



# ÉTUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE DU SÉCHOIR SOLAIRE ICARO

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU  
**MASTER EN GÉNIE ÉLECTRIQUE ET ÉNERGÉTIQUE**  
OPTION : GÉNIE ÉNERGÉTIQUE

Présenté et soutenu publiquement le [02/07/2018] par

**FANTA MADY CISSE Mahamadou**

**Travaux dirigés par : M. ADAMOU OUSMANE Chayaou**  
Centre National d'Énergie Solaire (CNES)

**M. HAMADOU Mounkaila**  
Centre National d'Énergie Solaire (CNES)

**Dr. N'TSOUKPOE KOKOUVI Edem**  
Laboratoire Énergie Solaire et Économie  
d'Énergie (LESEE), 2iE

Jury d'évaluation du stage :

Président : **Dr. SAWADOGO Marie**

Membres et correcteurs : **Dr. SIDIBE Sayon**

**Dr. N'TSOUKPOE Kokouvi Edem**

**Promotion [2016/2017]**

## DÉDICACES

*Je dédie ce mémoire de master :*

- *À la mémoire de mon cher Papa*

*Je ne saurais exprimer mon chagrin depuis votre départ le 27 octobre passé. J'aurais aimé que vous soyez à mes côtés à la fin de l'élaboration de ce projet.*

- *À ma très chère Maman*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon grand respect et ma reconnaissance pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon éducation. J'implore Dieu le tout puissant de vous accorder bonne santé et longue vie.*

- *À mes Frères et mes Sœurs*

*Votre soutien et votre amour m'a donné force et courage dans les moments difficiles de mon parcours scolaire.*

## REMERCIEMENTS

- *À la Directrice Générale du CNES Dr. PABYAM SIDO Mariam pour son accueil chaleureux et ses conseils.*
- *À mes encadreurs, Dr. N'TSOUKPOE Kokouvi Edem, M. ADAMOU OUSMANE Chayaou et M. HAMADOU Mounkaila pour leur disponibilité et leur conseil.*
- *À tout le personnel du CNES et de 2IE.*

## RÉSUMÉ

Au Niger, une part importante des produits agricoles et maraichers est soit bradée ou perdue faute de procédés de conservation efficace. Par le passé, le Centre National d'Énergie Solaire a mis au point des séchoirs solaires particulièrement le séchoir ICARO qui est l'objet de notre étude. Mais, de nos jours, ces séchoirs ne sont plus compétitifs à cause de leurs limites technico-opérationnelles. L'enquête que nous avons menée dans la ville de Niamey sur le séchage a révélé une prédominance des techniques de séchage à ciel ouvert par rapport à l'usage des séchoirs. À l'issue de l'enquête, une étude technico-économique est menée sur le séchoir ICARO. Elle consiste d'abord à prendre la mesure des dimensions et à évaluer le coût de fabrication du séchoir. Ensuite, une série de test des performances du séchoir est également menée. Il s'agit des tests à vide et des tests en charge avec le moringa, la tomate et l'oignon. Les différents tests ont révélé que le séchoir ICARO permet d'élever la température de l'air ambiant de 7 °C sous une irradiation moyenne de 525,97 W·m<sup>-2</sup>. Ces tests ont aussi prouvé que le moringa est le produit le mieux adapté au séchoir ICARO. Il se sèche en un jour d'ensoleillement contrairement à la tomate et l'oignon dont le procédé de séchage s'étend sur 2 à 3 jours. À l'issue de ces tests, des propositions d'amélioration du séchoir sont suggérées au niveau de sa configuration, son système photovoltaïque et son ergonomie.

### Mots Clés :

- 
- 1 – Capteur thermique**
  - 2 – Séchoirs solaires**
  - 3 - Performance**
  - 4 - Enquête**
  - 5 – Coût de fabrication**

## ABSTRACT

In Niger, a significant proportion of agricultural and market garden produce is either sold off or lost due to lack of effective conservation methods. In the past, the National Solar Energy Center has developed solar dryers, particularly the ICARO dryer, which is the subject of our study. But nowadays, these dryers are no longer competitive because of their technical and operational limitations. The investigation we conducted in the city of Niamey on drying revealed a predominance of open drying techniques compared to the use of dryers. At the end of the survey, a technical-economic study is conducted on the ICARO dryer. It consists first of all in measuring the dimensions and evaluating the cost of manufacturing the dryer. Then, a series of performance tests is also conducted on the dryer. These are vacuum tests and load tests with moringa, tomato and onion. The various tests revealed that the ICARO dryer can raise the ambient air temperature by  $7^{\circ}\text{C}$  under an average irradiation of  $525.97\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . These tests have also proved that moringa is the product best suited to the ICARO dryer. It dries on a day of sunshine unlike tomato and onion whose drying process extends over 2 to 3 days. At the end of these tests, proposals for improving the dryer are suggested in terms of its configuration, its photovoltaic system and its ergonomics.

### Keywords :

---

- 1 – Solar heater
- 2 – Solar dryer
- 3 - Efficiency
- 4 - Survey
- 5 – Manufacturing cost

## Table des matières :

Dédicaces.....	i
Remerciements .....	ii
Résumé .....	iii
Abstract.....	iv
Liste des tableaux .....	i
Liste des figures .....	ii
Liste des abréviations.....	iv
<i>I. Introduction.....</i>	<i>1</i>
<i>II. Contexte général et présentation du CNES.....</i>	<i>3</i>
<b>II.1 Contexte général.....</b>	<b>3</b>
<b>II.2 Présentation du CNES .....</b>	<b>4</b>
<i>III. Enquête sur le séchage au Niger .....</i>	<i>6</i>
III.2.1 Techniques de séchage utilisées.....	6
III.2.2 Applications principales .....	9
III.2.3 Coût des procédés de séchage .....	10
III.2.4 Acteurs impliquées .....	10
III.2.5 Utilisateurs/Intervenants.....	10
III.2.6 Problèmes rencontrés .....	11
III.2.7 Attentes des utilisateurs.....	12
<i>IV. Étude des performances du séchoir ICARO .....</i>	<i>14</i>
<b>IV.1 Introduction .....</b>	<b>14</b>
<b>IV.2 Présentation du séchoir ICARO .....</b>	<b>14</b>
IV.2.1 Historique .....	14
IV.2.2 Description du séchoir ICARO 2007 .....	15

<b>IV.3</b>	<b>Étude expérimentale .....</b>	<b>17</b>
IV.3.1	Dispositif expérimental .....	17
IV.3.2	Protocole expérimental.....	18
<b>IV.4</b>	<b>Analyse énergétique du séchoir.....</b>	<b>20</b>
IV.4.1	Analyse énergétique des deux capteurs thermiques .....	20
IV.4.2	Analyse énergétique de la chambre de séchage .....	21
<b>V.</b>	<b><i>Résultats et discussions</i> .....</b>	<b>22</b>
<b>V.1</b>	<b>Caractérisation à vide .....</b>	<b>22</b>
V.1.1	Variation journalière de la température au sein du l’enceinte de séchage .....	22
V.1.2	Rendement moyen des deux capteurs thermiques.....	24
V.1.3	Gamme de produits adaptés .....	25
<b>V.2</b>	<b>Caractérisation en charge.....</b>	<b>25</b>
V.2.1	Séchage de moringa .....	25
V.2.2	Séchage de l’oignon .....	26
V.2.3	Séchage de la tomate .....	28
V.2.4	Analyse énergétique des procédés de séchage en charge.....	30
<b>V.3</b>	<b>Évaluation thermique des capteurs thermiques.....</b>	<b>30</b>
<b>VI.</b>	<b><i>Améliorations proposées</i> .....</b>	<b>32</b>
<b>VI.1</b>	<b>Amélioration ergonomique du séchoir .....</b>	<b>32</b>
<b>VI.2</b>	<b>Amélioration thermique du séchoir .....</b>	<b>32</b>
<b>VI.3</b>	<b>Amélioration de l’hygiène.....</b>	<b>34</b>
<b>VI.4</b>	<b>Amélioration de la partie électrique .....</b>	<b>34</b>
<b>VI.5</b>	<b>Nouveau coût du séchoir ICARO après amélioration .....</b>	<b>36</b>
VI.5.1	Scenario 1 : Séchoir ICARO avec système photovoltaïque avec stockage.....	36
VI.5.2	Scenario 2 : Système photovoltaïque sans stockage .....	37
VI.5.3	Analyse des scénarios proposés .....	38
<b>VII.</b>	<b><i>Conclusion et perspectives</i> .....</b>	<b>39</b>

<b><i>Bibliographie</i></b> .....	<b>40</b>
<b><i>IX. Annexe</i></b> .....	<b>41</b>
<b>Annexe 1 : Contexte et enquête</b> .....	<b>1</b>
<b>Annexe 2 : Données expérimentales brutes</b> .....	<b>7</b>
<b>Annexe 3 : Améliorations proposées</b> .....	<b>19</b>
<b>Annexe 4 : Quelques réalisations du CNES</b> .....	<b>21</b>

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1 : Perte et excédant de la production agricole 2014 [6] .....	3
Tableau 2 : Coût de fabrication du séchoir ICARO avant amélioration .....	16
Tableau 3 : Rendement moyen du séchoir ICARO .....	24
Tableau 4 : Analyse énergétique des tests en charge .....	30
Tableau 5 : Équipements solaires choisis.....	35
Tableau 6 : Nouveau coût du séchoir ICARO (scénario 1).....	36
Tableau 7 : Nouveau coût du séchoir ICARO (scénario 2).....	37
Tableau 8 : Résultats de la campagne agricole 2014 [6].....	1
Tableau 9 : Caractéristiques techniques du séchoir .....	2
Tableau 10 : Liste des structures visitées .....	6
Tableau 11 : Données du test de séchage du moringa.....	7
Tableau 12 : Données du test de séchage de la tomate .....	7
Tableau 13 : Données du test de séchage de l'oignon.....	8
Tableau 14 : Données du premier test à vide .....	9
Tableau 15 : Données du deuxième test à vide .....	11
Tableau 16 : Données du troisième à vide .....	14
Tableau 17 : Humidité relative et température de l'air ambiant du test à vide .....	16
Tableau 18 : Dimensionnement du système PV avec stockage .....	19
Tableau 19 : Dimensionnement du système PV sans stockage.....	19
Tableau 20 : Caractéristiques du module PV 80 Wc choisi.....	20
Tableau 21 : Caractéristiques du module PV 30 Wc choisi.....	20

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Potentiel solaire de l’Afrique [7] .....	4
Figure 2 : Séchoir ICARO.....	8
Figure 3 : Séchoir coquille .....	8
Figure 4 : Séchoir à gaz artisanal .....	8
Figure 5 : Séchoir électrique .....	9
Figure 6 : Produits agricoles et maraichers emballés après séchage.....	9
Figure 7 : Schéma du séchoir ICARO.....	16
Figure 8 : Dispositif expérimental 1.....	18
Figure 9 : Dispositif expérimental 2.....	18
Figure 10 : Variation des températures en fonction du temps (test 1) .....	23
Figure 11 : Variation des températures en fonction du temps (test 2) .....	23
Figure 12 : Variation des températures en fonction du temps (test 3) .....	24
Figure 16 : Moringa frais .....	26
Figure 17 : Moringa séché.....	26
Figure 18 : Procédé de séchage du moringa.....	26
Figure 19 : Oignon frais .....	27
Figure 20 : Oignon séché .....	27
Figure 21 : Variation de la teneur en eau de l'oignon (1er jour) .....	27
Figure 22 : Variation de la teneur en eau de l'oignon (2e jour).....	28
Figure 23 : Variation de la teneur en eau de l'oignon (3e jour).....	28
Figure 24 : Tomate fraîche .....	29
Figure 25 : Tomate séchée .....	29
Figure 26 : Variation de la teneur en eau de la tomate (1 <sup>er</sup> jour) .....	29
Figure 27 : Variation de la teneur en eau de la tomate (2 <sup>e</sup> jour) .....	30
Figure 28 : Évolution de la température à la sortie des deux capteurs.....	31
Figure 29 : Poignée en bois de couleur blanche.....	32
Figure 30 : Nouvelle configuration des claies.....	32
Figure 31 : Nouvelle configuration du séchoir ICARO .....	33
Figure 32 : Capteur thermique avec chicanes .....	34
Figure 33: Grille en acier inoxydable.....	34
Figure 34 : Système photovoltaïque avec stockage du scénario 2 .....	35

Figure 35 : Fiche d'enquête .....	5
Figure 36 : Régulateur de charge/décharge Steca Solsum F 6.6F.....	20
Figure 37: Batterie solaire Gel plus 20 Ah.....	20
Figure 38 : Distillateurs fabriqués au CNES .....	21
Figure 39 : Séchoirs solaires fabriqués au CNES .....	21
Figure 40 : Chauffe-eau solaire du CNES installés dans une cité de Niamey .....	22
Figure 41 : Four solaire fabriqués au CNES .....	22

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

$Cp_a$	Capacité calorifique massique de l'air	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$CE$	Consommation d'énergie du séchoir	$J \cdot kg^{-1}$
$E_t$	Énergie totale utilisée pour le séchage	J
$m_e$	Masse d'eau retirée du produit	Kg
$m_t$	Masse restante à un instant t	Kg
$m_i$	Masse initiale du produit frais	Kg
$m_f$	Masse finale du produit après séchage	Kg
$m_{t1}$	Masse antérieurement mesurée	Kg
$m_{t2}$	Masse précédemment mesurée	Kg
$Q_{abs}$	Puissance thermique reçue par le capteur	W
$P_{elec}$	Puissance électrique des ventilateurs	W
$S_{cap}$	Surface de captage	$m^2$
$t$	Durée du procédé de séchage	s
$T_{amb}$	Température ambiante de l'air	$^{\circ}C$
$T_{cap}$	Température l'air à la sortie des deux capteurs thermiques	$^{\circ}C$

## I. INTRODUCTION

---

Le séchage est un procédé qui permet de déshydrater un produit de façon à abaisser sa teneur en eau à une valeur permettant sa conservation à température ambiante. Le séchage a pour effet d'alléger le produit, réduisant ainsi les dégâts environnementaux et les coûts financiers liés au transport des marchandises. Ce procédé permet aussi de réduire les pertes constatées entre la récolte et la mise à disposition des produits aux consommateurs. Par la réduction de la teneur en eau, le séchage permet d'inhiber la croissance des micro-organismes responsables de la dégradation des aliments [1].

Les principales sources d'énergie utilisées dans le domaine du séchage sont de type fossile, solaire ou biomasse. Avec une énergie annuelle fournie à la terre estimée à 75 000 Gtep [2], le soleil est la source d'énergie la plus abondante dont la ressource est gratuite, renouvelable et non polluante.

Par sa position géographique, l'Afrique fait partie des continents qui forment la ceinture solaire, les régions du globe dont la moyenne de l'ensoleillement annuel excède 2 000 kWh·m<sup>-2</sup> [3]. Faut de procédé efficace de conservation des produits agricoles pendant la phase post-récolte, près 100 000 tonnes de mangues sont perdues chaque année en Afrique de l'Ouest francophone [4]. L'utilisation des séchoirs solaires est l'une des solutions qui paraît la mieux adaptée au contexte des régions africaines. En effet, les séchoirs solaires sont des équipements simples, accessibles sur le marché local et sont aussi faciles à fabriquer avec des outils et des matériaux localement disponibles.

Avec un ensoleillement moyen de 6 kWh·m<sup>-2</sup>. j<sup>-1</sup> [5], le Niger fait partie des pays africains les plus ensoleillés. Malgré ce fort potentiel énergétique, environ 93 % d'épices et stimulants, 53 % de légumineuses et 51 % d'oléagineuses sont bradés ou perdus [6]. Le séchage solaire pourrait être utilisé pour valoriser ces produits locaux. Cette technique pourrait également être utilisée à des fins commerciales, générant ainsi des revenus à la population locale.

Ainsi, dans le cadre de la recherche et développement au Centre National d'Énergie Solaire du Niger, le thème « Étude technico-économique du séchoir ICARO » nous a été soumis. Cette étude a pour objectif de mener une enquête sur le séchage solaire au Niger pour recueillir les appréciations des structures locales et aussi de mener une étude technico-économique du séchoir ICARO. En effet, au CNES, aucune étude de caractérisation du séchoir ICARO n'a été effectuée par le passé ; c'est cette méconnaissance des performances du séchoir ICARO qui a motivé notre étude. Le travail comporte essentiellement trois volets :

- enquête sur le séchage au Niger ;
- étude expérimentale des performances du séchoir ICARO ;
- proposition des stratégies pour une performance optimale.

## II. CONTEXTE GÉNÉRAL ET PRÉSENTATION DU CNES

### II.1 CONTEXTE GÉNÉRAL

Le secteur agricole du Niger est basé essentiellement sur les procédés et techniques traditionnels. L'agriculture pratiquée est majoritairement de type familial. Le Tableau 1 résume les résultats d'une étude qui a été menée par le ministère en charge de l'agriculture du Niger [6]. Pour plus de détails sur le bilan agricole par catégorie de produit se référer à l'Annexe 1.

Tableau 1 : Perte et excédant de la production agricole 2014 [6]

Catégorie de produits	Perte [%]	Excédant [%]
Céréales	15,47	0
Tubercules	5	0
Légumes	19,48	25,87
Légumineuses	25	53,13
Oléagineuses	20	51,26
Épices et stimulants	0	93,19
Viandes	0	0
Lait et produits laitiers	0	40,61

Les pertes (11 % en moyenne) représentent la partie de la production agricole qui n'a pas pu être commercialisée ou valorisée faute de technique de conservation efficace. Quant aux excédants, ils représentent 33 % de la production agricole globale susceptible d'être valorisé localement à travers le séchage, exporté vers d'autres pays ou bradé.

Le Niger produit par an environ 1 500 tonnes de légumes et 1 600 tonnes de légumineuses (se référer à l'Annexe 1 pour plus de détails). Habituellement, ces produits sont consommés à l'état frais, et un certain pourcentage notamment d'oignons est destiné à l'exportation. En période de forte production, une grande proportion de ces produits très périssables sont soit perdue ou bradée. Cela est dû à l'absence de stratégie d'exportation vers d'autres pays ou de technique de conservation appropriées.

