

# SOMMAIRE

---

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

GLOSSAIRE

LISTES DES FIGURES

LISTES DES TABLEAUX

NOTATION

INTRODUCTION

RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE I. Généralités sur les aliments

I.1. Intérêts nutritionnels de fruits et légumes sur la santé :

I.2. Facteurs de l'altération des fruits et légumes :

I.3. Fruit et légumes à Madagascar :

CHAPITRE II. Notions de séchage

II.1. Historique de séchage :

II.2. Définition et objectif :

II.3. Les enjeux du séchage :

CHAPITRE III. Séchage de produit agricole

III.1. Caractéristiques de solide humide :

III.2. Caractéristiques de l'air de séchage :

III.3. L'eau et les aliments :

III.4. Cinétique de séchage :

III.5. Mode de séchage :

III.6. Mode de transfert :

III.7. Prétraitement avant le séchage :

III.8. Qualité du produit séché :

CHAPITRE IV. Type des séchoirs

IV.1. Séchoirs solaires directs :

IV.2. Les séchoirs solaires indirects :

IV.3. Les séchoirs hybrides

IV.4. Séchoirs mixtes:

CONCLUSION GENERALE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

TABLE DES MATIERES

# GLOSSAIRE

---

Texture : Ensemble des propriétés de rhéologie et de structure d'un produit alimentaire perceptible par les mécanorécepteurs usuels et auditifs

Air humide : Mélange d'air sec et eau (sous forme de vapeur)

Teneur critique : Teneur en eau entre la période de séchage à vitesse constante et la période de séchage ralenti.

## LISTES DES FIGURES

---

Figure 1 : Schéma de répartition de l'eau dans le produit humide

Figure 2 : Schéma de répartition de l'eau dans le produit humide

Figure 3 : Schéma de l'activité de l'eau

Figure 4 : Schéma de dégradation de produit en fonction de l'activité de l'eau

Figure 5 : Allure d'isotherme de désorption

Figure 6 : Courbe caractéristique de séchage

Figure 7 : La boîte de séchage ou séchoir coffre

Figure 8 : séchoir solaire intégral

Figure 9 : Séchoir solaire coquillage

Figure 10 : Le séchoir cabane

Figure 11 : Séchoir solaire indirect

Figure 12 : Séchoir solaire armoire

Figure 13 : Séchoir solaire hybride à convection forcée

Figure 14 : Séchoir solaire hybride solaire-gaz

Figure 15 : Séchoir mixte Type1

Figure 16 : Séchoir mixte Type 2

# LISTES DES TABLEAUX

---

Tableau 1 : Production de quelques fruits à Madagascar

Tableau 2 : Production de quelques légumes à Madagascar

Tableau 3 : Différents types de modèle empirique de l'isotherme de sorption :

## NOTATION

---

$A_w$  : Activité de l'eau

$X (kg)$  : Humidité absolue du Produit

$M_h(kg)$  : Masse du liquide des produits

$M_s(kg)$  : Masse sèche des produits

$X_r(\%)$  : Humidité relative des produits

$H_a(kg\ eau/kg\ air\ sec)$  : Humidité absolue de l'air

$m_v(kg)$  : Masse de vapeur d'eau

$m_{as}(kg)$  : Masse d'air sèche

$H_r(\%)$  : Humidité relative de l'air

$P_v(Pa)$  : Pression partielle de vapeur d'eau

$P_s(Pa)$  : Pression de saturation

$T (K)$  : Température

$D$ (%)	: Degré de saturation
$T_r(K)$	: Température de rosé
$P_{vp}(Pa)$	: Pression de vapeur à la surface du corps humide
$P_{rs}(Pa)$	: Pression de vapeur saturante de l'air
$n_s$	: Taux d'humidité des produits à sécher

# INTRODUCTION

---

Les fruits et les légumes sont les principes denrées alimentaires qui fournissent aux être humains les lipides, glucides, fibres ainsi que vitamine, minéraux, antioxydants... Mais la production des nombreuses denrées alimentaires périssables est saisonnière.

Madagascar, grâce à ses potentialités agro-climatiques, cultive la plupart des espèces fruitières et légumières. La récolte des fruits et légumes est une activité saisonnière et sont denrées son très périssables. Ils sont en surplus pendant la saison de la récolte et non disponible le restant de l'année.

