

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



**UNIVERSITE DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en génie mécanique
Spécialité construction mécanique

Etude et conception d'un séchoir électro-solaire en
utilisant le logiciel SolidWorks

Promoteur :

Mr. Merzoug Djamel

Réalisé par :

* LOUNICI Okba Rabeh

*IKHLEF Zakaria

Promotion : 2024/2025

REMERCEMENTS

Je remercie en premier lieu ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la santé et le pouvoir d'accomplir ce modeste travail.

Je tiens à remercier mes parents pour leur soutien moral et financier.

Je tiens particulièrement à témoigner ma gratitude à Monsieur

D.MERZOUG, d'abord pour m'avoir initié à la recherche en acceptant de me proposer ce thème. Je le remercie également pour ces conseils précieux.

Résumé

Bien que le concept de séchage des produits agroalimentaires soit simple, ses mécanismes sous-jacents sont très complexes. Ces complexités inhérentes ont conduit à l'adoption d'une méthodologie expérimentale pour cette recherche. Cette étude, réalisée par le Département de mécanique de l'Université de Blida 1, porte sur la conception d'un séchoir solaire pour le séchage indirect de divers produits alimentaires.

Dans ce système, l'air est aspiré dans le capteur solaire par sa partie inférieure et subit un processus de chauffage tout au long de son parcours jusqu'à la sortie située dans la partie supérieure de la chambre de séchage.

Mots-clés : Séchage solaire, conception, simulation.

ملخص

على الرغم من أن مفهوم تجفيف المنتجات الغذائية الزراعية مباشر، إلا أن آلياته الأساسية معقدة للغاية. وقد أدت هذه التعقيدات المتأصلة إلى اعتماد منهجية تجريبية لهذا البحث. تتضمن هذه الدراسة، التي قام بها القسم

الميكانيكي بجامعة البليدة 1، التحقيق في تصميم مجفف شمسي خاص بالتجفيف غير المباشر لمختلف المواد الغذائية.

في هذا النظام، يتم سحب الهواء إلى المجمع الشمسي من جزئه السفلي، ويخضع لعملية تسخين بينما يتقدم على طول مساره إلى المخرج الموجود في الجزء العلوي من غرفة التجفيف.

الكلمات المفتاحية: التجفيف الشمسي، تصميم، محاكاة.

Abstract

Although the concept of drying agri-food products is straightforward, its underlying mechanisms are quite complex. These inherent complexities led to the adoption of an experimental methodology for this research. This study, carried out by the Mechanical Department of the University of Blida 1, investigates the design of a solar dryer for the indirect drying of various foodstuffs.

In this system, air is drawn into the solar collector from its lower part, and undergoes a heating process as it progresses along its path to the outlet located in the upper part of the drying chamber.

Keywords: Solar drying, design, simulation.

Table de matière :

REMERCIEMENTS

Chapitre I Généralités et classification des machines de séchage

<i>I.1 introduction.....</i>	<i>1</i>
I.2 Concept du Séchage et ses Types.....	2
I.2.1 Définition du séchage:.....	2
I.2.2 Différences entre le séchage naturel et industriel	3
Le séchage naturel ou solaire	3
. Le séchage industriel.....	4
I.3 Différents méthodes du séchage.....	6
I.3.1. Séchage mécanique	6
I.3.2. Séchage chimique.....	6
I.3.3. Séchage thermique.....	6
I.4 Classification des séchoirs	7
I.4.1 Selon la source d'énergie	7
4.1.1 Séchoirs à combustible	7
4.1.2 Séchoirs électriques	7
4.1.3 Séchoirs hybrides	7
I.4.2 Par mécanisme de transfert de chaleur	8
4.2.1 Séchage direct	8
4.2.2 Séchage indirect	8
4.2.3 Séchage par rayonnement.....	8
4.2.4 Lyophilisation.....	8
I.4.3 Selon le mode de fonctionnement.....	8
4.3.1 Séchoirs continus.....	9
4.3.2 Séchoirs discontinus	9
4.3.3 Séchoirs semi-continus.....	9
I.4.4 Par type de produit séché.....	9
4.4.1 Aliments	9
4.4.2 Industriel.....	9
4.4.3 Pharmaceutique	9
4.4.4 Produits végétaux : Préservation des composés organiques	9
I.4.5 Par technologie d'élimination de l'humidité.....	9
4.5.1 Séchage à l'air.....	9

4.5.2 Séchage sous vide.....	9
4.5.3 Séchage par pulvérisation.....	9
4.5.4 Séchage par tambour	9
I.5 Classification des séchoirs solaires	9
I.5.1 Selon le mode de fonctionnement.....	9
5.1.1 Séchoir solaire direct	9
5.1.2 Séchoir solaire indirect	11
5.1.3 Séchoirs mixed	12
I.6.2 Selon le type de flux d'air	13
6.2.1 Flux d'air passif	13
6.2.2 Flux d'air actif.....	13
I.7 Les type de Séchoir Solaire	14
I.7.1 Séchoir solaire à convection naturelle	14
I.7.2 Séchoir solaire à convection forcée	15
I.7.3 Séchoir solaire à tunnel.....	15
I.8 Applications du séchage solaire	16
I.8.1 Le séchage solaire agricole.....	16
I.8.2. Le séchage solaire industrielle.....	16
I.9 Avantages et Inconvénients du Séchage Solaire.....	17
9.1 Avantages	17
9.2 Inconvénients	17
Chapitre II : Séchage électro-solaire	1
II.1 Introduction	18
II.2 Les principes scientifique du séchage électro-solaire.....	19
II.2.1 principe générale	19
II.2.2 Étapes du séchage	19
2.2.1 Absorption de la chaleur.....	19
2.2.2 Transfert de chaleur au produit.....	19
2.2.3 Transfert d'humidité.....	19
II.2.3 Analyse physique du processus de séchage.....	19
II.2.3 Contrôle du système.....	21
II.2.4 Aspects théoriques.....	21
2.4.2. Efficacité du système hybride.....	21
2.4.3 Taux de séchage (Drying Rate)	22
2.4. 4 Bilan énergétique du capteur solaire.....	22
2.4.5 Commande du fonctionnement hybride.....	23
II.3 Composants du système électro-solaire.....	23

II.3.1 Capteur solaire	23
II.3.2 Chambre de séchage.....	23
II.3.3 Système de ventilation.....	24
II.3.4 Système de chauffage électrique	25
II.3.5 Système de contrôle intelligent	26
II.3.6 Isolation thermique.....	26
II.3.7 Alimentation électrique	26
II.3.8 Système de régulation:	27
II.3.9 Module de condensation à Peltier	28
II.4 Conditions de fonctionnement.....	29
II.4.1 Données climatiques.....	29
II.4.2 Air de séchage.....	30
II.4.3 Calcul du point de rosée	31
II.4.4 Comportement du module de condensation	32
II.4.5 Comportement du corps de chauffe solaire	33
II.5 Validation du modèle numérique:	34
II.5.1 Mesures de performances globales.....	34
II.5.2 Validation des modules isolés	35
II.5.3 Pilotage par le système de régulation	35
II.6 Théorie appliquée.....	35
II.6.1 Loi fondamentale de la thermodynamique	35
II.6.2 Isolation thermique.....	36
II.7 Les avantage et mes inconvenient de système électro- séchage.....	38
Chapitre III : conception par logiciel SolidWorks	8
III.1 Généralités sur la Conception-Fabrication Assistée par Ordinateur CFAO :	40
III.2 Conception assistée par ordinateur (CAO).....	40
III.3 Fabrication assistée par ordinateur (FAO).....	41
III.4 Présentation de logiciel de conception SOLIDWORKS.....	41
III.4.1 Le module pièce.....	42
III.4.2 Interface	43
III.4.3 Le module assemblage	44
III.4.4 Le module Mise en Plan.....	44
III.5 Conception par SolidWorks.....	45
III.5.1 Description générale de la conception	45
Tableau III.1	46
III.5.2 .1La structure	46

III.5.3 Ventilateur	48
III.5.4 capteur solaire	50
III.5.5 Panneau solaire	53
III.5.6 Roues	54
III.5.7 Vitre	55
Chapitre IV : Etude et simulation par logiciel SolidWorks.....	41
IV.1 Introduction.....	57
IV.2 Matériaux utilisés	58
IV.3 Analyse thermique du séchoir solaire	58
IV.3.1 Introduction:	58
IV.3.2 Description du modèle.....	59
IV.3.3 Les conditions aux limites.....	59
IV.3.4 Interprétation de la distribution thermique	60
IV.3.5 Analyse.....	60
IV.4 Simulation de la structure du séchoir.....	61
IV.4.1 Introduction	61
IV.4.3 Etapes de la simulation.....	61
IV.4.4 Analyse des résultats	64
IV.5 Conclusion	66
Conclusion Générale	67
Les sources	68

Liste des Figure :

Figure I.1: Séchage naturelle des fruits.....	4
Figure I.2: Séchage industrielle.....	5
Figure I.3: séchoir hybride	8
Figure I.4 : Séchoir solaire direct	10
Figure I.5: Principe de fonctionnement d'un séchoir solaire indirect	11
Figure I.6 : Séchoir solaire mixte	13
Fig.I.7: Typical solar energy dryer designs [3]	14
Figure I.8 : Séchoir solaire tunnel.....	16
Figure II .1: Schéma Séchoir électro-solaire.....	18
Figure II .2 Variations de la quantité d'eau dans une substance en fonction du temps.....	20
Figure II.3 : Variation de la vitesse de séchage en fonction du temps.....	20
Figure II.4 : Principe d'un capteur solaire.....	23
Figure II.5 : structure chambre de séchage	24
Figure II.6: tube du système de ventilation.....	25
Figure II.6 : caisse de chauffe solaire	26
Figure II.7 : Alimentation électrique.....	27
Figure II.8 Système de régulation	27
Figure II.9 Module de condensation a peltier	28
Figure II.10 Température	29
Figure II.11 Air de séchage.....	30
Figure II.12 Energie maximale et minimale	31
Figure II.12 point de rosée.....	32
Figure II.13 Séchage a froid	33
Figure II.14 Corps de chauffe solaire	34
Figure III.1 Interface graphique de SolidWorks version 2019	42
Figure III.2 Interface et barre d'outil.....	42
Figure III.3 Les fonctions	43
Figure III.4 Les esquisse	43
Figure III.5 Affichage	43
Figure III.6 Assemblage.....	44
Figure III.7 Les barres d'outil.....	45
Figure III.8 Vue éclatée de séchoir solaire	46
Figure III.9 Dessin technique de la structure	47

Figure III.10 Dessin technique du Ventilateur	48
Figure III.11 Ventilateur	49
Figure III.12 La Structure du capteur solaire	50
Figure III.13 Dessin technique de capteur solaire.....	52
Figure III.14 Capteur solaire	53
Figure III.15 Panneau solaire.....	54
Figure III.16 Roues	54
Figure III.17 Dessin technique des roue.....	55
Figure IV.1 les caractéristiques de l'acier allier	58
Figure IV.2 Simulation thermique de la structure.....	59
Figure IV.3 La résultat de la simulation thermique.....	60
Figure IV.4 Etape 1	61
Figure IV.5 Etape 2	62
Figure IV.6 Etape 3	62
Figure IV.7 Les chargement extérieur	63
Figure IV.8 Les force impliqué	64
Figure IV.9 La résultat (Les contraintes).....	64
Figure IV.10 Les résultat des déplacements.....	65

NOMENCLATURE

symbole	Description	Unité
Q	Énergie thermique	J
η_{coll}	Efficacité du capteur solaire	-
A_{coll}	Surface du capteur solaire	m^2
G	Rayonnement solaire	W/m^2
t	Tempe	s
P_{elc}	Puissance de la résistance électrique	W
η_{hybrid}	Efficacité du système hybride	-
m_w	Masse d'eau évaporée	Kg
h_{fg}	Chaleur latente de vaporisation de l'eau	(≈ 2260 kJ/kg)
DR	Taux de séchage	Kg/s
h	Coefficient de transfert thermique	W/m^2k
A_{prod}	Surface du produit	m^2
T	température	k
m_{air}	débit d'air	Kg/s
C_p	capacité thermique	j/Kg.k
ρ	Masse volumique	Kg/m^3
P	Pression	Pa
R_a	La constante de l'air sec	$=287,058$ J/(kg.K)
R_w	La constante de la vapeur d'eau	$=461,495$ J/(kg.K)
F	Force	N
a	Accélération	m/s^2
σ	Contrainte	Pa
FS	coefficient de sécurité	-

Chapitre I : Généralités et classification des machines de séchage

1.1 introduction :

Depuis l'Antiquité, le séchage des aliments a été une méthode essentielle de conservation utilisée par les civilisations du monde entier. À l'origine, les techniques de séchage étaient entièrement naturelles et basées sur l'exposition directe au soleil. Ce procédé traditionnel, simple et économique, permettait de réduire l'humidité des produits agricoles comme les fruits, les légumes, les herbes ou les viandes, ralentissant ainsi leur détérioration et prolongeant leur durée de conservation.

Avec le temps, ces méthodes traditionnelles ont évolué pour répondre à des besoins croissants en matière d'efficacité, d'hygiène et de qualité. C'est dans ce contexte que le **séchoir solaire** a vu le jour. Utilisant l'énergie gratuite et renouvelable du soleil, les séchoirs solaires offrent une alternative plus contrôlée et performante au séchage à l'air libre. En permettant un meilleur contrôle des conditions de séchage (température, humidité, circulation d'air), ces dispositifs réduisent le risque de contamination et améliorent la qualité finale du produit séché.

Le séchage est un processus d'évaporation de l'humidité présente à l'intérieur des matériaux solides ou semi-solides afin d'empêcher la croissance des micro-organismes et les réactions chimiques responsables de la détérioration, dans le but de prolonger la durée de conservation des produits séchés.

Le séchage solaire en plein air est le plus courant, car il est peu coûteux et facile à mettre en œuvre. Cependant, son principal inconvénient réside dans le risque élevé de contamination des produits. Ce mode de séchage consiste à exposer les aliments directement aux rayons du soleil et au vent en les plaçant sur des plateaux, dans des récipients, sur des étagères ou même au sol. L'avantage principal de ce procédé est qu'il ne nécessite aucun coût en carburant ou en équipements pour l'agriculteur. Toutefois, les produits séchés ainsi obtenus sont souvent de qualité inférieure en raison des variations de température et de la contamination par la poussière, les insectes et les feuilles. Pour éviter ces problèmes, nous avons recours au séchage dans des séchoirs solaires. Ceux-ci permettent de réduire la durée du séchage, préservant ainsi les éléments nutritifs du produit et garantissant une meilleure qualité. De plus, ils protègent les aliments des contaminants extérieurs et offrent un contrôle optimal de la température et du niveau d'humidité à l'intérieur. Il existe plusieurs types de séchoirs solaires, qui

varient selon leur mode de fonctionnement et l'utilisation d'un flux d'air naturel ou forcé. Cependant, les séchoirs solaires simples nécessitent un faible investissement pour leur installation et ne requièrent aucune source d'énergie autre que l'énergie solaire pour fonctionner [1].

Ce chapitre a pour objectif de présenter un aperçu des différentes techniques de séchage, en définissant les types de séchoirs, leur mode de fonctionnement et leurs domaines d'application. Une attention particulière sera portée aux séchoirs solaires, en raison de leur importance croissante dans les procédés modernes de séchage et de leur rôle central dans l'amélioration de l'efficacité énergétique, sujet principal de cette recherche.

I.2 Concept du Séchage et ses Types :

I.2.1 Définition du séchage :

L'essence même du séchage consiste à réduire la teneur en humidité du produit à un niveau qui empêche sa détérioration pendant une période donnée, généralement appelée « période de stockage sécurisée ».

Le séchage est un processus double impliquant :

- Le transfert de chaleur du dispositif de chauffage vers le produit.
- Le transfert de masse de l'humidité de l'intérieur du produit vers sa surface, puis de la surface vers l'air ambiant.

Le séchage implique l'extraction de l'humidité du produit par chauffage ainsi que la circulation de l'air autour de celui-ci pour évacuer la vapeur libérée. Sous des conditions ambiantes, ces processus se poursuivent jusqu'à ce que la pression de vapeur de l'humidité retenue dans le produit soit égale à celle de l'atmosphère. Ainsi, le taux de désorption de l'humidité du produit vers l'environnement et celui de l'absorption de l'humidité de l'environnement vers le produit atteignent un équilibre, et la teneur en humidité du produit à cet état est appelée « teneur en humidité d'équilibre ».

Dans des conditions ambiantes, le processus de séchage est lent, et dans les environnements à forte humidité relative, la teneur en humidité d'équilibre reste trop élevée pour assurer un stockage sécurisé [2].

I.2.2 Différences entre le séchage naturel et industriel :

Le séchage naturel ou solaire :

Dans ce type de séchage, la chaleur provenant des rayons du soleil est utilisée pour évaporer une grande quantité d'eau ou d'humidité contenue dans les produits alimentaires. Ce processus nécessite un ensoleillement intense et une température adéquate, ainsi que des espaces de séchage appelés "aires de séchage". Ces aires doivent être proches des vergers et situées du côté exposé au vent dominant, tout en étant éloignées de la poussière et des vents chargés de sable.

Conditions requises pour les lieux de séchage :

La plupart des fruits sont généralement séchés dans un espace isolé appelé aire de séchage (à l'exception du raisin, qui est souvent séché entre les arbustes, ainsi que certaines variétés de figues). La superficie de l'aire de séchage varie en fonction de la taille du verger et du type de fruit, mais une surface de 0,5 à 1 hectare est généralement suffisante pour 20 hectares de vergers fruitiers.

Lors du choix du site, il est préférable d'opter pour des zones proches des vergers, exposées au vent dominant, tout en veillant à ce qu'elles soient éloignées des sources de poussière, des odeurs désagréables (comme les écuries, les tas de compost, les fermes d'élevage), ainsi que des cultures de crucifères et de choux-fleurs.

Il est également recommandé d'éviter les sols meubles et poussiéreux en privilégiant les sols compacts et bien stabilisés. Pour limiter la dispersion de la poussière, ces sols peuvent être irrigués ou couverts de cultures végétales permanentes comme la luzerne ou le gazon, qui seront coupés et nivelés avant la saison de séchage.

Autour de l'aire de séchage, il est conseillé de planter des arbres pour servir de brise-vent. L'aménagement des installations comprend également des abris pour la découpe, des locaux



Figure I.1: Séchage naturelle des fruits

Pour le soufrage des fruits au soufre, ainsi que des espaces de stockage et des bureaux. La surface restante est divisée en bandes étroites pour l'alignement des plateaux de séchage.

. Le séchage industriel :

Le séchage industriel consiste à déshydrater les produits alimentaires à l'aide d'air chauffé par combustion de carburants, d'électricité ou d'autres sources d'énergie. Il est réalisé dans des fours spéciaux appelés séchoirs, qui existent sous différentes formes et technologies. Certains séchoirs fonctionnent sous vide afin de préserver au maximum la valeur nutritionnelle des aliments.



Figure I.2: Séchage industrielle

Le séchage industriel présente plusieurs avantages par rapport au séchage naturel

Qualité supérieure des produits obtenus. Séchage plus hygiénique et meilleure conservation de la valeur nutritionnelle. Possibilité de séchage à tout moment et dans n'importe quel pays. Processus rapide nécessitant un espace réduit et permettant une production à grande échelle.

L'élément clé du séchage industriel est l'utilisation d'une température adéquate pour obtenir un produit sec de bonne qualité, avec une saveur agréable et une couleur attrayante, tout en minimisant les pertes en nutriments et en vitamines. La température idéale de séchage varie entre 50 et 80°C.

