



Elaboration d'un outil d'aide à la décision pour le choix des séchoirs solaires au Niger

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE DE
MASTER EN GENIE ELECTRIQUE ET ENERGETIQUE
SPECIALITE : GENIE ENERGETIQUE

Présenté et soutenu publiquement le 02 Juillet 2019 par

Rachida ISSAKA SEYNI (20130792)

Directeur de mémoire : Dr. Adamah MESSAN, Maître de Conférences.

Encadrant 2iE : Dr.-Ing. habil. N'TSOUKPOE Kokouvi Edem, Maître-Assistant HDR, Enseignant-chercheur au Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Energétique (LabEREE)

Maître de stage : M. ADAMOU OUSMANE Chayaou, Centre National d'Energie Solaire (CNES)

Structure d'accueil du stage : Centre National d'Energie Solaire (CNES)

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr. Babacar LEYE

Membres et correcteurs :

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

Dr. Sayon SIDIBE

Promotion [2018/2019]

DEDICACES

Je dédie ce document :

- A mes très chers parents qui m'ont soutenu tout au long de mon parcours avec tendresse et compréhension.
- A ma grand-mère Mme KANSAYE Amsatou et mon oncle Yacine KANSAYE pour tout leur amour, Que Dieu vous donne longue vie !
- A mon époux pour sa patience, son aide et sa compréhension, Que Dieu te récompense en bien !

REMERCIEMENTS

Mes sincères remerciements :

- A la Directrice Générale du CNES Dr. PABYAM SIDO Mariam pour son accueil et ses conseils.
- A mes encadreurs Dr. N'TSOUKPOE Kokouvi Edem et M. ADAMOU OUSMANE Chayaou pour avoir accepté diriger et corriger ce mémoire. Merci pour votre entière disponibilité et vos précieux conseils.
- A tous les enseignants de 2iE : je vous remercie de m'avoir encadré.
- A nos collègues stagiaires et camarades de classe pour l'esprit d'équipe ayant régné entre nous tout au long de notre parcours à 2iE.

RÉSUMÉ

En cette ère d'efficacité énergétique et d'énergie propre, le séchage par énergie solaire est d'un grand intérêt. Ce procédé réduit considérablement l'eau contenue dans les produits et ainsi, l'activité des microorganismes au sein de ces produits ; ces derniers pourront alors être mieux conservés.

Ce document est axé sur deux grands points : d'une part l'élaboration d'un outil d'aide à la décision permettant un choix de séchoir solaire pertinent selon le besoin de l'utilisateur ; et d'autre part, la proposition d'un protocole de caractérisation des séchoirs solaires. Ce dernier point fait ressortir les différents tests effectués afin d'affirmer l'efficacité d'un séchoir, il éclaire également le lecteur sur les outils utilisés et leur finalité.

Le principal but visé par cette étude est d'avoir en toute période de l'année, des aliments séchés mais ayant conservé leur saveur (goût) et leurs vitamines aussi bien pour la consommation que pour la vente. Le Niger pourra alors être classé au rang des pays exportateurs de produits séchés de qualité incomparable.

Mots Clés :

- 1 - Caractérisation**
- 2 - Choix**
- 3 - Produit**
- 4 - Séchoir solaire**
- 5 – Utilisateur**

ABSTRACT

In this era of energy effectiveness and clean energy, drying by solar energy is of a great interest. This process reduces considerably the water contained in the products and thus, the activity of the micro-organisms within these products.

This document is centered on two great points: on the one hand making of a tool of decision-making aid allowing a choice of relevant solar dryer according to the user's need; and in addition, the proposal for a protocol of characterization of solar dryers. This last point emphasizes the various tests carried out in order to affirm the effectiveness of a dryer, it also informs the reader on the tools used and their finality.

The principal aim set by this study is to have in all the year, dried food but having preserved their savour (taste) and their vitamins as well for consumption and for the sale. Niger could then be classified with the row of the exporting countries of dried products of incomparable quality.

Key words:

1 – Characterization

2 - Choice

3 - Product

4 – Solar dryer

5 – User

LISTE DES ABREVIATIONS

ATESTA	Atelier Energie Solaire et Technique Appliquée
CIRAD	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
DC	Direct Current (Courant Continu)
GERES	Groupe Energies Renouvelables, Environnement et Solidarités
M_i	Teneur en eau initiale dans le produit
M_f	Teneur en eau finale dans le produit
m_s	Masse sèche du produit
m_w	Wet masse = masse humide du produit
ONERSOL	Office de l'Energie Solaire
t_d	Drying time = durée du séchage
t_1	Temps avant séchage (état 1)
t_2	Temps après séchage (état 2)

Table des matières

Dédicaces.....	i
Remerciements	ii
Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
Liste des abréviations	v
Liste des tableaux.....	viii
Liste des figures.....	viii
I. Introduction.....	1
I.1 Contexte, justification et objectifs.....	1
I.2 Présentation de la structure d'accueil : le CNES.....	2
II. Revue bibliographique	3
II.1 Etat de l'art sur les séchoirs solaires au Niger et dans la sous-région.....	3
Introduction.....	3
II.1.1 Etat de l'art sur les séchoirs solaires utilisés au Niger.....	4
II.1.2 Etat de l'art sur les séchoirs solaires dans la sous-région.....	6
II.2 Revue bibliographique sur la caractérisation des séchoirs solaires	12
II.2.1 Définition	12
II.2.2 Méthode appliquée au CNES.....	12
Protocole expérimental de la caractérisation à vide.....	12
Protocole expérimental de la caractérisation en charge	13
II.2.3 Revue bibliographique.....	13
III. Adaptabilité des séchoirs solaires selon les contextes d'usage.....	19
III.1 Catégorisation des produits à sécher selon leurs caractéristiques.....	19
III.1.1 La nature ou catégorie d'aliment	19
III.1.2 La teneur en eau.....	20
III.1.3 L'activité de l'eau au sein du produit	20
III.1.4 La température maximale de séchage	21
III.2 Analyse des périodes de séchage des produits alimentaires au Niger.....	23
III.3 Classification des séchoirs solaires en fonction de leurs caractéristiques	26

III.4 Facteurs et paramètres à prendre en compte pour le choix d'un séchoir solaire.....	27
▪ La nature des produits à sécher.....	28
▪ La quantité de produits requise.....	28
▪ Les conditions climatiques	28
▪ L'entretien exigé.....	30
▪ La durée de vie du matériel	30
▪ La taille du capteur	31
▪ La capacité de la chambre de séchage	31
IV. Résultats et discussion.....	31
IV.1 Classification des contextes et affectation du séchoir adapté	31
IV.1.1 Proposition de séchoirs selon le climat de la région.....	31
IV.1.2 Outil d'aide à la décision conçu.....	32
IV.2. Proposition de protocole de caractérisation des séchoirs solaires.....	34
IV.2.1 Objectifs de la caractérisation d'un séchoir solaire.....	34
IV.2.2 Etapes utilisées pour la caractérisation d'un séchoir solaire.....	35
IV.2.3 Equipements nécessaires.....	35
IV.2.4 Protocole.....	35
IV.2.4.1 La caractérisation à vide.....	35
IV.2.4.1.1 Objectifs.....	35
IV.2.4.1.2 Mise en œuvre	35
IV.2.4.1.3 Exploitation des résultats.....	35
V.2.4.2 La caractérisation en charge	36
V.2.4.2.1 Objectifs	36
V.2.4.2.2 Mise en œuvre.....	36
V.2.4.2.3 Exploitation des résultats	36
V. Conclusion- Perspectives	38
VII. Bibliographie	39
VIII. Annexes	41

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Récapitulatif des protocoles de caractérisation	18
Tableau 2: Catégories d'aliments et caractéristiques de chacune	22
Tableau 3: Production agricole du Niger (en milliers de tonnes), statistiques de 2011/2012..	23
Tableau 4 : Périodes de saturation des marchés en quelques fruits et légumes au Niger	24
Tableau 5: Classification des séchoirs solaires selon leurs caractéristiques	27
Tableau 6: Proposition de séchoirs solaires selon le climat	31

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Organigramme du Centre National d'Energie Solaire (CNES).....	2
Figure 2: Séchoir ICARO 2007.....	5
Figure 3: Séchoir ICARO 2000.....	5
Figure 4: Séchoir solaire à coquilles conçu au CNES.....	5
Figure 5: Batterie de séchoirs C	6
Figure 6: Séchoir coquillage à trois claies développé par le GERES [4].....	7
Figure 7: Séchoirs tunnel ATESTA [3].....	7
Figure 8: Séchoir solaire tunnel banco [3]	8
Figure 9: Séchoir hybride solaire/gaz muni d'un réflecteur et d'un ventilateur [3]	8
Figure 10: Structure du séchoir Serre [5]	9
Figure 11: Vue intérieure du séchoir solaire Serre [5]	10
Figure 12: Schéma de principe du séchoir à flux traversant (coupe de l'enceinte) [5].....	10
Figure 13: Séchoir solaire hybride pour fruits et légumes [6].....	11
Figure 14: Séchoir "CASE" [7].....	11
Figure 15: Séchoir solaire hybride Geho [8]	12
Figure 16: Relation entre la teneur en eau et l'activité de l'eau à l'équilibre [9].....	20
Figure 17: Zones climatiques du Niger [13]	29
Figure 18: Algorithmique de l'outil d'aide à la décision	32
Figure 19: Vue de l'outil d'aide à la décision conçu sur Excel.....	34

I. INTRODUCTION

I.1 CONTEXTE, JUSTIFICATION ET OBJECTIFS

La plupart des pays sahéliens comme le Niger, font recours au séchage traditionnel pour la conservation de leurs denrées alimentaires, animales ou végétales. Cette méthode de séchage consiste à étaler des produits à même le sol pour que, sous l'action des rayons solaires, l'eau contenue dans ces produits soit évaporée. Cependant, ces aliments sont exposés à la poussière, aux insectes et à l'humidité, ce qui rend les produits séchés peu fiables tant sur le plan nutritionnel que sanitaire.

Il est donc primordial de moderniser le séchage et penser à des techniques plus performantes que celles utilisées jadis. Ainsi, vu le potentiel solaire dont dispose le Niger (un ensoleillement moyen de $6 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$) [1] et la production des denrées alimentaires basée en milieu rural, les séchoirs solaires présentent beaucoup d'avantages pour la valorisation de ces produits. Cela a favorisé la prolifération de diverses technologies de séchoirs solaires au Niger et même dans la sous-région. Puisque les utilisateurs disposent de peu de notions sur les séchoirs solaires ; il est nécessaire de les guider techniquement pour mieux exploiter les avantages offerts par ces séchoirs. C'est dans ce sens qu'on se propose, à travers cette étude, d'élaborer un outil permettant aux utilisateurs d'opérer un choix judicieux en fonction de leur contexte et leurs besoins. Plus loin, nous allons établir un protocole de test des séchoirs afin de bien caractériser les séchoirs pour une classification efficace.

Ce travail a d'abord consisté à faire un inventaire des séchoirs solaires au Niger et dans la sous-région. Ensuite, nous avons procédé à une classification des séchoirs puis une catégorisation des produits à sécher selon leurs caractéristiques. Par la suite, nous avons présenté les facteurs qui peuvent influencer le choix d'un séchoir solaire et nous avons fait un classement des séchoirs conformément aux contextes d'usage. Enfin, nous avons proposé un protocole de caractérisation des séchoirs solaires au Sahel selon les produits à sécher. Ce travail se termine par une conclusion et des recommandations en guise de perspectives visant à améliorer cette étude.

I.2 PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL : LE CNES

En Mai 1965, fut créé au Niger, l'Office de l'Energie Solaire "ONERSOL" dans le cadre de la Recherche-Développement orientée vers la filière solaire. En 1999, l'ONERSOL devient le Centre National de l'Energie Solaire (CNES) qui est un Etablissement Public à caractère Administratif placé sous la tutelle du Ministère de l'Energie. Dans le but de répondre aux besoins de la population, le CNES s'est fixé un certain nombre de missions dont : la promotion de la recherche et la diffusion des technologies renouvelables efficaces; le renforcement des capacités des acteurs du domaine des Energies Renouvelables; la contribution à la recherche et la mise en place des mécanismes de financement adaptés au domaine des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique. Le CNES est dirigé par une Direction Générale et structuré en Départements (Figure 1) dont :

- Le Département Recherche qui mène des activités de recherche et de développement dans les domaines du solaire thermique, thermodynamique et photovoltaïque.
- Le Département Ingénierie : chargé de mener des études et travaux de recherches sur les dispositifs et systèmes de conversion solaire photovoltaïque et thermique.
- Le Département des Etudes, Suivi & Evaluation qui élabore et donne des indications sur l'état d'avancement des projets et programmes de recherche.
- Le Département Administration & Finances qui est chargé d'assister le Directeur Général du CNES dans la gestion administrative, financière et matérielle du Centre.

