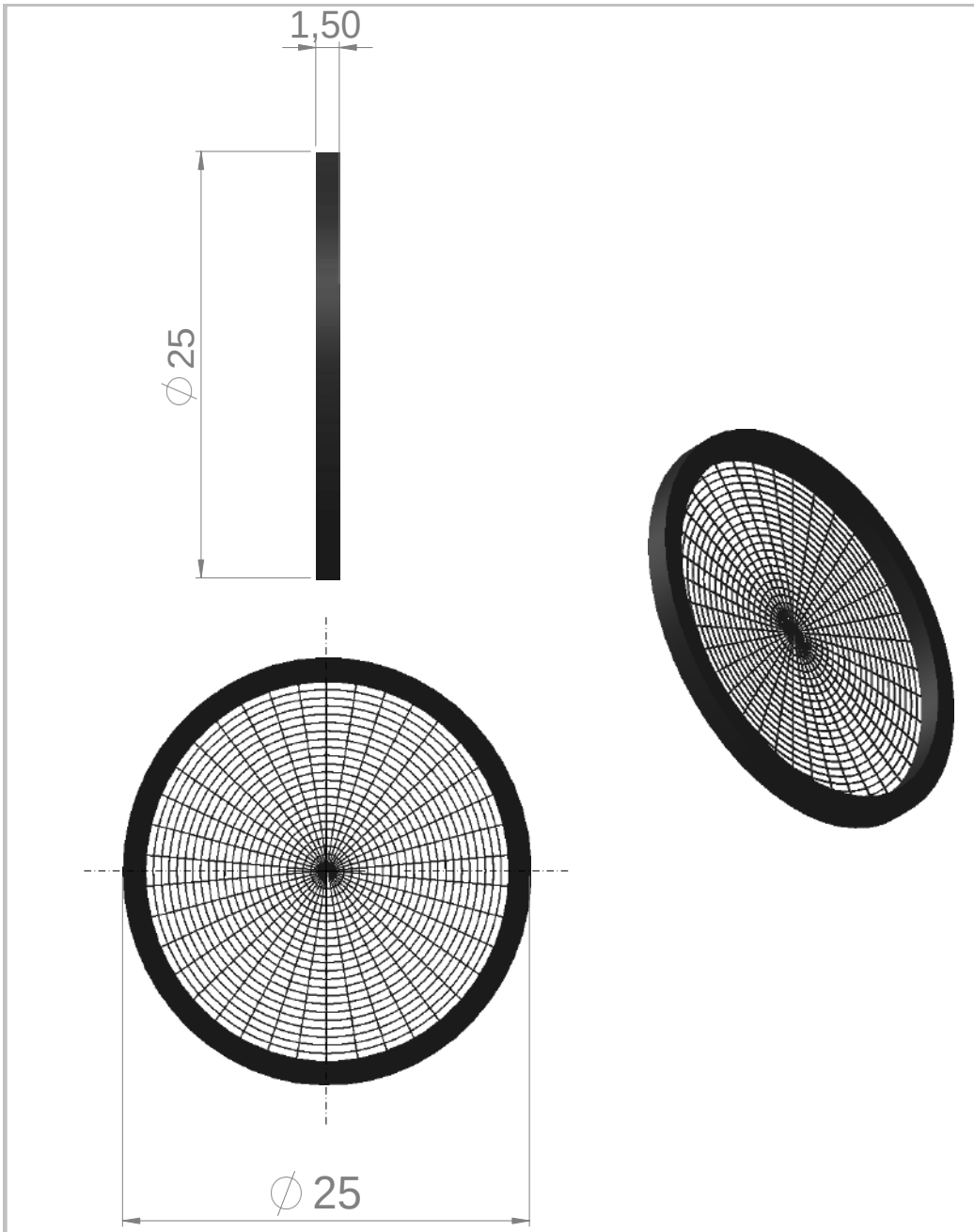
II.7.1.3. Mise en plan de porte :



Nom et prénom: Gacem Abdelghani Belaissa Yahia	Matériau: Galvanisé	Format: A4
Master 2 Mécatronique	La porte	Echelle:1/1
Université Yahia farés Médéa	Unité: Cm	15/03/2021

Figure II.17. Mise en plan de porte.

II.7.1.4. Mise en plan des Claies :



Nom & prénom Gacem Abdelghani Belaissa Yahia	Matériau:Fer	Format: A4
Master 2 Mécatronique	Claie	Echelle:1/1
Université Yahia farés Médéa	Unité: Cm	15/03/2021

Figure II.18. Mise en plan des Claies.

II.7.1.5. Mise en plan du Verre :

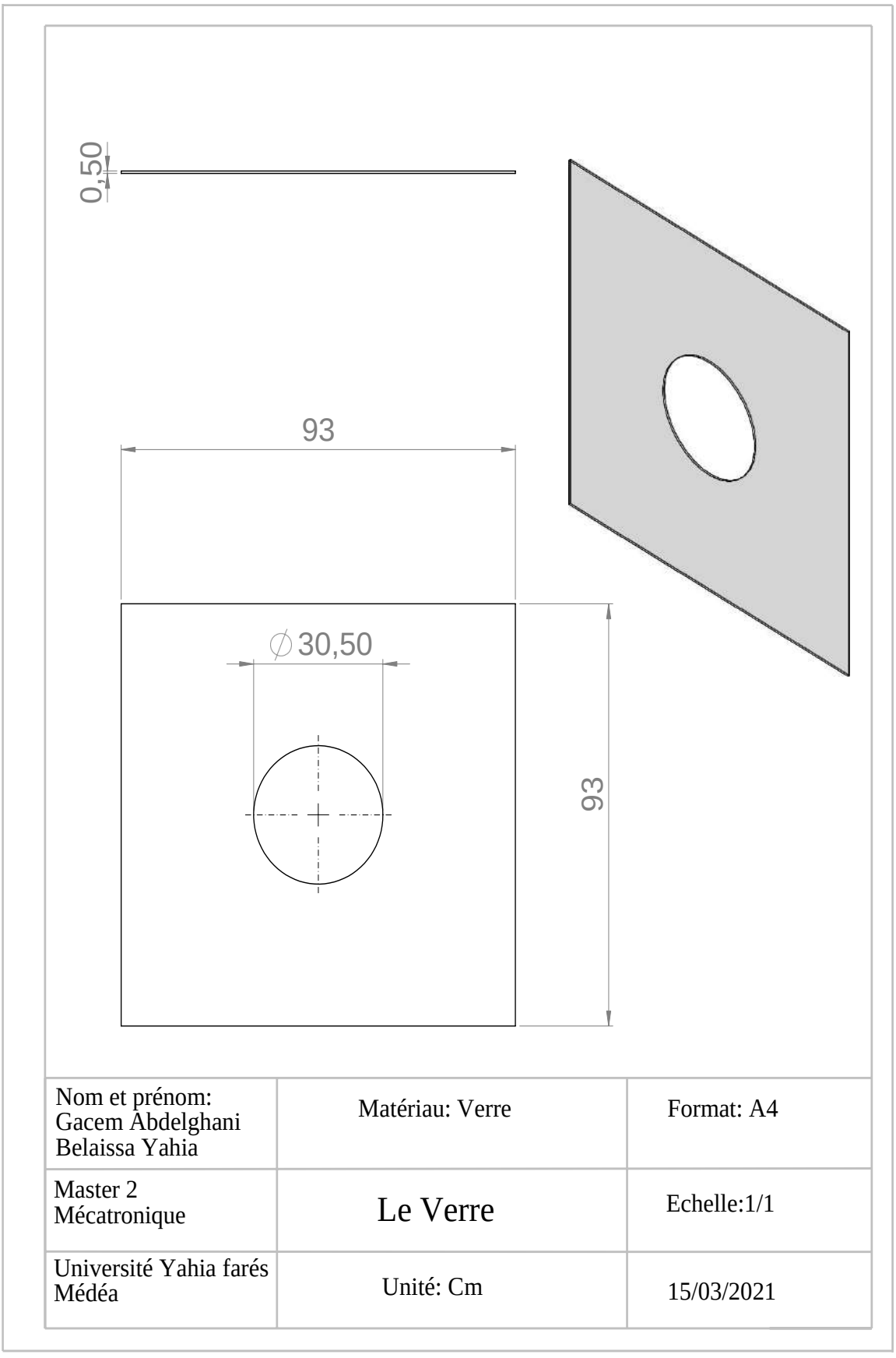


Figure II.19. Mise en plan du Verre.

II.8. Conclusion :

L'objectif de ce chapitre est de présenter le système de séchage solaire indirect utilisé dans cette étude et de déterminer les dimensions de chaque composant de ce système.

Pour clarifier la forme générale de ce système, nous avons conçu une tridimensionnelle à travers le programme SolidWorks, qui est considéré comme l'un des programmes les plus importants pour la conception des systèmes mécaniques au monde.

Chapitre III

Système de mesure de la température et de l'humidité

III.1.Introduction :

L'électronique est une discipline technique qui relève du domaine des sciences de l'ingénieur, constituant une branche importante de la physique appliquée. L'objectif principal de cette discipline est l'étude et la conception des systèmes de contrôle et de traitement des

signaux électriques porteurs d'informations désignant toute grandeur physique tel que : la température, l'humidité…etc. Ce chapitre est consacré à la présentation de la partie électronique de mesure de la température et de l'humidité associée à notre système de séchage. Au premier lieu, nous présentons la carte électronique développée est conçue autour d'une carte à microcontrôleur Arduino de type Nano et un ensemble de trois capteurs de température et d'humidité utilisée pour la collecte d'informations du système de séchage. La carte développée contient également un module d'affichage LCD permettant d'afficher les mesures relevées, un module de stockage des données sur carte mémoire de type SD, un module horloge temps réel et un module de communication RF de type Bluetooth. En dernier lieu, nous présentons la partie logicielle associée à cette carte de mesure.

III.2. Partie Hardware :

Dans cette partie, nous présentons la partie matérielle de la carte électronique de mesure ainsi que la réalisation du circuit imprimé.

III.2.1. Schéma synoptique général :

La Figure (III.1) présente le schéma synoptique de notre carte de mesure. Pour faciliter l'étude de cette carte, on a décomposé le schéma en sept blocs essentiels :

- Bloc de gestion et de traitement.
- Bloc d'alimentation.
- Bloc d'affichage.
- Bloc horloge temps réel.
- Bloc de stockage de données.
- Bloc de communication Bluetooth.
- Bloc de commande.

Le bloc de gestion et de traitement est l'élément principal de notre carte de mesure, puisqu'il assure la gestion des capteurs et des autres blocs ainsi que le traitement des données.

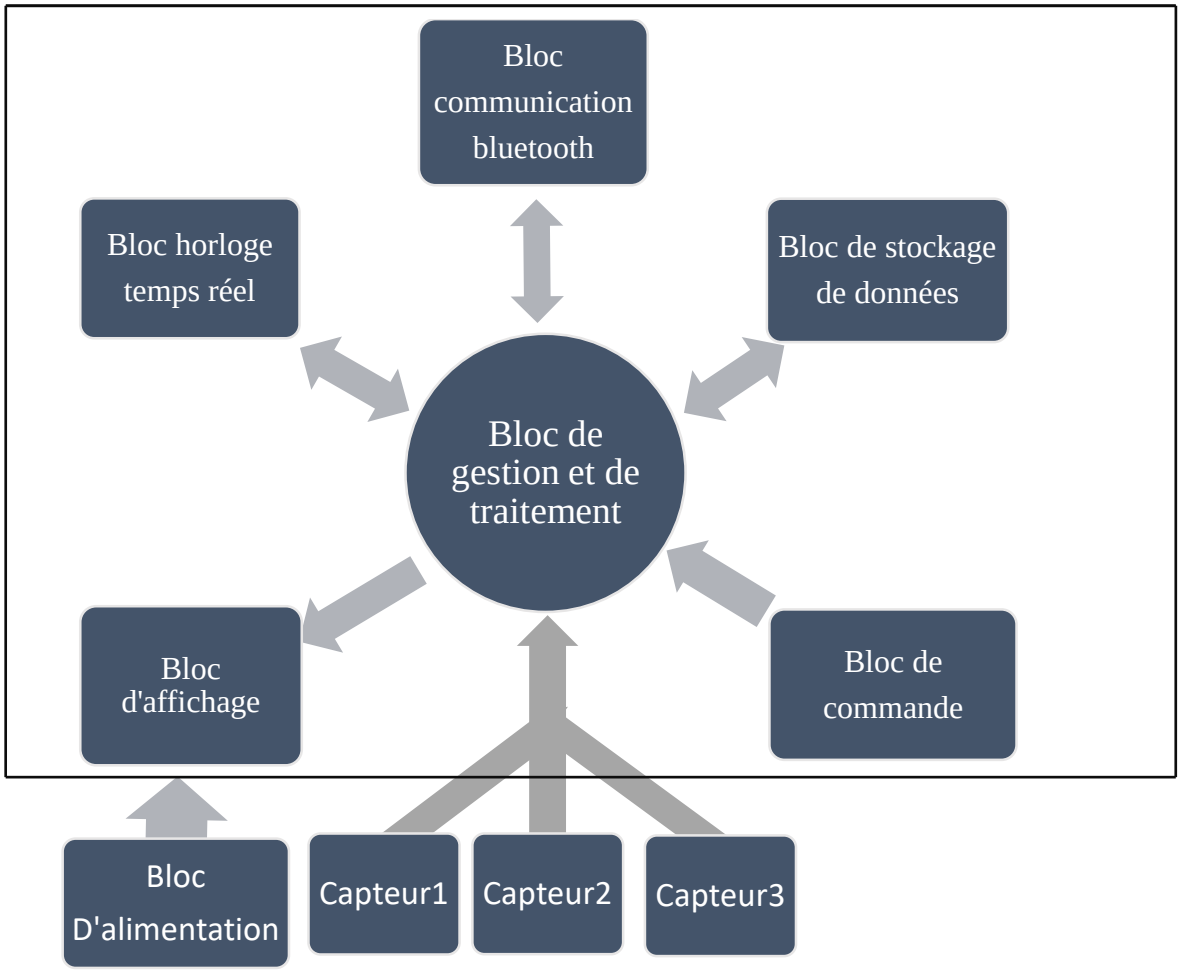


Figure III.1. Schéma synoptique de la carte de mesure.

III.2.2. Bloc de gestion et de traitement :

La carte de mesure développée pour notre système de séchage est à base d'une carte à microcontrôleur Arduino de type Nano. Cette dernière constitue le cerveau de notre installation, elle reçoit les signaux des capteurs de température et d'humidité et assure gestion des autres blocs.

III.2.2.1. La Carte Arduino Nano :

Présentation :

La carte Arduino nano est une petite carte électronique de 44 x 18 mm, elle est équipée d'un microcontrôleur. Ce dernier permet, à partir des données et des événements détectés par des capteurs, de gérer et commander des actionneurs ; la carte Arduino illustrée sur la Figure III.2 est donc une plate-forme de développement électronique qui constitue une interface programmable.



Figure III.2. La carte Arduino Nano.

III.2.2.2. Caractéristiques de la carte Arduino Nano :

Le tableau suivant résume les caractéristiques générales de cette plate-forme de développement :

Caractéristiques	Valeurs
Microcontrôleur	**Atmel ATmega328**
Tension de fonctionnement (niveau logique)	5 V
Tension d'alimentation (recommandée)	7 - 12 V
Tension d'alimentation (min-maximum)	6 - 20 V
Entrées/Sorties digitales	14 (dont 6 peuvent fournir une sortie PWM, notées par un trait blanc)
Entrées analogiques	8
Courant disponible par pin E/S	40 mA
Mémoire flash (mémoire programme)	32 KB (dont 2KB utilisés par le bootloader)
Mémoire SRAM	2 kB
Mémoire EEPROM	1 kB
Vitesse d'horloge	16 MHz
Dimensions	44 x 18 mm

Tableau III.1. Caractéristiques de la carte Arduino Nano [16].