Pour réussir la transformation et la conservation des produits frais, les méthodes qui se prêtent le mieux à ces opérations sont la dessiccation, la conservation chimique et le traitement thermique. Parmi les méthodes physiques de préservation et de conservation des denrées alimentaires, il y'a le séchage qui est une technique utilisée depuis l'antiquité. Le séchage est un des plus anciens moyens de conservation avec la fermentation.

Dans ce travail de recherche, nous allons étudier la technique de séchage de produit agricole.

Ce travail comporte quatre chapitres. Dans le premier chapitre, on va voir l'importance de fruits et légumes sur la santé humaine, ensuite, dans la second chapitre, nous allons découvrir les notions sur le séchage, puis dans le troisième chapitre, les séchages des produits agricoles et enfin dans le dernier chapitre, nous entamons les différents types des séchoir.

# RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES

---

## CHAPITRE I. Généralités sur les aliments

Les fruits et les légumes sont constitués parmi les groupes d'aliments végétaux dont la distinction est essentiellement d'ordre gastronomique. Du point de vue botanique, les fruits sont les structures de la plante qui, au stade de la maturité, contiennent des graines. Les légumes quant à eux, constituent plusieurs types de structure végétale dont plusieurs sont botaniquement des fruits. Les fruits et légumes sont riches en eau et leur teneur en constituant chimique varient considérablement au cours de la croissance, de la maturité et de l'entreposage. On estime généralement que le caractère commun aux fruits est : la richesse en sucre, l'acidité relativement élevée, le parfum prononcé et le fait qu'ils sont souvent consommés crus.

### **I.1. Intérêts nutritionnels de fruits et légumes sur la santé : [1,2]**

Les fruits et les légumes sont des aliments caractérisés par leur faible apport calorique (du fait de leur richesse en eau et leur faible teneur en lipides) et leur forte teneur en fibre, vitamine, minéraux, et micro constituant divers.

Les teneurs de tous ces composés varient en fonction de nombreux paramètres tels que la variété ou le stade physiologique de végétal, le climat, la pratique culturelle.

#### Les glucides :

Les glucides regroupent certaines substances naturelles qui ont une saveur sucrée. Ils sont aussi appelés hydrate de carbone en raison de leur formule  $C_n(H_2O)_n$ , sucre ou encore saccharides.

#### Les caroténoïdes :

Les caroténoïdes constituent le groupe le plus répandu parmi tous les pigments naturels et sont responsables des couleurs appétissantes de nombreux fruits et légumes.



Les caroténoïdes possèdent des propriétés anti-oxydantes et anti radicalaire qui réduisent le risque de cancer, de maladie cardiovasculaires, cataracte, maladie du système nerveux.

### Vitamines C:

L'acide ascorbique (vitamine C) est une vitamine hydrosoluble. Elle prend la forme d'un cristal ou d'une poudre blanche ou légèrement jaune avec un goût légèrement acide. La vitamine C est relativement stable à l'air sec et très sensible en oxydation en solution aqueuse, surtout en présence d'alcalin, de cuivre et de fer.

Plusieurs vertus est attribué à la vitamine C : du risque cardiovasculaires, diminution de l'athérogènes en s'opposant au stress oxydent, résistance à l'infection bactérienne et virale.

### Anti-oxydants :

L'organisme est pourvu de plusieurs moyens de défense dont la molécule anti-oxydant de faible poids moléculaire. Ces molécules réductrices consomment directement les radicolibres formés au cour de réaction d'oxydoréduction. Un déséquilibre entre la production excessive des molécules oxydante et/ou une diminution du taux d'antioxydants dans l'organisme est définie par le terme de stress oxydant.

## **I.2. Facteurs de l'altération des fruits et légumes : [3]**

On entend par détérioration des aliments ou pourrissement tout modification qui leur fait perdre la qualité désirée et les rends impropre à la consommation. Dès que le fruit et légumes sont séparés de leur source naturelle de substances nutritive, leur qualité se met à diminuer. Cela est dû a processus naturelle qui démarre dès que le cycle biologique est suspendu par la récolte. Le produit agricole n'est ensuite consommable que pendant quelques jours à quelques semaines. Il commence alors à se détériorer.

