# CONCEPTION D'UN PROTOTYPE DE SÉCHOIR SOLAIRE INDIRECT POUR LE SÉCHAGE DES PRODUITS MARAÎCHERS

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGÉNIEUR 2IE AVEC GRADE DE **MASTER**

**SPÉCIALITÉ : GÉNIE ÉLECTRIQUE ET ÉNERGÉTIQUE**

---

Présenté et soutenu publiquement le 26 Janvier 2021 par

**Safiatou SOULEY HASSANE (20150132)**

**Encadrant 2iE : Dr.-Ing. habil. N'TSOUKPOE Kokouvi Edem (HDR),**
**Maître de Conférences (CAMES), Institut 2iE**
**Maître de stage : M. SOUMANA Boubacar, ingénieur à l'ANERSOL**

**Encadrant externe : Pr MADOUGOU Saidou, Directeur de l'Ecole Normale Supérieure,**
**Université Abdou Moumouni de Niamey**

Structure d'accueil du stage : Agence Nationale de l'Énergie Solaire (ANERSOL)

Jury d'évaluation du mémoire :

Président : Dr Daniel YAMEGUEU

Membres et correcteurs : Dr.-Ing. Sayon Dit Sadio SIDIBE

Dr.-Ing. habil. Kokouvi Edem N'TSOUKPOE

Promotion [2020/2021]

# DEDICACES

Ce modeste travail est dédié à :

Ma courageuse et forte mère, Aminata AMADOU;

Mon bien aimé père, Souley HASSANE;

Mes petits frères, S.H Samira, S.H Khaled, S.H Ahmed, S.H Aichatou et S.H Adoul Majid ;

Mes grand-mères, Hadjara SIDDO, Salamatou SIDDO et Maimouna SIDDO (ma copine).

# CITATIONS

« Toutes les tempêtes ne viennent pas gâcher votre vie, certaines viennent nettoyer votre chemin »

Lume, Accueillante scolaire, Belgique, Gembloux, 1951

# REMERCIEMENTS

C'est le lieu de manifester ma gratitude à :

- Allah, le Tout miséricordieux, le Très miséricordieux, le Guide par essence et par excellence, par la grâce de qui ce travail a été accompli.

- L'ensemble du corps professoral de la fondation 2ie et plus particulièrement celui du Département Génie Energétique et Electrique pour la qualité de l'enseignement qu'il m'a prodiguée au cours de ces cinq années de formation.

- La Directrice Générale de l'Anersol Dr. PABYAM SIDO Mariam pour le cadre de stage octroyé, ses conseils et recommandations.

- Dr. N'TSOUKPOE Kokouvi Edem, je le remercie infiniment pour son encadrement, sa patience, sa disponibilité et sa compréhension. Ses remarques et recommandations ont fortement contribué à l'amélioration de la qualité de ce manuscrit.

- Mon Maitre de Stage, M. SOUMANA Boubacar, qui m'a laissé une large part d'autonomie dans ce travail tout en m'aiguillant sur des pistes de réflexions riches et porteuses. Je lui adresse mes sincères remerciements pour la qualité de son encadrement, le temps qu'il y a accordé et surtout pour l'amabilité dont il a fait preuve à mon égard.

- Prof. MADOUGOU Saidou, je le remercie énormément pour l'intérêt qu'il a porté à ce modeste travail de par ses commentaires judicieux et ses conseils avisés.

- La coopération Suisse DDC, pour l'aide financière accordée tout au long de mon parcours universitaire au 2ie.

- Tous ceux qui ont contribué de près et de loin à l'élaboration de ce travail.

# RÉSUMÉ

Tout comme dans beaucoup de pays sahéliens, au Niger le maraîchage occupe une place appréciable dans les productions vivrières. Il est principalement pratiqué entre Novembre et février, à la saison froide. Sa production procure des revenus non négligeables aux pratiquants et aux acteurs du domaine. La tomate est le troisième produit maraîcher au Niger après l'oignon et le poivron. Pendant la saison froide, la production en tomate du Niger permet de satisfaire la demande nationale et l'exportation du légume dans la sous-région. Cependant, la tomate étant un produit très périssable, une importante partie de la production est perdue faute de techniques de conservation efficaces. La technique de conservation la plus utilisée demeure le séchage traditionnel qui se fait dans des conditions non hygiéniques par exposition directe au soleil. Cette technique a pour conséquence une dépréciation de la tomate séchée qui en perd sa couleur naturelle et ses valeurs nutritives. Le séchage solaire indirect apparaît donc comme une solution idoine à cette technique rudimentaire. Malgré les multiples séchoirs solaires indirects développés au Niger, il n'existe pas à ce jour, un adapté au séchage de ce produit à forte teneur en eau.

Cette étude propose donc un séchoir solaire indirect à convection forcée de faible encombrement dont la conception est regardante des caractéristiques de la tomate et des conditions climatiques de la période propice au séchage du produit au Niger. Le séchoir est muni d'un capteur à air à vitre de 2,5 $m^2$ avec un absorbeur de forme ondulée d'une surface effective de 5 $m^2$. La cabine de séchage dispose de huit claies, leur surface totale est estimée à 7 $m^2$ pour 20 kg de produits frais. Chacun des éléments du séchoir est modélisé mécaniquement en 3D à la suite d'un choix méticuleux de leurs matériaux. Le séchoir a fait l'objet d'une modélisation numérique CFD afin de trouver une configuration de la cabine qui permet une distribution uniforme de la température et de l'écoulement d'air au sein de cette dernière. Un devis tenant compte des prix des matériaux de construction sur le marché local et de la main-d'œuvre estime le coût de fabrication du séchoir conçu à 621 775 FCFA toutes taxes comprises.

**Mots Clés :**

**1 - Conception**

**2 – Modélisation mécanique**

**3 – Modélisation numérique (CFD)**

**4 – Séchoir solaire**

**5 - Tomate**

# ABSTRACT

As in many Sahelian countries, market gardening plays an important role in food production in Niger. It is mainly practiced between November and February, during the cold season. Its production provides significant income to those who practice and work in the field. Tomatoes are the third most important market garden product in Niger after onions and peppers. During the cold season, Niger's tomato production satisfies national demand and exports of the vegetable in the subregion. However, since tomatoes are highly perishable products, a large part of the production is lost due to the lack of efficient conservation techniques. The most commonly used preservation technique is traditional drying, which is done in unhygienic conditions by direct exposure to the sun. This technique results in a depreciation of the dried tomato which loses its natural color and nutritional values. Indirect solar drying is therefore an ideal solution to this rudimentary technique. In spite of the multiple indirect solar dryers developed in Niger, there is not yet one suitable for drying this product with a high water content.

This study therefore proposes an indirect solar dryer with forced convection of small footprint whose design is looking at the characteristics of the tomato and the climatic conditions of the period conducive to the drying of the product in Niger. The dryer is equipped with a glass air collector of 2,5 $m^2$ with a corrugated absorber with an effective surface of 5 $m^2$. The drying cabin has eight racks, their total surface is estimated at 7 $m^2$ for 20 kg of fresh products. Each of the elements of the dryer is mechanically 3D modeled following a meticulous choice of their materials. The dryer was subjected to CFD numerical modeling in order to find a cabin configuration that would allow for a uniform distribution of temperature and airflow within the cabin. An estimate taking into account local market prices for building materials and labor estimates the manufacturing cost of the designed dryer at 621,775 FCFA including all taxes.

**Key words:**

**1 - Design**

**2 - Mechanical modeling**

**3 - Numerical modeling (CFD)**

**4 – Solar dryer**

**5 – Tomato**

# TABLES DES MATIÈRES

DEDICACES ..... i
CITATIONS ..... ii
REMERCIEMENTS ..... iii
RÉSUMÉ ..... iv
ABSTRACT ..... v
LISTE DES FIGURES ..... viii
LISTES DES TABLEAUX ..... ix
SIGLES ET ABRÉVIATONS ..... x
NOMENCLATURE ..... xi
Introduction ..... 1
I. Présentation de l'étude et de la structure d'accueil ..... 2
I.1 Contexte de l'étude ..... 2
I.2 Objectif de l'étude ..... 2
I.3 Présentation de la structure d'accueil ..... 3
I.3.1 Historique et Missions ..... 3
I.3.2 Organisation ..... 4
II. Étude bibliographique ..... 4
II.1 Généralités sur la tomate au Niger ..... 4
II.1.1 Production de la tomate au Niger ..... 4
II.1.2 Transformation et conservation de la tomate au Niger ..... 5
II.2 Principe du séchage et les types de séchoirs solaires ..... 8
II.2.1 Principe du séchage ..... 8
II.2.2 Les types de Séchoirs solaires ..... 8
II.3 Les prototypes développés à l'ANERSOL ..... 9
II.4 Etat de l'Art sur les séchoirs indirects dans la littérature ..... 10
II.4.1 Amélioration des performances du capteur ..... 10
II.4.2 Utilisation d'un déshumidificateur ..... 14
II.4.3 Utilisation du stockage thermique ..... 14
Conclusion partielle ..... 15
III. Dimensionnement du prototype ..... 15
III.1 Quelques notions pour la compréhension de la méthode du dimensionnement ..... 15
III.1.1 Activité de l'eau ..... 15

III.1.2 La cinétique de séchage ..... 16
III.1.3 Les courbes de sorption-désorption ..... 17
III.2 Méthodologie du dimensionnement ..... 18
III.3 Spécifications et hypothèses du dimensionnement ..... 22
III.4 Résultats du dimensionnement ..... 24
IV. Modélisation mécanique en 3D du séchoir ..... 24
IV.1 Méthodologie ..... 24
IV.1.1 Choix des matériaux du séchoir ..... 25
IV.1.2 Choix de la configuration du capteur ..... 27
IV.1.3 Orientation et inclinaison du séchoir ..... 28
IV.2 Résultats ..... 29
IV.2.1 La cabine de séchage ..... 29
IV.2.2 Le capteur solaire ..... 31
IV.2.3 Les supports du séchoir ..... 32
IV.2.4 Les accessoires annexes du séchoir solaire ..... 33
IV.2.4.1 Les Ventilateurs ..... 33
IV.2.4.2 Le module photovoltaïque ..... 34
V. Modélisation numérique (CFD) du prototype ..... 35
V.1 Présentation de la CFD et du logiciel de travail ..... 35
V.1.1 Définition au CFD ..... 35
V.1.2 Applications du CFD ..... 36
V.1.3 ANSYS Fluent ..... 36
V.2 Méthodologie de la modélisation dans ANSYS Fluent ..... 38
V.2.1 Création de la géométrie du domaine d'étude ..... 38
V.2.2 Maillage du domaine d'étude ..... 39
V.2.3 Configurations pour les calculs ..... 40
V.3 Résultats et discussions ..... 43
VI. Devis estimatif du coût de fabrication du séchoir ..... 49
Conclusion et perspectives ..... 51
Bibliographie ..... i
Liste des annexes ..... iv

# LISTE DES FIGURES

Figure 1: Organigramme de l'ANERSOL (Ressources Humaines) ..... 4
Figure 2:Les types de séchoirs solaires [7] ..... 9
Figure 3: Capteur Solaire à air avec chicanes[10] ..... 11
Figure 4: Vue de face du capteur du séchoir à capteur ondulé [11] ..... 12
Figure 5: Schéma du séchoir avec absorbeur ondulé [12] ..... 13
Figure 6: Vue de coupe du capteur à double passe[13] ..... 13
Figure 7: Vitesse de séchage en fonction du temps [18] ..... 16
Figure 8: Isotherme d'adsorption et de désorption [18] ..... 17
Figure 9:Diagramme de l'air humide ..... 20
Figure 10: Rayonnement sur le plan du capteur en fonction de l'inclinaison ..... 29
Figure 11 : Dimensions de la cabine de séchage ..... 30
Figure 12: Dimensions des claies ..... 30
Figure 13: Dimensions cheminée, diffuseur d'air et orifice d'emboitage du capteur ..... 31
Figure 14: Cotation du capteur à air ..... 32
Figure 15: Cotation des supports du séchoir ..... 32
Figure 16: Ventilateur pour le diffuseur d'air ..... 33
Figure 17: Prototype modélisé vue de coté ..... 35
Figure 18: Vue schématique de l'analyse dans le logiciel ..... 37
Figure 19: Géométries des deux configurations de la cabine de séchage ..... 39
Figure 20: Géométries maillées des deux configurations ..... 39
Figure 21:Conditions aux limites du domaine d'étude ..... 42
Figure 22: Température du volume d'air de la cabine de séchage pour les deux configurations ..... 44
Figure 23: Distribution de la température sur un plan vertical de la cabine de séchage ..... 44
Figure 24:Distrubution de la température sur les plans des claies ..... 45
Figure 25: Vitesses dans le volume de la cabine ..... 46
Figure 26:Distrubution de la température sur un plan vertical de la cabine de séchage ..... 46
Figure 27: Distribution de la vitesse sur les plans des claies ..... 47
Figure 28: Tourbillons d'air dans la cabine selon la configuration ..... 47
Figure 29: Vitesses des tourbillons dans la cabine ..... 48
Figure 30:Températures des tourbillons dans la cabine ..... 48
Figure 31: Vue d'ensemble du séchoir remodelisé ..... 49
Figure 32: Le Séchoir tour [8] ..... v
Figure 33: Le séchoir aluminium [8] ..... vi
Figure 34: Les séchoir C [8] ..... vii
Figure 35: Le séchoir D [8] ..... vii
Figure 36: Le séchoir sahel 50 [8] ..... viii
Figure 37: Séchoir Icaro 2000 ..... ix
Figure 38: Séchoir Icaro 2007 ..... x
Figure 39: Séchoir coquillage [34] ..... xi
Figure 40:Isothermes de désorption de la tomate [35] ..... xii
Figure 41: Données climatiques de la ville de Niamey (source RESTcreen) ..... xiii
Figure 42: Diagramme de l'air humide ..... xv
*Figure 43: Diagramme solaire [37]* ..... *xix*

# LISTES DES TABLEAUX

*Tableau 1 : Récapitulatif des hypothèses et spécifications pour le dimensionnement* ..... *23*
*Tableau 2 : Résultats du dimensionnement* ..... *24*
*Tableau 3 : Propriétés thermo-physiques de quelques matériaux[17]* ..... *26*
*Tableau 4 : Caractéristiques des ventilateurs pour l'aération* ..... *33*
*Tableau 5 : Caractéristiques des maillages des deux configurations* ..... *40*
*Tableau 6: Propriétés des matériaux utilisés dans la modélisation CFD* ..... *41*
*Tableau 7: Les conditions aux limites de la cabine pour toutes les deux configurations* ..... *43*
*Tableau 8 : Devis estimatif du coût de fabrication du séchoir solaire* ..... *50*
*Tableau 9: Ensoleillement solaire à Niamey sur le plan Horizontal en* $Wh{\cdot}m^{-2}{\cdot}jour^{-1}$ *(Source ANERSOL)* ..... *xiii*
*Tableau 10: Sélectivité des matériaux [36]* ..... *xvii*
*Tableau 11:Propriétés des différentes couvertures transparentes [17]* ..... *xviii*

# SIGLES ET ABRÉVIATONS

**ONERSOL** : Office National de l'Energie Solaire

**CNES** : Centre National de l'Energie Solaire

**ANERSOL** : Agence Nationale de l'Energie Solaire

**CRDI** : Centre de Recherches pour le Développement International

**CFD** : Computation Fluid Dynamics

**CAO** : Conception Assisté par Ordinateur

# NOMENCLATURE

## Général

| | | |
|---|---|---|
| $a_W$ | Activité de l'eau du produit | - |
| $P_{vp}$ | pression de la vapeur d'eau à la surface du produit à la température θ | Pa |
| $P_{sat}$ | Pression de saturation de la vapeur d'eau à la température θ | Pa |
| $H_e$ | Humidité relative d'équilibre | % |
| $M_{eq}$ | Teneur en eau du produit | $kg_{eau}/kg_{produit}$ |
| $M_i$ | Teneur en eau initiale du produit frais | % |
| $M_f$ | Teneur en eau finale du produit séché | % |
| $m_e$ | Masse d'eau à extraire du produit | kg |
| $m_p$ | Masse du produit frais à sécher | kg |
| $V_m$ | Vitesse moyenne du séchage | kg/h |
| $t_s$ | Durée du séchage pour le produit considéré | heure |
| $e_{air}$ | Pouvoir évaporatoire de l'air de séchage | $kg/m^3$ |
| $x_1$ | Humidité absolue de l'air à la température de sortie du capteur solaire | kg/kgas |
| $x_{sat}$ | Humidité absolue maximale (de saturation) de l'air à la température de sortie du capteur solaire | kg/kgas |
| $H_m$ | Humidité relative de l'air à la sortie du séchoir, en moyenne sur la durée totale du séchage | % |
| $H_s$ | Humidité relative de l'air à la sortie du séchoir, à la fin du séchage | % |
| $x_m$ | Humidité absolue de l'air en sortie de séchoir en moyenne sur la durée du séchage | g/kgas |
| $q_{eau}$ | Quantité d'eau enlevée en moyenne pendant le séchage | $g/m^3$ |
| $\dot{V}$ | Débit d'air nécessaire pour le séchage | $m^3/h$ |
| $C_{pair}$ | Chaleur massique de l'air (en J/kg/°C) | $J \cdot kg^{-1} \cdot °C^{-1}$ |
| $T_1$ | Température de l'air à l'entrée du capteur (température ambiante) | °C |
| $T_2$ | Température de séchage (à l'arrivée sur le produit) | °C |

| | | |
|---|---|---|
| $S$ | Surface de l'absorbeur du capteur | $m^2$ |
| $P_u$ | Puissance nécessaire pour le séchage | kW |
| $I_G$ | Irradiance globale sur le plan du capteur | $W \cdot m^{-2}$ |
| $P_c$ | Puissance crête minimale du générateur PV | kWc |
| $P_n$ | Puissance nominale d'un ventilateur | kW |
| $t$ | Nombre d'heures d'utilisation des ventilateurs par jour | h |
| $n$ | Nombre de ventilateurs | - |
| $G$ | Ensoleillement global moyen journalier du mois le moins ensoleillé dans le plan du module | $kWh \cdot m^{-2} \cdot j^{-1}$ |
| $\eta_{gen}$ | Rendement du générateur PV | % |
| $U_{bat}$ | Tension nominale de la batterie d'accumulateurs | V |
| $\eta_{bat}$ | Rendement d'une batterie d'accumulateurs | % |
| $DM$ | Décharge profonde de l'accumulateur | % |
| $N_{Jaut}$ | Nombre de jour d'autonomie | |
| $h_0$ | Coefficient de convection | $W \cdot m^2 \cdot K$ |
| $V_0$ | Vitesse de l'air autour des parois de la cabine | m/s |
| T | Température | °C |
| Ta | Température ambiante | °C |
| P | Pression | Pa |
| N | Nombre de tours de la roue du ventilateur par unité de temps | tour/min |
| R | Rayon de la roue du ventilateur | m |
| V | Vitesse périphérique de la roue | m/s |

**Lettres grecques**

| | | |
|---|---|---|
| $\rho_{air}$ | Masse volumique de l'air | $kg/m^3$ |
| $\eta_s$ | Coefficient correcteur de l'échange produit- air asséchant | % |
| $\eta_c$ | Rendement du capteur | % |

| | | |
|---|---|---|
| $\lambda$ | Conductivité thermique | $W \cdot m^{-1} \cdot K$ |
| $\alpha$ | Coefficient d'absorption | |
| $\varepsilon$ | Coefficient d'émissivité | |
| $\beta$ | Inclinaison du capteur par rapport au plan horizontale | % |
| $\Omega$ | : Vitesse angulaire du ventilateur | Rad/s |

# Introduction

L'énergie solaire est reconnue comme l'une des sources d'énergie renouvelable les plus prometteuses. Avec d'autres formes de sources d'énergie renouvelable, à savoir la biomasse, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, les piles à combustible et l'énergie des océans, elle présente un grand potentiel pour une grande variété d'applications en raison de son abondance et de son accessibilité [1]. Une de ces multiples applications est le séchage solaire.

Moyen de conservation de certains produits agricoles périssables, soit à l'issue d'une surproduction agricole, soit pour des convenances d'une société, le séchage a toujours été le moyen approprié pour répondre à diverses sollicitations. L'avènement de l'électricité qui a ouvert toutes les options de préservation contre la périssabilité des produits agricoles, notamment à travers le froid, n'a jamais pu fermer la voie du séchage comme un autre moyen de conservation des produits et des habitudes de consommation.

Le séchage naturel a longtemps été utilisé à travers les siècles dans les différentes sociétés du monde. L'avènement du progrès à travers la prise en compte de l'hygiène et la rapidité de répondre à une sollicitation de besoins de produits séchés ont conduit au développement des séchoirs électriques et à gaz. Les industriels qui, constatant le coût élevé de l'électricité et des énergies fossiles, ont de nos jours recours aux renouvelables dont le solaire, à travers l'utilisation des séchoirs solaires.

En Afrique, le recours à cette énergie à travers la vulgarisation de dispositifs appropriés ne s'est révélé que tardivement et a permis le développement des services en aval des productions maraîchères et agricoles notamment par la professionnalisation de la filière séchage.

Au Niger malgré la vulgarisation de quelques séchoirs solaires un peu partout dans le pays, le séchage traditionnel demeure prédominant dans les techniques de conservation des aliments surtout en zone rurale. Dans l'optique de promouvoir l'hygiène alimentaire et les énergies renouvelables, ce document porte sur la conception d'un nouveau prototype de séchoir solaire adapter pour une gamme de produits alimentaires dont les produits maraîchers. Le document est structuré en six parties dont:

- Une première partie introduit l'étude et la structure d'accueil;
- Une seconde présente une synthèse bibliographique sur la tomate au Niger, le séchage en général et les séchoirs solaires;
- Une troisième est consacrée au dimensionnement du séchoir solaire;
- Une quatrième porte sur la modélisation mécanique du séchoir solaire;
- Une cinquième destinée à la modélisation numérique (CFD) du prototype modélisé;
- Et dans la dernière partie un devis estimatif du coût de fabrication du séchoir est établi.

# I. Présentation de l'étude et de la structure d'accueil

## I.1 Contexte de l'étude

Le Niger pays sahélien, à fort ensoleillement 6 $kWh \cdot m^{-2} \cdot j^{-1}$ [2], est caractérisé par trois saisons : une saison sèche, une saison chaude et une saison pluvieuse. Depuis l'avènement des grandes sécheresses de 1973 et 1983, les cultures maraîchères au Niger ont connu un développement spectaculaire. Elles constituent actuellement les cultures les importantes dans le secteur des cultures irriguées. La production maraîchère totale est estimée à environ 992 000 tonnes en 2012 [3].

Au Niger, tout comme dans la plupart des pays de la sous-région, les marchés locaux sont inondés de fruits et légumes en période de production. Cette situation occasionne des pertes considérables pour les producteurs, selon les statistiques de la production agricole en 2014 [4], environ 19,48 % de la production légumière est perdue. Ces pertes représentent la part de la production qui n'a pas pu être commercialisée ou valorisée faute de techniques de transformation et de conservation efficaces.

La tomate représente le troisième produit maraîcher au Niger en termes de quantité produite après l'oignon et le poivron. Sa production est estimée à 229 585 tonnes selon les statistiques de la production agricole en 2014 [4]. Ce légume représente également le produit maraîcher le plus difficile à conserver à cause de sa périssabilité due à sa forte teneur en eau (95 %). Elle ne peut se conserver plus de trois jours dans un environnement non contrôlé. Les producteurs ont alors recours au séchage traditionnel comme moyens de conservation quand la production n'arrive pas être écoulée. De même certains groupements de femmes et particuliers s'adonnent à cette activité de séchage de la tomate pour un approvisionnement des marchés après la période de récolte. Cependant, la tomate séchée n'est pas très appréciée par les consommateurs surtout ceux urbains qui ont recours aux boites de conserves de tomate concentrée importées durant les périodes de flambée des prix du produit frais sur les marchés locaux. En effet, la tomate séchée à l'air libre, par exposition directe au soleil, perd sa couleur et ses valeurs nutritives dues aux rayons solaires. Cette perte de coloration du produit est l'un des éléments de la dépréciation de sa valeur monétaire sur les marchés locaux. Le séchage solaire indirect conservant la coloration de l'état frais du produit apparaît aujourd'hui, comme l'une des technologies appropriées pour rendre attrayante la tomate séchée aux consommateurs.

## I.2 Objectif de l'étude

Notre étude a pour but de mettre à la disposition des maraîchers et des groupements de femmes transformatrices ce type de technologie solaire pour valoriser la tomate séchée au Niger. Dans cette perspective, cette étude a pour objectif de concevoir un prototype de séchoir solaire indirect de faible

encombrement muni d'un capteur à vitrage qui optimise la durée du séchage et la qualité de la tomate séchée. Spécifiquement, il s'agira de :

- dimensionner le séchoir pour une quantité déterminée du produit frais ;
- choisir les matériaux des différents éléments du séchoir ;
- faire une modélisation mécanique du séchoir solaire et choisir ses éléments annexe;
- faire une modélisation numérique (CFD) du prototype de séchoir solaire;
- et enfin dresser un devis estimatif du coût de fabrication du séchoir.