III.2.2.3. Microcontrôleur ATMega328 :

Le microcontrôleur ATMega328 est un circuit intégré qui rassemble sur une puce plusieurs éléments complexes dans un espace réduit. Aujourd'hui, en soudant un grand nombre de composants encombrants ; tels que les transistors; les résistances et les condensateurs tout peut être logé dans un petit boîtier en plastique noir muni d'un certain

nombre de broches dont la programmation peut être réalisée en langage C. La Figure III.3 montre l'aspect d'un microcontrôleur ATMega328 de boitier DIP, qu'on trouve sur certaines cartes Arduino.



Figure III.3. Microcontrôleur ATMega328

Le microcontrôleur ATMega328 est constitué par un ensemble d'éléments qui ont chacun une fonction bien déterminée. Il est en fait constitué des mêmes éléments que sur la carte mère d'un ordinateur. Globalement, l'architecture interne de ce composant programmable contient essentiellement :

- ***Une mémoire Flash***: qui contiendra le programme à exécuter. Cette mémoire est effaçable et programmable, elle peut recevoir un programme jusqu'à 32 ko de taille (dont le boot loader de 0.5 ko).
- ***Une mémoire RAM* :** c'est la mémoire dite "vive", elle va contenir les variables du programme. Elle est dite "volatile" car elle perde son contenue l'alimentation du microcontrôleur est coupée, sa capacité est 2 ko.
- ***Une mémoire EEPROM*** : c'est le disque dur du microcontrôleur. On y enregistre des infos qui ont besoin de survivre dans le temps, même si la carte doit être arrêtée. Cette mémoire ne s'efface pas lorsque l'on éteint le microcontrôleur ou lorsqu'on le reprogramme [17]**.**



Figure III.4. Brochage du microcontrôleur Atmega328.

III.2.2.4. Les entrées / sorties de la carte Arduino Nano :

La figure III.5 présente l'aspect externe de la carte Arduino Nano qu'on a utilisé pour notre carte de mesure.

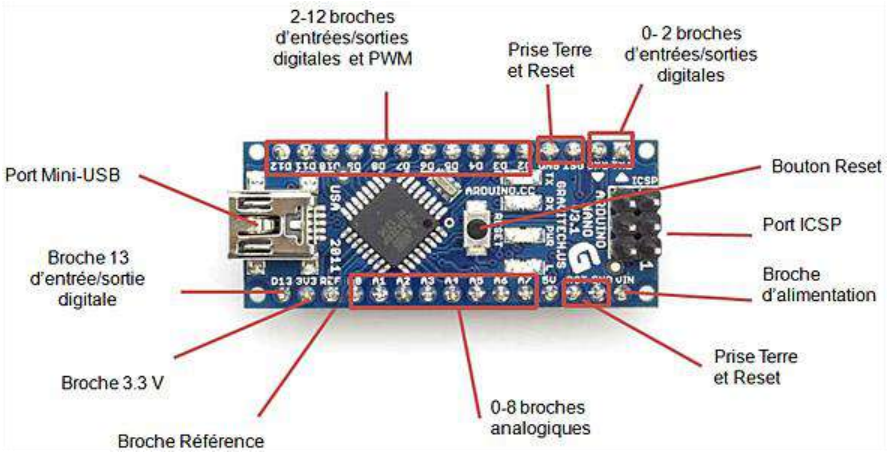


Figure III.5. Description des Entrées /Sorties de la carte Arduino Nano.

Chacune des 14 broches numériques sur la carte Nano peut être utilisé comme une entrée ou une sortie, en utilisant pinMode (), digitalWrite () et les fonctions digitalRead (). Chaque broche peut fournir ou recevoir un maximum de 40 mA et a une résistance de pull-up interne (déconnecté par défaut) de 20-50 kOhms. En outre, certaines broches ont des fonctions spécialisées.

La Figure III.6 illustre le brochage détaillé de la carte Arduino Nano.

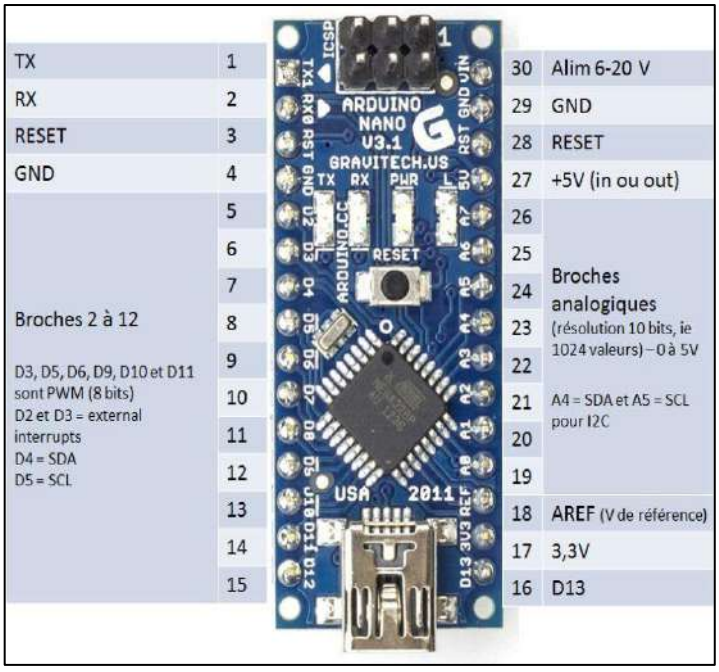


Figure III.6. Brochage de l'Arduino Nano [20].

Le tableau suivant résume les taches de différentes broches de la carte Nano :

Broche	Fonction
Série	0 (RX) et 1 (TX). Utilisé pour recevoir (RX) et transmettre (TX) des données série TTL. Ces broches sont connectées aux broches correspondantes de la puce série FTDI USB-TTL.
Interruptions externes	2 et 3. Ces broches peuvent être configurées pour déclencher une interruption sur une valeur basse, un front montant ou descendant ou une modification de valeur.
PWM	3, 5, 6, 9, 10 et 11. Sortie PWM 8 bits avec la fonction analogWrite ().
SPI	10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK). Ces broches prennent en charge la communication SPI.
LED 13	Il y a une LED intégrée connectée à la broche 13 numérique.
Reset	passez cette ligne à LOW pour redémarrer le microcontrôleur. habituellement utilisé pour rajouter une fonction ou un bouton de reset directement sur les shields/modules.
AREF	Tension de référence pour les entrées analogiques. Utilisé avec analogReference
Entrées analogiques	La carte dispose pour cela de 8 entrées, repérées de A0 à A7, qui peuvent admettre toute tension analogique comprise entre 0 et 5 V.

Tableau III.2. Brochage de la carte Arduino [18].

La carte Arduino Nano intègre un fusible qui protège le port USB de l'ordinateur contre les surcharges en intensité (le port USB est généralement limité à 500mA en intensité). Bien que la plupart des ordinateurs aient leur propre protection interne, le fusible de la carte fournit une couche supplémentaire de protection. Si plus de 500mA sont appliqués au port USB, le fusible de la carte coupera automatiquement la connexion jusqu'à ce que le court-circuit ou la surcharge soit stoppé **[19]**.

III.2.3. Bloc d'alimentation :

Pour faire fonctionner la carte électronique de mesure, on a besoin d'un bloc d'alimentation. Le microcontrôleur fonctionnant sous 5V, la carte peut être alimentée en 5 V par le port Mini-USB ou bien par une alimentation externe qui est comprise entre 7 et 12 V. Cette tension doit être continue et peut par exemple être fournie par une pile de 9 V. Un régulateur se charge ensuite de réduire la tension à 5 V pour le bon fonctionnement des éléments de la carte. Pas de risque de griller la carte Nano et ces modules associés à condition de respecter l'intervalle de la tension d'alimentation d'entrée qui doit être inclue entre 7 et 15 V. Les broches d'alimentation se répartissent comme suit :

- **VIN :** La tension en entrée vers la carte Arduino quand on utilise une source d'alimentation externe (par opposition aux 5 V provenant de la connexion USB ou d'une autre source d'alimentation régulée).
- **5V :** La broche émet du 5 V régulé depuis le régulateur de la carte Nano. La carte peut être alimentée avec du courant depuis la prise électrique CC (7 à 12 V), le connecteur USB (5 V), ou la broche VIN de la carte (7 à 12 V). La tension d'alimentation à travers des broches 5 ou 3,3 V contourne le régulateur et peut endommager la carte.
- **3V3 :** Une alimentation de 3,3 V générée par le régulateur intégré de la puce FTDI, le flux maximum de courant est de 50 mA.
- **GND :** c'est la broche de masse [17].

III.2.4. Bloc d'affichage :

Ce bloc est constitué essentiellement d'un écran LCD (Liquide Crystal Display) de type 4 x 16 caractères (4 lignes de 16 caractères chacun) associe à un module d'interfaçage de type I2C pour réduire la connectique au maximum.

III.2.4.1. L'afficheur LCD (Liquide Crystal Display) :

Ce module a été utilisé pour afficher La température et l'humidité, ces informations sont surtout nécessaires pour une personne qualifiée, qui peut vérifier les mesures issues des différents capteurs sans avoir besoin de brancher un PC à la carte Arduino et utiliser un logiciel spécialisé.

Les écrans LCD ou écrans à cristaux liquides sont de plus en plus courants dans notre environnement, que ce soit pour afficher des informations utiles ou pour servir de sélecteur de commande. Il existe des écrans de tout type allant du simple afficheur de caractères aux écrans géants couleur. Les écrans les plus couramment utilisés dans les applications Arduino sont les écrans à caractères alphanumérique (Figure III.7) [21].



Figure III.7. Afficheurs LCD alphanumérique à interface parallèle.

III.2.4.2. Définition de l'interface I2C :

I2C (*Inter-Integrated Circuits*) est une technologie qui permet le fonctionnement d'un ensemble d'éléments ou de dispositifs utilisant le moins de connexions électroniques aussi efficacement que possible.

Cette technologie permet le fonctionnement et l'échange de données en mode série avec tous les appareils à travers deux fils seulement ou plus précisément grâce à deux lignes. Une ligne de données série et une ligne d'horloge série. Chaque élément possède une adresse prédéfinie lors de la fabrication (comme l'adresse IP Internet ou l'adresse MAC des réseaux sans fil). Le microcontrôleurATMEGA328 communique alors avec chaque appareil selon son propre adresse et fonctionne de l'horloge. Tous les appareils sont connectés dans une rangée, chaque composant peut être manipulé indépendamment.

L'interface (ou bus) I2C porte parfois le nom de TWI (Two Wire Interface) ou TWSI (Two Wire Serial Interface*)* chez certains constructeurs [22].

III.2.4.3. Objectif de l'installation de l'afficheur LCD 16x4 avec interface I2C :

Il existe également de petits modules (Figure III.8) permettant d'interfacer un écran LCD avec un bus I2C. Cette solution peut être intéressante si on manque désespérément de broches sur le microcontrôleur ATMEGA328 comme dans notre projet puisqu'au lieu de monopoliser 6 à 7 broches, l'écran n'en utilisera plus que 2.

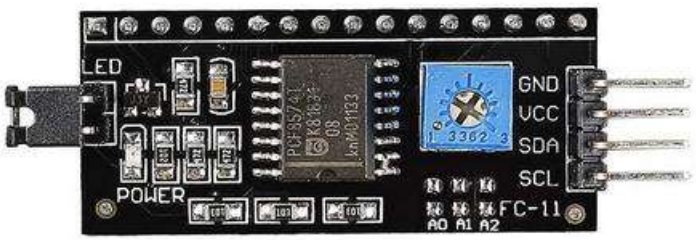


Figure III.8. Interface I2C d'un module LCD.

Toutefois, le module que l'on rencontre le plus souvent est construit autour de la puce PCF8574P de NXP, un circuit permettant d'augmenter le nombre d'entrées sorties numériques via le bus I2C [23].

La figure III.9 illustre le montage du module d'interface I2C avec l'afficheur LCD classique.

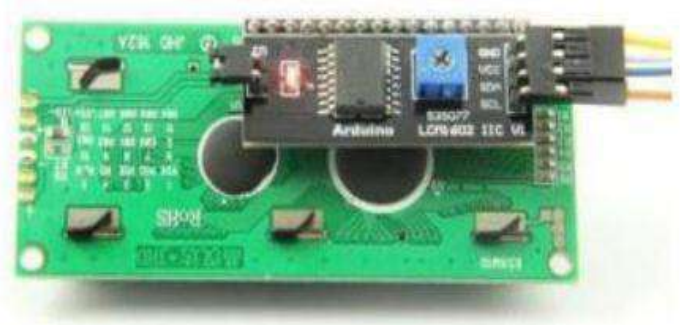


Figure III.9. Montage du Module I2C avec l'afficheur LCD.

III.2.5. Bloc horloge temps réel :

Dans ce bloc, nous avons utilisé une horloge temps réel de type DS 3231 pour mesurer le temps en heures, minutes et secondes dans le système de séchage solaire indirect.

Le DS3231 (Figure III.10) est un module économique très précis pouvant conserver les heures, les minutes et les secondes, ainsi que des informations sur le jour, le mois et l'année. En outre, il offre une compensation automatique pour les années bissextiles et les mois de moins de 31 jours. Ce qui le distingue est son fonctionnement avec sa propre batterie externe, ce qui lui permet de maintenir le calcul du temps même lorsque l'alimentation est coupée de la plaque Arduino. La connexion du module à notre carte de mesure est réalisée via le bus de communication I2C qui est supporté par le module.

La question qui peut se poser à ce niveau, est de savoir pourquoi nous avons réellement besoin d'un RTC pour notre carte de mesure, alors que l'Arduino lui-même contient un chronomètre intégré ? Le problème, c'est que le module RTC fonctionne sur batterie et peut garder une trace de l'heure même si nous reprogrammons le microcontrôleur ou déconnectons l'alimentation principale [24].



Figure III.10. Module d'horloge temps réel DS3231.

III.2.6. Bloc de stockage de données :

Pour ce bloc, nous avons utilisé un module électronique pour enregistrer les données de séchage solaire indirect (température et humidité) provenant des capteurs sur une mémoire de type SD.

Dans ce qui suit nous allons décrire comment utiliser un module de stockage des données sur carte SD avec une carte Arduino pour lire et écrire des fichiers de données.

Le module de carte SD est particulièrement utile pour les projets nécessitant un enregistrement de données, l'Arduino peut créer un fichier sur une carte SD pour écrire et sauvegarder des données à l'aide de la bibliothèque SD.

Il existe différents modèles proposés par différents fournisseurs, mais ils fonctionnent tous de manière similaire, en utilisant le protocole de communication (bus) SPI. Le module (adaptateur de carte Micro SD) est un module qui assure la lecture et l'écriture des données sous forme de fichiers à partir de la carte SD via l'interface SPI.

Les module adaptateur de carte SD utilisé dans notre réalisation supporte les modèles de cartes mémoires suivants : carte Micro SD (de capacité < = 2 Go), carte Micro SDHC (carte mémoire haute débit de capacité < = 32 Go). Le module adaptateur qu'on a utilisé assure la conversion des niveaux de tensions de 5 à 3.3 V nécessaires pour l'accès à la mémoire SD à travers un régulateur de tension intégré au module.

L'interface de gestion du module se présente comme suit : Un total de six broches (GND, V_{CC}, MISO, MOSI, SCK, CS), GND et la ligne de masse, V_{CC} est la ligne d'alimentation, MISO, MOSI, SCK sont les lignes de communications entre le module et la carte Arduino Nano, la ligne CS est la ligne de sélection de module adaptateur parmi les modules électroniques connectés sur le bus SPI [25].