Les pertes et les excédents des produits agricoles ne sont pas négligeables, une solution adéquate pour pallier à ces problèmes est la conservation. En tenant compte de la situation énergétique du Niger et l'abondance de sa ressource solaire (Figure 1), estimée en moyenne à  $6 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$  [5], le séchage solaire est le procédé de conservation à moindre coût, simple et accessible qui paraît le plus avantageux pour le séchage. Malgré ce potentiel solaire, l'usage des séchoirs solaires est peu répandu ; de ce fait, le séchage solaire traditionnel à ciel ouvert

demeure encore le procédé le plus utilisé.

Pour valoriser efficacement cette ressource solaire au Niger, le Centre National d'Énergie Solaire (CNES) avait mis au point des séchoirs solaires pour le séchage de différents types de produits. Cependant, ces systèmes n'arrivent pas à se positionner sur le marché local à cause leurs limites technico-opérationnelles et leur faible vulgarisation au Niger.

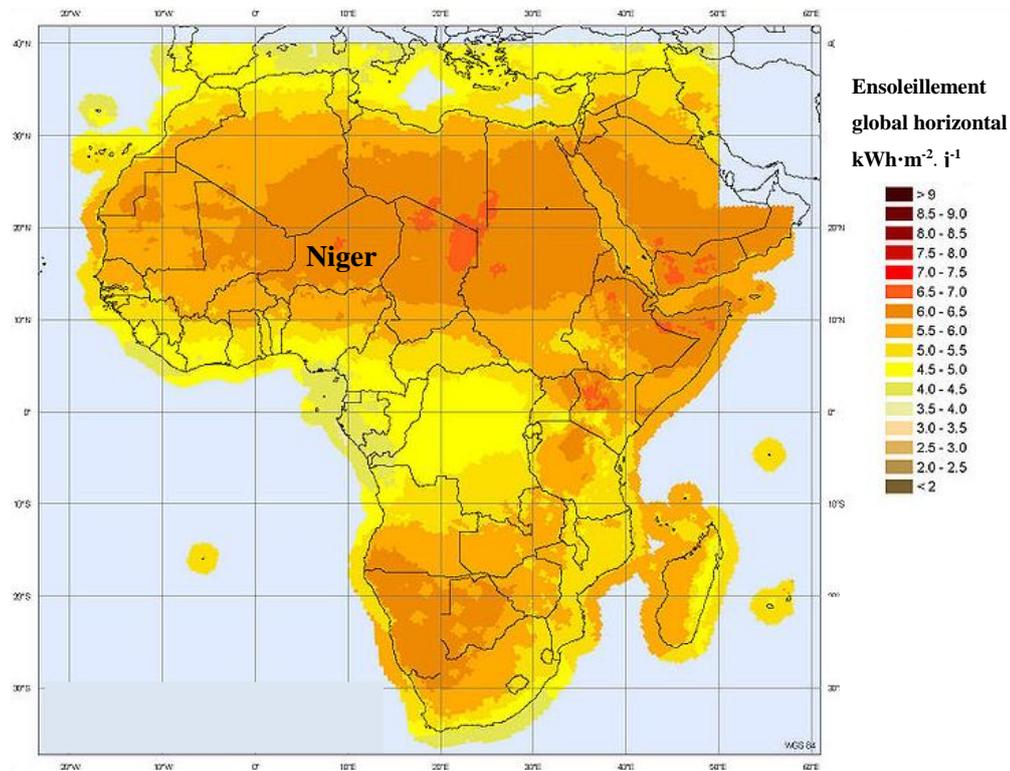


Figure 1: Potentiel solaire de l'Afrique [7]

## II.2 PRÉSENTATION DU CNES

Au sortir du premier Congrès Mondial sur l'Énergie Solaire, organisé à Rome en Août 1961, le Niger, tout comme certains pays de la sous-région, s'est engagé dans la Recherche-Développement orientée vers la filière solaire. À cet effet, fut créé en mai 1965 l'Office de l'Énergie Solaire à Niamey, sous l'acronyme « ONERSOL ». En 1999, l'ONERSOL devient le Centre National d'Énergie Solaire (CNES) érigé en établissement public à caractère administratif, placé sous la tutelle du Ministère en charge de l'Énergie.

Pour répondre à la problématique d'accroissement de l'accès aux services énergétiques, et respecter les engagements internationaux pris par le Niger en matière d'énergie, le CNES s'est fixé comme principales missions de :

- assurer la promotion de la recherche, de l'innovation technologique et la diffusion des technologies renouvelables efficaces ;

- assurer la veille et l'adaptation technologique dans les domaines des Énergies Renouvelables, notamment par la réalisation de projets pilotes à caractère d'illustration, de démonstration ou d'incitation ;
- assurer la maîtrise d'œuvre des projets dans les domaines des Énergies Renouvelables et de la Maîtrise de l'Énergie ;
- suivre, coordonner et superviser au niveau national, en concertation avec les administrations concernées, les programmes, projets et actions de développement dans le domaine des énergies renouvelables ;
- assurer le contrôle technique des équipements relatifs aux énergies renouvelables et réaliser les audits-qualité en collaboration avec les acteurs concernés, pour toute demande ou renouvellement de certification ;
- fédérer les acteurs nationaux et internationaux intervenant dans le domaine des Énergies Renouvelables ;
- prospecter les potentialités nationales en matière d'Énergies Renouvelables et identifier/réaliser la cartographie des ressources ;
- mener des actions de sensibilisation et de communication démontrant l'intérêt technique, économique, social et environnemental de l'utilisation des énergies renouvelables ;
- donner un avis technique sur les dossiers de demande d'agrément pour l'exercice de toute activité relevant du domaine des Énergies Renouvelables ;
- assurer le renforcement des capacités des acteurs du domaine des Énergies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique ;
- contribuer à rechercher et à mettre en place des mécanismes de financement durables et adaptés au domaine des Énergies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique ;
- exercer toutes autres missions confiées par le ministère en charge de l'Énergie.

Plusieurs projets ont été élaborés et réalisés par le CNES pour répondre aux besoins de la population. Les images de quelques réalisations du CNES sont disponibles à l'Annexe 4.

### III. ENQUÊTE SUR LE SÉCHAGE AU NIGER

---

Pour évaluer la situation nationale du séchage solaire, nous avons conduit une enquête dans la ville de Niamey. Cette enquête vise essentiellement à recueillir les appréciations des structures œuvrant dans ce domaine. La méthodologie employée pour mener à bien cette étude est la suivante :

- rédaction d'une fiche d'enquête, qui est présentée à l'Annexe 1 ;
- identification des différentes structures impliquées dans le séchage ;
- planification des entretiens ;
- visite des structures concernées.

Nous avons ainsi réalisé des entretiens avec une quinzaine de structures différentes (liste fournies à l'Annexe 1) de novembre à décembre 2017. Nous présentons les résultats de cette enquête dans les paragraphes qui suivent.

#### III.2.1 Techniques de séchage utilisées

Deux catégories de techniques de séchage sont utilisées au Niger, il s'agit des techniques de séchage classiques et des techniques de séchage améliorées. Parmi, les deux types de procédés de séchage, les techniques de séchage traditionnelle sont les plus utilisées.

##### III.2.1.1 Techniques de séchage classiques

Il s'agit des techniques de séchage traditionnelles et semi-traditionnelles utilisées principalement par les groupements féminins. Ces techniques sont les suivantes :

- **séchage solaire à ciel ouvert :**

Ce procédé consiste à étaler le produit frais sur des nattes ou à même le sol pour l'exposer au soleil. Cette technique de séchage est la plus répandue au Niger du fait de son accessibilité (pratiquement gratuit). Mais, son inconvénient principal est le risque de contamination des produits séchés, la pénétration de certains débris et l'attaque de certains animaux (ovins, caprins, volailles etc.). Par conséquent, ce procédé requiert un contrôle permanent ;

- **séchage en chambre sans ventilation :**

Cette technique consiste à étaler le produit frais sur des tables ou sur des nattes dans un local afin d'éviter toute contamination extérieure, pénétration de débris végétaux et l'attaque des animaux. C'est la deuxième technique la plus utilisée après le séchage au fil du soleil à ciel ouvert. Ce procédé est utilisé par les groupements féminins pour résoudre le problème de capacité des séchoirs solaires. Elle a pour principal inconvénient la longue durée de séchage

due au manque d'un système de renouvellement d'air ;

- **séchage en chambre sous ventilation :**

Cette technique consiste à étaler le produit humide sur des tables ou sur des nattes dans un local sous ventilation. Ce procédé est utilisé par les groupements féminins pour atténuer le problème de la longue durée de séchage en local non ventilé. La consommation électrique due à l'utilisation des brasseurs est son principal inconvénient.

- **séchage sous moustiquaire au fil du soleil :**

Il consiste à étaler le produit frais sur des tables ou nattes sous moustiquaire pour l'exposer au soleil. Ce procédé permet ainsi à la fois, d'utiliser l'énergie solaire et de protéger le produit contre la pénétration de certains débris et l'attaque de certaines espèces animales (mouches, oiseaux, etc.). Mais, le risque d'infiltration de la poussière n'est pas écarté. Ce procédé est surtout utilisé par les groupements féminins pour accélérer le séchage des produits agricoles ou maraichers en temps non poussiéreux.

- **séchage solaire au fil du soleil sur grille rectangulaire :**

Le produit frais est étalé sur une grille métallique à châssis de forme rectangulaire en bois puis exposé au soleil. Un premier tissu est mis d'abord avant d'étaler le produit, puis un deuxième est mis sur le produit. Cette technique est utilisée par les femmes transformatrices de produits agricoles ou maraichers pour faciliter la mobilité du produit.

### **III.2.1.2 Techniques de séchage améliorées**

Il s'agit des techniques de séchage faisant recourt à des séchoirs solaires et des séchoirs utilisant l'énergie électrique ou le gaz comme source d'énergie. Les principaux séchoirs utilisés par les acteurs intervenant dans le domaine du séchage sont :

- **séchoirs solaires :**

Les séchoirs solaires sont des équipements qui permettent de sécher un produit à l'intérieur d'une enceinte de séchage sur des claies. Cette technique permet d'obtenir un produit séché de meilleure qualité nutritive et de réduire la durée du séchage par rapport aux procédés traditionnels. À l'issue de l'enquête, l'utilisation courante de deux types de séchoirs solaires est enregistrée à Niamey. Il s'agit du séchoir ICARO qui est de loin le plus répandu et du séchoir coquille. Le séchoir ICARO est un séchoir à convection forcée de type indirect (Figure 2) qui a une capacité de stockage maximale de 50 kg de produit frais. Ses claies sont au nombre de 10 dont chacune a une capacité maximale de 5 kg.



Figure 2 : Séchoir ICARO

Quant au séchoir coquille, il est de type indirect fonctionnant en convection naturelle et peut supporter jusqu'à 10 kg de produits frais (Figure 3). Ce séchoir est destiné à une utilisation domestique.



Figure 3 : Séchoir coquille

#### ▪ séchoirs à gaz

Ce sont des séchoirs qui utilisent le gaz comme source d'énergie (Figure 4). Par rapport, aux séchoirs solaires, les séchoirs à gaz ont une durée de séchage moins longue. Mais, le coût d'exploitation lié à l'usage du gaz est son principal inconvénient. Les groupements féminins et PME font appel aux séchoirs à gaz pour accélérer le processus de séchage et produire plus de produits séchés de bonne qualité nutritive par rapport au séchage solaire.



Figure 4 : Séchoir à gaz artisanal

### ▪ séchoirs électriques

Ces séchoirs (Figure 5) convertissent l'énergie électrique en énergie thermique pour sécher le produit frais étalé sur des claies. Tout comme les séchoirs à gaz, les séchoirs électriques aussi ont une durée de séchage moins longue. Cependant, l'inconvénient majeur des séchoirs électrique est le coût lié à l'usage de l'électricité.



Figure 5 : Séchoir électrique de puissance 9 kW

## III.2.2 Applications principales

En dehors des produits issus du séchage solaire traditionnel destinés à l'autoconsommation, il y'a également les produits couramment séchés à petite échelle par les groupements féminins et PME à caractère commercial. À l'issue de notre enquête, les produits recensés sont les suivants :

- **céréales** : couscous (blé, mil, soja, maïs, riz et sorgho), degué (mil et sorgho), grumeaux (mil, sorgho), toukoudi (boule à base de mil épicé), farine (mil, maïs, sorgho, haricot), farine composée (mil-sorgho, maïs-blé etc.), bassi (mil et sorgho), dan-watché (haricot), fonio ;
- **condiments** : soubala, épices (piment, poivre, gingembre etc.) ;
- **fruits** : mangue, banane ;
- **légumes** : tomate, oignon, gombo, pomme de terre, carotte, choux ;
- **végétaux** : persil, céleri, moringa, feuilles de baobab, menthe, etc. ;
- **autres** : granulé de bissap et de gingembre.



Figure 6 : Produits agricoles et maraichers emballés après séchage

La période d'approvisionnement des groupements féminins et PME en produits céréaliers se situe entre octobre et décembre (période post-récolte). Quant aux produits maraichers, ils sont achetés pendant les périodes de forte production (entre novembre et février) puis séchés. Cette stratégie est utilisée par les groupements féminins et PME pour répondre aux besoins futurs des consommateurs en période de rareté des produits maraichers.

### **III.2.3 Coût des procédés de séchage**

Au Niger, le procédé de séchage le moins cher, voir même gratuit, demeure encore le séchage traditionnel à ciel ouvert malgré tous les risques de contamination. Le séchoir solaire ICARO de capacité maximale 50 kg de produits frais (Figure 2) coûte environ 450 000 FCFA, ce qui n'est pas du tout à la portée de tout groupements féminins et PME. De conception simple et de petite dimension, le séchoir coquille de capacité de stockage en produit frais de 10 kg (Figure 3) coûte environ 80 000 FCFA. Le taux d'utilisation des séchoirs solaires est de 30 %. Cependant, les séchoirs utilisant une source d'énergie (gaz, électricité) sont chers en acquisition tout comme en exploitation (taux d'utilisation 10 %). Ainsi, un séchoir électrique importé de la chine de capacité 50 kg et de puissance électrique de 9 kW (Figure 5) coûte environ 1 650 000 FCFA. Le séchoir à gaz de fabrication locale de 30 kg (Figure 4) vaut environ 300 000 FCFA.

### **III.2.4 Acteurs impliqués**

À échelle nationale, principalement trois établissements interviennent dans la fabrication et la maintenance des séchoirs solaires. Il s'agit du CNES (Centre National d'Énergie Solaire), de l'atelier de fabrication ATR (Atelier de Technologies Rurales) et de l'ONG ARES (Action Rurale et Énergie Solaire). Par contre, aucune entreprise n'est impliquée dans l'importation des séchoirs car ils sont majoritairement de fabrication locale.

### **III.2.5 Utilisateurs/Intervenants**

À l'échelle nationale, les principaux utilisateurs des séchoirs sont les groupements féminins et les PME. Les ONG en achètent aussi pour en faire des dons aux associations féminines et PME. Cependant, les séchoirs solaires disponibles n'arrivent pas à satisfaire pleinement les besoins des utilisateurs. Les subventions accordées aux groupements féminins et PME sont principalement d'ordre non gouvernemental. C'est le cas de l'ONG AcSSA (Action pour la Sécurité et la Souveraineté Alimentaire) Afrique Verte Niger qui a initié de 2010 à 2011 un projet de donation d'une centaine de séchoirs solaires de type ICARO et coquille, suivie d'une formation sur le séchage aux groupements féminins de Niamey et village environnant. Mais, ce projet n'a pas connu un grand succès puisque les séchoirs n'ont pas répondu aux attentes des

groupements féminins. Actuellement, ces séchoirs ICARO sont délaissés au profit des techniques de séchage classiques. De même, en 2016, l'Initiative Mil Sorgho (IMS) a subventionné l'acquisition d'un séchoir à gaz au groupement féminin ETC (Entreprise de Transformation Céréalière) de Niamey. Au cours de la visite, nous avons trouvé ce séchoir dans un état fonctionnel.

### III.2.6 Problèmes rencontrés

À l'issue de l'enquête, plusieurs problèmes liés à l'usage des séchoirs solaires ont été évoqués par les utilisateurs. Les principaux problèmes recueillis sont de deux catégories : les problèmes d'ordre général et ceux qui sont liés aux séchoirs ICARO.

#### III.2.6.1 Problèmes d'ordre général

Il s'agit des problèmes auxquels sont confrontés en général les utilisateurs des séchoirs solaires. Ces problèmes sont les suivant :

- **longue durée de séchage** : c'est l'un des freins qui bloquent encore le développement des séchoirs solaires à cause de l'intermittence de la ressource solaire. La durée moyenne de séchage des produits s'étend sur deux à trois jours environ ;
- **capacité limitée** : c'est une limite majeure qui freine l'utilisation des séchoirs solaires à grande échelle par les groupements féminins et PME. L'utilisation de plusieurs séchoirs peut résoudre ce problème, mais les moyens et l'espace surtout en milieu urbain constituent aussi un frein. Il ressort de l'enquête que la production en produits séchés agricoles ou maraichers n'arrive pas à couvrir pleinement la demande locale. D'où la nécessité de trouver un moyen pour contourner cette sous-production afin de satisfaire la demande croissante en produits séchés. Cela constitue une grande opportunité d'affaire au Niger ;
- **Difficulté en saison pluvieuse** : en période de pluie l'utilisation des séchoirs solaires devient pénible voire impossible du fait de l'humidité relative ambiante élevée et du faible ensoleillement. Certains utilisateurs cessent carrément le séchage par faute de procédé plus efficace. Cependant, les séchoirs utilisant une source d'énergie autre que le solaire ne sont pas à la portée des groupements féminin et PME ordinaires.

