

# MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

PRESENTE PAR :

*DALLO Ibrahim*

ANNEE 1994-1995

-----

SECHAGE AVEC DESHUMIDIFICATION  
PREALABLE DE L'AIR :  
APPLICATION A LA MANGUE

Mention :

E. I. E. R.
Enregistré à l'Arrivée le 03 JUIN 1995, N° 249/95

*Encadrement*

Y. COULIBALY



**A**  
**MON CHER**  
**AMI**  
**LE REGRETTE**  
**MONSIEUR BATHIONO BELI MIKHAEL**



# SOMMAIRE

REMERCIEMENT	
RESUME.....	1
I. - INTRODUCTION.....	2
II. - GENERALITES SUR LE SECHAGE SOLAIRE.....	5
II.1. - Le séchage solaire.....	5
II.2. - But du séchage.....	6
II.3. - Description du séchage.....	6
II.4. - Classification des séchoirs solaires.....	7
II.5. - Etude comparative des différentes types de séchoirs solaires.....	9
III. - Présentation du CEAS et Annexes.....	10
III.1. - Présentation du CEAS.....	10
III.2. - Les objectifs du CEAS.....	11
IV. - Séchage de la mangue.....	12
IV.1. - Le séchage des mangues au Burkina Faso... 12	
IV.2. - Etudes des caractéristiques des systèmes existants et leurs inconvénients.....	12
V. - Conception et réalisation du séchoir.....	17
V.1. - Définition.....	17
V.2. - Principe.....	18
V.3. - Conception et réalisation.....	19
V.4. - L'air humide.....	20
V.5. - Appareil de mesure.....	21
V.6. - Préparation du produit.....	24
VI. - Les Expérimentations.....	26
VI.1. - Essai 1.....	29
VI.2. - Essai 2.....	30
VI.3. - Essai 3.....	50
VI.4. - Essai 4.....	55
VII. - Etude Economique.....	65
VII.1. - Etude de rentabilité du séchoir à déshumidification.....	65
VII.2. - Etude de rentabilité du séchoir mixte... 68	
VIII. - Insuffisance et recommandations.....	72
IX - Proposition d'amélioration.....	74
X. - <u>Conclusion</u> .....	75
Sigles.....	77
Annexes.....	78
Bibliographie.....	79

## REMERCIEMENT

Je remercie très sincèrement tous ceux qui ont permis le bon déroulement de ce mémoire et en particulier :

- Monsieur Y. COULIBALY pour son encadrement, les moyens matériel mis à ma disposition, de son appui technique et sa bonne humeur.
- Monsieur Y. KOCHER, Directeur du CEAS pour ses conseils son encadrement et sa disponibilité.

Toute l'équipe CEAS-ATESTA en particulier Monsieur P. GUISSOU.

A tout le corps enseignant de l'E.I.E.R.

- Toute l'équipe KOALBA en particulier Monsieur et Madame OUEDRAOGO.

En fin à tous mes collaborateurs de travail

## **RESUME**

Cette étude a été proposée par l'ONG CEAS-ATESTA à Ouagadougou au Burkina Faso. Elle a pour but de faire une étude prospective d'un nouveau type de séchoir basé sur la déshumidification préalable de l'air destiné au séchage des produits.

Pour ce faire, différents essais ont été réalisés sur le séchoir. Ils ont permis de diagnostiquer, d'interpréter les résultats obtenus, afin d'améliorer l'efficacité, la rentabilité du séchoir.

Une étude technico-économique permettra aussi de proposer des solutions afin d'améliorer ses performances techniques et financières.

L'ensemble de cette étude doit mener à la définition, à la conception et à la réalisation d'un nouveau type de séchoir à moindre coût, pour mieux valoriser les produits séchés.

**Mots clés** : Séchage, mangues, produits alimentaires, ONG, déshumidification, conditionnement, ou humide.

## **I. - INTRODUCTION**

Le séchage est un moyen longtemps utilisé pour conserver les produits alimentaires ou leur donner de nouvelles qualités organoleptiques. C'est pour cette raison que plusieurs ONG ont initié cette activité dans beaucoup de pays par l'intermédiaire de groupement de séchage solaire. Les problèmes rencontrés par ces groupements se résument surtout à la maintenance, au suivi, à la rentabilité et à la formation des agents. Les études qui seront faites pour la recherche de solution a ces problèmes seront réalisées en deux phases :

- Une première phase qui consiste à faire des enquêtes auprès des ONG de fabrications et de diffusion de séchoirs pour recueillir des informations ;
- Une deuxième phase d'expérimentation sur le séchoir a deshumidification.

L'ensemble de ses études doit permettre d'améliorer les efficacités, rentabilités des différents types de séchoirs. Une étude technico-économique pourra permettre de proposer des solutions judicieuses pour améliorer les séchoirs.

Dans le soucis d'aider les groupements villageois à disposer de moyen matériel plus performant, efficace et rentable que l'ONG ATESTA a proposé un sujet qui s'intitule "séchage avec déshumidification préalable de l'air" : "Application à la mangue". Il sera question d'une étude technico-économique de ce procédé de séchage avec une comparaison avec les systèmes éprouvés et utilisés par l'ONG.