Figure III.11. Module Adaptateur de carte SD.

III.2.7. Bloc de communication Bluetooth :

Nous avons opté dans notre réalisation pour un module de communication radio fréquence (RF) de type Bluetooth, le module utilisé est le modèle HC-05. Ce module a été ajouter à notre carte de mesure pour permettre de superviser le système de séchage à distance (la visualisation de la températures et de l'humidité) afin d'éviter les rayons chauds du soleil tout au long de la période de séchage et lorsque l'accès au système de séchage est restreint.

Le module Bluetooth HC-05 est un module de communication de type SPP (Serial Port Protocol) facile à utiliser, il est conçu pour une configuration de communication série sans fil transparente. Il se connecte via une liaison série, ce qui facilite l'interaction avec la console ou tout appareil doté d'une fonctionnalité Bluetooth tel qu'un smartphone, tablette ou un ordinateur portable, car de nombreuses applications Android sont déjà disponibles sur le web et il est assez facile de développer des interfaces personnalisées d'affichages des données [26].



Figure III.12. Module Bluetooth de type HC-05.

III.2.8. Bloc de commande :

Dans ce bloc, nous avons utilisé un encodeur rotatif, possédant une molette qui va nous permettre de faire défiler les options d'un menu d'affichage quelconque sur le module LCD, savoir naviguer dans les menus, sélectionnez des sous-menus et également modifier des valeurs de paramétrage dans ces menus. En plus d'un switch intégré qui permet de valider les choix effectués.

L'encodeur rotatif est un capteur de rotation sans butée dont on peut connaitre le sens de rotation et l'angle. Similaire en aspect au potentiomètre, l'encodeur n'a pas de course limite et au lieu de renvoyer une valeur de résistance, comme le potentiomètre il renvoie deux signaux digitaux sous forme de trains d'impulsions qui permettent de calculer l'angle de rotation et déterminer le sens de rotation.

Avec un algorithme adéquat, il est possible de récupérer l'état des deux contacteurs et de retrouver sa position. L'encodeur rotatif est parfois couplé à un bouton poussoir (switch) ce qui est pratique pour la validation des commandes.



Figure III.13. L'encodeur rotatif.

III.2.9. Capteur de température et d'humidité :

Dans notre projet nous avons choisis d'utiliser un seul capteur qui assure à la fois la mesure de la température et la mesure de l'humidité. La famille des capteurs DHT contient deux modèles de capteurs (DHT 11 et DHT 22) qui sont très connus, d'une précision acceptable et bon marché. Ainsi ce type de composant regroupe à la fois une sonde de température et un capteur d'humidité. La version DHT22 est plus précise et possède une plus large plage de mesure que la version DHT 11. La Figure III.14 illustre l'aspect extérieur du DHT 22.



Figure III.14: La sonde DHT 22.

La Figure III.15 présente la version DHT 11 :



Figure III.15: La sonde DHT11.

Le tableau suivant présente une comparaison générale des caractéristiques des deux modèles de capteurs :

Caractéristiques	DHT 11	DHT 22
Tension d'alimentation	0 – 5 V	0 – 5 V
Plage humidité	20 à 80 %	0 à 100 %
Plage température	0 à + 50 °C	-40 à + 80 °C
Précision de mesure de l'humidité	± 5 %	± 2 %
Précision de mesure de la température	± 2 °C	± 0,5 °C

Tableau III.3. Comparaison entre le capteur DHT11 et DHT22.

Dans notre réalisation nous avons opté pour le DHT22 qui nous donne la température et l'humidité avec une grande précision. Il est fiable et peut même mesurer des températures négatives. Nous avons utilisé trois capteurs DHT22, le premier capteur est pour les mesures à l'extérieur de la chambre de séchage, le deuxième capteur est situé à l'intérieur de la chambre de séchage (entre les calais) et le troisième capteur est placé à l'entrée de la chambre. Le capteur DHT 22 est composé de 04 broches, en réalité, seulement 03 sont utilisables :

1- VCC : broche d'alimentation ;
2- Data : broche des données ;
3- NC : broche non utilisé
4- GND : broche de la masse.

III.2.10. Présentation du Schéma électrique de la carte de mesure :

La Figure III.16 présente le schéma électrique global de notre carte de mesure :

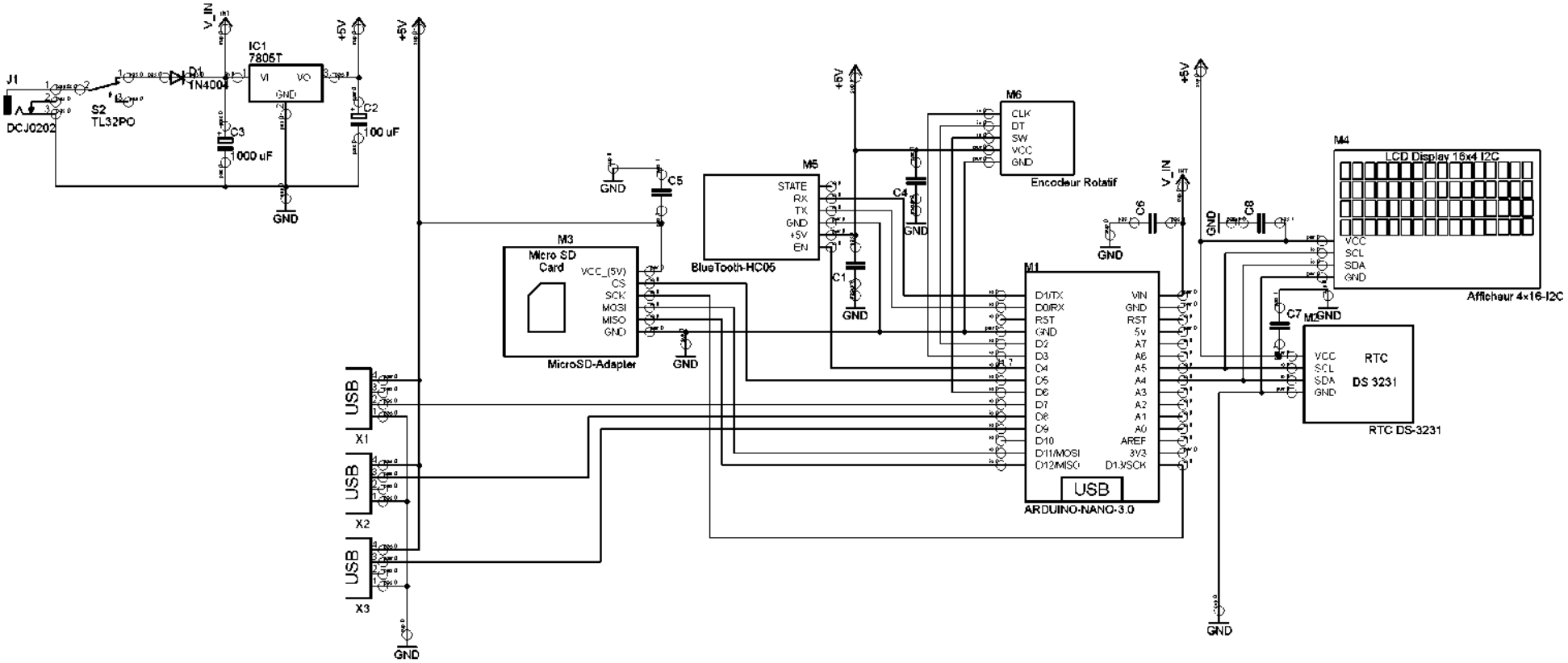


Figure III.16. Schéma électrique.

III.2.11. Développement du circuit imprimé (PCB) :

Un circuit imprimé ou PCB (Printed Circuit Board) est un support, en général une plaque, permettant de relier électriquement un ensemble de composants électroniques entre eux, dans le but de réaliser un circuit électronique complexe. Ce circuit est composé d'un matériau isolant sur lequel de fines couches de cuivre sont gravées sous forme d'un ensemble de pistes. Ces pistes sont terminées par des perçages (pastilles) où sont implantés des composants électroniques. Les couches de cuivre conductrices assurent l'interconnexion électrique entre les composants ajoutés au PCB et qui sont soudés sur ce dernier. Le circuit imprimé est ensuite recouvert d'un vernis pour le protéger de l'oxydation et préserver les pistes de cuivre.

Pour réaliser le PCB de notre carte électronique, nous avons utilisé le logiciel Eagle qui permet une conception de circuits imprimés de haute qualité, avec la possibilité de contrôler parfaitement l'apparence des cartes développées et le contrôle des interconnexions entre les composants électroniques ainsi que les paramètres de base comme l'épaisseur des pistes, la taille des pastilles, le rayon des pesages ... .Eagle est simple à manipulé et il dispose d'une large bibliothèque de composantes utiles pour la conception des cartes électroniques [27].

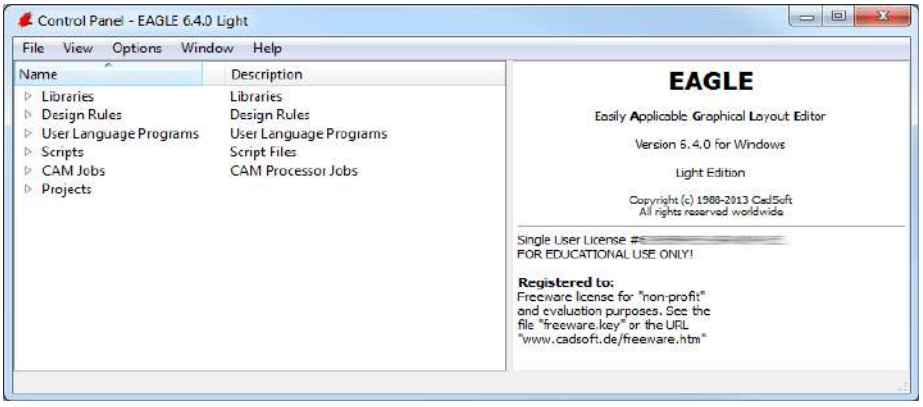


Figure III.17. Interface principale du logiciel EAGLE.

Pour cette réalisation, nous avons assemblé les différents composants et modules suivants :

- Carte Arduino Nano.
- Afficheur LCD 4 x 16 caractères avec interface I2C.
- Module adaptateur carte mémoire SD.
- Module horloge temps réel RTC DS3231.
- Module de communication Bluetooth HC-05.
- Encodeur rotatif (Ky-040).
- 3 ports USB de type A pour interconnecté les capteurs DHT 22.
- Régulateur de tension LM 7805.

- Interrupteur ON/OFF.

A la fin de la conception nous avons obtenu le circuit suivant, la finalisation de la carte de mesure notre réalisation nécessite la soudure des composants est cela après le perçage des pastilles où on implante les différents composants sur leurs emplacements.

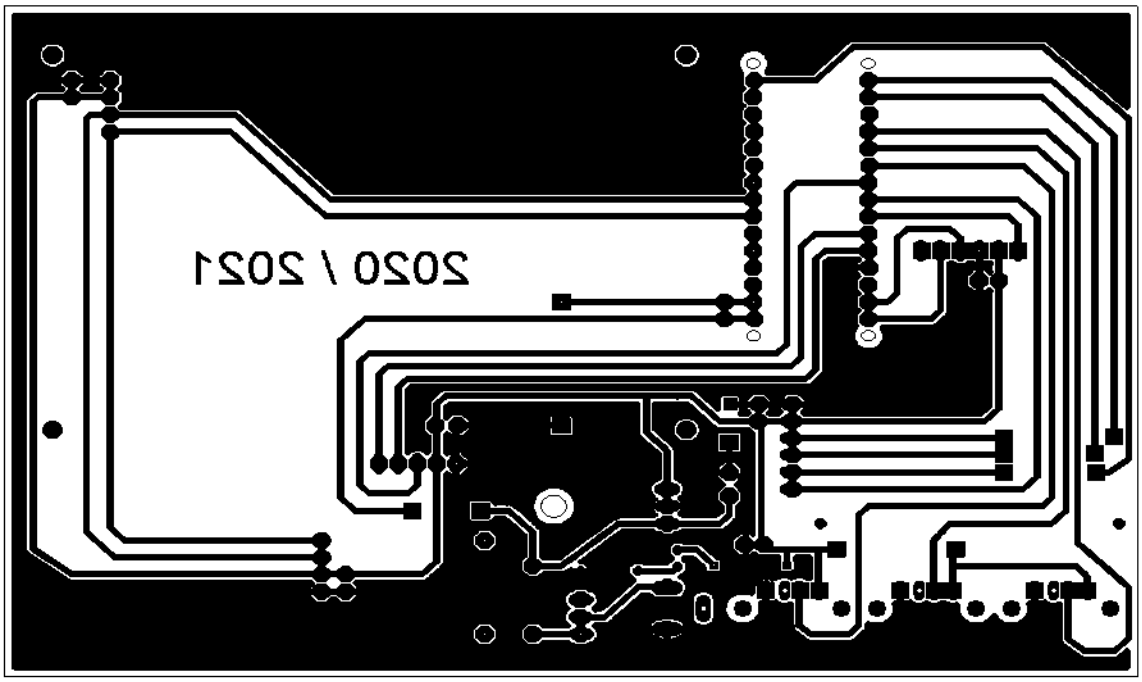


Figure III.18. Circuit imprimé «coté soudure».

La Figure III.18 illustre la photo de la carte de mesure avec ces trois capteurs :

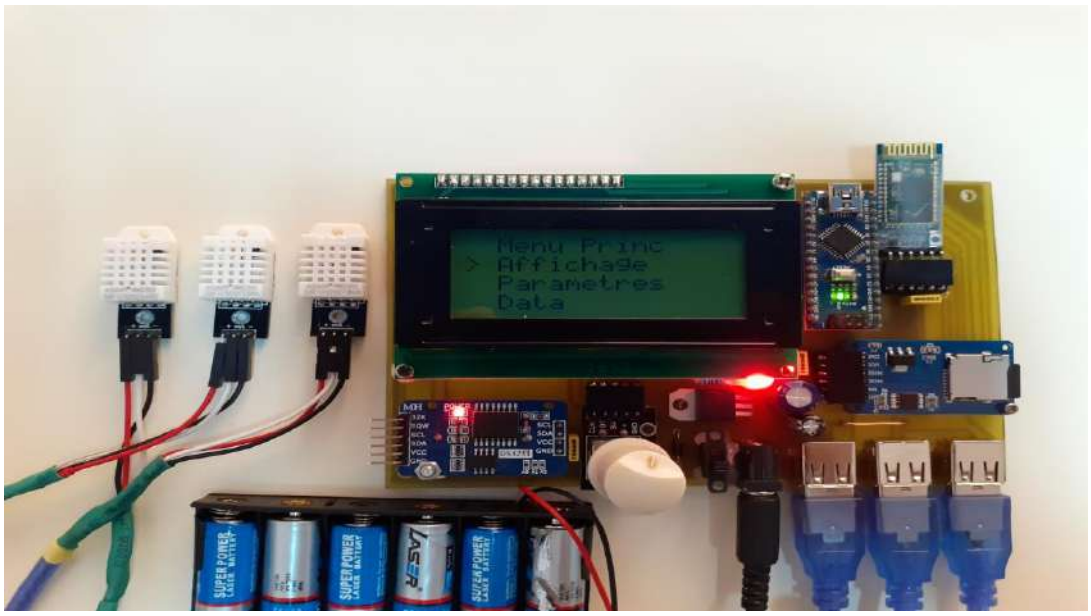


Figure III.19. Photo de la carte de mesure.

III.3. Partie SOFTWARE :

Dans cette partie nous avons utilisé l'environnement de développement IDE Arduino pour écrire le programme C pour programmer la carte Nano.