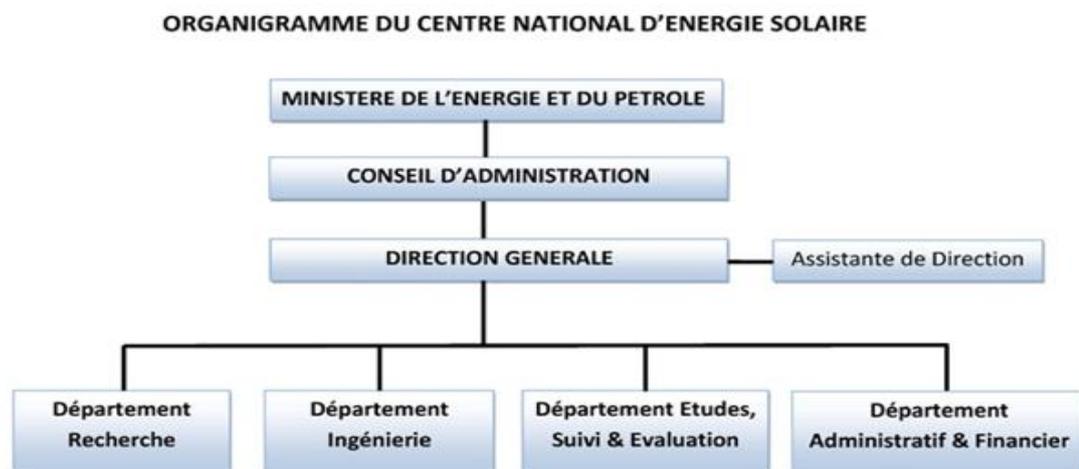


Figure 1: Organigramme du Centre National d'Énergie Solaire (CNES)

Dans le domaine du solaire, le CNES (ex ONERSOL) a élaboré et réalisé plusieurs équipements dont certains sont disponibles en Annexe 1.

II. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Cette revue vise d'une part l'état de l'art sur les séchoirs solaires au Niger et dans la sous-région ; et d'autre part, la caractérisation des séchoirs solaires.

II.1 ETAT DE L'ART SUR LES SECHOIRS SOLAIRES AU NIGER ET DANS LA SOUS-REGION

INTRODUCTION

Le séchage est une opération consistant à éliminer l'eau d'un aliment par évaporation afin d'améliorer sa conservation. En Afrique, le mode de séchage le plus répandu est le séchage naturel des produits ; le produit est réparti sur des claies ou des nattes, dans des grillages (pour les épis de maïs) ou disposé carrément sur le sol. Cela suppose une intervention humaine assez régulière : protection ou ramassage du produit en cas de pluie, malaxage fréquent pour éviter la surchauffe de la couche supérieure et homogénéiser le produit afin de permettre le séchage de la couche inférieure. Les inconvénients que présente cette pratique ne sont pas à négliger: pertes de produits mal séchés, destruction de certaines vitamines par l'exposition directe au soleil, dégradation par les intempéries et les nuisibles (insectes, rats, poussière). D'où l'importance des séchoirs plus modernisés mais aussi, exigeant des investissements plus élevés selon la technologie choisie.

Tout séchoir solaire a pour paramètres importants, la température et l'humidité relative de l'air asséchant. Selon le mode de chauffage ou le mode de fonctionnement, les séchoirs solaires peuvent être classés en quatre catégories :

- **Les séchoirs solaires directs**

Le rayonnement solaire arrive directement les produits dans ces séchoirs. Ce sont des appareils simples, généralement des cadres en bois couverts de plastique ou de vitre. La circulation de l'air se fait par tirage naturel suite à l'action du vent sur les ouvertures. Ces séchoirs sont à des prix abordables mais présentent des inconvénients dont on peut noter la destruction de certaines vitamines et le risque de dépassement de la température maximale admissible par le produit. Cela est dû à la mauvaise circulation de l'air dans ces systèmes.

- **Les séchoirs solaires indirects**

Pour ce type de séchoirs, les produits ne sont pas directement exposés au soleil ; ils sont disposés sur des claies à l'intérieur d'une chambre de séchage et séchés par de l'air

préalablement chauffé dans un capteur thermique. S'agissant des séchoirs à convection forcée, l'air ambiant est aspiré par des ventilateurs et passe ensuite dans le capteur à air où il est chauffé avant de monter par effet thermosiphon jusqu'à la chambre de séchage. L'air à une température plus élevée, traverse les différentes claies en retirant l'eau contenue dans les aliments et l'achemine vers l'extérieur à travers la cheminée sous forme de vapeur d'eau. La technologie indirecte, étant plus complexe, est plus coûteuse que celle directe.

- **Les séchoirs mixtes**

Dans ces séchoirs, la chaleur nécessaire au séchage est fournie par l'action combinée de l'air préchauffé dans un capteur et du rayonnement solaire frappant directement les produits.

- **Les séchoirs hybrides**

Ils utilisent en plus de l'énergie solaire, une énergie d'appoint (électricité, gaz, etc.) pour assurer un niveau élevé de chauffage de l'air. L'énergie solaire sert alors, à préchauffer l'air. Ces systèmes, assez coûteux, conviennent aux applications à grande échelle et celles commerciales pour lesquelles les aléas climatiques ne doivent pas constituer un obstacle.

II.1.1 ETAT DE L'ART SUR LES SECHOIRS SOLAIRES UTILISES AU NIGER

Deux types de séchoirs solaires sont principalement utilisés au Niger. Ce sont :

Le séchoir ICARO

Ce séchoir est disponible en deux modèles tous en tôle: un ancien qui était mis en place vers 2000 et un nouveau modèle mis au point en 2007 dans le but de mettre à disposition des populations rurales et des entrepreneurs, des unités de séchage plus performantes et plus grandes selon la demande. En effet, ICARO 2000 est un séchoir vertical (Figure 2) avec 5 claies pouvant supporter 25kg de produits frais. Il est constitué d'une chambre de séchage de 1 m², d'une porte qui sert à introduire les produits, d'un capteur solaire et d'une cheminée dotée d'un ventilateur qui aspire l'air chargé de l'humidité des produits. Quant au modèle ICARO 2007, de forme horizontale (Figure 3), il comprend une chambre de séchage et deux capteurs thermiques à air. Il s'agit d'un capteur incliné de 7° (par rapport à l'horizontale) comportant un hexaèdre, logement des ventilateurs qui aspirent l'air ambiant ; et d'un capteur horizontal où l'air est chauffé une seconde fois avant de rentrer dans la chambre de séchage à travers des diffuseurs. Avec une capacité de 50kg [2], le séchoir ICARO 2007 renferme 10 claies identiques dans une aire de 2 m². Notons également que les ventilateurs sont alimentés par un module photovoltaïque de 80 W. Les deux modèles fonctionnent à convection forcée.



Figure 3: Séchoir ICARO 2000



Figure 2: Séchoir ICARO 2007

Les séchoirs type ICARO sont préalablement étudiés de manière à être fabriqués avec des matériaux locaux et par une technique pouvant être exploitée par les ateliers de menuiserie métallique de la place.

Le séchoir à coquilles ou séchoir coquillage

C'est un séchoir solaire indirect constitué de deux parties métalliques superposées en forme de coquilles. Elles renferment une grille (Figure 4) appelée claie sur laquelle sont étalés les produits à sécher. Il est construit de façon artisanale avec de la tôle plate d'une teinte noire permettant d'augmenter sa capacité d'absorption du rayonnement solaire. Ce séchoir a une capacité de 10kg, il est facile à réaliser avec des matériaux locaux et peu coûteux. La partie basse comporte des trous par lesquels l'air ambiant pénètre le séchoir. A l'intérieur de ce dernier, l'air s'échauffe et monte par convection naturelle pour sécher les produits ; enfin, il est évacué à travers l'ouverture de la coquille supérieure prévue à cet effet. Notons que le séchoir à coquilles a des insuffisances puisque les produits qu'on y introduit ne sont pas à l'abri de la poussière bien qu'ils soient épargnés des rayons solaires directs et des insectes. Aussi, il ne peut être utilisé que pendant 5 ans, ce qui est trop faible comme durée de vie.



Figure 4: Séchoir solaire à coquilles conçu au CNES

Le séchoir C

Construit par l'ONERSOL en briques cuites et crépies au ciment, ce séchoir est constitué de dix compartiments identiques (Figure 5) de mêmes dimensions. Chaque compartiment est doté d'un tiroir (sur la partie arrière) qui sert à l'introduction des produits et au contrôle de leur aspect pendant le séchage, et d'une cheminée qui permet l'évacuation de l'air chaud chargé de l'humidité des produits.

Chaque compartiment du séchoir C comprend un capteur à air dont l'absorbeur est en tôle pliée peinte en noir et couverte de verre. L'air pénètre le capteur à partir du bas, à travers des trous prévus à cet effet, puis il est acheminé jusqu'aux produits par convection naturelle. Pour mieux emmagasiner la chaleur au sein du capteur, des cailloux furent introduits dans le séchoir et enveloppés d'une peinture noire.



Figure 5: Batterie de séchoirs C

II.1.2 ETAT DE L'ART SUR LES SECHOIRS SOLAIRES DANS LA SOUS-REGION

Au Burkina Faso, il y a trois grandes catégories fonctionnelles de séchoirs solaires à savoir :

- **le séchoir solaire coquillage**

Ce séchoir est très pratique, il est destiné aux manipulations des ménages et des groupements féminins. En effet, il eût un grand triomphe au niveau des projets de recherches et développement ayant un volet séchage. Ce type de séchoir est déjà décrit précédemment mais ceux utilisés au Burkina se distinguent de ceux construits au CNES par le fait qu'ils contiennent deux claies principales et une de finition (Figure 6). On peut introduire jusqu'à 20kg de produits frais dans le séchoir coquillage qui a une durée de vie d'environ 10ans [3]. Son entretien se limite au renouvellement annuel des claies et de la peinture noire des tôles (avec une couche antirouille).

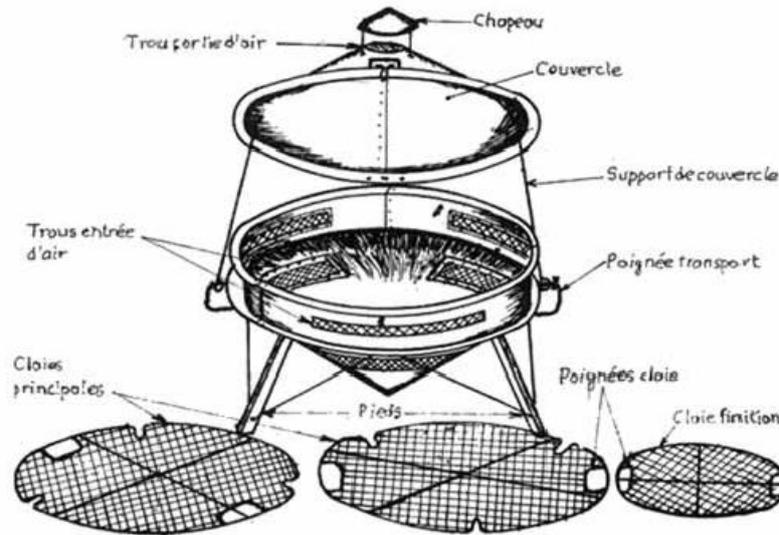


Figure 6: Séchoir coquillage à trois claies développé par le GERES [4]

▪ Le séchoir solaire tunnel ATESTA

C'est un séchoir en tôle plate de teinture noire, recouverte d'une couverture plastique transparente (Figure 7a, b). Il comporte deux portes latérales permettant l'introduction des produits et l'entretien. Les plastiques qui couvrent ces séchoirs sont souvent traités aux rayons ultraviolets, ils doivent être renouvelés tous les 3ans. Mais suite au fait que les enfants déchirent les plastiques, les fabricants couvrent désormais les séchoirs avec de la tôle planquée de peinture noire mate. Avec des dimensions de 1,5 m x 1,5 m, le séchoir tunnel ATESTA est le plus utilisé ; cela peut être dû à sa grande capacité. En effet, il existe en modèles de 20 kg et en modèles de 40 kg avec une capacité de 5 kg par claie [3]. Notons que le séchoir ATESTA est plus performant lorsque l'épaisseur de coupe est petite.



Figure 7: Séchoirs tunnel ATESTA [3]

▪ **Le séchoir solaire tunnel banco**

Ce type de séchoir est conçu pour des applications en grandes quantités (Figure 8) soit pour le commerce soit à la suite d'une bonne récolte, dans le but de sécher les produits et ainsi les conserver jusqu'à la saison nouvelle. Le séchoir banco peut contenir 80 à 120 kg de produits frais, cependant, il est le séchoir solaire le moins utilisé. Ce qui peut expliquer la réticence des utilisateurs face à ce séchoir c'est le fait qu'il soit fixe, non déplaçable en périodes de pluies alors que l'argile (dont le séchoir banco est fabriqué) est très sensible à l'eau. Il existe des séchoirs tunnel banco dans les unités suivantes : 3 à Gouran dans le Sourou, 4 à Belle-ville (Bobo-Dioulasso), 4 à Bérégadougou et à Lafiabougou (Bobo-Dioulasso) [3].