Utilisation de la température dans le séchage :

La chaleur nécessaire au séchage peut être générée par l'électricité, le bois, le mazout, le diesel ou le gaz. Parmi ces sources, l'électricité est la plus efficace, bien que son coût soit plus élevé. La transmission de la chaleur peut se faire de deux manières :

Chauffage direct : L'air chaud issu de la source de chaleur est directement soufflé sur les produits à sécher. Cette méthode est économique, mais présente un risque d'altération des aliments (brûlure, brunissement ou contamination par les résidus de combustion). **Chauffage indirect :** L'air est chauffé par contact avec des surfaces métalliques (fours, tuyaux chauffés à l'électricité ou à la vapeur), ce qui évite tout contact direct entre l'air chaud et les aliments. Fonctions de la chaleur dans le séchage

La chaleur utilisée dans le processus de séchage remplit plusieurs fonctions :

Élever la température du produit : Cela facilite l'évaporation de l'eau et son transfert vers la surface du produit, où elle s'évapore. La chaleur utilisée pour ce processus est appelée chaleur sensible. Dans la pratique, la température de séchage varie entre 50 et 80°C, et une température excessive entraîne un dessèchement superficiel qui altère la qualité du produit. **Transformer l'eau contenue dans le produit en vapeur :** Ce processus est appelé chaleur latente de vaporisation, qui correspond à l'énergie nécessaire pour évaporer 1 kg d'eau. **Augmenter la capacité de l'air à transporter la vapeur d'eau :** Plus la température de l'air est élevée, plus il peut absorber d'humidité. **Compenser les pertes de chaleur dans le séchoir :** Environ 50% de la chaleur produite est perdue avec l'air sortant du séchoir. Cette perte peut être réduite en réintroduisant une partie de l'air évacué après l'avoir mélangé avec de l'air frais. Le taux de mélange est généralement compris entre 50 et 75%.

I.3 Différents méthodes du séchage [4]:

I.3.1. Séchage mécanique :

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

I.3.2. Séchage chimique :

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

I.3.3. 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.4 Classification des séchoirs :

On peut classer les séchoirs suivant la façon dont ils utilisent le rayonnement solaire en séchoirs naturels, séchoirs directs et séchoirs indirects. Pour chacun de ces types de séchoir, l'écoulement de l'air asséchant peut se dérouler par convection forcée ou par convection naturelle. Dans le cas où l'écoulement d'air est par convection forcé, les séchoirs sont appelés séchoirs solaires actifs. Lorsque l'écoulement se fait par convection naturelle, ils sont appelés séchoirs solaires passifs.

I.4.1 Selon la source d'énergie :

Les séchoirs sont classés en fonction de leur source d'énergie :

4.1.1 Séchoirs à combustible (gaz, diesel) : Fonctionnent par combustion pour générer de la chaleur. Puissants mais polluants, utilisés pour le bois ou les produits chimiques.

4.1.2 Séchoirs électriques : Chauffage par résistance électrique. Précision élevée mais coût énergétique important. Idéaux pour les aliments et les médicaments.

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

d'importante quantité de produits et permettent l'obtention de produits séchés de bonne qualité.

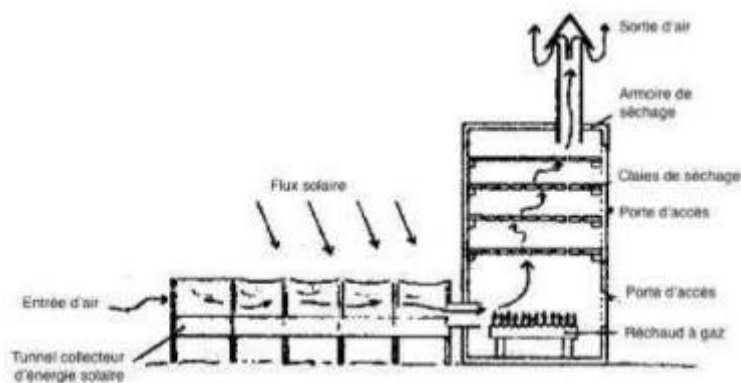


Figure I.3: séchoir hybride

Séchoirs solaires(naturelle) : Écologiques et économiques, mais dépendent des conditions climatiques. Adaptés aux produits agricoles. (Sujet de notre recherche)

I.4.2 Par mécanisme de transfert de chaleur :

4.2.1 Séchage direct : Dans ce type de séchoir, l'air asséchant circule dans le séchoir sous l'action d'un ventilateur. Ainsi, le contrôle du débit d'air contribue à la réduction de la surchauffe du produit et à une diminution de la durée de séchage.

4.2.2 Séchage indirect : La chaleur est transmise à travers une paroi (ex. : séchoir à tambour).

4.2.3 Séchage par rayonnement : Utilisation d'infrarouges ou de micro-ondes pour un chauffage interne.

4.2.4 Lyophilisation : Congélation du produit suivie d'une sublimation sous vide pour préserver les produits sensibles.

I.4.3 Selon le mode de fonctionnement :

4.3.1 Séchoirs continus : Fonctionnent en flux continu (ex. : séchoir tunnel).

4.3.2 Séchoirs discontinus : Traitent des lots séparés (ex. : séchoir à armoire).

4.3.3 Séchoirs semi-continus : Combinaison des deux (ex. : séchoir rotatif).

I.4.4 Par type de produit séché :

4.4.1 Aliments : Température modérée (40-80°C) pour fruits, légumes, etc.

4.4.2 Industriel : Température élevée (jusqu'à 500°C) pour métaux ou polymères.

4.4.3 Pharmaceutique : Contrôle strict de l'humidité et stérilisation.

4.4.4 Produits végétaux : Préservation des composés organiques (herbes, épices).

I.4.5 Par technologie d'élimination de l'humidité :

4.5.1 Séchage à l'air : Évaporation par air chaud (textiles, aliments).

4.5.2 Séchage sous vide : Pour produits sensibles à la chaleur.

4.5.3 Séchage par pulvérisation : Transformation de liquides en poudre (lait, café).

4.5.4 Séchage par tambour : Séchage d'une fine couche sur un cylindre chauffant (purées, concentrés).

I.5 Classification des séchoirs solaires :

Les séchoirs solaires peuvent être classés sur la base de la conception des composants du système et le mode d'utilisation de l'énergie solaire. On distingue quatre classes des séchoirs solaires pour produits agricoles :

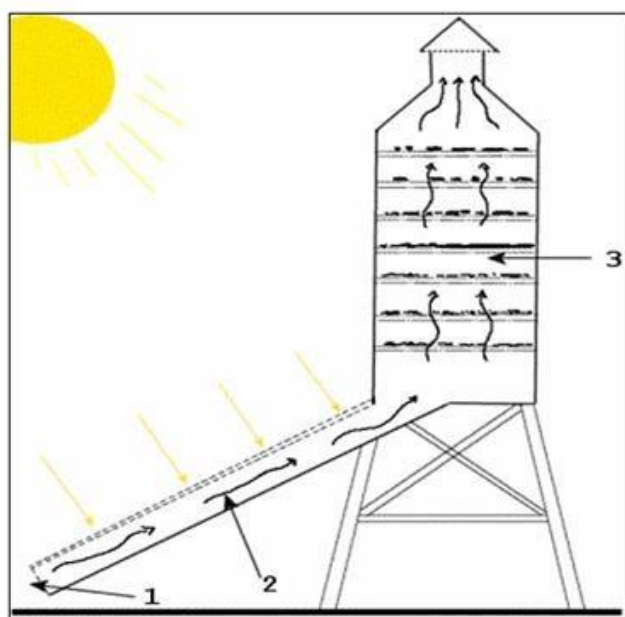
I.5.1 Selon le mode de fonctionnement :

5.1.1 Séchoir solaire direct :

Dans ce type des séchoirs, le rayonnement solaire traverse un couvercle transparent, généralement en verre, pour être incident sur le produit séché. Le couvercle en verre réduit les pertes de convection directe à l'environnement et augmente la température à l'intérieur du séchoir. Ces séchoirs sont constitués d'un seul composant principal qui sert à la fois de chambre de séchage et de capteur solaire. [3]

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 on peut également utiliser d'autres matériaux plus chers comme le verre ou les plastiques spéciaux (polyéthylènes agricoles).



1. Entrée d'air 2. Isolateur plan 3. Claies 4. Cheminée

Figure I.4 : Séchoir solaire direct

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

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 risques de moisissure.

5.1.2 Séchoir solaire indirect :

Les produits ne sont pas exposés directement au soleil. L'énergie solaire chauffe l'air entrant dans la chambre de séchage via un capteur solaire, augmentant ainsi sa capacité à absorber l'humidité. Il se compose de parties : un collecteur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur, une chambre de séchage qui contient le produit et une cheminée. 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 [4]

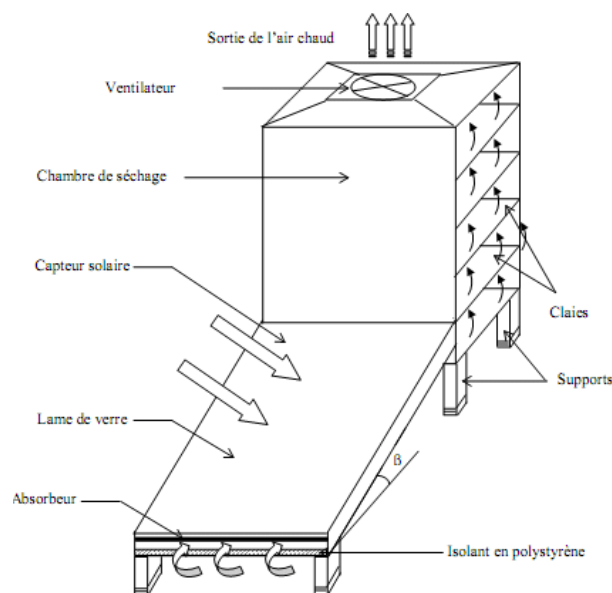


Figure I..5: Principe de fonctionnement d'un séchoir solaire indirect

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. 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.

Avantages du séchoir indirect :

Le séchoir solaire indirect présente les avantages suivants :

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

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.

5.1.3 Séchoirs mixed :

Ces séchoirs combinent les principes des deux modes de séchage direct et indirect. Les produits subissent l'action combinée des rayonnements solaires directs sur le produit et de l'air réchauffé dans un capteur placé en dessous de la chambre de séchage. Pour les séchoirs mixtes, les surfaces supérieures de la chambre de séchage et du capteur sont couvertes par des vitres ou des films transparents.

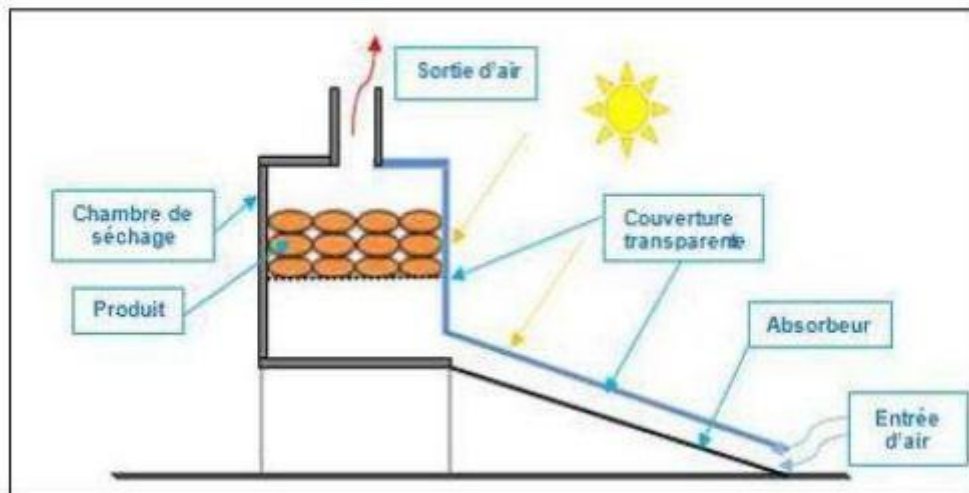


Figure I.6 : Séchoir solaire mixte

I.6.2 Selon le type de flux d'air :

6.2.1 Flux d'air passif: Ce type de séchoir est connu sous la dénomination de boîte de séchage. Une fraction du flux solaire incident est réfléchi par la couverture transparente, le reste est transmis dans le séchoir. Une partie du flux solaire transmis à l'intérieur du séchoir est réfléchi par les produits à sécher, le reste est absorbé par ces produits et les matériaux dont sont composées les parois du séchoir. Il en résulte une augmentation de leurs températures qui provoque une émission d'un flux de chaleur de grande longueur d'onde pour lequel la transmissibilité de la couverture est faible. C'est l'effet de serre. La couverture transparente sert également à réduire les pertes de chaleur par convection avec le milieu ambiant.

6.2.2 Flux d'air actif : Des sources d'énergie supplémentaires (turbines, ventilateurs) sont utilisées pour forcer la circulation de l'air ou augmenter sa température. Les séchoirs actifs fonctionnent sur le principe de la convection forcée. [5]

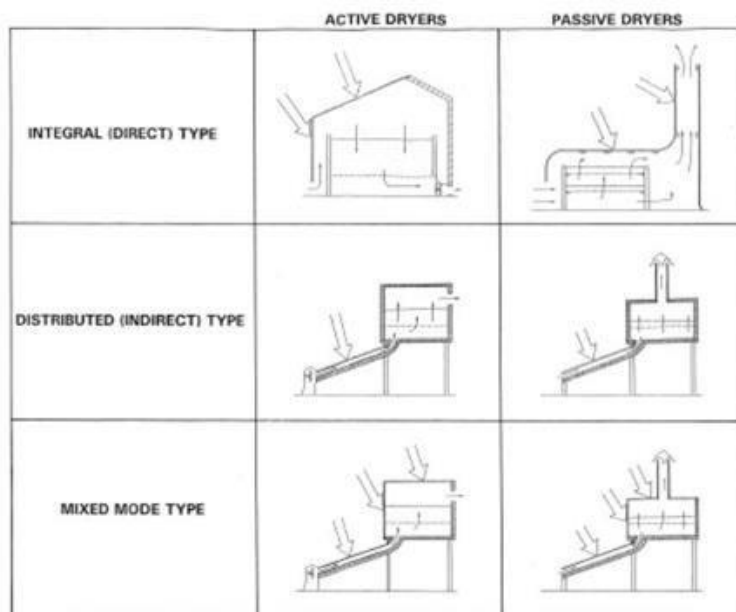


Fig.I.7: Typical solar energy dryer designs [3]

I.7 Les type de Séchoir Solaire :

I.7.1 Séchoir solaire à convection naturelle :

Les séchoirs solaires utilisent la convection verticale naturelle qui se produit lorsque l'air est chauffé. En général, les séchoirs à convection naturelle sont de taille appropriée pour une utilisation à la ferme.

La structure se compose de trois éléments principaux : un capteur solaire, un bac de séchage et une cheminée solaire. Les séchoirs à convection naturelle qui sont de plus petite taille sont essentiellement des boîtes en bois avec des événements en haut et en bas. Les aliments sont placés sur des cadres grillagés qui glissent dans les boîtes. Un réchauffeur d'air solaire de taille appropriée, doté d'un vitrage en plastique orienté au sud et d'un absorbeur en métal noir, est raccordé au fond des boîtes. L'air entre par le bas du chauffe-air solaire et est chauffé par l'absorbeur en métal noir. L'air chaud monte le long des aliments et sort par les événements situés en haut.

En fonctionnement, ces séchoirs produisent des températures de 54 à 82°C, ce qui est souhaitable pour la plupart des séchages d'aliments et pour la pasteurisation. Avec ces séchoirs, il est possible de faire sécher des aliments en une journée, même lorsque le temps est partiellement nuageux, brumeux et très humide. À l'intérieur, il y a treize

étagères qui peuvent contenir 35 à 40 pommes ou pêches de taille moyenne coupées en fines tranches.

I.7.2 Séchoir solaire à convection forcée :

La convection est forcée sur les aliments grâce à l'utilisation d'un ventilateur. Dans le cas des séchoirs à convection forcée, la structure peut être relativement similaire. Toutefois, le séchoir à convection forcée nécessite une source d'énergie pour que les ventilateurs fournissent le flux d'air. Le séchoir à convection forcée ne nécessite pas d'inclinaison pour le flux d'air, mais le collecteur peut être placé horizontalement avec le ventilateur à une extrémité et le bac de séchage à l'autre extrémité.

En outre, le séchoir à convection forcée est moins dépendant de l'énergie solaire, car il fournit lui-même le flux d'air ; cela permet à la conception de fonctionner dans des conditions météorologiques dans lesquelles le séchoir à convection naturelle ne fonctionne pas. Comme une ventilation inadéquate est une des principales causes de perte d'aliments dans les séchoirs solaires, et qu'elle est aggravée par un chauffage intermittent, il est essentiel de réaliser une ventilation adéquate. L'ajout d'un flux de convection forcée, par exemple fourni par une cellule solaire PV connectée à un ventilateur, empêchera la perte d'aliments.

I.7.3 Séchoir solaire à tunnel :

La structure d'un séchoir tunnel est relativement simple avec une paroi polyéthylène particulièrement résistante aux hautes températures. Contrairement aux autres types de séchoirs, la structure est suffisamment grande pour qu'une personne puisse y entrer.



Figure I.8 : Séchoir solaire tunnel

I.8 Applications du séchage solaire :

Les nombreuses applications de séchage solaire sont classées en deux catégories principales, à savoir agricoles et industrielles

I.8.1 Le séchage solaire agricole :

Est un processus essentiel dans la préservation des cultures agricoles telles que le paddy, les graines oléagineuses, la carotte, les herbes et épices, et les légumes.

I.8.2. Le séchage solaire industrielle :

De nombreux types de sécheurs peuvent être aptes à sécher un même produit. Le choix devra être orienté en fonction des besoins propres à l'utilisateur. Le produit proprement dit, par contre, du fait de ses caractéristiques physicochimiques et de son comportement au cours du séchage, devra être un élément essentiel du choix, le sécheur pouvant présenter des problèmes non pas de séchage à proprement parler, mais de détérioration ou de non-conformité du produit du fait des effets secondaires générés par l'opération de séchage, détérioration par élévation excessive de température modifiant les 25 caractéristiques du produit par rapport à celles souhaitées, détérioration par oxydation indésirable du produit due à un temps de séchage trop long

I.9 Avantages et Inconvénients du Séchage Solaire :

9.1 Avantages :

- Énergie gratuite et renouvelable : Utilise l'énergie solaire, donc pas de coût d'électricité ou de carburant.
- Respectueux de l'environnement : Ne produit pas de gaz à effet de serre ni de pollution.
- Réduction du temps de séchage.
- Économie à long terme : Faibles coûts de fonctionnement et d'entretien.
- Simplicité de conception et de fabrication

9.2 Inconvénients :

- Dépendance au climat : Ne fonctionne pas bien par temps nuageux ou pluvieux.
- Durée de séchage plus longue que les méthodes industrielles : Moins rapide que les séchoirs électriques.
- Capacité limitée : Convient aux petites quantités ; difficile d'augmenter l'échelle sans modifications.
- Besoin d'un suivi constant : Nécessite de surveiller la température et la ventilation manuellement.
- Main d'œuvre qualifiée.