III.3.1. l'environnement de la programmation :

L'environnement de développement IDE (Interactive Développement Environnement) Arduino est basé sur le langage C. Une fois, le programme saisi ou modifié au clavier, il sera transféré et mémorisé dans la carte à travers la liaison USB. Le câble USB alimente à la fois en énergie la carte et transporte aussi l'information.

III.3.2. Structure générale d'un programme :

La figure suivante illustre la fenêtre principale de l'IDE Arduino :

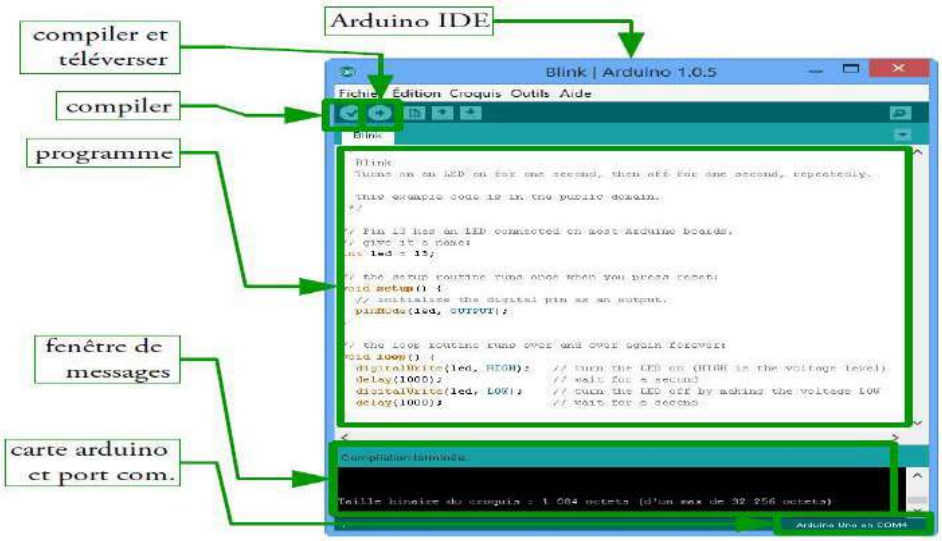


Figure III.20. Présentation de logiciel Arduino Nano.

III.3.3. Transfert du programme :

Avant d'envoyer un programme dans la carte, il est nécessaire de sélectionner le type de la carte (Arduino Nano) et le numéro du port USB (COM) (Figure III.21 et Figure III.22)

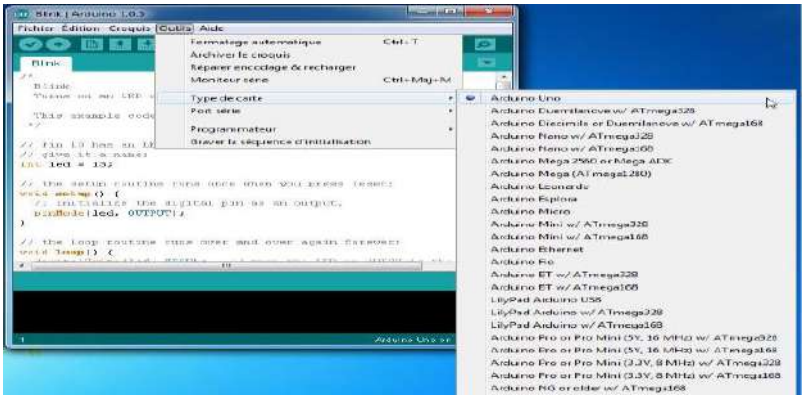


Figure III.21. Le choix de la carte a utilisée.

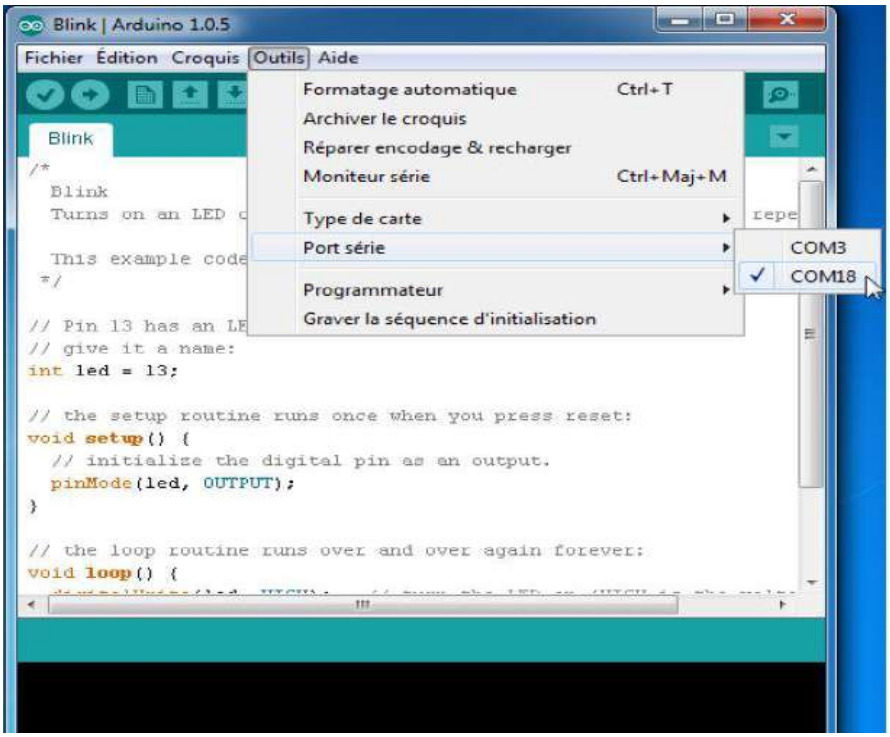


Figure III.22. Le port de programmation de la carte.

III.3.4. Description du programme :

Un programme Arduino comporte trois parties principales :

1. la partie déclaration des variables (optionnelle).
2. la partie initialisation et configuration des Entrées/Sorties et des périphériques par la fonction **setup ( )** ;
3. la partie principale qui s'exécute en boucle sans fin par la fonction **loop ( )**.

III.3.5. Les étapes de création d'un programme :

Une simple manipulation enchaînée doit être suivie afin de transférer le code vers la carte Arduino via le port USB.

1. On conçoit ou on ouvre un programme existant avec le logiciel IDE Arduino. On vérifie le code avec le bouton vérifié (phase de compilation).
2. On charge le programme sur la carte.
3. On câble le montage électronique.
4. L'exécution du programme est automatique après quelques secondes.
7. On alimente la carte soit par le port USB, soit par une source d'alimentation autonome (Pile 9 volts par exemple).
8. On vérifie que notre montage fonctionne.

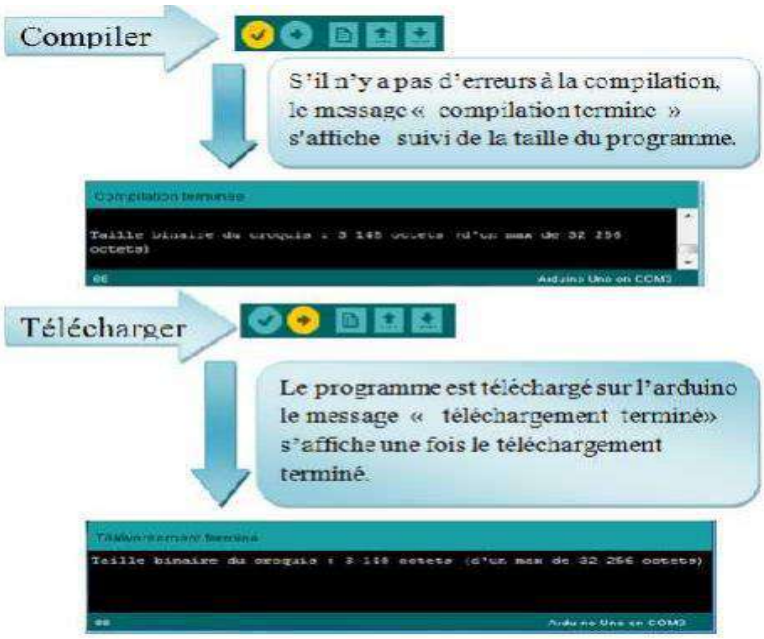


Figure III.23. Les étapes de téléchargement du code.

III.3.6. Bibliothèques Arduino :

Les bibliothèques Arduino sont des codes qui simplifient l'utilisation d'un capteur, d'une fonctionnalité, d'un composant ou d'un module. Elles sont chargées dans l'Arduino si nécessaire, nous allons voir comment faire pour les charger.

- **Chargement de bibliothèques :**

Dès qu'un sketch Arduino contient une ligne ressemblant à # include "LedControl.h", il appelle une librairie, ici c'est la bibliothèque LedControl. Lors de la compilation préalable à la programmation de l'Arduino, l'interface vérifie que la librairie est bien disponible, si ce n'est pas le cas, un message d'erreur s'affiche et l'Arduino ne peut pas recevoir le sketch.

Il est donc nécessaire de mettre la librairie à disposition de l'IDE avant de lancer la compilation.

- Utilisation du gestionnaire des bibliothèques :

Le gestionnaire des bibliothèques permet d'afficher la liste des librairies prêtes à l'emploi ou prêtes à installer.

- Importation d'un fichier bibliothèque zip :

Si on veut par exemple ajouter la librairie LedControl disponible sur le site GitHub, on clique sur le bouton vert « Clone or download » puis sur « Download ZIP ».



Figure III.24. Téléchargement de la librairie en format zip.

On obtient un fichier nommé « LedControl-master.zip », puis on a deux possibilités : par l'interface Arduino ou par l'ajout manuel d'un répertoire.

- Méthode par l'interface Arduino :

Cette méthode utilise la fonctionnalité « ajouter la bibliothèque.zip » de l'interface Arduino.

- On clique sur Croquis.
- Inclure une bibliothèque.
- Ajouter la bibliothèque.zip
- On choisit le fichier LedControl-master.zip qu'on a téléchargé.

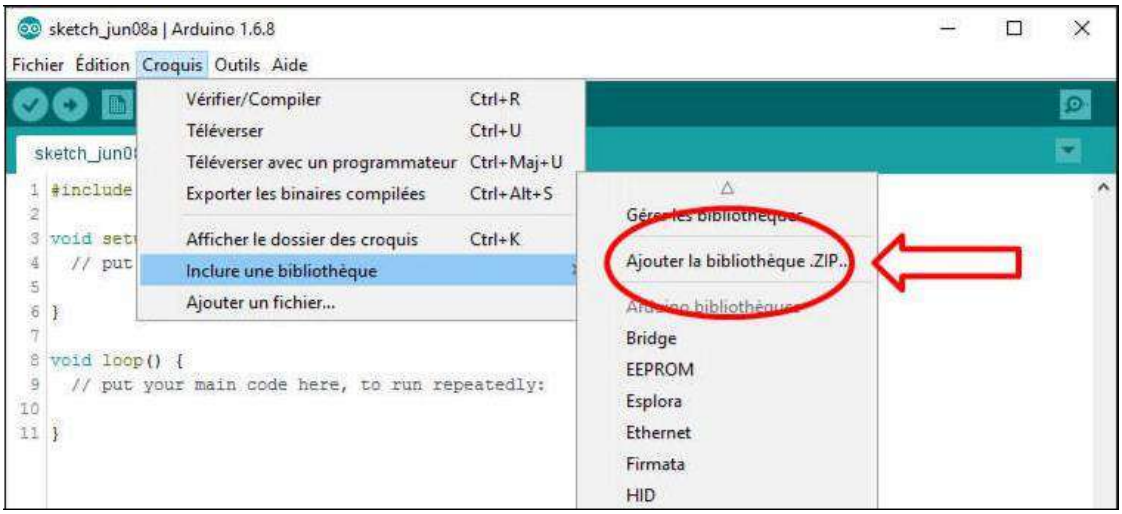


Figure III.25. Rajout d'une librairie par l'interface Arduino.

- **La méthode manuelle :**

- Fermer l'interface Arduino.
- Décompresser le fichier téléchargé, puis sélectionner le répertoire à installer.
- Coller le répertoire dans le chemin suivant «C:\Program Fil(x86)\Arduino\librairies »
- Redémarrer l'interface Arduino, la librairie sera maintenant disponible.

III.3.7. Menu de la carte :

III.3.7.1. Le menu principal :

Le menu principal utilisé dans ce projet est un ensemble d'options affichées sur un afficheur LCD qui permet à l'utilisateur d'effectuer diverses opérations.

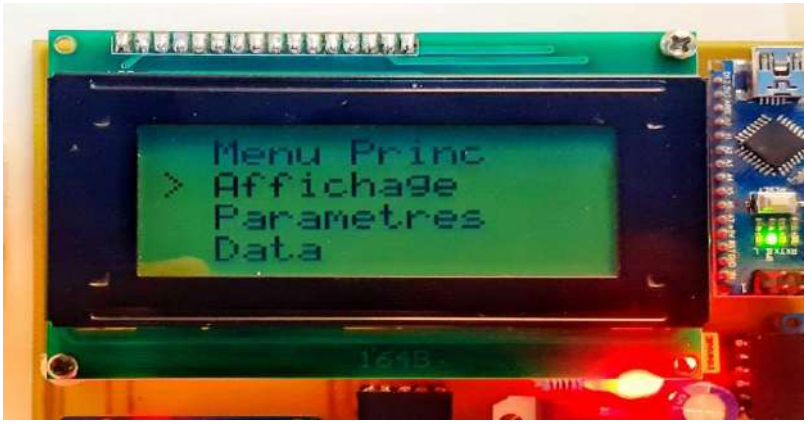


Figure III.26. Menu principale.

Le menu principal utilisé dans ce projet se compose de 3 options :

- **Affichage :** Le rôle de cette option est d'afficher les valeurs de température et d'humidité des trois capteurs obtenues sur un afficheur LCD, ainsi que le nombre de mesures que nous avons effectuées.

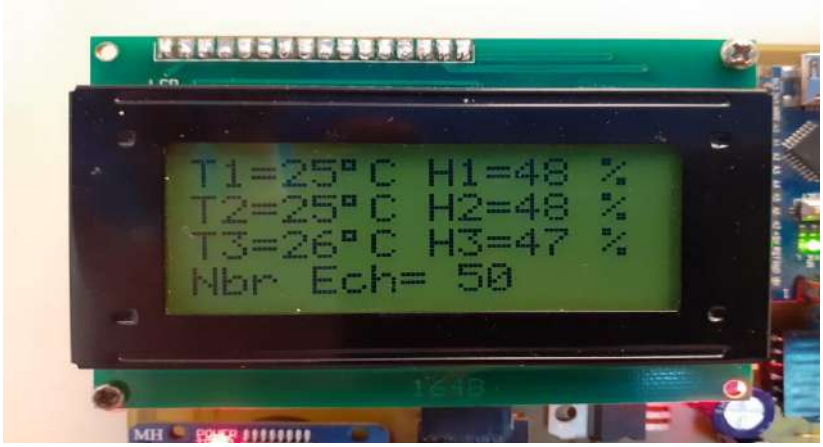


Figure III.27. Option D'affichage.

- **Paramètres :** Cette option permet de régler la date, l'heure et la durée de la mesure que l'on souhaite.



Figure III.28. Option Paramètres.

- **Data :**

Cette option permet à l'utilisateur de recevoir et de lire les valeurs de température et d'humidité dans le téléphone via Bluetooth sans avoir recours à un afficheur LCD, en plus de la possibilité de stocker les résultats dans une carte mémoire. Et Cette lecture se fait par une application Android gratuite appelée Bluetooth Terminal HC-05.



Figure III.29. Option Data.

III.4. Conclusion :

A travers ce chapitre nous avons présenté le développement et la réalisation de la carte de mesure à base du module Arduino Nano, des capteurs DHT 22 et des différents modules électroniques associés à notre système de séchage solaire. Pour mesurer, visualiser, stocker les données de température et d'humidité lors du processus de séchage avec possibilité de transmission de ces données via un module Bluetooth vers un Smartphone ou un PC portable distant.