Figure 8: Séchoir solaire tunnel banco [3]

Pour les producteurs réguliers de produits séchés, il est impératif de trouver une source de chaleur d'appoint puisque le séchage solaire n'est pas efficace pendant la saison pluvieuse. D'où l'apparition des séchoirs hybrides (Figure 9) avec lesquels le séchage est modernisé mais plus coûteux.



Figure 9: Séchoir hybride solaire/gaz muni d'un réflecteur et d'un ventilateur [3]

Une liste des séchoirs solaires présents au Burkina Faso est disponible en Annexe 2.

Au Mali, dans le cadre du projet européen FONIO « Amélioration de la qualité et de la compétitivité de la filière fonio en Afrique de l'Ouest », deux types de séchoirs ont été conçus, testés et validés par le CIRAD [5]. L'objectif étant d'accroître la qualité du fonio, céréale cultivée à Bamako (Mali) et commercialisée sous forme de fonio précuit dans les grandes villes. Ce produit est également exporté vers l'Europe ou les Etats Unis. Il s'agit des séchoirs suivants :

- le séchoir « serre solaire ventilée » (CSec-S)
- le séchoir « à flux traversant » (CSec-T)

Pour le **séchoir serre**, le séchage du produit est fait par effet de serre, le rayonnement solaire étant la source chaude. Sa structure est en tubes galvanisés recouverts d'un film plastique (Figure 10). D'un côté, ce séchoir comprend une porte et deux fenêtres dont chacune est équipée d'une moustiquaire; de l'autre côté se trouvent deux ventilateurs axiaux de diamètres respectifs 450 mm et 400 mm (ils sont logés dans une même niche et renouvellent l'air) et un troisième à grand débit, de diamètre 500 mm mis en marche pour les opératrices pendant le brassage du produit. A l'intérieur du séchoir, il y a 3 ventilateurs de plafond et des tables métalliques couvertes de nattes et tissus sur lesquels le fonio est étalé (Figure 11). Le séchoir serre permet de sécher 300 kg voire 400kg [5].

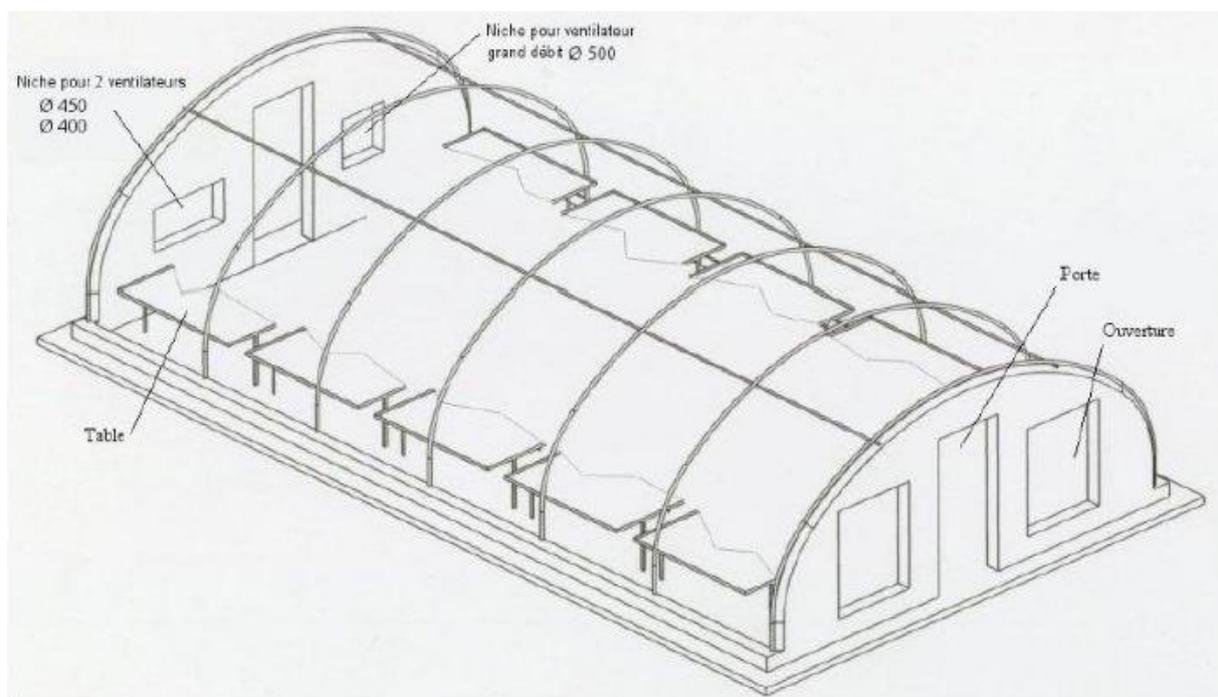


Figure 10: Structure du séchoir Serre [5]



Figure 11: Vue intérieure du séchoir solaire Serre [5]

Concernant le **séchoir à flux traversant**, il a été réalisé à l'aide d'une maquette comportant des claies-tiroirs. Le flux d'air doit traverser la masse de produit sans la déplacer ; ce séchoir n'est donc pas adapté aux farines mais aux produits granulés. Le principe du séchoir à flux traversant est de créer un mouvement à contre-courant entre le flux d'air chaud qui va du bas vers le haut d'une part, et d'autre part, le produit qu'on fait descendre par étapes (manuellement) depuis la position 4 des claies jusqu'à la position 1 (Figure 12) [5]. Précisons que l'air est chauffé par un brûleur à gaz puis introduit par une conduite métallique sous les claies. Dans ce principe, le flux d'air chaud traverse la masse de produit pour favoriser l'échange air-produit.

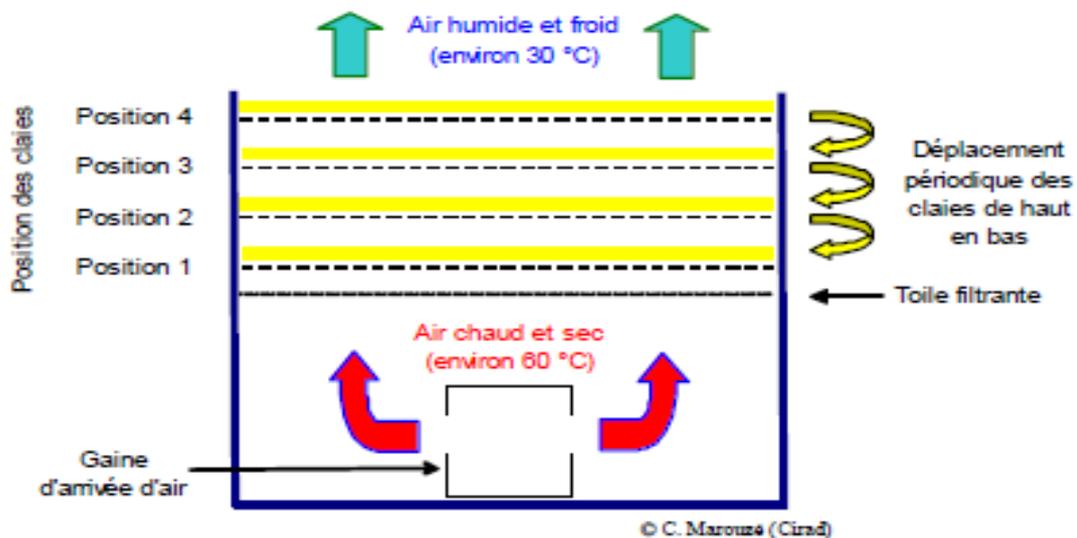


Figure 12: Schéma de principe du séchoir à flux traversant (coupe de l'enceinte) [5]

Au Sénégal, il y a des séchoirs de type coquillage. En plus de cela, notons qu'une entreprise sénégalaise, fabriquant de matériaux agroalimentaires, fabrique et commercialise des séchoirs solaires hybrides qui fonctionnent au solaire et au gaz. Ces séchoirs sont en verre (Figure 13), leur entretien est donc facile et on peut voir l'évolution des produits tout au long de leur transformation. Précisons également que ces séchoirs sont entièrement démontables et

pratiques, ils permettent le séchage des légumes, des fruits et des poissons.



Figure 13: Séchoir solaire hybride pour fruits et légumes [6]

Au-delà des séchoirs évoqués ci-dessus, on peut trouver au Sénégal, les séchoirs suivants [7]:

- Le séchoir tente qui a la forme d'une tente canadienne composée d'une structure en bois, d'une couverture transparente en polyéthylène clair, d'un absorbeur en polyéthylène noir et d'une claie de séchage. Sa capacité est variable selon la densité et la forme du produit.
- Le séchoir "CASE" : ayant la forme d'une case (comme le montre la Figure 14), il est constitué par un coffrage circulaire fait de contre-plaqué, un isolant et un absorbeur doté d'une couverture transparente en polyéthylène. Il renferme une claie de séchage et repose sur un support en bois qui permet d'orienter le séchoir.



Figure 14: Séchoir "CASE" [7]

- Le séchoir "BAN AK SUUF" totalement conçu avec de l'argile et du sable. Il comprend une couverture transparente, une claie de séchage et un absorbeur (du charbon de bois).
- Le séchoir "MIXTE" qui est la combinaison des deux principes de séchage (direct et indirect), Il est constitué par les mêmes matériaux que ceux du séchoir tente mais sa forme et sa partie préchauffage ou capteur, font sa particularité.

Au **Bénin**, en plus des technologies de séchoirs déjà présentées ci-haut, on peut trouver des séchoirs solaires hybrides (utilisant en plus de l'énergie solaire, une autre forme d'énergie au moins). C'est le cas du séchoir "Geho" ; à convection forcée, il est doté d'un brûleur à gaz qui chauffe l'air avant de le faire passer sur les produits déjà exposés aux rayons solaires (Figure

15). Il est utilisé pour le séchage des pâtes alimentaires à base de céréales et de tubercules [8].

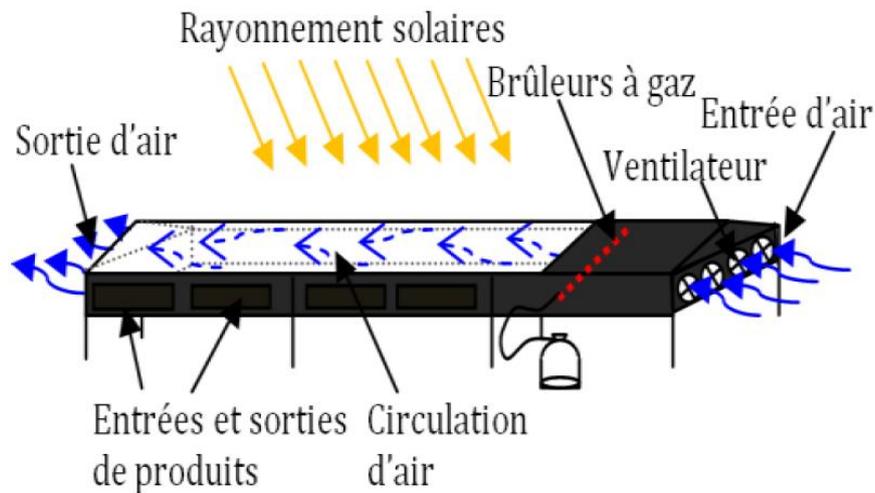


Figure 15: Séchoir solaire hybride Geho [8]

II.2 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA CARACTERISATION DES SECHOIRS SOLAIRES

II.2.1 DEFINITION

D'après le Dictionnaire Larousse, on appelle protocole, l'ensemble des règles définissant une opération complexe. Pour que les résultats des activités expérimentales soient valides, comparables et exploitables, il est nécessaire de se conformer à une série de règles prédéfinies, qui fixe les objectifs, les conditions, le déroulement et les équipements [9].

Dans notre cas, il s'agit d'élaborer un protocole permettant de caractériser expérimentalement les séchoirs solaires utilisables au Niger tout en rappelant que le séchage repose sur les conditions atmosphériques que sont la température et l'hygrométrie de l'air.

II.2.2 METHODE APPLIQUEE AU CNES

Protocole expérimental de la caractérisation à vide

- Placer des thermocouples à l'entrée, à l'intérieur et à la sortie de l'enceinte de séchage.
- Connecter l'ensemble des thermocouples à un enregistreur thermométrique de type CR 1000 Campbell Scientific (celui utilisé au CNES) par exemple. Il doit être relié à un ordinateur pour la collecte des valeurs enregistrées.
- Mesurer avec un pas de temps de 5 minutes [2], l'ensoleillement global horizontal à l'aide du pyranomètre.
- Mesurer progressivement la température et l'humidité relative de l'air ambiant [2].

Les résultats de ce test à vide sont fournis sous forme de données qui peuvent être collectés à partir de l'ordinateur et traduits en courbes selon le pas de temps souhaité (en abscisses).

Il est à noter que, dans plusieurs expériences de caractérisations de séchoirs solaires que nous avons lues, cette caractérisation préliminaire n'est pas effectuée.