Conclusion :

Après avoir découvert le processus de séchage, ses différentes étapes et ses différents types, ainsi que les avantages et les inconvénients de chacun d'entre eux, nous allons maintenant nous concentrer sur un seul type de séchage, compatible avec nos conditions climatiques méditerranéennes et les conditions économiques d'un pays en développement, et qui nous garantit le meilleur résultat au coût le plus bas possible et dans les plus brefs délais.

Chapitre II : Séchage électro-solaire

II.1 Introduction

Un séchoir solaire hybride est conçu pour exploiter principalement l'énergie solaire, tout en intégrant des sources d'énergie secondaires (électrique, biomasse, etc.) pour conditionner l'air nécessaire au séchage des aliments. Ce type de séchoir est particulièrement adapté aux conditions climatiques variables, lorsque l'énergie solaire seule ne suffit pas.

Dans ce chapitre, nous explorerons les principes scientifiques du séchage électro-solaire, en analysant les composants du système hybride et ses mécanismes de contrôle. Nous aborderons également ses applications pratiques dans le séchage des produits organiques, ainsi que les défis techniques et économiques liés à cette technologie, tout en proposant des solutions pour améliorer son efficacité. Ce type de séchoir utilise une énergie supplémentaire à la source initiale à savoir le soleil comme énergie d'appoint, cette dernière peut se situer en deux points différents à l'intérieur de la chambre de séchage en utilisant une résistance électrique pour maintenir la température constante et dans ce cas l'énergie solaire est secondaire ou bien des Ventilateurs électriques pour accélérer la circulation de l'air.

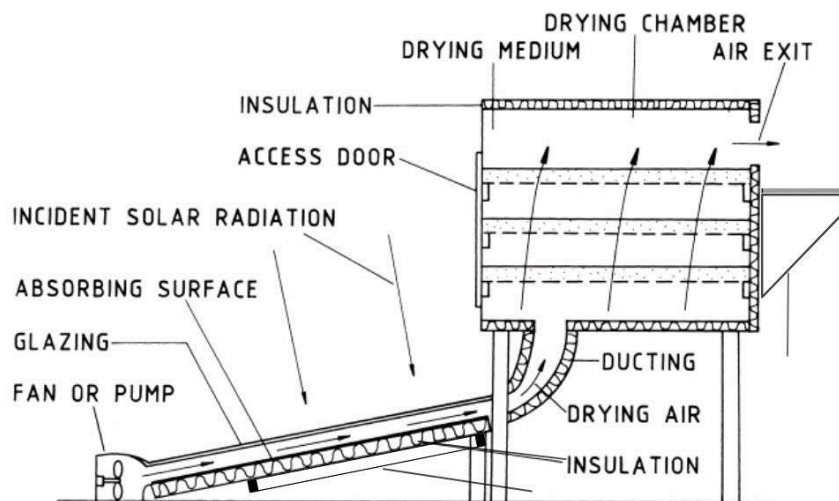


Figure II .1: Schéma Séchoir électro-solaire

II.2 Les principes scientifique du séchage électro-solaire :

II.2.1 principe générale :

Comme mentionné dans l'introduction, ce système repose sur deux sources d'énergie:

Énergie solaire : Source principale. Les rayons solaires sont convertis en énergie thermique via des capteurs solaires.

Énergie électrique : Source d'appoint en cas d'absence d'ensoleillement (perturbations météorologiques). Des résistances électriques chauffent l'air acheminé vers la chambre de séchage.

II.2.2 Étapes du séchage :

2.2.1 Absorption de la chaleur :

Mode solaire : Les capteurs solaires absorbent et transforment le rayonnement en chaleur pour réchauffer l'air entrant.

Mode électrique : En l'absence de soleil, des résistances électriques prennent le relais pour chauffer l'air.

2.2.2 Transfert de chaleur au produit :

Des ventilateurs pulsent l'air chaud dans la chambre de séchage, élevant sa température et initiant le transfert d'humidité.

2.2.3 Transfert d'humidité :

L'air chaud et sec:

Crée un gradient d'humidité entre le produit et son environnement, favorisant l'équilibrage thermodynamique.

Expulse l'air humide via des événements pour maintenir ce processus.

II.2.3 Analyse physique du processus de séchage

Nous pouvons suivre l'évolution du produit au cours du processus et l'exprimer sous forme de courbes graphiques, comme le montrent les courbes 1 et 2, qui expriment

respectivement l'évolution du pourcentage d'eau dans le produit et la vitesse du processus de séchage.

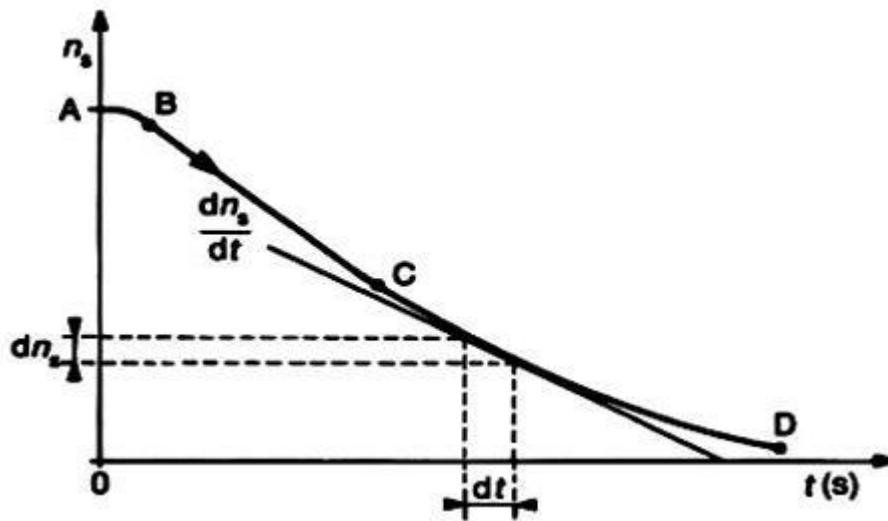


Figure II.2 Variations de la quantité d'eau dans une substance en fonction du temps

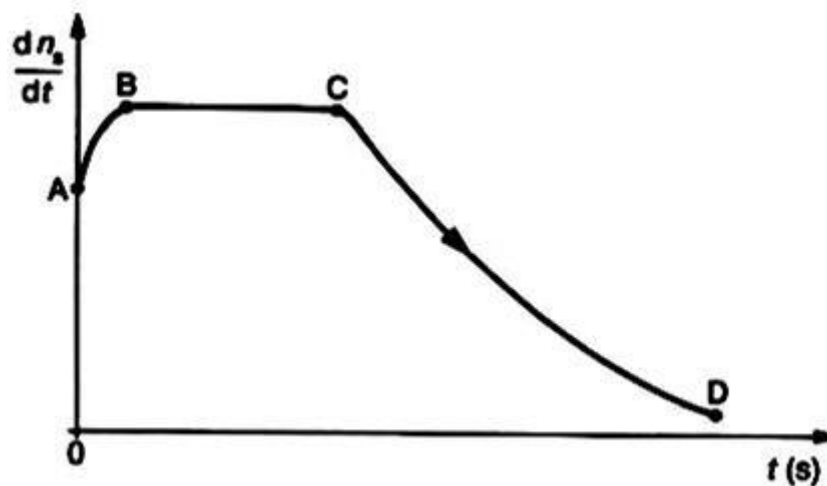


Figure II.3 : Variation de la vitesse de séchage en fonction du temps

Les courbes ci-dessus montrent que le produit passe par trois étapes avant d'atteindre le stade final

Phase 1 (AB) Transition

La température du produit commence à augmenter en raison de la température élevée dans la chambre de séchage.

Phase 2 (BC) phase de séchage à allure constante.

L'eau commence à se déplacer de l'intérieur du produit vers la surface pour équilibrer l'humidité avec l'environnement extérieur.

Phase 3 (CD) phase de ralentissement.

La vitesse de séchage est réduite en raison de la faible teneur en eau du produit et, par conséquent, de la température plus élevée du produit.]14[

II.2.3 Contrôle du système :

Deux méthodes pour basculer entre les modes solaire/électrique:

Manuelle : Intervention humaine.

Automatique: Utilisation de capteurs (température, humidité, rayonnement).

II.2.4 Aspects théoriques :

Nous décidé d'adopter le design illustré dans le figure II.1

Les résultats et les informations seront désormais basés sur ce design.

2.4.1 Énergie thermique fournie au système:

$$Q_{total} = Q_{solaire} + Q_{electrique}$$

Où :

$$Q_{solaire} = \eta_{coll} \cdot A_{coll} \cdot G \cdot t$$

$$Q_{electric} = P_{electric} \cdot t$$

- η_{coll} : Efficacité du capteur solaire (typiquement 30-50%).
- A_{coll} : Surface du capteur solaire (m²).
- G : Rayonnement solaire (W/m²).
- t : Temps de fonctionnement (s).
- P_{elec} : Puissance de la résistance électrique (W). -[7]

2.4.2. Efficacité du système hybride :

$$\eta_{hybride} = \frac{m_w \cdot h_{fg}}{Q_{total}} \cdot 100\%$$

Où :

- m_w : Masse d'eau évaporée (kg).
- h_{fg} : Chaleur latente de vaporisation de l'eau ($\approx 2260 \text{ kJ/kg}$).

2.4.3 Taux de séchage (Drying Rate) :

$$DR = \frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{h \cdot A_{prod} \cdot (T_{air} - T_{prod})}{h_{fg}}$$

Où :

- DR : Taux de séchage (kg eau/s).
- h : Coefficient de transfert thermique ($\text{W/m}^2\text{K}$).
- A_{prod} : Surface du produit (m^2).
- T_{air}, T_{prod} : Température de l'air et du produit (K). -[8]

2.4. 4 Bilan énergétique du capteur solaire :

$$\eta_{coll} = \frac{\dot{m}_{air} \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in})}{A_{coll} \cdot G}$$

Où :

$\dot{m}_{air}$: débit d'air (Kg/s)

c_p : capacité thermique de l'air ($\approx 1005 \text{ J/Kg.}^\circ\text{K}$)

T_{in}, T_{out} : Température de l'air à l'entrée/sortie du capteur (K). -[9]

2.4.5 Commande du fonctionnement hybride :

$$\begin{cases} Q_{solaire} & \text{si } G \geq 500 \text{ W/m}^2 \\ Q_{solaire} + Q_{electrique} & \text{si non} \end{cases}$$

II.3 Composants du système électro-solaire :

II.3.1 Capteur solaire :

Les capteurs solaires thermiques sont des appareils spéciaux d'échangeur de chaleur qui permettant la conversion de l'énergie de rayonnement solaire en énergie thermique.

Type : Panneau plat avec surface absorbante en aluminium ou cuivre revêtu de noir.

Vitrage : Couche de verre ou plastique isolante pour retenir la chaleur et minimiser les pertes.

Module électrique: Résistance chauffante (1–3 kW) intégrée dans les conduits d'air pour compléter l'apport solaire. -[10]

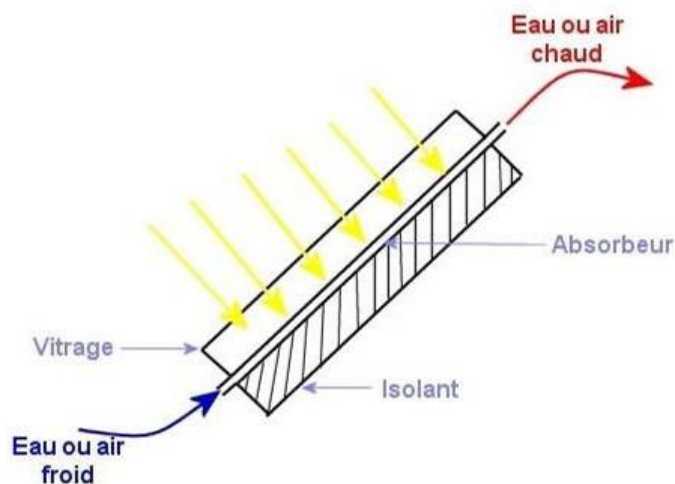


Figure II.4 : Principe d'un capteur solaire

II.3.2 Chambre de séchage :

Structure : Boîtier isolé avec laine de roche ou polystyrène (épaisseur : 5–10 cm).

Plateaux : Grilles métalliques ou plastiques ajustables pour optimiser l'aération.

Porte d'accès : Équipée d'un joint étanche pour maintenir la température. [11]

La structure en bois supporte l'ensemble du séchoir et a un angle d'inclinaison adapté pour le lieu de l'installation. Pour un captage solaire optimal, l'angle d'inclinaison annuel moyen correspond à la latitude du site, ajusté à latitude $+15^\circ$ en hiver et l'attitude -15° en été.

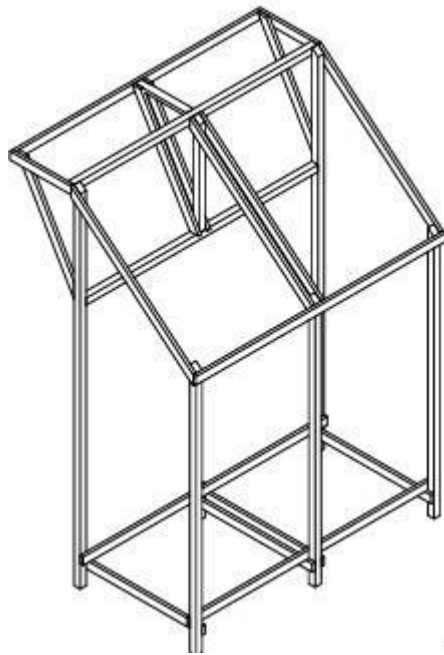


Figure II.5 : structure chambre de séchage

II.3.3 Système de ventilation :

Les conduits de ventilation sont composés de tubes de 110mm de diamètre avec des coude des connections en T puis des clapets anti-retour afin d'acheminer l'air entre les différents modules et les caisses de séchage. L'extraction de l'air se fait par les ventilateurs des caisses de séchage.

Ventilateur : Alimenté à l'énergie solaire ou électrique (puissance : 50–10.

Conduits : Tubes isolés pour transférer l'air chaud du capteur à la chambre.

Régulation du flux : Vannes ajustables pour une distribution homogène. -[10]

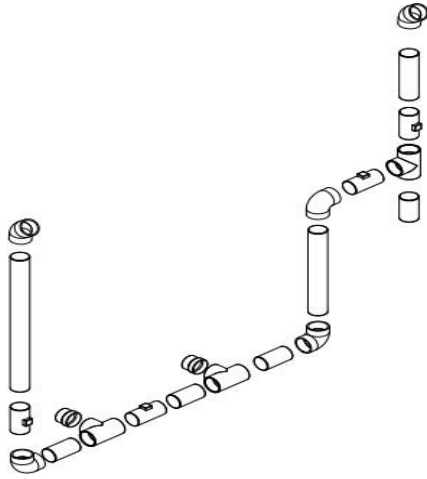


Figure II.6: tube du système de ventilation

Pour une meilleure efficacité les conduits doivent être étanches en utilisant les éléments de

Connexion adéquate dans tous les points de raccordement. Il est important d'isoler

thermiquement les conduits afin de conserver les caractéristiques souhaitées de l'air sec.

II.3.4 Système de chauffage électrique :

Caisson de chauffe solaire :

Fixé sur l'inclinaison de la structure en bois avec la bonne inclinaison, et avec la bonne orientation du séchoir solaire, la surface de captage solaire permet de chauffer l'air tout en

réduisant son humidité relative par dilatation. -[9]

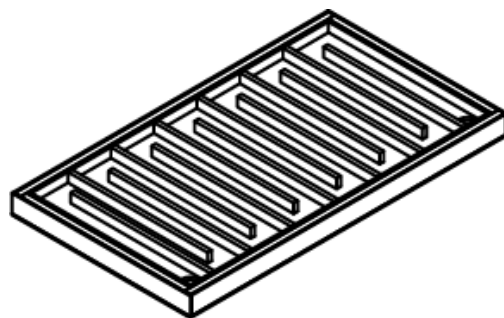


Figure II.6 : caisse de chauffe solaire

II.3.5 Système de contrôle intelligent

Capteurs:

Pyromètre pour mesurer le rayonnement solaire G

Capteurs de température/humidité dans la chambre.

Unité de contrôle (PLC/Arduino):

Active la résistance si

$$G < 500 \text{ W/m}^2$$

Ajuste la vitesse du ventilateur selon la température cible. -[9]

II.3.6 Isolation thermique :

Matériaux : Laine de verre autour des conduits et de la chambre.

Pertes thermiques : Inférieures à 1% grâce à l'isolation.

Tableau des spécifications techniques-[10]

II.3.7 Alimentation électrique :

La dans but d'avoir un appareil fonctionnent en autonomie des panneaux solaires photovoltaïques alimentent les modules du séchoir en électricité. Couplés à des batteries pour

un fonctionnement continu alimentant :

- L'électronique de la régulation
- Les ventilateurs d'extraction des caisses de séchage.
- Les modules Peltier de module de condensation.
- Les clapets anti-retour des conduits de ventilation.



Figure II.7 : Alimentation électrique

II.3.8 Système de régulation:

Les système de régulation est composé en d'une carte mère pour Arduino Mega2560, qui permet de contrôler les moteurs pas à pas, les ventilateurs, et les autres composants électroniques du séchoir pour garantir des conditions optimales de séchage

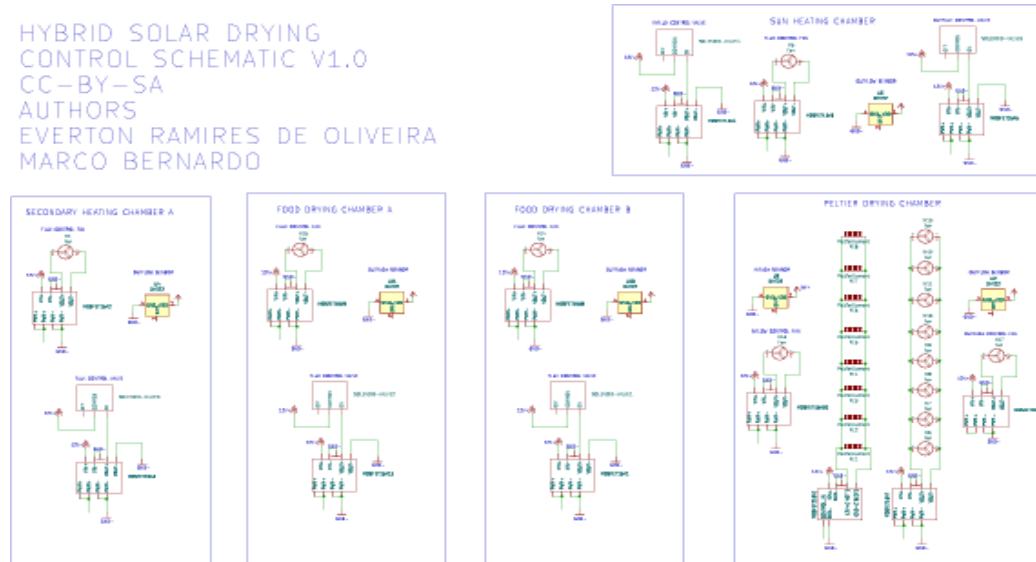


Figure II.8 Système de régulation

Utilisant les sondes pour mesurer la température et l'humidité de l'air extérieur ainsi que la température des corps de chauffe, la régulation pilote :

- Clapets de ventilation.
- Module de chauffe électrique ou biomasse.
- Module de condensation.
- Ventilateurs d'extraction.