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1.Introduction :

Dans ce chapitre de mémoire, nous allons présenter les résultats expérimentaux du séchage solaire indirect. Ce chapitre comprend deux expériences. La première expérience comprenait les résultats du séchage solaire de tranches de tomates d'épaisseur de 1 cm et de même pour la deuxième expérience d'épaisseur de 2 cm. Les résultats ont été présentés sous forme des courbes et discutés.

IV.2. Préparation des Échantillons :

Les tomates utilisées dans cette étude proviennent du marché de wilaya de Médéa, les tomates choisies sont de bonne qualité (ni trop mûrs, ni trop crûs). On les trie pour avoir les mêmes dimensions. Ensuite elles sont lavées avec de l'eau fraiche, puis on les pèse et on les découpe à l'aide d'un cutteur à lame tranchante.

Les figures suivantes montrent les différentes étapes suscitées :



Figure IV.1. Nettoyage du produit



Figure IV.2. Triage du produit



Figure IV.3. Découpage avec épaisseurs de 2cm



Figure IV.4. Découpage avec épaisseurs de 1cm



Figure IV.5. Tranches de tomates disposées sur les claies du dispositif de séchage.

IV.3. Expérience n°1 :

La première expérience a été effectuée durant la journée du 21/05/2020 et 21/05/2021. Cette expérience concerne le séchage des rondelles de tomate d'épaisseur égales à 1 cm, avec un poids total égale à 1000g, Avec une répartition uniforme (500 g par claies), la procédure de séchage s'effectue de 9h00 à 19h00. Nous surveillons la température et l'humidité pendant cette période.

IV.3.1. Variation de la température de différents éléments du séchoir :

Les figures IV.6 et IV.8 représente l'évolution des températures des différents endroits du séchoir en fonction du temps pendant les journées des 21 et 22 mai 2021.

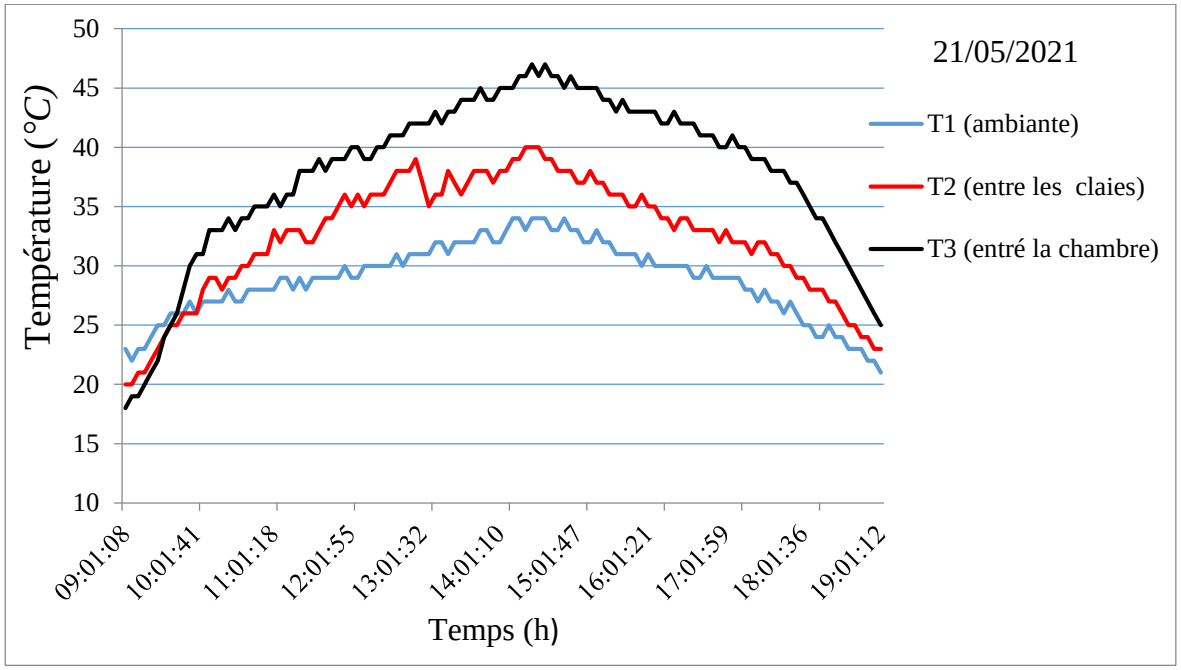


Figure IV.6. Evolution des températures expérimentales pour la journée du 21/05/2021.

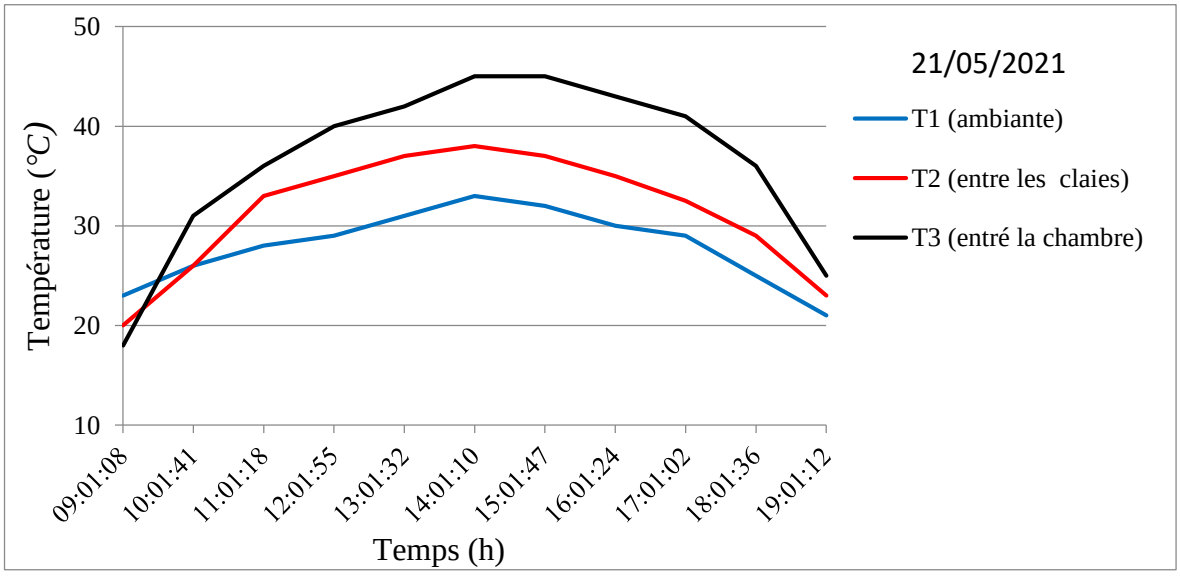


Figure IV.7. Evolution des températures moyenne pour la journée du 21/05/2021.

La courbe en noir représente l'évolution de la température d'entrée de la chambre à sécher, la courbe en rouge l'évolution de la température en avant des claies et celle en bleue caractérise la variation temporelle de la température ambiante. Pour la journée du 21 mai 2021, de 09:01 à 14:40, on observe une augmentation des températures (ambiante et dans la chambre de séchage) alors que de 14:40 à 19:00, on observe une baisse de ces températures.

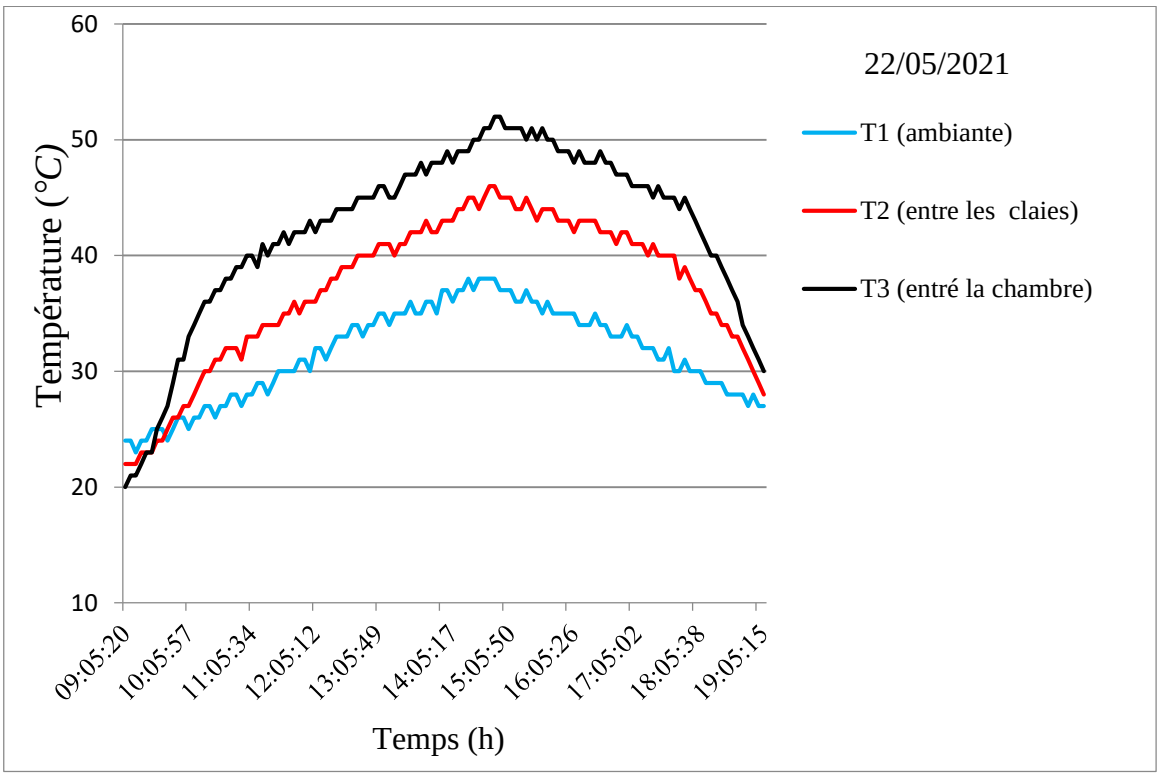


Figure IV.8. Evolution des températures expérimentales pour la journée du 22/05/2021.

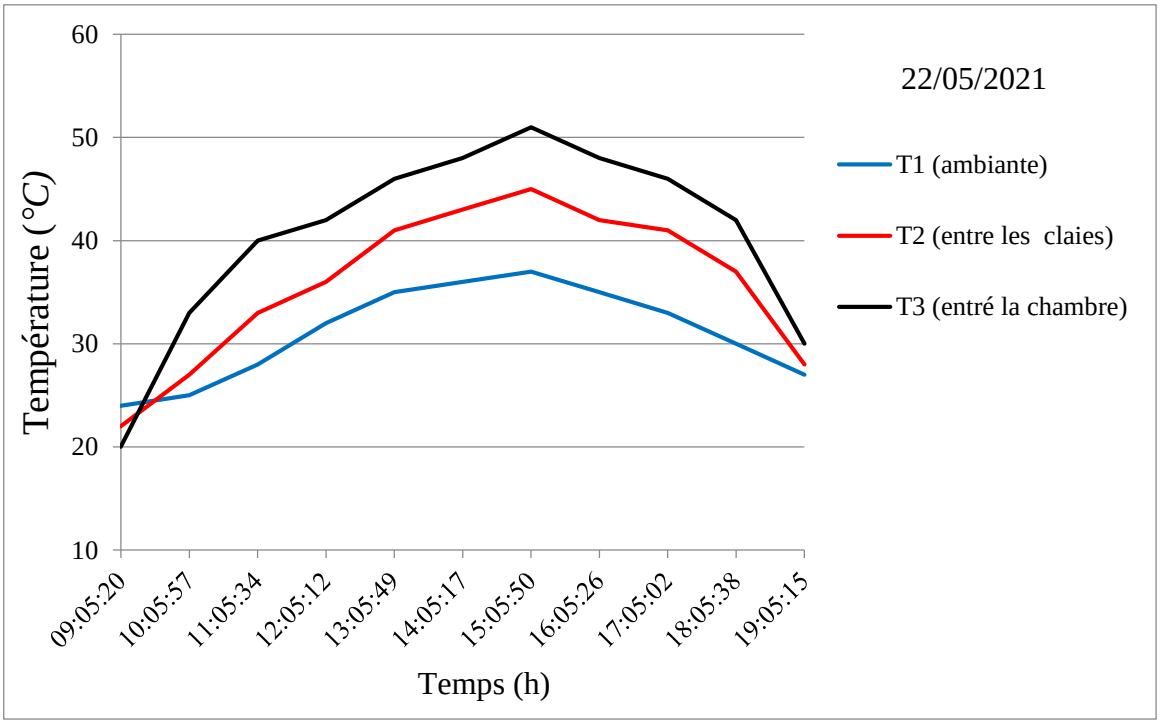


Figure IV.9. Evolution des températures moyenne pour la journée du 22/05/2021.

Les mêmes observations sont également valables pour la journée du 22 mai 2021 et ce, de 09:05 à 02:30, et de 02:30 à 19:30. On observe également un écart entre la température ambiante (entrée capteur), la température à l'entrée de la chambre à sécher et la température au niveau des claies.

Cet écart est dû au réchauffement de l'absorbeur dans le capteur solaire. En effet, sous l'effet du rayonnement solaire, la température de l'air ambiant augmente à la sortie du capteur.

IV.3.2. Variation de la l'humidité relative de différents éléments du séchoir :

Les figures IV.10 et IV.11 représentent l'évolution de l'humidité relative à différents endroits du séchoir en fonction du temps au cours des jours 21/05/2021 et 22/05/2021.

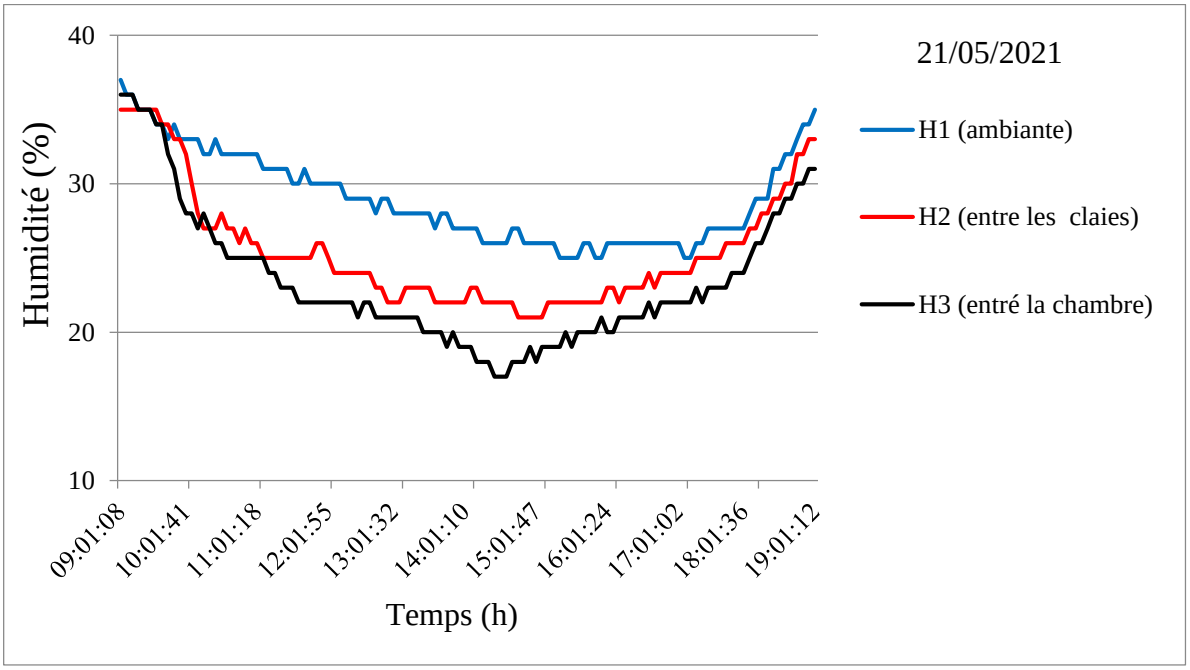


Figure IV.10. Evolution des l'humidité relative pour la journée du 21/05/2021.