#### III.2.6.2 Problèmes liés aux séchoirs ICARO

Il s'agit des problèmes particulièrement rencontrés au cours de l'utilisation des séchoirs ICARO. Ils sont entre autres :

- **infiltration de la poussière dans l'enceinte de séchage** : en temps poussiéreux l'usage des séchoirs s'avère risqué à cause du risque de contamination du produit. Pour faire face à ce problème, les groupements féminins et PME ont délaissé les séchoirs solaires, pour procéder à un séchage en chambre ventilée ou non ventilée ;
- **corrosion de la carrosserie du séchoir avec risque de contamination du produit** : le contact avec l'eau est la principale cause qui conduit à la corrosion. Le produit étant dans l'enceinte de séchage sur des claies, certains débris issus de la corrosion peuvent pénétrer dans le produit et exposer ainsi les consommateurs à des risques de maladies ;
- **contamination du produit par de débris de peinture** : avec le temps, la peinture des séchoirs peut se détériorer et ensuite se désolidariser de la tôle en acier. En se décollant, les débris de peinture risquent de pénétrer dans le produit et le contaminer ;
- **modification de l'odeur du produit après séchage** : cela est due à la peinture et à la corrosion de la carrosserie des séchoirs. En effet, la corrosion associée à la peinture détériorée dégage une odeur pouvant modifier l'odeur d'origine du produit après séchage ;
- **panne fréquente du système ventilateur-module PV** : ce système fait constamment l'objet d'opérations de maintenance et générant ainsi des coûts d'exploitation supplémentaires ;
- **attaque du produit par les bactéries en absence du soleil** : certains produits ayant une teneur en eau élevée (surtout en période de pluies) pendant la nuit sont susceptibles d'être attaqués par les moisissures et les levures. Le manque d'un système de ventilation en permanence pourrait être la cause principale ;
- **Claies tranchantes** : lors du nettoyage, de l'introduction ou du retrait du produit de la chambre de séchage, le risque de blessure est probable.

### III.2.7 Attentes des utilisateurs

Élargir leur production en utilisant des séchoirs solaires, est la première attente des groupements féminins et PME recueillie au cours des entretiens. En général, les principaux souhaits recueillis sont d'avoir des séchoirs :

- d'une grande capacité (produit) ;
- accessibles (moins cher) ;
- ayant un processus de séchage rapide ;
- hygiéniques (propres);

- ergonomiques (facile à utiliser).

Au Niger, le séchage solaire est couramment utilisé, mais des problèmes restent à régler, notamment au niveau du séchoir ICARO qui est le séchoir solaire phare sur le marché local. La résolution des problèmes du séchoir ICARO passe par sa caractérisation et l'analyse de ses performances afin de l'améliorer dans le but de répondre aux attentes des utilisateurs.

## IV. ÉTUDE DES PERFORMANCES DU SÉCHOIR ICARO

---

### IV.1 INTRODUCTION

L'étude des performances du séchoir ICARO est essentiellement basée sur des tests expérimentaux. Il s'agit entre autres des tests à vide et des tests en charge afin de recueillir des données exploitables pour sa caractérisation. Au CNES, aucune étude de caractérisation du séchoir ICARO n'a été effectuée par le passé, notre étude en est la première. Les principaux objectifs de notre étude sont les suivants :

- étudier le comportement du séchoir ICARO en fonction de l'ensoleillement, la température et l'humidité ambiante ;
- évaluer la température à la sortie de chacun des deux capteurs thermiques (horizontal et incliné) afin de vérifier la nécessité du capteur horizontal.

### IV.2 PRÉSENTATION DU SÉCHOIR ICARO

#### IV.2.1 Historique

Les séchoirs ICARO sont des séchoirs solaires de type indirect à convection forcée conçu au Niger en collaboration avec l'université de Turin (Italie) depuis 1998 [8]. Pour répondre efficacement aux besoins des utilisateurs, ces séchoirs ont connu certaines améliorations suivant les années. Les différentes versions des séchoirs ICARO sont les suivantes :

- séchoir ICARO 1998 : c'est un séchoir vertical de petite capacité pouvant supporter jusqu'à 20 kg de produit frais. L'enceinte de séchage à une surface de 1 m<sup>2</sup> ;
- séchoir ICARO 2000 : c'est un séchoir vertical de petite capacité pouvant supporter jusqu'à 25 kg de produit frais. L'enceinte de séchage à une surface de 1 m<sup>2</sup> ;
- séchoir ICARO 2004 : il a une capacité de 50 kg de produits frais. La chambre de séchage de forme horizontale est passée de 1 m<sup>2</sup> à 2 m<sup>2</sup>. C'est la version des ICARO la plus vulgarisée au Niger.
- séchoir ICARO 2007 : il a les mêmes dimensions que la version 2004 (Figure 7). Cependant, pour accélérer le processus de séchage, deux capteurs thermiques sont utilisés (incliné et horizontal).

Notre étude s'est portée essentiellement sur la version ICARO 2007 étant donné que c'est la version qui est actuellement la moins utilisée à cause de ses multiples insuffisances technico-opérationnelles par rapport aux versions antérieures. Il s'agit en effet à travers notre étude d'apporter des réponses aux insuffisances de cette version 2007.

## IV.2.2 Description du séchoir ICARO 2007

Le séchoir ICARO est un séchoir solaire de type indirect à convection forcée (Figure 7). Il a une durée de vie estimée à 15 ans [8] à condition de renouveler sa peinture chaque année. Le prototype conçu au CNES depuis 2007 est toujours fonctionnel. Les différents éléments constitutifs du séchoir ICARO sont les suivants :

- **capteur thermique** : fabriqué entièrement en tôle (sans vitre) peinte en noire mate. Il est constitué d'un capteur horizontal intégré dans la partie supérieure de l'enceinte de séchage et d'un capteur incliné de  $7^\circ$  (par rapport à l'horizontal). Chaque capteur a une longueur de 2 m sur une largeur de 1 m et une épaisseur de 6,5 cm. L'objectif visé par les concepteurs à travers cette nouvelle configuration du séchoir ICARO est d'optimiser la température à l'entrée de l'enceinte de séchage. L'isolant de la partie inférieure du capteur est la sciure de bois avec une épaisseur de 35 mm ;
- **enceinte de séchage** : elle a un volume de  $1 \text{ m}^3$  avec une capacité de 50 kg soit 5 kg par claie. L'enceinte est peinte en noire mate et l'isolant de la partie inférieure est la sciure de bois avec une épaisseur de 30 mm ;
- **claires** : l'enceinte de séchage est constituée de 10 claires dont chacune à une surface de  $0.62 \text{ m}^2$  et des orifices de  $1 \text{ cm}^2$  ;
- **hexaèdre** : c'est la partie dans laquelle les ventilateurs sont logés, elle a un volume de  $38 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$  avec 3 orifices circulaires d'environ 10 cm de diamètre ;
- **ventilateurs** : ils sont au nombre de 3 avec une puissance de 5 W chacun sous une tension de 12 V / 24 V DC. Ils sont installés sur l'hexaèdre ;
- **module PV** : il est de type poly-cristallin, il a une puissance de 80 Wc. À puissance maximale, il a un courant de 4,47 A et une tension de 17,5 V.

Le Tableau 9 de l'Annexe 1 fournit d'avantage de détails techniques du séchoir ICARO.

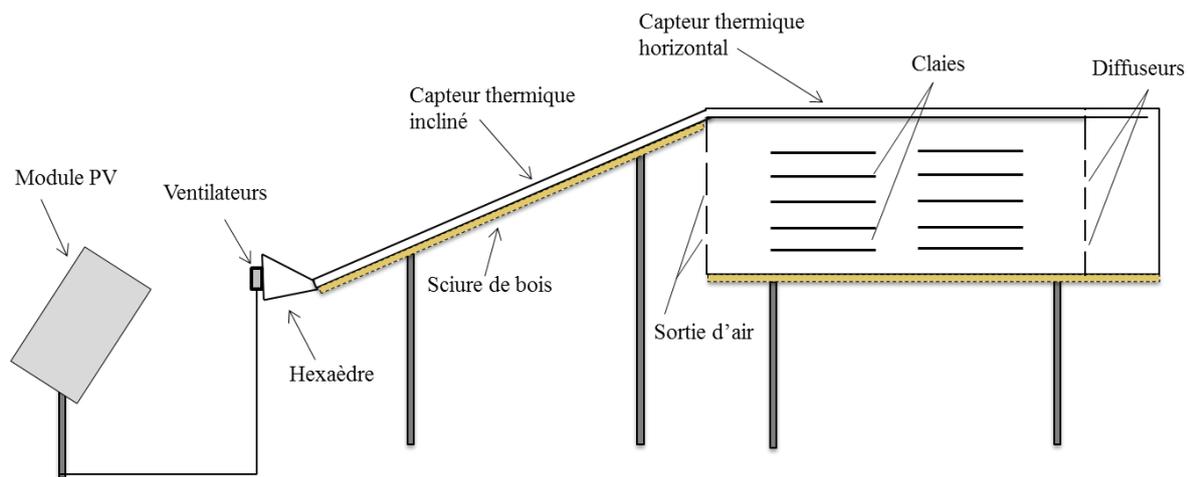


Figure 7 : Schéma du séchoir ICARO

L'estimation du coût de fabrication du séchoir ICARO 2007 a été faite en considérant les prix des matériaux sur le marché local. Le Tableau 2 renseigne en détails sur le coût global de fabrication du séchoir avant toutes améliorations.

Tableau 2 : Coût de fabrication du séchoir ICARO avant amélioration

Désignation	Détail	Quantité	Prix unitaire [FCFA]	Prix global [FCFA]
Tôle de 0,8 mm	2 m x 1 m (Feuille)	10	10 000	100 000
Tube carré de 40 mm	5,75 m de longueur	4	5 500	22 000
Tube carré de 35 mm	5,75 m de longueur	2	4 500	9 000
Tube carré de 30 mm	5,75 m de longueur	6	3 500	21 000
Tube carré de 25 mm	5,75 m de longueur	8	2 500	20 000
Cornière de 20 mm	5,75 m de longueur	10	2 500	25 000
Grille métallique	1 m <sup>2</sup>	15	3 000	45 000
Ventilateur 5 W	DC	3	5 000	15 000
Sciure de bois	Sac	2	1 500	3 000
Module PV 80 W	Poly-cristallin	1	55 000	55 000
Peinture noire mate	Boite de 2 kg	1	15 000	15 000
Autres accessoires	Crochets, câbles, rondelles, boulons...	-	5 000	5 000
<b>Sous total</b>				<b>335 000</b>
Main d'œuvre	Équipe : 2 personnes Durée : 24 h à 32 h	-	50 000	50 000
<b>Total</b>				<b>385 000</b>

Le Tableau 2 montre principalement que le coût d'achat de la tôle de 0,8 mm, le module PV, la main d'œuvre et la grille métallique représente respectivement 26 % ; 14 % ; 13 % et 12 % du coût de fabrication du séchoir ICARO. Tandis que, la sciure de bois ne représente que 0,78 % du coût total.

### IV.3 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

L'étude est réalisée à Niamey sur le site du Centre National d'Énergie Solaire ; les caractéristiques géographiques de la ville sont les suivantes : latitude 13,3° Nord, longitude 2,6° Est et altitude 227 m.

#### IV.3.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental (Figure 8, Figure 9) est un séchoir solaire à convection forcée de type indirect (Figure 2) auquel est associé des équipements de mesure (température, ensoleillement et humidité) et de sauvegarde des données. En effet, les équipements utilisés pour réaliser les tests à vide et en charge sont les suivants :

- une centrale d'acquisition de données Campbell CR 1000 pour la sauvegarde des valeurs de la température et de l'ensoleillement global horizontal ;
- deux thermocouples Campbell 105E de type E pour la mesure de la température à la sortie des capteurs et la température à la sortie de la chambre de séchage. L'incertitude de mesure est de l'ordre de 0,5% ;
- un thermo-hygromètre TFA kat.Nr 30.3015 pour la mesure de la température et de l'humidité de l'air ambiant. La précision des mesures de la température est de l'ordre  $\pm 0,1$  °C et celle de l'humidité est de l'ordre de  $\pm 1$  % ;
- un pyranomètres Kipp & Zonen CMP22 pour mesurer l'ensoleillement global horizontal avec une incertitude de mesure inférieure à 5 W/m<sup>2</sup> ;
- une balance numérique Sauter RC 1631 pour peser le produit au cours du procédé de séchage afin d'évaluer sa teneur en eau. La précision des mesures est de l'ordre de  $\pm 0,1$  g ;
- un anémomètre Dostman P670 pour évaluer la vitesse de l'air en convection forcée avec une incertitude de  $\pm 0,5$  % ;
- un multimètre Eldes ELD 9102 pour vérifier les différents câblages en cas de problème.

La Figure 8 et la Figure 9 décrivent les dispositifs expérimentaux utilisés pour mener les tests de performance du séchoir ICARO à vide et en charge.

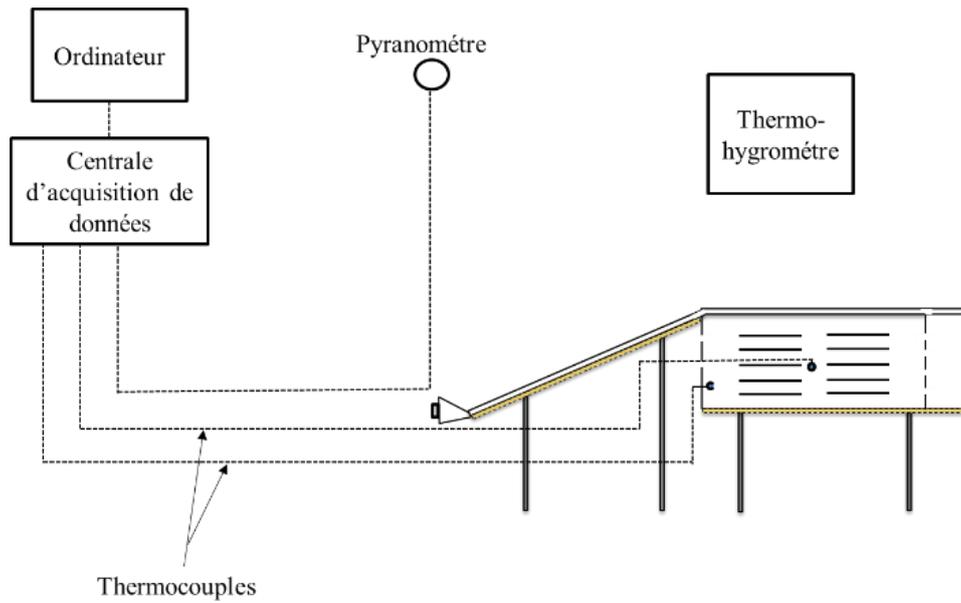


Figure 8 : Dispositif expérimental 1

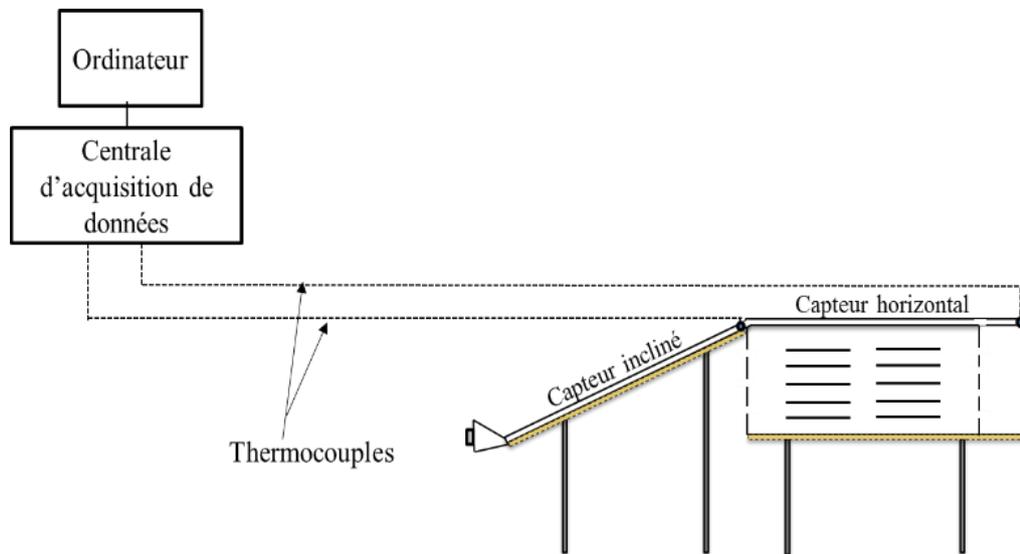


Figure 9 : Dispositif expérimental 2

La performance des séchoirs solaires dépend fortement des conditions climatiques de la région et de certains paramètres physiques. Les principaux paramètres de l'air asséchant qui influencent le séchage sont : sa température, sa vitesse et son humidité.

Mais, faute de sondes hygrométriques pouvant être installées au sein de la chambre pour évaluer la variation de l'humidité de l'air asséchant, seule la variation de la température au sein du séchoir ICARO est principalement étudiée.

### IV.3.2 Protocole expérimental

Trois tests ont été réalisés sur le séchoir ICARO dans deux différentes conditions, à vide et en charge, dont le but d'évaluer le comportement du séchoir ICARO entre 9 h et 17 h (Figure 8).

Lors des tests les températures et l'humidité sont enregistrées avec un pas de 5 min.

Le test à vide consiste à mesurer la température à la sortie des deux capteurs thermiques et celle à la sortie de l'enceinte de séchage (Figure 8). À la différence du test à vide, au test en charge s'ajoute l'évaluation de la teneur en eau du produit agricole ou maraicher testé. Lors du troisième test, seul l'apport en température de chacun des deux capteurs thermiques est évalué.

#### **IV.3.2.1 Caractérisation à vide**

Au cours de ce test (voir le dispositif expérimental sur la Figure 8), les valeurs expérimentales sont enregistrées entre 9 h et 17 h sur la centrale d'acquisition des données avec un pas de 5 mn. Pour mener à bien ce test, le protocole expérimental employé consiste à :

- mesurer l'ensoleillement global horizontal ;
- mesurer la température et l'humidité relative de l'air ambiante ;
- évaluer la température au centre et celle à la sortie de l'enceinte de séchage à l'aide des deux thermocouples installés sur le séchoir ;
- connecter les deux thermocouples et le pyranomètre sur la centrale d'acquisition de données, laquelle est reliée à un micro-ordinateur pour la collecte des valeurs mesurée sous forme de fichiers de données.