II.3.9 Module de condensation à Peltier :

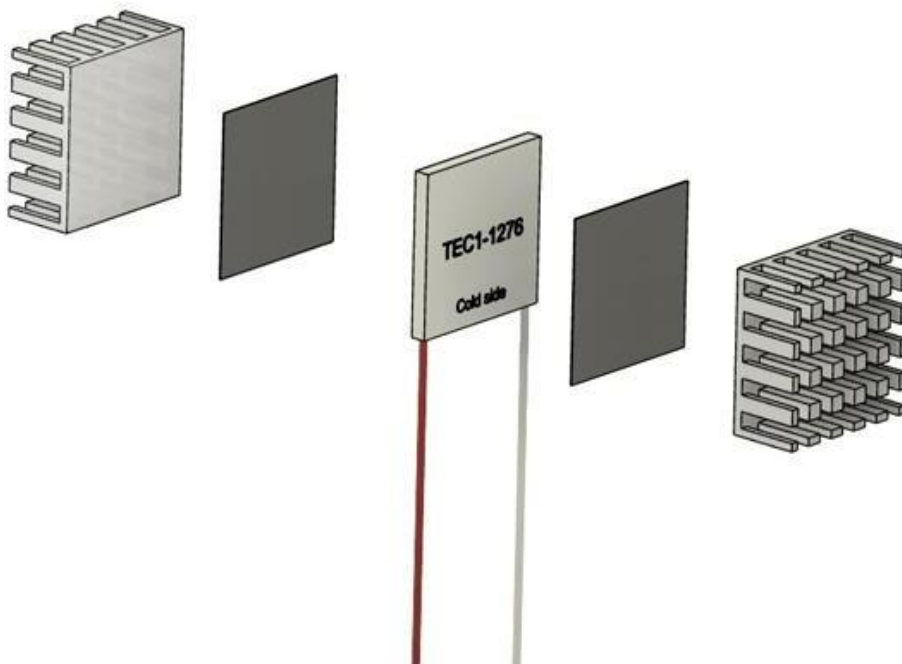


Figure II.9 Module de condensation a peltier

Composé de modules de Peltier, des parallélépipèdes en céramique qui permettent de transformer un courant électrique en chaleur et froid simultanément des deux cotés de parallélépipède.

.Pour le refroidissement de l'air extérieur, ce dernier passe par les dissipateurs en aluminium lié avec de la pâte thermique pour conductibilité optimale.

Ayant plusieurs modules de Peltier ce module est piloté par la régulation le module permet de sécher l'air par condensation de la vapeur d'eau en diminuant la température de l'air sous le la température de point de rosée.

Alimenté par des panneaux solaires pour une autonomie énergétique. Le module est actionné par la régulation lorsque les mesures de température et humidité instantanées de l'air extérieur permettent d'atteindre le point de rosée selon le dimensionnement de la puissance du module.

Le dimensionnement du module de condensation se fait en fonction des conditions climatiques pour maximiser les heures de fonctionnement annuellement.

Une fois que l'air extérieur condensé passera par ce module, il sera plus froid et moins chargé en vapeur d'eau, donc plus moins énergivore pour atteindre la température souhaitée.

II.4 Conditions de fonctionnement :

Les Conditions de fonctionnement joue un rôle clé dans le dimensionnement d'un séchoir solaire hybride. Elle permet de combiner les données climatiques spécifiques au lieu d'installation avec les propriétés thermodynamiques de l'air pour concevoir un système efficace et adapté.

Voici les étapes et les principaux éléments pris en compte

II.4.1 Données climatiques :

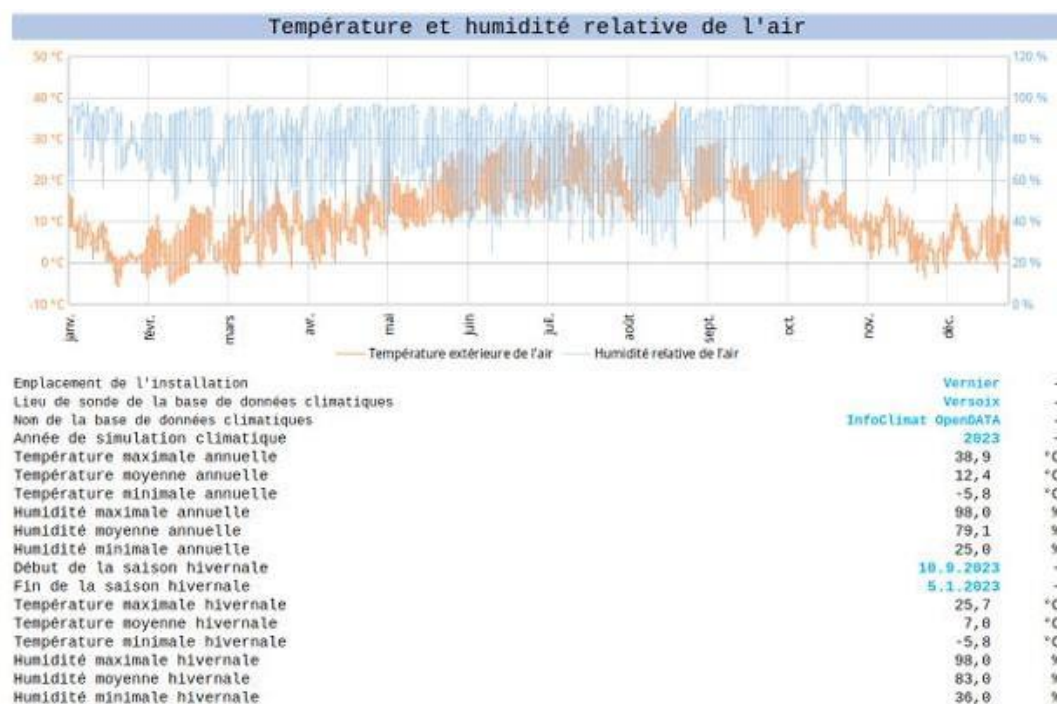


Figure II.10 Température

Les données climatiques du lieu d'installation sont essentielles pour adapter le séchoir aux conditions locales. Les paramètres analysés incluent :

- **Température et humidité relative de l'air extérieur** : Ces données déterminent les variations saisonnières et quotidiennes des conditions de séchage.
- **Ensoleillement** : La disponibilité de l'énergie solaire heure par heure permet d'évaluer la quantité d'énergie thermique accessible pour le séchage.

II.4.2 Air de séchage :

Air de séchage en fonction des aliments à Sécher		
Aliment à sécher dans la caisse de séchage 1		
Quantité	Herbes	-
Teneur en eau de l'aliment	0,500	kg
Condition d'humidité relative minimale pour le séchage	0,76	kg/kg
Condition d'humidité relative maximale pour le séchage	10	%
Évaporation d'eau de l'aliment pour séchage complet	15	%
Température minimale de séchage	80	%
Température maximale de séchage	20	°C
Enthalpie de l'air de séchage maximale	40	°C
Enthalpie de l'air de séchage minimale	65	kJ/m³
Quantité d'eau à extraire de l'aliment	29	kJ/m³
	0,304	kg
Aliment à sécher dans la caisse de séchage 2		
Quantité	Legumes	-
Teneur en eau de l'aliment	1,000	kg
Condition d'humidité relative minimale pour le séchage	0,86	kg/kg
Condition d'humidité relative maximale pour le séchage	10	%
Évaporation d'eau de l'aliment pour séchage complet	15	%
Température minimale de séchage	88	%
Température maximale de séchage	40	°C
Enthalpie de l'air de séchage maximale	60	°C
Enthalpie de l'air de séchage minimale	115	kJ/m³
Quantité d'eau à extraire de l'aliment	59	kJ/m³
	0,757	kg
Quantité d'eau totale à extraire des aliments	1,061	kg
Enthalpie de séchage maximale pour les aliments sélectionnés	31,97	Wh/m³
Enthalpie de séchage minimale pour les aliments sélectionnés	16,26	Wh/m³

Figure II.11 Air de séchage

L'air de séchage est conditionné pour répondre aux besoins spécifiques des aliments à traiter. Les propriétés de l'air sec sont définies en fonction des aliments à sécher :

- **Humidité relative maximale et minimale** : Ces seuils garantissent un séchage efficace tout en évitant de dégrader les aliments.
- **Quantité d'eau à extraire** : Elle correspond à la masse d'eau à évaporer des aliments en fonction de leur poids initial et final.
- **Énergie à échanger avec l'air extérieur** : L'énergie nécessaire pour ajuster la température et l'humidité de l'air extérieur afin qu'il atteigne les conditions optimales de séchage.

Connaissant les conditions de l'air de séchage et air extérieur, il est possible d'évaluer l'énergie nécessaire à échanger avec l'air pour atteindre les conditions de séchage.

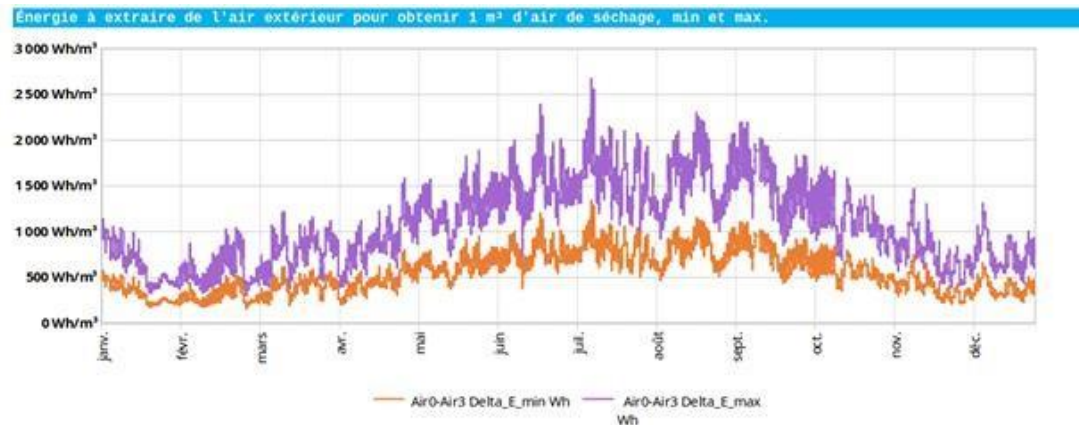


Figure II.12 Energie maximale et minimale

Le graphique dans la figure II.12 indique l'énergie maximale et minimale à échanger avec l'air pour atteindre les conditions de séchage.

II.4.3 Calcul du point de rosée :

Le point de rosée correspond à la température à laquelle l'humidité de l'air se condense.

La simulation évalue :

- **L'énergie nécessaire pour atteindre la condensation** : Calculée à partir des propriétés de l'air extérieur, cette énergie permet de réduire efficacement l'humidité avant le séchage.

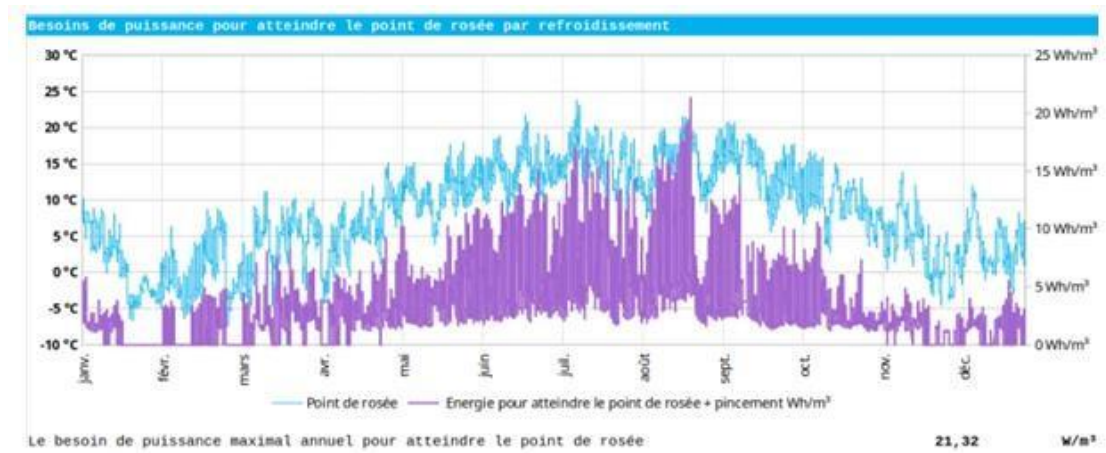


Figure II.12 point de rosée

Ci-dessus un graphique représentant l'énergie nécessaire heure par heure pour atteindre la température de rosée. En plus de l'énergie nécessaire heure par heure on connaît l'énergie maximale dans l'année pour atteindre la température de point de rosée pour 1m³ d'air extérieur. Cette dernière valeur nous permet de connaître la puissance du module de condensation.

II.4.4 Comportement du module de condensation :

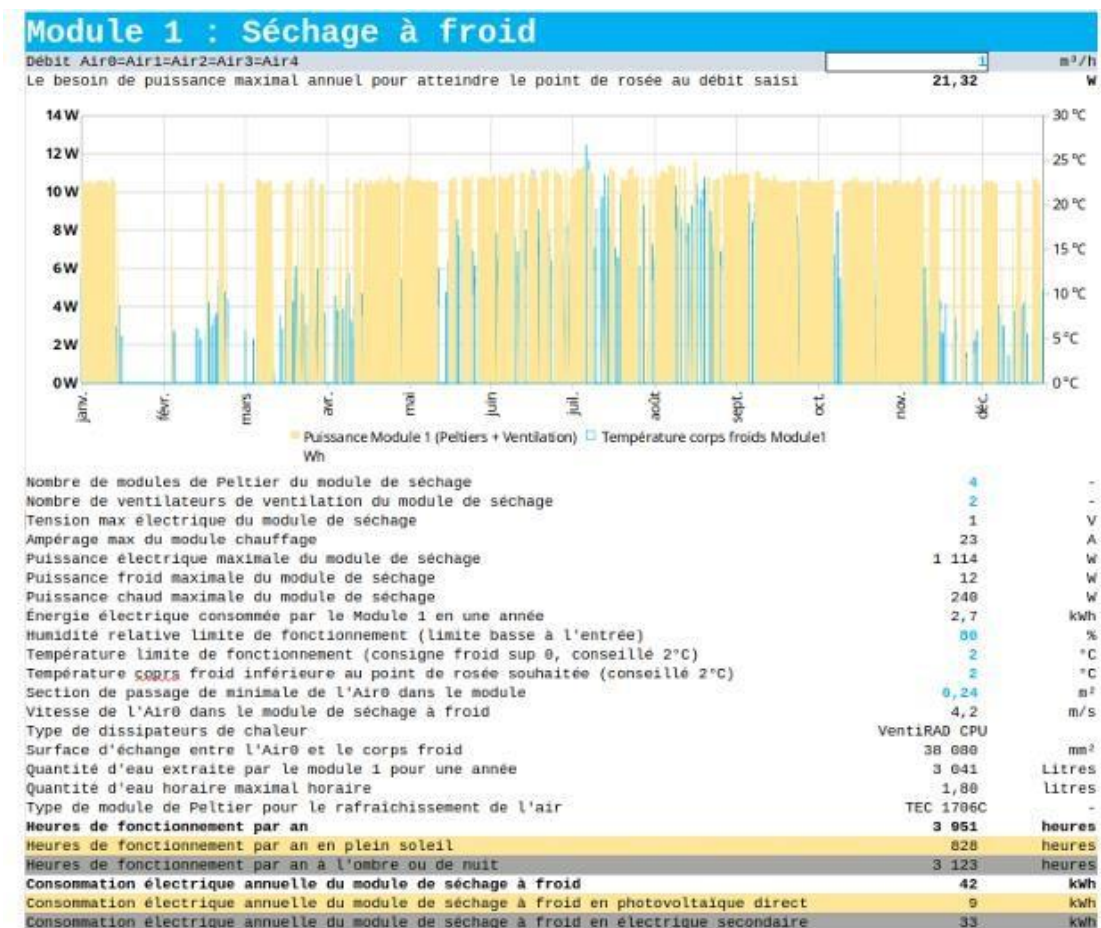


Figure II.13 Séchage a froid

Le module de condensation à Peltier joue un rôle crucial dans la préparation de l'air sec. La simulation permet de déterminer :

- **Conditions de fonctionnement** : Les limites d'humidité et de température pour un fonctionnement optimal du module.
- **Heures de fonctionnement** : En analysant les données climatiques, on identifie les périodes où le module peut opérer efficacement pour maximiser son usage annuel.

II.4.5 Comportement du corps de chauffe solaire :

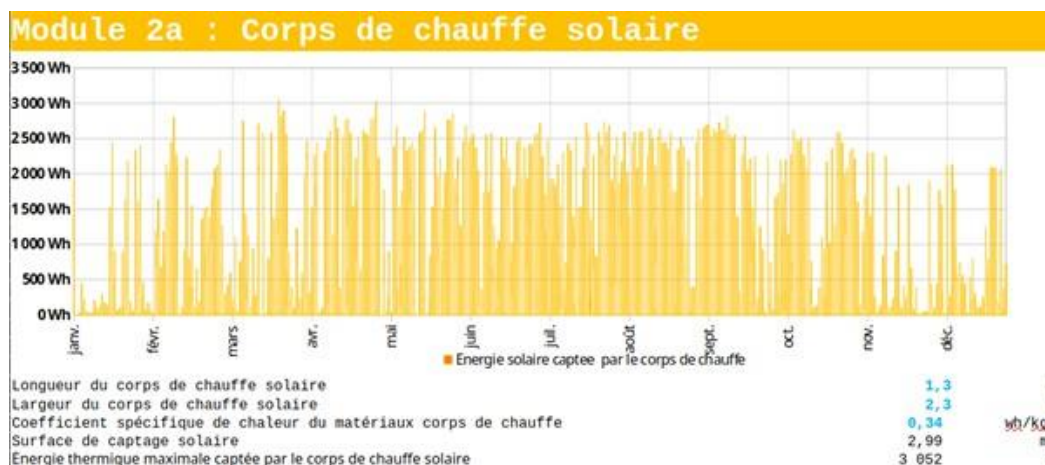


Figure II.14 Corps de chauffe solaire

Le corps de chauffe solaire exploite l'énergie thermique captée pour conditionner l'air.
La simulation évalue :

- **Ensoleillement** : Les variations horaires et saisonnières influent sur la quantité d'énergie thermique disponible.
- **Surface de captage** : Le dimensionnement optimal de la surface de captage solaire garantit une exploitation maximale de l'énergie solaire disponible.
- **Énergie thermique captée** : Calculée en fonction de l'ensoleillement et des propriétés du corps de chauffe (matériaux, inclinaison, orientation)

II.5 Validation du modèle numérique:

Étant donné la complexité des calculs et des paramètres pris en compte pour le dimensionnement et la conception du séchoir solaire hybride, il est crucial de valider le modèle numérique avec des données réelles. Cette étape de validation garantit que les simulations et hypothèses utilisées reflètent fidèlement le fonctionnement du séchoir en conditions réelles. Pour ce faire, une fois le séchoir construit, des mesures expérimentales doivent être réalisées :

II.5.1 Mesures de performances globales :

Les conditions climatiques réelles (température, humidité, ensoleillement) seront comparées aux prévisions du modèle, ainsi qu'aux paramètres de fonctionnement des modules tels que l'énergie captée, l'humidité extraite et les températures atteintes.

II.5.2 Validation des modules isolés :

Chaque module sera testé séparément pour analyser son comportement individuel :

- Le module de condensation sera évalué pour sa capacité à réduire l'humidité de l'air et atteindre le point de rosée.
- Le corps de chauffe solaire sera observé pour sa capacité à capter et transférer l'énergie thermique selon les prévisions.
- Les ventilateurs et conduits de ventilation seront examinés pour s'assurer que le flux d'air est conforme aux attentes.