La courbe en noir représente l'évolution de l'humidité relative à l'entrée de la chambre, et la courbe en rouge représente l'évolution de l'humidité relative devant les claies, La courbe en bleu représente l'humidité relative à l'extérieur de la chambre de séchage. Le 21 mai 2021, de 09h01 à 02h30, on constate une diminution de l'humidité (ambiante (25%), l'entré la chambre (17%) et entre les claies (21%)) tandis que de 02h30 à 19h00, on constate une augmentation de cette humidité relative.

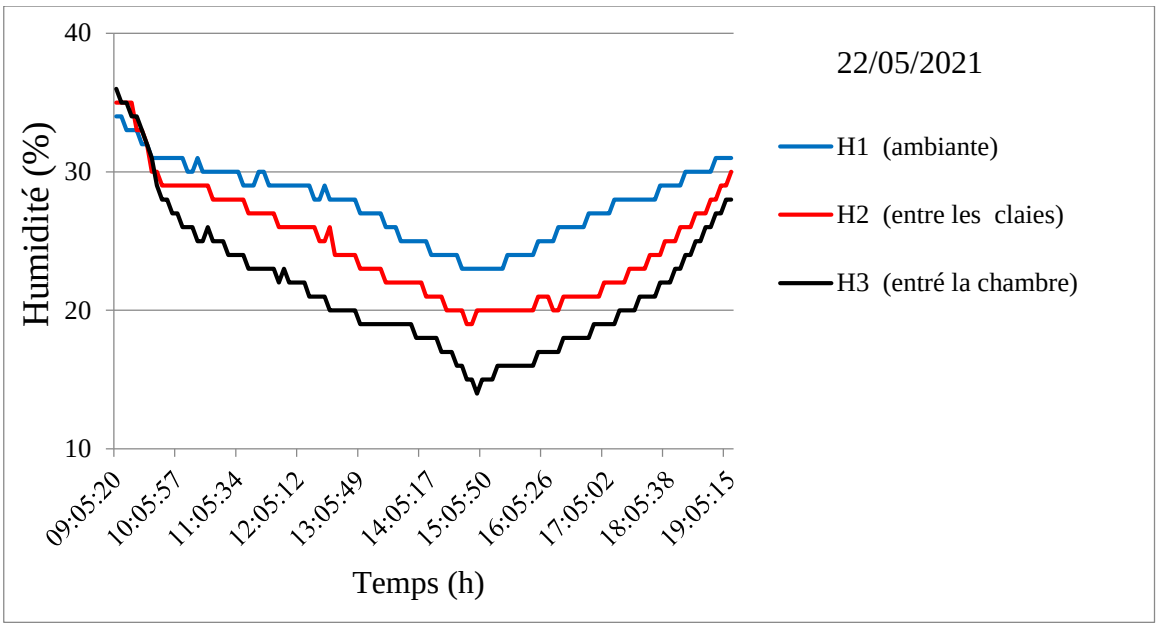


Figure IV.11. Evolution des l'humidité relative pour la journée du 22/05/2021.

Les mêmes observations sont également valables pour le 22 mai 2021, de 9h05 à 14h45 une diminution de l'humidité et 14h45 à 19h30 une augmentation de cette humidité relative. Il existe également une différence entre l'humidité relative à l'extérieur de la chambre (23%) et l'humidité à l'entrée de la chambre (19%) et entre les claies (14%).

Cette différence est due à la température plus élevée à chaque position du séchoir.

IV.4. Expérience n°2 :

À deuxième expérience a été réalisée durant la journée du 28/05/2020, 29/05/2021 et 30/05/2021 avec une épaisseur 1cm, dans laquelle nous avons suivi les mêmes étapes avec les mêmes poids en claies.

IV.4.1. Variation de la température de différents éléments du séchoir :

Les figures (IV.12), (IV.14) et (IV.16) présentent la variation des températures des différents endroits du séchoir en fonction du temps pendant les journées des 28, 29 et 30 mai 2021.

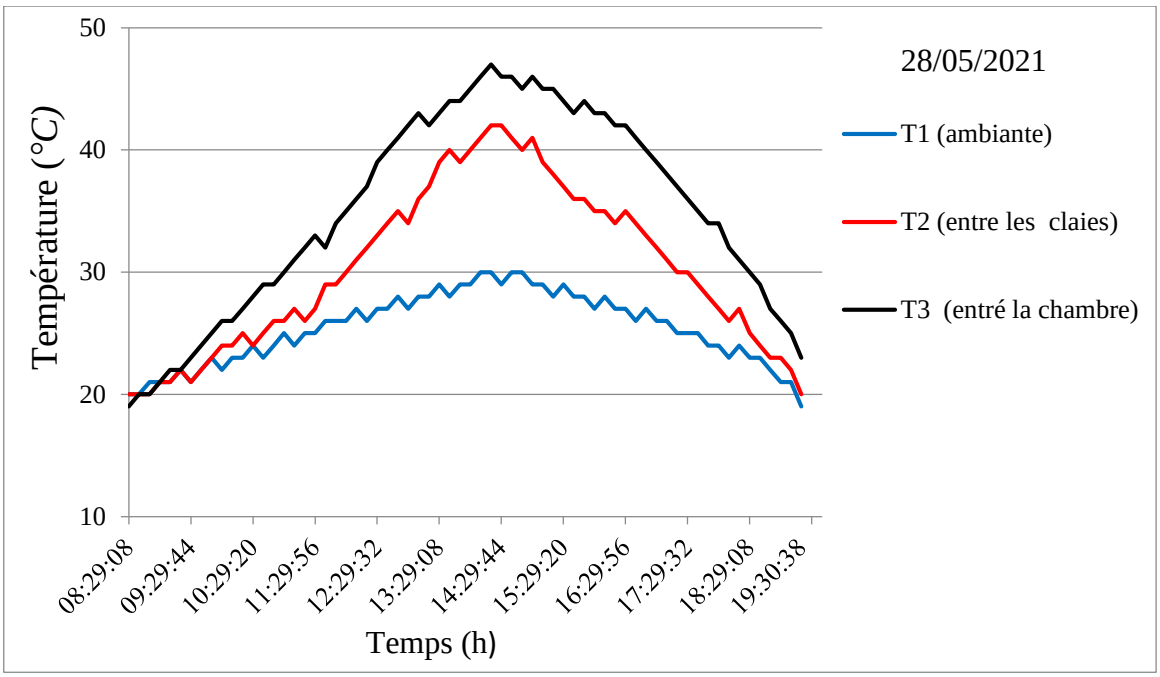


Figure IV.12. Evolution des températures expérimentales pour la journée du 28/05/2021.

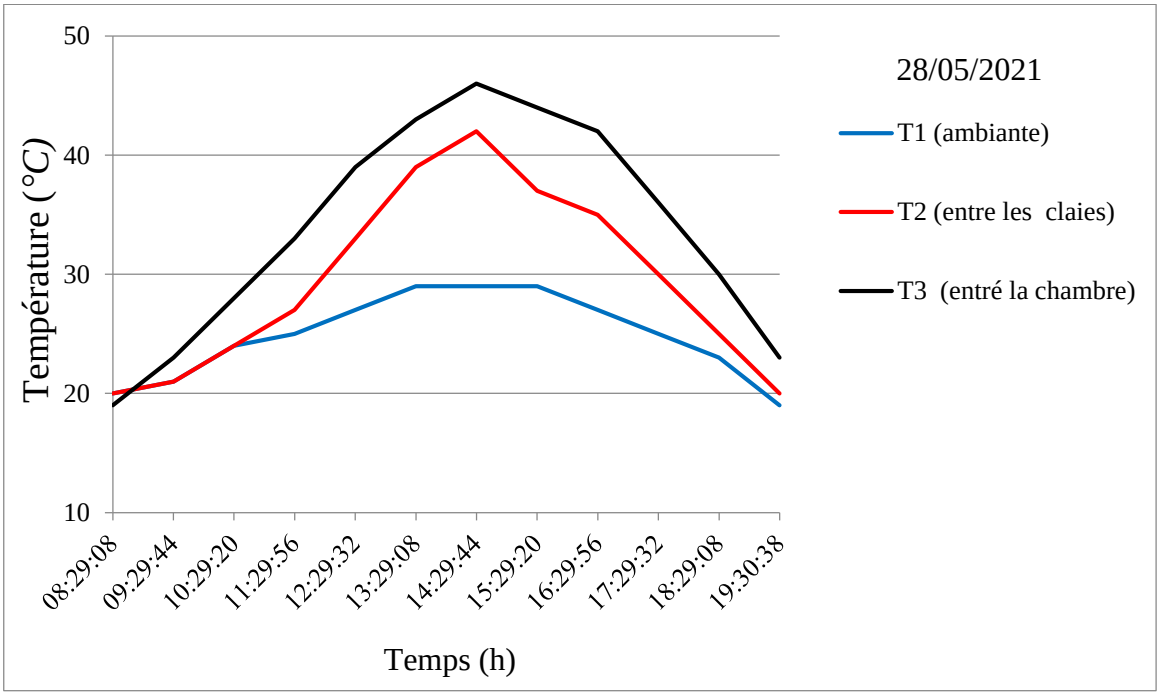


Figure IV.13. Evolution des températures moyenne pour la journée du 28/05/2021.

On observe une augmentation relative dans les trois température, Où la température á l'entré de la chambre de séchage atteint à 47 degrés á 14:30 Puis il diminue progressivement jusqu'à atteindre 23 degrés à 19h30 (courbe noir) , Alors que les températures entre les claies atteignent un maximum de 42 degrés à 2h30 puis diminuent progressivement jusqu'à 20 degrés à 19h30 (la courbe rouge), Lorsque la température ambiante varie de 20 degrés à 30 degrés.

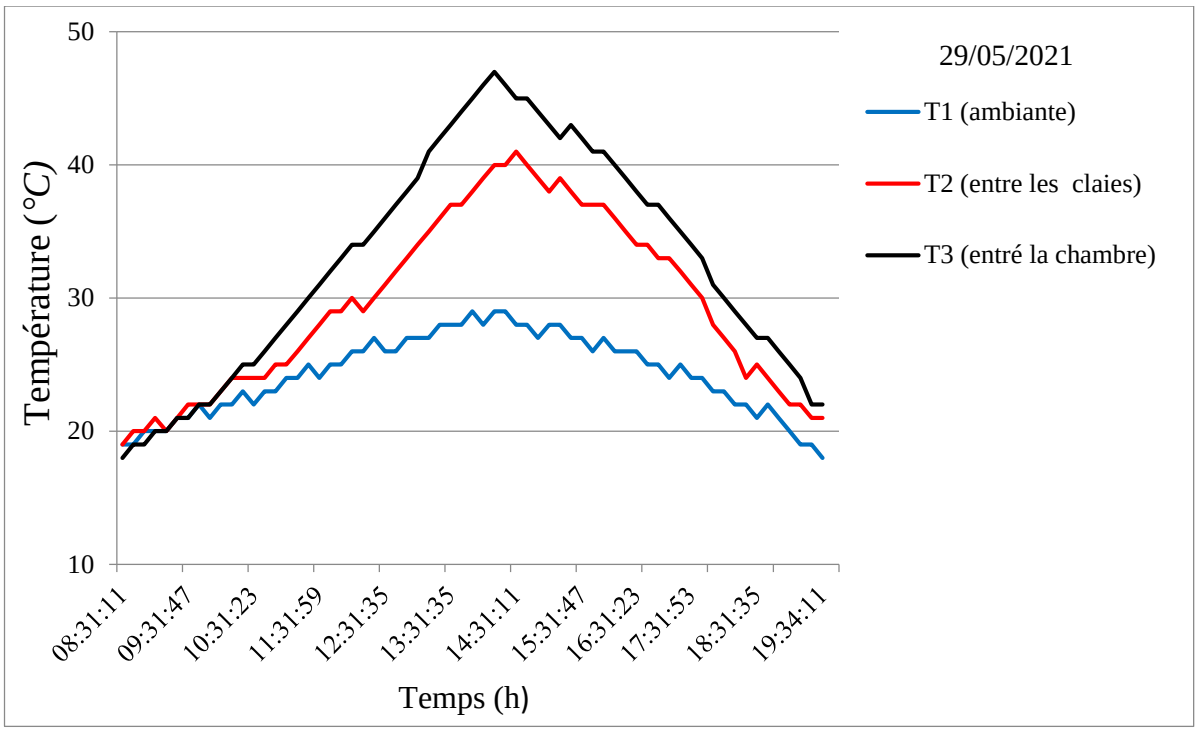


Figure IV.14. Evolution des températures expérimentales pour la journée du 29/05/2021.

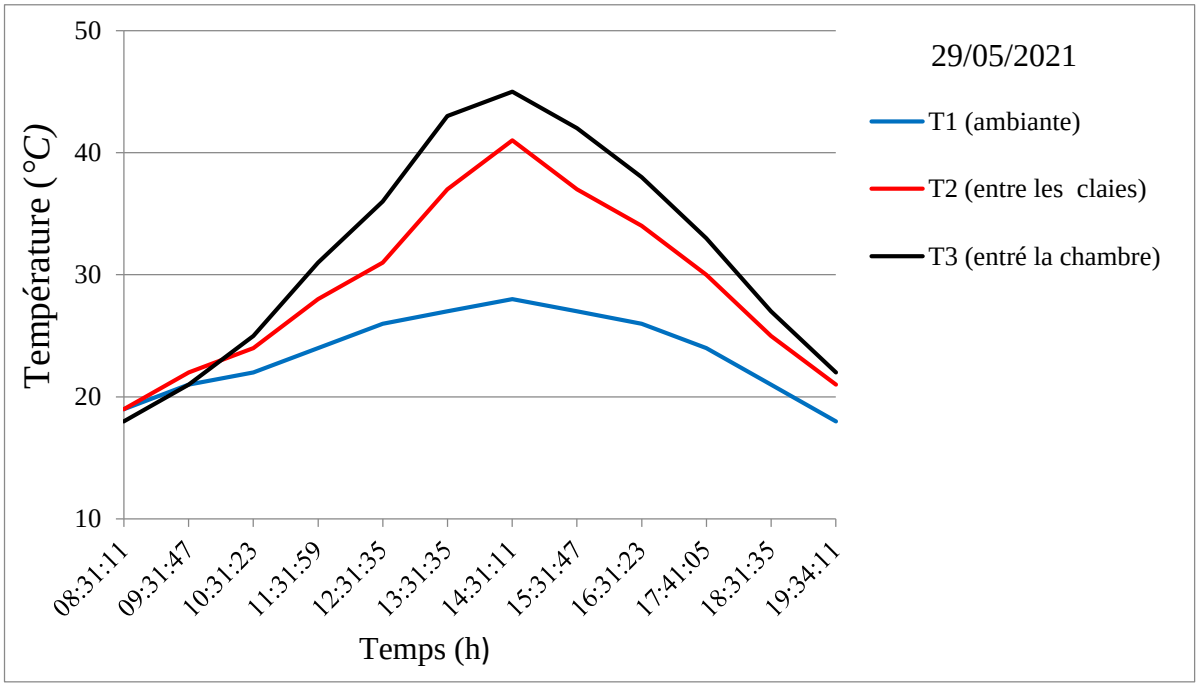


Figure IV.15. Evolution des températures moyenne pour la journée du 29/05/2021.