#### **IV.3.2.2 Caractérisation en charge**

Au cours des tests en charge, en plus de la collecte des valeurs de l'humidité, de la température et de l'ensoleillement on distingue aussi les opérations suivantes qui consiste à :

- conditionner le produit brut en le découpant ou en le triant afin le rendre convenable à l'opération de séchage ;
- peser la masse initiale du produit frais ;
- étaler le produit frais sur les deux claies centrales de la chambre de séchage ;
- évaluer la masse du produit en cours de séchage chaque 1 h par le biais d'une balance numérique.

Les produits choisis pour l'expérimentation sont le moringa, l'oignon et la tomate en raison de leur usage fréquent parmi les habitudes alimentaires de la population nigérienne. Pour évaluer la quantité d'eau perdue, la différence entre deux valeurs successives de la masse du produit est effectué chaque 1 h.

$$m_t = m_{t2} - m_{t1}$$

$m_t$  : Masse du produit à un instant t (kg)

### IV.3.2.3 Évaluation thermique des capteurs (incliné et horizontal)

Pour évaluer la température de l'air au niveau de chaque capteur (Figure 9), un thermocouple est placé à la sortie de chaque capteur. Ce test a pour but d'apprécier la performance thermique de chaque insolateur. La température à la sortie du capteur incliné et celle à la sortie du capteur horizontal sont enregistrées entre 10 h et 17 h chaque 5 minute sur la centrale d'acquisition des données (CR 1000).

## IV.4 ANALYSE ÉNERGÉTIQUE DU SÉCHOIR

L'analyse énergétique consiste à étudier le comportement du séchoir ICARO en fonction des données expérimentales. Il s'agit principalement du rendement et de la consommation d'énergie du séchoir ICARO.

### IV.4.1 Analyse énergétique des deux capteurs thermiques

La quantité d'énergie totale reçue par le capteur thermique en tôle peinte en noire mate est donnée par l'équation (1). Elle est exprimée en fonction de l'ensoleillement, de la surface du capteur et de l'absorptivité de la tôle peinte en noire mate.

$$Q_{abs} = \alpha I S_{cap} \quad (IV.1)$$

La puissance thermique récupérée par l'air caloporteur entre l'entrée et la sortie du capteur est donnée par :

$$Q_u = \dot{m}_a \cdot C_{pa} \cdot (T_{asc} - T_{amb}) \quad (IV.2)$$

Avec  $C_{pa} = 1008 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  [9]

Le rendement thermique des deux capteurs (incliné et horizontal) est donné par le rapport de la puissance utile et de la puissance thermique absorbée.

$$\eta_{cap} = \frac{\dot{m}_a \cdot C_{pa} \cdot (T_{cap} - T_{amb})}{I \cdot S_{cap}} \quad (IV.3)$$

$\dot{m}_a$  : Débit massique de l'air caloporteur ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$C_{pa}$  : Capacité calorifique de l'air caloporteur

$T_{cap}$  : Température de l'air à la sortie du capteur ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{amb}$  : Température ambiante ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\alpha$  : Absorptivité de la tôle peinte en noire mate

$I$  : Ensoleillement ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )

$S_{cap}$  : Surface de captage ( $\text{m}^2$ )

$Q_{abs}$  : Puissance thermique solaire reçue

$\eta_{cap}$  : Rendement du capteur thermique

#### IV.4.2 Analyse énergétique de la chambre de séchage

La consommation d'énergie (4) du séchoir est définie par le ratio de l'énergie totale reçue par le séchoir solaire et la quantité d'eau extraite du produit [1].

$$CE = \frac{E_t}{m_e} \quad (IV.4)$$

La quantité d'eau retirée du produit lors du séchage est donnée par la différence de masse entre le produit initial (frais) et le produit séché obtenu (5).

$$m_e = m_i - m_f \quad (IV.5)$$

Pour suivre la régression instantanée de la masse du produit au cours de la caractérisation en charge, l'expression (6) est utilisée. Elle consiste à faire la différence entre deux pesées successives après 1 h.

$$m_t = m_{t2} - m_{t1} \quad (IV.6)$$

L'énergie totale (7) reçue par le système est composée de l'énergie solaire reçue par le capteur thermique et de l'énergie électrique consommée par les ventilateurs.

$$E_t = (I \cdot S_{cap} + P_{elec}) \cdot t \quad (IV.7)$$

CE : Consommation d'énergie du séchoir ( $J \cdot kg^{-1}$ )

$E_t$  : Énergie totale consommée par le séchoir (J)

$m_i$  : Masse initiale du produit (kg)

$m_f$  : Masse finale du produit après séchage (kg)

$m_t$  : Masse du produit à un instant t (kg)

$m_e$  : Masse d'eau retirée du produit (kg)

I : Ensoleillement global horizontal ( $W \cdot m^{-2}$ )

$P_{elec}$  : Puissance électrique consommée par le séchoir (W)

t : Temps d'utilisation du séchoir (s)

## V. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

---

Cette partie présente les différents résultats expérimentaux et théoriques obtenus dans le cadre de l'étude du comportement du séchoir ICARO. Il s'agit entre autre de l'influence des paramètres de l'air et du produit (la température de l'air caloporteur et la teneur en eau du produit) sur le processus de séchage. Comme le séchoir est peint en noire mate, dans les calculs, l'absorptivité considérée est 0,9 [10].

Le débit de l'air asséchant a été calculé à partir de sa vitesse (1 m/s) mesurée à l'aide de l'anémomètre et la section du capteur qui est de 0,065 m<sup>2</sup>. Le débit volumique obtenu après calcul est 0,065 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. Pour plus d'informations sur les données expérimentales brutes (non traitées) se référer à l'Annexe 2.

### V.1 CARACTÉRISATION À VIDE

#### V.1.1 Variation journalière de la température au sein du l'enceinte de séchage

La Figure 10, la Figure 11 et la Figure 12 représentent respectivement la variation journalière de la température ambiante, la température au centre et celle à la sortie du séchoir obtenue à partir des expériences de trois jours différents en décembre. Les plus basses valeurs sont enregistrées vers 9 h alors que les plus hautes températures (environ 50° C) sont enregistrées vers 14 h et commencent à décroître à partir 15 h, suivant le même profil que la température ambiante.

Les valeurs minimales de la température ambiante, au centre et à la sortie du séchoir sont respectivement 25°C, 24°C et 21°C enregistrés à 9 h (Figure 10). Les valeurs maximales de la température ambiante, au centre et à la sortie du séchoir sont respectivement 45°C, 56°C et 52°C enregistrées à 14 h 50.

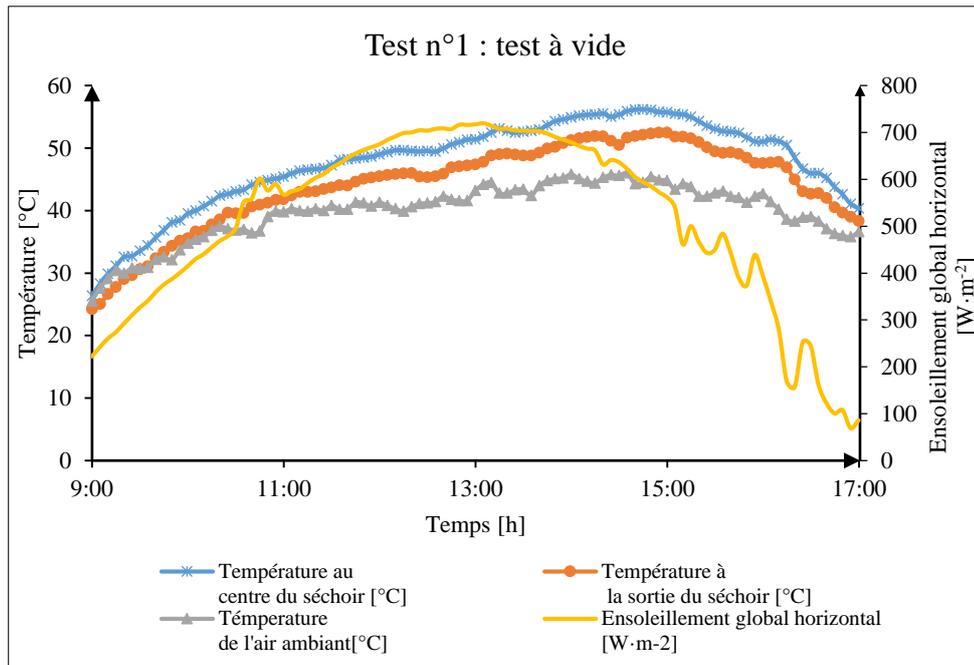


Figure 10 : Variation des températures en fonction du temps (test 1)

Les valeurs minimales de la température ambiante, au centre et à la sortie du séchoir sont respectivement 24° C, 24° C et 22° C enregistrés à 9 h (Figure 11). Les valeurs maximales de la température ambiante, au centre et à la sortie du séchoir sont respectivement 37 ° C, 48° C et 43° C enregistrées à 14 h 45.

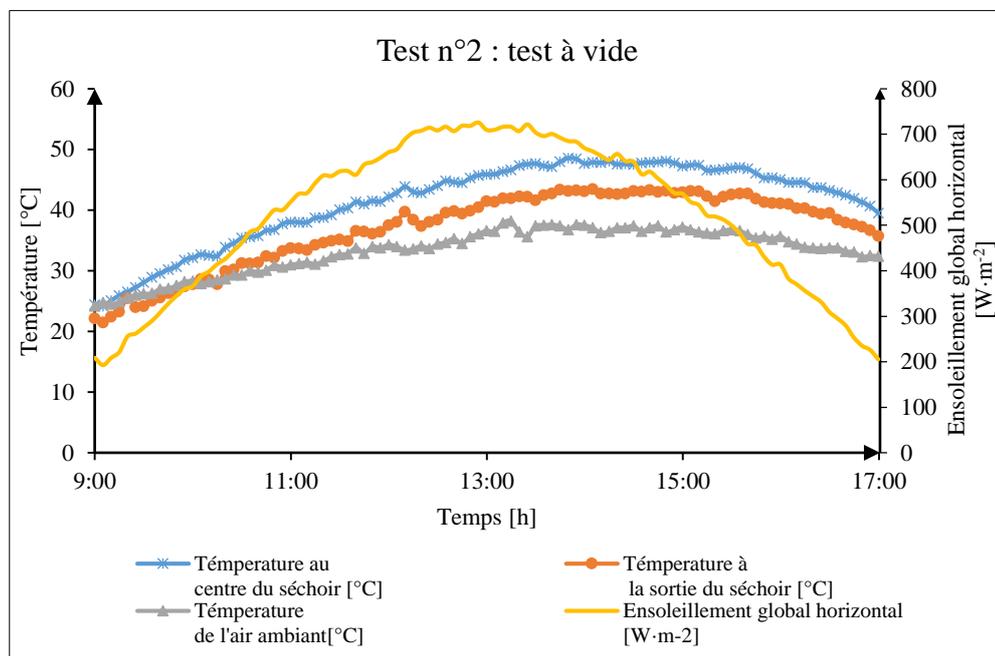


Figure 11 : Variation des températures en fonction du temps (test 2)

Les valeurs minimales de la température ambiante, au centre et à la sortie du séchoir sont respectivement 25°C, 24°C et 21°C enregistrés à 9 h (Figure 12). Les valeurs maximales de la température ambiante, au centre et à la sortie du séchoir sont respectivement 40°C, 53°C et 48°C enregistrées à 14 h 35.

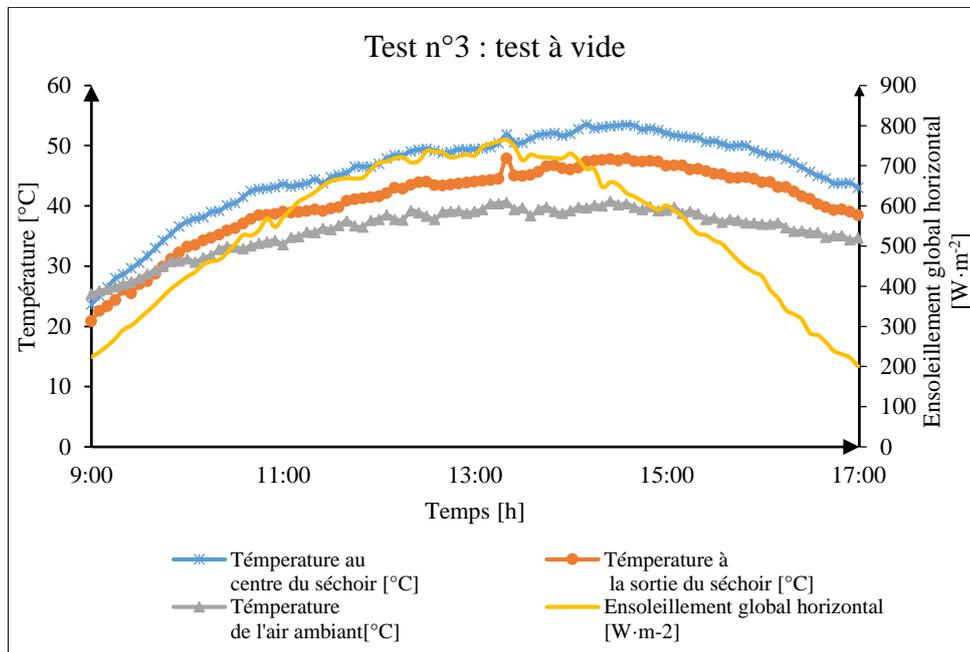


Figure 12 : Variation des températures en fonction du temps (test 3)

### V.1.2 Rendement moyen des deux capteurs thermiques

En considérant que l'air est sec pour simplifier les calculs, le rendement moyen des deux capteurs du séchoir ICARO est obtenu à partir de la température moyenne à la sortie des deux capteurs, la température ambiante moyenne et l'insolation globale moyenne des trois tests à vide (Tableau 3). Ce rendement est relativement bas par rapport la valeur moyenne des capteurs thermiques.

Tableau 3 : Rendement moyen du séchoir ICARO

Température moyenne à la sortie des capteurs [° C]	Température ambiante moyenne [° C]	Ensoleillement global moyen [W·m <sup>-2</sup> ]
44,86	36,41	525,97
<b>Rendement moyen des trois tests à vide [%]</b>		
<b>32,16</b>		

### V.1.3 Gamme de produits adaptés

D'après les trois tests à vide, le séchoir ICARO permet d'élever la température de l'air ambiant en moyenne de 7°C sous un ensoleillement moyen de 525,97 W·m<sup>-2</sup>. À vide, la température moyenne de l'enceinte de séchage est 45 °C et la moyenne des températures maximales est 55 °C. Donc, le séchoir ICARO est mieux adapté au séchage des produits en couche mince tels que les :

- céréales (riz, maïs, mil, sorgho...) : la température optimale doit se situer entre 45 °C et 55 °C [11] ;
- végétaux (feuilles de baobab, moringa, menthe, persille, cèleri) : la température optimale doit se situer entre 40°C à 55°C [11].

Quant aux fruits (mangue, banane...) et légumes (oignon, tomate, aile...), la température optimale doit se situer entre 50°C et 70°C avec un temps de séchage qui se situe entre 10 et 21 h [12], leurs procédés de séchage avec ICARO prendra beaucoup plus de temps par rapport aux végétaux. Étant donné que le séchoir ICARO est adapté au séchage d'un nombre restreint de produit frais sous une température d'air asséchant relativement élevée de 50 °C pendant un bref moment, des améliorations ont été suggérées (VI. Améliorations proposées) afin d'améliorer ses performances.

## V.2 CARACTÉRISATION EN CHARGE

### V.2.1 Séchage de moringa

La Figure 15 représente la régression de la masse de 0,5 kg de moringa en fonction du temps. Le procédé de séchage du moringa s'est effectué en un jour entre 10 h et 17 h (14/02/2018) avec une masse initiale de 0,5 kg et une masse finale (après séchage) de 0,11 kg sous une température moyenne de 52 ° C.

Entre 10 h et 15 h, la régression de la masse de moringa est continue (0,5 kg à 0,12 kg) tandis qu'à partir de 15 h, elle reste constante jusqu'à 17 h. Le moringa s'est donc séché en 6 h.

À l'issue du test, nous constatons que 0,38 kg d'eau est retiré du moringa utilisé au cours de la caractérisation en charge. Les photos du moringa avant et après séchage sont disponible sur la Figure 13 et la Figure 14.



Figure 13 : Moringa frais



Figure 14 : Moringa séché

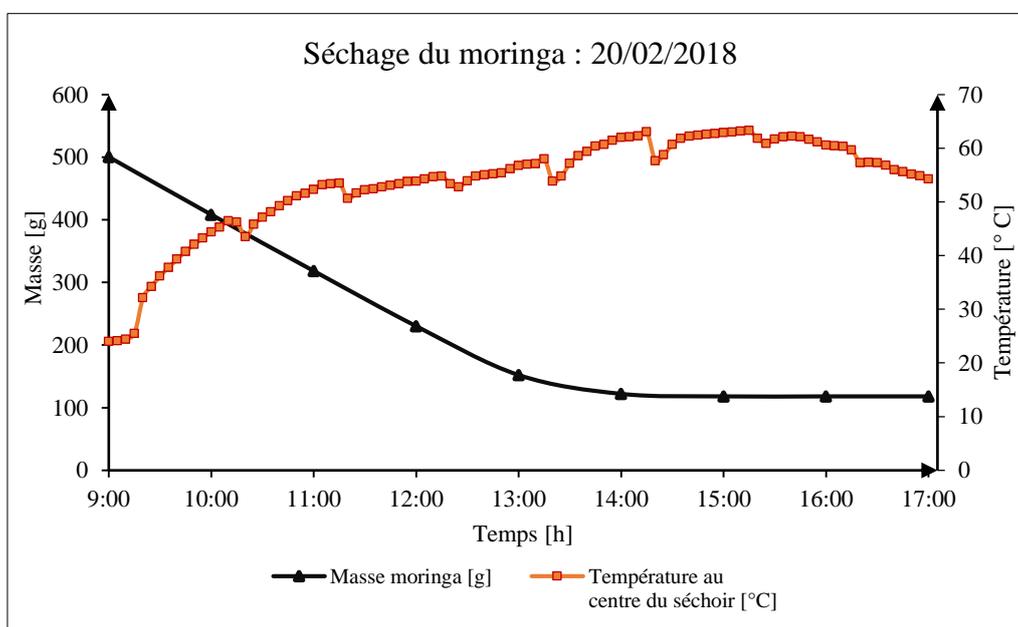


Figure 15 : Procédé de séchage du moringa

## V.2.2 Séchage de l'oignon

La Figure 18, la Figure 19 et la Figure 20 présentent la régression de la masse de 1 kg d'oignon au cours d'un procédé de séchage qui s'est réalisé en trois jours. La température moyenne de l'air asséchant est environ 56 °C. Durant le 1<sup>er</sup> jour du procédé de séchage environ 0,65 kg d'eau s'est évaporé, à ces moments l'eau est à l'état libre dans le produit. Cela rend son évaporation facile. Au cours de la nuit, la masse de l'oignon a diminué passant de 0,35 à 0,26 kg.