## I.3 Présentation de la structure d'accueil

### I.3.1 Historique et Missions

De son ancienne dénomination, ONERSOL, l'actuelle ANERSOL fut créée en 1965. Elle était rattachée au ministère des travaux publics de l'époque avec le statut d'un établissement public à caractère administratif. Elle avait pour mission d'effectuer des mesures de l'énergie solaire, des études des prototypes existants et de ceux à fabriquer ainsi que des recherches appliquées. Suite à une restructuration survenue en 1975, elle prend le statut d'établissement à caractère industriel et commercial placé sous la tutelle du ministère en charge de l'enseignement supérieur et de la recherche permettant ainsi l'industrialisation de sa production. Conformément à ce nouveau statut industriel, deux sections voient le jour au sein de l'établissement. Il s'agit de :

- la section recherche chargée de promouvoir la recherche en matière d'énergies renouvelables ;
- la section fabrication et commercialisation dont la mission était de produire et de commercialiser des produits mis au point par la section recherche.

Suite à la faillite de la section fabrication et commercialisation en 1982, une nouvelle réforme de la structure fut engagée mais ne sera jamais effective faute d'adoption des textes préparés par les autorités compétentes, laissant l'institution dans une conjoncture économique assez défavorable. En 1999, l'ONERSOL fait place au Centre National de l'Energie Solaire (CNES) puis récemment en 2017 à l'Agence Nationale de l'Energie Solaire (ANERSOL). Elle reprend son ancien statut d'établissement public à caractère administratif dont la tutelle est cédée au ministère de l'énergie. Les nouveaux textes adoptés en novembre 2018, confèrent à la nouvelle structure les missions ci-après :

- mener des travaux de recherche sur l'utilisation des énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire et d'assurer la vulgarisation des résultats ;
- participer à la réalisation d'études prospectives et diagnostiques en matière d'utilisation des

énergies renouvelables pour tous les secteurs de l'économie nationale ;

- participer à la formation en énergies renouvelables ;
- etc.

### I.3.2 Organisation

L'actuelle ANERSOL est organisée selon l'organigramme ci-contre :

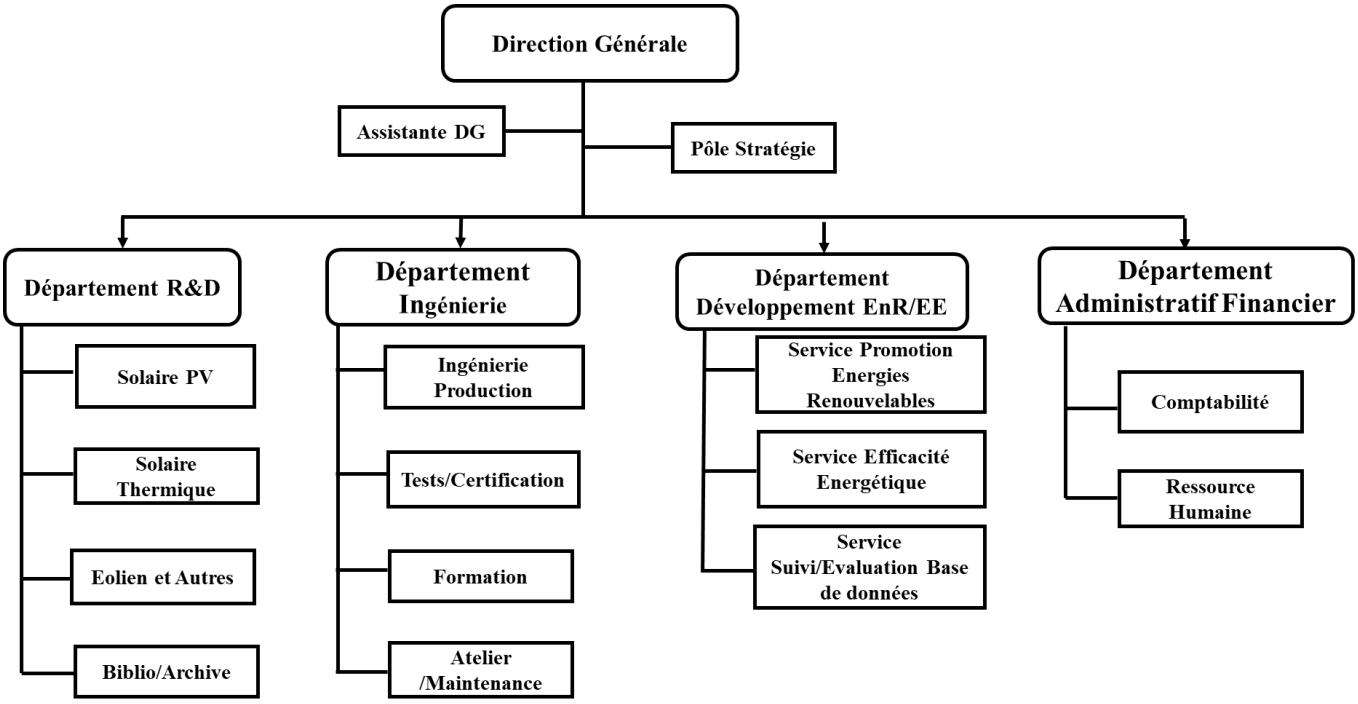


*Figure 1: Organigramme de l'ANERSOL (Ressources Humaines)*

# II. Étude bibliographique

Dans la présente étude bibliographique, nous allons mettre la loupe sur la tomate au Niger, le statut du séchage de la tomate au Niger, les séchoirs solaires développés au Niger et nous terminerons par faire une revue sur ce qu'il y'a comme amélioration au niveau des séchoirs indirects dans la littérature à l'état actuel des recherches.

## II.1 Généralités sur la tomate au Niger

### II.1.1 Production de la tomate au Niger

Au Niger la principale période de production des cultures vivrières est l'hivernage qui s'étale de Juin à Septembre. En cette période, les rendements des cultures dépendent surtout des conditions climatiques (la pluie) et restent faibles par rapport aux autres cultures de contre saison. Pendant cette période, la culture est confrontée à des attaques de nombreux ennemis (insectes et maladies), ce qui

nécessite beaucoup d'entretien surtout des traitements phytosanitaires. Toutefois des cultures de contre-saison sont pratiquées au cours de la saison fraiche et sèche autour des points d'eau permanents et semi permanents (vallées des cours d'eau, mares, bas-fonds, oasis, forages, puits etc.). Cette culture de contre saison qui commence juste après l'hivernage permet d'obtenir des produits maraîchers. La tomate constitue parmi ces produits, l'un des principaux légumes consommés surtout en milieu urbain. Au Niger la tomate est produite un peu partout dans toutes les régions mais les régions de Zinder, Agadez et Tahoua sont des références en termes de quantité produite par an. Elle peut être produite pendant toute l'année, mais la période propice à sa culture est la saison fraiche qui s'étend de novembre à Février. Durant cette saison, on trouve la tomate en abondance sur tous les marchés. Il y en a assez pour répondre à la demande nationale et pour exporter au Benin et au Nigeria [2]. L'excédent de production que les producteurs n'arrivent pas à commercialiser sur les marchés, est soit séché ou perdu. Pendant l'hivernage, le Niger importe de la tomate fraîche du Burkina Faso principalement, du Nigeria, du Bénin, du Ghana et depuis 2015 du Maroc [2]. La consommation de la tomate au Niger est estimée à 15 kg par personne par an, soit une demande d'environ 240 000 tonnes par an pour le Niger [2]. Le Niger achète également du concentré de tomate, plus de 10 000 tonnes par an sur le marché international [2].

### II.1.2 Transformation et conservation de la tomate au Niger

La tomate fraîche supporte mal les manipulations excessives pendant la récolte, au cours de son emballage et de son conditionnement qui exigent des contenants adaptés. Une conservation de quelques jours est possible dans des endroits frais si le fruit est récolté avant maturité car à la maturité la conservation est très difficile [6]. En effet sa dégradation est accentuée par sa teneur en eau très élevée qui favorise sa détérioration rapide.

#### II.1.2.1 Le séchage traditionnel de la tomate

Le séchage de la tomate intervient quand les difficultés d'écoulement apparaissent dans les zones de grande production. Ces difficultés se caractérisent par une très forte baisse du prix du produit frais et une mévente provoquant le pourrissement du produit. Cette technique de conservation a pour but d'éviter les pertes et de conserver le produit pour un approvisionnement en différé des marchés en dehors des périodes de récoltes pour la valorisation monétaire du produit. Ce procédé, longtemps pratiqué, consiste à couper les tomates en tranches et à les déposer à même le sol ou sur des nattes en bambou tissé ou du plastique étalé sur le sol. Une des techniques améliorées du séchage à l'air libre est l'utilisation de séchoirs directs simples qui peuvent être construits à partir d'une plate-forme surélevée en bois recouverte de nattes en paille tissée [3]. Les tomates fraîches coupées en tranches

sont directement exposées au soleil et étalées sur la plate-forme. L'air peut passer au-dessus et en dessous des tomates, accélérant ainsi le séchage en réduisant les pertes dues à la surchauffe. Le conditionnement des tomates séchées se fait généralement dans des sacs en jute ou des récipients traditionnels.

La durée de séchage de la tomate est d'autant plus longue que la température ambiante est basse. Par ailleurs, le séchage à l'air libre au soleil a une influence significative sur les teneurs en vitamines et le produit perd le plus souvent sa couleur et sa présentation est peu attrayante. De façon générale, le séchage traditionnel présente les inconvénients suivants :

- A l'arrivée de la saison des pluies, ou lors d'une dégradation momentanée des conditions climatiques, le séchage à l'air libre s'avère inopérant et les pertes sont importantes.
- La faible qualité nutritionnelle et microbiologique du produit séché, ainsi que ses caractéristiques parfois médiocres de goût, d'aspect, voire d'odeur.
- La mauvaise protection face aux éléments nuisibles, le séchage à l'air libre sans système de protection efficace expose le produit à toutes sortes d'attaques extérieures.
- Le temps que nécessite cette pratique pour un séchage adéquat du produit et celui employé par les personnes chargées du séchage pour la préparation, la manipulation et la protection contre les ravageurs.

#### II.1.2.2 Les techniques améliorées du séchage de la tomate au Niger

Il y'a lieu de notifier que des initiatives ont été développées au niveau national afin de trouver une solution à cette de technique de séchage rudimentaire des produits maraichers. Ces initiatives visent à mettre à la disposition des maraichers et des acteurs de la filière séchage de technologies de conservation plus éprouvées dont les séchoirs.

L'ANERSOL a développé des séchoirs solaires qui ont été vulgarisés un peu partout dans le pays, particulièrement à des groupements de femmes transformatrices, sous subvention de partenaires économiques. Les séchoirs solaires vulgarisés sont ceux de la série « séchoirs Icaro » qui sont retrouvables sous sept versions. La toute dernière version améliorée de cette série a fait l'objet d'une étude technique en 2018 afin d'évaluer ses performances. Cette version dénommée « séchoir Icaro 2007 » est un séchoir de type indirect dont une présentation détaillée est fournie en Annexe 2. Il possède deux capteurs à air sans vitrage, dont l'un horizontal de 2 $m^2$ de surface de captation et l'autre incliné de 7° de mêmes dimensions que le précédent. Sa capacité est estimée à 50 kg de produits frais. Selon [4], le séchoir a été testé avec trois produits maraichers dont le moringa, l'oignon et la tomate, les tests expérimentaux étant conduits durant le mois de Février. D'après les résultats de l'étude, le

séchoir est jugé non adapté pour le séchage des produits à forte teneur en eau comme la tomate. En effet, sous un ensoleillement moyen de 684,34 W/m$^2$, il a fallu 14 heures pour sécher 1 kg de tomates fraiches malgré ces deux capteurs à air dont celui horizontal a été démontré non contribuable dans l'apport énergétique en air chaud.

En 2003, un ingénieur agronome nigérien a conçu un séchoir à charbon minéral qui permet de sécher des tomates en quelques heures seulement. Après des tests concluants, en 2016, il conçut le séchoir à l'ampleur d'une unité d'industriel de 500 kg de capacité. D'après la source [5], le séchoir peut sécher 500 kg de tomates en 15 heures. Son entreprise dénommé «YABE production » achète les produits frais à des coopératives de femmes maraîchères, leur permettant ainsi d'écouler leur production. Le fonctionnement du séchoir est le suivant, des turbines alimentées par des modules photovoltaïques soufflent de l'air à l'emplacement du charbon minéral, le charbon est ainsi ravivé et dégage de la chaleur qui déshydrate les tomates disposées sur les claies [5]. Les tomates séchées sont ensuite réduites en poudre et conditionnées dans des sachets en plastique de 10 g destinées à la vente en détail. La source de ces informations date de 2016, alors nous ne savons pas si l'entreprise est toujours sur pied.

#### II.1.2.3 Utilisation de la tomate séchée

La tomate est utilisée comme ingrédient dans la sauce en lieu et place de la tomate fraiche. Le produit est d'abord pilé avant d'être ajouté dans la sauce. Pour le cas de la tomate séchée à même le sol, les tranches sont d'abord placées dans une tasse contenant de l'eau pendant quelques minutes, le temps d'imprégnation et de séparation des grains de sable. Certaines femmes préparent du jus ou filtrat de tomate après l'avoir pilé. Les grains de sables se déposent au fond du récipient tandis que le filtrat est utilisé dans la sauce. Lorsque les dépôts de sable sont visibles d'autres femmes préfèrent scarifier les tomates afin de les débarrasser de leurs impuretés.

Depuis quelques années on trouve en zone urbaine de la tomate séchée en emballage sur les marchés et foires des aliments. Cette tomate est séchée dans des conditions plus hygiéniques mais principalement par exposition directe au soleil. Les conséquences découlant de cette exposition directe demeurent par ailleurs sur le produit de par son goût et sa couleur sombre. Cette activité est pratiquée principalement par des femmes qui en font une profession à part entière. Certaines, pour améliorer la qualité du leur produit, pratiquent le séchage à l'ombre ou dans une chambre sous ventilation naturelle ou forcée. Cela nécessite plusieurs jours de séchage, ce qui handicape leur capacité à répondre à une sollicitation rapide du produit. Selon une transformatrice, il faut sept jours de séchage à l'ombre pour atteindre une teneur en eau qui rend le produit propre à la conservation.

## II.2 Principe du séchage et les types de séchoirs solaires

### II.2.1 Principe du séchage

Le séchage est un processus qui consiste à éliminer partiellement ou totalement l'eau contenue dans un produit afin de pouvoir le conserver sur une longue période sans précaution particulière [6]. Le séchage est un processus de transfert de masse et d'énergie. Il met en œuvre l'air et l'eau contenue dans le produit. L'air a la capacité d'absorber de l'eau, plus il est chaud et sec, plus il peut en contenir. Le principe du séchage consiste donc à faire passer de l'air chaud et sec sur le produit, l'air chaud en contact avec le produit, par transfert thermique se charge d'humidité suite à la vaporisation de l'eau contenue dans le produit. Le produit final doit avoir une teneur en eau suffisamment faible afin d'éviter le développement des micro-organismes, moisissures et levures.

### II.2.2 Les types de Séchoirs solaires

Un séchoir solaire est un dispositif permettant de sécher un produit à l'intérieur d'une enceinte en utilisant l'énergie solaire comme source de chaleur principale. Par rapport aux techniques de séchage traditionnel, ces systèmes permettent non seulement de faire sécher les aliments dans des meilleures conditions hygiéniques mais aussi de réduire le temps de séchage.

Selon le mode de fonctionnement des séchoirs, on peut les classer en quatre catégories [7] :

- **les séchoirs solaires directs** : dans ces types de séchoirs, les produits sont placés dans une enceinte couverte par une plaque en verre ou du plastique. Les rayons du soleil traversent la couverture transparente du séchoir et restent piégés dans l'enceinte avec le phénomène d'effet de serre. Les produits sont séchés par les rayons solaires piégés qui chauffe les produits et l'air circulant dans l'enceinte.
- **Les séchoirs solaires indirects** : dans ces types de séchoirs, le produit est séché indirectement par le soleil par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur dont l'air. L'air chauffé dans un capteur solaire à air, arrive sur le produit placé dans une cabine où par convection il se charge de l'humidité des aliments puis s'évacue par l'ouverture aménagée à cet effet sur la cabine.
- **Les séchoirs solaires mixtes** : Ce sont des séchoirs combinant les deux modes de fonctionnement direct et indirect. Le produit est séché simultanément par les rayons solaires et l'air chaud provenant du capteur solaire.
- **Les séchoirs solaires hybrides** : ces séchoirs sont développés pour pallier au caractère intermittent de l'énergie solaire en utilisant une autre source d'énergie d'appoint comme le gaz, l'électricité, le fuel ou la biomasse pour sécher le produit.

Selon le mode de déplacement de l'air dans les séchoirs solaires, les séchoirs se distinguent en [7]:

- **Séchoirs actifs**: ces séchoirs utilisent des ventilateurs motorisés ou des pompes pour la circulation forcée de l'air dans le séchoir. Donc le transfert de chaleur est principalement par convection forcée.
- **Séchoirs passifs :** ce sont des séchoirs fonctionnant avec une convection naturelle de l'air en utilisant le phénomène de thermosiphon et l'effet cheminée solaire.

La Figure 2 présente des schémas représentatifs des types de séchoirs et de leurs modes de fonctionnement.

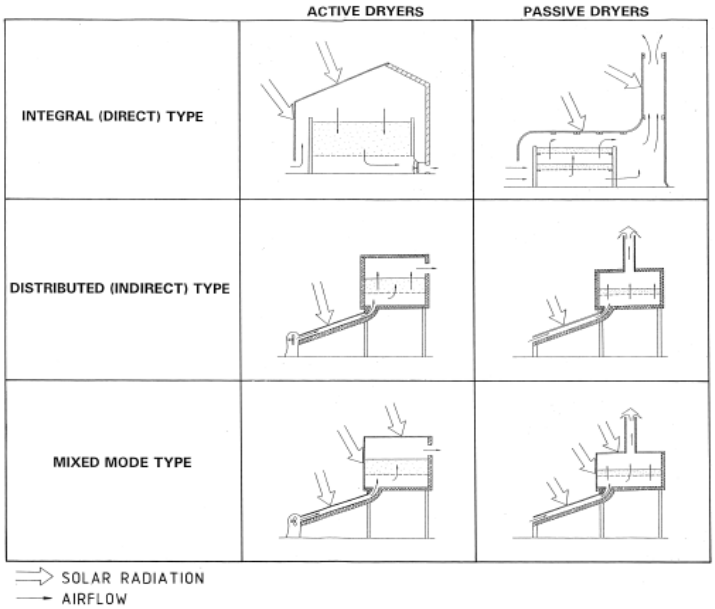


*Figure 2:Les types de séchoirs solaires [7]*

## II.3 Les prototypes développés à l'ANERSOL

Les premières expériences de séchage solaire au Niger remontent à 1980 quand l'ANERSOL sous ses anciens acronymes ONERSOL a signé un projet de recherche financé par la CRDI sur le séchage des oignons [8]. Dans le cadre de ce projet, plusieurs prototypes de séchoirs solaires ont été expérimentés dans le courant des années 1980. Les ruines de certains d'entre eux sont toujours présentes sur leurs lieux d'implantation en l'occurrence ceux construits en ciment. Une description des cinq premiers prototypes réalisés de 1981 à 1986 est faite à l'Annexe 1.

Dans le début des années 1990, le département Mécanique Agraire de l'université italienne Turin en collaboration avec le CNES et d'autres partenaires entamèrent l'étude et l'expérimentation de prototypes de séchoirs solaires. Ce projet avait pour but de mettre à la disposition des populations rurales et des entrepreneurs du domaine alimentaire des modèles de séchoirs solaires afin de trouver

une solution idoine aux pertes après récolte des denrées alimentaires à travers le séchage [9]. Après trois prototypes expérimentaux, en 1998 ils aboutissent à un premier modèle satisfaisant dénommé Icaro 1998 qui fut vulgarisé au Niger et un peu partout dans la sous-région. Depuis, ce sont sept versions de ce modèle qui ont été mises au point pour son amélioration dont deux sont présentées à l'Annexe 2.

Outres ces séchoirs solaires, il existe un séchoir vulgarisé depuis 1992 dans des pays comme le Sénégal, le Burkina, le Mali etc. Le CNES toujours dans sa politique de promotion des équipements solaires a répliqué ce séchoir dénommé « séchoir coquillage » au Niger. Une description de ce séchoir est fournie en Annexe 3.

## II.4 Etat de l'Art sur les séchoirs indirects dans la littérature

Le séchoir solaire indirect est sans doute le séchoir solaire le plus adapté pour la majeure partie des produits agricoles nécessitant un séchage pour leur conservation. Le fait que les aliments à sécher soient disposés dans une enceinte fermée les protège contre les insectes, les animaux et très souvent de la poussière, l'hygiène est donc au rendez-vous. Mieux, les produits sont protégés des rayons solaires, ce qui leur permet de conserver leurs couleurs naturelles et éléments nutritifs comme les vitamines.

Les séchoirs indirects sont constitués principalement de deux parties, le capteur solaire et la cabine de séchage. Les travaux récents portent principalement sur les différentes innovations techniques permettant d'améliorer le rendement de ces séchoirs solaires par plusieurs moyens parmi lesquels :

- l'amélioration des performances thermiques du capteur solaire ;
- le prolongement de la durée de fonctionnement des séchoirs en utilisant le stockage thermique ;
- l'utilisation d'un déshumidificateur.

### II.4.1 Amélioration des performances du capteur

Le capteur solaire à air représente la source d'énergie d'un séchoir solaire indirect bien que son application ne se limite pas au séchage des aliments. En effet les capteurs à air peuvent être utilisés dans beaucoup d'applications nécessitant des températures basses et modérées, telles que le chauffage des bâtiments, le séchage des briques, le séchage du bois, etc. Les capteurs solaires plans à air présentent de faibles performances thermiques comparés aux capteurs solaires à eau. Cela est essentiellement dû aux faibles propriétés thermo-physiques de l'air. Pour accroître leurs performances, de nombreuses recherches ont été consenties pour leurs améliorations en mettant l'accent sur les matériaux utilisés, la géométrie l'absorbeur, la dynamique du flux d'air dans le capteur, etc.

#### II.4.1.1 Capteur avec absorbeur muni de chicanes

Bahria et Amirat [10] ont étudié l'influence de l'adjonction des chicanes longitudinales sur les performances d'un capteur solaire plan à air. Ce capteur représente une partie d'un prototype de séchoir solaire indirect agricole. Le boitier du capteur est en bois de longueur 1,93 m et de largeur 0,935 m, l'épaisseur de la veine d'air est de 0,02 m. L'absorbeur est une plaque métallique en tôle galvanisée munie de chicanes longitudinales déviées de 30° à chaque 10 cm (Figure 3). Leur hauteur est 0,02 m avec une épaisseur de 0,1 m. Une isolation est faite en bas du capteur avec du polystyrène de 4 cm d'épaisseur, la couverture du capteur est en verre de 0,4 cm d'épaisseur. Une première comparaison a été faite entre le capteur sans chicanes et le capteur avec 8 rangées de chicanes, il ressort que ce dernier est plus performant avec un rendement de 27 % obtenu vers midi. L'adjonction des ailettes augmente la surface d'échange. Le coefficient d'échange convectif entre le fluide et l'absorbeur est aussi amélioré. La présence des chicanes change la nature de l'écoulement par la création des tourbillons qui favorisent l'échange thermique.

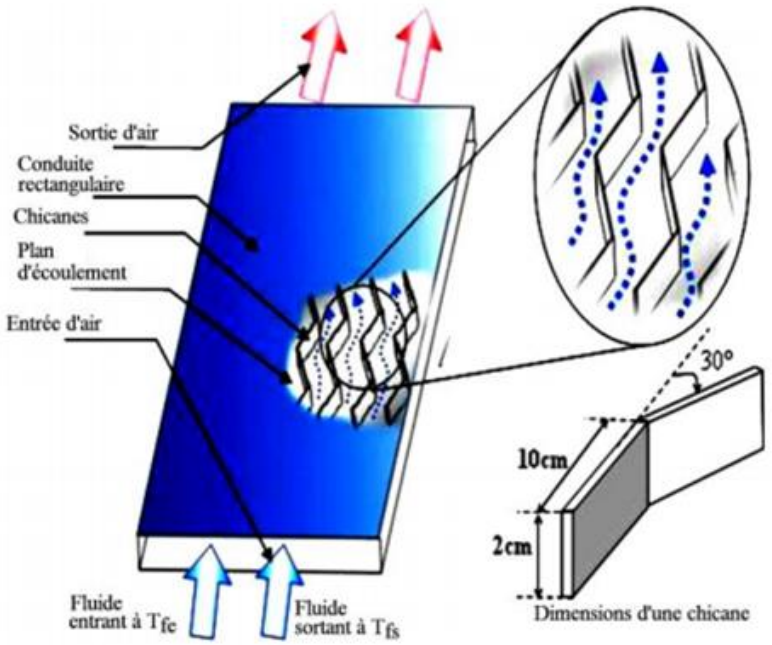


*Figure 3: Capteur Solaire à air avec chicanes[10]*

#### II.4.1.2 Capteurs avec absorbeur ondulé en forme de V

Lopez et al [11] ont expérimenté à Oaxaca au Mexique, les performances d'un séchoir solaire indirect hybridé à un système de combustion à LPG (gaz propane liquide) pour le séchage de 20 kg tomate. L'objectif principal de l'étude était d'évaluer le rendement global du séchoir en considérant les performances énergétiques de chaque source (capteur solaire et le système auxiliaire de LPG) dépendant du mode de fonctionnement sélectionné : solaire seulement, système LPG ou hybride. Le

capteur solaire du séchoir a un absorbeur en aluminium peint en noir et ondulé en forme de V parallèlement au sens d'écoulement de l'air (Figure 4). La couverture du capteur est en double vitrage de 0,6 cm d'épaisseur chacune avec un espacement de 5 cm. L'isolation thermique du capteur est faite avec du polystyrène expansé de 1,9 cm d'épaisseur. Pour le fonctionnement du séchoir en mode solaire uniquement, la température dans la cabine de séchage était comprise entre 50 °C et 60 °C. Le rendement global du séchage obtenu avec le mode solaire est de 11,43 % et le rendement maximal du capteur solaire est de 38,22 %. Pour un fonctionnement du séchoir en mode solaire uniquement le temps de séchage moyen requis pour le séchage de 20 kg de tomates est de 28 h.