Protocole expérimental de la caractérisation en charge

Pendant le test en charge, au-delà de la collecte des valeurs de l'humidité, de la température et de l'ensoleillement, les opérations suivantes sont entreprises :

- Préparer le produit pour le séchage comme ce fût expliqué dans la partie VI.2
- Peser le produit et obtenir ainsi la masse initiale
- Le disposer en couches minces sur les claies
- Peser le produit chaque heure par le biais de la balance numérique afin d'évaluer la quantité d'eau (m_t) en un instant t . On effectue alors chaque heure, la différence entre deux valeurs successives de la masse du produit [2] :

$$m_t(\text{kg}) = m_{t1} - m_{t2}$$

II.2.3 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Afin d'apporter des améliorations à la méthode utilisée au CNES, nous avons lu des articles dont les auteurs nous donnent des informations très importantes sur la caractérisation des séchoirs solaires indirects. Les idées proposées pour le protocole de caractérisation sont les suivantes :

- Kouhila et al. [10] qui avaient pour objectif, d'étudier l'influence de certains paramètres aérothermiques (température de séchage, débit d'air asséchant et fraction d'air recyclé) préalablement fixés, sur la durée de séchage. Leur protocole fût le suivant :
 - Fixer la masse du produit (après préparation) à sécher par claie ;
 - Régler la température de séchage (thermostat)
 - Fixer un débit d'air asséchant à l'aide d'un vélocimètre
 - Mesurer le rayonnement solaire et les températures
 - Peser la masse humide M_h du produit toutes les 10 minutes
 - Déterminer la masse sèche M_s du produit en le plaçant dans une étuve (après le séjour au séchoir et réglage de la température à 110°C et du temps à 7h) jusqu'à déshydratation totale.

Résultats :

- Les produits de la première claie en contact avec l'air chaud sèchent les premiers
- Les courbes de variation de la teneur en eau X et celle de la vitesse de séchage v en fonction du temps montrent la cinétique de séchage du produit ; $v = -\frac{d(X)}{dt}$
- La durée de séchage dépend de la teneur en eau initiale ;
- Plus la température de l'air asséchant est élevée, plus la durée de séchage diminue.

La température reste le paramètre le plus important qui influence le séchage.

➤ Touati [11] dont le protocole expérimental pour le séchage solaire des feuilles de la menthe verte est le suivant :

- Fixer les conditions d'entrée de l'air
- Dégarnir les feuilles de la menthe des tiges, les peser puis les répartir uniformément sur les claies
- Faire fonctionner l'ensemble de l'appareillage au moins 30 minutes avant l'introduction des claies chargées dans la chambre de séchage pour une homogénéisation de la température à l'intérieur du séchoir ;
- Peser les claies à l'extérieur de la chambre sans excéder une durée de pesée de 90 secondes qui est déduite du temps total de séchage ;
- Effectuer des mesures des températures, de l'humidité relative et de la vitesse de l'air asséchant;
- Mesurer les masses humides M_h pour voir la diminution du poids du produit pendant le séchage et plus loin, l'évolution de la teneur en eau X ;
- Placer les échantillons (après le séchage au séchoir) dans une étuve réglée à 105°C durant 6 à 7 heures afin de déterminer la masse sèche M_s . Le produit est pesé toutes les heures jusqu'à ce qu'il atteigne sa déshydratation maximale.

Déduire les courbes caractéristiques de séchage qui sont celles représentant les variations de la teneur en eau X et de la vitesse de séchage en fonction du temps t .

Il trouve que la teneur en eau des feuilles diminue considérablement lorsque la température de l'air asséchant augmente et que la température a une influence plus importante sur le séchage que le débit d'air.

➤ Saleh et Badran [12] qui montrent que les facteurs affectant le taux de séchage sont: l'humidité initiale du produit, la température, la vitesse et l'humidité relative de l'air.

Protocole suivi pour la caractérisation :

- Le séchoir vide était exposé au rayonnement solaire durant 30 minutes environ pour atteindre une condition stable avant le chargement
- La température ambiante, celle au sein du séchoir, l'ensoleillement et la vitesse de l'air étaient enregistrées et les masses des échantillons avec un pas de 3h
- La masse du produit était divisée entre les claies et le séchoir était refermé.

Résultats obtenus :

- Plus l'humidité initiale du produit est élevée, plus le temps de séchage est long, ce qui fait que les feuilles sèchent plus vite que les autres aliments.
 - La température croît rapidement le deuxième jour de séchage par rapport au premier.
 - Le taux de séchage augmente nettement surtout au début du séchage (suite au préchauffage du séchoir).
 - Une bonne vitesse de l'air influence positivement le taux de séchage d'où l'intérêt des ventilateurs.
- Dissa et al. [13] qui procèdent comme suit:
- Laver, éplucher et trancher les mangues avant de les disposer uniformément sur quatre claies numérotées qui sont par la suite introduites dans l'unité de séchage ;
 - Enregistrer les températures à l'aide de thermocouples connectés à un ordinateur doté d'un logiciel d'acquisition de températures puis évaluer l'humidité relative de l'air ambiant et celle à l'intérieur de la chambre de séchage en utilisant un thermo hygromètre ;
 - Connecter une balance à un indicateur de modèle CD11 pour avoir les masses des différentes claies ;
 - Peser les claies au début de chaque opération de séchage sachant que chaque claie porte 1kg de tranches de mangues ;
 - Décharger et peser régulièrement le contenu de ces claies chaque 30min ;
 - Prélever à la fin du séchage, un échantillon sur chaque claie ; le peser et le placer dans une étuve à 70°C pendant 24h conformément à la norme européenne EN12145. Au-delà des 24h, la masse mesurée pour est la masse sèche M_s .
 - Calculer la teneur en eau X (kg d'eau/kg de masse sèche) en base sèche du produit pour chaque claie par l'expression:

$$X = \frac{M(t) - M_s}{M_s} \times 100$$

Où $M(t)$ est la masse du fruit sur une claie à un instant t

- Calculer enfin le taux de séchage du produit
- Selon Romero et al. [14] , installer des thermo-hygromètres à l'entrée et à la sortie du capteur solaire également pour observer les différentes évolutions subies par l'air ambiant.
- Srivastava et al. [15] ; faire uniquement la caractérisation en charge qui a pour but de calculer la teneur en eau X (en base sèche) après le passage du produit au séchoir et détermination de la masse sèche M_s de manière à ce que :

$$X(\%) = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$$

M_h : masse humide obtenue en pesant progressivement le produit au cours du séchage.

Comme résultats, ils obtiennent des données sur la variation de l'ensoleillement, la variation de la température ambiante qui est la température de l'air à l'entrée du séchoir et celle de l'air à sa sortie (en fonction de l'ensoleillement).

- Musembi et al. [16] pour lesquels, en plus des travaux antérieurs, les débits d'air à l'entrée du collecteur solaire et au sein de la chambre de séchage doivent être mesurés. Les caractéristiques de séchage qu'ils énumèrent sont :

- La quantité d'humidité à évacuer m_0 (kg):

$$m_0 = m_w \frac{(M_i - M_f)}{(100 - M_f)}$$

- La quantité de chaleur nécessaire au séchage Q (kJ):

$$Q = m_0 \times h_{fg}$$

h_{fg} : Chaleur latente de vaporisation (kJ/kg)

- Le taux moyen de séchage A_{dr} (kg/h ou g/s):

$$A_{dr} = \frac{m_0}{t_d}$$

- Le rendement du séchoir η qui est le rapport de l'énergie thermique utilisée pour le séchage, sur l'énergie thermique disponible pour le séchage tel que :

$$\eta = \frac{m_v L}{I_{av} A_{in} t} \times 100$$

m_v : masse d'eau évaporée pendant la durée totale du séchage ;

L : chaleur latente de vaporisation ;

I_{av} : rayonnement solaire moyen journalier sur la surface du séchoir ;

A_{in} : aire de l'absorbeur exposée au rayonnement solaire ;

t : temps de séchage en secondes.

Le protocole de caractérisation qu'ils proposent est le suivant :

- Programmer des enregistreurs pour enregistrer les données sur les températures et les humidités chaque 20 min respectivement à l'entrée collecteur, entrée et sortie chambre de séchage.
- Incliner le collecteur d'un angle de 30°.
- Mesurer et enregistrer l'ensoleillement chaque 20min.
- Préparer le produit, le peser puis le répartir sur les claies et les placer à l'intérieur de la chambre de séchage.
- Placer les fils des anémomètres à l'entrée collecteur et sortie cheminée pour mesurer la vitesse du vent à ces endroits.

En fin d'expérience, ils calculent les paramètres ci-haut définis comme étant les caractéristiques de séchage, avant de les consigner dans un tableau. Ils aboutissent à ces résultats :

- Représentations graphiques des évolutions de l'ensoleillement, les températures et les humidités pendant le séchage
- La température à la sortie de la chambre de séchage est supérieure à la température à l'entrée.
- L'humidité relative décroît lorsque la température augmente mais l'air est plus chargé d'humidité à la sortie de la chambre.

Ils précisent enfin que la performance d'un collecteur solaire est donnée par la température et le rendement.

- Mghazli et al. [17] qui procèdent comme suit: (feuilles de rosemary)
 - Charger le séchoir puis peser régulièrement la masse du produit jusqu'à stabilisation ;
 - Placer ensuite l'échantillon dans une étuve dont la température est fixée à 105°C pour 24h dans le but d'avoir la masse sèche et calculer la teneur en eau.

Ils déduisent que :

- Le taux de séchage des feuilles croît quand la température augmente ;
- Les paramètres qui caractérisent un séchoir solaire sont: la température et le débit d'air, ce sont ces derniers qui influencent le taux de séchage de tout produit.

Tous ces articles sont renseignés dans le Tableau 1.

Tableau 1: Récapitulatif des protocoles de caractérisation

Auteur	Produit séché	Protocole de caractérisation du séchoir	Conditions (température et durée) étuve
Kouhila et al. (2000) [10]	Feuilles de sauge (plante aromatisée)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fixer la masse à sécher par claie ▪ Régler la température de séchage ▪ Fixer un débit d'air asséchant ▪ Mesurer le rayonnement solaire et les températures ▪ Peser M_h toutes les 10 minutes ▪ Déterminer la masse sèche M_s du produit en le plaçant dans une étuve (après séjour au séchoir) jusqu'à déshydratation totale. 	110°C pendant 6 à 7h
Touati (2008) [11]	Feuilles de la menthe verte	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fixer les conditions d'entrée de l'air ▪ Dégarnir les feuilles de la menthe des tiges, les peser puis les répartir uniformément sur les claies ▪ Faire fonctionner le séchoir au moins 30 min avant d'y introduire les claies chargées ▪ Effectuer des mesures des températures, de l'humidité relative et de la vitesse de l'air ▪ Mesurer les masses humides M_h sans dépasser 90 s hors séchoir ▪ Placer les échantillons dans une étuve pour déterminer la masse sèche M_s et calculer X ▪ Déduire les courbes caractéristiques de séchage 	105°C pendant 6 à 7h
Saleh et Badran (2009) [12]	"Mallow de juif" et feuilles de menthe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Exposer le séchoir vide au soleil durant 30 minutes avant le chargement ▪ Enregistrer la température ambiante, celle au sein du séchoir, l'ensoleillement et la vitesse de l'air toutes les 30min et les masses des échantillons chaque 3h ▪ Diviser la masse du produit entre les claies et refermer le séchoir. 	80°C pendant 15h pour avoir l'humidité initiale
[13]	Tranches de mangue	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Laver, éplucher et trancher les mangues avant de les disposer uniformément sur les claies ▪ Enregistrer les températures et évaluer l'humidité relative de l'air ambiant et celles à l'intérieur de la chambre de séchage ▪ Connecter une balance à un indicateur de modèle CD11 pour avoir les masses des claies ; ▪ Peser les claies au début de chaque opération ▪ Décharger et peser régulièrement le contenu de ces claies à des intervalles de temps de 30min ; ▪ Prélever à la fin du séchage, un échantillon sur chaque claie ; le peser et le placer dans une étuve ▪ Calculer la teneur en eau X et le taux de séchage 	70°C pendant 24h
[14]	Cosse de vanille	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Configuration et protocole identiques à ceux appliqués au CNES, ils ajoutent juste l'enregistrement des températures et humidités à l'entrée et à la sortie du capteur solaire. 	RAS
[15]	Patates et carottes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Couper les produits et les disposer sur les claies ▪ Mesurer les différentes températures prises par l'air sécheur ▪ Mesurer la perte de masse du produit à des intervalles de temps réguliers ▪ Calculer les teneurs en humidité à partir des données sur les pertes de masses. 	RAS
[16]	Pommes rouges	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Enregistrer les données sur les températures et les humidités chaque 20 min ▪ Incliner le collecteur d'un angle de 30°. ▪ Mesurer et enregistrer l'ensoleillement chaque 20min. ▪ Couper en tranches, peser le produit et le répartir sur les claies avant de les placer à l'intérieur de la chambre de séchage. ▪ Mesurer la vitesse du vent à l'entrée collecteur et sortie cheminée ▪ Calculer les caractéristiques de séchage 	RAS
[17]	feuilles de rosemary	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Introduire le produit dans le séchoir puis peser régulièrement la masse jusqu'à stabilisation ; ▪ Placer l'échantillon dans une étuve de séchage afin de trouver la masse sèche et calculer la teneur en eau. ▪ Mesurer la température et le débit de l'air ▪ Calculer le taux de séchage 	105°C pendant 24h

III. ADAPTABILITE DES SECHOIRS SOLAIRES SELON LES CONTEXTES D'USAGE

III.1 CATEGORISATION DES PRODUITS A SECHER SELON LEURS CARACTERISTIQUES

Les produits alimentaires susceptibles d'être séchés peuvent être classés en fonction de plusieurs facteurs que sont : la nature de l'aliment, la teneur en eau ou humidité, l'activité de l'eau au sein du produit et la température maximale de séchage admissible.