Au cours du 2<sup>e</sup> jour de l'opération de séchage, la masse de l'oignon régresse continuellement passant de 0,26 à 0,17 kg.

Durant le 3<sup>e</sup> jour du procédé de séchage de l'oignon, sa masse varie très faiblement passant de 0,17 à 0,15 kg vers 16 h , pendant cette phase les molécules d'eau sont fortement liés à l'oignon.

En somme, l'opération de séchage de l'oignon avec le séchoir solaire ICARO s'est effectuée en 22 h de temps d'ensoleillement. Les images de l'oignon avant et après séchage sont disponibles sur la Figure 16 et la Figure 17.



Figure 16 : Oignon frais



Figure 17 : Oignon séché

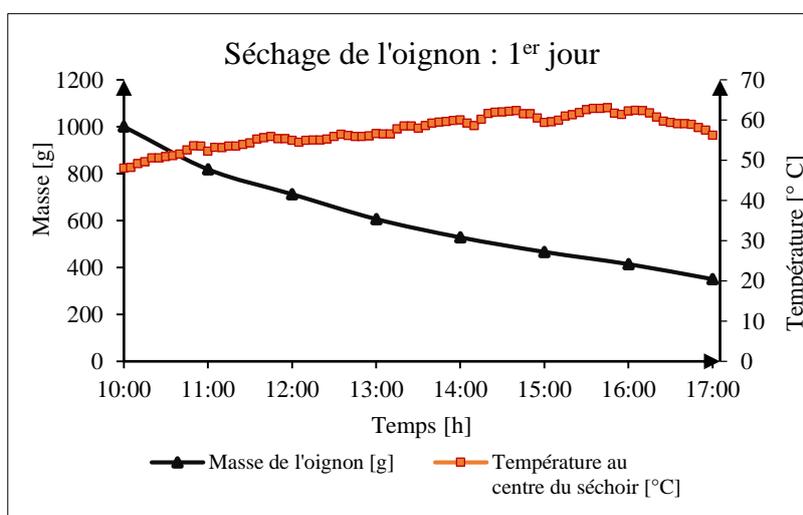


Figure 18 : Variation de la teneur en eau de l'oignon (1er jour)

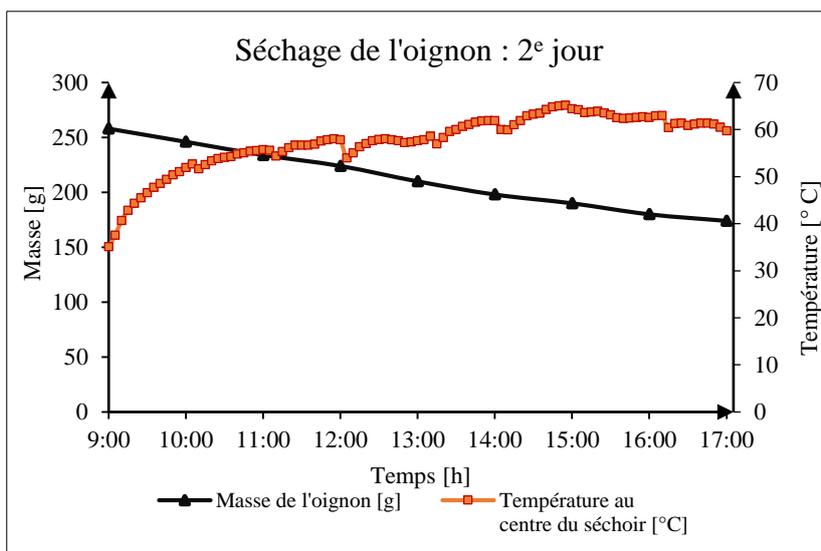


Figure 19 : Variation de la teneur en eau de l'oignon (2e jour)

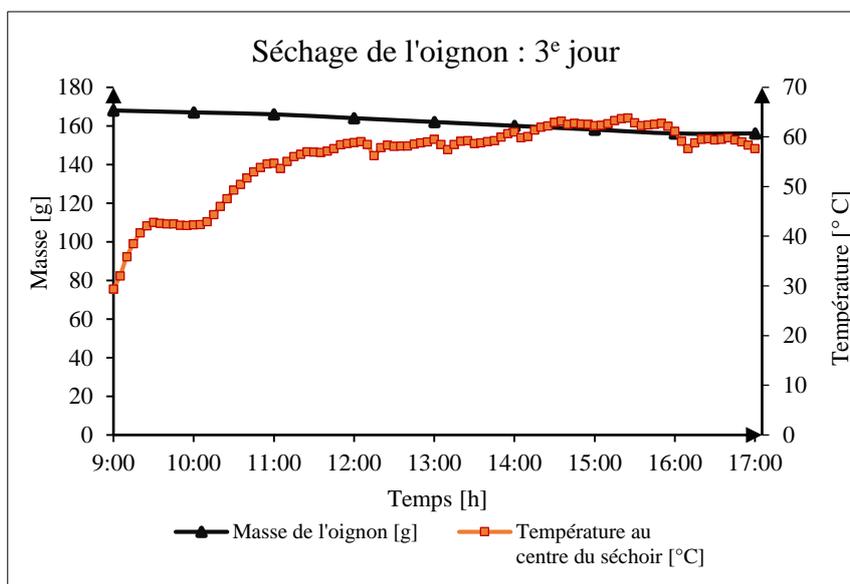


Figure 20 : Variation de la teneur en eau de l'oignon (3e jour)

### V.2.3 Séchage de la tomate

La Figure 23 et la Figure 24 présentent la régression de 1 kg de tomate en fonction du temps sous une température moyenne de 53 °C. Ce procédé s'est effectué en deux jours.

Au cours du 1<sup>er</sup> jour du procédé de séchage, entre 10 h et 17 h, la teneur en eau de la tomate est passée de 1 à 0,32 kg, cela est dû au fait que les molécules d'eau contenue dans la tomate ne sont à l'état libre. La tomate a perdu environ 0,68 kg d'eau au cours du 1<sup>er</sup> jour.

Pendant le second jour, la teneur à 9 h la masse de tomate est de 0,15 kg, le processus de déshydratation de la tomate a continu au cours de la nuit passant de 0,32 à 0,15 kg.

La masse de la tomate varie faiblement au cours du 2<sup>e</sup> jour. Entre 16 h et 17 h, la masse de tomate ne varie plus, cela signifie que la tomate est séchée. Ainsi, le processus de séchage de la tomate à travers le séchoir ICARO s'est effectué en 14 h de temps d'ensoleillement. Les photos de la tomate avant et après séchage sont disponibles sur la Figure 21 et la Figure 22.



Figure 21 : Tomate fraîche



Figure 22 : Tomate séchée

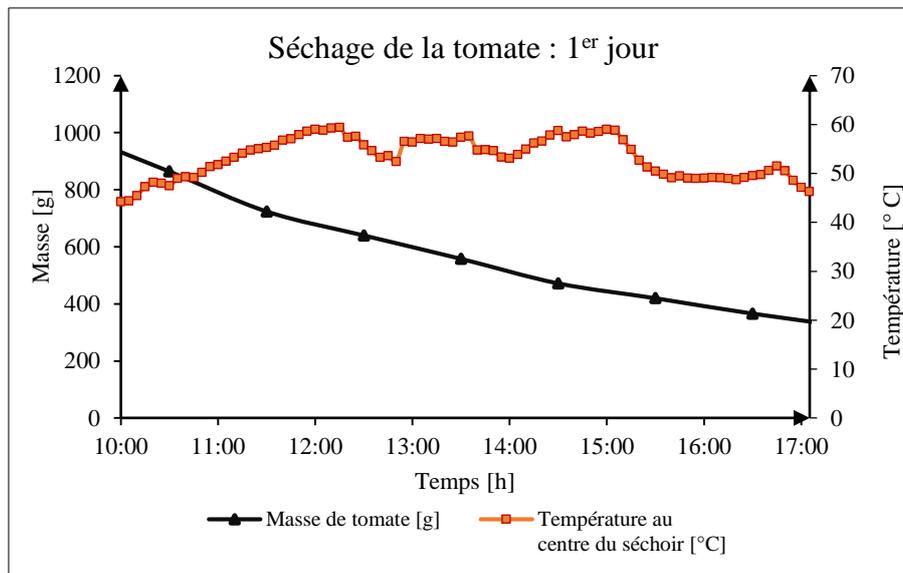
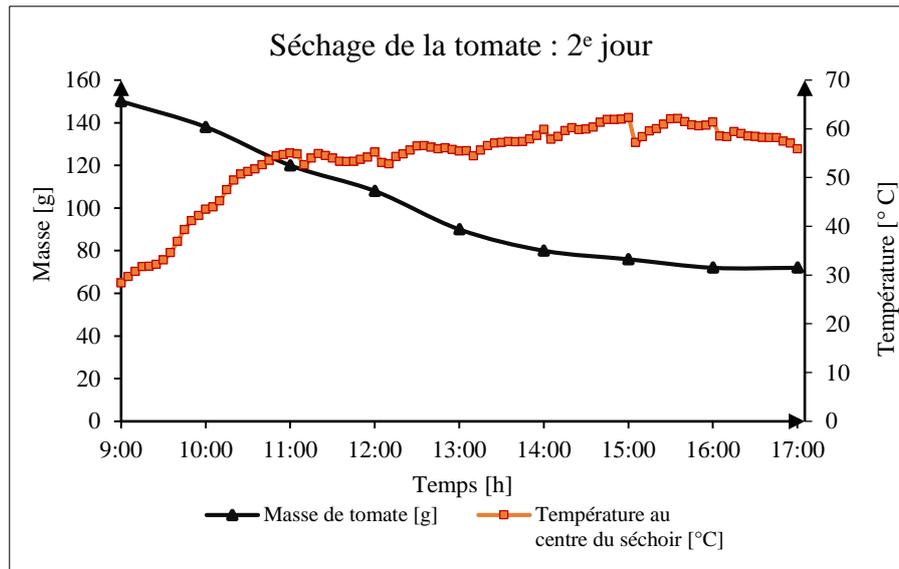


Figure 23 : Variation de la teneur en eau de la tomate (1<sup>er</sup> jour)

Figure 24 : Variation de la teneur en eau de la tomate (2<sup>e</sup> jour)

### V.2.4 Analyse énergétique des procédés de séchage en charge

Le Tableau 4 présente la consommation d'énergie de chaque produits utilisé lors de la caractérisation en charge. Parmi les produits testés, le moringa a été séché en 6 h, sa consommation d'énergie est de  $1,21 \cdot 10^8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  pendant la durée de séchage. D'une façon générale, les végétaux de la même famille que le moringa pourraient être aussi séchés plus facilement avec le séchoir ICARO. Quant à la tomate, l'énergie utilisé pour évaporer 1 kg d'eau de la tomate est de l'ordre de  $1,31 \cdot 10^8 \text{ J}$ .

Parmi les trois produits testés, l'oignon semble être le moins adapté, cela est dû à sa porosité qui est faible par rapport à celle de la tomate et du moringa. Ainsi, l'énergie utilisée pour évaporer 1 kg d'oignon est de  $2,58 \cdot 10^8 \text{ J}$ .

Tableau 4 : Analyse énergétique des tests en charge

Produit	Masse totale [kg]	Masse d'eau retirée [kg]	Ensoleillement moyen [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]	Temps [h]	CE [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]
Moringa	0,5	0,38	638,67	6	$1,21 \cdot 10^8$
Tomate	1	0,93	601,1	14	$1,31 \cdot 10^8$
Oignon	1	0,84	684,34	22	$2,58 \cdot 10^8$

## V.3 ÉVALUATION THERMIQUE DES CAPTEURS THERMIQUES

La Figure 25 représente la variation entre 10 h et 17 h des températures issues du capteur incliné (rouge) et du capteur horizontal (noir) du séchoir solaire ICARO. Vers le début et la fin du test,

les deux températures (capteur incliné et horizontal) sont pratiquement égales. Au maximum, le capteur horizontal ne permet d'élever la température à sa sortie que d'environ 1 °C. Par conséquent, l'utilisation du capteur horizontal ne s'avère pas nécessaire. Comme, les deux températures à la sortie de chaque capteur sont pratiquement égales, l'utilisation d'un 2<sup>e</sup> capteur horizontal sur le séchoir ICARO ne paraît pas utile.

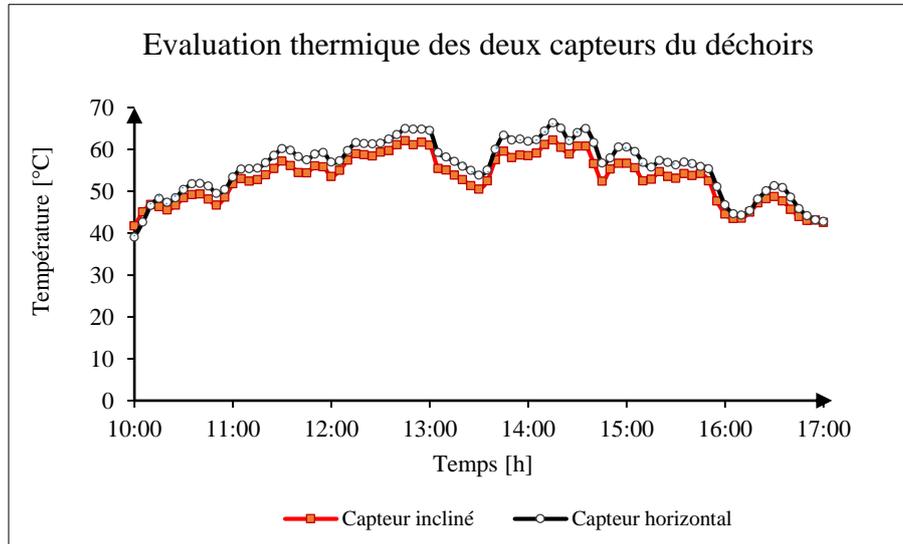


Figure 25 : Évolution de la température à la sortie des deux capteurs

L'étude des performances du séchoir ICARO à vide et en charge nous a donné un aperçu de son niveau de température et de son rendement. Ces tests, nous ont également permis de confirmer que le capteur thermique horizontal est dispensable. Ainsi, le chapitre suivant porte sur les propositions d'amélioration afin de tendre vers une performance optimale.

## VI. AMÉLIORATIONS PROPOSÉES

### VI.1 AMÉLIORATION ERGONOMIQUE DU SÉCHOIR

Pour faciliter l'utilisation du séchoir ICARO, la poignée d'ouverture et de fermeture de l'enceinte de séchage qui est en acier peinte en noire pourrait être remplacée par une poignée fabriquée à partir du bois de couleur blanche (Figure 26). En effet, le bois a une faible conductivité qui est égale à  $0,15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  [9] et la couleur blanche a une faible absorptivité qui est de l'ordre 0,2 [9]. Avec une poignée répondant à ces deux critères, l'ouverture et la fermeture de l'enceinte se feraient sans être en contact avec la paroi chauffée du séchoir.



Figure 26 : Poignée en bois de couleur blanche

Quant aux claies, pour rendre facile leur manipulation, les extrémités qui sont en cornière (acier) pourront être en bois de forme rectangulaire et relevées de 5 cm (Figure 27). Avec cette nouvelle configuration des claies, le risque de blessure ou de gaspillage du produit à sécher est réduit. La grille doit être légère afin de faciliter le retrait ou la mise des claies dans la chambre de séchage.



Figure 27 : Nouvelle configuration des claies

### VI.2 AMÉLIORATION THERMIQUE DU SÉCHOIR

Pour améliorer la circulation et la température de l'air asséchant, les améliorations pourront être apportées sur les parties suivantes du séchoir ICARO :

- **enceinte de séchage** : pour que l'air puisse bien circuler par effet thermosiphon, l'enceinte de séchage doit être de forme verticale de dimension 1,5 m sur 1 m et 0,5 m de largeur avec un capteur thermique de  $2 \text{ m}^2$  comme le précédent. Étant donné que

l'enceinte de séchage serait verticale, la hauteur retenue rendra facile l'exploitation du séchoir à toute personne de taille moyenne. Également, avec les dimensions de la chambre de séchage rendra aisé sa logistique.