Le présent rapport sera constitué de quatre parties :

- Une première partie sur les généralités des séchoirs solaires ;

- Une deuxième partie sur les études réalisées :  
expérimentation et interprétation ;
- Une troisième partie sur les recommandations et les  
insuffisances.
- et enfin une conclusion.



## DEFINITION ET FORMULATION DU SUJET

Après avoir attentivement lu le sujet qui nous a été proposé à savoir : "séchage solaire avec déshumidification préalable de l'air" ; nous avons compris qu'il était question pour nous de faire une étude sur un séchoir à déshumidification sans rayonnement solaire. Après mûr réflexion, nous nous sommes rendus compte qu'il s'agissait d'un séchoir avec déshumidification préalable de l'air. Ce que nous appelons simplement séchoir à déshumidification.

## II. - GENERALITES SUR LE SECHAGE

### II.1. - Le séchage solaire

Le séchage constitue une opération appliquée depuis la plus haute antiquité à une très grande variété de matériaux et de cas. On distingue :

- le séchage des produits alimentaires, qui est surtout pratiqué en tant que méthode de conservation de certaines denrées. De nombreux fruits et légumes, le poisson, la viande, se prêtent à ce traitement et les produits obtenus peuvent alors se conserver plusieurs mois, ce qui permet leur transport et leur commercialisation, ou même d'assurer la "soudure" entre deux récoltes annuelles.
- le séchage des matériaux, en tant que méthode préparatoire, est appliqué à grande échelle à certains produits : bois, minerais (phosphates par exemple), produits d'argile et céramiques.

Un peu à la frontière de ces deux cas, le séchage de grandes catégories des produits agricoles, comme les céréales, le cacao, le café, etc, apparaît à la fois comme un processus de préparation industrielle et un moyen indispensable d'assurer des conditions correctes d'enlissage et de stockage des produits. Le stockage des grains incorrectement séchés, conduit invariablement à des pertes au cours du stockage, dont les conséquences peuvent devenir catastrophiques lorsqu'il s'agit d'un denrée alimentaire de base à récolte annuelle.

## II.2. - But du séchage

Le but du séchage est d'éliminer la teneur en eau d'un produit de façon à l'amener en dessous d'une certaine valeur, permettant ainsi sa conservation sans aucune autre précaution. L'élimination d'eau par séchage se fait par voie thermique.

Cette opération est divisée en quatre parties :

- transfert de chaleur de la source de chaleur vers la surface du produit ;
- transfert de la chaleur de la surface du produit vers le coeur du produit ;
- transfert de masse du produit vers la surface du produit ;
- transfert de masse de la surface du produit vers le milieu extérieur.

## III.3. - Description du séchage

### III.3.1. - Principe :

Pour sécher un produit, il faut un apport d'énergie et une circulation d'air pour entrainer la vapeur d'eau issue du produit. L'eau des produits existe sous plusieurs formes définie par un nombre additionnel appelé activité de l'eau

$$a_w = \frac{P_S}{P}$$

où

$P_S$  = pression de vapeur d'eau d'une substance (Pa)

$P$  = pression de vapeur d'eau pure à la même température  
 $\theta$ (Pa)

Le point de conservation optimale des produits biologiques, sans additifs de conservation ni réfrigération se situe généralement entre  $a_w = 0,25$  et  $a_w = 0,35$

### III.3.2. - Température du séchage

La température du produit a intérêt à être la plus élevée possible pour obtenir une vitesse de séchage importante. Cependant, la température du produit doit être inférieure à une certaine valeur pour éviter sa détérioration.

## II.4. - Classification des séchoirs solaires

Les séchoirs, selon la façon dont ils utilisent l'énergie solaire peuvent être classés en cinq grandes catégories : les séchoirs naturels, les séchoirs solaires directs, les séchoirs solaires indirects, les séchoirs mixtes et les séchoirs hybrides.

### II.4.1. - Les séchoirs naturels

Ce sont les séchoirs traditionnels qui consistent en l'étalage à l'air libre (et au soleil) des produits à sécher sur des nattes, des claies, des toitures ou autres.

### II.4.2. - Les séchoirs solaires directs

Ce sont des appareils constitués d'un châssis vitré, sous lequel les produits à sécher sont installés sur des clayettes. Les rayons solaires frappent donc directement le produit et le tirage de l'air se fait naturellement par réchauffement ou par action du vent sur les ouvertures.

#### II.4.3. - Les séchoirs indirects

Dans ce type de séchoirs, les produits ne sont pas directement exposés au rayonnement solaire. Ils sont entreposés à l'intérieur d'une enceinte où le déplacement de l'air se fait mécaniquement (séchoirs à convection forcée ou convection naturelle).

#### II.4.4. - Les séchoirs mixtes

Ce type de séchoirs utilise simultanément de l'air préchauffé dans des capteurs et le rayonnement solaire frappant directement le produit.

#### II.4.5. - Les séchoirs hybrides

En plus de l'énergie solaire, une énergie d'appoint (fuel, bois, électricité biogaz etc..) est utilisé pour élever le niveau de chauffage de l'air ou pour assurer la ventilation.