II.5.3 Pilotage par le système de régulation :

Une fois les performances des modules validées individuellement, le système de régulation sera testé pour vérifier sa capacité à gérer les interactions entre les modules, en adaptant leur fonctionnement aux conditions climatiques et aux besoins du séchage. Ces tests permettront d'ajuster le modèle numérique en fonction des écarts éventuels entre les résultats simulés et les mesures réelles. Ce processus d'ajustement est essentiel pour garantir que le séchoir hybride fonctionne de manière optimale et que son système de régulation réagisse correctement dans toutes les situations. En validant chaque étape, le modèle devient une référence fiable pour optimiser le séchage, réduire la consommation énergétique et maximiser l'efficacité des modules

II.6 Théorie appliquée :

II.6.1 Loi fondamentale de la thermodynamique :

Dans le cadre de la conception de ce séchoir hybride, nous utilisons l'équation fondamentale de la thermodynamique, également connue sous le nom d'équation de la chaleur, comme base théorique pour calculer et modéliser le comportement des modules des aliments systèmes. Cette équation, largement utilisée dans nos calculs, est la suivante :

$$Q=m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Cette équation nous permet de déterminer l'énergie (Q) nécessaire pour chauffer une certaine quantité d'air humide (m) d'une température initiale à une température finale. Elle prend en compte la capacité thermique spécifique de l'eau (cp), qui mesure la quantité d'énergie nécessaire pour augmenter la température de l'air d'une unité, ainsi que la différence de température (ΔT) entre les deux états. Dans cette formule :

- Q représente l'énergie thermique en joules (J) ou en calories (Wh).
- m est la masse de l'eau en kilogrammes (kg) ou en grammes (g).
- cp est la capacité thermique spécifique de l'air humide, exprimée en joules par kilogramme-kelvin (J/kg·K), en calories par gramme-kelvin (Wh/kg·K) ou par m³.
- Il est important de noter que cette valeur est variable selon la température et le taux d'humidité.
- ΔT représente la différence de température entre la température finale et la température initiale de l'air, mesurée en kelvins (K) ou en degrés Celsius (°C).

Le cp de l'air humide varie uniquement en fonction de la température et son humidité. La pression de l'air n'a pas d'influence sur sa capacité thermique spécifique (cp).

II.6.2 Isolation thermique :

Le coefficient d'isolation U (ou coefficient de transmission thermique) mesure la capacité d'un matériau à résister au transfert de chaleur entre deux milieux. Il est exprimé en watts par mètre carré-kelvin (W/m²K). Permet de calculer par exemples les déperditions de la caisse de séchage dans l'environnement par saison froides.

Matériaux isolants :

-Plaques en polyuréthane : 0,023 - 0,028 W/m²K

-PUR pulvérisé : 0,030 W/m²K

-Laine minérale : 0,035 W/m²K

-Laine de verre : 0,035 W/m²K

-XPS : 0,035 W/m²K EPS : 0,040 W/m²K

Air humide :

L'air extérieur est considéré comme air humide, son taux d'humidité dans l'air est variable et peut être influencé par la température et/ou la pression.

L'humidité :

L'humidité est la quantité d'eau présente dans l'air sous forme de vapeur d'eau. Elle est exprimée en pourcentage de l'humidité relative (HR) ou en grammes par mètre cube d'humidité absolue (H_A).

Humidité absolue

L'humidité absolue peut être calculée à partir de l'humidité relative, la température et la pression partielle de vapeur.

$$H_A = \frac{(H_R \times P_w)}{(461,5 \text{ J/kg}\cdot\text{K})} \times T \text{ [g/kgairsec]}$$

461,5 J/kg·K est la constante des gaz

spécifique pour la vapeur d'eau.

Masse volumique de l'air humide :

La masse volumique de l'air humide (ρ) est fonction de la masse volumique de l'air sec (ρ_0) et de l'humidité relative (H_R) :

$$\rho = (P_{sec}/RaT) + (P_w/RwT)$$

où :

P_{sec} : La pression de l'air sec en Pa

P_w : La pression de la vapeur d'eau en Pa

T : La température de l'air en kelvins

R_a : la constante de l'air sec, égale à 287,058 J·kg⁻¹·K⁻¹

R_w : la constante de la vapeur d'eau, égale à 461,495 J·kg⁻¹·K⁻¹

La masse volumique de l'air sec

(ρ_0) varie également en fonction de la température et de la pression atmosphérique :

$$\rho_0 = P_{atm} / (R \cdot T)$$

R – la constante de l'air sec, égale à $287,058 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

La pression partielle de la vapeur d'eau :

La pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air humide est un facteur direct du taux d'humidité relatif : $P_w = H_R \times P_{sat}$ [hPa]

La pression de vapeur saturante :

La pression saturante de l'air humide, également appelée pression de vapeur saturante, est la pression maximale de vapeur d'eau que l'air peut contenir à une température donnée. L'équation de Tetens avec ses constantes permet une approximation : $P_{sat} = 0.61078 \cdot e((17.27 \cdot T)/(T+237.3))$ [kPa]

La constante 0,61078 est un coefficient qui dépend de la pression de vapeur saturante de l'eau à 0°C (273,15 K).

17,27 : coefficient multiplicatif de la température (T) dans l'expression exponentielle

237,3 : valeur de référence pour l'addition à la température (T) dans l'expression exponentielle.

Il est important de noter que cette formule est spécifique à l'eau et est valable pour des températures comprises entre -50°C et 100°C.

$$P_{vsat} = 610,78 \times \exp(\text{SI}(T < 0; 21,8745584 \times T / (T + 265,5); 17,2693882 \times T / (T + 237,3))) \text{ [kPa]}$$

[kPa] Des valeurs exemple de pression de vapeur saturante

$$-T = 20^\circ\text{C} : P_{ws} \approx 23,4 \text{ hPa}$$

$$-T = 30^\circ\text{C} : P_{ws} \approx 43,2 \text{ hPa}$$

$$-T = 40^\circ\text{C} : P_{ws} \approx 76,1 \text{ hPa}$$

II.7 Les avantages et les inconvénients de système électro- séchage :

Les Avantages sont :

- Indépendance par rapport aux conditions climatiques.
- Meilleur contrôle du séchage.

- Forte croissance de la productivité par rapport aux autres types de séchoirs solaires, car le matériel peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin.

Les inconvénients :

- Le coût de production et d'investissement est élevé.
- La nécessité d'approvisionnement du local en carburant, électricité, gaz.
- Demande un personnel qualifié pour la maintenance.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu modéliser le processus de séchage, l'exprimer sous forme d'équations et de courbes graphiques et étudier les meilleurs moyens d'obtenir le meilleur rendement possible, cette étude théorique nous permettra de concevoir un séchoir solaire compatible avec les conditions d'exploitation de notre région.

Les principes fondamentaux de la thermodynamique ont permis de dimensionner le séchoir solaire hybride de manière à garantir un fonctionnement optimal tout au long de l'année. Toutefois, pour finaliser sa construction et en optimiser les réglages, il est essentiel de valider le modèle en conditions réelles.

Cela implique d'observer et de mesurer le comportement du séchoir ainsi que celui de ses différents modules, en tenant compte des paramètres climatiques et des variations environnementales. Les données recueillies permettront d'ajuster le système de régulation pour maximiser l'efficacité énergétique et garantir des performances optimales.

Cette étape finale de validation et d'ajustement est cruciale pour transformer la conception théorique en un outil pratique, fiable et adapté aux besoins réels du séchage.

Chapitre III : conception de séchoir solaire par logiciel SolidWorks

III.1 Généralités sur la Conception-Fabrication Assistée par Ordinateur CFAO :

Pour aider les métiers de la conception et de la fabrication de produits manufacturiers, de nombreux logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et de Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO) ont été développés et commercialisés au cours de ces cinquante dernières années.

Le premier logiciel de Conception apparu est : la DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) en 1963 (Sketch pad développé par Ivan Sutherland à MIT). Dans les années 1970 est apparue la modélisation solide 3D mettant en œuvre 2 techniques différentes : B-Rep (Boundary Représentation) et CSG (Constructive Solide Géométrie). Plus tard, la modélisation s'appuyant sur les NURBS (Non Uniform Rational B-Spline) a permis d'harmoniser la représentation de toutes les courbes et surfaces utilisées en CAO. Le premier logiciel de FAO commercialisé est PRONTO qui fut développé par Patrick Hanratty en 1957.

Comme les logiciels de CAO, la FAO a également énormément évolué grâce à l'augmentation de la puissance de calcul, de mémorisation et de visualisation des ordinateurs. Cependant les systèmes de CAO et de FAO ont longtemps évolué en parallèle, posant ainsi des problèmes pour passer de l'un à l'autre.

La conception et la fabrication assistées par ordinateur (CFAO ou CAO-FAO) sont souvent Présentées conjointement. En effet, ces deux champs d'application informatique en génie Mécanique ont plusieurs points en commun. Chacune des applications porte sur les mêmes pièces mécaniques et utilise une base informatique commune : les ressources graphiques d'édition et de gestion. [12]

III.2 Conception assistée par ordinateur (CAO) :

La conception d'un produit consiste à proposer des solutions ou reconcevoir des solutions existantes pour remplir des fonctions bien définies à l'intérieur d'un ensemble de contraintes. Généralement, l'obtention d'une solution n'est pas directe sauf pour des problèmes extrêmement simples. Le processus est plutôt itératif au cours duquel un objet est conçu et modifié afin qu'il puisse remplir des fonctions bien définies et se conformer à un ensemble de contraintes [13].

III.3 Fabrication assistée par ordinateur (FAO) :

Au sens strict, la fabrication assistée par ordinateur (FAO) désigne les logiciels d'assistance à la programmation des machines-outils à commande numérique. Un souci très actuel dans l'Entreprise, où l'informatisation des tâches de préparation du travail apparaît comme la nouvelle étape à franchir pour améliorer les délais de mise en fabrication. Mais, faute d'informations autres que commerciales, les décideurs se trouvent très démunis devant le choix pratique d'un système d'assistance à la programmation [13].

III.4 Présentation de logiciel de conception SOLIDWORKS :

Créé en 1993 par l'éditeur américain éponyme, SOLIDWORKS est racheté le 24 juin 1997 par la société Dassault Systèmes. SOLIDWORKS est un logiciel propriétaire de conception assistée par ordinateur 3D fonctionnant sous Windows. SOLIDWORKS est un modéleur 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.

Dans ce contexte, des logiciels tels que SolidWorks permet de générer des modèles numériques détaillés, capables de simuler le comportement réel des composants en termes de dimensions, de matériaux et de contraintes. L'intégration avec des outils de FAO offre la possibilité de passer rapidement du modèle virtuel à la fabrication physique.

Le présent projet s'inscrit dans cette démarche : il consiste à concevoir un séchoir solaire à l'aide de SolidWorks, en tenant compte des aspects thermiques, fonctionnels et mécaniques. Ce travail représente une application concrète des principes de la CFAO, en exploitant les outils numériques pour transformer une idée fonctionnelle en un prototype virtuel prêt à être optimisé ou fabriqué.

Le logiciel SolidWorks comprend : trois (03) modules élémentaires : Pièce, Assemblage, Mise en plan.

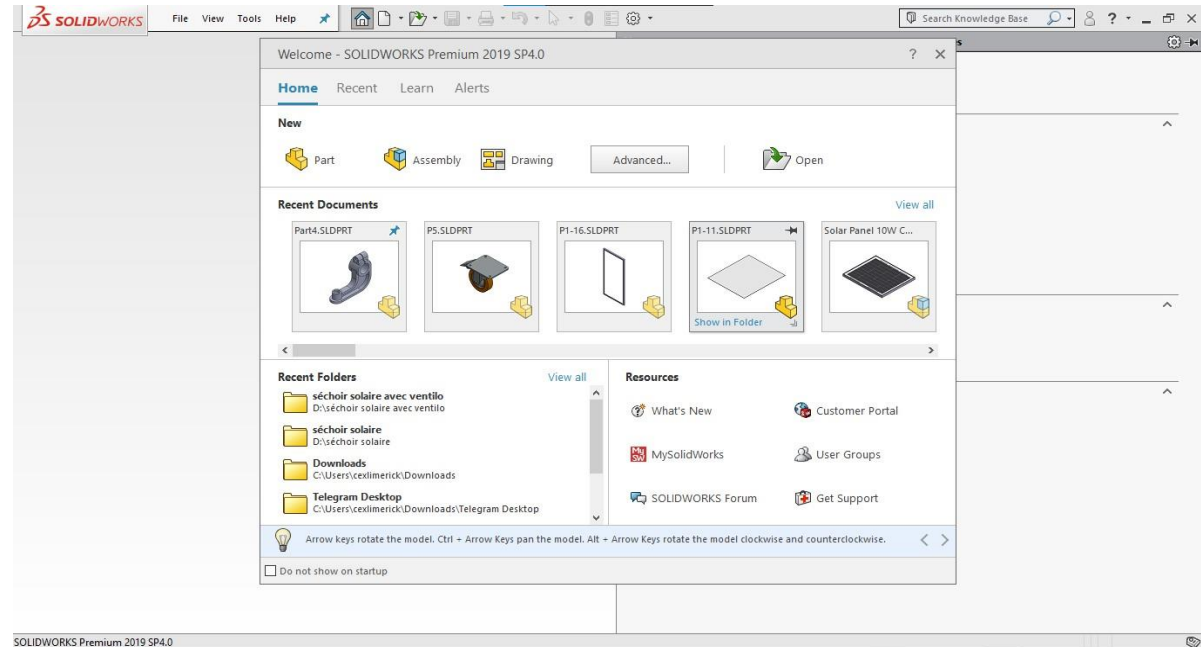


Figure III.1 Interface graphique de SolidWorks version 2019

III.4.1 Le module pièce :

Le module pièce est le premier module élémentaire de SolidWorks, servant à élaborer le modèle numérique.

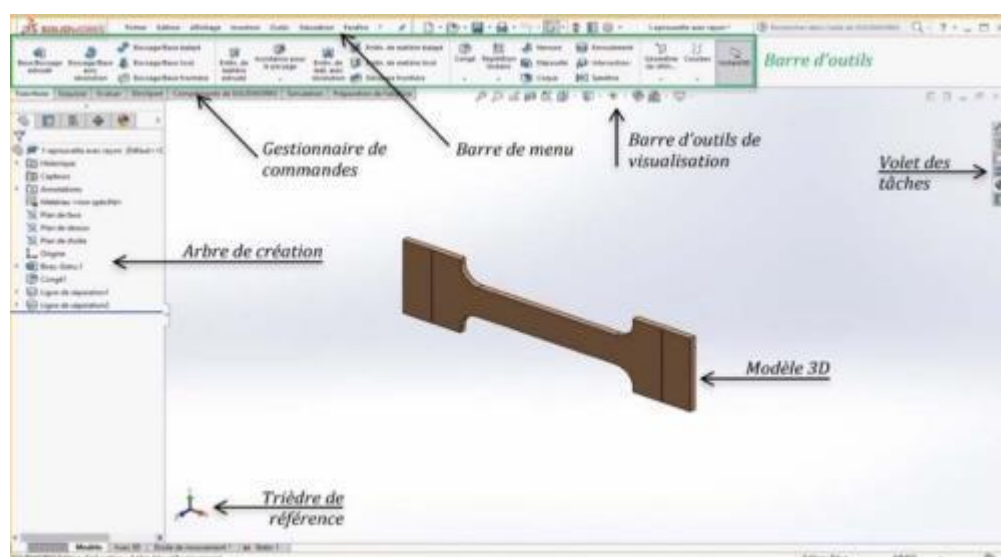


Figure III.2 Interface et barre d'outil

III.4.2 Interface :

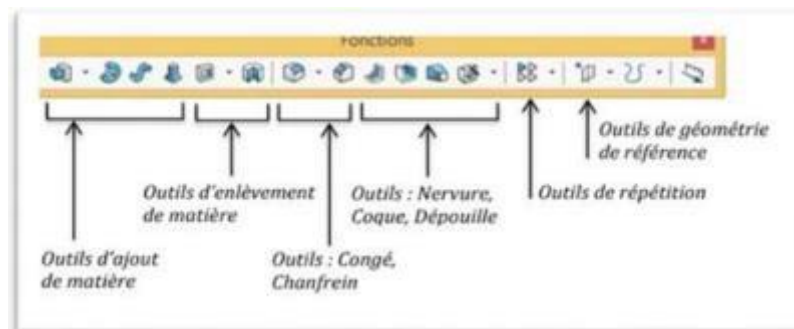


Figure III.3 Les fonctions.

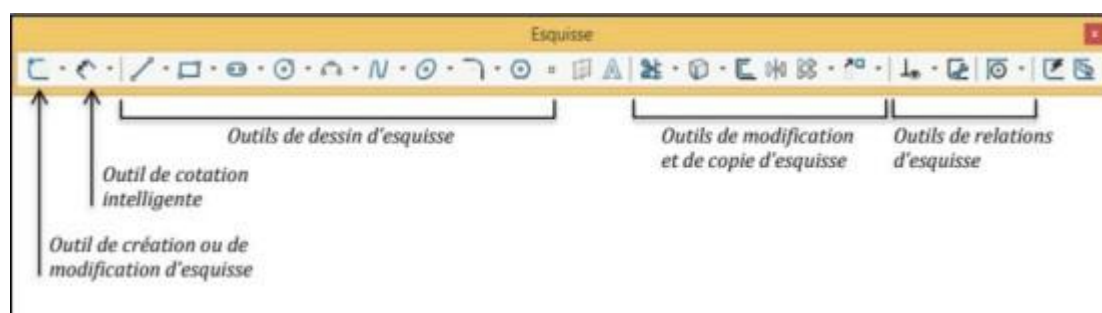


Figure III.4 Les esquisse.