Il y a 3 types de facteur de dégradation de fruits et légumes :

- Facteur biologique
- Facteur physique
- Facteur enzymatique

*Facteur biologique :*

Les denrées périssables se dégradent sous l'action d'animaux tels que les insectes, les rongeurs et les germes microbiens. Sans traitement préalable et étant donné ses divers constituants, les fruits et légumes constituent un milieu idéal pour les microorganismes surtout les levures et les moisissures et la majorité pénètre par les tissus abîmés. Les facteurs qui influencent la croissance des microorganismes dans les fruits et légumes sont : le pH, la température, l'activité de l'eau ( $A_w$ ) et le potentiel d'oxydo-réduction.

*Facteur physique :*

La détérioration physique est provoquée par exemple par la déshydratation. Le vieillissement physiologique se produit dès que le cycle biologique est interrompu par la récolte. Ces deux processus sont inévitables mais on peut les retarder en stockant les produits agricoles dans un lieu sec et à l'abri des courants d'air, à une température la plus basse.

*Facteur enzymatique :*

Tous les aliments contiennent des enzymes naturelles qui décomposent les protéines, les lipides, et les glucides de manière à faciliter la croissance de l'animal ou de la plante.

Une fois que le plante à été récolté, ces enzymes, si elles ne sont pas sous contrôle, commencent à travailler et détériorent les aliments.

### **I.3. Fruit et légumes à Madagascar [4,5]**

#### **Production de quelques fruits et légumes à Madagascar :**

Madagascar est un pays très riche en ressources naturelles importants et dispose d'une immense variété de climat qui favorise la culture d'une vaste gamme des produits agricoles à valeur élevée et potentiellement exportable. Plus de 80% de la population malagasy vivent en milieu rural et dépendant de l'agriculture, de l'élevage et de la pêche.

La production de quelques fruits et légumes à Madagascar est représentée sur le tableau ci-dessous :

**Tableau 1 : Production de quelques fruits à Madagascar (en tonnes)**

<b>FRUIT</b>	<b>PRODUCTION</b>
Abricot	1200
Melon charentais	100
Pêche	7500
Poire	1600
Pomme	6500
Prune	1800
Raisin	10400

**Tableau 2 : Production de quelques légumes à Madagascar (en tonnes)**

<b>LÉGUMES</b>	<b>PRODUCTION</b>
Carotte	5200
Choux	1300
Choux fleur	620
Concombre	950
Haricot vert	2100
Oignon	5800
Petit pois	580
Tomate	22000

*(Source : stat agri)*

## CHAPITRE II. Notions de séchage

### II.1. Historique de séchage : [4,6]

Le séchage des récoltes, fruits et légumes, a été pratiqué partout dans le monde pendant des siècles.

Traditionnellement, la pratique de séchage se mettait à exposer directement aux radiations solaires des graines, des feuilles, des fruits sur une surface dure et horizontale pendant quelques jours. Ils les protégeaient de la pluie, des rongeurs et des insectes. Puis ils les déposaient sous un abri le soir afin d'éviter qu'elle se réhydrate au contact du rosé. Ils utilisent les repères tactiles pour connaître si le produit a atteint un bon niveau de déshydratation et il entrepose finalement les denrées dans différents types de contenant et des greniers.

### II.2. Définition et objectif : [7,8]

Le séchage est une opération unitaire la plus utilisée dans l'industrie. C'est l'application de la chaleur dans des conditions contrôlées pour enlever la majorité de l'eau dans l'aliment par évaporation. Dans le cas pratique, le séchage des produits agricoles présente beaucoup d'avantages. Il permet d'augmenter la durée de conservation des produits. La masse et le volume de produit diminuent ce qui facilite le transport et le stockage.

Dans l'industrie, le séchage est aussi couramment utilisé comme :

- Séchage de matériaux de construction : bois, brique, céramique, carreaux de plâtre
- Séchage du papier, la fabrication passant par une étape de pulpe humide
- Séchage produits chimiques solides, obtenus par des réactions en milieu liquide, par précipitations, cristallisation

- Séchage boues d'épuration et de sous produits de traitement de l'eau
- Séchage textile, lavage, teinture
- Mise en forme de poudre, granulation

### **II.3. Les enjeux du séchage : [4,9]**

#### *Technique de séchage traditionnel :*

La pratique de technique de séchage traditionnel consiste à étaler le produit sur le sol, sur le natte, ou en le disposent sur des claies donc, il n'y a pas besoin d'outillage ou d'équipements très chères, le coût de production est assez faible car l'énergie utilisé est gratuite.

Mais les inconvénients sont aussi nombreux. La forte dépendance vis à vis des conditions climatiques, faible qualité nutritionnelle, microbiologique et organoleptiques du produit séché. L'insécurité de produit séché contre les insectes, rongeurs, et autres nuisibles. Cette technique de séchage nécessite beaucoup plus de temps.