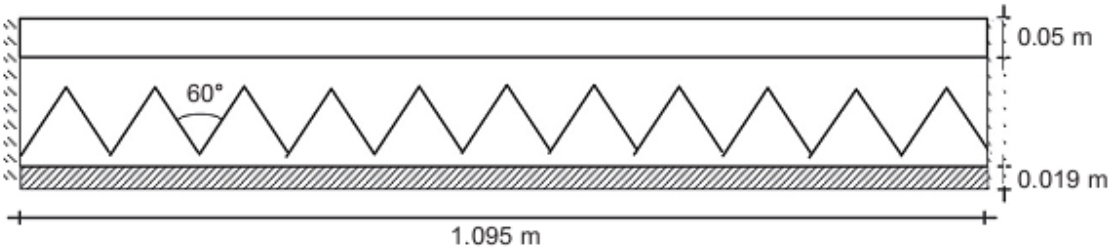


*Figure 4: Vue de face du capteur du séchoir à capteur ondulé [11]*

Lingayat et al [12] ont aussi développé un séchoir indirect avec un absorbeur ondulé en forme de V pour le séchage de la banane en Inde ( Figure 5). Le capteur solaire est constitué d'une plaque d'absorption ondulée en V, peinte de couleur noire. D'une couverture en verre simple et une isolation au fond et aux cotés avec de la laine de roche. L'Absorbeur ondulé en forme de V de dimensions 2 m x 1 m x 0,01 m est fait en cuivre de 0,4 mm d'épaisseur. Contrairement au modèle précèdent, le sens d'écoulement de l'air est perpendiculaire au sens des ondulations du capteur (Figure 5). La boîte rectangulaire du capteur est fabriquée à partir d'un cadre en fer galvanisé. La cabine de séchage est en aluminium, isolée de tous les côtés sauf le haut où une cheminée de 0,25 m de hauteur est placée pour le renouvellement de l'air. Les rendements thermiques moyens du capteur et du séchage pour ce séchoir sont respectivement de 31.5 % et 22.38 %.

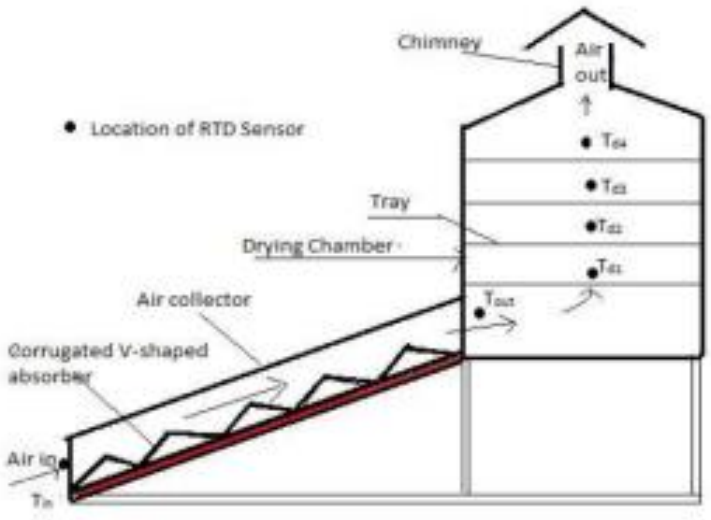


*Figure 5: Schéma du séchoir avec absorbeur ondulé [12]*

### II.4.1.3 Capteurs à double passe

Rudra et al [13] ont étudié analytiquement et expérimentalement les performances d'un capteur solaire à double passe avec surface étendue au fond (ailettes) en Inde. Leur modèle de capteur est constitué d'un absorbeur en aluminium avec un revêtement sélectif au-dessus et des ailettes longitudinales en bas de l'absorbeur pour augmenter la surface d'échange de ce dernier. Le revêtement sélectif permet d'optimiser la capacité d'absorption de l'absorbeur et de réduire les pertes par émission. Les ailettes sont en aluminium aussi, avec une épaisseur de 0,3 mm et allongées jusqu'à 0,5 cm vers le bas de la plaque d'absorption dans le canal inférieur (Figure 6). Ces ailettes sont rivetées sur toute la longueur de la surface de l'absorbeur. Contrairement aux capteurs solaires classiques à double passe où l'air s'écoule du haut de l'absorbeur vers le bas, l'écoulement est inversé dans le modèle-ci (Figure 6). Les résultats de l'étude témoignent des bonnes performances de ce type de capteur avec un rendement maximal de 69 % et une température de sortie maximale de 88°C enregistrée au mois d'Avril.

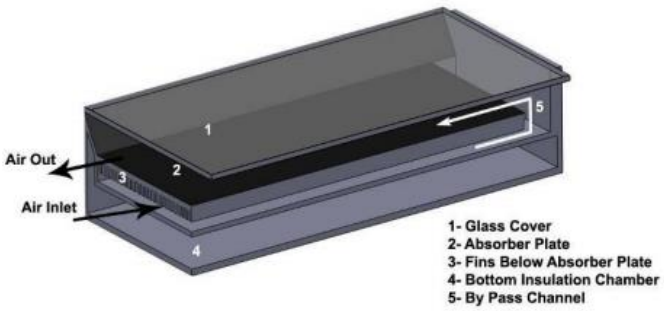


*Figure 6: Vue de coupe du capteur à double passe[13]*

### II.4.2 Utilisation d'un déshumidificateur

Pour l'amélioration des performances de séchage, d'autres études se sont intéressées à l'amélioration des propriétés hygroscopiques du fluide caloporteur dont l'air. En effet comme nous l'avons dit précédemment le séchage indirect se fait par l'intermédiaire d'un flux d'air chaud qu'on passe sur les aliments par convection naturelle ou forcée. Ce flux d'air par échange thermique absorbe l'eau contenu dans les aliments, d'où il voit son humidité augmentée à la sortie du séchoir. Ainsi, plus l'air à l'entrée du séchoir est sec plus sa capacité d'absorption d'eau augmente, par ricochet le séchage est amélioré. Dans certaines zones du monde ou à certaines périodes de l'année dont la saison pluvieuse, l'air ambiant est caractérisé par une forte humidité relative. Pour ces cas, déshumidifier l'air ambiant avant son entrée dans le séchoir solaire contribue à améliorer le séchage. A cet égard bon nombre d'études ont appliqué des systèmes de déshumidification aux séchoirs solaires. Les systèmes les plus retrouvés sont la combinaison aux séchoirs solaires d'un lit dessiccatif liquide, d'un lit dessiccatif solide ou d'une roue dessicative. Ces systèmes de dessiccation ont pour fonction de diminuer l'humidité de l'air entrant dans le séchoir ou de l'air recyclé grâce aux phénomènes d'adsorption ou d'absorption, c'est à dire le mécanisme par lequel certains solides et liquides ont la capacité de piéger un gaz ou une vapeur [14].

### II.4.3 Utilisation du stockage thermique

Le caractère intermittent de l'énergie solaire se présente comme une limite pour son application dans beaucoup de systèmes comme les séchoirs solaires. A l'exemple d'un séchoir indirect, le capteur solaire ne peut fournir de l'air chaud que pendant les heures d'ensoleillement. Or le séchage de nombreux aliments est effectué à des températures modérées et de façon continue pendant quelques jours. Pour ces cas, un stockage thermique est nécessaire pour assurer la continuité du séchage pendant les heures de couverture nuageuse et en fin de soirée. Deux voies sont utilisées pour le stockage thermique de l'énergie : la voie thermique et celle chimique, la voie thermique étant la plus utilisée pour le séchage solaire. Cette voie se distingue sous deux formes : le stockage par chaleur sensible et celui par chaleur latente. Différents modèles de séchoirs solaires intégrant un stockage thermique sont retrouvables dans la littérature. Dans une revue de littérature présentée par Lyes Bennamoun [15], il ressort que le stockage sensible est le plus utilisé dans les séchoirs solaires avec l'utilisation des lits tassés de sable, de graviers ou de roches. Le lit tassé peut être ajouté à la chambre de séchage, au capteur solaire, ou aux deux. L'eau peut être aussi utilisée comme matériau de stockage en fonction de sa disponibilité, son coût et ses caractéristiques thermo-physiques. Il rapporte aussi que le stockage par chaleur latente est peu appliqué pour le séchage solaire.

## Conclusion partielle

Le séchage traditionnel reste prédominant dans les habitudes de conservation des aliments au Niger. Malgré les multiples prototypes de séchoirs développés par l'ANERSOL, il n'existe pas à l'heure actuelle au Niger, un séchoir exclusivement solaire adapté au séchage des produits à forte teneur en eau comme la tomate bien que le besoin d'une telle technologie se fait ressentir. La portée de cette étude sera de poser les jalons d'un prototype de séchoir solaire indirect adapté principalement au séchage de la tomate qui optimise la qualité du produit séché et le temps du séchage. Pour atteindre une telle portée, la conception du prototype devra être regardante des caractéristiques intrinsèques du produit et des conditions climatiques de la période où le besoin de sécher le produit est imminent, notamment sa période de récolte. Les connaissances acquises sur les séchoirs indirects recensés de la littérature comme les matériaux utilisés dans leur conception, les dimensions et les configurations des différents éléments de ces séchoirs seront très utiles à la conception de notre prototype.

# III. Dimensionnement du prototype

Cette partie est consacrée au dimensionnement du prototype. Avant de passer à la méthodologie du dit dimensionnement, nous allons d'abord introduire quelques notions qui seront utiles à la bonne compréhension de l'approche du dimensionnement.

## III.1 Quelques notions pour la compréhension de la méthode du dimensionnement

### III.1.1 Activité de l'eau

L'activité de l'eau « $a_W$ » est une grandeur classique, utilisée pour évaluer la capacité avec laquelle un produit dans une atmosphère donnée se dégrade d'un point de vue biologique. Elle correspond au rapport entre la pression de la vapeur d'eau de l'aliment $P_{vp}$ (pression de la vapeur d'eau à la surface du produit) et la pression de la vapeur de l'eau pure à la même température (pression de la vapeur saturante $P_{sat}$).

$$a_W = \frac{P_{vp}}{P_{sat}} \quad (1)$$

Avec :

- $a_W$: activité de l'eau;
- $P_{vp}$: pression de la vapeur d'eau à la surface du produit (Pa);
- $P_{sat}$: pression de la vapeur saturante (Pa).

Lorsqu'il n'y a plus d'échange de matière entre le produit et l'air qui l'entoure, il s'établit un équilibre hygroscopique entre les deux. L'activité de l'eau est aussi égale à l'humidité relative de l'air en équilibre avec le produit [16].

L'activité de l'eau d'un produit est toujours inférieure ou égale à 1. Lorsque l'eau contenue dans un produit a une activité proche de 1, elle s'évapore comme de l'eau pure à l'air libre. Par analogie, on dit que ce produit contient de l'eau libre**.** Lorsque l'activité de l'eau d'un produit est inférieure à 1, cela signifie que les constituants du produit fixent partiellement l'eau et diminuent ainsi sa capacité à se vaporiser. On parle alors d'eau liée**,** plus ou moins fixée au produit par absorption [17]**.**

### III.1.2 La cinétique de séchage

La cinétique de séchage correspond à l'évolution de la vitesse de séchage (masse d'eau évaporée par unité de temps) en fonction du temps. Elle est représentée par des courbes qui caractérisent le comportement global du produit pendant l'opération du séchage en fonction du temps. Quel que soit le mode de séchage solaire (direct, indirect ou naturel), les produits agro-alimentaires subissent trois phases de séchage de durées variables (Figure 7) durant leur processus de séchage suivant les caractéristiques de l'air et du produit.

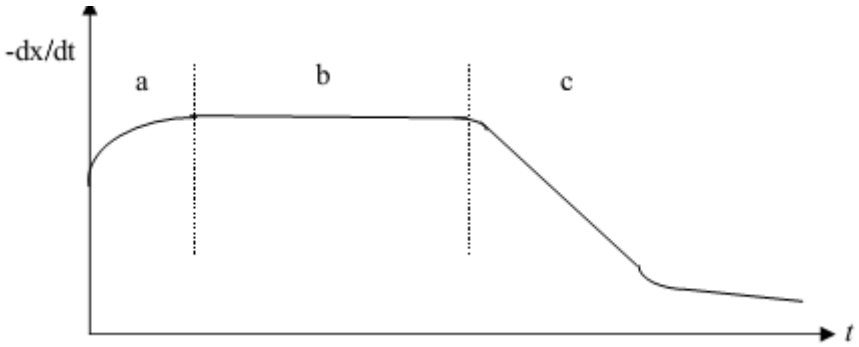


*Figure 7: Vitesse de séchage en fonction du temps [18]*

Phase I : Mise en température du produit (zone « a » sur la courbe)

Cette période très courte et éventuellement inexistante pour certains produits (produits en particule ou feuilles) est caractérisée par une élévation de la température du produit jusqu'à une température d'équilibre. Le produit étant à une température plus basse au départ, cette température d'équilibre ne s'atteint pas instantanément. L'apport d'énergie durant cette phase contribue à élever la température du produit tout en vaporisant une certaine quantité d'eau du produit.

Phase II : Vitesse de séchage constante (Zone « b » sur la courbe)

Cette phase correspond à l'évaporation de l'eau libre du produit qui est sans cesse renouvelée par la migration de l'eau de l'intérieur produit vers la surface. Le produit est à une température constante de même que la vitesse de séchage. Cette dernière reste constante tant que les caractéristiques de l'air arrivant sur le produit sont constantes (sa température, son humidité et sa vitesse de circulation).

Phase III : Période de ralentissement du séchage (zone « C » sur la courbe)

Cette phase (vitesse de séchage décroissante) correspond à l'évaporation de l'eau liée du produit. L'eau libre migrant de l'intérieur vers la surface du produit est complétement évaporée. Il ne reste que de l'eau liée dans le produit dont l'évaporation est faite à l'intérieur de celui-ci. Un front d'évaporation se crée en direction du fond du produit. La vapeur d'eau est ensuite évacuée en surface par l'air. Plus le front s'éloigne de la surface extérieure du produit, plus le transfert d'eau est difficile [17]. La vitesse de séchage n'est plus maintenue constante, elle décroit et on tend donc vers la fin du séchage.

### III.1.3 Les courbes de sorption-désorption

Les courbes donnant la teneur en eau en fonction de l'activité de l'eau ($a_W$) dans un produit pour une température donnée, sont appelées isothermes de désorption pour le cas du séchage ou d'adsorption pour celui de la réhumidification (Figure 8). Pour chaque valeur de la teneur en eau du produit, l'isotherme donne la valeur de l'activité de l'eau qui correspond aussi à l'humidité relative d'équilibre ($H_e$ ) de l'air à cette température. La connaissance de l'isotherme de désorption est particulièrement importante dans le processus de séchage d'un produit car elle permet de déterminer l'humidité relative vers laquelle va tendre l'air sortant du séchoir à la fin du séchage.

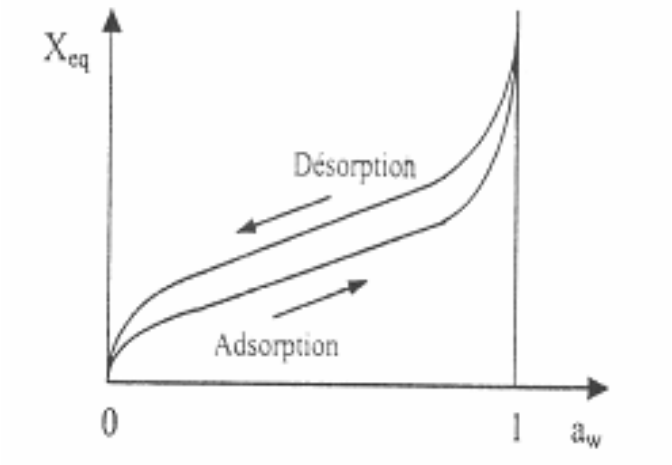


*Figure 8: Isotherme d'adsorption et de désorption [18]*

$$H_e = a_w * 10 \quad (2)$$

Avec :

- $H_e$ : humidité relative d'équilibre de l'air (%) ;
- $a_w$ : activité de l'eau.

## III.2 Méthodologie du dimensionnement

Cette partie est consacrée à l'explication de la méthodologie de dimensionnement adopté. Les résultats du dimensionnement seront déterminants pour la conception du séchoir et plus particulièrement pour celle du capteur solaire. La méthode du dimensionnement est inspirée de celle du livre en référence [17]. La méthode permettra de calculer certaines caractéristiques du séchage et du capteur.

**La quantité d'eau à retirer du produit**

Le produit étant humide, il contient une certaine quantité d'eau qu'il faut retirer pour pouvoir le sécher jusqu'à une teneur en eau qui le rend propre à une bonne conservation Connaissant la teneur en eau initiale du produit et la teneur en eau finale à atteindre, cette masse d'eau peut être calculée suivant la formule qui suit.

$$m_e = m_p \frac{M_i - M_f}{100 - M_f} \quad (3)$$

Avec:

- $M_i$: teneur en eau initiale du produit frais (en %);
- $M_f$: teneur en eau finale du produit séché (en %);
- $m_e$: masse d'eau à extraire du produit (en kg);
- $m_p$: masse du produit frais à sécher (en kg).

**La vitesse moyenne du séchage**

Connaissant le temps imparti au séchage d'un produit frais et la masse d'eau à retirer de ce produit pour le sécher, on peut estimer la vitesse moyenne d'enlèvement de l'eau du produit selon la formule suivante :

$$V_m = \frac{m_e}{t_s} \quad (4)$$

Avec :

- $V_m$ : vitesse moyenne du séchage(en kg/h)
- $t_s$: durée du séchage pour le produit considéré (en heures).

**Le pouvoir évaporatoire de l'air asséchant**

Le pouvoir évaporatoire désigne la quantité d'eau que peut importer un mètre cube d'air en contact avec une surface humide jusqu'à la saturation en vapeur d'eau de l'air en question. Pour le cas d'une quantité d'air qui passe sur des produits comme dans le cas du séchage, on peut approximer le pouvoir évaporatoire de cet air. Cette approximation est faite en supposant que l'air sort du séchoir au début du séchage saturée d'eau. Elle suppose aussi que l'humidité relative de l'air sortant du séchoir en fin de séchage correspond à celle de l'équilibre air-produit quand il ne subsiste plus de transfert entre ces deux derniers. Donc partant de cette approximation, on supposera que l'humidité relative de l'air sortant du séchoir sur la durée du séchage est la moyenne des deux humidités relatives citées précédemment. Elle est calculée comme suit :

$$\mathrm{H_m} = \frac{100 + \mathrm{H_s}}{2} \tag{5}$$

- $H_m$ : humidité relative de l'air à la sortie du séchoir, en moyenne sur la durée totale du séchage (en %);
- $H_s$ : humidité relative de l'air à la sortie du séchoir, à la fin du séchage (en %).

Sachant que le transfert de chaleur dans le capteur se fait sans échange de masse et en supposant le processus de séchage dans la cabine de séchage est isenthalpique, on peut décrire ce processus de séchage de l'entrée du capteur à la sortie de la cabine selon le tracé sur le diagramme de l'air humide (Figure 9).

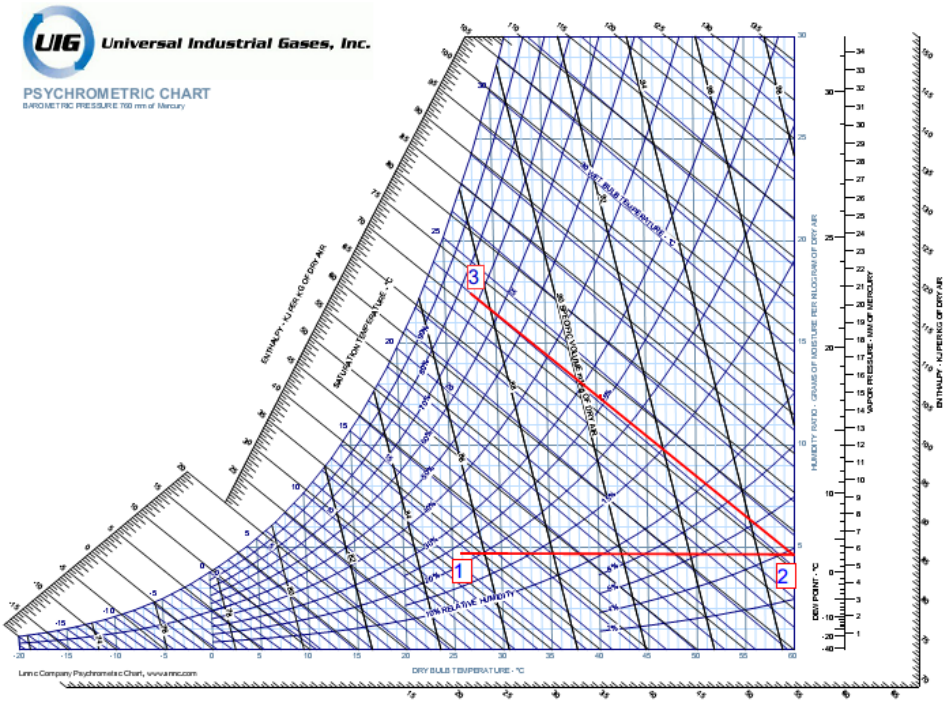


*Figure 9:Diagramme de l'air humide*

Les trois points sur le diagramme sont décrits comme suit :

- Le point 1 correspond aux caractéristiques de l'air à l'entrée du capteur à air ;
- Le point 2 correspond aux caractéristiques de l'air à la sortie du capteur qui correspond aussi à l'entrée de la cabine de séchage ;
- Le point 3 correspond au statut de l'air à la sortie de la cabine.

Suivant ce tracé on peut déterminer l'humidité absolue de l'air à la sortie du séchoir à partir de l'humidité relative moyenne exprimée précédemment. On peut dont établir une première relation (équation 6) permettant de déterminer la quantité d'eau que peut emporter un mètre cube de l'air asséchant.

$$q_{eau} = \rho_{air}(x_m - x_1) \quad (6)$$

- $q_{eau}$ : la quantité d'eau enlevée en moyenne pendant le séchage (en g/m$^3$) ;
- $x_m$ : humidité absolue de l'air en sortie de séchoir en moyenne sur la durée du séchage (en g/kgas) ;
- $x_1$ : humidité absolue de l'air à l'entrée du séchoir (entrée cabine de séchage) (en g/kgas).

Cependant les échanges entre le produit placé dans la cabine de séchage et l'air asséchant n'étant pas parfaits, on peut introduire un coefficient correcteur permettant d'ajuster l'approximation faite dans l'équation précédente selon l'équation ci-dessous :

$$q_{eau} = \rho_{air} * \eta_s * (x_m - x_1) \quad (7)$$

Avec :

- $q_{eau}$ : la quantité d'eau enlevée en moyenne pendant le séchage (en g/m$^3$) ;
- $\eta_s$ : coefficient correcteur de l'échange thermique produit-air asséchant.

**Le débit d'air moyen à avoir dans le séchoir**

Connaissant la quantité d'eau que peut emporter un mètre cube de l'air asséchant et la vitesse moyenne du séchage, on peut exprimer le débit moyen d'air asséchant qu'il faut faire mettre en circulation dans le séchoir. Ce débit est exprimé comme suit :

$$\dot{V} = \frac{1000 * V_m}{q_{eau}} \quad (8)$$

- Avec :
- $\dot{V}$ : débit d'air moyen nécessaire pour le séchage (m$^3$/h).

**L'énergie requise pour sécher les produits**

En supposant que les pertes d'énergie sont minimes dans la chambre de séchage, on peut avoir une approximation de l'énergie requise au séchage en supposant qu'elle est égale à celle nécessaire pour élever la température de l'air dans le capteur de sa température ambiante à celle recommandée pour le séchage du produit. Elle est exprimée comme suit :

$$P_u = \rho_{air} * \dot{V} * C_{pair} * (T_2 - T_1) \quad (9)$$

Avec :

- $P_u$ : puissance nécessaire pour le séchage (en kW);
- $C_{pair}$ : chaleur massique de l'air (en kJ·kg$^{-1}$·°C$^{-1}$);
- $T_1$ : température de l'air à l'entrée du capteur, température ambiante (en °C);
- $T_2$ : température de séchage (à l'arrivée sur le produit) (en °C) ;

**La surface de captation moyenne nécessaire pour le séchage des produits**

Avec la puissance énergétique et le débit d'air calculés plus haut, on peut exprimer la surface de captation (surface de l'absorbeur) permettant de transmettre cette énergie à l'air asséchant.

$$S = \frac{\rho_{air} * \dot{V} * C_{pair} * (T_2 - T_1)}{\eta_c * I_G} = \frac{P_u}{\eta_c * I_G} \quad (10)$$

Avec :

- $S$ : surface de l'absorbeur du capteur ($m^2$) ;
- $\eta_c$ : rendement du capteur ;
- $I_G$ : irradiance globale sur le plan du capteur ($W \cdot m^{-2}$).