En outre, pour une meilleure circulation de l'air asséchant (humidifié), la chambre de séchage pourrait être équipée d'une cheminée de 10 cm de diamètre et 20 cm de longueur (Figure 28). En effet, les dimensions de la cheminée sont des valeurs standard les plus fréquemment utilisées. Cette cheminée permettra d'obtenir un meilleur effet thermosiphon par rapport à la configuration précédente du séchoir ICARO

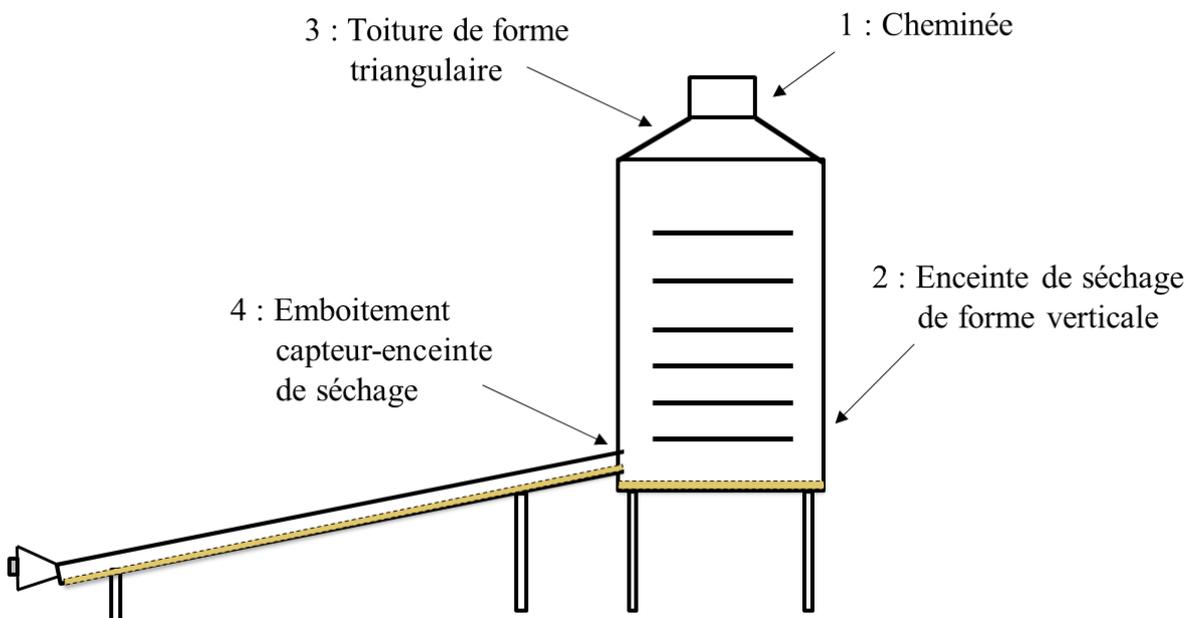


Figure 28 : Nouvelle configuration du séchoir ICARO

- **capteur thermique** : pour augmenter la température de l'air asséchant, un réseau de chicanes pourrait être installé sous l'absorbeur (Figure 29) dont le rôle est de rallonger le parcours de l'air caloporteur. Cette configuration permet de retarder la sortie de l'air afin qu'il puisse mieux s'échauffer. Chaque chicane forme un angle de  $30^\circ$  avec une longueur totale de 20 cm et une largeur de 2 cm. Cette configuration est la meilleure obtenue à partir d'une série d'expérimentation menée par Bahria et Amirat [13].

Pour un effet thermosiphon optimal, l'emboîtement capteur-chambre de séchage devrait se faire sur la partie inférieure de l'enceinte de séchage (Figure 28).

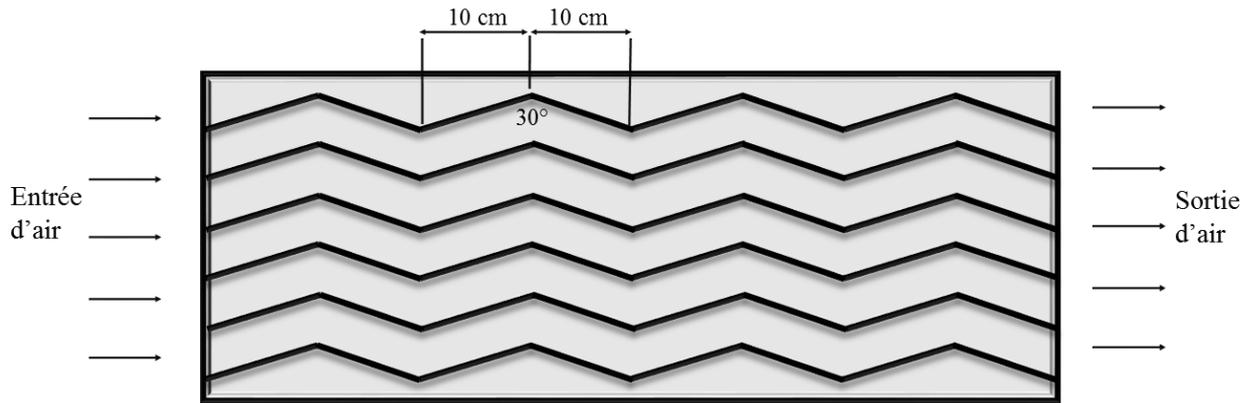


Figure 29 : Capteur thermique avec chicanes

### VI.3 AMÉLIORATION DE L'HYGIÈNE

Pour assurer l'hygiène des produits séchés, les améliorations suivantes pourront être apportées dans le processus de fabrication du séchoir :

- appliquer un anticorrosif adapté sur toutes les parois du séchoir afin d'éviter toute attaque de la carrosserie par la corrosion ;
- peindre l'intérieur et l'extérieur du capteur et l'enceinte de séchage avec une peinture alimentaire pour éviter toute contamination des produits agricoles ou maraichers après séchage ;
- fabriquer les claies à partir d'une grille en acier inoxydable (Figure 30) pour écarter tout risque de contamination du produit par la corrosion.



Figure 30: Grille en acier inoxydable

### VI.4 AMÉLIORATION DE LA PARTIE ÉLECTRIQUE

Pour pallier aux pannes fréquentes de la partie électrique et à l'attaque par les moisissures et les levures du produit frais en absence du soleil, au système précédant pourrait être ajouté un régulateur de charge et un accumulateur. Ainsi, cela permettra d'assurer une ventilation

continue de l'enceinte de séchage pendant 12 h. Le nouveau système PV dimensionné avec stockage serait constitué d'un module PV de puissance 70 Wc, d'un régulateur de charge de 6 A / 12 V DC et une batterie de 12 V / 20 Ah.

Dans le cas d'un système sans stockage, le module PV serait de puissance 30 Wc. Le Tableau 5 renseigne sur les marques et les modèles des équipements choisis.

Tableau 5 : Équipements solaires choisis

Équipement	Marque/Modèle
Module PV 70 Wc	King Sun KSP-70W
Module PV 30 Wc	Victron VT30
Batterie 20 Ah	Gel Plus GL12-20
Régulateur 12V / 6A	Steca Solsum F 6.6F

Le socle du module PV pourrait être équipé de roulettes et conçu de manière à pouvoir supporter le poids de l'accumulateur. Cela facilitera la mobilité du système PV. Les détails sur les dimensionnements des deux systèmes PV et des équipements choisis sont disponibles à l'Annexe 3.

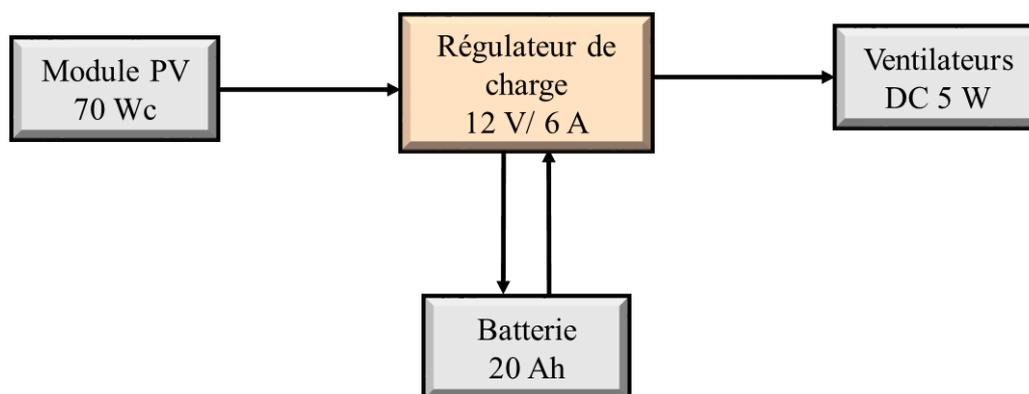


Figure 31 : Système photovoltaïque avec stockage du scénario 2

## VI.5 NOUVEAU COÛT DU SÉCHOIR ICARO APRÈS AMÉLIORATION

### VI.5.1 Scenario 1 : Séchoir ICARO avec système photovoltaïque avec stockage

Dans ce scénario, le séchoir ICARO est alimenté par un système photovoltaïque avec batterie permettant d'assurer une circulation continue de l'air asséchant à l'absence du soleil. Cela permettra de protéger le produit à sécher contre les attaques des moisissures et levures.

Le coût du système PV, des tôles et de la main d'œuvre représente respectivement 25 %, 22 % et 14 % du coût total de fabrication du séchoir (Tableau 6). Ces matériaux et équipements représentent la plus importante part du coût de fabrication du séchoir ICARO.

Dans les scénarios 1 et 2 le coût du séchoir a baissé par rapport à la version précédente car le volume de l'enceinte de séchage est réduit passant de 1 m<sup>3</sup> à 0,75 m<sup>3</sup>, également, le second capteur thermique est supprimé et le nombre de claies est passé de 10 à 6.

Tableau 6 : Nouveau coût du séchoir ICARO (scénario 1)

Désignation	Détail	Quantité	Prix unitaire [FCFA]	Prix global [FCFA]
Tôle de 0,8 mm	2 m x 1 m (Feuille) acier	8	10 000	80 000
Tube carré de 40 mm	5,75 m de longueur	2	5 500	11 000
Tube carré de 35 mm	5,75 m de longueur	2	4 500	9 000
Tube carré de 30 mm	5,75 m de longueur	4	3 500	14 000
Tube carré de 25 mm	5,75 m de longueur	6	2 500	15 000
Fer plat de 20 mm	5,75 m de longueur	3	2 000	6 000
Cornière de 20 mm	5,75 m de longueur	2	2 500	5 000
Grille métallique	1m <sup>2</sup> (Inoxydable)	6	4 000	24 000
Bois raboté 30 mm	5,75 m de longueur	5	1 500	7 500
Ventilateur 5 W	DC	3	5 000	15 000
Sciure de bois	Sac	2	1 500	3 000
PV 70 Wc	Poly-cristallin	1	55 000	55 000
Batterie	20 Ah / 12 V DC	1	25 000	25 000
Régulateur de charge	6 A / 12 V DC	1	10 000	10 000
Poignée en bois	Couleur blanche	1	1 000	1 000
Antirouille	Boîte de 4 kg	1	5 000	5 000
Peinture alimentaire	Boîte de 4 kg	1	20 000	20 000
Autres accessoires	Crochets, câble, rondelles, boulons...	-	5 000	5 000
<b>Sous total</b>				<b>310 500</b>

Main d'œuvre	Équipe : 2 personnes Durée : 24 h à 32 h	-	50 000	50 000
<b>Total</b>				<b>360 500</b>

### VI.5.2 Scénario 2 : Système photovoltaïque sans stockage

Dans ce scénario, les 3 ventilateurs du séchoir ICARO sont alimentés par un système PV sans stockage. Avec ce système, le produit à sécher est susceptible d'être attaqué par les bactéries et les levures à l'absence du soleil.

Le coût des tôles et la main d'œuvre représente respectivement 28 % et 17 % du coût de fabrication du séchoir ICARO (Tableau 7). Contrairement au scénario 1, dans ce scénario le système PV ne représente que 5,5 %.

Tableau 7 : Nouveau coût du séchoir ICARO (scénario 2)

Désignation	Détail	Quantité	Prix unitaire [FCFA]	Prix global [FCFA]
Tôle de 0,8 mm	2 m x 1 m (Feuille) acier	8	10 000	80 000
Tube carré de 40 mm	5,75 m de longueur	2	5 500	11 000
Tube carré de 35 mm	5,75 m de longueur	2	4 500	9 000
Tube carré de 30 mm	5,75 m de longueur	4	3 500	14 000
Tube carré de 25 mm	5,75 m de longueur	6	2 500	15 000
Fer plat de 20 mm	5,75 m de longueur	3	2 000	6 000
Cornière de 20 mm	5,75 m de longueur	2	2 500	5 000
Grille métallique	1m <sup>2</sup> (Inoxydable)	6	4 000	24 000
Bois raboté 30 mm	5,75 m de longueur	5	1 500	7 500
Ventilateur 5 W	DC	3	5 000	15 000
Sciure de bois	Sac	2	1 500	3 000
PV 30 Wc	Poly-cristallin	1	15 000	15 000
Poignée en bois	Couleur blanche	1	1 000	1 000
Antirouille	Boite de 4 kg	1	5 000	5 000
Peinture alimentaire	Boite de 4 kg	1	20 000	20 000
Autres accessoires	Crochets, câble, rondelles, boulons...	-	5 000	5 000
<b>Sous total</b>				<b>235 500</b>
Main d'œuvre	Équipe : 2 personnes Durée : 24 h à 32 h	-	50 000	50 000
<b>Total</b>				<b>285 500</b>

### **VI.5.3 Analyse des scénarios proposés**

Le scénario 2 paraît plus adapté au contexte nigérien car coûtant moins cher et exigeant le minimum d'entretien. Il est préférable de sécher des produits dont la durée de séchage n'excède pas un jour d'ensoleillement tel que les végétaux car tout produit ayant une teneur en eau atteignant au moins 0,61 [14] est susceptible d'être attaqué les moisissures et les levures en absence de ventilation naturelle ou mécanique.

Quant au scénario 1, il convient mieux aux utilisateurs ayant quelques notions techniques sur les systèmes PV pour pouvoir résoudre les pannes mineures surtout en lieu rural. Ce scénario paraît plus adapté au séchage des légumes ayant une teneur en eau importante. La durée du procédé de séchage des légumes s'étend en moyenne sur 2 à 3 jours d'ensoleillement.

## VII. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

---

Au Niger, le secteur du séchage solaire à but lucratif est toujours à un niveau traditionnel, c'est la raison pour laquelle certaines structures ayant les moyens font recours à l'usage des séchoirs à gaz. Mettre en place des séchoirs solaires efficaces, est un défi pour les chercheurs locaux. Principalement, deux types de séchoirs solaires sont utilisés au Niger, le séchoir coquille et le séchoir ICARO. Par ailleurs, les utilisateurs des séchoirs solaires sont peu encadrés pour bien les exploiter. C'est pour cette raison qu'ils n'ont plus foie à l'usage des séchoirs solaires et se tournent majoritairement vers les séchoirs électriques ou à gaz.

L'étude des performances du séchoir ICARO a permis d'évaluer son état thermique à vide et en charge. Cela a permis également d'identifier les végétaux comme type de produits adaptés au séchoir ICARO, le moringa est séché en moyenne en 6 h. Pour assurer une bonne circulation de l'air, le séchoir ICARO pourrait être de forme verticale et pour éviter l'attaque du produit par les moisissures ou les levures, un système PV avec stockage a été proposé pour assurer une ventilation continue en absence du soleil (nuit). L'étude des performances du séchoir ICARO à travers les résultats expérimentaux a aussi démontré que l'usage du second capteur (horizontal) ne s'avère pas nécessaire en terme d'apport énergétique.

Pour le développement du séchage au Niger, la recherche et développement dans le but d'amélioration les séchoirs solaires doivent être encouragés, notamment sur la technologie des capteurs thermiques à air avec vitrage et aussi sur l'hybridation des séchoirs solaires. Ainsi, les résultats des prochaines études pourront permettre de concevoir des séchoirs solaires répondant efficacement aux besoins des groupements féminins et PME du Niger intervenant dans le domaine du séchage.

À l'issue de notre stage au Centre National d'Énergie Solaire (CNES), nos principales recommandations sont les suivantes :

- mettre à la disposition des stagiaires des équipements de mesure efficaces (sondes hygrométriques, les thermocouples, débitmètre, solarimètre, etc.) ;
- s'acquérir d'un dessiccateur (analyseur d'humidité) pour mieux évaluer la teneur en eau des produits ;
- affecter la fabrication des séchoirs à des ateliers de menuiserie métallique spécialisés ;
- mettre à la disposition des acteurs intervenant dans le domaine du séchage solaire un manuel illustré qui pourrait leur faciliter l'utilisation des séchoirs solaires.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] D. K. Rabha et P. Muthukumar. *Performance studies on forced convection solar dryer integrated with a paraffin wax-based latent heat storage system*. 2016. Solar Energy 149, P. 214-226.
- [2] Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). *L'énergie solaire : PV et Concentré*. 2010. Paris : solaire PV-C, P. 28.
- [3] Yao Azoumah. *Le solaire thermique*. 2010. Ouagadougou : Institut International de l'Eau et de l'Environnement 2IE, P. 2.
- [4] J. F. Polle. *Le grand gaspillage alimentaire*. 2015. Liège : Imagine magazine 108, P. 36- 37.
- [5] Cri de Cigogne (CDC). *Bilan énergétique et perspectives pour une politique énergétique ambitieuse au Niger*. 2009. Niamey, P. 14.
- [6] Direction des statistiques. *Résultats définitifs de la campagne agricole d'hivernage 2014 et perspectives alimentaires 2014-2015*. 2014. Niger : Ministère de l'agriculture, P. 15-22.
- [7] Yeo Mita. *Le potentiel solaire en Afrique*. 2016. Consulté le 15/04/2018. < URL : <http://aeertechnologies.over-blog.com/2016/07/le-potentiel-solaire-en-afrique.html> >.
- [8] B. Stefano et B. Federico. *Manuel de construction et d'utilisation du séchoir ICARO*. 2013. Université de Turin : DEIAFA-MA.
- [9] Yves Jannot. *Transferts thermiques*. 2012. Nancy : École des Mines.
- [10] G. Isabel. *Les capteurs solaires à air*. 2012. Paris : Groupe Eyrolles, P. 42-43
- [11] Bureau International du Travail (BIT). *Le séchage solaire : Méthodes pratiques de conservation des aliments*. 1986. Genève : Diffusion BIT, CH1211.
- [12] A. Guillaume. *Séchage des fruits et légumes*. 2015. Lozèrac : Centre de Formation Professionnelle et de Promotion Agricoles (CFPPA).
- [13] S. Bahria et M. Amirat. *Influence de l'adjonction des chicanes longitudinales sur les performances d'un capteur solaire plan à air*. 2013. Revue des Énergies Renouvelables Vol. 16 N°1, P. 51-63.
- [14] V. Belessiotis et E. Delyannis. *Solar drying*. 2011. Aghia Paraskevi : Solar Energy 85, P. 1665-1691.