II.5. - Etude comparative des différents types de séchoirs solaires

	Avantages	Inconvénients
Séchoir naturel	<p>Très faible coût</p> <p>Très facile à utiliser</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>produits non protégés contre les intempéries atmosphériques et les insectes</li> <li>pertes de produits mal séchés</li> <li>destruction des vitamines A et C</li> <li>l'aspect des produits changé (ils jaunissent)</li> <li>séchage moins rapide que le séchage direct</li> </ul>
Séchoir direct	<p>produits protégés contre les intempéries atmosphériques et les insectes.</p> <p>Amélioration des échanges grâce à l'effet de . séchage rapide</p> <p>Très invariable et construction assez simple</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>coût relativement cher. Destruction de la vitamine C par photooxydation des produits</li> <li>l'aspect des produits change. Destruction de la vitamine A</li> <li>température élevée en fin de séchage</li> </ul>
Séchoir indirect	<p>produits protégés des intempéries atmosphériques et des insectes</p> <p>protection contre les rayons U.V. venant du soleil</p> <p>les produits conservent leur couleur naturelle</p> <p>température des produits limitée</p>	<p>cher par rapport au séchoir naturel</p> <p>Fabrication complexe séchage souvent un peu moins rapide que le séchage direct</p>
Séchoir mixte	<p>séchoir rapide produits protégés contre toute source de contamination</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transfert de chaleur et d'eau complexe et mal connu</li> <li>les inconvénients sont les mêmes que ceux des séchoirs directs</li> <li>cher par rapport aux séchoirs directs et naturels</li> </ul>
Séchoir hybride	<p>la qualité et le débit des produits sont indépendants des conditions climatiques</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Très coûteux</li> <li>fabrication complexe</li> </ul>

### **III. - PRESENTATION DU CEAS ET ANNEXES**

#### III.1. - Présentation du CEAS

Le Centre Ecologique Albert Schweitzer (CEAS) est constitué en 1978 sous la forme d'une fondation à Neuchâtel par François Gerbes pasteur Maurice Lack, architecte du nouvel hôpital Albert Schweitzer à l'initiative de Willy Raudin, directeur fondateur de "Nouvelle Planète" organisation dont la périodique l'Avenir est entre vos mains informe sur les activités du CEAS.

Le siège du CEAS est à Neuchâtel (Suisse) ; il assure l'organisation et l'administration de l'ensemble des activités. Le bureau pour le sahel est à Ouagadougou Burkina Faso, il assure le relais du CEAS avec le terrain ; gestion et suivi des projets, relation avec les partenaires et identification de leurs besoins, accueil et formation des stagiaires, expérimentation des nouvelles techniques et des prototypes, supervision des trois services d'ATESTA.

L'Atelier d'Energie Solaire et de Technologies appropriées du CEAS à Ouagadougou Burkina Faso depuis 1980, sert d'exemple pour la création ou l'amélioration d'autres ateliers. Il développe et améliore les produits actuels et futurs destinés à préserver le milieu sahélien (eau chaude, cuisson, séchage et lumière solaires, exhaure de l'eau, protection des cultures). ATESTA organise la formation et le perfectionnement des artisans intéressés à créer ou améliorer leur atelier de technologies appropriées. Cette formation est technique et/ou gestion.

III.2. - Les objectifs du CEAS sont :

court terme :

- lutter contre la famine en contribuant à l'extension et à l'amélioration des jardins maraichers irrigués, moins dépendants des pluies que les grandes cultures ; et en assurant toutes les récoltes par le compost.

à moyen terme :

- utilisation de l'énergie solaire et des autres énergies renouvelables en remplacement des combustibles traditionnels (bois) ou importés (hydrocarbures) ;
- Fabrication locale d'équipement à usage villageois et agricole (pompe manuelles, machines à grillage, séchoirs et chauffe-eau solaires) ;
- Vulgarisation de techniques agro-écologiques (compost au lieu des engrais chimiques, lutte anti-érosive, reboisement).

à long terme :

- lutter contre la désertification en encourageant la sauvegarde et la restauration du couvert végétal et de la fertilité de sols. Promouvoir un développement en faveur de l'être humain et en harmonie avec son environnement.

Pour réaliser ses objectifs, avec l'appui du CEAS les artisans spécialisés mettent en place leurs ateliers ; les groupements de paysans ou paysannes organisent leur programmes de cultures et de protection des récoltes.



## **IV. - SECHAGE DE LA MANGUE**

### **IV.1. - Le séchage des mangues au Burkina Faso**

Le Burkina Faso est un grand producteur de mangues. Les estimations pour l'année 1993 dépassent 15 000 tonnes. Les 3/4 des mangues proviennent des régions Ouest et Sud-Ouest du pays. La plupart des mangues sont consommées dans le pays, environ 20 % sont exportées vers les pays voisins (Niger, Cote d'Ivoire). Plus de 1000 tonnes sont exportées vers l'Europe.

Cette situation est regrettable et même dramatique dans un pays comme le Burkina Faso dont la balance commerciale est très déficitaire.