## III.3 Spécifications et hypothèses du dimensionnement

Afin d'appliquer la méthode de dimensionnement expliquée ci-dessus, la formulation de quelques hypothèses de départ est nécessaire :

- **La capacité du séchoir**

Etant donné que le séchoir sera un prototype dont les performances devront être validées par une expérimentation, il serait judicieux de partir d'un séchoir d'une faible capacité pour des raisons économiques (coût de fabrication). Si le modèle du séchoir est approuvé, une réplication du modèle intégrant une extension de sa capacité selon les besoins pourra être faite. Au vu de tout cela, nous supposons pour le dimensionnement que la cabine du séchoir a une capacité maximale de 20 Kg de produits frais.

- **Site d'implantation et conditions climatique**

Les données climatiques de la ville de Niamey seront considérées pour le dimensionnement. En effet la région de Niamey renferme quelques bassins de culture de la tomate (Kangou, Rive Droite, Hankoto etc.). De plus, de nombreux PME et groupements de femmes œuvrant dans le domaine du séchage des légumes siègent dans la capitale.

La culture de la tomate étant une contre-saison pratiquée et récoltée pendant la saison froide, la température moyenne et l'humidité relative moyenne des quatre mois (Novembre à Févier) constituant cette saison sont considérées dans les calculs. Les données sont prises dans le logiciel RESTcreen (Annexe 5) .Quant à l'ensoleillement moyen pour ces quatre mois, il est considéré à 5329 $Wh \cdot m^{-2} \cdot j^{-1}$, moyenne calculée sur quatre années successives (2014-2018) avec des données enregistrées sur le site de l'ANERSOL (Annexe 5). La durée moyenne de l'ensoleillement à Niamey est de 11 heures [19], cependant comme pendant la saison froide les nuits sont plus longues que les journées, la durée est réduite à 10 heures dans cette étude . La durée impartie au séchage des 20 kg des tomates est de 16 heures, le séchage se fera alors en deux jours d'ensoleillement.

- **Caractéristiques de la tomate**

Des données relatives au séchage de la tomate et à ses caractéristiques intrinsèques doivent être considérés pour les calculs intervenants dans le dimensionnent. Ainsi, une teneur en eau initiale de 95 % de la tomate fraiche est considérée dans les calculs. Pour une conservation de la tomate séchée, il est recommandé d'atteindre une teneur en eau de 10 % (base humide) [20]. La température de séchage recommandée pour le séchage de la tomate est 60°C [17]. Pour cette température et la teneur en eau de conservation de la tomate en base sèche d'environ 0,11 kg/kg $_{\text{produit sec}}$, on lit une activité de l'eau de la tomate de 0,5 sur la courbe de désorption en Annexe 4. Cette activité de l'eau correspond donc à une humidité relative d'équilibre de l'air de 50%. Le Tableau 1 ci-contre est un récapitulatif des différentes hypothèses.

*Tableau 1 : Récapitulatif des hypothèses et spécifications pour le dimensionnement*

| **Désignations** | **Spécifications et hypothèses** |
|---|---|
| Site | Niamey (Latitude : 13,5°N) |
| Produit | Tomate |
| Période de récolte | Novembre à Février |
| Quantité du produit frais | 20 kg |
| Teneur en eau initiale du produit frais (base humide) | 95 % |
| Teneur recommandée pour la conservation (base humide) | 10 % |
| Teneur recommandée pour la conservation (base sèche) | 0,11 kg/kg $_{\text{produit sec}}$ |
| Température de séchage | 60°C |
| Température ambiante | 26°C |
| Humidité relative ambiante | 23 % |
| Activité de l'eau de la tomate séchée | 0,5 |
| Humidité relative de l'air en fin de séchage | 50 % |
| Ensoleillement moyen | 5,329 $kWh \cdot m^{-2} \cdot j^{-1}$ |
| Nombre d'heures d'ensoleillement par jour | 10 h |

| | |
|---|---|
| Irradiance solaire moyenne | $533 W \cdot m^{-2}$ |
| Durée du séchage | 16 h |
| Rendement thermique du capteur solaire | 30 % |

### III.4 Résultats du dimensionnement

Le Tableau 2 présente sommairement les résultats du dimensionnement du séchoir solaire. Les détails des différents calculs effectués pour aboutir à ces résultats sont en Annexe 6.

*Tableau 2 : Résultats du dimensionnement*

| **Désignations** | **Symboles** | **Valeurs** |
|---|---|---|
| Masse d'eau à enlever des tomates | $m_e$ | 18,89 kg |
| La vitesse moyenne d'enlèvement de l'eau du produit | $V_m$ | 1,18 kg/h |
| Quantité d'eau qu'on peut retirer du produit avec un mètre cube d'air asséchant | $q_{eau}$ | 16,65 kg/h |
| Le débit d'air moyen qu'on doit avoir dans le séchoir | $\dot{V}$ | 71 $m^3/h$ |
| La puissance énergétique moyenne requise pour l'évaporation de l'eau contenue dans le produit | $P_u$ | 0,87 kW |
| La surface moyenne de l'absorbeur du capteur | $S$ | 5 $m^2$ |

Le débit d'air moyen nécessaire au séchage des 20 kg de tomates est de 71 $m^3/h$. Au-delà d'un débit d'air supérieur à 60 $m^3/h$, il est recommandé d'intégrer un ventilateur dans un système de séchoir solaire [17]. Au vu de cette recommandation et de tous les avantages qui découlent d'une convection forcée comme un meilleur coefficient d'échange et une indépendance du débit d'air des conditions extérieures, dans la conception du séchoir une convection forcée sera envisagée.

## IV. Modélisation mécanique en 3D du séchoir

### IV.1 Méthodologie

En plus des résultats obtenus dans la phase dimensionnement, nous allons introduire quelques spécifications qui feront office de contraintes dans la modélisation du séchoir solaire. Ces spécifications sont entre autres :

- La simplicité de réalisation du séchoir, de telle sorte que sa fabrication puisse être à la portée des menuisiers métalliques locaux ;
- Les matériaux de fabrication doivent être disponibles localement et à des prix modérés;
- La cabine de séchage et le capteur doivent être conçus en deux unités séparées pour faciliter le déplacement du séchoir;
- Le séchoir doit être ergonomique, facile à utiliser et pas très lourd ;
- Le coût du séchoir doit être raisonnable afin d'être à la portée des utilisateurs finaux ciblés.

### IV.1.1 Choix des matériaux du séchoir

#### IV.1.1.1 Le matériau de la carrosserie du séchoir

Pour la carrosserie du séchoir, en l'occurrence la boite de la cabine de séchage et le caisson du capteur plusieurs matériaux métalliques peuvent être utilisés. Etant donné que ces éléments du séchoir doivent contenir un flux d'air chaud, il serait judicieux d'éviter les matériaux ayant une très grande conductivité thermique et une forte émissivité thermique pour limiter les déperditions thermiques. Le poids de la carrosserie constituant l'essentiel du poids d'un séchoir, une attention particulière devra donc être portée à la masse volumique du matériau à choisir. De même les critères comme la durabilité du matériau, son coût et sa disponibilité locale sont tous aussi importants à considérer. Au vu de tous ces critères, nous pouvons présélectionner trois matériaux pour la carrosserie du séchoir: la tôle en acier, la tôle en aluminium et le bois.

L'aluminium est un matériau léger comparé à l'acier, mais il présente une forte conductivité thermique bien que son émissivité soit faible (Tableau 3). De plus l'aluminium est un matériau peu disponible au Niger contrairement au bois et à l'acier.

Le bois est un isolant thermique si on compare sa conductivité à celles de l'aluminium et de l'acier, il est tout autant plus léger que ces derniers pour le même volume comme on peut le voir dans le Tableau *3*. Son coût d'acquisition est aussi abordable mais il est très sensible à l'humidité ce qui ne fait pas de lui un bon choix pour un dispositif qui sera exposé à la pluie.

L'acier est un matériau très résistant mais plus lourd que l'aluminium et le bois. Sa conductivité thermique est faible par rapport à celle de l'aluminium et son émissivité thermique est aussi acceptable si on se réfère au Tableau *3*. Il est aussi disponible localement et à un prix relativement abordable.

A la suite de toutes ces comparaisons et en faisant un compromis sur son poids, la tôle acier ressort comme le matériau adapté pour la carrosserie de séchoir solaire.

*Tableau 3 : Propriétés thermo-physiques de quelques matériaux[17]*

| Matériaux | Conductivité thermique (W/m/°C) | Densité (kg/dm $^3$) | Coefficient d'absorption Wh/kg/°C) | Coefficient d'émission | Coût (1) | Disponibilité locale (2) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Acier doux | 45,3 | 7,83 | 0,3-0,8 | 0,12 | * | * |
| Aluminium | 221 | 2,74 | 0,04 | 0,09 | ** | 0 |
| Bois | 0,11-0,25 | 0,37-1,12 | 0,6 | 0,9 | * | * |
| Sciure de bois | 0,06 | 0,19 | - | - | 0 | * |

(1) Bon marché: 0; moyennement cher: *; coûteux: **.

(2) Peu disponible :0 ; Disponible :*.

#### IV.1.1.2 L'isolant thermique

Une isolation thermique est sans doute nécessaire pour minimiser les pertes thermiques au niveau des parois du séchoir surtout celles se trouvant en bas (parois basse de la cabine et du capteur) qui ne seront pas exposées au rayonnement solaire. Les isolants thermiques sont distingués en trois classes selon leur origine : les isolants synthétiques, les isolants minéraux et les isolants naturels. Parmi ceux synthétiques et minéraux seuls quelques-uns sont disponibles localement comme le polystyrène, le polyuréthane et la laine de verre mais à des prix assez onéreux. Cependant la sciure de bois qui est un isolant naturel est disponible en grande quantité et à coût modique. Son pouvoir d'isolation ($\lambda = 0{,}06$ W·m$^{-1}$·°C$^{-1}$) n'est pas aussi excellent que pour les autres mais sa disponibilité locale et son faible coût d'acquisition fait d'elle le bon candidat pour l'isolation d'un séchoir dont on cherche à amoindrir les coûts des matériaux de conception sans que cela porte préjudice à l'efficacité du dispositif.

#### IV.1.1.3 Le matériau de l'absorbeur du capteur

Le rôle de l'absorbeur d'un capteur est d'absorber le rayonnement solaire qui sera transmis sous forme de chaleur au fluide caloporteur qui sera en contact avec lui. Un absorbeur est d'autant plus efficace qu'il est caractérisé par un coefficient d'absorption élevé et une faible émissivité. L'application d'une peinture noire ($\alpha$= 0,97 Annexe 7) sur une plaque absorbante permet d'augmenter sa capacité d'absorption. L'absorbeur du capteur du séchoir sera donc en tôle acier peinte en noir. En effet la sélectivité (rapport du coefficient d'absorption sur celle d'émission) de l'acier ($\alpha/\varepsilon$ = 2,5-6,67 Tableau 3) est meilleure que celle de l'aluminium ($\alpha/\varepsilon$ = 0,44 Tableau 3).

#### IV.1.1.4 La couverture transparente du capteur

Le rôle de la couverture transparente du capteur est de transmettre le rayonnement solaire à l'absorbeur et de le piéger par le phénomène d'effet de serre. Il permet aussi d'isoler l'air chaud qui circule dans le capteur de l'air ambiant. Il existe plusieurs matériaux qui peuvent être utilisés comme couverture transparente comme on peut le voir en Annexe 8. Compte tenu de sa bonne transmittance ($\tau = 0{,}86$ à $0{,}91$ Annexe 8) du rayonnement solaire, sa disponibilité locale, sa durabilité et sa résistance aux fortes températures, caractéristiques spécifiées dans le tableau en Annexe 8, le choix sera porté sur le verre ordinaire de 4 mm d'épaisseur.

#### IV.1.1.5 Les matériaux des claies

Les claies désignent les dispositifs sur lesquels le produit sera étalé dans le séchoir. Elles seront superposées sur des cornières métalliques soudées aux parois intérieures de la cabine. Les claies doivent être conçues avec un matériau en mailles pour permettre une bonne circulation de l'air sur les produits. Pour cet effet, nous choisirons du grillage en acier inoxydable encastré dans un cadre en bois. Le bois étant un matériau de faible conductivité thermique (Tableau 3), la manipulation des claies sera plus aisée pour les utilisateurs car le cadre qui servira d'appui pour leur retrait du séchoir ne sera pas surchauffé contrairement à un cadre métallique vu que les claies baigneront dans un flux d'air chaud.

#### IV.1.1.6 La peinture

Le séchoir étant destiné pour le séchage des aliments, une peinture alimentaire doit être appliquée sur toutes les parties du séchoir en contact avec l'aliment et l'air d'entrainement pour éviter toute action préjudiciable de la peinture sur l'aliment. Une peinture de couleur sombre est préférable et en particulier le noir pour profiter de son caractère absorptif du rayonnement. Une couche d'anticorrosif alimentaire doit être appliquée avant la peinture sur l'ensemble du séchoir pour le préserver efficacement des agressions quotidiennes impactant sur la durée de vie des matériaux métalliques et indirectement sur qualité hygiénique des aliments.

### IV.1.2 Choix de la configuration du capteur

Comme ce fut indiqué dans les résultats du dimensionnement, la surface de captation moyenne nécessaire pour sécher 20 kg de tomates en 16 heures est de 5 $m^2$. Cette surface correspond à celle que doit avoir l'absorbeur du capteur à air. Cependant, pour un capteur à absorbeur simple (lisse), une surface de 5 $m^2$ serait trop encombrante pour le séchoir solaire donc tout l'intérêt de trouver une configuration qui permettrait d'avoir la même surface mais avec moins encombrement. Dans la partie bibliographie nous avons répertorié quelques capteurs avec des absorbeurs de formes diverses

permettant un bon échange thermique tout en permettant de réduire l'espace à occuper. Parmi ces capteurs nous avons les capteurs avec absorbeur à chicanes, ceux avec absorbeur ondulé en forme de V et les capteurs à double passe. Si nous incluons le critère de facilité de réalisation du capteur, les capteurs avec absorbeur ondulé en forme de V apparaissent comme la configuration judicieuse pour notre capteur à air. Pour cette configuration de l'absorbeur, comme nous l'avons vu plus haut aussi, il existe deux variantes : celle dont l'écoulement d'air est perpendiculaire au sens des ondulations (Figure 5) et celle dont l'écoulement est parallèle au sens des ondulations (Figure 4). Pour notre capteur nous avons préféré la deuxième variante car elle semble permettre un parcourt plus long de l'air dans le capteur, par conséquent un meilleur échange thermique.

### IV.1.3 Orientation et inclinaison du séchoir

Un capteur solaire peut être assimilé à un échangeur thermique. Il absorbe l'irradiation solaire qu'il transforme en chaleur, qui est transmise par convection à l'air de séchage. L'efficacité d'un capteur dépend beaucoup de son orientation et de son inclinaison. En général, l'inclinaison et l'orientation recommandées pour une installation visant une production annuelle sont : la valeur angulaire de la latitude du lieu d'installation pour l'inclinaison et une orientation plein Sud pour les localités situées dans l'hémisphère Nord [21]. Ces recommandations pour le cas d'une installation située à Niamey au Niger correspondent à une inclinaison de 13,5° et une orientation plein Sud. Toutefois, dans cette étude, le séchage de la tomate étant considéré comme une application saisonnière, on peut déterminer l'inclinaison et l'orientation optimales qui permettent d'avoir le maximum de rayonnement sur le plan du capteur solaire. Avec une analyse des trajectoires du soleil (Annexe 9) pour les mois correspondants à la période de récolte des tomates qui est comprise entre Novembre et Février, les trajectoires du soleil sont situées vers le Sud. De ce fait, l'orientation optimale du capteur à air du séchoir pour cette application saisonnière demeure le Sud.

Pour le cas de l'inclinaison du capteur, l'analyse du rayonnement sur le plan du capteur en fonction de l'inclinaison de ce dernier (Figure 10), démontre que l'inclinaison optimale pour recevoir le maximum de rayonnement pour la période du séchage de la tomate est de 40°. L'analyse est faite à l'aide du logiciel RESTcreen avec Niamey comme référence pour les données climatiques.

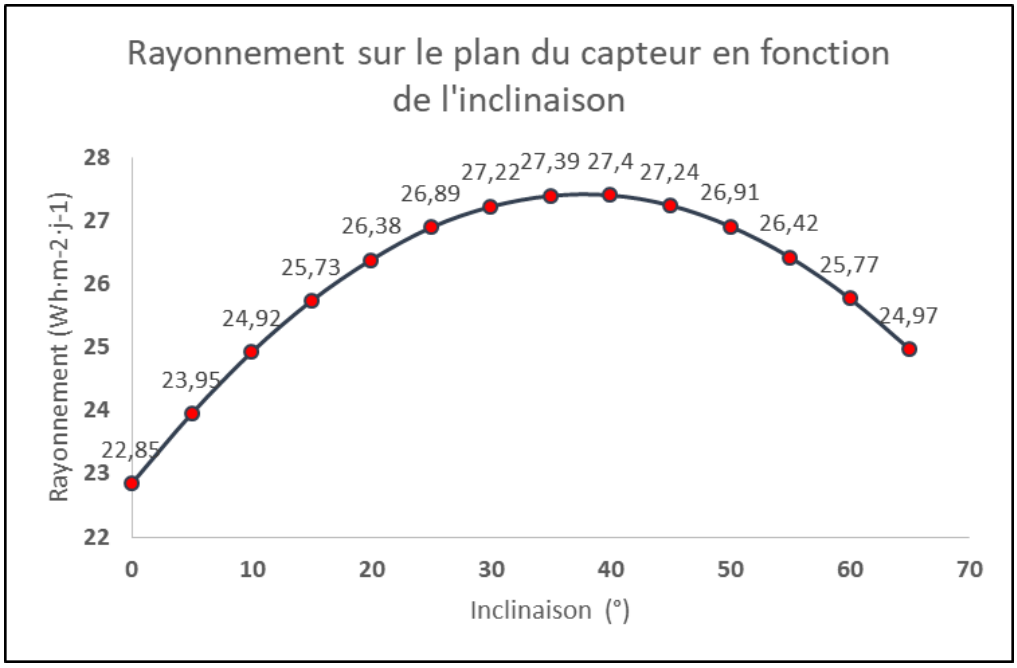


*Figure 10: Rayonnement sur le plan du capteur en fonction de l'inclinaison*

## IV.2 Résultats

La modélisation en 3D du séchoir solaire a été faite à l'aide du logiciel Fusion 360 de l'éditeur Autodesk. Fusion 360 est un puissant logiciel de modélisation 3D. Son programme permet de concevoir, de visualiser et aussi de modifier des modélisations 3D mécaniques et organiques. C'est l'un des logiciels les plus réputés de nos jours, utilisé par de nombreux passionnés et professionnels des secteurs mécanique et impression 3D.

### IV.2.1 La cabine de séchage

#### IV.2.1.1 La carrosserie

Pour la cabine de séchage nous avons opté pour une boîte de forme verticale de dimensions 112 cm*100 cm*100 cm (longueur-largeur-hauteur). Sa forme est inspirée de celle du séchoir Icaro 2000 décrit en Annexe 2. Sa structure est faite avec des tubes carrés en acier de 20 mm de côté, les parois de la cabine sont en tôle acier de 1 mm d'épaisseur peintes en noir. Une isolation de 4 cm en sciure de bois est faite sur la paroi basse de la cabine de séchage. Une porte de dimensions 96 cm*92 cm est ajoutée à la cabine pour permettre l'introduction et le retrait des claies (Figure 11).

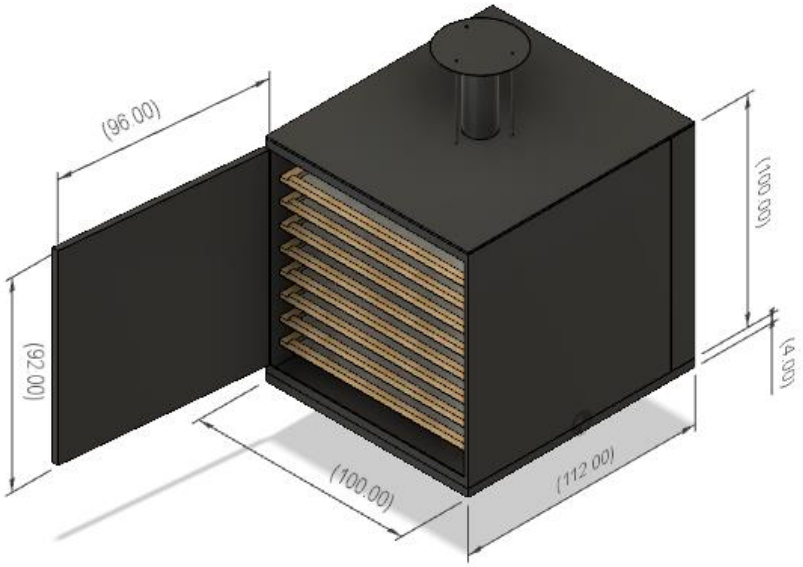


*Figure 11 : Dimensions de la cabine de séchage*

### IV.2.1.2 Les claies

Les claies sont au nombre de huit disposées sur des cornières soudées à l'intérieur sur les deux parois gauche et droite de la cabine, un espacement de 10 cm subsiste entre deux claies consécutives. Chaque claie a une dimension de 96 cm*90 cm soit une surface de 0,864 $m^2$ et une surface de séchage d'environ 7 $m^2$ pour les 20 kg de tomates (Figure 12).

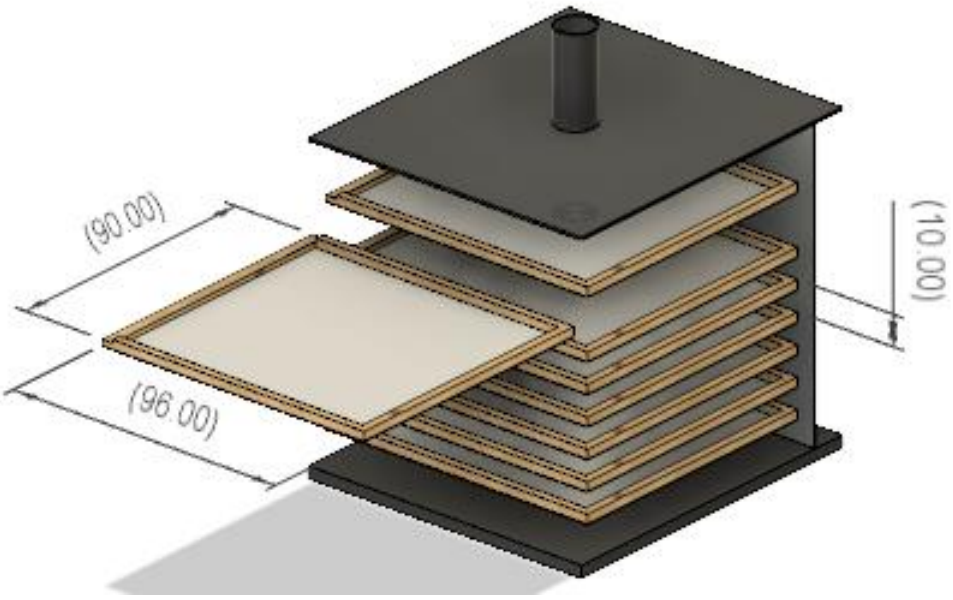


*Figure 12: Dimensions des claies*

#### IV.2.1.3 Le diffuseur d'air et la cheminée

Sur la face arrière de la cabine un orifice rectangulaire de dimensions 96 cm*12 cm est percé pour emboiter le capteur à air (Figure 12). Un diffuseur est placé à 11,7 cm de la face arrière de la cabine de séchage vers les claies. Ce diffuseur est percé de quatre orifices de forme carrée de 8 cm de côté placés de façon équidistante le long de la hauteur de la cabine (Figure 12). Trois ventilateurs DC de mêmes dimensions seront encastrés dans ces orifices. Ces ventilateurs vont aspirer l'air en provenance du capteur puis le refouler sur les claies. Une cheminée de 30 cm de hauteur et de 13 cm de diamètre est placée sur la paroi supérieure de la cabine pour permettre le renouvellement d'air dans ce dernier (Figure 12). Le diffuseur d'air a pour but de concourir à une distribution uniforme de l'écoulement d'air à l'intérieur de la cabine de séchage afin que les produits disposés sur les différentes claies puissent sécher en même temps.