III.1.1 La nature ou catégorie d'aliment

Les grandes catégories d'aliments susceptibles d'être séchés sont : les viandes, les poissons, les fruits, les légumes, les céréales, les légumineuses et les épices [2]. Celles-ci ne sèchent pas de la même manière et n'ont pas la même durée de séchage. En effet, leurs constitutions ne sont pas identiques et certains nécessitent des traitements préalables (comme le sucrage pour les fruits) avant le processus de séchage.

Dans cette étude, nous ne retiendrons que les aliments produits au Niger et susceptibles d'être séchés dans les séchoirs solaires. Quelques précisions :

Les fruits sont subdivisés en deux grandes catégories pour un meilleur classement :

- Les fruits à teneur en eau élevée: mangue, pastèque.
- Les fruits à faible teneur en eau comme les dattes qui sèchent plus rapidement.

Les légumes sous forme de feuilles vertes sont nommées "**légumes feuilles**" et sont très utilisées dans la cuisine des femmes nigériennes. On peut citer le moringa, le persil, le céleri, les feuilles de baobab, de "fakou", l'oseille, les fleurs d'hibiscus appelées bissap (disponibles en deux variétés : blanche et rouge), etc.

Les céréales sont le plus souvent séchées sous forme de farine (maïs, mil, sorgho, haricot), couscous (mil, mas, riz, sorgho, fonio) [2], ou "boule" obtenue après broyage puis cuisson pour le degué (mil, sorgho).

Les légumineuses : il s'agit des légumes secs comme le haricot et l'arachide

Les épices : ce sont des ingrédients utilisés dans la cuisine pour améliorer les goûts. On peut citer : le poivre, les épices locales.

Le séchage du "**Tchoukou**" au Niger n'est pas à négliger, c'est un fromage à base de lait de chèvre, de vache ou de chamelle. Il est séché au soleil en rondelles avant d'être commercialisé

dans les marchés locaux ou exporté. La farine de tchoukou (broyé) est mélangée à celle de mil ou de sorgho pour former une poudre homogène appelée "boule" ou "toukoudi".

III.1.2 La teneur en eau

La teneur en eau "X_{eq}" ou humidité d'un aliment est l'expression de la quantité d'eau perdue par la substance lorsqu'on l'amène à l'équilibre vrai avec une pression de vapeur nulle (Humidité relative égale à 0%) ; c'est donc la quantité d'eau totale contenue dans cet aliment.

La teneur en eau d'un échantillon d'aliment s'exprime en pourcentage de la masse d'eau rapportée soit à la masse de matière sèche contenue dans l'échantillon, soit à la masse totale de la matière humide de l'échantillon [18].

Par les méthodes de dessiccation (séchage), les produits atteignent rarement "l'équilibre vrai" mentionné ci-haut. Cependant, ces méthodes donnent la quantité d'eau perdue entre deux instants t₁ et t₂ avant et après séchage.

L'état d'hydratation d'un produit est essentiellement variable et très sensible à la durée de conservation (après cueillette pour les produits végétaux).

III.1.3 L'activité de l'eau au sein du produit

L'activité de l'eau (Activity of water : A_w) est une grandeur qui exprime la disponibilité de l'eau d'un produit pour des réactions ou un développement de micro-organismes. Elle est définie comme étant le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau dans tout système alimentaire, sur la pression partielle de vapeur de l'eau pure à la même température θ que l'aliment [18]. A_w est un chiffre adimensionnel.

$$A_w = \frac{\text{Pression partielle de vapeur d'eau d'un aliment à } \theta^\circ}{\text{Pression partielle de vapeur de l'eau pure à } \theta^\circ}$$

La pression de la vapeur d'eau, étant inférieure ou égale à la pression de vapeur de l'eau pure à la même température, l'activité de l'eau (A_w) est toujours comprise entre 0 et 1 (Figure 16).

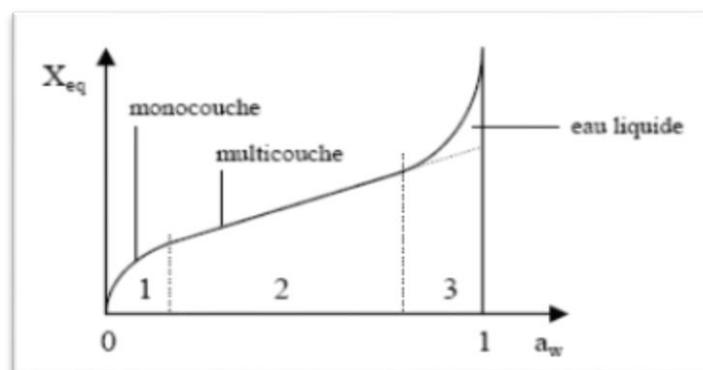


Figure 16: Relation entre la teneur en eau et l'activité de l'eau à l'équilibre [18]

Comme nous le voyons, à chaque valeur de A_w correspond une teneur en eau (X_{eq}) fixe mais cette relation représentée par une courbe appelée "isotherme de sorption" n'est pas linéaire ; elle varie avec chaque aliment ou groupe d'aliments.

Cette isotherme indique à l'équilibre, pour une température donnée, la quantité d'eau contenue dans l'aliment en fonction de son A_w . La courbe ci-dessus peut être divisée en trois zones :

- La zone 1 ($0 < A_w < 0,3$) qui correspond à l'eau "fortement liée" dite aussi "de constitution". L'eau est fidèlement liée aux composants constitutifs du produit par des liaisons hydrogène (force intermoléculaire impliquant un atome d'hydrogène et un atome comme l'oxygène, l'azote ou le fluor) et ne peut être séparée que par des techniques très pointues. Cette eau n'est pratiquement pas disponible comme solvant et équivaut à la première couche (monocouche) qui entoure la matière sèche des aliments [18].
- La zone 2 ($0,3 < A_w < 0,7$) où l'eau est "faiblement liée" sous forme de couches polymoléculaires (multicouche) recouvrant partiellement le produit sec.
- La zone 3 ($0,7 < A_w < 1$) : elle correspond à l'eau "libre" ou "eau liquide" qui n'est retenue à la surface du produit sec que par des forces capillaires (forces d'interfaces entre cette surface et le liquide). Cette eau est disponible comme solvant ; de plus, c'est seulement sous cette forme que l'eau est utilisable par les microorganismes [18] (bactéries des aliments).

Retenons que plus l'eau est libre dans l'aliment, plus elle y est disponible pour les réactions (biochimiques) d'altération. Par contre, si elle liée dans l'aliment, l'activité des substances chimiques (enzymes) est arrêtée et les micro-organismes ont des difficultés à se reproduire.

On distingue deux types d'isothermes de sorption : isotherme d'adsorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit sec et isotherme de désorption dans le cas où elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit saturé en eau [18]. Les deux courbes sont en général différentes à cause d'un phénomène appelé hystérésis.

III.1.4 La température maximale de séchage

Ce sont les températures maximales auxquelles les aliments peuvent être séchés. Chaque produit alimentaire est caractérisé par une température de séchage à ne pas dépasser pour conserver la qualité du produit.

Le Tableau 2 récapitule les catégories d'aliments avec les caractéristiques détaillées :

Tableau 2: Catégories d'aliments et caractéristiques de chacune

Catégorie d'aliment		Exemples	Teneur en eau [%] [18] , [19]	Températures maximales [°C] [20]	
Les viandes et poissons	Les viandes	Viande de bœuf	60	75	
	Les poissons	Silure	75	60	
Les fruits et légumes	Les fruits à forte teneur en eau	Mangue	85	70	
		Pastèque	92	65	
	Les fruits à faible teneur en eau	Datte	15	55	
	Les légumes	Tomate	94	60	
		Oignon	89	60	
		Ail	32	55	
		Chou	93	60	
		Carotte	88	70	
		Gombo	87	60	
		Poivron	90	70	
		Pomme de terre	80	60	
		Légumes "feuilles"	Moringa	75	55
			Feuilles de baobab	73	50
			Feuilles de "fakou"	80	40
Oseille			91	50	
Persil / céleri	79		40		
	Hibiscus "Bissap" (rouge et blanc)	85	60		
Les céréales et légumineuses	Les céréales	Mil (farine ou couscous)	14	60	
		Maïs (farine ou couscous)	13	60	
		Riz (farine ou couscous)	12	50	
		Sorgho (farine, couscous)	11	60	
	Les légumineuses	Haricot (farine)	13	50	
		Arachide	43	55	
Les épices et condiments		Poivre, épices, piment	3 à 10	45	

III.2 ANALYSE DES PERIODES DE SECHAGE DES PRODUITS ALIMENTAIRES AU NIGER

Avant toute analyse, il est important de préciser que les productions agricoles au Niger (Tableau 3), sont classées en cultures maraîchères et en cultures pluviales. Ces dernières dépendent fortement des pluies (cas du mil et du sorgho) tandis que les cultures maraîchères sont pratiquées durant toute l'année dans les périmètres irrigués qu'on rencontre partout sur le territoire nigérien. Les denrées issues du maraîchage sont très importantes pour l'approvisionnement quotidien de la population nigérienne.

Tableau 3: Production agricole du Niger (en milliers de tonnes), statistiques de 2011/2012

Culture		Production (milliers de tonnes)	Total (milliers de tonnes)
Céréales	Mil	3404	5391,4
	Sorgho	1916	
	Riz paddy	60	
	Mas	5,6	
	Fonio	5,8	
Légumineuses	Niébé	1608	1645,3
	Voandzou	37,3	
Cultures maraîchères	Oignon	592,7	992,3
	Tomates	141,5	
	Moringa	12,8	
	Ail	4,7	
	Gombo	3,5	
	Poivron	237,1	
Cultures industrielles	Arachide	427,03	593,3
	Pomme de terre	59	
	Manioc	107,3	

Les moments les plus adéquats pour le séchage des produits frais sont les périodes où ces derniers sont disponibles en grandes quantités ; autrement dit, les périodes post-récolte comme l'indique le Tableau 4. Selon le produit à sécher, la période de disponibilité peut concerner les périodes suivantes qui constituent les trois grandes saisons au Niger [21] (voir Tableau 4) :

- **La saison froide**

C'est la période allant de **Décembre à Février** ; la canicule est atténuée pendant ce trimestre puisque la température moyenne fluctue entre **18 et 33°C** [22]. Avec une humidité relative moyenne pouvant être estimée à 20%, la saison froide est caractérisée par une fraîcheur (surtout pendant les nuits) et une brume sèche [21]. On assiste parfois à des tempêtes de sable dans les régions du Nord.

- **La saison chaude**

Elle commence en **Mars** et se termine en **Mai**. Les températures moyennes dépassent **40°C** et l'humidité relative est de 25% en moyenne. En cette période, le vent est chaud et sec, il vient du Sahara en dominant tout le pays : c'est l'harmattan [23].

- **La saison pluvieuse ou hivernage**

Il s'agit de la période allant de **Juin à Septembre** en particulier dans le Sud du Niger (Niamey et ses alentours), mais elle débute au mois de Mai à Gaya qui est un département de la région de Dosso proche du Bénin. Pendant cette saison, la température moyenne varie entre **28 et 32°C** ; l'humidité relative étant de 51%. On assiste à de bonnes averses orageuses [23] et un vent humide appelé "mousson" qui souffle du Sud-Ouest vers le Nord-Est en dominant la majeure partie du pays [22]. Le Nord du territoire (Agadez) ne reçoit pratiquement pas de pluies, c'est la zone désertique.

- **La saison sèche**

Pendant cette courte saison d'**Octobre à Novembre**, les températures peuvent atteindre **38°C**. Avec une humidité relative moyenne de 19%, la saison sèche annonce la saison froide et possède des caractéristiques semblables à cette dernière.