Le séchage permet donc de valoriser une production excédentaire et par là dévaloriser l'arbre, élément clé de l'écosystème sahelien très fragile. Il permet de redresser la balance commerciale par l'entrée de devises étrangères, et enfin de consommer des mangues pendant une période de l'année plus étendue.

### **IV.2. - Etude des caractéristiques des systèmes existants et leurs inconvénients**

Les enquêtes effectuées auprès des concepteurs ont permis de recueillir des informations sur les séchoirs solaires.

#### **IV.2.1. - Les séchoirs solaires**

Au Burkina Faso, il y a plusieurs ONG d'exploitation d'énergie solaire parmi lesquels nous avons celles qui s'occupent de la conception et de la diffusion des séchoirs solaires qui sont : l'I.B.E., l'ABAC, l'ATESTA.

IV.1.1.1. - Au niveau de l'IBE

C'est au centre de recherche sur les Energies renouvelables. Elle est située à Kossodo dans la zone industrielle. Il y a plusieurs types de séchoirs solaires parmi lesquels :

Le séchoir tente est utilisé par le groupement de séchage de Banfora (SOCABE) et les problèmes rencontrés par les femmes sont :

- obstruction partielle ou totale de couvertures inférieures et supérieures donnant une mauvaise aération ;
- augmentation de la température dans le séchoir par effet de cuisson et altération de la qualité du produit.

C'est un séchoir solaire direct à convection naturelle assurée par les deux ouvertures. Toutes les faces sont en film plastique transparent traité contre les rayons ultra-violet (U.V.) à l'exception du plancher en film plastique noir. Les claies sont en grillage du type moustiquaire. La charpente est en bois blanc (le bois rouge se déforme sur l'effet de l'humidité). ce séchoir n'est pas adapté a une petite production (surtout en fruits et légumes) car des manipulations trop fréquentes le détruisent vite (polythylène). Une pris au vent assez important entraine un rendement amoindri.

Il est facilement endommageable par les animaux, et facilement sali à l'intérieur. Le contrôle de la température pour le séchage du poisson est difficile. Le coût est assez élevé.

## IV.1.1.2. - ABAC-GERES

C'est une ONG de fabrication et de diffusion de technologies adaptées, notamment de séchoirs solaires, située au 1200 logements. Le type de séchoirs disponibles actuellement est le séchoir du type coquillage qui existe sous trois modèles différents : petit, moyen, grand. C'est un séchoir solaire indirect à convection naturelle assurée par des trous d'aération supérieurs et inférieurs. Le séchoir est réalisé en tôle peint en noir (utilisé l'effet du corps noir), c'est un séchoir sans orientation préférentielle. Les claies sont en grillage du type moustiquaire et sont au nombre de trois dont deux claies principales et une claie de finition.

Il est utilisé par les paysans pour auto-consommation et petite commercialisation. Après la conception, les séchoirs sont destinés aux utilisateurs et les groupements de séchage solaire.

Les inconvénients sont surtout la petitesse de la surface de séchage et de sa capacité.

## Avantages :

Le séchoir est résistant et se construit assez facilement, il sert de garde-manger lors des périodes de séchage, il n'est pas nécessaire de l'ouvrir pendant le séchage. Le coût est relativement modéré.

## IV.1.1.3. - ATESTA

Il existe plusieurs types de séchoirs

- séchoirs solaires simples
- séchoirs à gaz
- et des séchoirs mixtes

Ils sont des séchoirs à convection naturelle assurée par des ouvertures inférieures et latérales (caisson) et les ouvertures latérales (tunnel).

**Séchoir tunnel :** Il est constitué par une couverture en film plastique transparent et l'ossature est en tôle plate norcie. Les portes (3) sont disposées sur les côtés principaux pour assurer les chargements des produits et les travaux. Les claies (9) sont en nylon tissé sur lequel est disposé du grillage plastique.

**Séchoir caisson :** Il est aussi constitué en film plastique transparent, incliné de 12° environ (pour tenir compte tenu de la latitude du lieu). Le caisson est en bois peint en noir. Les claies (4) sont de même type que celles du séchoir tunnel.

**Séchoir mixte solaire-gaz**

Il est constitué d'une colonne de séchage en maçonnerie raccordé a un capteur pouvant servir de séchoir solaire a rayonnement. Le séchoir mixte peut fonctionner toute l'année, ce qui est intéressant pour une entreprise. Il utilise au mieux l'énergie solaire. Son fonctionnement est indépendant les conditions climatiques avec une qualité du produit exportable vers l'europe. Le séchoir mixte est un outil conçu pour des entreprises, celles-ci doivent être gerées comme tel car le coût des intrants énergétiques notamment oblige l'entrepreneur à une certaine rigueur pour maitriser ces charges de production.

### Avantages

- réalisables en matériaux locaux
- faible coût de fabrication et d'entretien
- régulation séchage à deux niveaux : entrée d'air, brûleur, température, utilisation combinée ou exclusive du soleil et du gaz consomme un peu moins du gaz.