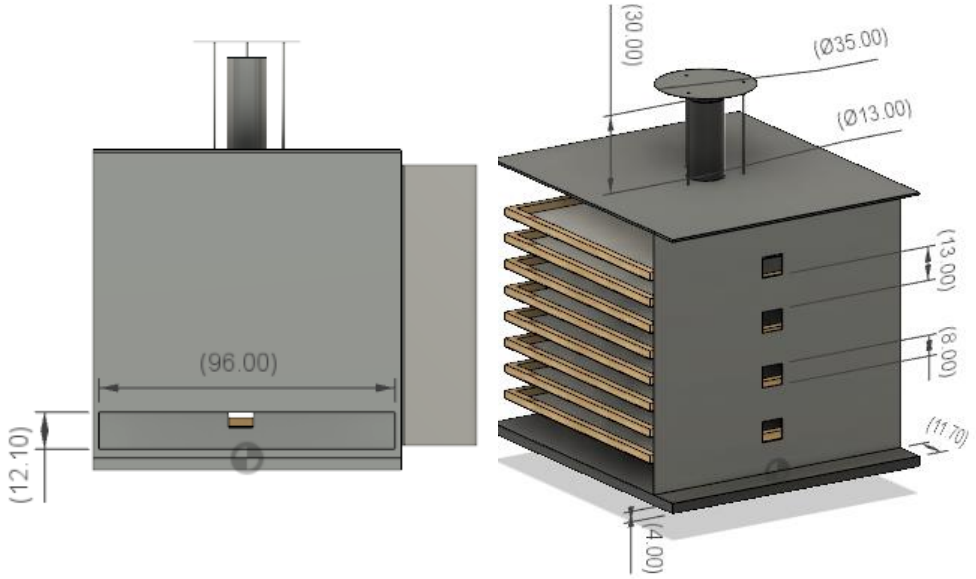


*Figure 13: Dimensions cheminée, diffuseur d'air et orifice d'emboitage du capteur*

### IV.2.2 Le capteur solaire

Le capteur est de forme rectangulaire avec une longueur de 2,5 m, une largeur de 1 m et une profondeur de 15,45 cm qui est repartie entre les différents éléments du capteur selon la Figure *14*. L'absorbeur est ondulé en forme de V de sorte à avoir une surface effective de 5 $m^2$ avec des ondulations sur 2,5 m. Ces ondulations qui sont au nombre de 25 sont toutes identiques, de forme triangulaire de 10 cm de côté (Figure 14). L'espace libre entre la couverture en verre de 4 mm et l'absorbeur est de 3 cm. En effet la distance couverture-absorbeur doit être de 3 à 4 cm pour minimiser le transfert de chaleur de l'absorbeur vers la couverture [17]. Une isolation de 3 cm en sciure de bois

est introduite entre les deux plaques en tôle en dessous de l'absorbeur ondulé. Une petite extension de 10 cm du capteur vers le côté cabine permettra d'emboiter les deux unités (Figure 14).

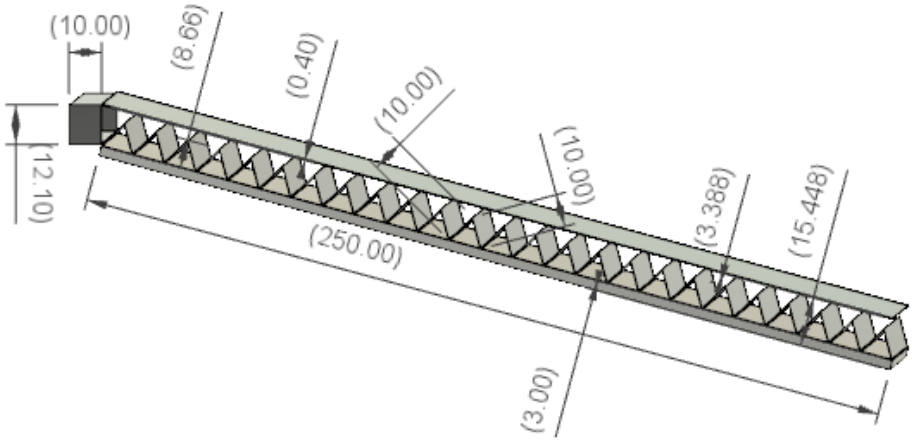


*Figure 14: Cotation du capteur à air*

### IV.2.3 Les supports du séchoir

Pour conférer une inclinaison à notre séchoir, les supports de la cabine et du capteur doivent être dimensionnés à cet effet. Pour avoir une inclinaison de 40° du capteur, la cabine doit être positionnée à 210 cm du sol. Nous avons jugé cette distance trop haute au risque de porter préjudice à l'ergonomie du dispositif. L'inclinaison a donc été réduite à 15°, en considérant des supports de 15 cm au-devant du capteur, les supports de la cabine doivent avoir une hauteur de 82 cm (Figure 15) pour satisfaire l'inclinaison de 15°. La différence du rayonnement reçue par rapport au cas où on confère au capteur l'inclinaison optimale de 40° est de 6%.

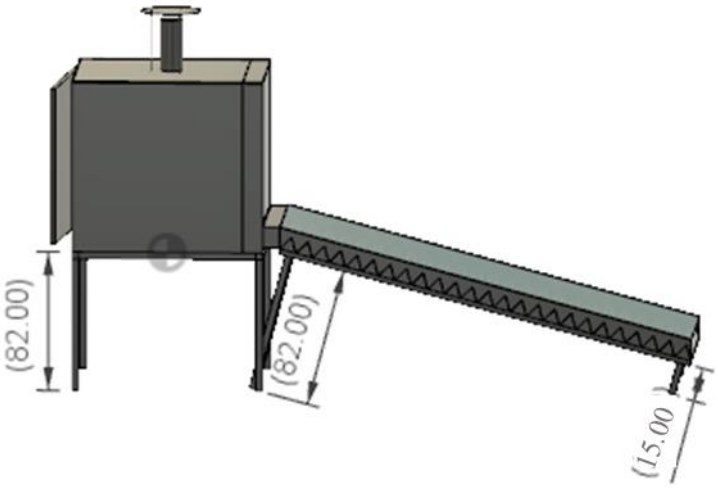


*Figure 15: Cotation des supports du séchoir*

### IV.2.4 Les accessoires annexes du séchoir solaire

#### IV.2.4.1 Les Ventilateurs

Le séchoir étant un séchoir à convection forcée, des ventilateurs doivent donc être insérés dans le dispositif. Comme ce fut mentionné plus haut, dans notre dispositif quatre ventilateurs hélicoïdaux sont prévus sur le diffuseur d'air placé dans la cabine de séchage. Ce sont des ventilateurs recyclés de boitiers d'ordinateur (figure 16) disponibles sur le marché local à très bon prix. Les caractéristiques des ventilateurs diffèrent d'une marque à une marque. Les principales caractéristiques de ces types de ventilateurs sont consignées dans le Tableau 4.

*Figure 16: Ventilateur pour le diffuseur d'air*

*Tableau 4 : Caractéristiques des ventilateurs pour l'aération*

| **Désignation** | **Unités** | **Variation** |
|---|---|---|
| **Débit** | $m^3/h$ | 17-30 |
| **Vitesse de rotation** | tour/min | 1200-2000 |
| **Dimensions** | cm | 8*8*2,5 |
| **Puissance électrique** | W | 1,8-5 |
| **Tension** | V | 12 V |

Le nombre de ventilateurs (quatre) a été choisi afin de pouvoir satisfaire au minimum le débit d'air moyen de 71 $m^3/h$ requis pour le séchage des 20 Kg de tomates, résultat obtenu suite au dimensionnement se trouvant plus haut (Tableau 2).

#### IV.2.4.2 Le module photovoltaïque

Un module photovoltaïque permettra d'alimenter les ventilateurs en électricité, ce module sera combiné avec un stockage d'énergie pour assurer l'aération des produits pendant la nuit comme le séchage est prévu pour deux jours d'ensoleillement.

- La puissance minimale du module photovoltaïque est calculée comme suit :

$$P_{cmin} = \frac{P_n * n * t}{G * \eta_{gen} * \eta_{bat}} \quad (14)$$

- La capacité minimale de la batterie d'accumulateurs à avoir est calculée selon la formule qui suit

$$C_{bAtmin} = \frac{P_n * N * t}{U_{bat} * \eta_{bat} * DM} * N_{Jaut} \quad (15)$$

Avec :

- $P_c$ : Puissance crête minimale du générateur PV (Wc) ;
- $P_n$ : Puissance nominale d'un ventilateur (W), ici nous allons considérer 5 W;
- $n$ : Nombre de ventilateurs (4 ventilateurs sur le diffuseur d'air) ;
- $G$ : Ensoleillement global moyen journalier du mois le moins ensoleillé sur le plan du module, (Mois de Décembre : 5007 $Wh \cdot m^{-2} \cdot j^{-1}$ , Annexe 5 : Tableau 8);
- t : Nombre d'heures d'utilisation des ventilateurs par jour (10 heures) ;
- $\eta_{gen}$ : Rendement du générateur PV (Pertes dues à la poussière, à l'échauffement du module, au câblage, etc.). Valeur typique de 80 % ;
- $C_{bAtmin}$ : Capacité minimale de la batterie (Ah)
- $U_{bat}$ : Tension nominale de la batterie d'accumulateurs (12 V) ;
- $\eta_{bat}$ : Rendement d'une batterie d'accumulateurs (80%) ;
- $DM$ : Décharge profonde de l'accumulateur DM (75%) ;
- $N_{Jaut}$ : Nombre de jour d'autonomie (0,5 jour).

Apres calcul, un module photovoltaïque de 50 Wc et une batterie de 5 Ah permettent de subvenir largement aux besoins énergétiques des ventilateurs d'aération du séchoir de jour comme de nuit.

# V. Modélisation numérique (CFD) du prototype

La modélisation CFD d'un modèle de séchoir permet d'éliminer les coûts financiers liés au développement de modèles non valables et à leur validation expérimentale. Dans cette optique nous allons procéder à une analyse CFD du séchoir afin de pouvoir juger de la nécessité ou pas d'apporter des modifications au niveau du prototype conçu. La Figure 17 est une vue de côté du séchoir modélisé en 3D, comme on peut le remarquer sur cette figure, le séchoir peut être sectionné en trois partie dont :

- Une qui correspond au capteur à air en entier
- Une deuxième qui va de l'orifice d'emboitement du capteur dans la cabine au diffuseur d'air logé dans la cabine
- Et une troisième qui va du diffuseur d'air à la porte de la cabine

Cette dernière partie qui correspond à la cabine de séchage proprement dit, fera l'objet de notre étude CFD. La cabine de séchage est le composant le plus important du séchoir. En effet dans cette zone, le flux d'air chaud provenant du capteur va sécher les produis disposés sur les différentes claies. De même la cheminé, assure le renouvellement de l'air à l'intérieur du séchoir. Ainsi selon la configuration de la cheminé sur le séchoir, le comportement de ce dernier peut changer en conséquence. Le but de la modélisation sera d'analyser l'uniformité de la distribution de l'écoulement d'air et de température à l'intérieur de la cabine pour deux positions de la cheminée afin de juger du meilleur emplacement de cette dernière sur la paroi supérieure de la cabine.

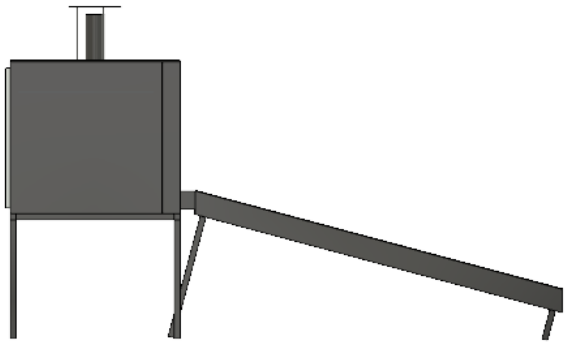

*Figure 17: Prototype modélisé vue de coté*

## V.1 Présentation de la CFD et du logiciel de travail

### V.1.1 Définition au CFD

La mécanique des fluides numériques, généralement abrégée en CFD (Computation Fluid Dynamics), est une branche de la mécanique des fluides qui utilise des modélisations mathématiques

et des algorithmes de simulations numériques pour analyser et résoudre des problèmes impliquant des écoulements de fluides [22]. Des ordinateurs sont utilisés pour effectuer les calculs nécessaires pour simuler l'interaction du fluide avec des surfaces définies par des conditions aux limites. Elle fournit une prédiction qualitative et parfois quantitative des écoulements de fluides aux moyens de :

- modélisations mathématiques (équations aux dérivées partielles) ;
- méthodes numériques (discrétisations et techniques de résolution) ;
- outils logiciels (solveurs, utilitaires de pré et de post-traitement).

### V.1.2 Applications du CFD

La CFD est utilisée de nos jours dans presque tous les domaines : Aérospatiale, Architecture, Automobile, Biomédical, Procédés chimiques, Combustion, Électronique, Electricité, Informatique, Mécanique, Métallurgie, Chauffage, Ventilation et Refroidissement, Nucléaire etc [23].

Les simulations numériques des écoulements de fluides permettent par exemple:

- Aux architectes de concevoir des environnements de vie confortables et sûrs ;
- Aux ingénieurs chimistes de maximiser le rendement de leurs équipements ;
- Aux ingénieurs pétroliers d'élaborer des stratégies optimales de récupération du pétrole ;
- Aux chirurgiens de soigner les maladies artérielles (hémodynamique) ;
- Aux météorologues de faire des prévisions météorologiques et de catastrophes naturelles ;
- Aux experts en sécurité de réduire les risques sanitaires liés aux radiations et autres dangers ;
- Aux organisations militaires de développer des armes et d'estimer leurs dégâts.

### V.1.3 ANSYS Fluent

Notre étude CFD sera faite à l'aide de l'outil ANSYS Fluent (version académique 2020) de l'éditeur de logiciels ANSYS. ANSYS Fluent est un outil de simulation CFD qui utilise des modèles de mathématiques appliqués pour générer des simulations d'écoulement pour l'estimation du transfert de masse, de chaleur et de quantité de mouvement. Une analyse CFD implique des considérations incluant température, vitesse et débit massique. Il donne des résultats qui permettent aux chercheurs d'optimiser une conception et ses performances globales. D'une manière générale, le logiciel d'analyse CFD permet d'économiser en temps et en argent dans des observations expérimentales pour la validation des performances d'un modèle. Pour résoudre tout phénomène physique à l'aide du logiciel ANSYS Fluents, les étapes suivantes sont à suivre:

- La conception de la géométrie (le domaine de calcul) au moyen de tout logiciel de CAO ou du DesignModeler de ANSYS.
- La génération du maillage qui est la subdivision du domaine en un certain nombre de sous-domaines plus petits (cellules). La précision des solutions CFD et leur temps de calcul sont régis par la qualité du maillage [23]. Une bonne qualité de maillage repose sur la minimisation des éléments présentant des distorsions (skewness en anglais), et sur une bonne résolution (maillage fin) dans les régions présentant un fort gradient (couches limites, ondes de choc, etc) [24].
- Définition des propriétés des matériaux et des conditions aux limites du domaine de chaque composante du système à étudier.
- Clarification des équations de conservation à appliquer à chaque cellule du maillage généré.
- Et enfin une illustration graphique des résultats obtenus qui peuvent être suivis d'un post traitement.

Toutes ces étapes se résument dans le logiciel ANSYS Fluent suivant la Figure 18 ci-dessous :

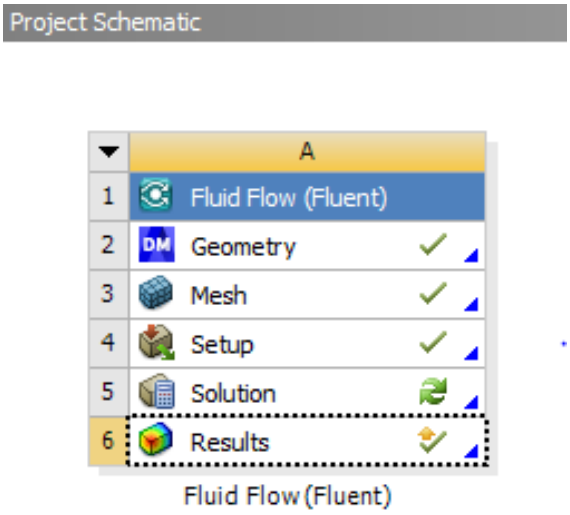


*Figure 18: Vue schématique de l'analyse dans le logiciel*

En générale, pour la simulation d'un modèle, il est nécessaire de sélectionner les équations appropriées à résoudre par le logiciel. Pour un modèle commun qui nécessite le calcul des propriétés du fluide de travail comme la vitesse, la température et la pression, il est essentiel de résoudre de nombreuses équations de conservation régissant le comportement de l'écoulement. Diverses équations directrices sont données selon [25] comme:

- L'équation de continuité

En mécanique de fluide, le principe de conservation de la masse peut être décrit selon l'équation suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \tag{11}$$

Où $\rho$ est la masse volumique du fluide, $t$ le temps et $v$ la vitesse.

- Equation de la quantité de mouvement

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide lors de son mouvement et les causes qui le produisent. Il s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla p + \rho g + F \tag{12}$$

Où p est la pression, $g$ la force gravitationnelle, $F$ les forces extérieures, $t$ le temps et $v$ la vitesse.

- Equation de l'énergie

Le principe de conservation de l'énergie s'écrit suivant l'équation qui suit :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [v(\rho E + p)] = 0 \tag{13}$$

Où p représente la pression ; $v$ la vitesse, $\rho$ la masse volumique du fluide et E l'énergie totale du fluide.

Les équations de conservation présentées ci haut n'ont pas de solutions analytiques connues d'où l'intérêt de faire appel à des logiciels utilisant des techniques de résolution numériques par approximation (la discrétisation). Le développement des techniques de résolution numérique telles que les méthodes de différences finies, éléments finis et volumes finis ont permis de mettre au point des codes de calcul traitant des problèmes de la mécanique des fluides. Pour le cas du logiciel ANSYSFluent, son code de calcul est basé sur la méthode des volumes finis.

## V.2 Méthodologie de la modélisation dans ANSYS Fluent

### V.2.1 Création de la géométrie du domaine d'étude

La Figure 19 présente les deux configurations de la cabine, toutes les deux géométries ont les mêmes dimensions sur tous les aspects. Cependant la cheminée sur la deuxième configuration à gauche sur la figure, est déplacée du centre de la paroi vers la porte de la cabine à moins 4 cm de ce dernier.

Toutes les deux géométries ont été conçues dans le logiciel de CAO Fusion 360 à cause de sa flexibilité puis exportées dans l'interface DesignModeler de ANSYS Fluent, qui est spécialement conçu pour la création et la préparation de la simulation.

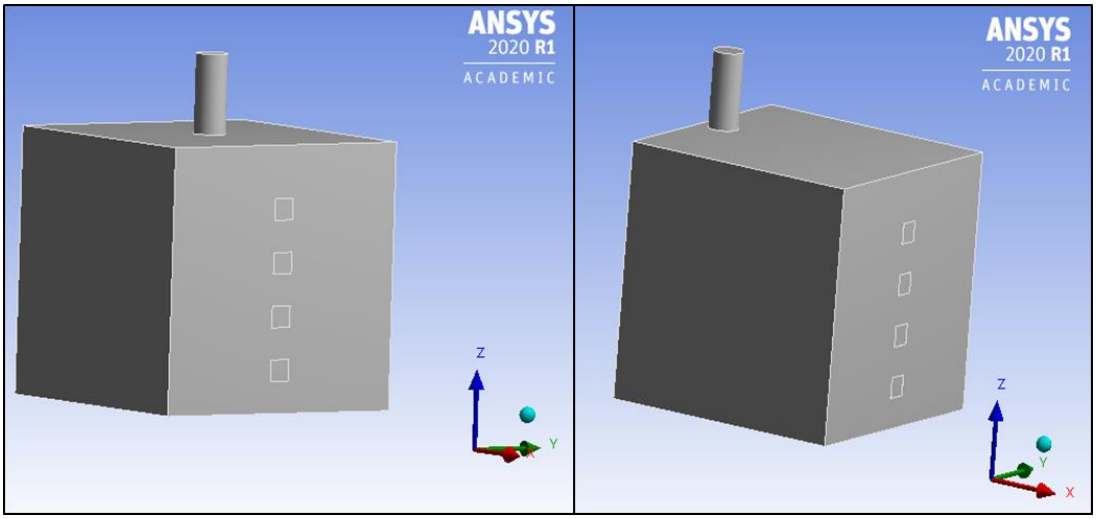


*Figure 19: Géométries des deux configurations de la cabine de séchage*

### V.2.2 Maillage du domaine d'étude

Pour discrétiser les équations gouvernant l'écoulement, le logiciel utilise la méthode des volumes finis qui consiste d'abord à discrétiser le domaine d'étude en utilisant un maillage. Les équations aux dérivées partielles sont ensuite discrétisées (transformées) en équations algébriques en les intégrant sur chaque volume de contrôle [26]. La Figure 20 représente les maillages des domaines des deux configurations de la cabine. Ce sont des maillages obtenus par l'outil de maillage du logiciel. Les caractéristiques de chaque maillage sont consignées dans le Tableau 4.

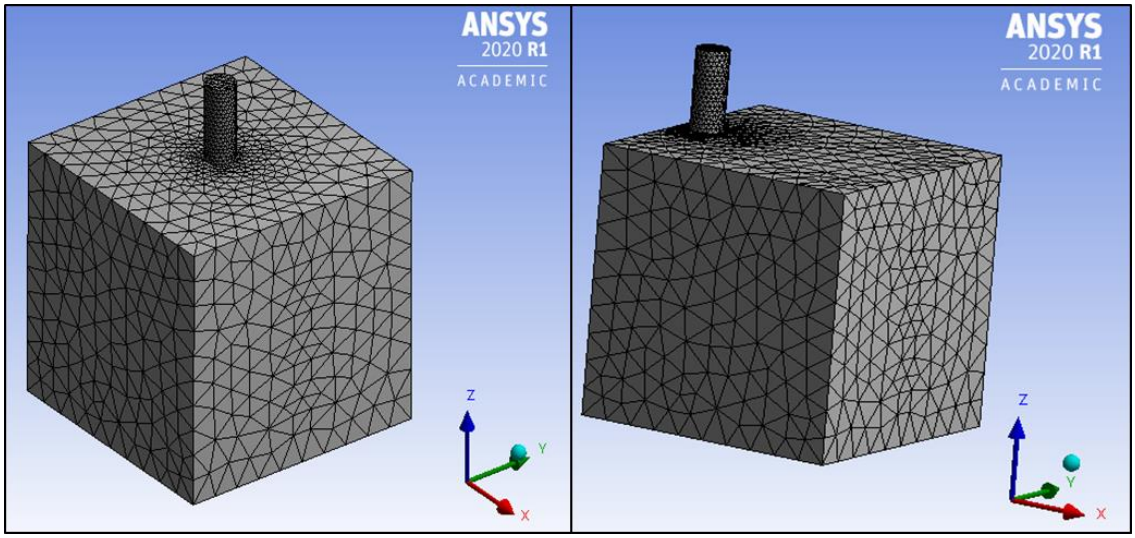


*Figure 20: Géométries maillées des deux configurations*

*Tableau 5 : Caractéristiques des maillages des deux configurations*

| Caractéristiques du Maillage | Configuration 1 | Configuration 2 |
|---|---|---|
| **Nombre de nœuds** | 3479 | 3344 |
| **Nombre d'éléments** | 16716 | 15787 |
| **Type de maillage** | triangulaire et structuré | triangulaire et structuré |

### V.2.3 Configurations pour les calculs

#### V.2.3.1 Vérification de la qualité des maillages

Avant d'entreprendre toute action dans l'interface de configuration pour les calculs, il est nécessaire de vérifier la qualité du maillage généré. En effet comme nous l'avons dit plus haut, la qualité du maillage a un impact considérable sur la précision des résultats qui seront obtenus. Cette vérification se fait au niveau des généralités de la fenêtre configuration. Notons que dans le guide d'utilisation du logiciel [27], il est stipulé que cette qualité se vérifie à l'aide de l'indicateur « Minimum Orthogonal Quality ». Cet indicateur a une valeur variant de 0 à 1, les valeurs proches de 0 correspondent à un maillage de faible qualité. Quant aux valeurs proches de 1, elles indiquent une bonne qualité du maillage. En général, l'orthogonalité minimale ne doit pas être inférieure à 0,01 [27]. Pour les maillages de nos deux modèles, cet indicateur est de 2.54338e-01et 1.60023e-01 respectivement pour la configuration 1 et la configuration 2.

#### V.2.3.2 Modèle de turbulence

Les équations qui gouvernent l'écoulement convectif de l'air à l'intérieur d'un séchoir solaire sont basées sur les principes de la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie dont les équations ont été décrites plus haut. Le modèle k-ε epsilon standard est activé pour la description de l'écoulement turbulent. Bien qu'il existe plusieurs modèles de turbulence, le modèle k-ε standard reste encore une référence et ses applications se retrouvent dans de nombreuses études [26, 27]. D'après [30], les équations du modèle k-ε sont :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k})\nabla k\right] + P_k - \rho\varepsilon \tag{14}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon})\nabla \varepsilon\right] + \frac{\varepsilon}{k}(C_{\varepsilon 1}P_k - C_{\varepsilon 2}\rho\varepsilon) \tag{15}$$

Où $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, $\sigma_k$ et $\sigma_\varepsilon$ sont des constantes données comme : $C_{\varepsilon 1} = 1{,}44$, $C_{\varepsilon 2} = 1{,}12$, $\sigma_k = 1$ et $\sigma_\varepsilon = 1{,}3$.

Avec $\rho$ la masse volumique, P la pression, U le vecteur vitesse, $\mu$ le coefficient de viscosité dynamique, $P_k$ la production de turbulence due à la viscosité, $\mu_t$ la viscosité turbulente, $\varepsilon$ le taux de dissipation des turbulences et k l'énergie cinétique de turbulence par unité de masse.

#### V.2.3.3 Propriétés des matériaux

ANSYS Fluent dispose d'une base de données de quelques matériaux et fluides. Ainsi les propriétés de l'acier, matériau des parois de la cabine ont été ajoutées à notre étude depuis cette base de données. Il en a été de même pour l'air qui est le fluide du domaine d'étude. Quant à l'isolation qui est en sciure de bois, ses propriétés ont été ajoutées manuellement. Le tableau 6 présente les propriétés de ces matériaux et du fluide.