Tableau 4 : Périodes de saturation des marchés en quelques fruits et légumes au Niger

Produit	Périodes de saturation = Périodes propices au séchage	
	Intervalle de temps [24]	Saisons concernées
Tomate	Novembre à Février	Saison froide
Oignon	Janvier à Mai	Saison froide + Saison chaude
Chou	Novembre à Mars	Saison froide+ Début Saison chaude
Carotte	Décembre à Mars	Saison froide + Début Saison chaude
Gombo	Août à Septembre	Saison pluvieuse
Poivron	Novembre à Mars	Saison froide + Début Saison chaude

Pomme de terre	Octobre à Mars	Saison sèche + Saison Froide + Début Saison chaude
Haricot (à sécher sous forme de farine)	Septembre à Novembre	Saison sèche
Arachide (à sécher sous forme de farine)	Octobre à Novembre	Saison sèche
Mangues	Mai à Juillet	Saison pluvieuse
Pastèque	Mai à Juillet	Saison pluvieuse

Analyse de la période de séchage de chaque produit :

- La tomate : elle peut être séchée pendant la saison froide qui est caractérisée par un vent poussiéreux ; d'où la nécessité de trouver des séchoirs solaires hermétiques qui résistent aux tempêtes de sable. De plus, les nuits sont très froides durant cette période, il est alors crucial d'écarter tout risque de condensation à l'intérieur des séchoirs et assurer une ventilation efficace aux produits lorsque l'énergie solaire n'est pas disponible.
- L'oignon : son séchage peut s'étendre de la saison froide à la fin de la saison chaude. Au début il faudra donc chercher des équipements au sein desquels l'oignon sera épargné de la poussière. Une fois la saison chaude installée, le séchage se fera dans de bonnes conditions tant que le produit est à l'abri des mouches et autres animaux.
- Le chou, la carotte, le poivron et la pomme de terre peuvent être séchés dans la même période : de la saison froide jusqu'au début de la saison chaude. Par conséquent, ils requièrent des séchoirs identiques à ceux qui conviennent au séchage des tomates.
- Le gombo, la mangue, la pastèque mûrissent et inondent les marchés locaux au cours de la saison des pluies. Leur séchage nécessite alors des séchoirs hybrides puisque durant cette période, les températures sont basses et l'air est humide. En outre, ce sont des aliments à forte teneur en eau ($X_{eq} > 80\%$)
- Le haricot, l'arachide et les céréales qui sont cultivés pendant l'hivernage, arrivent à maturité lorsque les conditions de séchage sont assez bonnes (la saison sèche). Tous les types de séchoirs qui existent conviennent au séchage de ces produits une fois transformés en farine ou couscous.

Quant aux poissons et viandes qui sont disponibles à tout moment, il est préférable d'effectuer leur séchage en combinant l'énergie solaire et une autre source d'énergie. Cela permettra de les sécher plus rapidement et de réduire les risques de pourritures auxquels ces produits peuvent

être exposés si le temps de séchage dépasse une journée. Cette situation peut se produire pendant la saison pluvieuse où l'ensoleillement n'est pas assez élevé pour faire sécher la viande et le poisson en une seule séance.

III.3 CLASSIFICATION DES SECHOIRS SOLAIRES EN FONCTION DE LEURS CARACTERISTIQUES

Dans cette classification donnée par le Tableau 5, les séchoirs solaires identifiés au niveau de la partie II.1 sont répartis en deux grands groupes: les séchoirs directs et les séchoirs indirects. Les séchoirs solaires indirects sont eux-mêmes classés en deux groupes :

- Les séchoirs à convection naturelle au sein desquels la circulation de l'air se fait naturellement par effet thermosiphon ; quand l'air ambiant entre dans le capteur thermique, il s'échauffe (devient moins dense) et monte jusqu'à la partie haute du capteur. Cet air est renouvelé à travers la partie basse du capteur.
- Les séchoirs à convection forcée pour lesquels l'air ambiant est aspiré par des ventilateurs à courant continu alimentés par des panneaux photovoltaïques (en général). En plus de cela, certains séchoirs solaires sont dotés de ventilateurs extracteurs d'air juste en dessous des cheminées. Ils sont de diamètres plus petits et refoulent l'air de l'intérieur du séchoir, vers l'extérieur.

S'agissant des séchoirs hybrides, ils sont peu utilisés au Niger du fait du coût supplémentaire que constitue l'énergie d'appoint. Cependant, dans les pays où le gaz butane est subventionné par l'Etat (cas du Burkina Faso [3]), l'utilisation des séchoirs hybrides est assez répandue.

Tableau 5: Classification des séchoirs solaires selon leurs caractéristiques

Type de séchoir		Nom du séchoir	Caractéristiques du séchoir			
			Surface utile (m ²)	Matériau	Capacité maximale (kg)	Nombre de claies
Séchoirs directs		Séchoir serre	43	Film plastique sur des tubes galvanisés	300 à 400	8
		Séchoir tente	3,35	Bois	Variable suivant la densité et la forme du produit	1
		Séchoir "CASE"	0,5	Contre-plaqué		1
		Séchoir "BAN AK SUUF"	0,5	Argile et sable		1
Séchoirs indirects	à convection naturelle	Séchoir solaire coquillage [3]	6	Métal (tôle plate)	20	3
		Séchoir solaire tunnel ATESTA	2,25	Tôle plate	20 à 40	4 à 8
		Séchoir solaire tunnel banco		Argile (banco)	80 à 120	10
	à convection forcée	Séchoir solaire ICARO 2007	2	Tôle	50	10
Séchoir à gaz		Séchoir à flux traversant	30	Bois (plaques) et tôle (partie basse)	200 à 300	12
Séchoir hybride		Séchoir Geho (solaire et gaz)	11,36	Tôle et barre métallique couverte de plexiglass	50 à 60	16

III.4 FACTEURS ET PARAMETRES A PRENDRE EN COMPTE POUR LE CHOIX D'UN SECHOIR SOLAIRE

Parmi les facteurs qui influent le choix d'un séchoir solaire, on peut citer :

▪ **La nature des produits à sécher**

Selon la catégorie des produits (comme nous l'avons vu précédemment), nous pouvons préférer un séchoir à un autre.

▪ **La quantité de produits requise**

Selon la finalité du futur séchoir, s'il est destiné à une production en petite, moyenne ou grande quantité, on distingue les applications suivantes :

➤ L'utilisation familiale (domestique)

Pour les familles, le séchage a pour but principal, la conservation pour une autoconsommation des produits séchés avec souvent, un peu de vente. N'ayant pas les moyens de se procurer des séchoirs sophistiqués, la plupart des ménages au Niger s'adonne au séchage traditionnel sur des nattes ou des tissus. Une certaine quantité de ces produits est perdue suite à l'action du vent, notons aussi l'invasion des insectes et autres animaux.

➤ L'utilisation par un groupement [2] (de maraîchers ou de femmes)

Il s'agit ici, d'exploitants de champs en commun dont la production est souvent à moyenne échelle et destinée à la vente dans les marchés locaux. Ils exercent le séchage traditionnel mais font également recours aux séchoirs solaires à prix modérés et ne nécessitant pas un entretien particulier. Le séchage constitue une activité génératrice de revenus pour les utilisateurs qui n'ont d'ailleurs pas de qualifications pointues dans le domaine du séchage.

➤ L'utilisation par les Petites et Moyennes Entreprises (PME) [2]

Elles pratiquent le séchage à grande échelle (en très grandes quantités) pour une commercialisation dans les marchés locaux ou pour l'exportation. En effet, ces entreprises bénéficient d'aides financières ou techniques (séchoirs) venant des organisations non gouvernementales [2] qui font la promotion du séchage solaire. Elles emploient des individus ayant un niveau d'instruction élémentaire au minimum.

▪ **Les conditions climatiques**

On doit s'assurer que les conditions climatiques sont favorables pour le séchage des produits qu'on envisage. Tout système de séchage est étroitement lié au climat de la zone où il est implanté ; trois cas peuvent se présenter :

- Les pays (régions) arides où les températures sont élevées et l'air sec, cas du Niger ;
- Les régions où l'ensoleillement est important mais l'humidité élevée ;
- Les conditions climatiques défavorables pour le séchage solaire (période de récolte en saison pluvieuse par exemple).

Cependant il faut différencier les caractéristiques climatiques locales dominant le pays, des périodes d'abondance des produits (détaillées dans le Tableau 4). La saison sèche est celle qui offre des conditions optimales pour le séchage solaire mais certains produits (comme la mangue) arrivent à maturité juste en début d'hivernage d'où le besoin de choisir le type de séchoir le plus approprié.

Au Niger on distingue quatre zones climatiques [22] réparties en fonction des latitudes (Figure 17) : la zone saharienne au Nord, la zone sahélo-saharienne au centre, la zone sahélienne et celle sahélo-soudanienne au Sud.

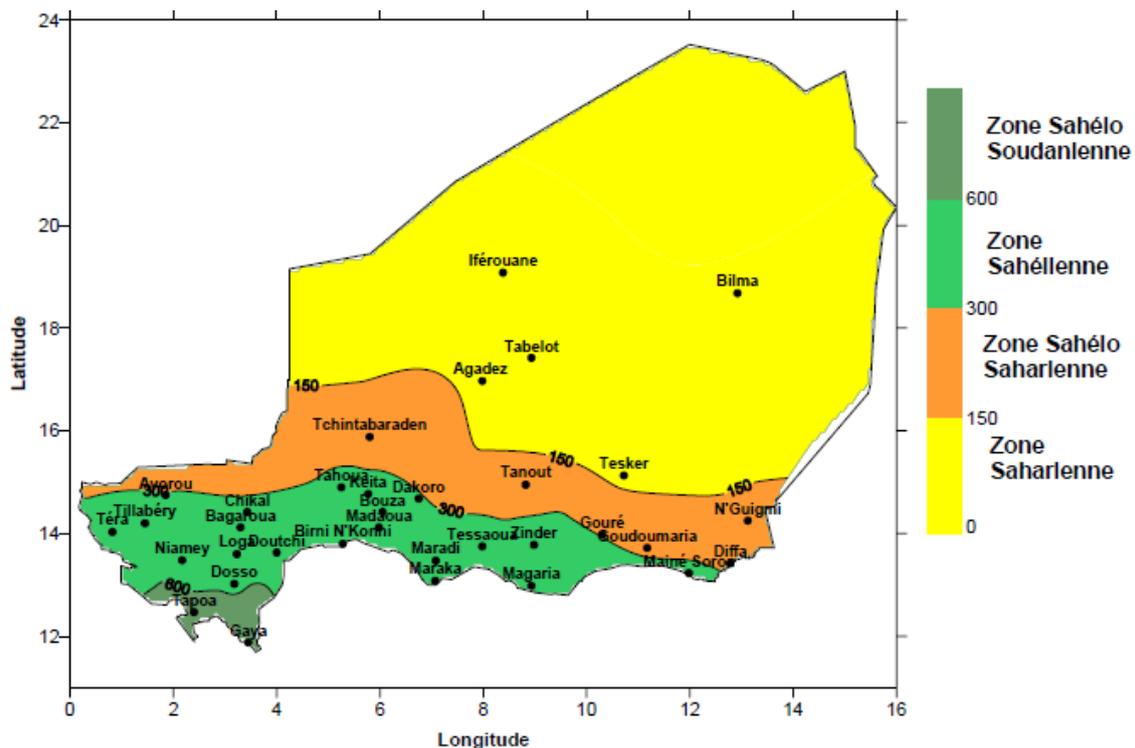


Figure 17: Zones climatiques du Niger [22]

- ❖ La zone saharienne: elle couvre 77% de la superficie du pays et reçoit en moyenne, moins de 150 mm de pluie par an. Elle est caractérisée par des températures moyennes très élevées pendant la saison chaude (40 à 46°C) et basses durant la saison froide (25 à 30°C). Dans cette zone, les séchoirs directs ne sont pas à conseiller pour le séchage des fruits et légumes puisque nous voulons des produits séchés ayant conservé leur goût et leur coloration (le rayonnement solaire direct est un obstacle à cela). Nous optons alors pour les séchoirs indirects sauf pour le séchage des farines à base de céréales. Plus on monte vers le Nord, plus le climat est désertique, sec et ensoleillé mais on y pratique des cultures irriguées (grenadines, raisin, pomme de terre, etc.).

- ❖ La zone sahélo-saharienne qui représente 12% du pays et reçoit 150 à 300 mm de pluie en moyenne par an, le climat est subdésertique. Cette zone est propice à l'élevage transhumant (où les troupeaux se déplacent à la recherche de pâturages plus verdoyants). Elle combine les caractéristiques de la zone saharienne et celle sahélienne, donc les séchoirs solaires indirects sont les plus adaptés.
- ❖ La zone sahélienne : elle s'étend sur 10% du territoire national et bénéficie en moyenne de 300 à 600 mm de pluies par an. Elle est favorable à l'agropastoralisme du fait de ses températures assez douces. En effet dans cette zone, la température moyenne annuelle est de 29,4°C. Là aussi nous choisirons les séchoirs solaires indirects à convection forcée, les séchoirs mixtes ou ceux hybrides. Les aliments pourront ainsi être séchés en des séances journalières uniques.
- ❖ La zone sahélo-soudanienne qui représente environ 1% de la superficie totale du pays et reçoit en moyenne 600 à 800 mm de pluie par an. Cette zone est propice à la production agricole et animale. Ici nous encouragerons l'usage des séchoirs hybrides d'une part pour éviter la condensation (possible à l'intérieur des séchoirs directs suite à l'humidité) et d'autre part, pour favoriser le séchage rapide des produits.