Utilisation pour une vaste gamme de produits végétaux (fruits et légume), qualité des produits satisfaisantes : pas de poussière, ni d'insectes rongeurs, qualité exportable.

### Facteurs défavorable

Consomme du gaz qui n'est pas disponible partout et qui augmente le coût du séchage. Permutation des claies pour homogénéiser le séchage, gaz de CO<sub>2</sub> dangereux pour l'organisme.

#### IV.1.2. - Quelques proposition de solution

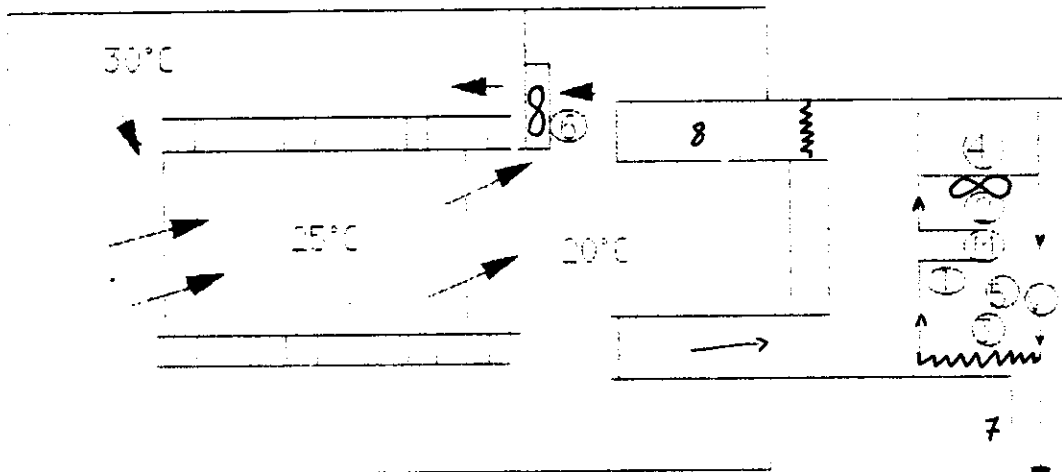
Les séchoirs doivent être améliorés par les organismes constructeurs en faisant un suivi, une maintenance et une formation des utilisateurs. Parmi les séchoirs, le plus rentable est le séchoir mixte. Il a été amélioré mais c'est compte tenu de certains inconvénients (brûlure, noircissement etc) constatés par les utilisateurs, que l'ONG ATESTA a proposé l'étude d'un prototype de séchoir à déshumidification pour essayer d'améliorer les rendements, l'efficacité et la rentabilité. Il est prévu une étude technico économique comparée au séchoir mixte pour avoir une idée sur la rentabilité et la performance.

## V. - CONCEPTION ET REALISATION DU SECHOIR

### V.I. - Définition

Le séchage par déshumidification se fait dans une cellule thermiquement isolée et étanche. L'élément actif est constitué par un appareil de déshumidification qui, suivant le cas, est soit à l'intérieur, soit à l'extérieur de cette cellule. (voir schéma).

Schéma de principe d'un séchoir à bois par deshumidification de l'air.



### DESCRIPTION DU SCHEMA

- 1- Compresseur du fluide frigorigène
- 2- Ventilateur de circulation d'air à l'intérieur de l'appareil de déshumidification
- 3- Evaporateur (élément froid de l'appareil): refroidissement de l'air chaud et humide et condensation de l'eau qu'il contient
- 4- Condensateur (élément chaud de l'appareil): refroidissement de l'air chaud et sec
- 5- Détendeur du fluide frigorigène
- 6- Ventilateur de reprise et de circulation d'air dans la cellule de séchage
- 7- Ecoulement de l'eau extraite
- 8- Résistance électrique au chauffage utilisée si nécessaire

L'appareil comprend :

- Un groupe frigorifique, constitué par un compresseur de fluide réfrigérant ;
- Un évaporateur, élément froid, qui refroidit l'air chaud et humide après un passage sur la mangue, et provoque la condensation de l'eau de cet air ;
- Un condenseur qui rechauffe l'air refroidi et asséché après son passage sur l'évaporateur ;
- un détendeur du fluide réfrigérant ;
- Un écoulement de l'eau extraite de l'air au niveau de l'évaporateur ;
- Un ventilateur ;
- Une résistance pour chauffer l'air si nécessaire.

La déshumidification a toujours lieu lorsque l'air entre en contact avec une batterie sèche ou humide dont la température superficielle est inférieure au point de rosée de l'air. Chaque fois qu'il y a des humidification, il y a refroidissement.

## V.2. - Principe

Le principe de séchage est le suivant :

L'air est d'abord refroidi jusqu'à la saturation (point de rosée) par un système de climatisation. Les conduisats qui se forment ont évacués, puis on chauffe, cet air devient sec à l'entrée de la chambre de stockage. L'air sec traverse les claies ou sont stockées les mangues. A la

sortie de la chambre de stockage nous obtenons un air chaud chargé de vapeur d'eau. A la traversée de la batterie froide, l'air se refroidi la vapeur d'eau se condense et les condensats sont séparés de l'air et son évacués vers l'extérieur.