#### *Technique de séchage moderne :*

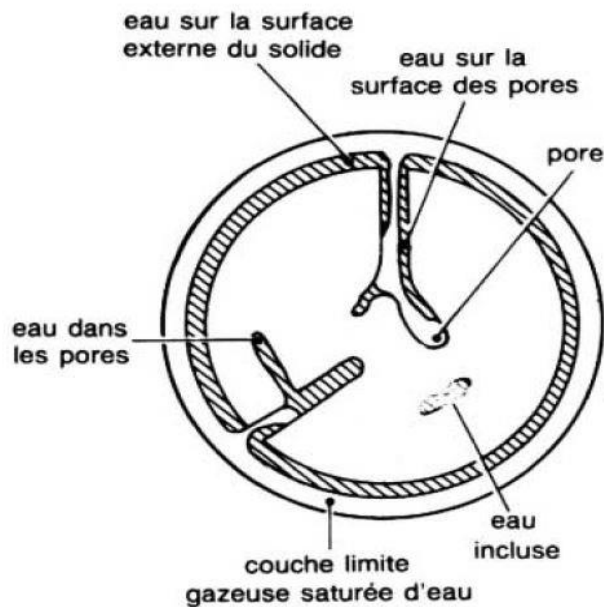
La production à grande échelle limite l'utilisation de séchage normale en plein air. Beaucoup des scientifiques ont étudié la modélisation de séchoir pour permettre d'appliquer le séchage dans le domaine industriel. En effet, ce séchoir permet d'éviter les inconvénients influencés par les poussières, les rongeurs, les insectes. Elle peut aussi gagner beaucoup plus de temps par rapport au technique traditionnel, par contre, elle ne change rien à la qualité de produits aromatiques et les éléments nutritifs des produits séchés.

Malheureusement, le coût de la conception de séchoir est très élevé.

## CHAPITRE III. Séchage de produit agricole

### III.1. Caractéristiques de solide humide : [10,11,12]

Description de solide humide :



**Figure 1 : Schéma de répartition de l'eau dans le produit humide**

(Source : [20])

Le solide a un film d'eau adhérent à sa surface externe par des forces superficielles. Une couche limite à la périphérie du solide est constituée par de l'air saturé en eau, c'est-à-dire que l'air contient de la vapeur d'eau, une pression partielle égale à la tension de vapeur d'une eau qui serait seule présente dans une enceinte, à la même température. L'eau peut aussi se retrouver localisée à la surface ou au fond des pores : les forces qui la retiennent sont alors beaucoup plus fortes et ont trait à des phénomènes complexes de capillarité. Plus les pores sont de petites tailles, plus ces forces sont intenses.

### Humidité absolue :

Humidité absolue d'un solide appelé aussi teneur en eau à base sèche, ou plus simplement humidité s'exprimer par la masse de liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse sèche.

$$X = \frac{M_h - M_s}{M_s}$$

où  $M_h$  : masse du liquide du produit

$M_s$  : masse sèche du produit

### Humidité relative :

Humidité relative appelé aussi teneur en eau à base humide s'exprime par la masse du liquide contenu dans le produit par rapport à sa masse humide.

$$X_r = \frac{M_h - M_s}{M_h}$$

Où  $M_h$  : masse du liquide du produit

$M_s$  : masse sèche du produits

### Hygroscopicité :

Un solide est dit hygroscopique quand l'eau qu'il contient est en équilibre avec un air dont la pression partielle en eau est inférieure à la tension de vapeur maximale pour la température considérée. L'humidité relative de cet air est alors inférieure à 1. Ce comportement est du principalement aux forces liées à la capillarité qui ont tendance "à retenir l'eau en phase liquide.



### III.2. Caractéristiques de l'air de séchage : [10,11,12]

#### Humidité absolue :

On appelle humidité absolue ou spécifique, noté  $H_a$  la masse du vapeur d'eau contenue dans l'air par Kg d'air sec.

$$H_a = \frac{m_v}{m_{as}}$$

Où  $m_v$  et  $m_{as}$  sont les masses respectives de vapeur d'eau et d'air sec contenues dans un même volume  $v$  d'air humide.