## **IX. ANNEXE**

---

<b>Annexe 1 : Contexte et enquête.....</b>	<b>1</b>
<b>Annexe 2 : Données expérimentales brutes.....</b>	<b>7</b>
<b>Annexe 3 : Améliorations proposées.....</b>	<b>19</b>
<b>Annexe 4 : Quelques réalisations du CNES.....</b>	<b>21</b>

## ANNEXE 1 : CONTEXTE ET ENQUÊTE

Tableau 8 : Résultats de la campagne agricole 2014 [6]

Catégorie de produits	Production brute [kg]	Pertes [kg]	Production disponible [kg]	Consommation humaine		Balance [kg]	Perte [%]	Excédant [%]
				Norme [kg·pers <sup>-1</sup> ·an <sup>-1</sup> ]	Total [kg]			
Céréales	4 925 268	761 766	4 163 502	231	4 349 652	-186 150	15,47	0
Tubercules	294 149	14 707	279 442	21	395 423	-115 981	5	0
Légumes	1 516 264	295 422	1 220 824	44	828 505	392 319	19,48	25,87
Légumineuses	1 636 184	409 046	1 227 128	19	357 764	869 364	25	53,13
Oléagineuses	458 608	91 722	366 886	7	131 808	235 078	20	51,26
Épices et stimulants	276 324	0	276 324	1	18 830	257 494	0	93,19
Viandes	276 078	0	276 078	15	282 445	-6367	0	0
Lait et produits laitiers	1 109 660	0	1 109 660	35	659 038	450 622	0	40,61

Tableau 9 : Caractéristiques techniques du séchoir

Élément	Caractéristique	Détail
<b>Capteur thermique</b>	Dimension de la partie inclinée	2 m x 1 m x 0,065 m
	Dimension de la partie horizontale	2 m x 1 m x 0,065 m
	Épaisseur de l'isolant de la partie inclinée	30 mm (sciure de bois)
	Épaisseur-tôle	0,8 mm (Acier)
	Distance tôle supérieure-absorbeur	35 mm
	Peinture	Noire mate
	Inclinaison (par rapport à l'horizontal)	7°
<b>Enceinte de séchage</b>	Dimension	2 m x 1 m x 0,5 m
	Dimension-porte	1,95 m x 0,45 m
	Épaisseur-tôle	0,8 mm (Acier)
	Peinture	Noire mate
	Épaisseur-Isolant	30 mm (sciure de bois)
	Distance entre claies	8 cm
<b>Claie</b>	Nombre	10
	Capacité d'une claie	5 kg
	Dimension	0,95 m x 0,65 m
	Dimension-orifice	1 cm <sup>2</sup>
<b>Hexaèdre</b>	Volume	38·10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
	Diamètre-orifice	10 cm
	Nombre d'orifice	3
	Peinture	Noir mat
<b>Ventilateur</b>	Dimension	12 cm x 12 cm x 3,8 cm
	Nombre	3
	Vitesse	15 cm/s
	Tension	12 V / 24 V
	Puissance	5 W
<b>Module PV</b>	Puissance	80 Wc (poly-cristallin)
	Courant I <sub>mp</sub>	4,57 A
	Tension V <sub>mp</sub>	17,5 V



Date :

Lieu/Structure :

**Questionnaire CNES**

Question	Réponse
----------	---------

Autoconsommation  Commercial

**But du séchage ?**

Autres :

**Dimension du séchage ?**

Industriel  Coopérative   
 PME  Groupement

Autres :

**Produits couramment séchés ?**

Céréales :  
 Condiments :  
 Fruits :  
 Légumes :  
 Végétaux :

Autres :

**Quantité de produits séchée ?**

Produit	Quantité



**Période de récolte des produits séchés ?**

Produit	Période

**Coût d'acquisition d'un séchoir solaire ?**

Type de séchoir	Coût [FCFA]	Fabricant	Capacité [kg]

**Provenance des séchoirs ?**

Entreprises impliquées :

**Maintenance des séchoirs ?**

Entreprises impliquées :

**Durée moyenne du Séchage ?**

Produit	Séchoir	Heure	Jour



<b>Période de séchage ?</b>	Saison pluviale <input type="checkbox"/> Saison sèche <input type="checkbox"/> Saison chaude <input type="checkbox"/>
	Autres : <input style="width: 100%;" type="text"/>
<b>Atouts du séchage ?</b>	<input style="width: 100%; height: 80px;" type="text"/>
<b>Subvention liée au séchage ?</b>	<input style="width: 100%; height: 80px;" type="text"/>
<b>Demande en produits séchés ?</b>	<input style="width: 100%; height: 80px;" type="text"/>
<b>Problèmes rencontrés ?</b>	<input style="width: 100%; height: 80px;" type="text"/>
<b>Améliorations souhaitées ?</b>	<input style="width: 100%; height: 80px;" type="text"/>
<b>Pourquoi l'utilisation des séchoirs à gaz ?</b>	<input style="width: 100%; height: 80px;" type="text"/>
<b>Alternatives en absence du soleil ?</b>	Biomasse <input type="checkbox"/> Gaz <input type="checkbox"/> Diesel <input type="checkbox"/> Essence <input type="checkbox"/> Autres : <input style="width: 100%; height: 60px;" type="text"/>

© CNES Octobre 2017 Page 3 sur 3

Figure 32 : Fiche d'enquête

Tableau 10 : Liste des structures visitées

N°	Structure	Type	Quartier
1	La colombe	Groupement féminin	Route Filingué
2	RDFN	Groupement féminin	Terminus
3	Farahan	Groupement féminin	Terminus
4	ETC	Groupement féminin	Recasement
5	Tounda-hiney	Groupement féminin	Banizounbou II
6	Gaka-siney	Groupement féminin	Talladjé
7	Lakal-kaney	Groupement féminin	Dar-Es-Salam
8	Holaré	Groupement féminin	Haro-banda
9	Bani-Bani	Groupement féminin	Recasement
10	Halal	Groupement féminin	Haro-banda
11	Albassa	Groupement féminin	Zabarkan
12	ARES	Groupement féminin	Koira-Kano
13	ATR	Atelier de soudure	Koira-Kano
14	AcSSA Afrique Verte	ONG	Plateau
15	RESEDA	ONG	Koira-Kano

**ANNEXE 2 : DONNÉES EXPÉRIMENTALES BRUTES**

Tableau 11 : Données du test de séchage du moringa

<b>Temps</b>	<b>Masse [g]</b>
9:00	500
10:00	408
11:00	318
12:00	230
13:00	152
14:00	122
15:00	118
16:00	118
17:00	118

Tableau 12 : Données du test de séchage de la tomate

<b>1<sup>er</sup> jour</b>	
<b>Temps</b>	<b>Masse [g]</b>
9:30	1000
10:30	864
11:30	724
12:30	640
13:30	558
14:30	472
15:30	420
16:30	366
17:30	320
<b>2<sup>e</sup> jour</b>	
09:00	150
10:00	138
11:00	120
12:00	108
13:00	90
14:00	80
15:00	76
16:00	72
17:00	72

Tableau 13 : Données du test de séchage de l'oignon

<b>1er jour</b>	
<b>Temps</b>	<b>Masse [g]</b>
10:00	1000
11:00	818
12:00	712
13:00	606
14:00	528
15:00	466
16:00	414
17:00	350
<b>2e jour</b>	
09:00	258
10:00	246
11:00	234
12:00	224
13:00	210
14:00	198
15:00	190
16:00	180
17:00	174
<b>3e jour</b>	
09:00	168
10:00	167
11:00	166
12:00	164
13:00	162
14:00	160
15:00	158
16:00	156
17:00	156

Tableau 14 : Données du premier test à vide

Temps	Température à la sortie du séchoir [°C]	Température au centre du séchoir [°C]	Ensoleillement global horizontal [W·m <sup>-2</sup> ]	Puissance thermique absorbée [W]	Puissance utile [W]	Rendement [%]
9:00	24,19	26,33	222,4	711,68	0,00	0,00
9:05	25,02	28,3	242,2	775,04	0,00	0,00
9:10	26,59	29,89	260,5	833,6	0,00	0,00
9:15	27,74	31,13	274,1	877,12	0,00	0,00
9:20	29,01	32,57	292,3	935,36	0,00	0,00
9:25	29,63	32,71	309,9	991,68	0,00	0,00
9:30	30,59	33,55	326,7	1045,44	0,00	0,00
9:35	31,07	34,4	340,8	1090,56	12,25	1,12
9:40	32,32	35,72	359,7	1151,04	8,65	0,75
9:45	33,33	36,85	375,5	1201,6	52,61	4,38
9:50	34,33	38,1	387,2	1239,04	160,72	12,97
9:55	35,13	38,43	400,5	1281,6	103,06	8,04
10:00	35,56	39,53	415	1328	54,77	4,12
10:05	36,61	39,98	430,3	1376,96	87,21	6,33
10:10	36,74	40,73	440,5	1409,6	67,75	4,81
10:15	37,73	41,45	455,2	1456,64	67,03	4,60
10:20	38,55	42,38	468,5	1499,2	75,68	5,05
10:25	39,64	42,64	478,7	1531,84	183,06	11,95
10:30	39,52	43,06	495,5	1585,6	188,83	11,91
10:35	39,58	43,32	551,4	1764,48	185,95	10,54
10:40	40,6	44,11	558,5	1787,2	302,70	16,94
10:45	40,9	44,52	601,7	1925,44	302,70	15,72
10:50	41,2	44,87	575,9	1842,88	158,56	8,60
10:55	41,7	45,12	590,2	1888,64	129,73	6,87
11:00	41,76	45,41	567,2	1815,04	141,26	7,78
11:05	42,37	45,94	574,3	1837,76	149,19	8,12
11:10	42,97	46,36	579	1852,8	214,05	11,55
11:15	42,98	46,52	591,8	1893,76	221,98	11,72
11:20	43,07	46,65	603,1	1929,92	199,64	10,34
11:25	43,44	46,8	611,1	1955,52	247,93	12,68
11:30	43,65	47,24	624,2	1997,44	205,41	10,28
11:35	44,01	48,09	633,6	2027,52	274,59	13,54
11:40	43,99	48,2	645,3	2064,96	273,15	13,23
11:45	44,58	48,32	654,9	2095,68	236,40	11,28
11:50	45,07	48,47	662,2	2119,04	278,92	13,16
11:55	45,28	48,61	668,6	2139,52	330,09	15,43
12:00	45,48	49	674,6	2158,72	301,26	13,96

12:05	45,64	49,35	684	2188,8	348,83	15,94
12:10	45,8	49,64	691,4	2212,48	396,40	17,92
12:15	45,93	49,65	698,5	2235,2	434,59	19,44
12:20	45,99	49,54	699,9	2239,68	388,47	17,34
12:25	45,4	49,47	704,4	2254,08	309,91	13,75
12:30	45,32	49,55	703,7	2251,84	296,94	13,19
12:35	45,47	49,42	707,4	2263,68	293,33	12,96
12:40	45,86	49,95	708,4	2266,88	256,58	11,32
12:45	46,88	50,59	707,1	2262,72	366,13	16,18
12:50	47,04	50,94	716,3	2292,16	392,07	17,10
12:55	47,21	51,36	715,9	2290,88	404,32	17,65
13:00	47,37	51,41	717,1	2294,72	300,54	13,10
13:05	47,74	51,82	719,5	2302,4	255,13	11,08
13:10	48,76	52,48	714,3	2285,76	307,03	13,43
13:15	48,97	53,12	707,8	2264,96	444,68	19,63
13:20	49,09	52,75	707,7	2264,64	453,33	20,02
13:25	48,96	52,48	704	2252,8	407,93	18,11
13:30	48,79	52,63	703,4	2250,88	388,47	17,26
13:35	48,79	52,78	702,9	2249,28	460,54	20,48
13:40	49,22	52,95	702,6	2248,32	376,22	16,73
13:45	49,89	53,66	697,8	2232,96	366,85	16,43
13:50	50,17	54,31	690,4	2209,28	365,41	16,54
13:55	50,78	54,59	684,4	2190,08	402,16	18,36
14:00	51,24	54,9	679	2172,8	392,07	18,04
14:05	51,56	55,19	671,1	2147,52	465,59	21,68
14:10	51,72	55,3	665,5	2129,6	505,95	23,76
14:15	51,88	55,39	661,8	2117,76	539,10	25,46
14:20	51,84	55,51	631,4	2020,48	471,35	23,33
14:25	51,15	55,03	641	2051,2	392,79	19,15
14:30	50,48	55,35	636,3	2036,16	351,71	17,27
14:35	51,62	55,9	622,6	1992,32	405,04	20,33
14:40	51,9	56,16	605,1	1936,32	547,75	28,29
14:45	52,11	56,2	594,3	1901,76	548,47	28,84
14:50	52,3	56,08	585,3	1872,96	497,30	26,55
14:55	52,46	55,77	572,5	1832	544,86	29,74
15:00	52,44	55,75	561,8	1797,76	550,63	30,63
15:05	51,81	55,5	540,9	1730,88	606,13	35,02
15:10	51,8	55,39	461	1475,2	540,54	36,64
15:15	51,55	54,99	500,1	1600,32	558,56	34,90
15:20	50,93	54,28	466,6	1493,12	621,98	41,66
15:25	50,1	53,58	443,1	1417,92	562,16	39,65
15:30	49,46	53,06	450	1440	480,00	33,33

15:35	49,19	52,71	484	1548,8	438,92	28,34
15:40	49,31	52,59	442,4	1415,68	505,22	35,69
15:45	49,04	52,42	389,8	1247,36	500,18	40,10
15:50	48,4	51,71	373,6	1195,52	511,71	42,80
15:55	47,63	51,08	438,9	1404,48	384,14	27,35
16:00	47,58	51,04	394,9	1263,68	351,71	27,83
16:05	47,67	51,35	340,5	1089,6	451,89	41,47
16:10	47,76	51,07	280,5	897,6	544,86	60,70
16:15	46,9	50,46	250	800	598,20	74,77
16:20	44,93	48,48	200	640	477,84	74,66
16:25	43,08	46,71	230	630	301,26	47,82
16:30	42,67	45,95	200	600	264,50	44,08
16:35	42,74	45,99	161,1	515,52	320,00	62,07
16:40	41,97	45,23	150	480	350,99	73,12
16:45	40,51	43,76	115	368	303,42	82,45
16:50	39,66	42,62	107,8	344,96	263,78	76,47
16:55	38,95	41,07	100,47	321,504	227,03	70,61
17:00	38,31	40,35	86,2	275,84	123,24	44,68

Tableau 15 : Données du deuxième test à vide

Temps	Température à la sortie du séchoir [°C]	Température au centre du séchoir [°C]	Ensoleillement global horizontal [W·m-2]	Puissance thermique absorbée [W]	Puissance utile [W]	Rendement [%]
9:00	22,14	24,4	208,7	793,06	14,41	1,82
9:05	21,49	24,15	192,8	732,64	0,00	0,00
9:10	22,4	25,11	208,6	792,68	43,96	5,55
9:15	23,26	25,96	221,5	841,7	76,40	9,08
9:20	25,47	26,54	255,8	972,04	67,75	6,97
9:25	24	27,27	262	995,6	91,53	9,19
9:30	24,18	28,08	275,9	1048,42	135,50	12,92
9:35	25,06	28,92	289,9	1101,62	188,83	17,14
9:40	25,59	29,56	308,4	1171,92	184,50	15,74
9:45	26,33	30,22	327,8	1245,64	224,86	18,05
9:50	26,64	30,7	344,8	1310,24	223,42	17,05
9:55	27,4	31,8	359,8	1367,24	259,46	18,98
10:00	27,77	32,16	366,2	1391,56	278,20	19,99
10:05	28,65	32,67	388,1	1474,78	343,78	23,31
10:10	28,55	32,52	398,8	1515,44	311,35	20,55
10:15	27,77	32,43	414,8	1576,24	283,24	17,97

10:20	29,95	33,89	426,5	1620,7	374,05	23,08
10:25	30,2	34,51	444,3	1688,34	375,50	22,24
10:30	31,28	35,43	461,4	1753,32	441,80	25,20
10:35	31,21	35,57	485,1	1843,38	401,44	21,78
10:40	31,38	35,8	492,4	1871,12	432,43	23,11
10:45	32,43	36,65	513,9	1952,82	472,07	24,17
10:50	32,15	36,77	533,6	2027,68	423,06	20,86
10:55	33,27	37,75	533,5	2027,3	515,31	25,42
11:00	33,71	38,05	551,5	2095,7	508,11	24,25
11:05	33,66	37,98	569	2162,2	488,65	22,60
11:10	33,42	38	570,9	2169,42	475,68	21,93
11:15	34,28	38,7	592,6	2251,88	547,75	24,32
11:20	34,62	38,79	609,3	2315,34	518,20	22,38
11:25	34,92	39,21	608,2	2311,16	498,02	21,55
11:30	35,14	40,07	618,2	2349,16	531,17	22,61
11:35	34,9	40,34	619,2	2352,96	543,42	23,10
11:40	36,58	41,37	610,9	2321,42	545,59	23,50
11:45	36,44	40,98	633,4	2406,92	582,34	24,19
11:50	36,08	41,52	638,9	2427,82	541,98	22,32
11:55	36,41	41,4	648,4	2463,92	547,75	22,23
12:00	37,54	42,2	660,5	2509,9	569,37	22,68
12:05	38,04	42,82	667	2534,6	635,68	25,08
12:10	39,75	43,88	689	2618,2	755,31	28,85
12:15	38,39	43	703,7	2674,06	677,48	25,34
12:20	37,37	42,85	707,8	2689,64	630,63	23,45
12:25	38,04	43,41	714,4	2714,72	699,82	25,78
12:30	38,43	44,03	708,4	2691,92	694,05	25,78
12:35	39,58	44,84	716,6	2723,08	730,81	26,84
12:40	39,84	44,61	706,8	2685,84	670,99	24,98
12:45	39,39	44,49	718,7	2731,06	720,00	26,36
12:50	39,86	45,28	718,3	2729,54	697,66	25,56
12:55	40,44	45,74	725,8	2758,04	694,77	25,19
13:00	41,46	45,9	709,6	2696,48	670,27	24,86
13:05	41,35	45,92	710	2698	678,92	25,16
13:10	41,94	46,34	716,2	2721,56	608,29	22,35
13:15	41,95	46,61	716,2	2721,56	606,13	22,27
13:20	42,24	47,33	706,8	2685,84	787,75	29,33
13:25	42,18	47,56	721,7	2742,46	861,98	31,43
13:30	41,64	47,65	704	2675,2	738,74	27,61
13:35	42,47	47,31	696	2644,8	707,03	26,73
13:40	42,73	47,16	700,6	2662,28	689,01	25,88
13:45	43,37	47,96	692,6	2631,88	761,08	28,92