Le procédé peut être fait en circuit fermé, semi fermé c'est à dire avec un rejet partiel de l'air cyclé ou en circuit ouvert.

### V.3. - Conception et Réalisation

Le séchoir a été conçu dans les ateliers d'ATESTA. Il est fabriqué en bois (contre-plaqué) et peint en blanc. Il est divisé en deux compartiments comportant chacun 13 claies. Les caractéristiques de la chambre de stockage sont :

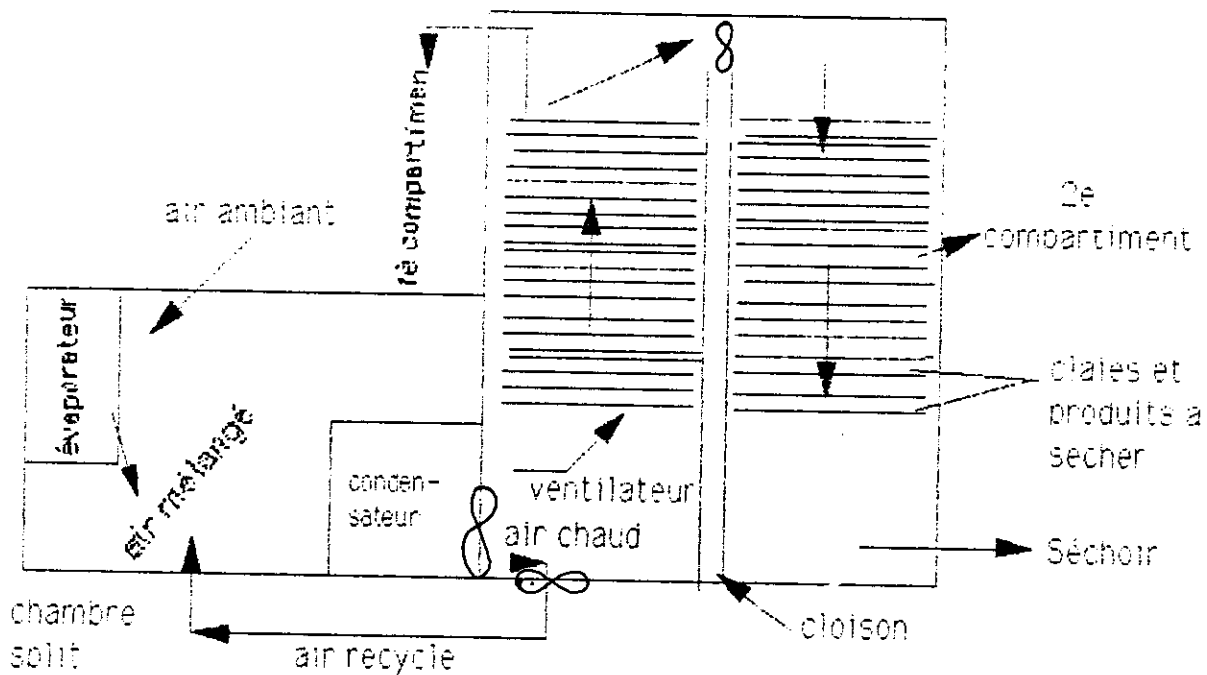
longueur = 1,5 m  
largeur = 1,35 m  
hauteur = 2,80 m

Il faut noter que nous ne sommes pas acteur dans la conception et la réalisation du prototype de séchoir. Par ailleurs, nous avons conçu une chambre pour le split. Après les études préliminaires, nous avons étudié les formes à donner aux différentes pièces pour favoriser une bonne stabilité de l'appareil et un bon agencement des pièces en contact. Toute la structure porteuse est en bois, il s'avère nécessaire pour minimiser les risques d'erreur, de tracer avec précision les plans et de les suivre. Il ne reste plus que les travaux de menuiserie pour fabriquer la structure porteuse.

Nous allons faire schématiquement un dispositif de principe du séchoir : voir le schéma qui suit. Les structures porteuse ne changent pas mais a chaque essai, on modifie le retour de l'air chaud. Pour plus d'informations voir les schémas de principe des différents essais.



## Schéma de principe du séchoir à deshumification



Avant d'attaquer les études et les interprétations des résultats nous allons essayer de définir quelques notions théoriques et pratiques indispensables.

#### V.4. - L'air humide

Il est constitué par l'air sec et de la vapeur d'eau (en suspension, puisque qu'il s'agit d'un mélange).