#### Humidité relative :

L'humidité relative ou degré hygrométrique est le rapport de la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air et la pression de saturation  $P_s$  de cette vapeur d'eau à la température  $T$ .

$$H_R = \frac{P_v}{P_s(T)} \times 100$$

#### Degré de saturation :

Le degré de saturation est le rapport d'humidité absolue de l'air à l'humidité absolue de l'air saturé à la même température.

$$D = \frac{H_a}{H_{as}}$$

#### Température de rosée :

Dans un mélange de gaz et de vapeur, la pression de saturation de la vapeur est constante si la température ne varie pas. Quand on refroidit ce mélange sous pression totale constante, la pression partielle de la vapeur demeure inchangée mais par contre, la tension maximale  $P_s$  de la vapeur diminue, tant que cette tension maximale  $P_s$  est supérieure à la pression partielle  $P_v$  de la vapeur dans le mélange, la vapeur reste sèche et l'humidité (absolue) du gaz reste constante. Pour une certaine température  $T_r$ , la tension

maximale  $P_s$  devient égale à la pression partielle  $P_v$ . La vapeur devient saturante et les premières traces de phase condensée (liquide généralement) apparaissent à cette température  $T_r$  : on donne le nom de point de rosé. À la température  $T_r$  on a donc  $H_r = 1$ , un refroidissement au-dessous de  $T_r$  provoque une condensation de la vapeur (brouillard) et par la suite une diminution de l'humidité du gaz.

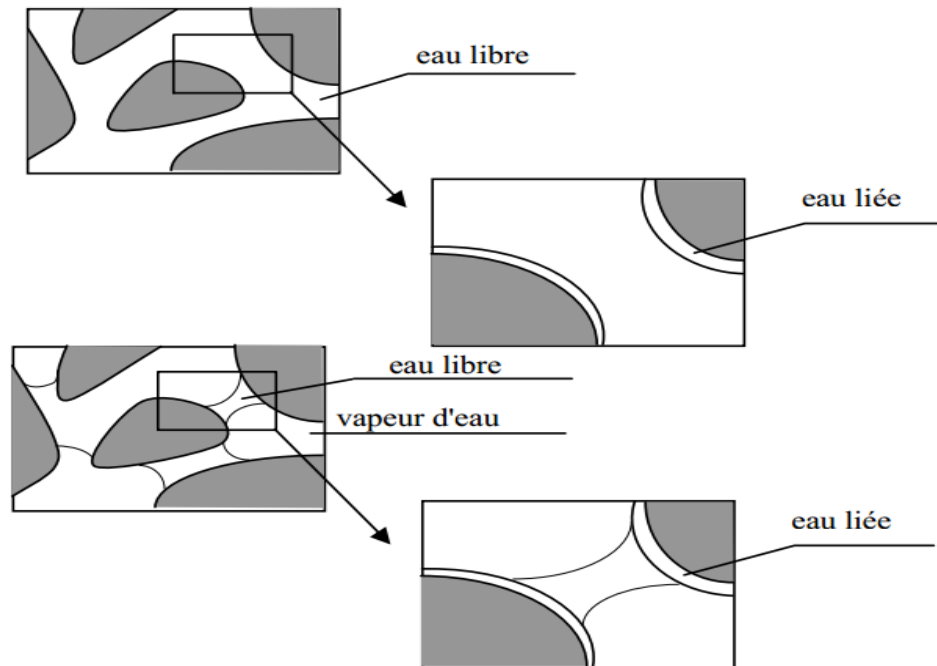
### **III.3. L'eau et les aliments :**

#### État de l'eau ;[4]

L'eau dans l'aliment se représente sous forme de :

Eau libre : l'eau est dite eau libre lorsqu'elle se comporte comme de l'eau pure. C'est cette eau qui est éliminée en premier pendant le séchage.

Eau liée : l'eau est dite liée, l'énergie de liaison est élevée comparée à celle de l'eau libre, ce qui rend son élimination plus difficile et demande une énergie plus élevée pour passer à l'état vapeur.



**Figure 2 : Schéma de répartition de l'eau dans le produit humide**

(Source : [3])

Au cours du séchage, l'eau libre part en premier, puis l'eau est de plus liée. Il ne reste à la fin qu'une eau résiduelle très liée, a une teneur en eau acceptable propre à chaque produit et qui constitue la teneur en eau objectif du séchage.