Le deuxième jour, on constate une augmentation des températures aux trois endroits, où elle atteint un maximum à l'entrée de la chambre 47 degrés Celsius (la courbe noire) et entre les claies elle atteint 41 degrés Celsius (la courbe rouge), et cela à 14h30 puis diminua progressivement pour atteindre 22 et 21 degrés Celsius, respectivement, alors que la température ambiante variait entre 19 et 30 degrés Celsius.

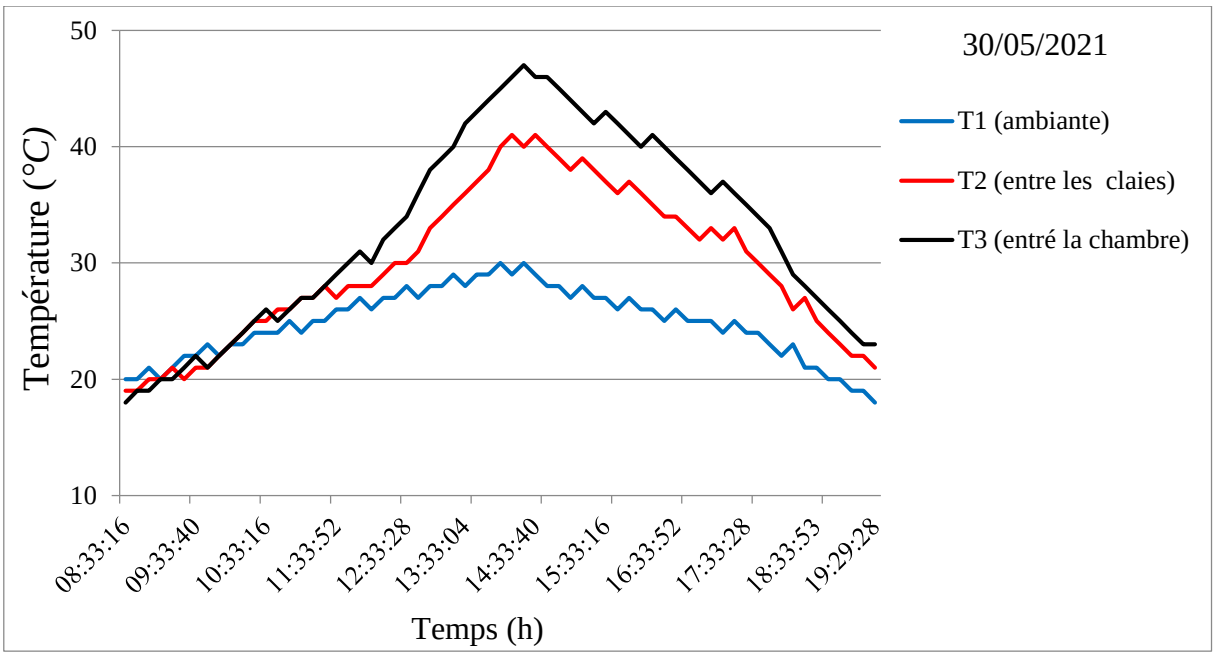


Figure IV.16. Evolution des températures expérimentales pour la journée du 30/05/2021.

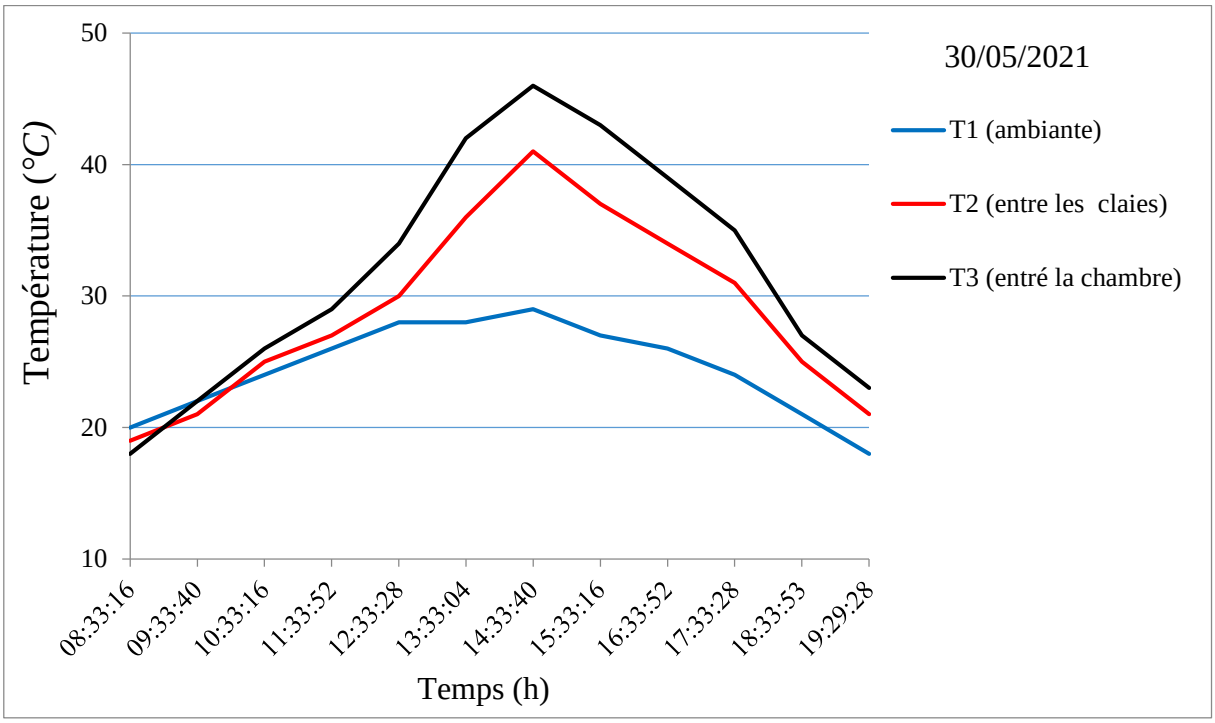


Figure IV.17. Evolution des températures moyenne pour la journée du 30/05/2021.

Les mêmes observations se sont produites le dernier jour de séchage, Alors que les températures ont augmenté à la même manière, mais à des degrés différents, atteignant 47 °C à l'entrée de la chambre, et 41 °C entre les claies à 14h30, de sorte que les températures ont convergé à nouveau à 19h00, alors que la température ambiante variait entre 20°C et 30°C.

On remarque que le passage nuageux lors de cette journée a une influence sur les températures relevées (aux environs de 9h00 jusqu'à 11h00).

IV.4.2. Variation de la l'humidité relative de différents éléments du séchoir :

Les figures IV.18, IV.19 et IV.20 représentent l'évolution de l'humidité relative à différents endroits du séchoir en fonction du temps au cours des jours 28/05/2021, 29/05/2021 et 30/05/2021.

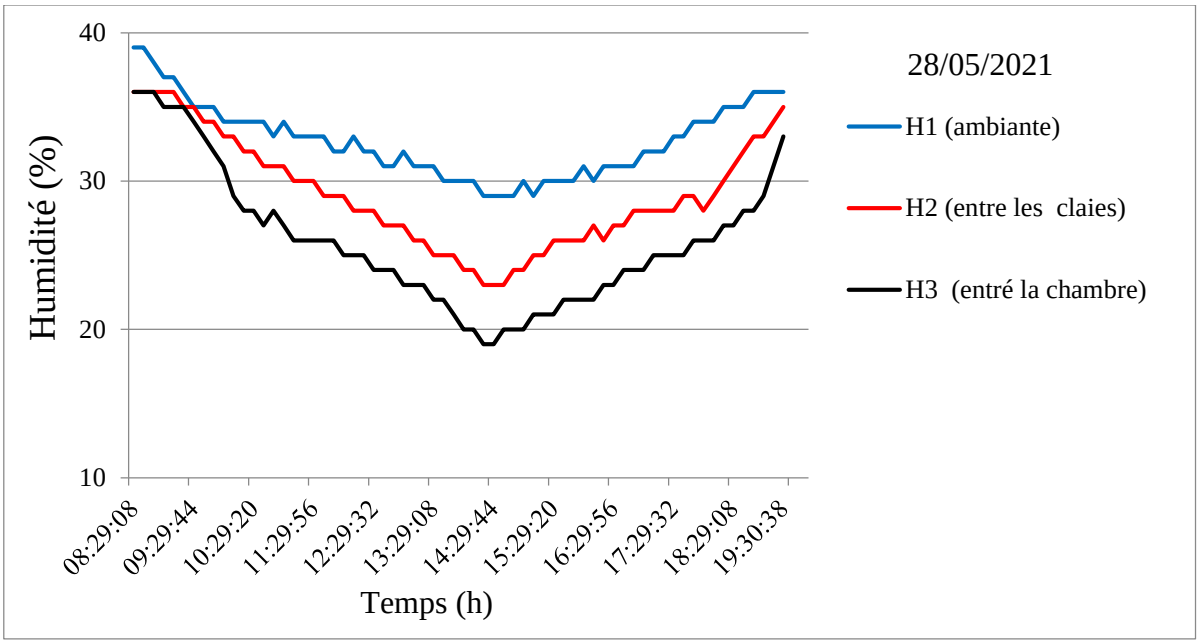


Figure IV.18. Evolution des l'humidité relative pour la journée du 28/05/2021.

L'humidité relative à l'entrée du séchoir atteint un minimum (19%) et entre les claies un minimum (23%), Alors qu'à l'extérieur de la chambre, il était 29 % á partir de 14h30 locales, heure où la température atteint sa plus grande valeur qui correspond à un flux solaire maximum.

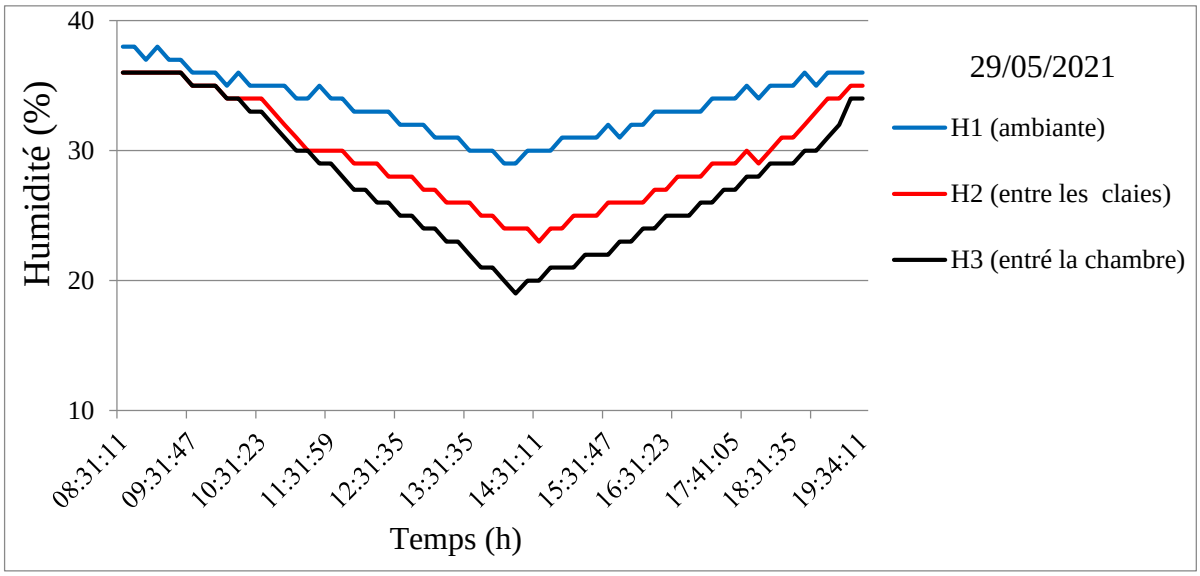


Figure IV.19. Evolution des l'humidité relative pour la journée du 29/05/2021.

La deuxième journée, l'humidité relative au début de 8h30 à l'entrée de la chambre était de 36% (la courbe noire), puis elle a diminué à 19% à 14h20, puis elle est remontée pour atteindre 34% à 19h30. Entre les claies, l'humidité relative à 8h30 du matin était de 36% (la courbe rouge), puis elle diminuait à 24% à 14h20, pour remonter à nouveau pour atteindre 35% à 19h30. Alors que l'humidité relative ambiante était variaient entre 29% et 36%, pendant la période de séchage (la courbe bleu).Cette différence est due à la variation de température à chaque endroit.

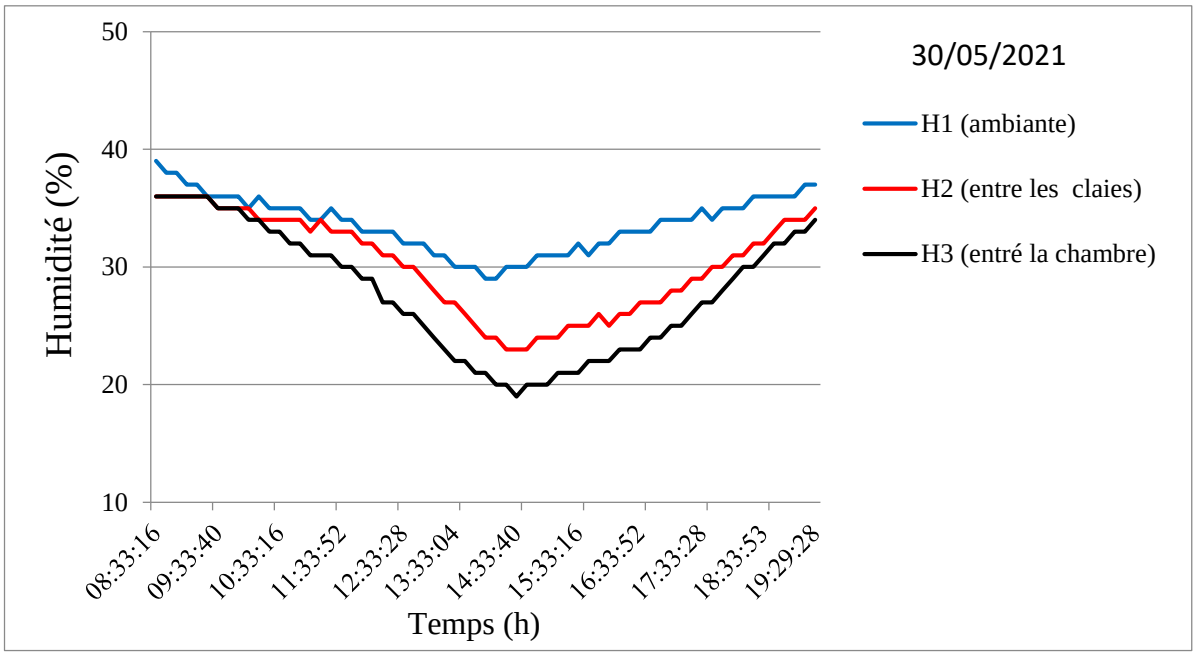


Figure IV.20. Evolution des l'humidité relative pour la journée du 30/05/2021.

Les mêmes observations sont valables pour le dernier jour. A l'entrée de la chambre au début du séchage à 8h30, l'humidité était de 40%, puis a diminué à 19% à 2h30, jusqu'à 19h00 a atteint 34%. Entre les claies était 36%, il est diminué à 19% à 2h30, est augmente à 35% à 19h00. L'humidité relative ambiante variait de 38% à 29%.

L'évolution de l'humidité relative de l'air varie d'une façon opposée à l'évolution de la température de l'air à l'intérieur du séchoir. En effet, l'augmentation de la température de l'air engendre une diminution de son humidité relative.