▪ **L'entretien exigé**

Certains séchoirs exigent beaucoup d'entretien et doivent être implantés loin de la portée des enfants. C'est le cas du premier séchoir solaire tunnel ATESTA (au Burkina Faso) initialement recouvert d'une couverture plastique transparente qui était déchirée par les enfants, elle était alors remplacée par de la tôle planquée [3]. Le séchoir C du CNES aussi est un exemple illustratif ; à sa conception, les capteurs solaires étaient couverts de vitre qui malheureusement, couvre juste quelques capteurs aujourd'hui. D'où l'intérêt de choisir des séchoirs dont on peut assurer l'entretien à long terme et surtout, des séchoirs conçus avec des matériaux locaux qui sont facilement accessibles et à des coûts relativement infimes.

▪ **La durée de vie du matériel**

Il est très important de trouver le juste compromis coût/performances du séchoir. Les utilisateurs doivent préférer les séchoirs solaires durables et résistants (même avec des coûts d'achat relativement élevés), aux séchoirs élémentaires qui sont souvent plus sensibles (comme les séchoirs directs) et ne donnent pas des produits séchés de qualité.

Concernant les paramètres permettant d'effectuer un choix sur les séchoirs, on doit souligner ceux donnés par le dimensionnement même du séchoir. Ce sont les éléments dont le calcul nous épargne l'achat (commande) d'un équipement trop petit ou trop grand pour le besoin. Il s'agit

de :

- **La taille du capteur**

Le capteur préchauffeur d'air est proportionnel à la nature du produit. Les produits à forte teneur en eau comme la tomate, exigent de l'air à une température assez élevée pour être séchés en un jour. Aussi, pour améliorer la performance des séchoirs solaires, on peut augmenter la taille du capteur thermique.

- **La capacité de la chambre de séchage**

Elle peut être faible ou importante selon le type de séchoir solaire et selon la quantité de produits séchés voulue comme ce fût détaillé ci-haut, dans le cas d'une utilisation domestique, pour un groupement ou une entreprise.

Notons enfin que ces paramètres dépendent aussi du capital disponible. En effet, même si les dimensions requises pour un séchoir sont trouvées et que le type est défini, il faut des moyens pour le financer. Certains utilisateurs de séchoirs solaires se trouvent contraints de prendre du crédit auprès des banques (pour se procurer du matériel) et se posent des questions sur comment rembourser cet argent jusqu'à rentabiliser leur activité. De plus, selon la technologie et le matériel utilisé, les prix des séchoirs solaires varient.

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1 CLASSIFICATION DES CONTEXTES ET AFFECTATION DU SECHOIR ADAPTE

IV.1.1 PROPOSITION DE SECHOIRS SELON LE CLIMAT DE LA REGION

Basé sur la répartition climatique de la Figure 17, le Tableau 6 donne une proposition des séchoirs solaires selon la région au Niger.

Tableau 6: Proposition de séchoirs solaires selon le climat

Région	Type de climat dominant [22]	Séchoirs solaires convenables
Agadez	Saharien	Séchoirs indirects à convection naturelle ou forcée
Diffa	Sahélo-saharien	Séchoirs indirects à convection forcée
Dosso, Maradi, Niamey, Tahoua, Tillabéry, Zinder	Sahélien	Séchoirs indirects à convection forcée ; Séchoirs mixtes ou hybrides

La priorité est donnée aux séchoirs indirects, le but étant de conserver la couleur et les vitamines des aliments à sécher. En effet, l'exposition directe aux rayons solaires dégrade l'aspect et le goût des produits comme les légumes "feuilles". Le choix s'est porté également sur la convection forcée parce que d'une part, la vitesse moyenne du vent au Niger n'est pas très élevée et dépend de la région ; d'autre part, la convection naturelle ne garantit pas un séchage effectif pendant une seule journée, or il y'a des denrées sensibles comme la viande et le poisson. Il est à préciser que cette affectation de séchoirs sera détaillée davantage en prenant en compte plusieurs critères.

IV.1.2 OUTIL D'AIDE A LA DECISION CONÇU

Le but est de faire un outil d'aide à traduire dans Excel.

Cet outil informatique proposé, donne le type de séchoir le mieux indiqué au séchage de produits bien définis selon des critères introduits comme données. Il est conçu de manière à être accessible à tous les utilisateurs, des familles aux PME, selon l'algorithmique implémenté dans Excel et présenté sur la Figure 18.

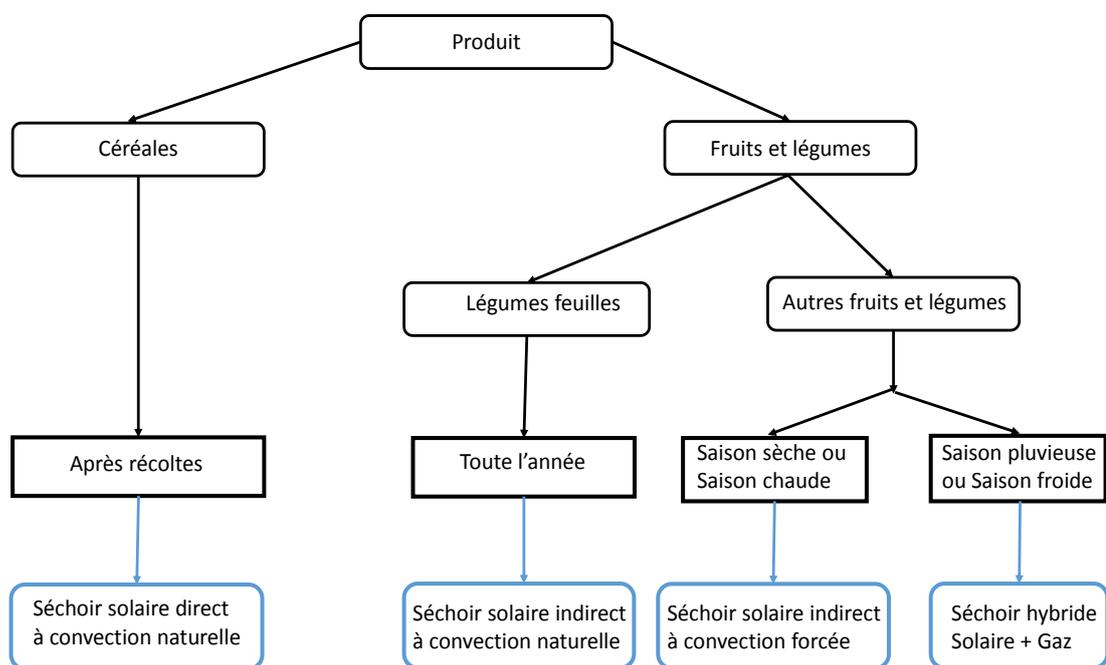


Figure 18: Algorithmique de l'outil d'aide à la décision

Présentation et fonctionnement de l'outil :

Les codes sont écrits sur Visual Basic avant d'être intégrés dans Microsoft Excel. Il comprend

les données d'entrée nommées "input" et le résultat ou "output" qui est le séchoir adapté au contexte défini en entrée. Les données sur les produits sont celles présentées dans les tableaux 2 et 4 concernant la catégorisation des produits et les moments propices de séchage correspondants; celles sur les séchoirs sont issues du tableau 5. Les catégories d'utilisateurs sont déjà détaillées dans la partie III.4.

Différents choix possibles en input :

- Produit : « fruits et légumes » ou « céréales »
- Sous-catégories de produits: « légumes feuilles », « autres fruits et légumes » ou « céréales »
- Catégories d'utilisateurs : « familles », « groupements » ou « PME »

En output nous avons :

- La période pendant laquelle le séchoir peut être utilisé : « saison sèche », « saison chaude », « saison pluvieuse », « saison froide», « après les récoltes : octobre à mai » ou « toute l'année»
- Le modèle de séchoir utilisable : « séchoir solaire direct à convection naturelle», « séchoir solaire indirect à convection naturelle », « séchoir solaire indirect à convection forcée » ou « séchoir hybride solaire et gaz ».
- Type (nom) du séchoir à conseiller : « TENTE ou CASE», « SERRE », « Coquillage », « tunnel ATESTA », « ICARO 2007 » ou « GEHO ».

L'appel à la macro (pour afficher le résultat) se fait par appui sur le bouton commande nommé "Choix du Séchoir" créé en Visual basic. La Figure 19 montre une simulation du programme pour un groupement désirant sécher des mangues pendant la saison pluvieuse (Juin à Septembre).

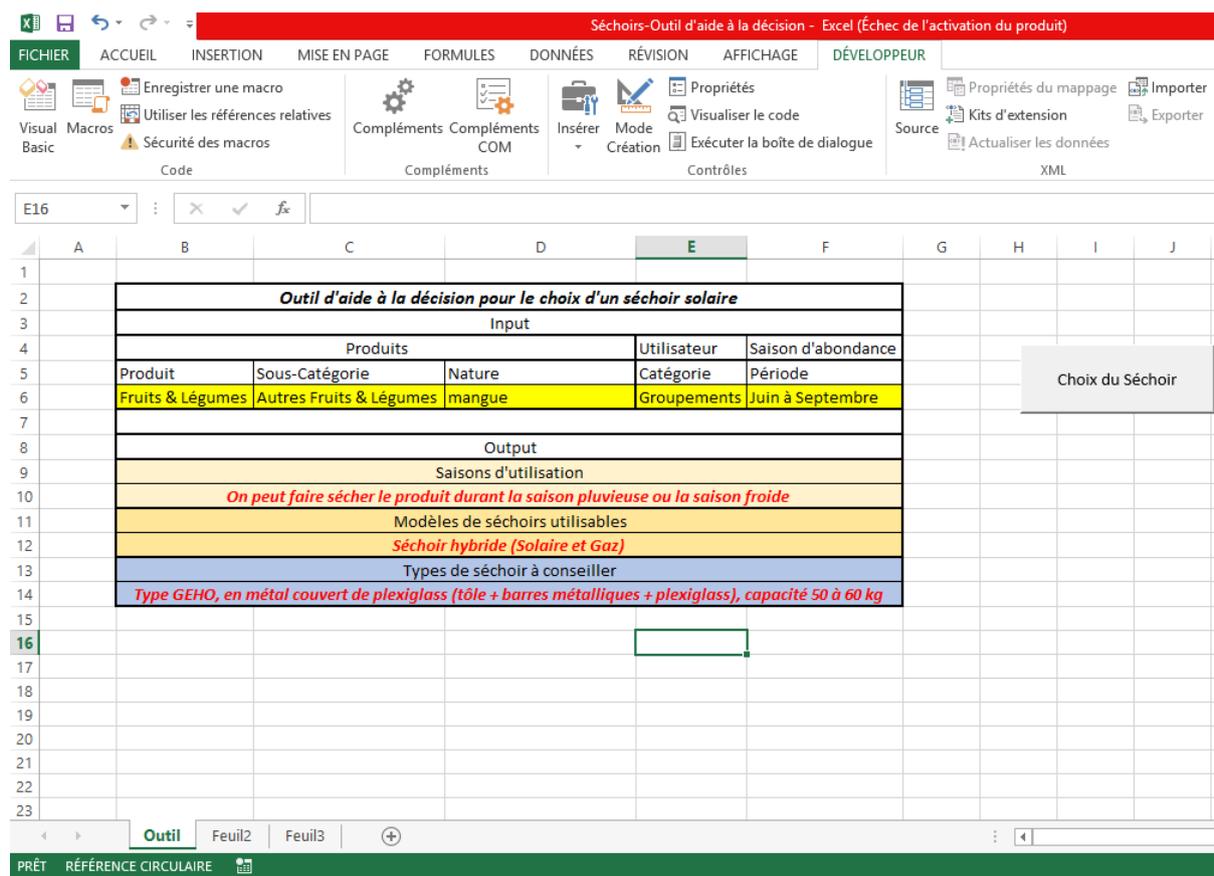


Figure 19: Vue de l'outil d'aide à la décision conçu sur Excel

IV.2. PROPOSITION DE PROTOCOLE DE CARACTERISATION DES SECHOIRS SOLAIRES

IV.2.1 OBJECTIFS DE LA CARACTERISATION D'UN SECHOIR SOLAIRE

Notre protocole de caractérisation concerne les séchoirs solaires indirects à convection naturelle pour les raisons suivantes :

- Le produit n'est pas exposé directement au rayonnement solaire ; il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C).
- Possibilité de construire ce type de séchoirs localement, avec un coût réduit par rapport à ceux importés.
- Son fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles sauf dans le cas où l'utilisateur désire lui-même augmenter les performances dudit séchoir selon la nature de son produit, la quantité, ou la saison concernée par le séchage.