*Tableau 6: Propriétés des matériaux utilisés dans la modélisation CFD*

| | **ρ (kg/m$^3$)** | **$C_P$ (J·kg$^{-1}$·K)** | **λ (W·m$^{-1}$·K)** | **α** |
|---|---|---|---|---|
| **Air** | 1,225 | 1006,43 | 0,0242 | - |
| **Acier** | 8030 | 502,48 | 16,17 | 0,8 |
| **Sciure de bois** | 190 | 2310 | 0,06 | 0,6 |

#### V.2.3.4 Conditions aux limites

La simulation numérique est conditionnée par des conditions initiales et des conditions aux limites appliquées aux frontières du domaine. Le fluide dans le séchoir solaire est initialement au repos et à une température uniforme égale à la température ambiante considérée (26°C). Selon la Figure 21 les conditions limites suivantes ont été appliquées au domaine d'étude.

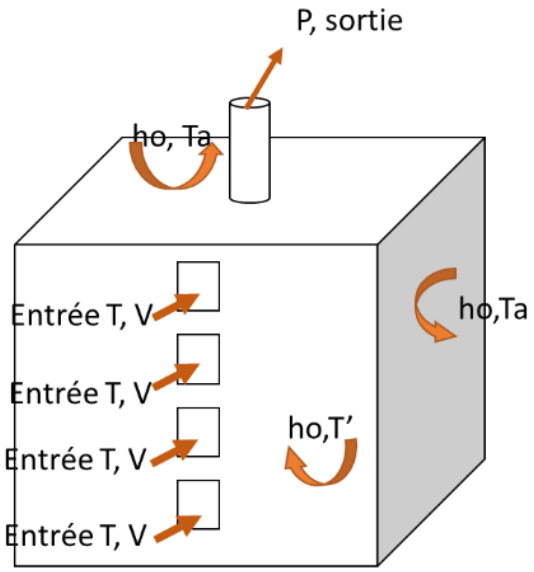


*Figure 21:Conditions aux limites du domaine d'étude*

Les quatre entrées d'air de la cabine de séchage ont été considérées comme des entrées de vitesse «Velocity Inlet » avec une vitesse de V= 5 m/s en considérant une vitesse de rotation des ventilateurs du diffuseur de la cabine de 1200 tour/min pour un rayon de la roue de 4 cm (Tableau 4).

$$\Omega = \frac{2\pi N}{60} \tag{16}$$

$$\mathrm{V} = \Omega \mathrm{R} \tag{17}$$

Avec :

- $\Omega$ : Vitesse angulaire (rad/s)
- $N$ : Nombre de tours de la roue du ventilateur par unité de temps (tour/min)
- $R$ : Rayon de la roue du ventilateur (m)
- V : Vitesse périphérique de la roue (m/s)

Le flux d'air entrant est supposé à T= 60°C pour être en accord avec la température de séchage considérée dans le dimensionnement (Tableau 1). La sortie de la cheminée est configurée comme une sortie de pression « Pressure Outlet » à une pression atmosphérique P= $10^5$Pa. Quant aux parois latérales de la cabine, elles ont été configurées comme des « Wall » exposées à une convection extérieure de coefficient $h_0$ =11,8 W·m$^2$·K. Considérant une vitesse du vent extérieur de $V_0$= 3 m /s , ce coefficient est calculé suivant la corrélation de Watmuff [31] ci-dessous. La température de l'air ambiant est considérée à Ta= 26°C pour les trois parois extérieures. Pour le diffuseur d'air, paroi

servant d'interface entre une paroi extérieure et l'intérieur de la cabine, pour son cas, la température de l'air de convection est configurée à T'=60°C. Toutes ces conditions sont résumées dans le Tableau 7.

$$h_0 = 2{,}8 + 3V_0 \quad (18)$$

*Tableau 7: Les conditions aux limites de la cabine pour toutes les deux configurations*

| | Nombre | Type de limite | Paramètres configurés |
|---|---|---|---|
| **Entrée** | 4 | Velocity Inlet | • Température : 60°C<br>• Vitesse : 5 m/s |
| **Sortie** | 1 | Pressure Oulet | • Pression : $1010^5$Pa |
| **Paroi verticale extérieure** | 3 | Wall | • Coefficient de convection : 11,8 W·m$^2$·K<br>• Température de l'air en convection : 26°C<br>• Epaisseur du mur : 1 mm<br>• Matériau : Acier |
| **Paroi verticale intérieure** | 1 | Wall | • Coefficient de convection : 11,8 W·m$^2$·K<br>• Température de l'air en convection : 60°C<br>• Epaisseur du mur : 1 mm<br>• Matériau : Acier |
| **Paroi horizontale (bas)** | 1 | Wall | • Coefficient de convection : 11,8 W·m$^2$·K<br>• Température de l'air en convection : 26°C<br>• Epaisseur du mur : 3 cm<br>• Matériau: Sciure de bois |
| **Paroi horizontale (haut)** | 1 | Wall | • Coefficient de convection : 11,8 W·m$^2$·K<br>• Température de l'air en convection : 26°C<br>• Epaisseur du mur : 1 mm<br>• Matériau : Acier |

## V.3 Résultats et discussions

La modélisation du séchoir a été réalisée sans tenir compte des claies et du produit à sécher. Les contours sur les plans horizontaux et verticaux dans la chambre de séchage ont été visualisés à l'aide de l'interface CFD POST du logiciel.

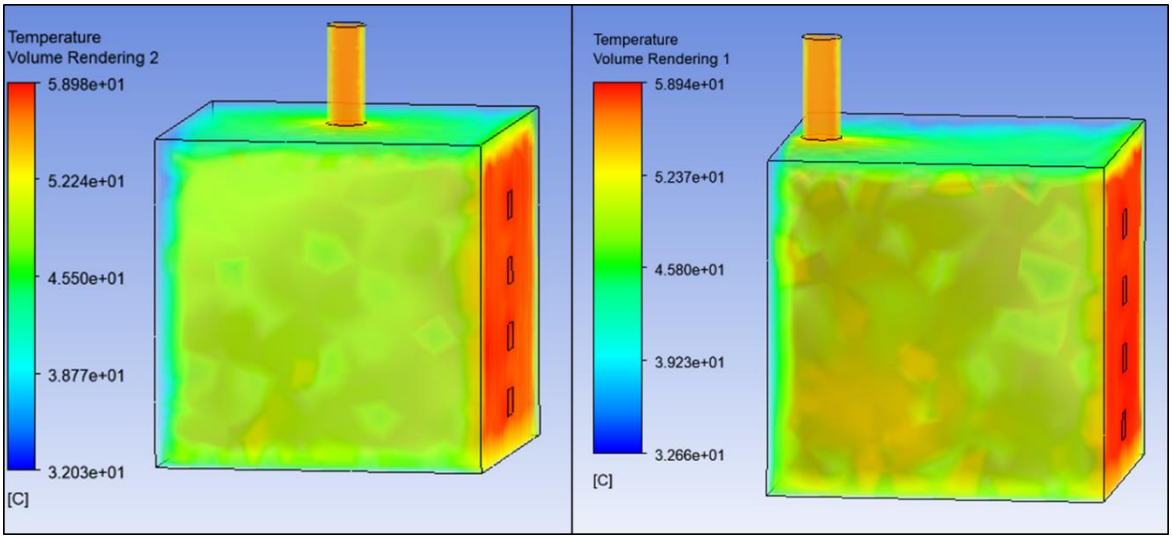


*Figure 22: Température du volume d'air de la cabine de séchage pour les deux configurations*

La Figure 22 illustre la température du volume d'air qui avoisine les parois de cabine de séchage. Comme on peut le remarquer sur l'image et les légendes de couleurs, la température du volume d'air dans le séchoir pour toutes les deux configurations varie de de 40°C à 59°C, la plus basse température étant observée aux frontières des parois extérieures. On remarque aussi une température élevée au niveau des entrées du séchoir du côté du diffuseur exposé à une convection d'air de température équivalente à celle de l'air asséchant (60°C) comparé aux parois exposées à l'air ambiant (26°C). De même le volume d'air semble plus foncé et plus uniforme sur la deuxième configuration comparée à celui du premier. Cette illustration ne permettant une bonne analyse distinctive de la distribution de température entre les deux configurations, une vue en plan est générée selon la Figure 23.

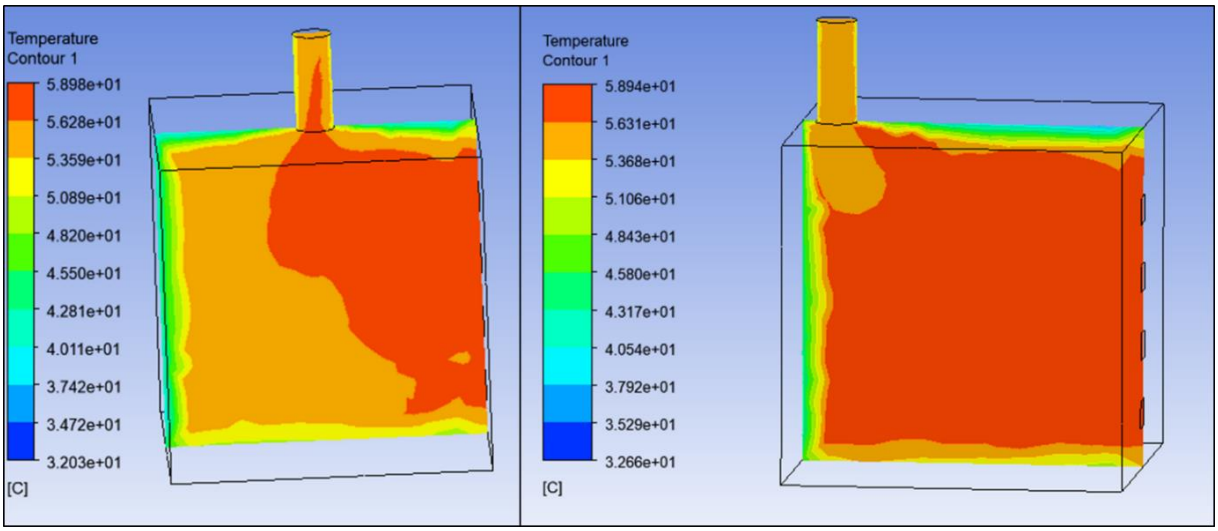


*Figure 23: Distribution de la température sur un plan vertical de la cabine de séchage*

La Figure 23 représente la distribution de la température sur un plan vertical placé au centre de la cabine pour chacune des deux configurations. Les isothermes sur ce plan pour toutes les deux configurations varient de de 40°C à 59°C dont les plus influents sont ceux allant de 53°C à 59°C. On remarque aussi une meilleure uniformité de la distribution de la température sur la deuxième configuration.

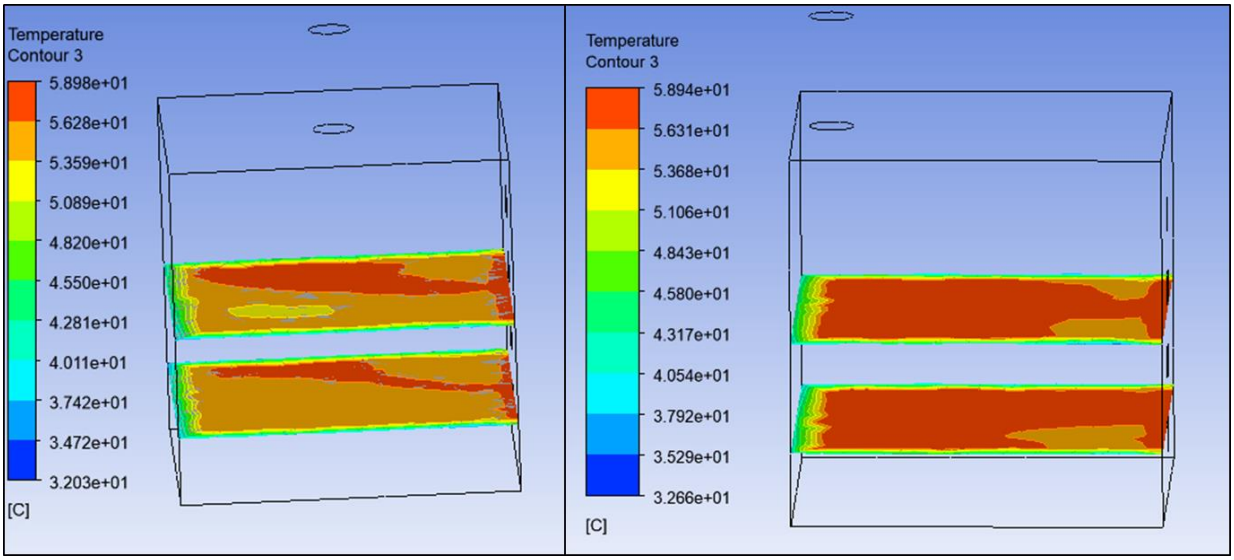


*Figure 24:Distrubution de la température sur les plans des claies*

La Figure 24 modélise la distribution de la température sur des plans assimilables à des claies de la cabine pour chaque configuration de cette dernière. Les contours de température varient de 45°C à 59°C dont les plus faibles sont localisés au niveau des extrémités des claies situées à côté des parois extérieures. Les plus dominants sur chaque claies sur les deux configurations sont les contours variant de 53°C à 56°C et ceux variant de 56 à 59°C. Cependant, sur les claies de la deuxième configuration la distribution de la température est visuellement plus uniforme.

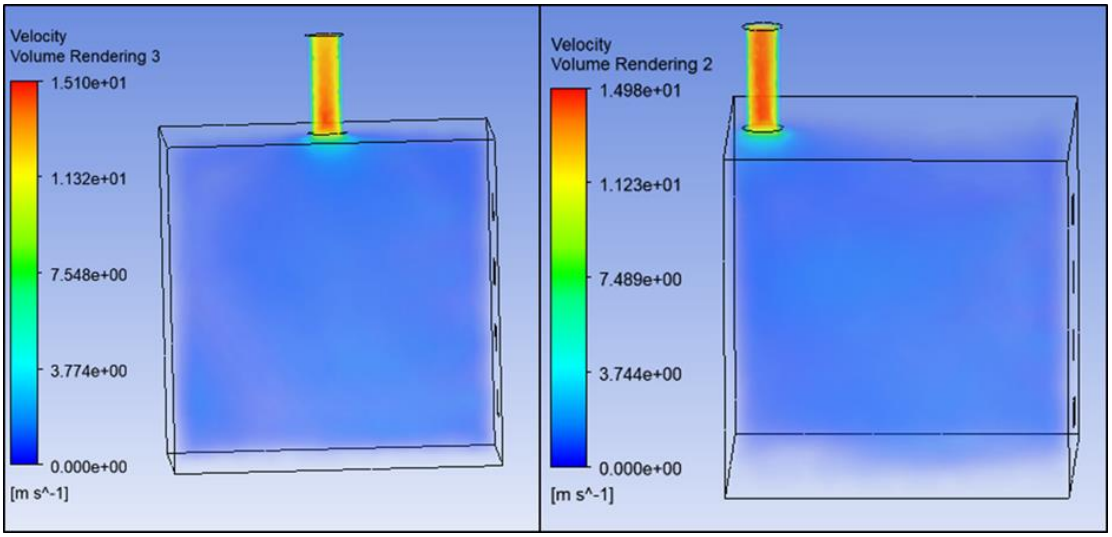


*Figure 25: Vitesses dans le volume de la cabine*

La Figure 25 est une illustration des courants de vitesse dans la totalité du volume de la cabine. Pour chacune des configurations, les courants de vitesse dans l'ensemble du volume de la cabine sont inférieurs à 3 m/s si on se réfère aux légendes de couleurs. Cette illustration ne permettant pas aussi une bonne analyse de la distribution de vitesse étant une vue globale, une vue en plan est modélisée suivant la Figure 26.

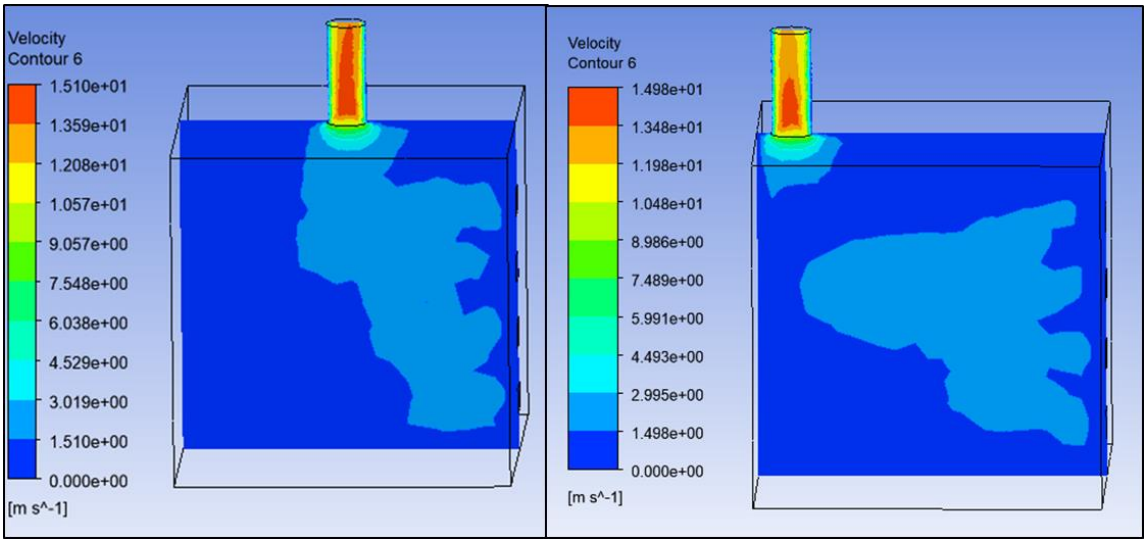


*Figure 26:Distrubution de la température sur un plan vertical de la cabine de séchage*

La Figure 26 illustre la distribution de la vitesse sur un plan vertical central de la cabine. Comme le démontrent les légendes de couleurs sur la figure, les contours de vitesse observés sur ce plan sont en accord avec ceux observés sur la figure précédente, les vitesses sont inférieures à 3 m/s pour toutes les deux différentes configurations. Les vitesses les plus élevées étant localisées au niveau des cheminées

avec une vitesse d'entrée de 4,5 m/s qui s'accentue jusqu'à 13 m/s aux centres des cheminées de chacune des configurations. Cependant les courants de vitesse variant de 1.5 m/s à 3 m/s sont plus dominats sur la deuxième configuration, ils balayent aussi un large espace en direction de la porte par rapport à la première configuration.

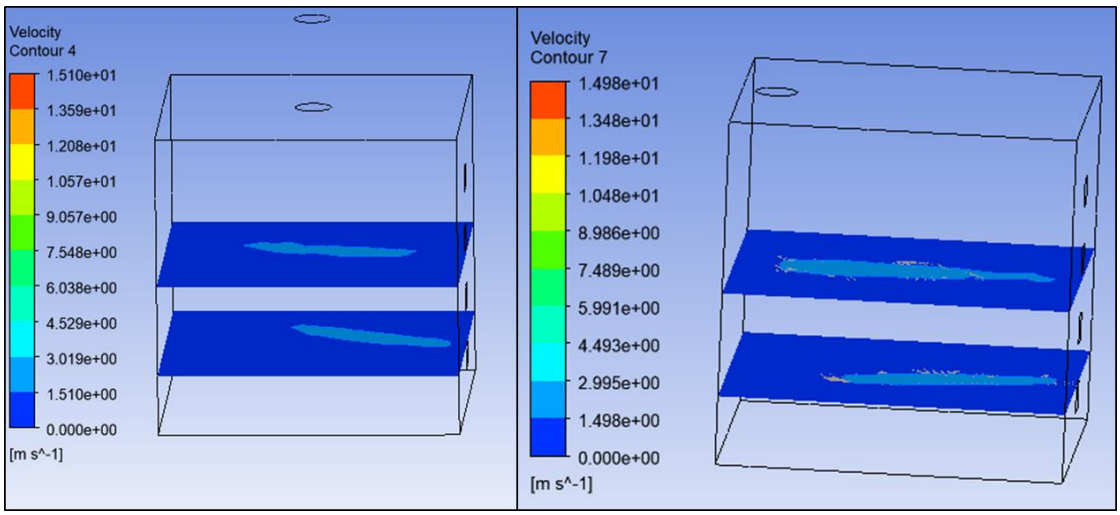


*Figure 27: Distribution de la vitesse sur les plans des claies*

La Figure 27 présente la distribution de l'écoulement d'air sur les plans des claies de la cabine. Comme on peut le remarquer sur l'image, les contours de vitesse sur les claies sont majoritairement inférieurs à 1,5 m/s. Mais les centres des claies enregistrent des courants d'air de vitesses supérieures à 1,5 m/s voir jusqu'à 3 m/s sur des petites superficies. Sur la deuxième configuration, les superficies occupées par ces courants de vitesses supérieures à 1,5 m/s sont un peu plus larges comparées à celles de la première configuration.

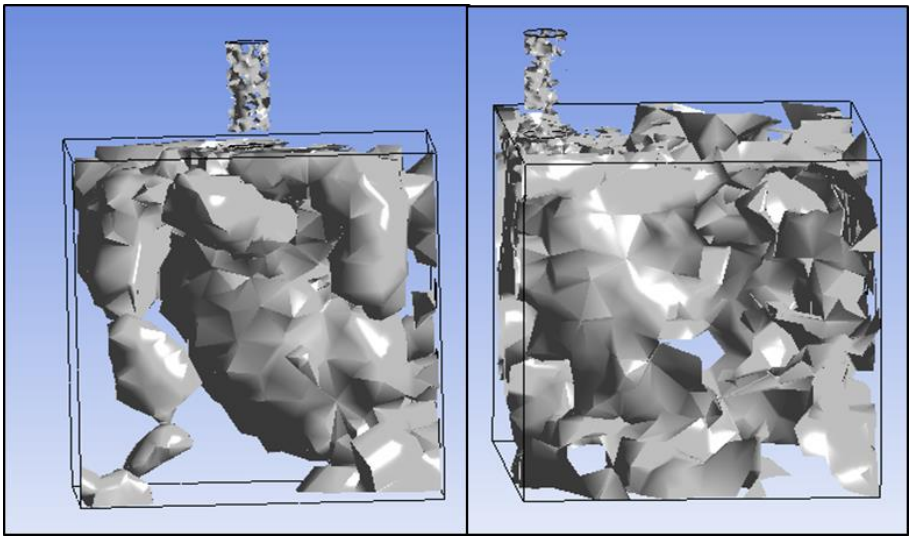

*Figure 28: Tourbillons d'air dans la cabine selon la configuration*

La Figure 28 est une modélisation des tourbillons découlant de l'écoulement d'air dans les deux différentes configurations de la cabine de séchage. La deuxième configuration avec la cheminée déplacée vers la porte est caractérisée par de nombreux tourbillons, mieux répartis dans l'ensemble de la cabine comparée à la première configuration. Les tourbillons étant une caractéristique des écoulements turbulents et le transfert de masse et de chaleur étant meilleur en régime turbulent, on peut escompter un échange thermique bien meilleur entre les produits et l'air asséchant avec la deuxième configuration de la cabine.

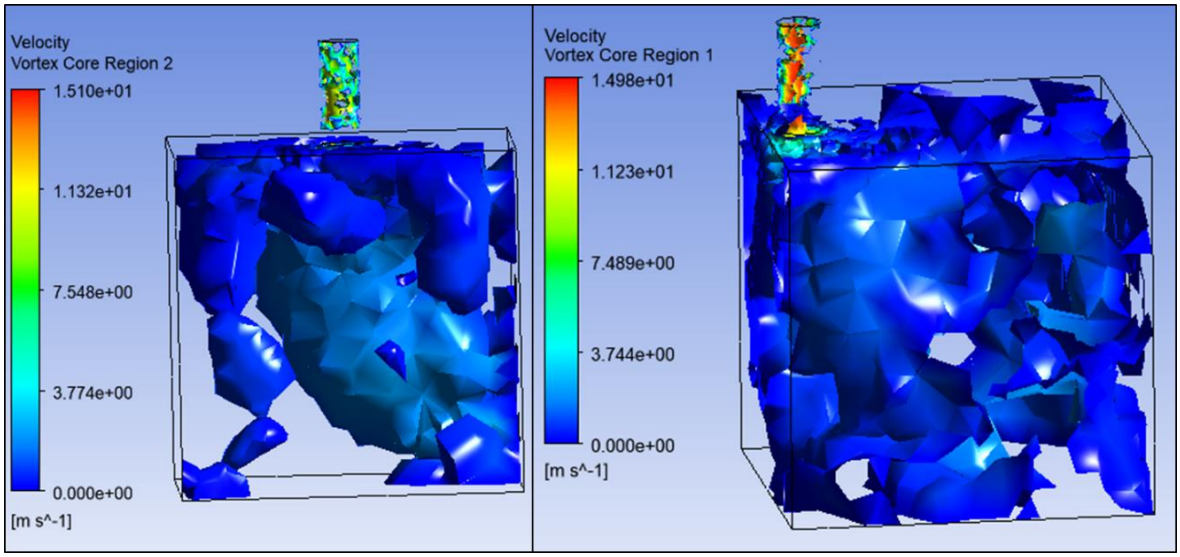


*Figure 29: Vitesses des tourbillons dans la cabine*

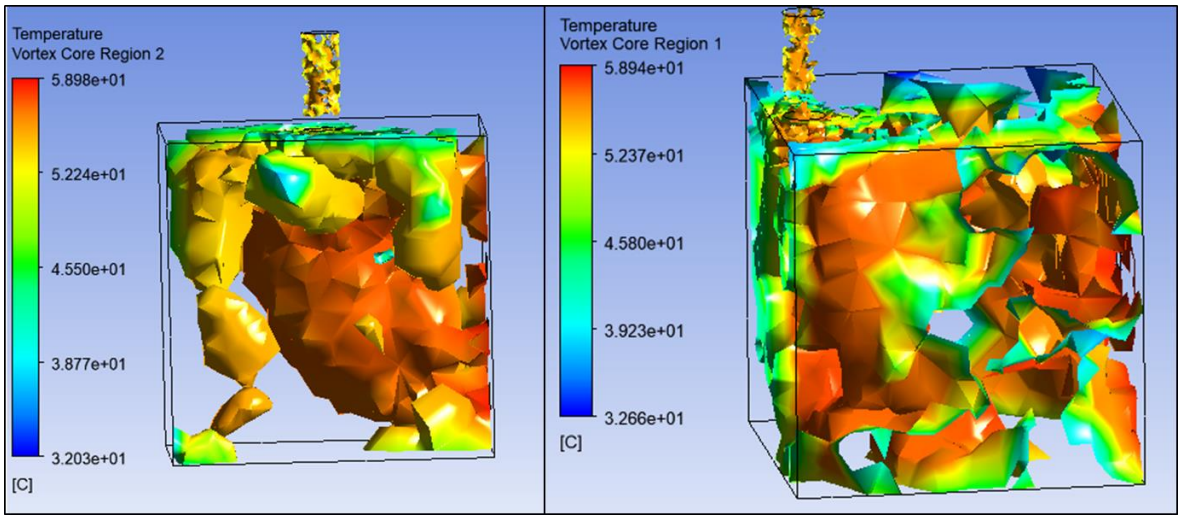


*Figure 30:Températures des tourbillons dans la cabine*

Les Figure 29 et Figure 30 modélisent respectivement les vitesses des tourbillons d'air et leurs températures pour les deux configurations de la chambre de séchage. Avec les légendes de couleurs

en appuis, on remarque que les variations de vitesse et de température dans les tourbillons sont en accord avec celle observées dans les précédentes illustrations.