Les principaux paramètres de l'air humide sont :

- Humidité absolue (ou teneur absolue en vapeur d'eau) : elle se définit comme étant la masse des vapeurs d'eau contenues dans une unité de masse ou de volume d'air sec ;

- Humidité relative : Elle est définie par le rapport de la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air  $P_v$  à la pression de saturation de la vapeur de l'air saturé à la même température sèche.

$$\theta = \frac{P_r(t)}{P_s(t)}$$

- Teneur de l'air en humidité : la teneur en humidité de l'air est une grandeur usuelle qui est utilisée dans la théorie et dans la pratique. Elle est définie par le rapport :

de la masse de la vapeur d'eau qui est contenue dans l'air à la masse de l'air sec

$$x = \frac{m_v}{m_s}$$

A ces paramètres principaux, il faudra ajouter d'autres :

- l'enthalpie spécifique : c'est le rapport de l'air humide à celle de la masse d'air sec qui s'y trouve contenue.

$$h(x + 1) = h_a + x h_v \quad \frac{\text{KJ}}{(1 + x) \text{ kg}}$$

- enthalpie de la vapeur d'eau

$$h_v = r + C_{p_v} t \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

- enthalpie de l'air humide

$$\begin{aligned} h(1 + x) &= C_{p_a} t + x(C_{p_v} t + r) \\ &= 1,006 t + 1,86 x.t + 2500 x \frac{\text{KJ}}{(1 + x) \text{ kg}} \end{aligned}$$

avec  $C_{p_a} = 1,006 \frac{\text{KJ}}{\text{KgK}}$  : chaleur massique de l'air (-50 à 50° C)

$C_{p_v} = 1,86 \frac{\text{KJ}}{\text{KgK}}$  : chaleur massique de la vapeur d'eau (-50 à 50° C)

$r = 2500 \frac{\text{KJ}}{\text{KgK}}$  : chaleur massique de l'eau à 0°C

Toutes ces grandeurs sont lues sur le diagramme de l'air humide.

#### - Diagramme de l'air humide

En assimilant l'air a un gaz parfait, ce qui est une bonne approximation pour le domaine de température dans lequel on travaille en séchage solaire, on obtient cinq relations avec sept variables pour caractériser l'air humide.

Il nous reste pour cela deux variables indépendantes pour caractériser l'air. L'idée de la construction du diagramme de l'air humide est qu'à partir des mesures faites sur deux grandeurs, on déduit les cinq autres grandeurs sur des abaques.

#### V.5. Appareils de mesure

Pour obtenir des informations sur les caractéristiques de la mangue, il faut des outils qui permettent de quantifier les grandeurs.

- a) Températures : On mesure la température à l'aide d'un thermomètres. Les mesures sont faites aux endroits suivants :

- à la paroi froide de l'évaporateur, pour déterminer la température ;
- sur les ailettes du condenseur
- à la sortie du condenseur pour avoir la température de l'air chaud soufflé.

b) Humidité : Il existe plusieurs moyens pour mesurer l'humidité de l'air. Ces appareils s'appellent des hygromètres. Les mesures sont faits :

- à la sortie de chaque compartiment.

On effectue aussi d'autres mesures qui sont : l'humidité et la température de l'air ambiant, l'humidité et la température de l'air mélangé ;

c) Vitesse : On mesure la vitesse de l'air au moyen d'un anémomètre numérique.

En faisant le tour des splits de l'EIER nous avons pu estimer la vitesse moyenne à l'aide d'un anémomètre à environ 4,2 m/s. Connaissant la section, on peut déterminer le débit d'air.

d) Pouvoir évaporatoire de l'air

Le pouvoir évaporatoire de l'air est la capacité à absorber de l'humidité. Plus il est important, plus le séchage des produits est rapide. Il dépend donc de la différence entre l'humidité absolue de l'air et l'humidité absolue de l'air à saturation.

Cela dépend donc de :

- la différence entre l'humidité relative de l'air et l'humidité relative à la saturation, plus cette différence est élevée, plus le pouvoir évaporatoire est élevé ;
- la température de l'air : plus elle est élevée, plus le pouvoir évaporatoire est important ;
- la pression du système : plus la pression est faible, plus le pouvoir évaporatoire est élevé.

e) Tracé sur le diagramme de l'air humide

Toutes les valeurs obtenues sont des valeurs moyennes. Cela s'explique par le fait que les mesures effectuées n'étaient pas très fiables dues aux erreurs et imperfections des appareils de mesures.

Le diagramme permet de caractériser l'air et l'eau qu'il contient. Il met en relation la température, l'humidité absolue et relative de l'air et l'enthalpie pour une pression atmosphérique standard. Toutes ces variables tracées sur le diagramme permettent d'interpréter nos expériences faites sur le séchage.

V.6. - Préparation du produit

a) Conduite du séchage

C'est un ensemble d'opérations à exécuter rigoureusement lors du séchage pour assurer la fiabilité des résultats obtenus. Ces opérations permettent de suivre le séchage

et sont menées avant, pendant et après le séchage. Elles débutent par le choix des produits et finissent avec la conservation des produits séchés. Ces opérations sont :

- choix du produit,
- préparation du produit,
- suivi du séchage,
- conservation des produits séchés.

b) Choix du produit : cas de la mangue

Le choix du produit est très déterminant dans la qualité du produit séché car il conditionne le goût et la couleur. Pour le cas de la mangue, il faut choisir celles qui sont bien mûres (pas trop mûres ni moins mûres). Les mangues cueillies directement de l'arbre sont conseillées. Dans le cas contraire, il faut faire un choix qui tient compte de la durée de conservation du produit avant le séchage. Ce qui nécessite quelques fois un local pour conserver les produits frais.

c) Préparation du produit : cas de la mangue :