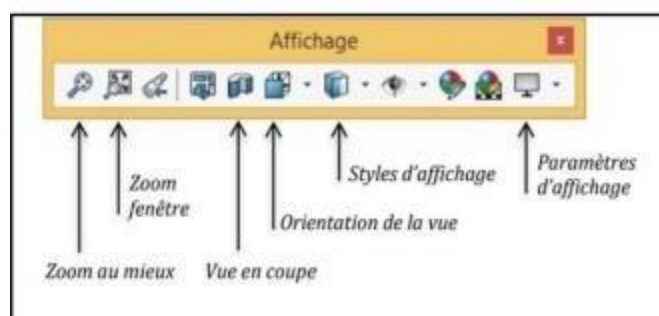


Figure III.5 Affichage

III.4.3 Le module assemblage :

Le module assemblage est le deuxième module élémentaire de SolidWorks, permettant

d'effectuer l'assemblage des pièces que l'on a élaboré probablement dans le module pièce

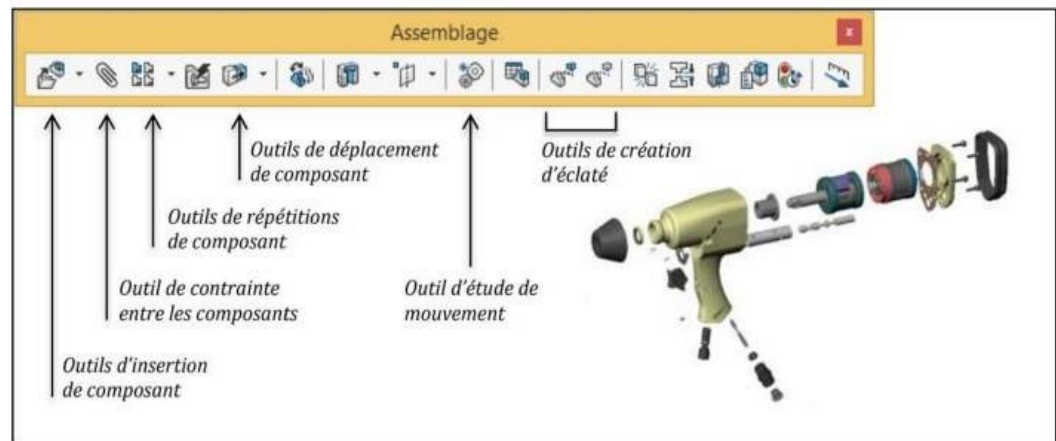


Figure III.6 Assemblage

III.4.4 Le module Mise en Plan :

Le module Mise en Plan est le troisième module élémentaire de SolidWorks, servant effectuer la mise en plan d'une pièce ou d'un assemblage, que l'on a élaboré préalablement dans le module Pièce

Les barres d'outils :

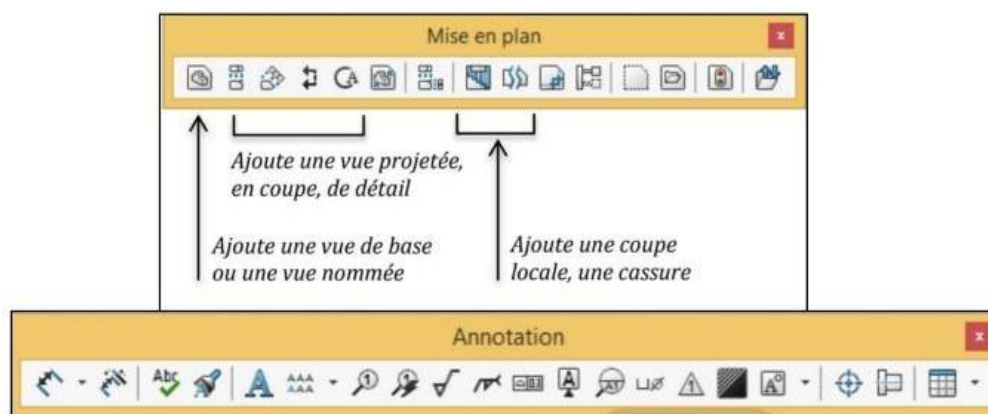


Figure III.7 Les barres d'outil.

III.5 Conception par SolidWorks :

III.5.1 Description générale de la conception

La conception présentée dans **Figure III.8** a été adoptée en fonction des conditions de notre région au nord de l'Algérie avec un climat méditerranéen afin que les rayons du soleil atteignent le produit en quantités suffisantes et assurent également sa protection contre l'humidité élevée.

Ce séchoir se compose de deux éléments principaux :

La salle de séchage, qui contient 5 étagères pour placer le produit et 3 ventilateurs pour tirer l'air chargé d'humidité, qui est alimenté en électricité par des panneaux solaires installés au sommet à un angle de 45° pour assurer la meilleure exposition à la lumière du soleil

Le collecteur solaire qui chauffe l'air entrant dans la salle de séchage et qui est placé à un angle d'inclinaison de 18°

La figure 6 montre un vue éclatée du séchoir avec un tableau des éléments (tableau 1).

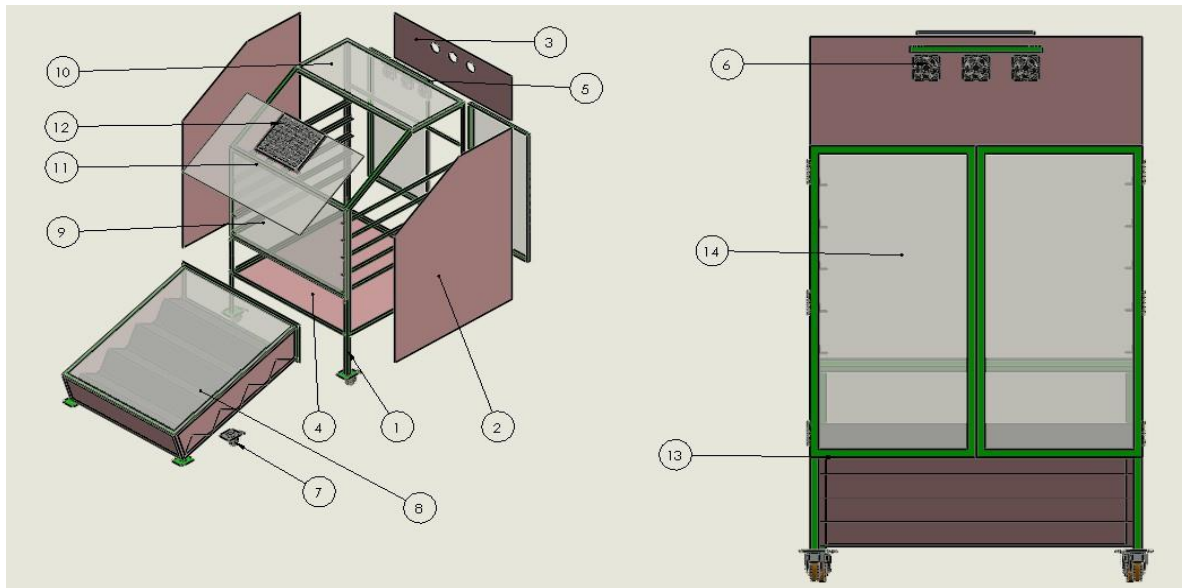


Figure III.8 Vue éclatée de séchoir solaire

Tableau des éléments

No. d 'article	Designation	Quantité
1	La structure	1
2	Plaque 1 coté	2
3	Plaque 2 supérieure	1
4	Plaque 3 base	1
5	couvercle du ventilateur	1
6	Ventilateur	3
7	Roue	6
8	capteur solaire	1
9	Verre de face	1
10	Verr superieure	1
11	Verre encline	1
12	Panneau solaire	1
13	Porte	2
14	Porte vitrée	2

Tableau III.1

III.5.2 .1La structure :

Description de la structure montre les dimensions :

Largeur : 1000 mm

Hauteur totale : 1350 mm

Profondeur : 1000 mm

Elle contient plusieurs niveaux horizontaux pour supporter des plateaux ou des grilles.

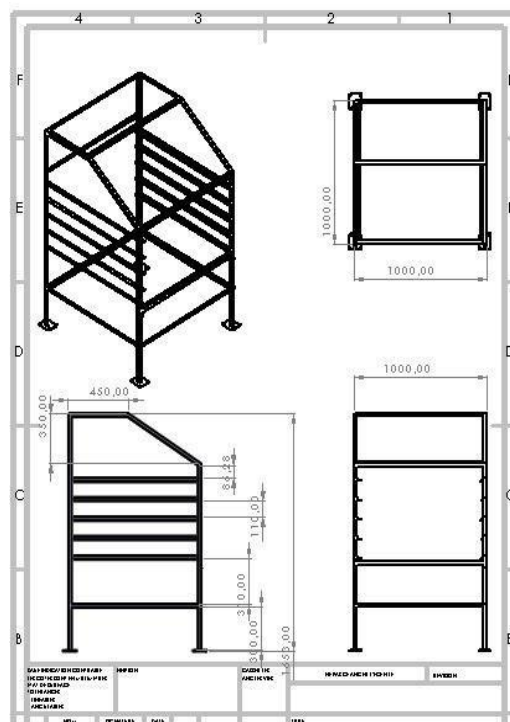


Figure III.9 Dessin technique de la structure

Cette structure sert de support principal pour un séchoir solaire, probablement de type indirect ou mixte, et elle remplit plusieurs fonctions :

-Support des plateaux de séchage :

Les barres horizontales servent à placer des clayettes ou des grilles sur lesquelles on dispose les aliments à sécher (fruits, légumes, herbes, etc.).

-Fixation de l'enveloppe du séchoir :

La partie supérieure inclinée suggère qu'elle va supporter une toiture en verre ou plastique transparent, formant une chambre de captation solaire. Cette inclinaison permet de capter efficacement le rayonnement solaire.

-Circulation de l'air :

La structure ouverte sur les côtés permet une bonne circulation de l'air chaud, essentielle pour un bon séchage.

-Stabilité et mobilité :

Les pieds visibles peuvent être fixés au sol ou réglables pour assurer la stabilité de l'appareil.

III.5.3 Ventilateur :

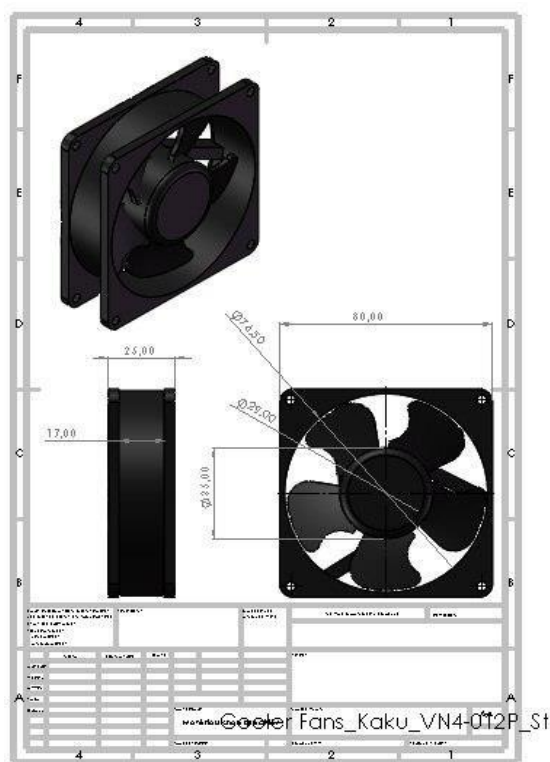


Figure III.10 Dessin technique du Ventilateur

L'utilisation d'un ventilateur dans le séchoir solaire est primordiale pour assurer une bonne circulation de l'air chaud à l'intérieur de la chambre de séchage. Le ventilateur permet d'éviter la formation de zones mortes où l'air pourrait stagner, ce qui garantit un séchage homogène des produits placés dans le séchoir. Cette circulation forcée de l'air facilite l'évacuation rapide de l'humidité extraite des produits, réduisant ainsi le temps de séchage et améliorant la qualité finale des produits séchés en préservant leurs caractéristiques organoleptiques (couleur, goût, texture) et nutritionnelles.

De plus, le ventilateur empêche la condensation de la vapeur d'eau sur les parois internes du séchoir, limitant ainsi les risques de moisissures et d'altération des produits. Cette amélioration de l'échange thermique contribue à une utilisation plus efficace de l'énergie solaire captée par le système.

Sur le plan technique, le ventilateur utilisé dans ce projet est un modèle de type axial dont les principales dimensions sont :

Longueur : 80 mm,

Largeur : 80 mm,

Épaisseur : 25 mm.

Le diamètre des pales est d'environ 82 mm, avec une épaisseur centrale de 17 mm. Ce ventilateur est conçu pour assurer un débit d'air adapté aux applications de séchage, permettant un renouvellement constant de l'air à l'intérieur de la chambre de séchage solaire.



Figure III.11 Ventilateur

Ventilateur d'extraction durable 12 V, Silencieux, puissant mais sobre, il est destiné à extraire l'air vicié hors enceinte

Caractéristiques :

Alimentation : 12V

Consommation : 3 W

Débit d'air : 130 m³/h

Vitesse 1800 ± 10% tr/mn

Résistant aux hautes températures et facile à nettoyer.

Durée de vie : 35.000 heures

III.5.4 capteur solaire :

Le capteur solaire de séchage est la partie principale d'un séchoir solaire.

Sa fonction consiste à capter le rayonnement solaire et le transformer en chaleur afin de chauffer l'air qui le traverse.

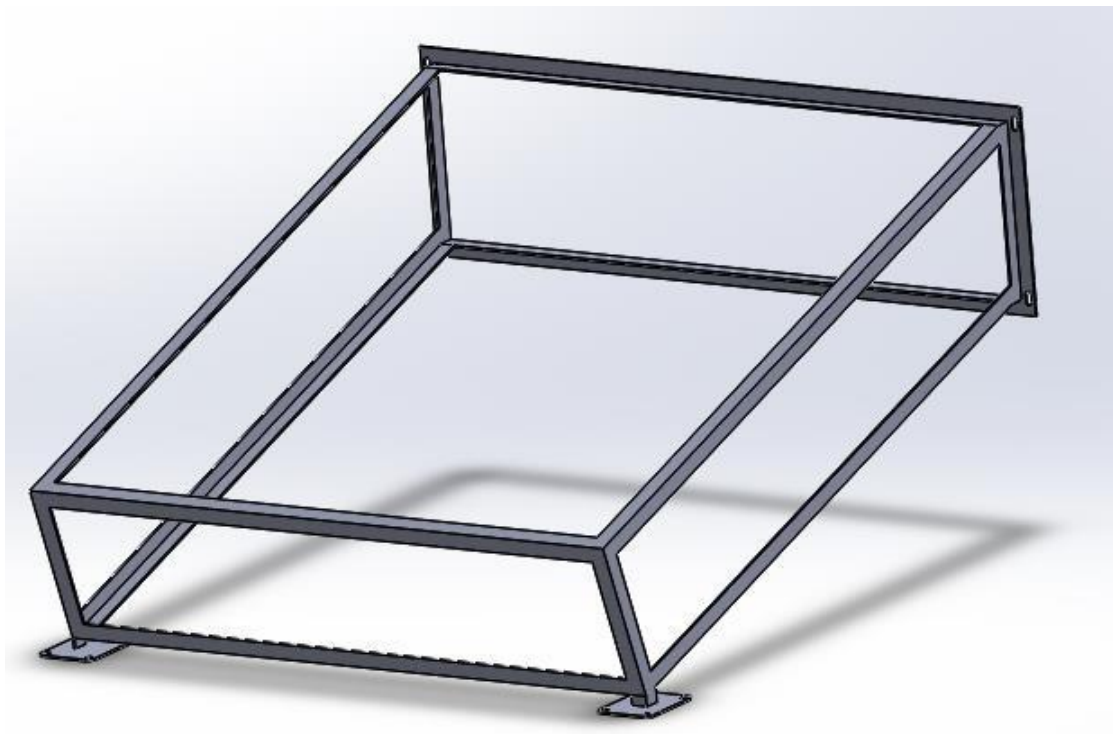


Figure III.12 La Structure du capteur solaire

Cet air chaud est ensuite envoyé dans la chambre de séchage afin d'enlever l'humidité des produits (fruits, légumes...).

Intérêt du collecteur solaire de séchage :

Économie d'énergie : il n'a pas besoin de combustible, seulement de l'énergie solaire.

Écologique : pas d'émissions de CO₂, pas de pollution.

Peu d'entretien : système simple, robuste, avec une durée de vie assez longue.

Dimensions du collecteur (comme montré sur la figure) :

Largeur : 1000 mm (soit 1 mètre)

Longueur : environ 1,07 m (comme indiqué : 1072,11 mm)

Hauteur : 500 mm (un demi-mètre)

Description du fonctionnement : le collecteur est installé de manière inclinée afin de profiter au maximum du rayonnement solaire.

L'air froid entre par le bas, circule dans le caisson en absorbant la chaleur générée par le rayonnement, puis ressort par le haut, plus chaud, afin d'alimenter le séchoir en air

sec

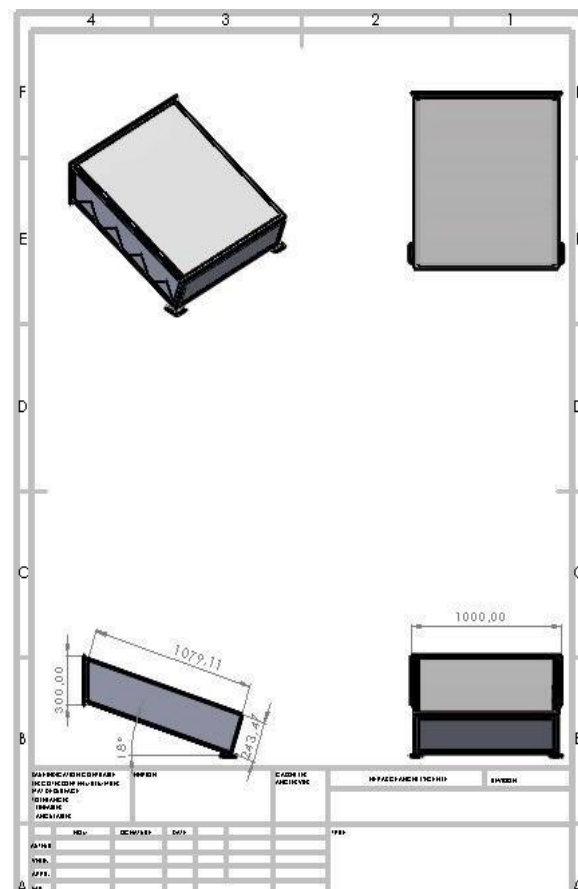


Figure III.13 Dessin technique de capteur solaire

Voici la partie finale De conception capteur solaire (figure III.14)

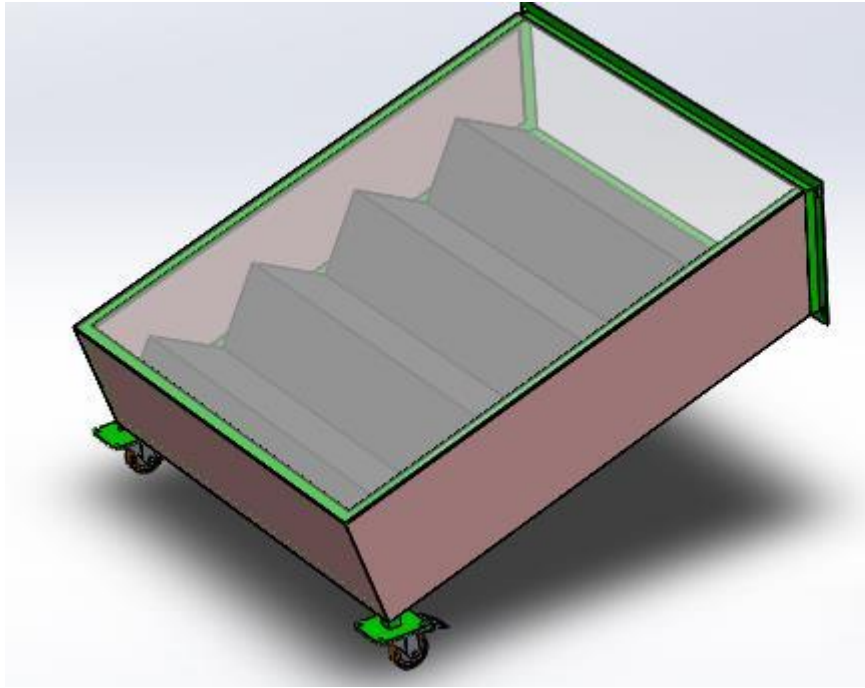


Figure III.14 Capteur solaire

III.5.5 Panneau solaire :

Un panneau solaire est un dispositif convertissant une partie du rayonnement solaire en énergie thermique ou électrique, grâce à des capteurs solaires thermiques ou photovoltaïques respectivement.