13:50	43,13	48,58	685	2603	849,01	32,62
13:55	43,27	48,44	683,5	2597,3	781,26	30,08
14:00	43,11	47,69	669,6	2544,48	734,41	28,86
14:05	43,45	47,86	662,5	2517,5	775,49	30,80
14:10	42,74	47,8	652,7	2480,26	828,83	33,42
14:15	42,73	48,02	643,5	2445,3	830,27	33,95
14:20	42,63	47,57	656,8	2495,84	754,59	30,23
14:25	42,73	47,59	641,1	2436,18	756,04	31,03
14:30	43,13	47,5	639,8	2431,24	727,93	29,94
14:35	43,04	47,77	612,2	2326,36	812,25	34,92
14:40	43,32	47,87	617,7	2347,26	776,22	33,07
14:45	42,98	47,93	602,8	2290,64	758,92	33,13
14:50	43,21	48,08	588,2	2235,16	841,80	37,66
14:55	42,82	47,77	570,8	2169,04	790,63	36,45
15:00	42,92	47,25	569,4	2163,72	724,32	33,48
15:05	43,13	47,39	551,4	2095,32	763,24	36,43
15:10	43,1	47,42	544,5	2069,1	794,23	38,39
15:15	42,3	46,55	521,7	1982,46	745,95	37,63
15:20	41,45	46,64	519,1	1972,58	759,64	38,51
15:25	42,19	46,73	512,5	1947,5	730,09	37,49
15:30	42,58	46,92	500,1	1900,38	729,37	38,38
15:35	42,71	47,04	482,7	1834,26	752,43	41,02
15:40	42,74	46,8	459,4	1745,72	778,38	44,59
15:45	41,86	46,09	456,6	1735,08	770,45	44,40
15:50	41,3	45,3	431	1637,8	691,89	42,25
15:55	41,14	45,33	413,3	1570,54	730,09	46,49
16:00	41,1	45,03	413,8	1572,44	672,43	42,76
16:05	40,97	44,54	382,7	1454,26	701,98	48,27
16:10	40,32	44,56	370,4	1407,52	732,25	52,02
16:15	40,31	44,52	356,2	1353,56	765,40	56,55
16:20	39,7	43,7	343,8	1306,44	713,51	54,62
16:25	39,37	43,7	331,3	1258,94	720,72	57,25
16:30	39,51	43,26	309,5	1176,1	681,80	57,97
16:35	38,42	42,86	295,3	1122,14	652,97	58,19
16:40	37,96	42,44	280	1064	665,95	62,59
16:45	37,6	41,95	253,6	963,68	637,84	66,19
16:50	37,25	41,32	235,4	894,52	650,09	72,67
16:55	36,69	40,65	226,3	859,94	587,39	68,31
17:00	35,75	39,51	205,6	781,28	512,43	65,59

Tableau 16 : Données du troisième à vide

Temps	Température à la sortie du séchoir [°C]	Température au centre du séchoir [°C]	Ensoleillement global horizontal [W·m <sup>2</sup> ]	Puissance thermique absorbée [W]	Puissance utile [W]	Rendement [%]
9:00	20,9	23,68	223,2	848,16	0,00	0,00
9:05	22,6	25,12	236	896,8	0,00	0,00
9:10	23,38	26,49	251,7	956,46	78,56	8,21
9:15	24,38	28,02	269,9	1025,62	152,79	14,90
9:20	26,05	28,67	291,7	1108,46	178,02	16,06
9:25	25,5	29,67	302,2	1148,36	221,26	19,27
9:30	27,04	30,6	319,4	1213,72	259,46	21,38
9:35	27,52	31,75	336,9	1280,22	313,51	24,49
9:40	28,72	32,99	354,9	1348,62	359,64	26,67
9:45	29,96	34,31	375	1425	404,32	28,37
9:50	31,22	35,4	394,1	1497,58	439,64	29,36
9:55	32,29	36,62	408,8	1553,44	477,12	30,71
10:00	33,21	37,41	423,8	1610,44	476,40	29,58
10:05	33,57	37,88	435,3	1654,14	503,06	30,41
10:10	34,28	38,13	453,5	1723,3	499,46	28,98
10:15	34,69	39,02	461,2	1752,56	599,64	34,22
10:20	35,26	39,19	465,6	1769,28	561,44	31,73
10:25	35,92	40,11	483,3	1836,54	598,92	32,61
10:30	36,31	40,5	505	1919	554,95	28,92
10:35	37,11	41,48	527,2	2003,36	589,55	29,43
10:40	37,82	42,51	525,8	1998,04	670,99	33,58
10:45	38,45	42,81	539,4	2049,72	714,23	34,85
10:50	38,55	42,91	568,8	2161,44	685,40	31,71
10:55	38,67	43,13	547	2078,6	672,43	32,35
11:00	39,05	43,59	571,5	2171,7	691,17	31,83
11:05	38,89	43,25	591,5	2247,7	645,04	28,70
11:10	39,02	43,48	611,5	2323,7	712,07	30,64
11:15	39,16	43,78	621,6	2362,08	647,21	27,40
11:20	39,43	44,41	634,4	2410,72	685,40	28,43
11:25	39,15	43,81	649,6	2468,48	588,83	23,85
11:30	39,6	44,76	661,4	2513,32	660,18	26,27
11:35	39,8	45,15	666,2	2531,56	637,84	25,20
11:40	40,87	45,5	668,7	2541,06	677,48	26,66
11:45	41,12	46,54	667,5	2536,5	701,98	27,68
11:50	41,28	46,54	670,2	2546,76	651,53	25,58
11:55	41,43	46,52	690,1	2622,38	707,75	26,99
12:00	41,6	47,02	707,1	2686,98	758,20	28,22

12:05	42,13	47,91	710,8	2701,04	743,06	27,51
12:10	43,01	48,43	718,3	2729,54	766,13	28,07
12:15	42,87	48,41	721,2	2740,56	714,23	26,06
12:20	43,52	49,09	707,9	2690,02	813,69	30,25
12:25	43,93	49,33	712	2705,6	838,20	30,98
12:30	44,05	49,48	736,7	2799,46	740,90	26,47
12:35	43,43	49,15	734,5	2791,1	738,74	26,47
12:40	43,41	48,83	732,9	2785,02	758,92	27,25
12:45	43,55	48,95	720,1	2736,38	803,60	29,37
12:50	43,73	49,4	723,7	2750,06	749,55	27,26
12:55	43,86	49,38	727,5	2764,5	740,90	26,80
13:00	44,03	49,45	725,1	2755,38	738,74	26,81
13:05	44,17	49,57	747,4	2840,12	776,22	27,33
13:10	44,31	49,74	754,2	2865,96	766,85	26,76
13:15	44,52	50,43	760,5	2889,9	794,95	27,51
13:20	47,88	51,86	764,1	2903,58	825,95	28,45
13:25	45,05	50,53	747	2838,6	730,09	25,72
13:30	44,99	50,51	713	2709,4	714,23	26,36
13:35	45,13	51,19	727,5	2764,5	849,73	30,74
13:40	45,69	51,77	721,7	2742,46	869,91	31,72
13:45	46,56	51,95	720,5	2737,9	976,58	35,67
13:50	46,73	52,11	718,7	2731,06	916,04	33,54
13:55	46,26	51,66	718,2	2729,16	854,77	31,32
14:00	46,04	52	729,9	2773,62	929,73	33,52
14:05	46,39	52,79	713,9	2712,82	1008,29	37,17
14:10	47,39	53,52	691,6	2628,08	1032,07	39,27
14:15	47,51	52,9	690,8	2625,04	944,14	35,97
14:20	47,65	53,09	646,3	2455,94	965,04	39,29
14:25	47,82	53,23	658,8	2503,44	946,31	37,80
14:30	47,55	53,34	652,1	2477,98	961,44	38,80
14:35	47,91	53,49	631,7	2400,46	914,59	38,10
14:40	47,44	53,31	623,1	2367,78	944,86	39,91
14:45	47,35	52,72	611,1	2322,18	887,93	38,24
14:50	47,49	52,86	600,2	2280,76	941,26	41,27
14:55	47,37	52,59	589,5	2240,1	950,63	42,44
15:00	46,7	52,08	601,1	2284,18	877,84	38,43
15:05	46,73	51,74	588	2234,4	903,78	40,45
15:10	46,76	51,54	573,8	2180,44	882,16	40,46
15:15	46,04	51,42	548,4	2083,92	837,48	40,19
15:20	46,17	51,29	530,9	2017,42	900,18	44,62
15:25	45,76	50,64	526,7	2001,46	831,71	41,56
15:30	45,36	50,74	513,7	1952,06	867,75	44,45

15:35	45,28	50,31	504,9	1918,62	901,62	46,99
15:40	44,69	49,92	484,5	1841,1	859,10	46,66
15:45	44,65	50,04	463,8	1762,44	918,20	52,10
15:50	44,77	50	446,7	1697,46	879,28	51,80
15:55	44,53	49,25	434,1	1649,58	839,64	50,90
16:00	43,92	48,83	424,4	1612,72	838,20	51,97
16:05	43,96	48,34	391,2	1486,56	802,88	54,01
16:10	43,14	48,44	370	1406	824,50	58,64
16:15	43,15	47,79	339,9	1291,62	777,66	60,21
16:20	42,41	47,16	330	1254	717,84	57,24
16:25	41,61	46,4	316,2	1201,56	720,72	59,98
16:30	41,19	45,66	282,7	1074,26	710,63	66,15
16:35	40,32	44,99	277,6	1054,88	655,13	62,11
16:40	39,79	44,57	260	988	646,49	65,43
16:45	39,34	43,78	238,5	906,3	589,55	65,05
16:50	39,42	43,77	230,4	875,52	646,49	73,84
16:55	39,04	43,8	221,8	842,84	627,03	74,39
17:00	38,48	43,04	200,4	761,52	572,25	75,15

Tableau 17 : Humidité relative et température de l'air ambiant du test à vide

Temps	EXPERIENCE 1		EXPERIENCE 2		EXPERIENCE 3	
	Humidité [%]	Température [°C]	Humidité [%]	Température [°C]	Humidité [%]	Température [°C]
9:00	33	25,5	24	24,2	24	25,4
9:05	25	27,6	23	24,8	24	25,9
9:10	24	29,1	23	24,5	23	26,2
9:15	22	30,4	23	24,9	23	26,6
9:20	22	30	23	25,6	22	27
9:25	22	30,8	22	26	22	27,4
9:30	22	30,8	22	26,2	21	28
9:35	22	30,9	22	26,3	21	28,7
9:40	21	32,2	22	27	21	29,3
9:45	21	32,6	22	27,1	20	30
9:50	21	32,1	21	27,6	20	30,8
9:55	21	33,7	21	28,2	20	30,9
10:00	20	34,8	21	28,3	20	31,2
10:05	19	35,4	21	27,9	20	30,7
10:10	19	35,8	21	28,2	20	31,4
10:15	19	36,8	21	28,5	19	31,8
10:20	18	37,5	21	28,7	19	32,8

10:25	18	37,1	20	29,3	19	33,3
10:30	18	36,9	20	29,3	20	33,2
10:35	18	37	20	30	20	32,9
10:40	18	36,4	20	29,8	19	33,4
10:45	18	36,7	20	30,1	20	33,8
10:50	17	39	19	30,9	19	34
10:55	17	39,9	20	30,6	19	34,3
11:00	17	39,8	19	31	20	33,6
11:05	15	40,3	19	31,2	19	34,8
11:10	15	40	19	31,4	19	34,9
11:15	15	39,9	19	31,1	19	35,64
11:20	15	40,3	19	31,6	19	35,6
11:25	15	40	19	32,3	18	36,3
11:30	15	40,8	18	32,7	18	36,1
11:35	15	40,2	19	32,8	18	36,8
11:40	15	40,2	18	33,8	18	37,5
11:45	15	41,3	18	32,9	18	36,7
11:50	15	41,2	18	34	18	36,5
11:55	15	40,7	18	33,8	18	37,6
12:00	15	41,3	18	34,3	18	37,8
12:05	15	40,8	17	34	17	38,5
12:10	15	40,3	18	33,4	18	37,8
12:15	15	39,9	18	33,6	18	37,7
12:20	15	40,6	18	34,1	17	39,2
12:25	15	41,1	18	33,7	17	38,9
12:30	15	41,2	16	34,4	17	38,3
12:35	15	41,4	16	34,7	18	37,8
12:40	14	42,3	16	35,3	17	39
12:45	15	41,8	16	34,5	18	39,1
12:50	15	41,6	16	35,6	17	39,2
12:55	15	41,6	16	36,1	17	38,8
13:00	14	43,2	16	36,6	17	39,1
13:05	14	44,2	16	36,5	17	39,4
13:10	14	44,5	15	37,9	17	40,4
13:15	14	42,8	15	38,2	17	40,4
13:20	14	42,8	15	36,4	17	40,6
13:25	14	43,3	16	35,6	17	39,4
13:30	14	43,4	15	37,4	17	39,7
13:35	14	42,4	15	37,5	18	38,4
13:40	14	44	15	37,6	17	39,4
13:45	14	44,8	15	37,4	17	39,8
13:50	14	45,1	15	36,8	17	39,1

13:55	14	45,2	15	37,6	17	38,8
14:00	13	45,8	15	37,5	17	39,2
14:05	13	45,1	15	37,1	17	39,8
14:10	14	44,7	15	36,3	17	39,7
14:15	13	44,4	15	36,5	17	40,1
14:20	13	45,3	15	37,1	17	40
14:25	13	45,7	15	37,1	17	40,8
14:30	13	45,6	15	37,4	17	40,2
14:35	13	46	15	36,5	16	40,4
14:40	14	44,3	15	37,1	17	39,8
14:45	14	44,5	15	37,4	17	39,4
14:50	13	45,4	15	36,4	17	39,9
14:55	14	44,9	15	36,8	17	39,2
15:00	14	44,8	15	37,2	17	39,3
15:05	14	43,4	15	36,8	17	39,8
15:10	14	44,3	15	36,4	17	38,8
15:15	14	43,8	15	36,2	17	39,1
15:20	14	42,3	15	36,1	17	38,7
15:25	14	42,3	15	36,6	17	37,8
15:30	14	42,8	15	36,8	18	38
15:35	14	43,1	15	36,6	18	37,3
15:40	14	42,3	15	36	18	37,8
15:45	14	42,1	15	35,4	18	37,6
15:50	14	41,3	15	35,7	18	37,2
15:55	14	42,3	15	35,2	18	37,2
16:00	14	42,7	15	35,7	18	37
16:05	14	41,4	15	34,8	18	37
16:10	15	40,2	15	34,4	18	37,2
16:15	16	38,6	15	33,9	19	36,4
16:20	17	38,3	15	33,8	19	35,8
16:25	15	38,9	16	33,7	19	35,9
16:30	17	39	15	33,8	19	35,6
16:35	17	38,3	16	33,8	19	35,6
16:40	17	37,1	16	33,2	19	34,8
16:45	18	36,3	16	33,1	19	35,1
16:50	19	36	16	32,3	19	35,1
16:55	20	35,8	16	32,5	19	34,4
17:00	20	36,6	16	32,4	20	34,7

## ANNEXE 3 : AMÉLIORATIONS PROPOSÉES

Tableau 18 : Dimensionnement du système PV avec stockage

Équipement	Quantité	Puissance unitaires [W]	Puissance installée [W]	Nombre d'heures d'utilisation [h]		Consommation énergétique [Wh]	
				Jour	Nuit	Jour	Nuit
Ventilateur	3	5	15	8	12	120	180
<b>Total</b>			<b>15</b>			<b>120</b>	<b>180</b>
<b>Besoins [kWh/j]</b>	<b>Rendement champs PV</b>	<b>Rendement batterie</b>	<b>Ensoleillement moyen [kWh/m<sup>2</sup>·j]</b>	<b>Puissance crête minimale [Wc]</b>		<b>Puissance crête réelle [Wc]</b>	
0,3	0,95	0,9	5,43	64,61		70	
<b>Besoins période en autonomie [kWh]</b>		<b>Profondeur de la décharge</b>	<b>Rendement batteries</b>	<b>Tension du système [V]</b>		<b>Capacité minimale [Ah]</b>	
0,18		0,85	0,9	12		19,6	
<b>Tension [V]</b>		<b>12</b>					
<b>Capacité réelle [Ah]</b>		<b>25</b>					

Tableau 19 : Dimensionnement du système PV sans stockage

Équipements	Quantité	Puissances unitaires [W]	Puissance installée [W]	Nombre d'heures d'utilisation [h]		Consommation énergétique [Wh]	
				Jour	Nuit	Jour	Nuit
Ventilateur	3	5	15	8		120	
<b>Total</b>			<b>15</b>			<b>120</b>	
<b>Besoins [kWh/j]</b>	<b>Rendement champs PV</b>	<b>Rendement batterie</b>	<b>Ensoleillement moyen [kWh/m<sup>2</sup>·j]</b>	<b>Puissance crête minimale [Wc]</b>		<b>Puissance crête réelle [Wc]</b>	
0,12	0,95	0,9	5,43	25,84		<b>30</b>	



Figure 33 : Régulateur de charge/décharge Steca Solsum F 6.6F



Figure 34: Batterie solaire Gel plus 20 Ah

Tableau 20 : Caractéristiques du module PV 80 Wc choisi

<b>Module PV King Sun poly cristallin</b>	
Puissance maximale	70 Wc
Courant de puissance maximale	3,86 A
Tension de puissance maximale	18,18 V
Courant de court-circuit	4.12 A
Tension en circuit ouvert	22,35 V
Rendement	13.4 %

Tableau 21 : Caractéristiques du module PV 30 Wc choisi

<b>Module PV Vitron ploy cristallin</b>	
Puissance maximale	30 Wc
Courant de puissance maximale	1.66 A
Tension de puissance maximale	18 V
Courant de court-circuit	1.83 A
Tension en circuit ouvert	21.6 V
Rendement	13.2 %

## ANNEXE 4 : QUELQUES RÉALISATIONS DU CNES



Figure 35 : Distillateurs fabriqués au CNES



Figure 36 : Séchoirs solaires fabriqués au CNES



Figure 37 : Chauffe-eau solaire du CNES installés dans une cité de Niamey



Figure 38 : Four solaire fabriqués au CNES