Après le choix de la mangue, il faut procéder au lavage et au nettoyage du produit. ensuite viennent l'épluchage de la mangue et le découpage de la pulpe en tranches de 7 à 8 mm d'épaisseur. Par la suite, on fait l'étalage de produit sur des claies. Enfin pour lutter contre les contaminations par les insectes, des larves, les bactéries et le noircissement du produit, on fait un prétraitement au soufre  $SO_2$  et au métabisulfite.

d) Suivi du séchage

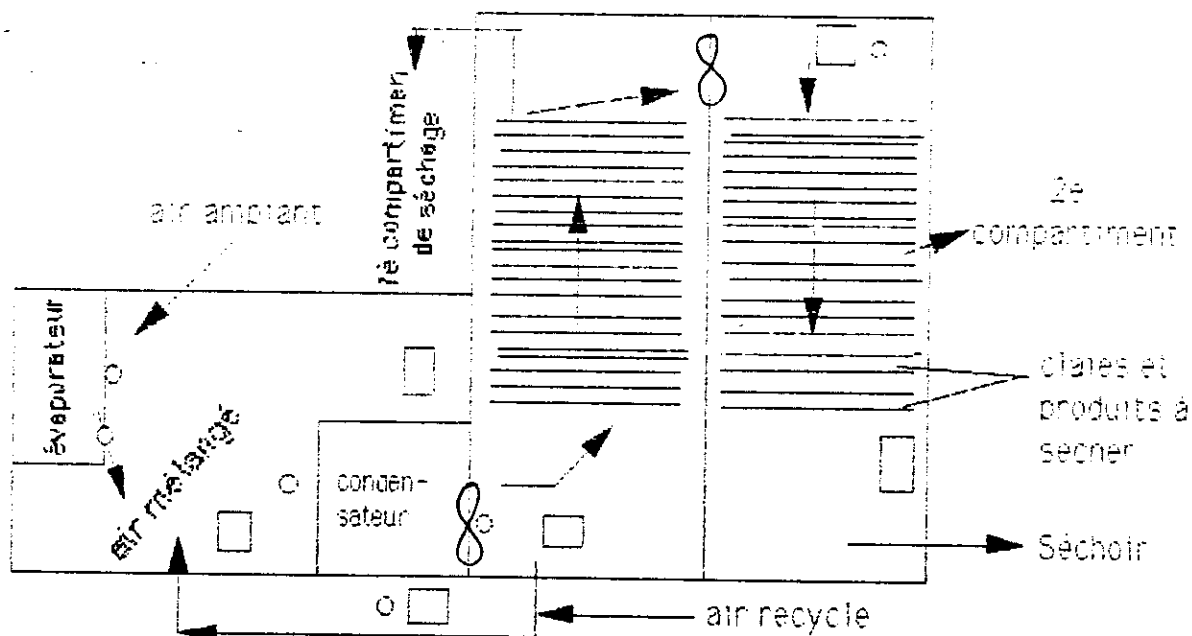
Cette opération consiste à vérifier de temps en temps la température dans le séchoir et la température maximale admissible pour le produit  $T_m$ , la température sèche et humide de l'air ambiant et à la sortie du séchoir. Ces mesures permettront

de vérifier le degré d'humidité relative de l'air ambiant et à la sortie du séchoir. La mesure de poids du produit permet de connaître le rapport de séchage et comparer avec le rapport de séchage conseillé (cf. fiche produit document, GRET-GERES : le séchage solaire des produits alimentaires).

## VI. - LES EXPÉRIMENTATIONS

Les essais se sont déroulés à ATESTA, nous avons mis dans le séchoir des feuilles de journaux mouillés pour tester la vitesse et le temps de séchage.

Le schéma qui suit donne l'emplacement des thermocouples et des thermohygromètres.



○ thermocouples

□ thermohygromètres

Figures n° 1 : Schéma d'emplacement des thermocouples et hygromètre.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau n° 1

Heure	text	Hext	tm	H2	T condenseur		entrée séchoir		Sortie séchoir		eau (e)
					aillettes	sortie	t	H2	t	H2	
9H50	36	43 %	38	28	55	47	47	25 %	36	54	22/8

Tableau n° 1 : Valeurs moyennes obtenues lors du séchage des feuilles de journaux.

Sur le diagramme de l'air humide fig. 2, l'air extérieur se condense jusqu'à la saturation. A la sortie de l'évaporateur, la paroi froide se trouve à 15°C. Le mélange d'air obtenu est 38°C, HR = 28 %. A la sortie du séchoir, l'humidité a augmenté tandis que la température a chuté à 36°C.

Le séchage est presque isenthalpique. La teneur en eaux éliminée s'élève environ à 0,004 g/KgAs et la variation d'enthalpie sera de 9,5 KJ/KgAs.

Il est plutôt facile d'amener l'air extérieur à la courbe de saturation que l'air sortie des produits (dépenses de frigorifiques). Avec la suite des essais, nous proposons qu'il faut utiliser l'air extérieur ou faire un recyclage d'air.



DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE  
 - 10 - 55 °C  
 Altitude 0

Fig 2