Á l'issue de cette modélisation CFD, la configuration de la cabine de séchage avec la cheminée à l'extrême ressort comme la configuration permettant une distribution uniforme de l'écoulement d'air et de la température dans la cabine. La Figure 31 est une vue d'ensemble du séchoir remodélisé mécaniquement avec la modification de l'emplacement de la cheminée. D'autres vues détaillées du séchoir solaire sont insérées à l'Annexe 10.

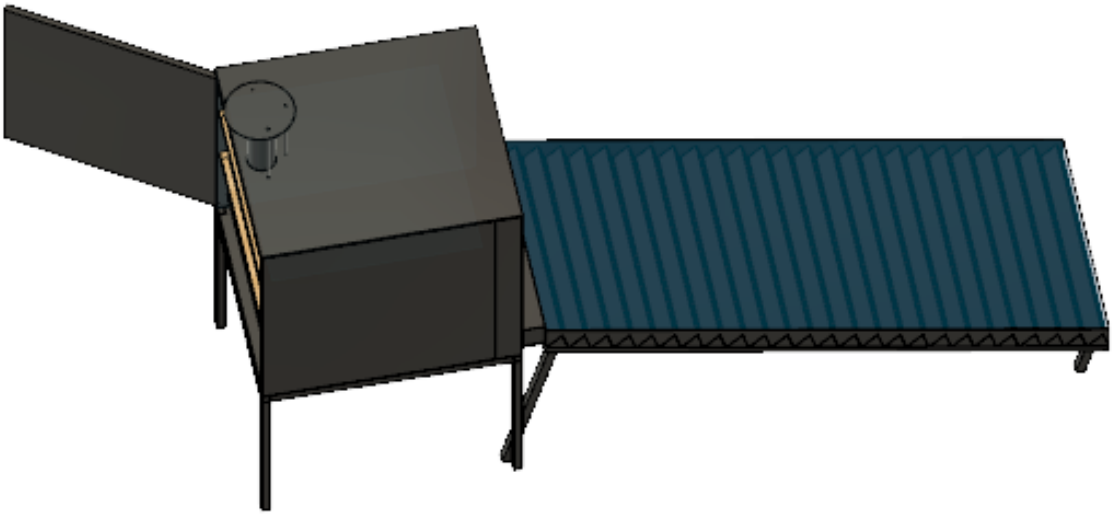

*Figure 31: Vue d'ensemble du séchoir remodelisé*

# VI. Devis estimatif du coût de fabrication du séchoir

Le Tableau 8 est un devis estimatif du coût de fabrication du prototype du séchoir solaire incluant les prix des matériaux, des appareils électriques et de la main d'œuvre. Les quantités des matériaux ont été appréciées à partir de la modélisation mécanique en 3D du séchoir. Quant aux prix unitaires des matériaux, ils ont été déterminés à partir d'une facture pro-forma d'un distributeur local agréé de matériaux de construction.

*Tableau 8 : Devis estimatif du coût de fabrication du séchoir solaire*

| | Désignations | Caractéristques | Quantité | Prix Unitaire (FCFA) | Prix Total (FCFA) |
|---|---|---|---|---|---|
| Matériaux de construction | Tôle noire acier | Epaisseur : 1 mm<br>Dimensions 1*2m² | 10 | 15 200 | 152 000 |
| | Verre ordinaire | Epaisseur : 4 mm<br>Dimensions 1*1,2 m² | 2,5 | 15 000 | 37 500 |
| | Tube carré acier | Longueur : 6<br>Dimensions 20*20 | 3 | 4 000 | 12 000 |
| | Tube carré acier | Longueur : 6<br>Dimensions 40*40 | 4 | 8 000 | 32 000 |
| | Cornière acier | Longueur : 6 mm<br>Dimensions 30*30 | 3 | 7 000 | 21 000 |
| | Grillage acier inoxydable | Dimension: 1,2*1 m² | 8 | 4 000 | 32 000 |
| | Planche bois raboté | Epaisseur : 30 mm<br>Longueur: 5,75 m | 6 | 3 000 | 18 000 |
| | Isolant thermique | Sciure de bois | 2 | 3 000 | 6 000 |
| | Peinture noire alimentaire | Boite 4 Kg | 1 | 20 000 | 20 000 |
| | Antirouille | Boite 1 kg | 4 | 1 500 | 6 000 |
| | Mastique Silicone | Transparent | 3 | 3 000 | 9 000 |
| Kit solaire | Ventillateur | 12V, 5W | 4 | 5 000 | 20 000 |
| | Batterie | 5 Ah,12V | 1 | 15 000 | 15 000 |
| | Régulateur de charge | 2A, 12 V | 1 | 15 000 | 15 000 |
| | Module PV | 12V, 50 W | 1 | 20 000 | 20 000 |
| Divers | Autres acessoires | Câble, Boulons, Crochets etc. | | 7 000 | 7 000 |
| Service | Main d'œuvre | | | 100 000 | 100 000 |
| Total HT | | | | | 522 500 |
| TVA | | | 19% | | 99 275 |
| Total TTC | | | | | 621 775 |

Le coût de fabrication du prototype de séchoir solaire conçu est estimé à 621 775 FCFA toutes taxes comprises, les matériaux de construction représentent 63% de cet investissement suivis de la main d'œuvre qui détient les 19% et enfin le kit solaire pour la convection forcée qui représente les 13% restant.

# Conclusion et perspectives

L'objectif de cette étude était de concevoir un prototype de séchoir solaire indirect de faible encombrement muni d'un capteur à vitrage qui optimise la durée du séchage et la qualité de la tomate séchée. Un prototype de séchoir solaire indirect à convection forcée a donc été conçu en conséquence, sa cabine de séchage à une surface de séchage d'environ 7 $m^2$ pour une capacité de 20 kg de produits frais. Quant au capteur du séchoir, il a une surface de 2,5 $m^2$ avec un absorbeur ondulé en forme de V d'une surface effective de 5 $m^2$. Tout ceci est le résultat en aval de calculs tenant compte des caractéristiques de la tomate et des conditions climatiques de sa période récolte au Niger. Les matériaux de chaque composant du séchoir ont été choisis méticuleusement. Le séchoir a fait aussi l'objet d'une modélisation mécanique qui permet d'avoir un aperçu en 3D du prototype et de ses différents composants. Le logiciel de modélisation CFD ANSYS Fluent a été utilisé pour simuler le comportement du séchoir pour deux configurations différentes de la cheminée sur la paroi supérieure de la cabine. Suite à cette modélisation, il a été démontré qu'en déplaçant la cheminée du centre de la paroi vers l'extrémité, la distribution de la température et de l'écoulement d'air dans le séchoir serait plus uniforme, le séchage des produits sur les différentes claies sera par conséquent plus homogène. Conformément à ces résultats CFD, la modélisation mécanique en 3D du séchoir a donc été modifiée. Un devis a été dressé pour estimer l'investissement nécessaire pour fabriquer le prototype, ce devis estime le coût à 621 775 FCFA toutes taxes comprises.

Comme nous l'avons mentionné au début de ce travail, cette étude ne représente que les premiers jalons d'un prototype de séchoir exclusivement solaire, efficace et adapté au séchage des produits à forte teneur en eau comme la tomate. En effet beaucoup reste à faire, le prototype devra être fabriqué et ses performances devront être validées par des tests expérimentaux. La durée escomptée pour le séchage de 20 kg de tomates avec ce prototype de séchoir selon des conditions climatiques définies dans l'étude est de 16 heures, avec un séchage prévu sur deux jours d'ensoleillement. Cette durée peut cependant être optimisée en intégrant un stockage thermique dans le modèle, ceci permettrait de réduire l'indépendance de l'opération de séchage de l'irradiation solaire et aussi de la prolonger au-delà des heures d'ensoleillement durant la nuit. Une étude techno-économique du séchoir doit aussi être faite afin de s'assurer de sa viabilité économique.

# Bibliographie


[1] Maytham Ali Jasim Al-Neama, « Performance enhancement of solar air collectors appliedfor drying processes », Szent Istvan University, Gödöllő, Hongrie, Thèse Doctorat, 2018. [En ligne]. Disponible sur: https://szie.hu/sites/default/files/maytham_dissertation.pdf.

[2] Réseau National des Chambre d'Agriculture du Niger (RECA), « La tomate au Niger », juill. 10, 2016, [En ligne]. Disponible sur: http://reca-niger.org/spip.php?article896.

[3] JICA et Ministère du développement agricole, « Etude de Développement des Oasis Sahéliennes (EDOS) en République du Niger ». 2009.

[4] Fanta Mady Cissé Mahamadou, « Etude techno-Econmique du séchoir solaire ICARO », Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Niger, Mémoire de fin d'études, 2017. [En ligne]. Disponible sur: http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/doc_num.php?explnum_id=2735.

[5] Chloé Lauvergnier, « Un séchoir à charbon minéral pour sauver les tomates du Niger », *Les obsevateurs France 24*, mai 20, 2016. https://observers.france24.com/fr/20160520-niger-sechoir-charbon-mineral-sauver-tomates-innovation-production-poudre-eco (consulté le déc. 18, 2020).

[6] Kane Adoul Youssouf, « Etude d'un séchoir hybride, solaire-gaz », Ecole Inter-Etats d'Ingenieurs de l'Equipement Rural, Burkina Faso, Mémoire de fin d'études 289/96, 1996. [En ligne]. Disponible sur: http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/doc_num.php?explnum_id=1428.

[7] O.V. Ekechukwu et B. Norton, « Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology », *Process Safety and Environment Protection*, p. 620, 1997.

[8] Michael W. Bassey et O.G. Schmidt, « Le séchage solaire en Afrique », Dakar,Senegal, 1986, [En ligne]. Disponible sur: https://idl-bnc-idrc.dspacedirect.org/bitstream/handle/10625/21589/IDL-21589.pdf?sequence=1.

[9] Stefano Bechis, « manuel de construction et utilisation du séchoir Icaro 2007 ». [En ligne]. Disponible sur: https://docplayer.fr/8639184-Universita-di-torino-italia-manuel-de-construction-et-utilisation-du-sechoir-icaro-2007-revision-2013-stefano-bechis-federico-barigazzi.html.

[10] S. Bahria et M. Amirat, « Influence de l'adjonction des chicanes longitudinales sur les performances d'un capteur solaire plan à air », *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 16, n° 1 (2013) 51-63, 2013.

[11] E. C. Lopez-Vidana, L. L. Mendez-Lagunas, et Juan, « Efficiency of a hybrid solar–gas dryer », *Solar Energy 93*, p. 23-31, 2013.

[12] L. Abhay, V. P. Chandramohan, et V.R.K. Raju, « Design, Development and Performance of Indirect Type Solar Dryer for Banana Drying », *Energy Procedia*, p. 409-416, 2017.

[13] P. Rudra Nandan, S. Sudhansu Sekhar, et S. Ranjan Kumar, « Performance Analysis of Double Pass Solar Air Heater with Bottom Extended Surface », *Revue des Energies Renouvelables*, p. 331-317, 2017.

[14] Rémi Cheilan, « La Climatisation Solaire », Ecole Nation d'Ingénieurs de Saint Etienne, Rapport de Projet de fin d'Etudes, 2004. [En ligne]. Disponible sur: https://docplayer.fr/8744755-La-climatisation-solaire.html.

[15] Lyes Bennamoun, « Improving Solar Dryers' Performances Using Design and Thermal Heat Storage », *Food Eng Rev*, p. 230-248, 2013.

[16] Benlahmidi Said, « Etude du séchage convectif par l'énergie solaire des produits rouges », Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie, Thèse Doctorat, 2013. [En ligne]. Disponible sur: http://thesis.univ-biskra.dz/77/.

[17] Jean-François Rozis, *Sécher des produits alimentaires. Techniques, procédés, équipements, GRET, 1995*. France, 1995.

[18] Slimane Boughali, « Etude et optimisation du séchage solaire des produits agro-Alimentaire dans le zones arides et désertiques », Université Hadj Lakhdar Batna, Algérie, Thèse Doctorat, 2010. [En ligne]. Disponible sur: http://eprints.univ-batna2.dz/249/1/BOUGHALI%20Slimane.pdf.

[19] « Astronomical observations Niamey - Niger Niamey (Niger) ». https://www.horlogeparlante.com/astronomical-observations-2440485.html (consulté le déc. 17, 2020).

[20] Heba Abdel Mohsen, A. A. Abd El-Rahmam, et H. E. Hassan, « Drying of tomato fruits using solar energy », *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, vol. 21, nº 2, p. 206, 2019.

[21] N'tsoukpoe Kokouvi Edem, « Effet des angles d'inclinaison et d'orientation des capteurs solaires sur leur production : cas des capitales des pays d'Afrique de l'Ouest et du Centre », Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Ouagadougou,Burkina Faso, 2017. [En ligne]. Disponible sur: http://www.ecowrex.org/fr/system/files/ntsoukpoe_-_orientation_des_capteurs_solaires.pdf.

[22] A. Jain et M. Sharma, « Computational fluid dynamics simulation and energy analysis of domestic direct-type multi-shelf solar dryer », *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018.

[23] A.I. Ambesange et Kusekar S.K, « Analysis of Flow Through Solar Dryer Duct Using CFD », *International Journal of Engineering Development and Research*, vol. Volume 5, p. 532-554, 2017.

[24] HEMISSI SAFA, « Simulation du transfert thermique dans la lame d'air d'un capteur solaire plan à l'aide du logiciel Fluent », Université Badji I Mokhtar Annaba, Algérie, Memoire de fin d'étude (Master), 2018. [En ligne]. Disponible sur: https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2018/10/Hemissi-Safa.pdf.

[25] Romero, V.M., Cerezo, E., Garcia, M.I, et Sanchez, M.H, « Simulation and validation of vanilla drying process in an indirect solar dryer prototype using CFD Fluent program », *Energy Procedia*, nº 1655, 2014.

[26] Souheyla Khaldi, « Etude numérique du comportement thermique d'unséchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d'énergie », Université Bourgogne Franche-Comté; Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2018. [En ligne]. Disponible sur: https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01879901/document.

[27] ANSYS, Inc, « ANSYS Fluent Tutorial Guide », 2017. [En ligne]. Disponible sur: http://users.abo.fi/rzevenho/ansys%20fluent%2018%20tutorial%20guide.pdf.

[28] Soumaïla TIGAMPO, Vincent SAMBOU, Younouss DIEYE, Pape Moussa TOURE, et Séckou BODIAN, « Study of air mouvement and temperature distribution in a greenhouse used as a dryer », *MATEC Web of Conferences*, 2020.

[29] R. M. Ali Ghaffari, « Modeling and Improving the Performance of Cabinet Solar Dryer Using Computational Fluid Dynamics », *International Journal of Food Engineering*, 2015.

[30] Jackis Aukah, Mutuku Muvengei, Hiram Ndiritu, et C. Onyango, « Simulation of Drying Uniformity inside Hybrid Solar Biomass Dryer using ANSYS CFX », *Proceedings of the Sustainable Research and Innovation (SRI) Conference*, 2015.

[31] Jon Watmuff et David Proctor, « Solar and wind induced external coefficients - Solar collectors », *Revue Internationale de d'Heliotechnique*, 1977.

[32] Aly Sané Niang, « Utilisation d'énergies renouvelables et amélioration de la qualité des produits agroalimentaires séchés au Burkina Faso », Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Burkina Faso, Mémoire de fin d'études, 2006. [En ligne]. Disponible sur: http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/doc_num.php?explnum_id=932.

[33] Philippe Dudez, « Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.gret.org/wp-content/uploads/GP-08_Sechage-solaire-des-fruits-et-legumes.pdf.

[34] Rachida Issaka Seyni, « Elaboration d'un outil d'aide à la décision pour le choix des séchoirs solaires au Niger », Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Niger, Mémoire de fin d'études, 2019. [En ligne]. Disponible sur: http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/doc_num.php?explnum_id=3118.

[35] Amira Belghith, Soufien Azzouz, et Afif ElCafsi, « Desorption isotherms and mathematical modeling of thin layer drying kinetics of tomato », *Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015*, 2015.

[36] N'tsoukpoe Kokouvi Edem, « Principe et typologie des capteurs thermiques », Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Ouagadougou,Burkina Faso, cours Solaire Thermique, 2018.

[37] Yézouma Coulibaly, « Les Sources de Chaleur du Batiment », Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Ouagadougou,Burkina Faso, Cours Thermique du Bâtiment, 2011.

# Liste des annexes

Annexe 1 : Les cinq premiers prototypes de séchoirs solaires réalisés à l'ANERSOL.....v
Annexe 2 : Les séchoirs Icaro.....ix
Annexe 3 : Le séchoir coquillage.....xi
Annexe 4: Isothermes de désorption de la tomate .....xii
Annexe 5 : Données climatiques de la ville de Niamey ..... xiii
Annexe 6: calculs détaillés du dimensionnement .....xiv
Annexe 7 : Sélectivité des matériaux.....xvii
Annexe 8: Propriétés des différentes couvertures transparentes..... xviii
Annexe 9: Diagramme solaire (cas des pays de latitude 10° à 15° Nord).....xix
Annexe 10 : Vues détaillées du prototype de séchoir solaire .....xx

# Annexe 1 : Les cinq premiers prototypes de séchoirs solaires réalisés à l'ANERSOL

## Le séchoir type tour

Ce séchoir fut le premier prototype réalisé dans le cadre de ce projet de recherche en 1981. Comme on peut le voir sur la (Figure 32), ce prototype est de type indirect, il est constitué d'un capteur thermique comportant des obstacles placés parallèlement au sens de l'écoulement de l'air et d'une chambre de séchage comportant trois claies. Dans la référence [8],il est rapporté que les résultats de séchage de l'oignon pour ce modèle n'étaient pas très satisfaisants faute d'une bonne circulation d'air.

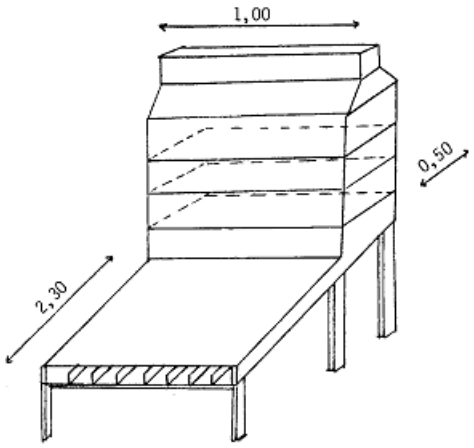


*Figure 32: Le Séchoir tour [8]*

## Le séchoir Aluminium

En 1983 voit jour le séchoir Aluminium, il a permis l'expérimentation d'un séchoir mixte où l'air s'écoule parallèlement au sens de la disposition des claies dans le séchoir. Sa géométrie sur la Figure 33 laisse entrevoir sur sa partie inférieure un capteur solaire de 0,12 m de profondeur qui se rétrécit sur un compartiment couvert en vitre réservé aux claies suivi d'une cheminée circulaire de 3 m de hauteur. D'après les résultats de son expérimentation pour le séchage de l'oignon, le débit d'air pour ce prototype était acceptable comparé à celui du séchoir tour. Néanmoins son coût de fabrication élevé dû à l'aluminium utilisé et sa faible capacité qui était de 6 kg ne permirent pas sa vulgarisation.

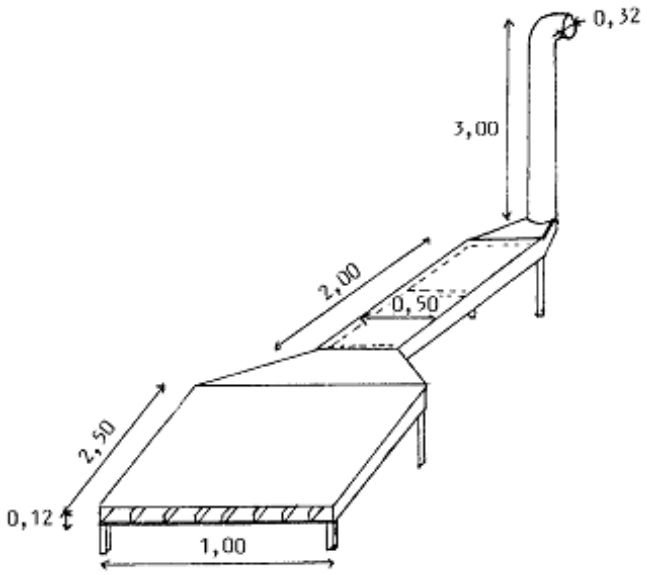


*Figure 33: Le séchoir aluminium [8]*

- **Le séchoir C**

En 1983 l'Anersol développa son premier prototype de séchoir solaire en briques de terre cuite. Il est de type indirect avec un stockage en lit de cailloux. Sa géométrie est constituée d'une partie inclinée, d'une partie horizontale et d'une cheminée (Figure 34). La partie inclinée couverte en vitre abrite un absorbeur en tôle ondulée peinte en noir pour maximiser l'absorption du rayonnement. Sous le vitrage de la partie horizontale sont placés des cailloux pour le stockage thermique. Un tiroir en aluminium accessible par l'arrière fait office de cabine de séchage dans lequel les produits peuvent être déposés sur des claies. L'expérimentation du séchoir dénota un débit d'air très faible au niveau des claies. D'autres modules identiques au premier avec des cheminées de différentes dimensions furent alors crées afin de juger de la configuration qui permettrait d'avoir un débit d'air acceptable au niveau des produits. Ceci donna lieu alors au lot de séchoirs C qui sont encore existant à l'Anersol bien qu'ils ne soient plus fonctionnels.

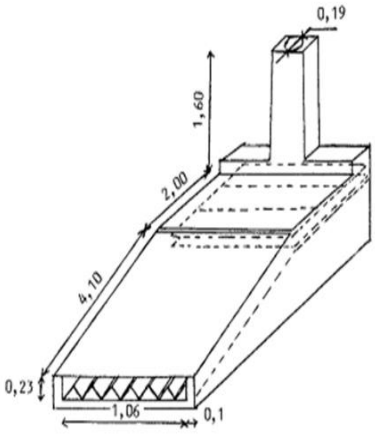


*Figure 34: Les séchoir C [8]*

- **Le séchoir D**

En 1984, l'Anersol construisit un petit séchoir portatif d'une capacité familiale de 6 kg destiné aux agriculteurs (Figure 35). C'est un caisson en contreplaqué isolé par 4 cm de copeaux de bois et recouvert de film EVA [8]. C'est un séchoir mixte avec un absorbeur en tôle acier galvanisée peinte en noir. Les résultats de son expérimentation pour la tomate étaient assez satisfaisants, il pouvait en sécher 6 kg en 2 h. Malgré ces performances, il n'a pas été vulgarisé à cause de son coût de fabrication jugé assez élevé au regard de l'indisponibilité du bois de remplacement en zone sahélienne à cette époque.