Pendant tous les jours de séchage, on remarque une différence d'environ14-18°C par rapport à la température ambiante (extérieur), ce qui implique un bon rendement du séchoir. Malgré le passage nuageux (Le dernier jour de la deuxième expérience.) Et des vents à intervalles (les premier et deuxième jours de la première expérience).

IV.5. Influence de la taille du produit sur la qualité du produit séché :

Il est à noter que pour les deux cas étudiés, pour l'épaisseur 1 cm, les rondelles sont déformées ainsi elles sont devenues d'une couleur sombre (voir figure IV. 21). Elles sont fragile (cassable) à cause de la grande quantité d'eau extraite. Les rondelles d'épaisseur 2 cm sont moins déformées et moins sombres (voir figure IV. 22). Elles ont également un aspect doux.

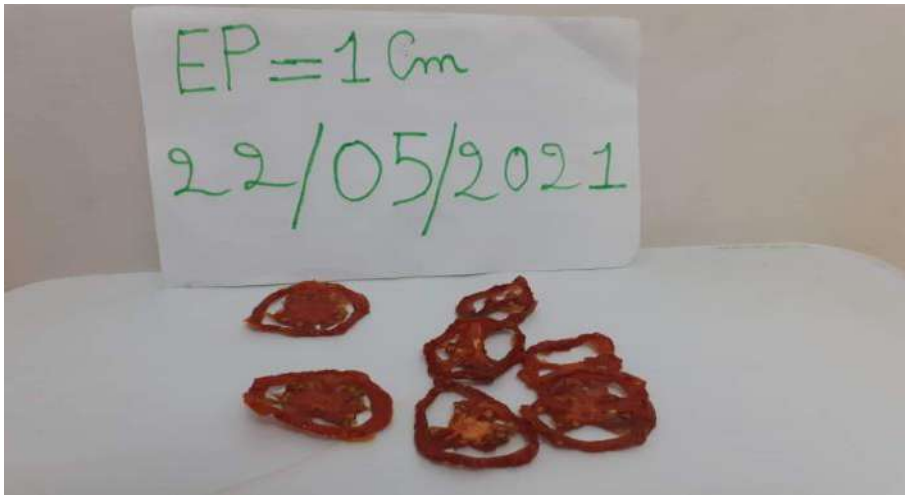


Figure IV.21. Aspect final des lamelles de tomate séchées (Ep = 1cm).



Figure IV.22. Aspect final des lamelles de tomate séchées (Ep = 2cm).

IV.6. Conclusion :

Dans ce travail, nous avons présenté les résultats de l'analyse de température et d'humidité de séchage de la tomate dans un séchoir solaire indirect fonctionnant en convection naturelle et de façon discontinue (uniquement le jour).

Les résultats obtenus nous semblent satisfaisants, acceptables et en accord avec les travaux d'autres auteurs.

Conclusion générale

Dans ce travail présent, nous nous sommes intéressé au séchage solaire indirect de l'air chaud qui est assuré par un unité de production d'énergie vers la chambre de séchage et plus particulièrement pour étude expérimentale du séchage de certains produits agro-alimentaires (tomate) cultivées dans la région de Médéa.

Notre rapport porte sur « la Conception et la Réalisation d'un système de séchage Solaire indirect à base d'une carte électronique Arduino » à l'aide des composants électroniques programmable gérés par un microcontrôleur (Arduino).

Ce projet de fin d'études était pour nous l'occasion précieuse de faire un travail multidisciplinaire, associant l'électronique, la mécanique, la programmation même le travail en collaboration avec des étudiants d'autre département sous la direction de notre encadreur.

Le résultat le plus pertinent de ce projet est que grâce à des mesures d'humidité et de température à l'intérieur et à l'extérieur du système de séchage et à les traduire en courbes graphiques afin de faciliter la lecture et l'analyse des résultats obtenus.

Pour cela, le système que nous avons pu réaliser s'est avéré capable de contrôler le séchage, fonctionnant à environ 100% ou avec quelques défauts. Malgré les problèmes rencontrés durant la réalisation, parmi lesquels nous citons :

- Les matériels mécaniques.
- Le manque de pièces électroniques.

Les recommandations pour les projets futurs sont très diverses, à savoir : Augmentation du niveau de contrôle de séchage, Sous réserve de fourniture de capteurs professionnels et d'un mécanisme de surveillance efficace, le propriétaire en sera informé par tous les conditions entourant sa système de séchage et donc pourra réagir rapidement en temps réel. l'utilisation de capteurs de haute technologie, la liaison du système via Internet étant données les consignes de références.

BIBLIOGRAPHIE

[1] SAID Bachir, " Modélisation mathématique de séchage solaire indirect des dattes Deglet-Nouer réhumidifiées ", Mémoire de fin d'étude, Université Kasdi Merbah. Ouargla, 2014/2015.

[2] SEBBAGH Khadidja, " Etude de séchage de produits agricoles dans un séchoir solaire – cas de poivron rouge ", Mémoire de fin d'étude, Université M'hamed Bougara. Boumerdes, 2016/2017.

[3] HOUHOU Hatem, " Etude théorique et expérimentale du séchage solaire de certains produits agro-alimentaires ", Mémoire de magister, Université Mohamed Khider. Biskra, Décembre 2012.

[4] TEMACINI Bachir, " Etude expérimentale du séchage solaire des produits agro-alimentaires de la région d'el-oued ", Mémoire de fin d'étude, Université Echahid Hamma Lakhdar. El-Oued, 2017/2018.

[5] KAMIL Sacilik, Rahmi Keskin et Ahmet Konuralp Elicin "Modélisation mathématique du séchage en tunnel solaire de tomate biologiques en couche mince", Journal of Food Engineering. 73(231 – 238)-(2003).

[6] Wiképidia l'encyclopédie libre. Séchage. http://fr.wikipedia.org/wiki/Séchage. [17/03 / 2021].

[7] BOROZE Tchamye Tcha-Esso, " Outil d'aide a la conception de séchoirs pour les produits agricoles tropicaux ", Thèse de Doctorat, Université de Lomé. Togo, 1 Juillet 2011.

[8] BEN DJELLOUL Walid, " Réalisation et expérimentation d'un prototype séchoir solaire de type serre avec systèmes de stockage thermique, par chaleur latente et sensible ", Mémoire de fin d'étude, Université Kasdi Merbah. Ouargla, 2018/2019.

[9] CHOUICHA.S, " Etude Expérimentale du Séchage Solaire des Dattes Humides et Impact sur la Qualité", Mémoire de Magister, Université Kasdi Merbah. Ouargla, 2010.

[10] TOGRUL.T, D. Pehlivan, "Mathematical modeling of solar drying of apricots in the layers", Journal of Food Engineering 55 (209-216) (2002).

[11] REBBAH Abd Eraouf " Étude, Conception et simulation sous- SolidWorks d'un Système de freinage", Mémoire de fin d'étude, 2019.

[12] https://fr.wikipedia.org/wiki/Conception_assist%C3%A9e_par_ordinateur. 09/05/2021, 21:21.

[13] https://www.journaldunet.com/solutions/cloud-computing/1150875-la-cao-une-histoire-ancienne, 09/05/2021, 21:52.

[14] https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Conception-assistee-par-ordinateur.html, 09/05/2021, 23:09.

[15] Conception assistée par ordinateur – Lyrfac, Fichier PDF.

[16] https://www.ensta-bretagne.fr/jaulin/mastersds_cours_robot_boimond.pdf.

[17] http://www.monclubelec.fr/pmwiki_reference_arduino/pmwiki.php?n=Main.Materiel arduino uno, 03/06/ 2021,19:56.

[18] C. Tavernier, « Arduino applications avancées ». Version Dunod, 2012.

[19] http://www.generationrobots.com/fr/152-arduino, 05/05/2021, 17:08.

[20] https://knowledge.parcours-performance.com/utiliser-arduino-nano, 05/05/2021, 17:27.

[21] BOUDJEDIR Imen " Un système embarque pour la détection des gaz dangereux a base d'une carte arduino ", Mémoire de fin d'étude, Université Oum El Bouaghi, (2017).

[22] https://learn.sparkfun.com/tutorials/i2c , 05/05/2021, 17:15.

[23] https://www.researchgate.net/publication/288327838**,** 05/05/2021, 17:50.

[24] http://gilles.thebault.free.fr/spip.php?article53, 05/05/2021, 17:28.

[25] http://www.ardwtech.com/shop/development-accessoire/48-lecteur-micro-sd-card-module.html 05/05/2021, 17:34.

[26] https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/arduino-and-hc-05-bluetooth-module-tutorial/, 04/06/2021, 16:29.

[27] https://www.autodesk.com/products/eagle, 04/06/2021, 16:46.

ANNEXES

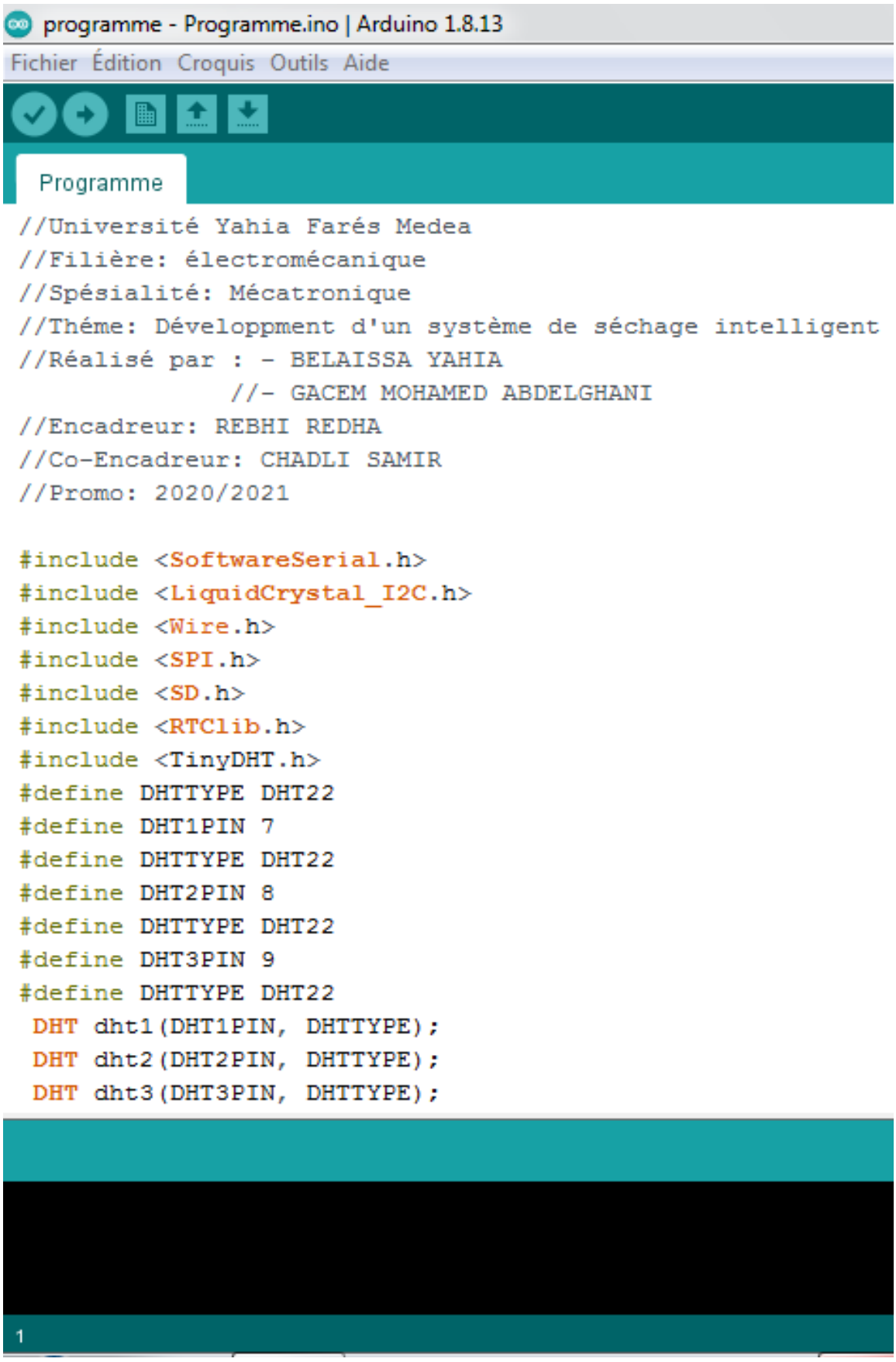


Figure A1. Interface de logiciel Arduino.

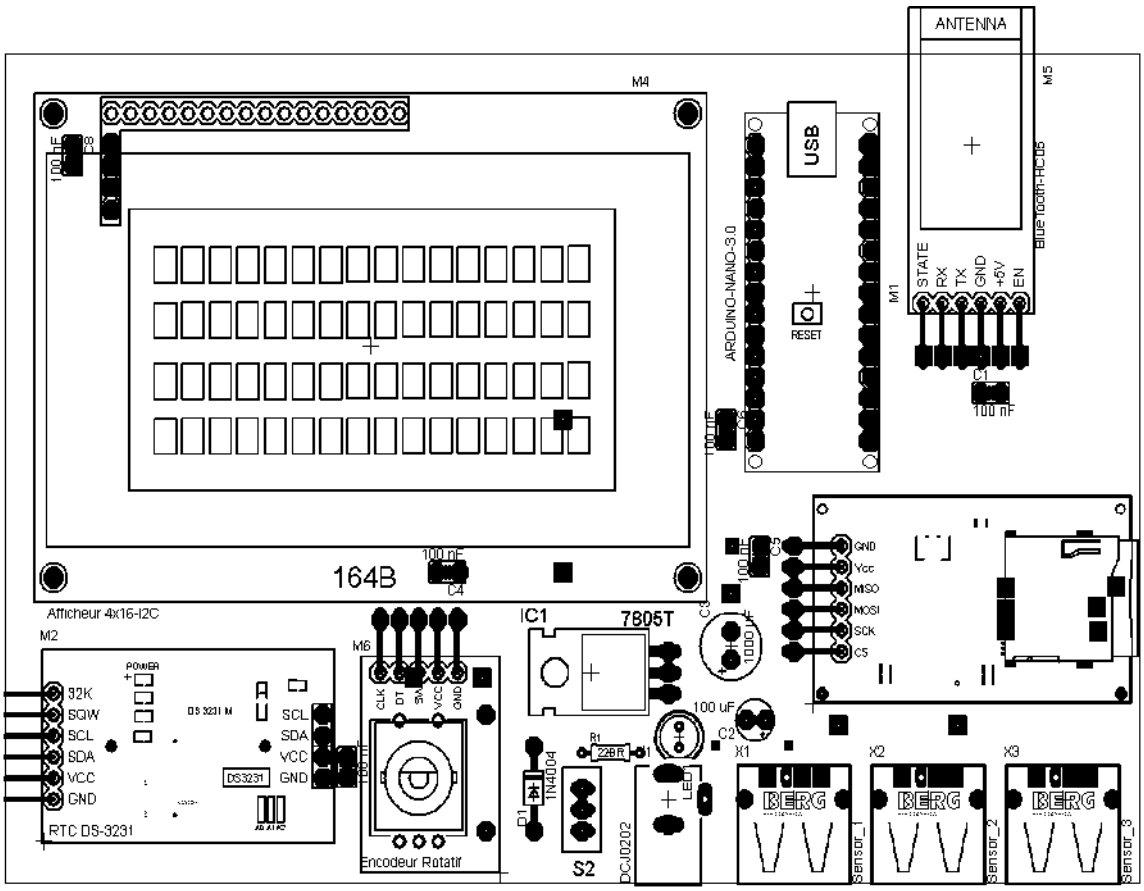


Figure A2. Schéma implantation composants.



Figure A3. Tranches de tomates disposées sur les claies.



Figure A4. Réalisation final d’un système de séchage solaire indirect.