L'objectif global de la caractérisation d'un séchoir est l'évaluation du comportement dudit séchoir dans le cas considéré (produit introduit, zone d'implantation, hybridation, etc.)

IV.2.2 ETAPES UTILISEES POUR LA CARACTERISATION D'UN SECHOIR SOLAIRE

1^{ère} étape : La caractérisation à vide

2nde étape : La caractérisation en charge

IV.2.3 EQUIPEMENTS NECESSAIRES

Les équipements indispensables pour effectuer la caractérisation d'un séchoir solaire sont les suivants :

- Des thermocouples pour mesurer la température de l'air ;
- Un enregistreur thermométrique jouant le rôle de centrale d'acquisition de données pour la sauvegarde des valeurs de la température et de l'ensoleillement [2] ;
- Un ordinateur pour la collecte des valeurs sous forme de fichiers de données ;
- Un pyranomètre pour mesurer l'ensoleillement global horizontal ;
- Un thermo-hygromètre pour la mesure de la température et de l'humidité relative de l'air ambiant ;
- Une balance numérique servant à peser le produit avec une certaine précision ;
- Des anémomètres à fils chauds (éventuellement) pour mesurer la vitesse de l'air ;
- Une étuve pour la détermination de la masse sèche du produit.

IV.2.4 PROTOCOLE

IV.2.4.1 LA CARACTERISATION A VIDE

IV.2.4.1.1 OBJECTIFS

La caractérisation à vide a pour objectif de caractériser expérimentalement la boîte de séchage avant d'y introduire le produit.

IV.2.4.1.2 MISE EN ŒUVRE

Il s'agit d'effectuer un test à vide avant l'introduction du produit dans le séchoir donc avant le chargement des claies. On enregistre néanmoins l'évolution du rayonnement global pendant chaque journée de test, celle des caractéristiques de l'air ambiant (température et humidité) et celle de la température au niveau des claies en plus de celle des températures de l'air à l'entrée de la chambre de séchage et à sa sortie.

IV.2.4.1.3 EXPLOITATION DES RESULTATS

- Les valeurs du rayonnement global peuvent indiquer le climat lors du séchage par rapport aux autres mois de l'année.

- A partir des températures sur les claies, on peut déterminer la catégorie de produits à sécher par le séchoir étudié en fonction des températures maximales de séchage admissibles.
- Au cas où la température à l'entrée du séchoir est insuffisante pour le produit envisagé, l'utilisation d'un appoint d'énergie s'avère donc nécessaire.

IV.2.4.2 LA CARACTERISATION EN CHARGE

IV.2.4.2.1 OBJECTIFS

Cette caractérisation est effectuée pour les raisons suivantes :

- Suivre l'évolution de la masse du produit jusqu'à stabilisation
- Déterminer la masse sèche du produit et établir la courbe de la teneur en eau en fonction du temps.

IV.2.4.2.2 MISE EN ŒUVRE

Tout d'abord, une série de prétraitements du produit est effectuée : triage, lavage, découpage (ou blanchiment selon le type de produit), etc. Ensuite le produit est disposé en couches minces sur les claies du séchoir et ce dernier est fermé. Le produit est pesé progressivement jusqu'à la fin du séchage.

IV.2.4.2.3 EXPLOITATION DES RESULTATS

- Les masses progressives étant connues, la perte d'eau au cours du séchage est nettement visible.
- La courbe de la teneur en eau du produit peut indiquer le niveau de séchage au cours du temps.

Proposition de protocole :

Dans le but de caractériser un séchoir solaire, nous proposons le protocole suivant :

1. Laver, découper (selon la nature) et peser le produit
2. Disposer les tranches en quantités égales sur les claies à introduire dans la chambre de séchage
3. Effectuer des mesures de l'ensoleillement, de l'humidité relative et de la température de l'air ambiant en plus de celles à l'entrée, à l'intérieur et à la sortie de la chambre de séchage. On pourra alors suivre progressivement l'évolution de la température de manière à ne pas dépasser la température maximale admissible par le produit.

4. Peser régulièrement le produit tout au long du séchage en déchargeant les claies très brièvement. Arrêter l'opération lorsque la masse pesée devient constante

5. Placer ensuite le produit dans une étuve afin d'obtenir la masse sèche et établir la courbe d'évolution de la teneur en eau

Conditions étuve :

- i. 105°C pendant 6 à 7h pour les légumes de type feuilles (AOAC, 1990)
- ii. 70°C pendant 24h (NF EN12145) ou 105°C pendant 24h (AOAC, 1990) pour les autres types de fruits et légumes

6. Recueillir les données enregistrées et les traduire en courbes avant d'interpréter

7. Calculer le taux de séchage et le rendement du séchoir avant de conclure sur le séchoir étudié.

V. CONCLUSION- PERSPECTIVES

Il ressort de notre étude que l'outil d'aide à la décision conçu est assez pratique et permettra une meilleure utilisation des séchoirs solaires. Cependant, il faut sensibiliser les différents acteurs sur l'importance du séchage solaire qui demeure la meilleure alternative pour les pays à fort ensoleillement comme le Niger.

Avec le protocole de caractérisation proposé, les séchoirs solaires présents au CNES pourront servir au suivi de la cinétique de séchage du produit introduit ; des conclusions peuvent alors être obtenues sur les différentes phases de séchage.

Nos principales recommandations sont les suivantes :

- Approfondir l'outil d'aide à la décision en intégrant les teneurs en eau initiales et finales des produits à sécher (après avoir réalisé des expériences) et les prix des différents séchoirs ;
- Poursuivre les recherches sur les éléments caractéristiques d'un séchoir solaire dans le but d'avoir de meilleurs résultats (en chiffres illustratifs) sur la caractérisation ;

Au CNES, nous préconisons de se munir de plus d'équipements pour caractériser ses séchoirs. Ces derniers peuvent être des étuves pour déterminer les masses sèches des produits, des anémomètres pour mesurer la vitesse du vent à l'entrée des séchoirs et des outils pour avoir l'humidité des produits. Nous leur conseillons également de disposer d'une balance à proximité du lieu de séchage pour que le produit ne prenne pas de l'humidité lors des pesées régulières tout au long du séchage.

VII. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Cri de Cigogne (CDC), «Potentiel énergétique du Niger,» 12 Novembre 2009. [En ligne]. Available: <https://www.cridecigogne.org/content/potentiel-energetique-du-niger>. [Accès le 15 Juillet 2018].
- [2] CISSE, *Etude technico-économique du séchoir ICARO*, Niamey, 2017.
- [3] N. e. al., *Rapport de l'étude de marché du solaire thermique: production d'eau chaude et de séchage de produits agricoles*, Ouagadougou: SOLtrain Afrique de l'Ouest, 2015.
- [4] B. Nadine, *Fiche sur les différents types de séchoirs solaires à convection naturelle et forcée*, République Fédérale d'Allemagne, 2004.
- [5] MAROUZE, *Equipements pour le séchage du fonio*, 2008.
- [6] SENA, «espace agro,» SENA, 1 Mars 2016. [En ligne]. Available: https://www.espaceagro.com/materiels-machines/sechoir-solaire-pour-legume-fr_i229373/html. [Accès le 19 Septembre 2018].
- [7] LO, *Amélioration du séchage solaire des légumes*, Dakar, 2013.
- [8] BOROZE, *Outil d'aide à la conception de séchoirs pour les produits agricoles tropicaux*, Lomé, 2011.
- [9] Le Club de Techno, *Procédures et Protocoles*, Gironde (Créon): Sciences & Technologie, 2018.
- [10] K. e. al., *Etude expérimentale du séchage convectif de la sauge dans un séchoir solaire muni d'un appoint électrique*, Marrakech, 2000, pp. 33 - 38.
- [11] Touati, *Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte (Mentha viridis)*, Lyon, 2008.
- [12] B. Saleh, *Modelling and experimental studies on a domestic solar dryer*, Philadelphie, 2009, pp. 2239 - 2245.
- [13] D. e. al., *Modelling and experimental validation of thin layer indirect solar drying of mango slices*, Ouagadougou, 2009, pp. 1000 - 1008.
- [14] R. e. al., *Simulation of vanilla drying process in an indirect solar dryer prototype using CFD fluent program*, Cancun, 2014, pp. 1651-1658.
- [15] S. e. al., *Evaluation of solar dryer / air heater performance and the accuracy of the result*,

Varanasi, 2014, pp. 2360 - 2369.

- [16] M. e. al., *Design and analysis of solar dryer for mid-latitude region*, Ashikaga, Japan, 2016, pp. 98 - 110.
- [17] M. e. al., *Drying characteristics and kinetics solar drying of Moroccan Rosemary leaves*, Marrakesh, 2017.
- [18] Amrouche, «genie-alimentaire.com,» SPIP, 15 Août 2010. [En ligne]. Available: <http://genie-alimentaire.com/spip.php?article17>. [Accès le 20 Octobre 2018].
- [19] B. e. al., *Composition nutritionnelle des feuilles de Moringa oleifera*, p. 4.
- [20] Drabo, *Contribution à l'étude: de la qualité des fruits et légumes séchés par trois types de séchoirs solaires domestiques, des possibilités d'augmenter le rythme de séchage du séchoir coquillage.*, Ouagadougou, 1994.
- [21] Conservation et Développement Durable (CDD), «Données climatiques,» [En ligne]. Available: <http://www.consdev.org/consdev/niger/DECOUVERTENIGER/DONNECLIM/donneclim.html>. [Accès le 15 Octobre 2018].
- [22] Conseil National de l'Environnement pour un Développement Durable (CNEDD), *Programme d'action national pour l'adaptation aux changements climatiques*, Niamey, 2006.
- [23] Leroutard, «Guide du routard,» [En ligne]. Available: https://www.routard.com/guide/niger/2948/climat_et_meteo.htm. [Accès le 15 Octobre 2018].
- [24] Association Nigérienne de Promotion de l'Irrigation Privée (ANPIP), *Manuel technique de l'irrigant prive*, Niamey, 2008.

VIII. ANNEXES

Sommaire des annexes :

ANNEXE 1: Illustrations de quelques appareils réalisés au CNES.....	42
ANNEXE 2 : Liste de quelques installations de séchoirs solaires au Burkina Faso [3]	43

ANNEXE 1: Illustrations de quelques appareils réalisés au CNES



A : Vue des installations de chauffe-eaux; B : usine de fabrication de chauffe-eau



Eau distillée conditionnée en bidon et distillateurs



A : Vue de la cuisinière solaire papillon ; B : Cuisinière solaire parabolôïde

ANNEXE 2 : Liste de quelques installations de séchoirs solaires au Burkina Faso [3]

Localisation	Type de séchoir	Origine	Nombre
Institutions publiques et assimilées			151
Ministère de la promotion de la femme et du genre (Ouagadougou)	ATESTA	A.S. Boniface Willy	75
Ministère de la promotion de la femme et du genre (Banfora)	ATESTA	A.S. Saidou Porgo	65
Commissariat centrale de Ouagadougou (Ouagadougou)	ATESTA	A.S. Boniface Willy	10
FAO	Coquillage	A.S. Saidou Porgo	1
PME et assimilées			114
Centre multimedia de l'ex-secteur 30 (près du SIAO, Ouagadougou)	Banco	A.S. Saidou Porgo	1
Association Planète Jeune (Ouagadougou)	Banco	A.S. Saidou Porgo	1
Une association à Boromo	ATESTA	A.S. Saidou Porgo	1
Association Lafiabougou à Bobo	ATESTA	A.S. Saidou Porgo	1
Association féminine à Tampouy (vers la gare de Larlé, Ouagadougou)	ATESTA	A.S. Saidou Porgo	1
Association ODE à la Zone du Bois (Ouagadougou)	ATESTA	A.S. Saidou Porgo	3
Association ATESTA (Ouagadougou)	ATESTA	A.S. Boniface Willy	12
Association CDS	ATESTA	A.S. Boniface Willy	12
OCADES Fada	ATESTA	A.S. Boniface Willy	4
OCADES Manga	ATESTA	A.S. Boniface Willy	10
ONG CREDO	ATESTA	A.S. Boniface Willy	4
Société SOCOGRI DE M. Isso RWAMBA	Coquillage	A.S. Boniface Willy	16
Société SOCOGRI DE M. Isso RWAMBA	ATESTA	A.S. Boniface Willy	6
Alimentation SOCOMOUF	ATESTA	A.S. Boniface Willy	2
Petit séminaire de Pabré	Banco	A.S. Saidou Porgo	1
Faso Délices (Dassasgo, Ouagadougou)	Coquillage	Association Lohrom	28
Groupement féminin à Bobo-Dioulasso (transformation de chenilles)	Mixte	Association Lohrom	12
Particuliers			6
Mme Bebemba (Ouagadougou)	ATESTA	A.S. Saidou Porgo	1
Une femme à Tanghin (Ouagadougou)	ATESTA	A.S. Saidou Porgo	4
Mme Barry	ATESTA	A.S. Boniface Willy	1
TOTAL			271