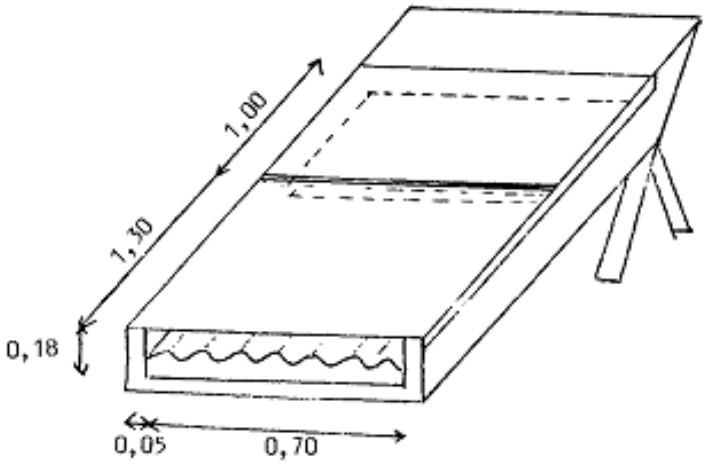


*Figure 35: Le séchoir D [8]*

### Le Séchoir Sahel 50

En 1986 l'ONERSOL développa encore un autre prototype de séchoir en briques de ciment dénommé séchoir Sahel 50, il est une version améliorée des séchoirs C. Comme ces derniers, c'est un séchoir de type mixte à convection naturelle où le courant d'air s'écoule parallèlement au sens de la disposition des claies (Figure 36). Il a été conçu en deux modules identiques juxtaposés (Figure 36). Sa charge est adaptable aux conditions climatiques en jouant sur l'agencement entre la surface des claies et celle du réchauffeur d'air, sa charge maximale est estimée à 50 kg. L'absorbeur du séchoir est fait en tôle galvanisée ondulée peinte en noir , ses claies sont confectionnées en tige de mil et la couverture transparente est en polycarbonate alvéolaire [8]. La cheminée est inclinée de 10° par rapport à la verticale afin d'éviter qu'elle fasse de l'ombre sur la couverture transparente.

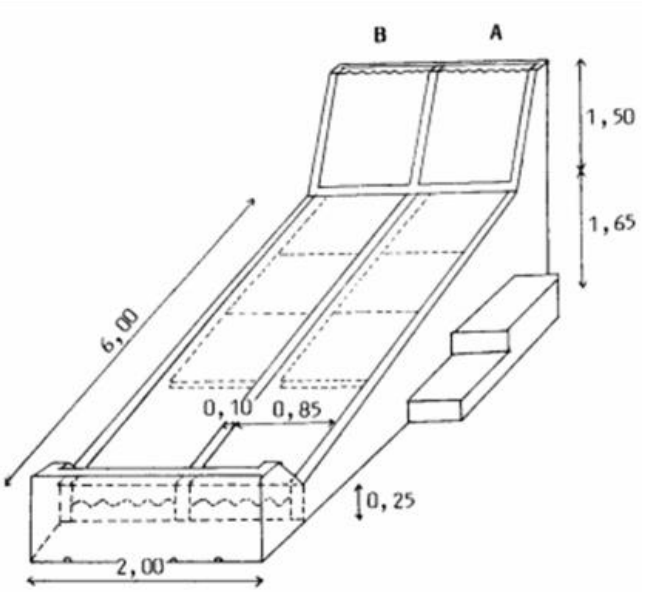


*Figure 36: Le séchoir sahel 50 [8]*

## Annexe 2 : Les séchoirs Icaro

### Séchoir Icaro 2000

C'est un séchoir de type indirect à convection naturelle (Figure 37). Il est conçu en deux unités détachables dont la cabine de séchage et le capteur solaire afin de facilité son déplacement. Le capteur est fait avec deux plaques de tôle acier peintes en noir entre lesquelles est laissée une petite veine pour la circulation de l'air. La plaque inférieure est isolée avec une couche de sciure de bois. La cabine de séchage est de type vertical, elle peut supporter 25 kg de produits frais qui peuvent être répartis sur 5 claies. Une cheminée est placée au-dessus de la cabine pour l'extraction de l'air chargé d'humidité.

*Figure 37: Séchoir Icaro 2000*

### Le séchoir Icaro 2007

Il représente la dernière version améliorée de la série des séchoirs Icaro, il dérive de la version de 2004, version à partir de la laquelle la cabine de séchage a pris une forme horizontale et la capacité de séchage est passée à 50 kg de produits frais. Il est tout comme ses prédécesseurs de type indirect mais avec une convection d'air forcée. Il est constitué de deux capteurs solaires, un incliné de 7° par rapport à l'horizontal et l'autre horizontal qui s'identifie aussi comme la paroi supérieure de la cabine de séchage (Figure 38). La cabine de séchage comporte 10 claies identiques dont chacune à une surface de 0,62 $m^2$ [4]. L'air est aspiré par des ventilateurs solaires logés dans un hexaèdre accrochable au bout du capteur incliné, puis il est chauffé par les deux capteurs avant d'être envoyé dans la cabine de séchage à travers un diffuseur. La tôle acier galvanisé est utilisée comme matériau principal pour sa fabrication et la sciure de bois pour l'isolation thermique.

*Figure 38: Séchoir Icaro 2007*

## Annexe 3 : Le séchoir coquillage

Le séchoir coquillage est un séchoir de type indirect à convection naturelle, son nom dérive de sa géométrie qui a une forme de coquille (Figure 39). Il est constitué de deux cônes métalliques reliés par une charnière et d'une claie en grillage galvanisé. Le cône inférieur comporte des petits orifices circulaires tout au long de sa circonférence et celle supérieure dispose d'une ouverture au-dessus. Tous les composants du séchoir sont confectionnés avec des matériaux locaux dont la tôle noire pour les deux cônes et le grillage galvanisé de mailles fines pour la claie. L'air pénètre dans le séchoir par les orifices circulaires, s'échauffe, échange avec les produits disposés sur la claie et ressort par l'orifice circulaire situé au-dessus de cône supérieur. C'est un séchoir à usage familial qui peut sécher 5 Kg de produits frais. Il peut sécher aussi bien des fruits et légumes que des produits carnés [32]. Sa forme est esthétique et il est facilement transportable par deux femmes. La durée de vie du séchoir coquillage est estimée à 5 ans. Son entretien est très limité, en effet il est principalement lié au renouvellement du tamis de la claie et de la peinture noire des cônes [33].

*Figure 39: Séchoir coquillage [34]*

## Annexe 4: Isothermes de désorption de la tomate

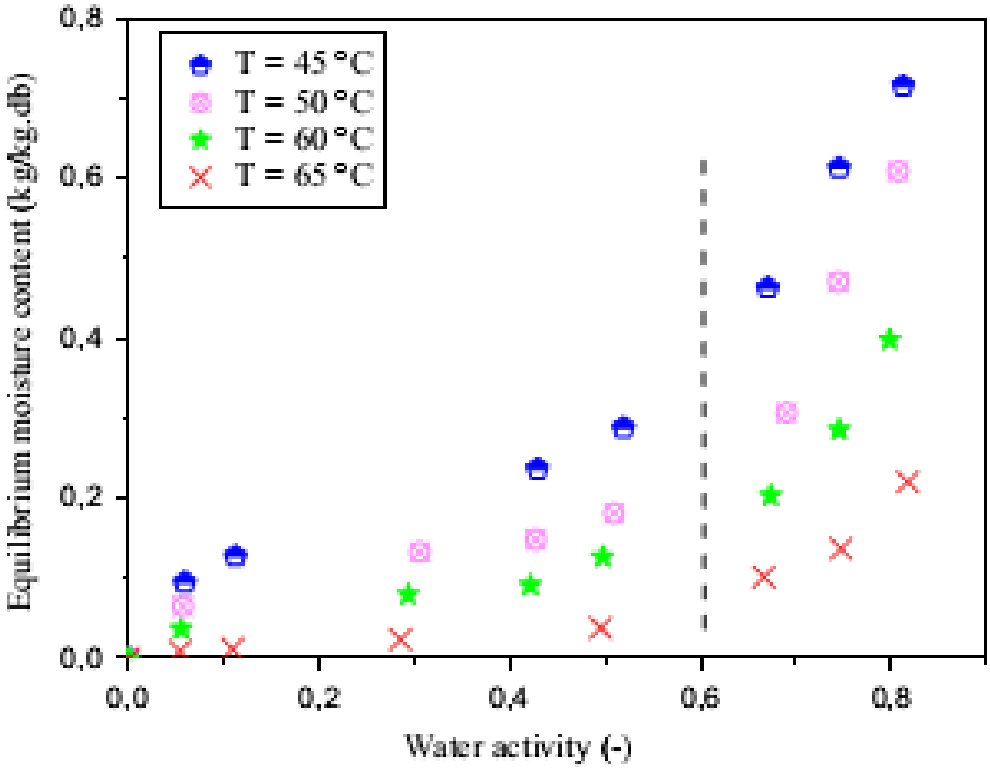


*Figure 40:Isothermes de désorption de la tomate [35]*

# Annexe 5 : Données climatiques de la ville de Niamey

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Pays | | Niger | | |
| Province/État | | | | |
| Lieu des données climatiques | Voir carte | Niamey (Civ/Mil) | | |
| Latitude | | °N | 13,5 | |
| Longitude | | °E | 2,2 | Source |
| Zone climatique | | 0B | Extrêmement chaud - Sec | Sol+NASA |
| Élévation | | m | 227 | Sol |
| Température extérieure de calcul de chauffage | | °C | 16,9 | Sol |
| Température extérieure de calcul de climatisation | | °C | 41,4 | Sol |
| Amplitude des températures du sol | | °C | 21,1 | NASA |

| Mois | Température de l'air | Humidité relative | Précipitation | Rayonnement solaire quotidien - horizontal | Pression atmosphérique | Vitesse du vent | Température du sol |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | °C | % | mm | kWh/m²/j | kPa | m/s | °C |
| Janvier | 24,4 | 21,6% | 0,09 | 5,47 | 98,4 | 3,8 | 26,3 |
| Février | 27,2 | 17,4% | 0,81 | 6,38 | 98,3 | 3,9 | 28,8 |
| Mars | 31,4 | 17,0% | 1,06 | 6,83 | 98,0 | 3,6 | 33,6 |
| Avril | 34,4 | 25,3% | 6,01 | 7,02 | 97,9 | 3,4 | 36,7 |
| Mai | 34,4 | 40,9% | 24,00 | 6,96 | 98,0 | 3,8 | 35,2 |
| Juin | 31,9 | 54,5% | 88,21 | 6,64 | 98,2 | 4,1 | 31,5 |
| Juillet | 29,3 | 66,9% | 155,70 | 6,07 | 98,3 | 3,8 | 28,2 |
| Août | 28,0 | 74,7% | 171,82 | 5,70 | 98,4 | 3,3 | 27,6 |
| Septembre | 29,2 | 69,5% | 105,94 | 5,96 | 98,3 | 3,1 | 28,9 |
| Octobre | 30,9 | 47,1% | 10,65 | 6,05 | 98,2 | 2,7 | 31,9 |
| Novembre | 28,4 | 27,4% | 1,11 | 5,76 | 98,3 | 2,9 | 30,2 |
| Décembre | 25,1 | 24,4% | 0,09 | 5,24 | 98,4 | 3,5 | 26,8 |
| **Annuel** | **29,6** | **40,7%** | **565,49** | **6,17** | **98,2** | **3,5** | **30,5** |
| **Source** | Sol | Sol | NASA | NASA | NASA | Sol | NASA |
| Mesuré à | | | | | m | 10 | 0 |

*Figure 41: Données climatiques de la ville de Niamey (source RESTcreen)*

*Tableau 9: Ensoleillement solaire à Niamey sur le plan Horizontal en Wh·m$^{-2}$·jour$^{-1}$ (Source ANERSOL)*

| Mois | Années | | | | Moyenne |
|---|---|---|---|---|---|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | |
| **Janvier** | 5497 | 5325 | 5264 | 5356 | 5361 |
| **Février** | 5820 | 5763 | 5686 | 4956 | 5556 |
| **Mars** | 5633 | 5703 | 6841 | 5424 | 5900 |
| **Avril** | 6315 | 5776 | 6269 | 6034 | 6099 |
| **Mai** | 5896 | 5776 | 6047 | 5530 | 5812 |
| **Juin** | 5677 | 5850 | 5903 | | 5810 |
| **Juillet** | 5605 | 5939 | 6046 | | 5863 |
| **Août** | 5127 | 5885 | 5469 | 5165 | 5412 |
| **Septembre** | 5585 | 5933 | 5540 | 5546 | 5651 |
| **Octobre** | 5735 | 5385 | 5520 | 5305 | 5486 |
| **Novembre** | 5792 | 5814 | 4986 | 4989 | 5395 |
| **Décembre** | 5489 | 4853 | 4821 | 4865 | 5007 |

## Annexe 6: calculs détaillés du dimensionnement

1. Quantité d'eau à enlever du produit

$$m_e = m_p \frac{M_i - M_f}{100 - M_f}$$

D'après le tableau récapitulatif des hypothèses de départ :

- $M_i$= 95 %
- $M_f$= 10 %;
- $m_p = 20\ kg$ de tomates fraiches

$$AN: m_e = 20 \frac{95 - 10}{100 - 10}$$

$\boldsymbol{m_e}$ **=18,89 kg**

2. La vitesse moyenne d'enlèvement de l'eau

$$V_m = \frac{m_e}{t_s}$$

D'après le tableau récapitulatif des hypothèses de départ :

$t_s$= 16 h

$$V_m = \frac{18{,}89}{16}$$

$$\boldsymbol{V_m = 1{,}18\ kg/h}$$

3. Quantité d'eau qu'on peut retirer avec un mètre cube d'air

En fin de séchage, l'air est en équilibre avec le produit, donc l'eau a alors une activité de 0,5. L'humidité relative d'équilibre en fin de séchage est égale à cette activité, donc: $H_s$ = 50 %.

$$H_m = \frac{100 + H_s}{2}$$

$$AN: H_m = \frac{100 + 50}{2}$$

$H_m$ =75 %

D'après le diagramme de l'air humide (Figure 42) pour la température ambiante $T_1 = 26°C$ et une humidité relative de 23 %, l'humidité absolue de l'air est $x_1 = 4{,}79\ g/kgas$.

En chauffant cette air dans le capteur jusqu'à $T_2 = 60°C$, l'humidité absolue reste demeure le même qu'au point 2 et $x_2 = x_1 = 4{,}79\ g/kgas$. L'enthalpie $H_2$ lit sur le diagramme est $H_2 = 73$ kJ/kgas

En supposant que le séchage est isenthalpique, à la sortie de la cabine de séchage (point 3), l'air aura une enthalpie $h_3 = h_2$ =73 kJ/kgas et l'humidité relative moyenne $H_m = 75\%$ sur la durée totale du séchage. L'humidité absolue moyenne de l'air à la sortie du séchoir qui se lit sur le diagramme de l'air humide (Figure 42) est de $x_m = 20{,}8\ g/kgas$.

$q_{eau} = \rho_{air} * \eta_s * (x_m - x_1)$

Pour $\rho_{air} = 1{,}3\ kg/m^3$ et avec une correction de $\eta_s = 0{,}8$ on a :

$AN: q_{eau} = 1{,}3 * 0{,}8 * (20{,}8 - 4{,}79)$

$\boldsymbol{q_{eau}}$ **=16,65 g/m³**

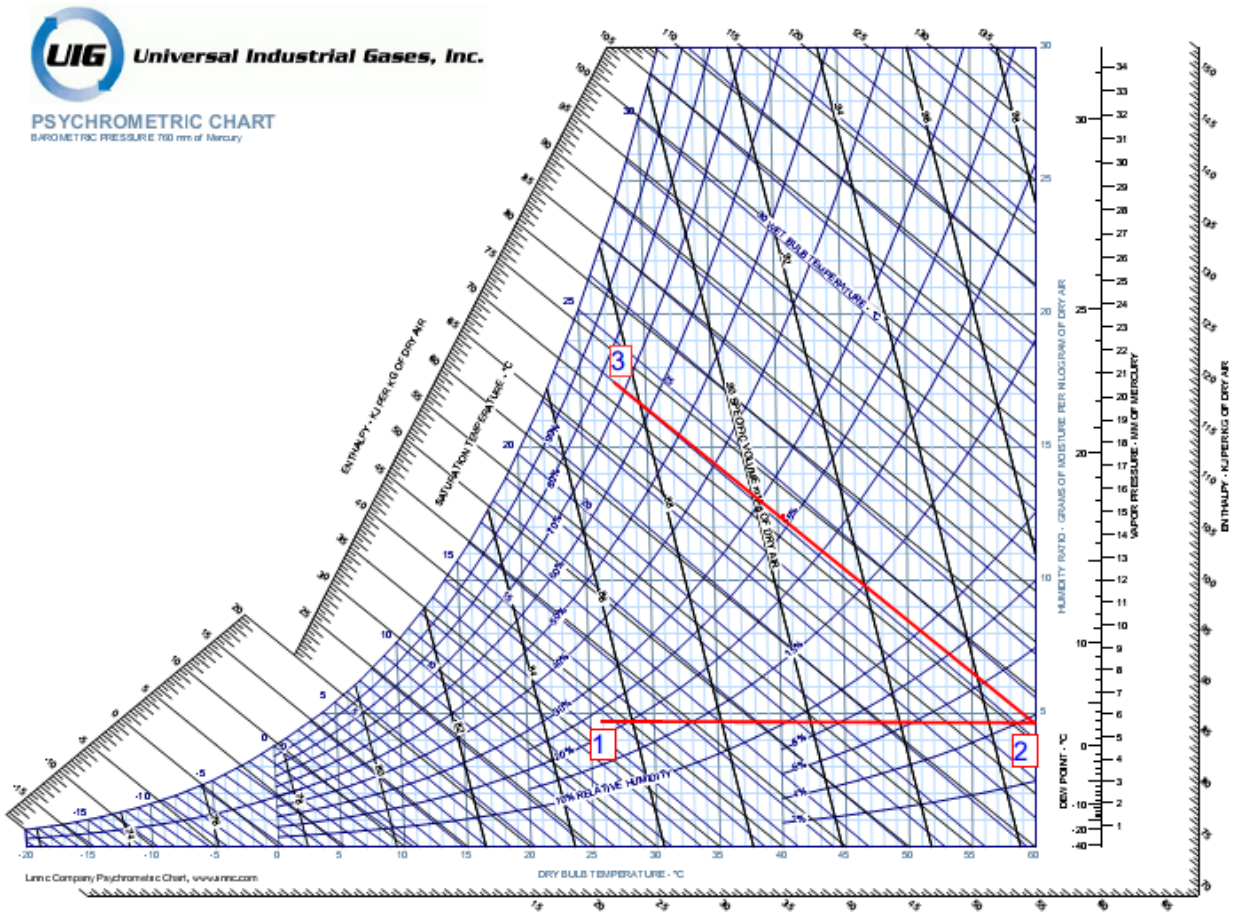


*Figure 42: Diagramme de l'air humide*

4. Le débit d'air en moyenne qu'il faudrait avoir dans le séchoir

$$\dot{V} = \frac{V_m * 1000}{q_{eau}}$$

Avec les calculs précédents on a :

$V_m = 1{,}18\ kg/h$ et $q_{eau}$ =16,65g/m$^3$

Donc :

$$AN: \dot{V} = \frac{1000 * 1{,}18}{16{,}65}$$

$$\boldsymbol{\dot{V} = 70{,}9 m^3/h}$$

5. La puissance énergétique requise pour l'évaporation de l'eau

$$P_u = \rho_{air} * \dot{V} * C_{pair} * (T_2 - T_1)$$

Avec :

$C_{pair}$ = 1 kJ·kg$^{-1}$·°C$^{-1}$;

$T_1$ = 26 °C ;

$T_2$ = 60°C ;

$\dot{V}$ = 70,9 m$^3$/h ;

$\rho_{air}$= 1,3 kg/ m$^3$.

$$AN: P_u = 1{,}3 * 1 * (70{,}9/3600) * (60 - 26)$$

$$\boldsymbol{P_u = 0{,}87\ \mathbf{kW}}$$

**6.** La surface du capteur solaire

$$S = \frac{P_u}{\eta_c * I_G}$$

D'après le tableau récapitulatif des hypothèses on a :

$\eta_c = 30\%$ ;

$I_G = 533$ W·m$^{-2}$

$$AN: S = \frac{870}{0{,}3 * 533}$$

$$\boldsymbol{S = 5{,}44\ m^2 \cong 5\ m^2}$$

## Annexe 7 : Sélectivité des matériaux

*Tableau 10: Sélectivité des matériaux [36]*

| Matériaux | α | ε | α/ε |
|---|---|---|---|
| Cuivre poli | 0.25 | 0.02 | 12.5 |
| Film plastique recouvert d'or | 0.30 | 0.03 | 10 |
| Acier poli | 0.63 | 0.09 | 7 |
| Aluminium anodisé | 0.80 | 0.14 | 5.71 |
| Nickel brillant | 0.34 | 0.07 | 4.86 |
| Aluminium poli | 0.10 | 0.04 | 2.5 |
| Peinture noire (silicate) | 0.97 | 0.88 | 1.10 |
| Peinture aluminium | 0.26 | 0.26 | 1 |
| Acier sablé | 0.75 | 0.80 | 0.94 |
| Kapton aluminisé | 0.36 | 0.52 | 0.69 |
| Peinture blanche (silicate) | 0.14 | 0.90 | 0.16 |
| Miroir verre argenté | 0.11 | 0.83 | 0.13 |

## Annexe 8: Propriétés des différentes couvertures transparentes

*Tableau 11:Propriétés des différentes couvertures transparentes [17]*

| **Matériau** | **Verre ordinaire** | **Verre trempé** | **Verre armé** | **Polyester armé de fibre de verre** | **Policarbonate double paroi** | **Polypropylène double paroi** | **Polymétacrylate double paroi (acrylique)** | **Polyéthylène** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Transmission rayonnement solaire sous incidence normale % | 86/91 (4 mm) | 86 (4 mm) | 72 | 83 | 80 | 65 | 83 | 85 |
| Transparent (P) Translucide (L) | P | P | P | L | L (simple paroi: P) | L | L (simple paroi: P) | L |
| Épaisseurs standard disponibles | 3 à 6 mm | 4 à 8 mm | 6 mm | 1 mm | 4 à 16 mm | 4 mm | 8 à 16 mm | 0,1 à 0.3 mm |
| Température maximale d'utilisation | 200°C | 200°C | 200°C | 70°C | 100°C+ | H60°C | 90°C | 60°C |
| Poids kg/m $^2$ | (e = 4 mm) 11 faible | (e = 4 mm) 11 faible | (e = 6 mm) 6 faible | (e = 1 mm) 1,5 importante | (e = 6 mm) 1,2 importante | (e = 4 mm) 0,7 importante | (e = 16 mm) 5 importante | (e = 1 mm) 0,17 très importante |
| Longévité (durée au-delà ans de laquelle transmission rayonnement solaire = 90% de la valeur initiale) | 100 ans + | 100 ans + | 7-10 ans H15 ans avec protection UV | 6 ans | H2 ans très mauvaise | 15 ans+ | 1 à 3 ans | |
| Coût(2) | * | ** | ** | * | * | ** | ** | 0 |

(2) Bon marché: 0; moyennement cher: *; coûteux: **.

## Annexe 9: Diagramme solaire (cas des pays de latitude 10° à 15° Nord)

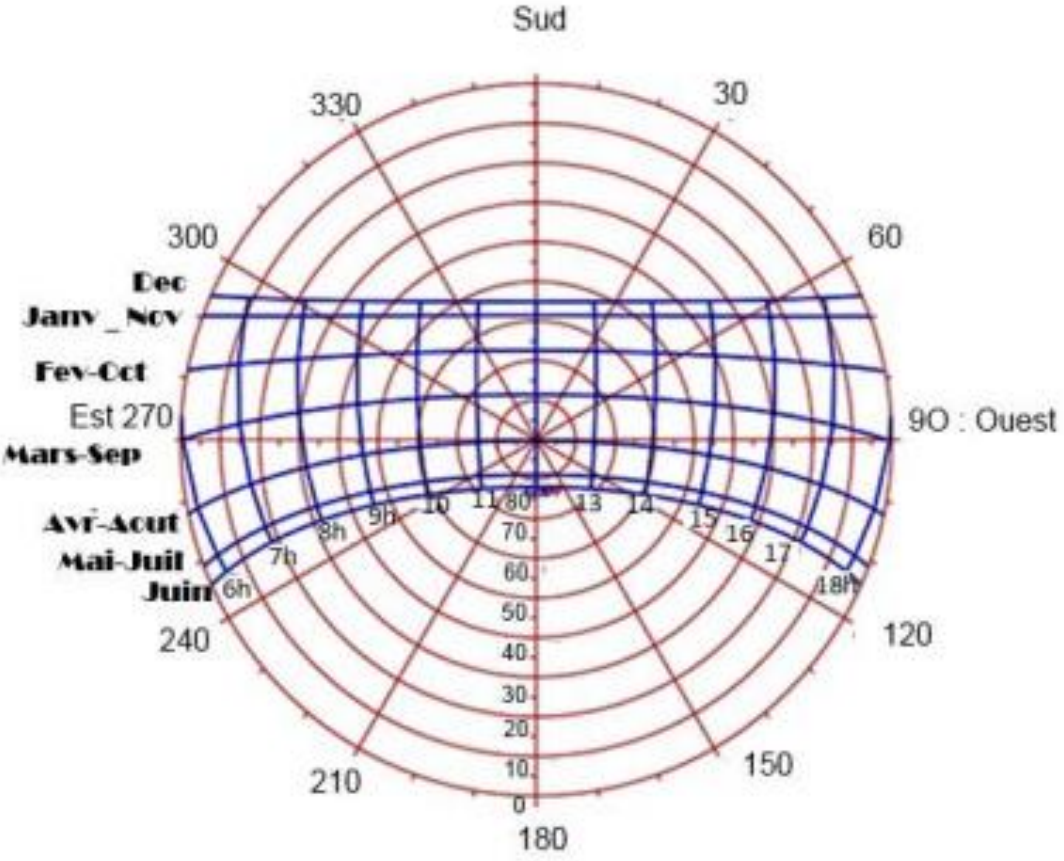


*Figure 43: Diagramme solaire [37]*

## Annexe 10 : Vues détaillées du prototype de séchoir solaire