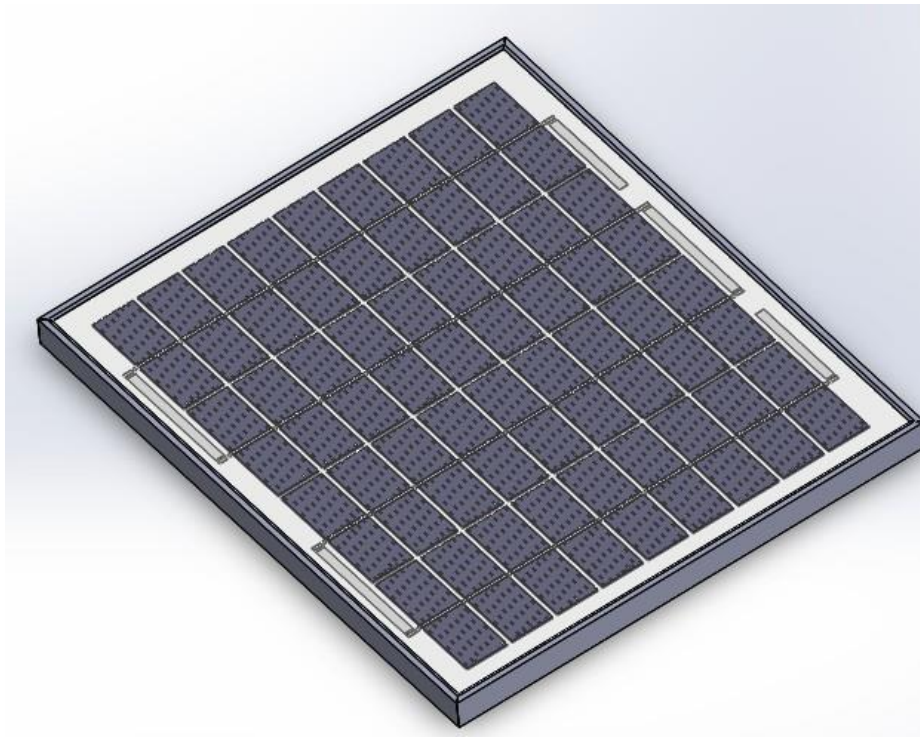


Figure III.15 Panneau solaire

III.5.6 Roues :

Nous avons installé 6 roues (4 pour la chambre de séchage et 2 pour le capteur solaire) pour faciliter le déplacement du séchoir.

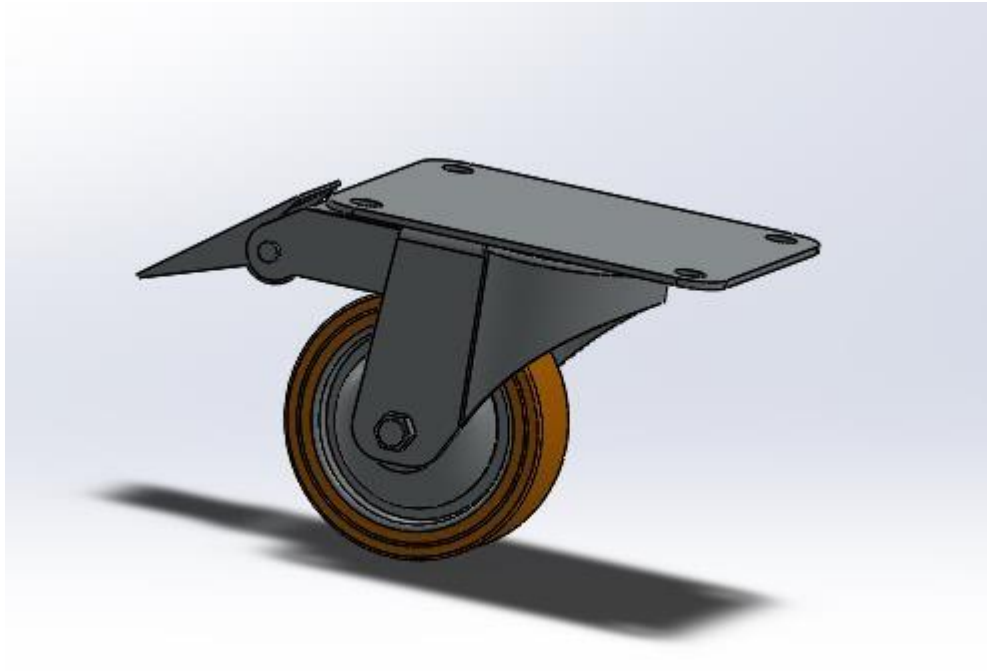


Figure III.16 Roues

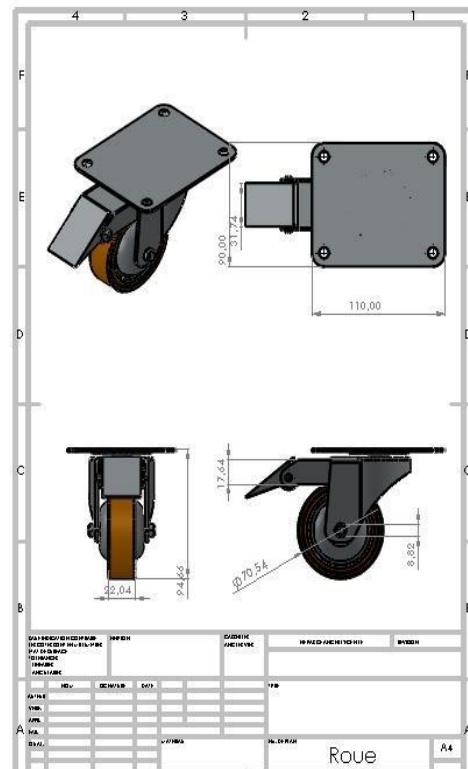


Figure III.17 Dessin technique des roue

III.5.7 Vitre :

C'est un Panneau de verre transparent servant à isoler de l'air extérieur tout en laissant passer la lumière. Le verre à vitre courant est transparent de l'UV jusqu'au moyen infrarouge, il ne transmet pas les UV-B et les UV-C. Ainsi, on peut bronzer derrière une vitre, puisque les UV-A sont transmis.

Chapitre IV : Etude et simulation du séchoir solaire

IV.1 Introduction :

La conception et l'analyse numériques constituent l'un des principaux piliers du développement des systèmes d'ingénierie modernes, car les outils de simulation informatique permettent de tester les performances et l'efficacité avant de passer à l'étape de la fabrication proprement dite. Dans ce chapitre, nous présentons une étude de simulation détaillée d'un séchoir solaire à l'aide de SolidWorks**, l'un des principaux logiciels de conception et de simulation dans le domaine de l'ingénierie mécanique.

Ce chapitre vise à évaluer les performances du séchoir solaire à travers deux analyses principales :

1. Analyse thermique : Étudier la distribution de la température à l'intérieur du séchoir et déterminer l'efficacité du transfert de chaleur.
2. Analyse structurelle : Examiner la durabilité de la structure et sa capacité à résister aux charges mécaniques pendant le fonctionnement.

La modélisation tridimensionnelle (3D) a été utilisée pour simuler des conditions réelles, telles que l'exposition au rayonnement solaire et les charges causées par le poids des produits à sécher. Des propriétés matérielles proches de la réalité, telles que l'acier allié, ont également été adoptées pour garantir la précision des résultats.

Grâce à cette simulation, nous pourrons :

- Identifier les zones de concentration thermique et éviter tout déséquilibre dans la distribution de la chaleur.
- Assurer l'intégrité de la structure mécanique et éviter les déformations ou les contraintes excessives.

Cette étude fournit une approche pratique qui relie la théorie et la pratique, contribuant au développement de solutions durables et efficaces dans le domaine du séchage des produits agricoles à l'aide d'énergies renouvelables.

IV.2 Matériaux utilisés, la structure est réalisée en acier allié avec les caractéristiques suivantes : (figure IV.1)

The screenshot shows the 'Propriétés du matériau' (Material Properties) dialog box in SolidWorks. The 'Type de modèle' (Model Type) is set to 'Linéaire élastique isotropique' (Linear elastic isotropic). The 'Unités' (Units) are set to 'SI - N/m^2 (Pa)'. The 'Catégorie' (Category) is 'Acier' (Steel) and the 'Nom' (Name) is 'Acier allié' (Alloy steel). The 'Critère de ruine par défaut' (Default failure criterion) is 'Contrainte de von Mises max' (Max von Mises stress). The 'Durabilité' (Durability) is 'Définie' (Defined). Below the input fields is a table of material properties.

Propriété	Valeur	Unités
Module d'élasticité	2.1e+11	N/m^2
Coefficient de Poisson	0.28	S.O.
Module de cisaillement	7.9e+10	N/m^2
Masse volumique	7700	kg/m^3
Limite de traction	723825600	N/m^2
Limite de compression		N/m^2
Limite d'élasticité	620422000	N/m^2
Coefficient de dilatation thermique	1.3e-05	/K
Conductivité thermique	50	W/(m.K)
Chaleur spécifique	460	J/(kg.K)
Rapport d'amortissement du matériau		S.O.

Buttons at the bottom: Enregistrer, Config..., Appliquer, Fermer, Aide.

Figure IV.1 les caractéristiques de l'acier allier

IV.3 Analyse thermique du séchoir solaire

IV.3.1 Introduction:

Une étude thermique a été réalisée sur un modèle 3D de séchoir solaire à l'aide d'une simulation numérique par logiciel SolidWorks. L'objectif principal est d'évaluer la distribution des températures dans la structure afin de mieux comprendre le comportement thermique du système en fonctionnement.

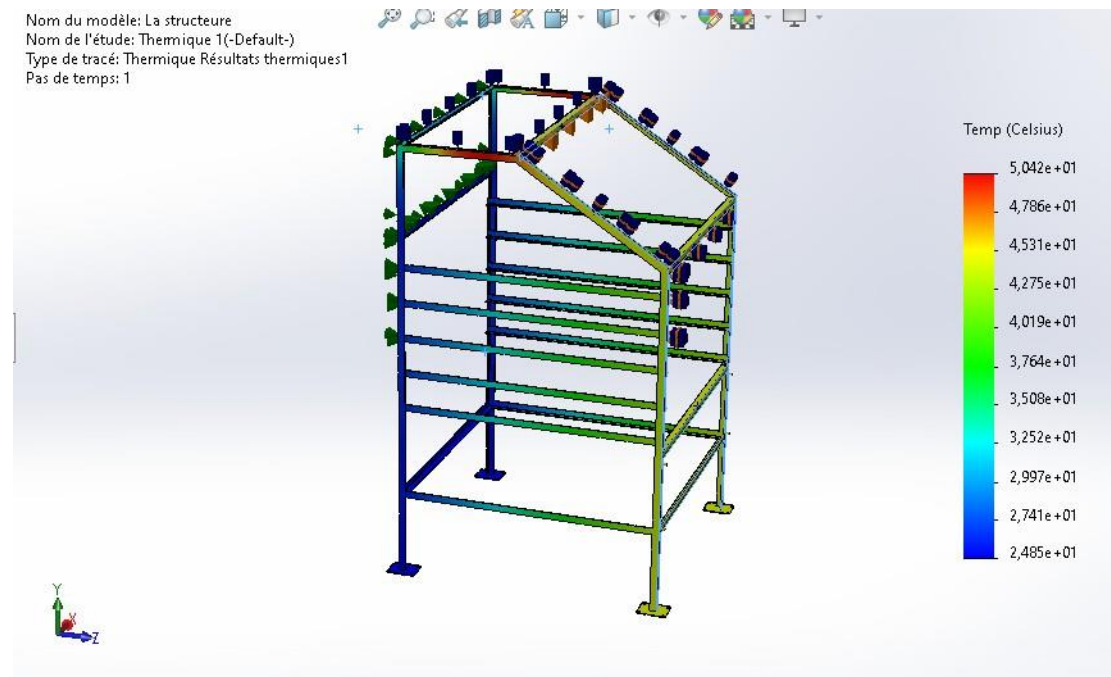


Figure IV.2 Simulation thermique de la structure

IV.3.2 Description du modèle:

- Nom du modèle : La structure
- Nom de l'étude : Thermal 1 (étude thermique statique)
- Type de graphique : Thermique (Température en Celsius)
- Étape de temps : 1 (représente probablement une condition stationnaire ou le premier instant de simulation)

Le modèle représente un séchoir solaire à plusieurs étagères, avec une structure métallique en treillis.

Résultats de la simulation thermique:

L'échelle de température est exprimée en Kelvin (K), allant de :

Min : 24 °C $\approx$ 297 K

Max : 50°C $\approx$ 323 K

IV.3.3 Les conditions aux limites :

Source de chaleur :

- Type : Radiation solaire
- Densité de radiation : 900 W/m^2 (Valeur représentant le pic de rayonnement solaire lors d'une journée ensoleillée).

IV.3.4 Interprétation de la distribution thermique :

Rouge foncé (zones chaudes) : concentration de chaleur dans la partie supérieure du séchoir (comportement cohérent avec l'accumulation d'air chaud).

Bleu (zones froides) : parties inférieures de la structure, support au sol, où la température est la plus basse.

Du vert au jaune : zones de transition thermique, suggérant un gradient thermique vertical logique du bas vers le haut, dû à la convection naturelle.

IV.3.5 Analyse

La carte des couleurs de cette simulation (figure IV.3) nous montre comment la chaleur se propage dans la structure, où l'on observe l'accumulation de masse thermique dans les couches supérieures près de la position des ventilateurs, ce qui confirme que les ventilateurs sont placés au bon endroit pour disperser la chaleur.

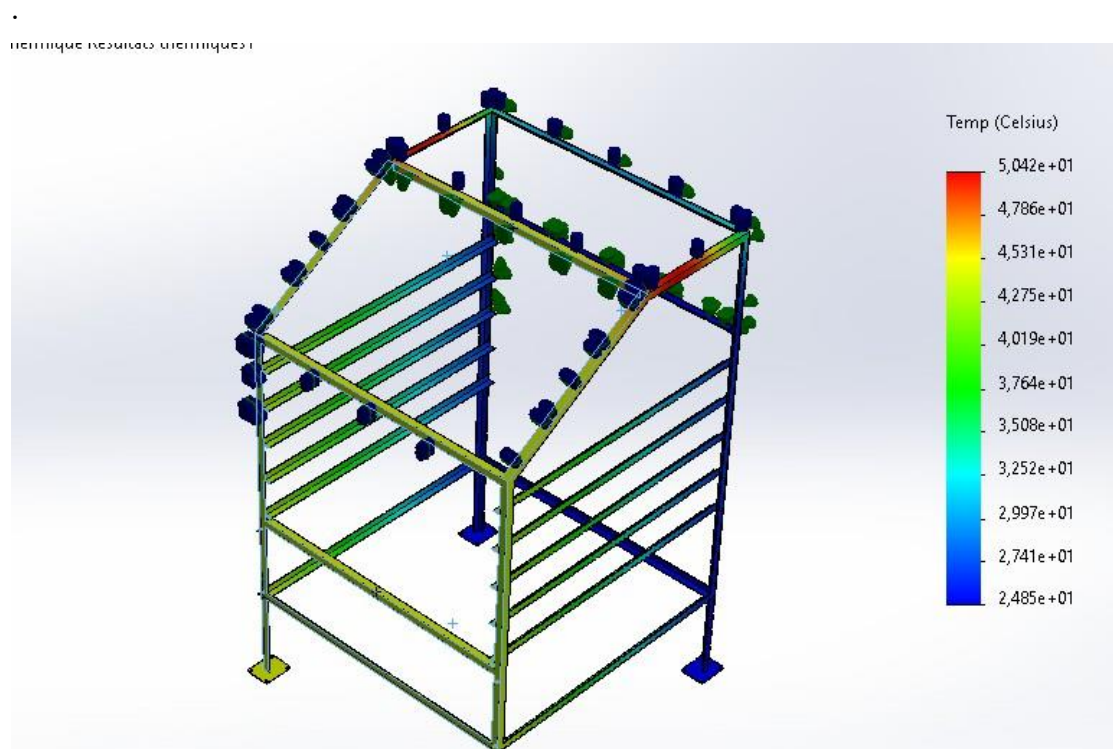


Figure IV.3 La résultat de la simulation thermique

IV.4 Simulation de la structure du séchoir :

IV.4.1 Introduction

Cette partie a pour but d'évaluer les performances de la structure du séchoir sous les charges prévues pendant le fonctionnement

Cette simulation a également été réalisée à l'aide du logiciel de simulation SolidWorks.

IV.4.2 Caractéristiques de la structure :

La structure utilisée dans la simulation a été présentée ainsi que ses dimensions géométriques dans la rubrique précédente.

IV.4.3 Etapes de la simulation :

1 Entrez dans SolidWorks Simulation et sélectionne nouvelle étude et on choisir étude statique

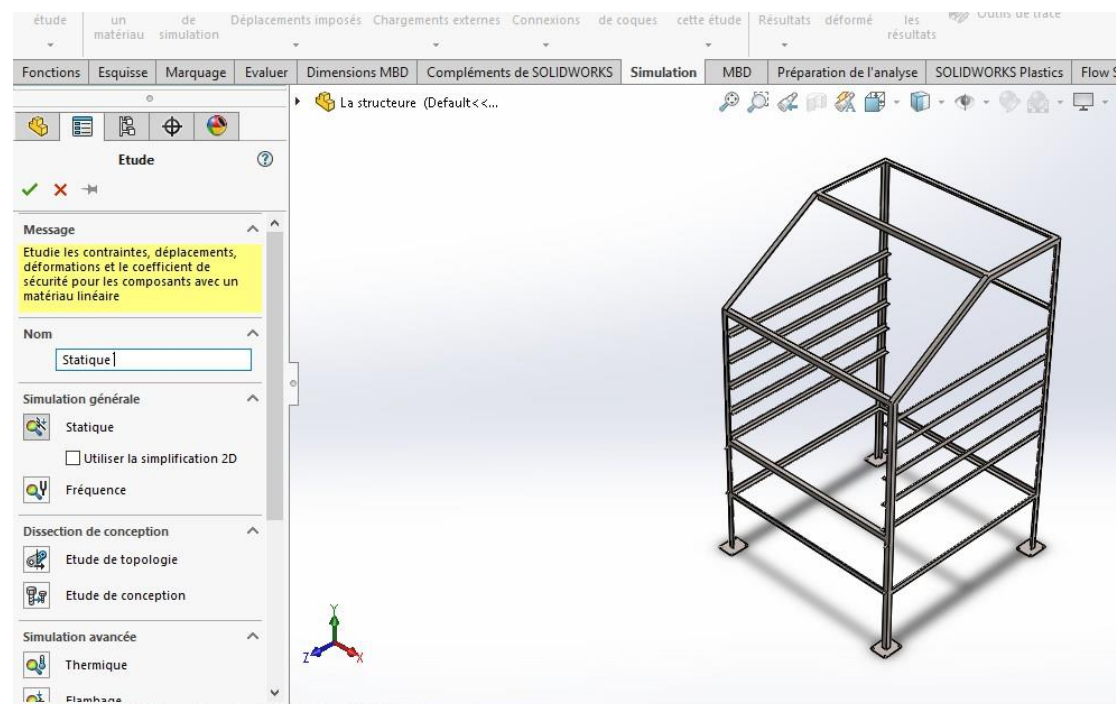


Figure IV.4 Etape 1

2 Commencez à entrer les données dans l'ordre

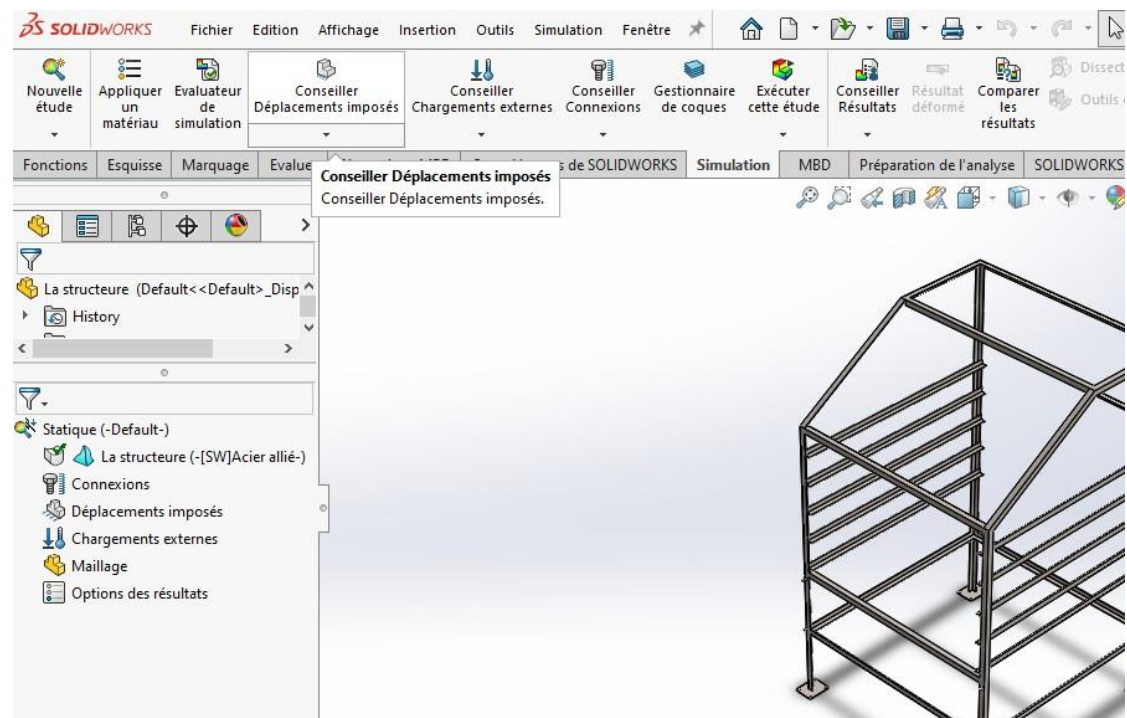


Figure IV.5 Etape 2

Déplacements imposés, nous installons la face inférieure des quatre pieds de la structure (figure IV.6)

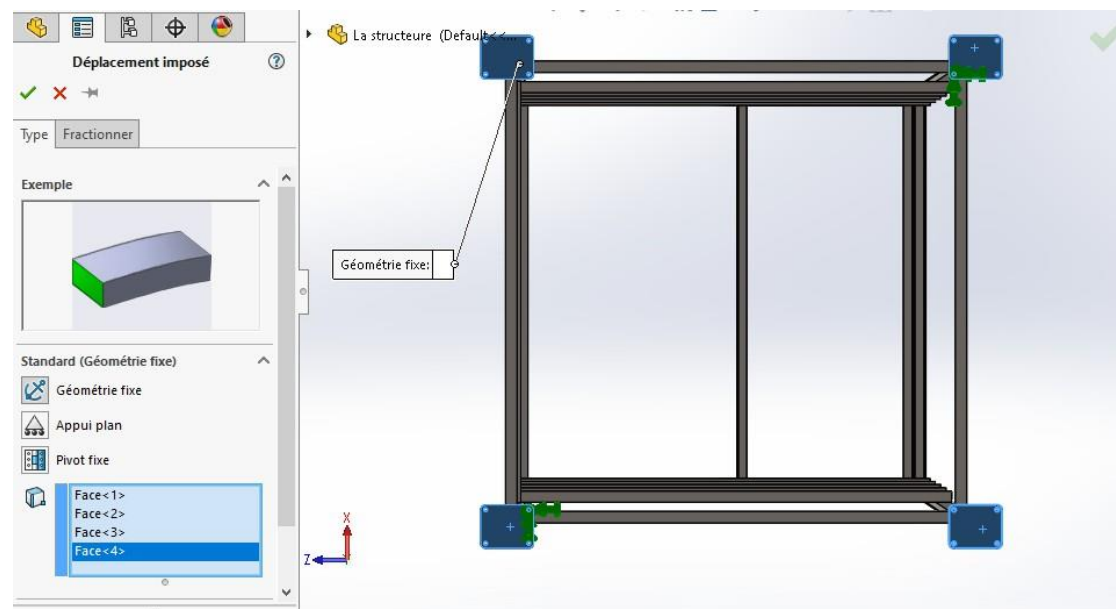


Figure IV.6 Etape 3

- Charges externes : Nous déterminons les charges externes qui sont l'autogravité de la structure, représentée par la constante d'accélération gravitationnelle G, et le poids exercé par les plateaux sur les étagères, représenté par une force F dirigée vers le bas.

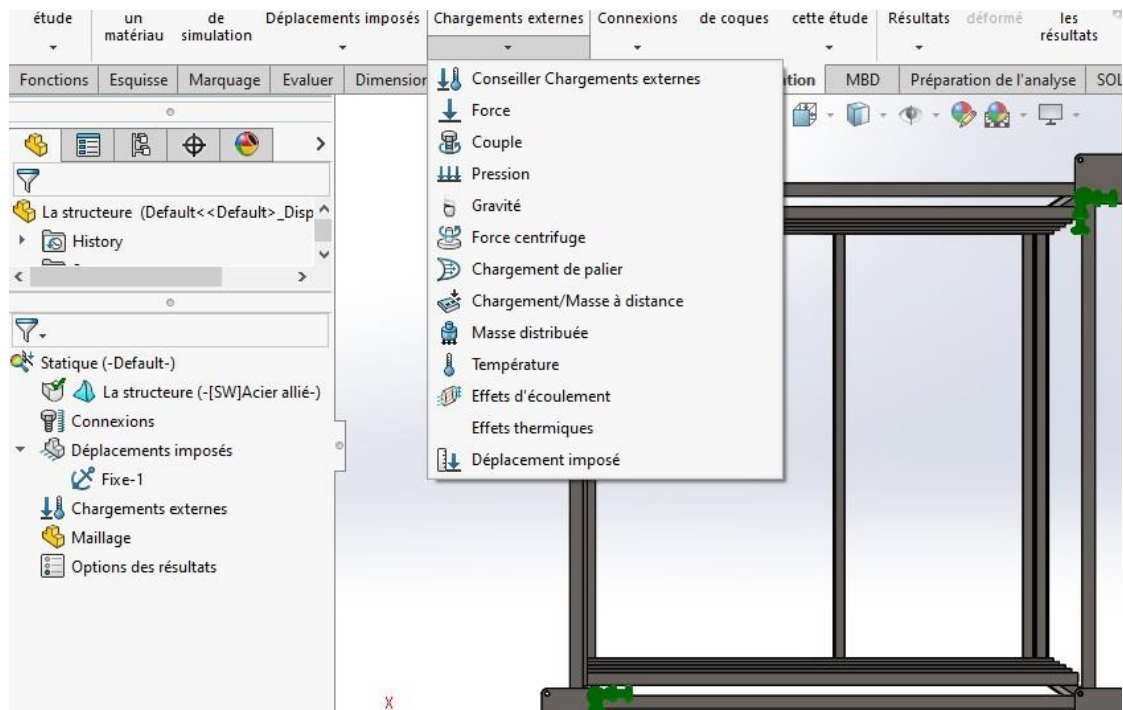


Figure IV.7 Les chargement extérieur

- Calculer la valeur de la Force F :

Les plateaux les plus éloignés mesurent 1×1 mètre, leur poids à vide est donc d'environ 2 kg, et chaque plateau de cette zone peut contenir environ 4 kg de produits humides, ce qui fait que le poids total de chaque plateau est d'environ 6 kg.

Avec une simple équation (équation III.1), nous trouvons que la force exercée sur chaque étagère est de 58.86 N, mais nous avons pris une valeur de 100 N pour des raisons de sécurité.

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (\text{IV.1})$$

$$6 \times 9.81 = 58.86 \text{ N}$$

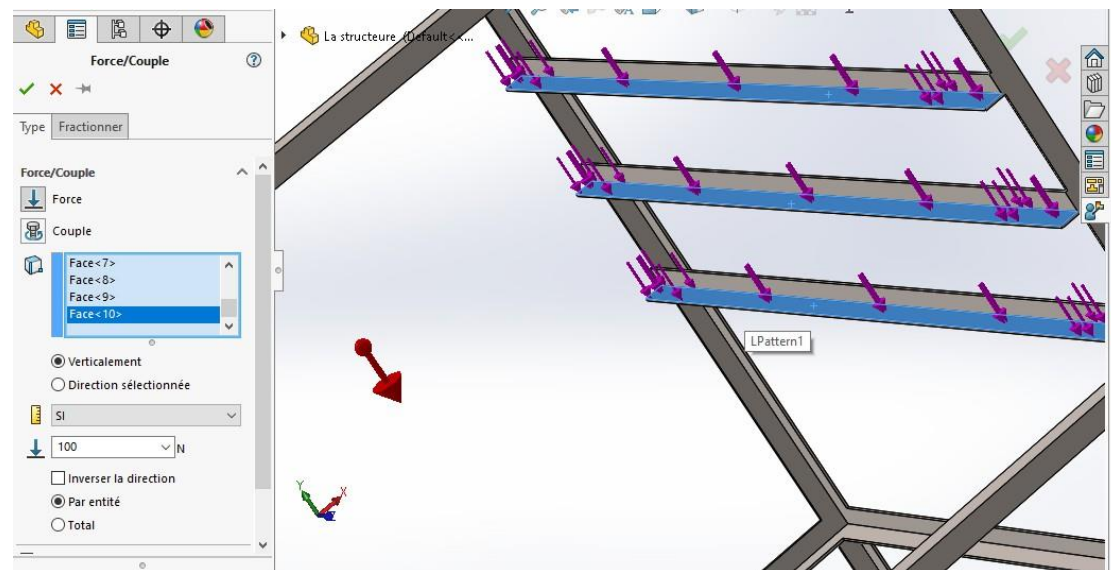


Figure IV.8 Les force impliqué

IV.4.4 Analyse des résultats :

Les figures IV.9 et IV.10 montrent les résultats de la simulation sur cette structure avec une échelle de déformations de 1:1.

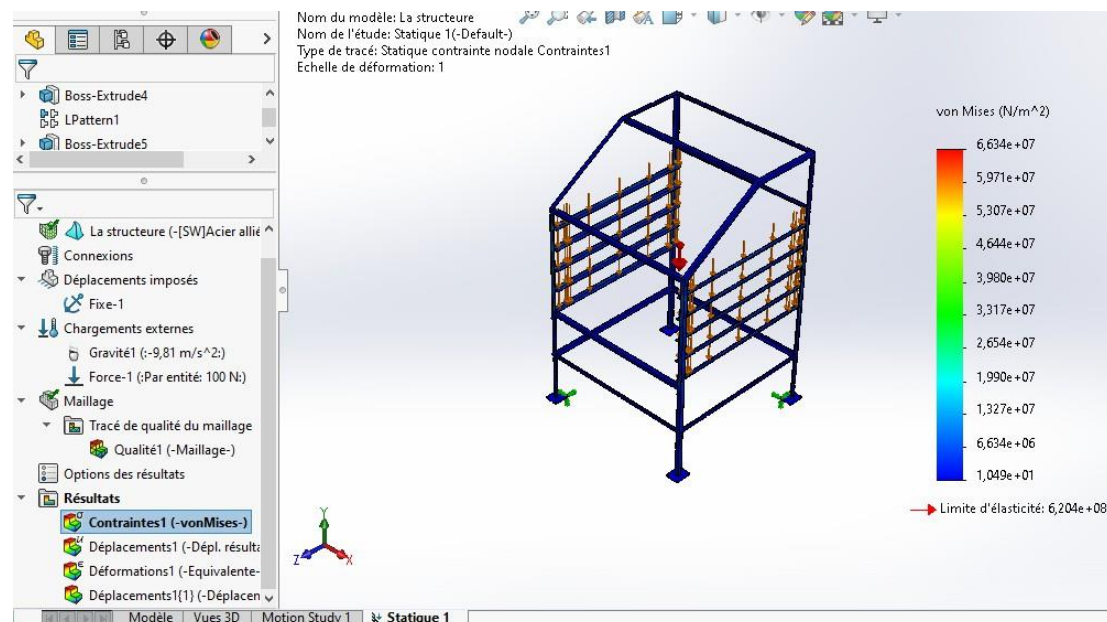


Figure IV.9 La résultat (Les contraintes)

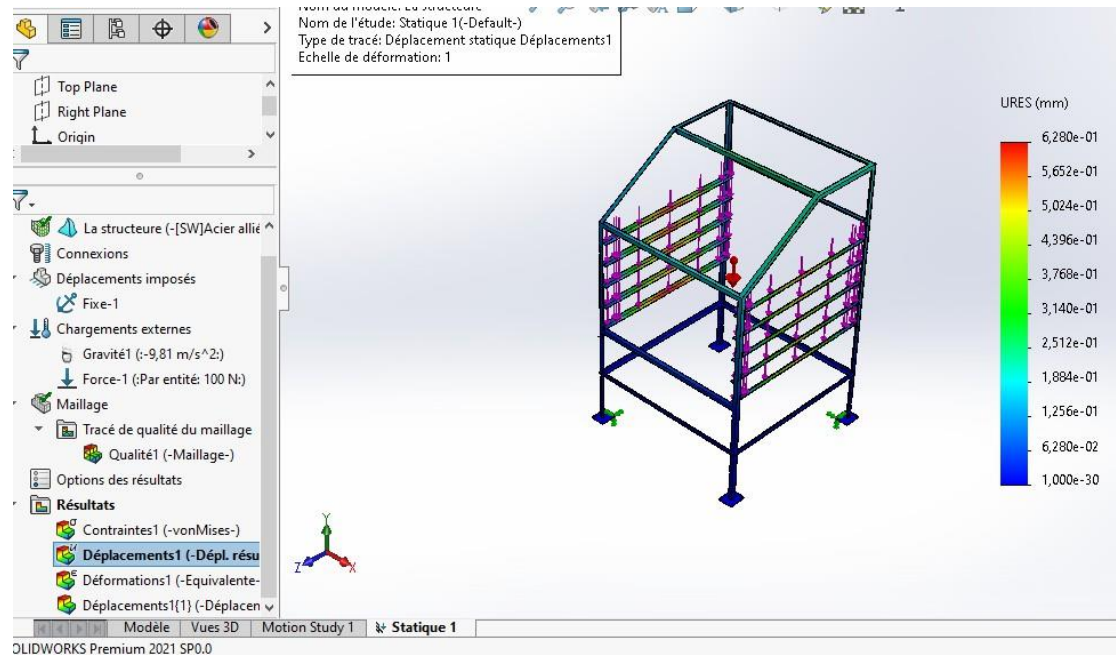


Figure IV.10 Les résultat des déplacements

:

- Contraintes :

Nous constatons que la plus grande valeur des contraintes est égale à $(6.634 \times 10^7 \text{ N/m}^2)$, ce qui est inférieur à la contrainte maximale de l'alliage d'acier, qui est égale à $(1.094 \times 10^8 \text{ N/m}^2)$, ce qui signifie que la structure fonctionne dans le domaine élastique et qu'il n'y a pas de risque de rupture.

- Déplacements :

A travers la figure IV.10, qui montre le déplacement de la structure pendant le fonctionnement, on constate que la valeur maximale du déplacement est $(6.280 \times 10^{-1} \text{ mm})$ et qu'elle a été enregistrée au centre des étagères, cette valeur est beaucoup plus petite par rapport aux dimensions du séchoir, ce qui réaffirme la durabilité de la conception et le bon choix des matériaux utilisés.

- Calcul du coefficient de sécurité

$$FS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{VM \max}} \quad (\text{III.2})$$

Avec : FS : coefficient de sécurité

σ_y : Limite d'élasticité

σ_{VMmax} : Contrainte de von Mises maximal

$$A.N : FS = \frac{6.204 \times 10^8 \text{ N/m}^2}{6.634 \times 10^7 \text{ N/m}^2} \approx 9.35$$

Selon l'équation 1, nous constatons que le facteur de sécurité est très élevé, ce qui se reflète positivement sur le facteur de sécurité et souligne la durabilité de la conception.

IV.5 Conclusion :

Grâce à la simulation, nous avons constaté que le séchoir fonctionne efficacement aux températures prévues et montré que la conception pratique contribue de manière significative à la distribution de la chaleur dans l'ensemble de la chambre de séchage et qu'elle est capable de résister à différentes conditions de fonctionnement avec un niveau de sécurité élevé.

Conclusion Générale :

L'étude bibliographique et conceptuelle a révélé que le séchage solaire est un domaine de recherche vaste et approfondi, tant sur le plan théorique qu'expérimental. Le séchage solaire demeure l'une des méthodes les plus répandues dans le monde, avec des systèmes directs et indirects .

Dans ce travail, nous avons détaillé les étapes de conception d'un séchoir solaire, incluant le choix des matériaux et le dimensionnement, tout en mettant en lumière les avantages du séchage hybride électro-solaire, qui combine l'énergie solaire et des sources électriques pour optimiser l'efficacité et réduire la dépendance aux conditions climatiques .

Cette étude nous a permis de mieux comprendre les différentes techniques de séchage solaire et hybride, ainsi que les points critiques à surveiller pour éviter toute contamination. Enfin, nous espérons que ce modeste travail sera utile aux nouveaux chercheurs et à toute personne s'intéressant au domaine du séchage en général, et particulièrement au séchage hybride électro-solaire .

Les sources

-[1] Bourdoux Safety Microbial Ensure to Technologies Drying of Performance .,M ,Uyttendaele .,A ,Rajkovic .,D ,Li .,Safety 2016. .,Safety Food and Science Food in Reviews Comprehensive .Vegetables and Fruits Dried 2016

-[2] 2001. .,GATE-GTZ .Preservation Food for Technology Drying Solar .D ,Schwarz .M ,Green

-[3] A. Madhlope, S.A. Jones, and J.D. Kalenga Saka, 2001. A solar air heater with composite absorber systems for food dehydration. Renewable Energy, 27, 27-3

-[4] Dudez et al., 1996

Hughes, B. R., Oates, M., 2011, Performance investigation of a passive solar-assisted kiln in the United Kingdom, Solar Energy, 85, pp. 1488-1498.

-[6] Getahun, E.; Delele, M. A.; Gabbiye, N.; Fanta, S. W.; Demissie, P.; Vanierschot, M. Importance of integrated CFD and product quality modeling of solar dryers for fruits and vegetables: A review. Sol. Energy 2021, 220, 88–110.

-[7] Mujumdar, A. S. (2014). Handbook of Industrial Drying (3rd ed.) . CRC Press

-[8] Prakash, O., & Kumar, A. (2017). Solar Drying Systems: Fundamentals and Applications. Springer.

-[9] US 9,200,000 B2: "Hybrid Solar-Electric Dryer with Thermal Storage

-[10] Kreith, F. & Goswami, D.Y. (2016). Principles of Solar Engineering (3rd ed.). CRC Press.

-[11] Belessiotis, V. & Delyannis, E. (2011). "Solar Drying". Solar Energy, 85(8), 1665-1691

-[12] Modélisation CAO et Stratégies d'usinage pour la réalisation des à géométrie compliquée (Surfaces Libres), thèse de doctorat en science, ameddah hacène, université HADJ LAKHDAR BATNA, 2013.

-[13] HANDBOOK OF CARBON, GRAPHITE, DIAMOND AND FULLERENES, Properties, Processing and Applications, Hugho Pierson.