Activité de l'eau : [13,14]

### **Définition :**

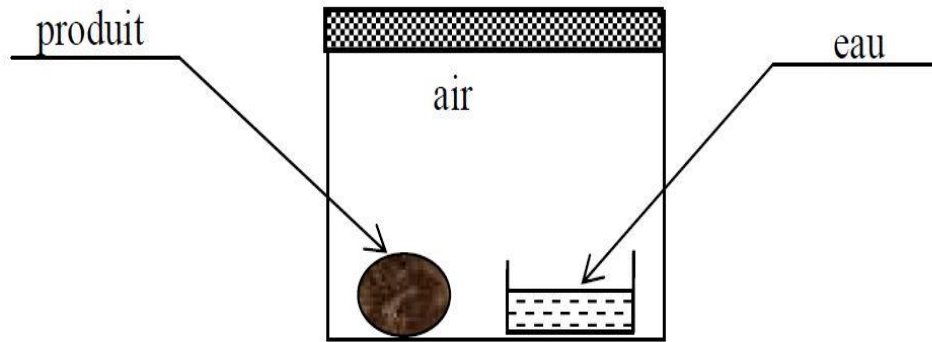
Considérons une enceinte où règnent une pression totale voisine de la normale, une température et hygrométrie constante. A l'intérieur de cette enceinte sont placé : d'une part, le produit et d'autre part, une coupelle contenant de l'eau.

Soient

$P_v$  la pression de vapeur d'eau de l'air dans l'enceinte.

$P_{vs}$  la pression de vapeur saturante de l'air dans la couche limite au contact de la surface d'eau.

$P_{vp}$  la pression de vapeur à la surface du corps humide.



**Figure 3 : Schéma de l'activité de l'eau**

(Source : [19])

On définit l'activité de l'eau dans le corps humide par la relation

$$A_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}}$$

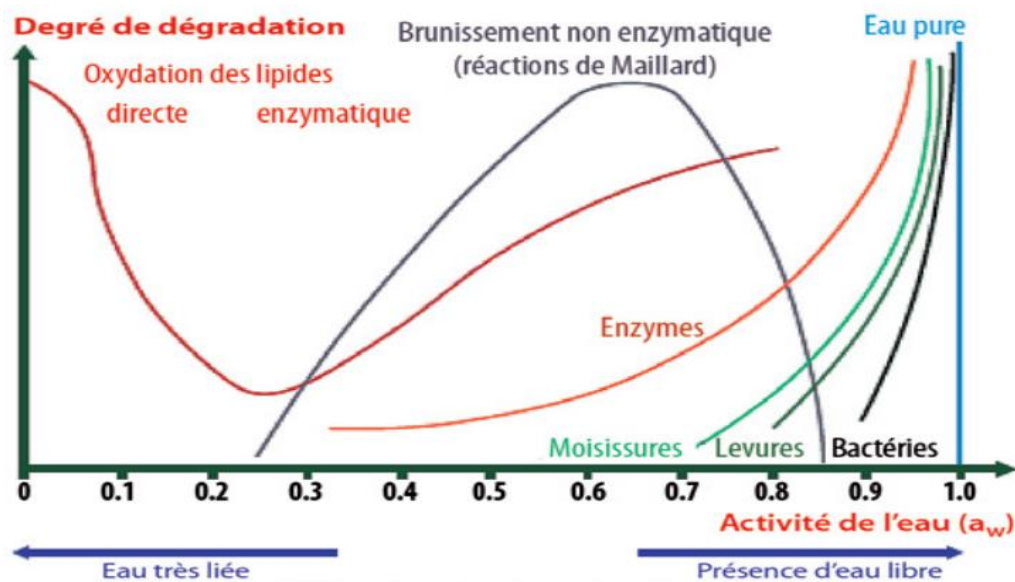
### **Importance de mesure de l'activité de l'eau :**

La connaissance de l'activité de l'eau permet de :

- Représenter le degré de liberté ou disponibilité de l'eau
- Déterminer directement les propriétés physiques, mécaniques, chimiques et microbiologiques d'un matériau hygroscopique
- Déterminer la conservation des aliments

### L'activité de l'eau et la détérioration des aliments :

L'eau active était le facteur le plus important de la stabilité d'un aliment. C'est donc l'activité qui définit la disponibilité de l'eau d'un système, qui doit traduire la stabilité du produit au cours de sa conservation. En effet, de nombreuses réactions de dégradation biochimique et de croissance des microbes sont directement influencées par la valeur de l'activité de l'eau.



**Figure 4 : Schéma de dégradation de produit en fonction de l'activité de l'eau**

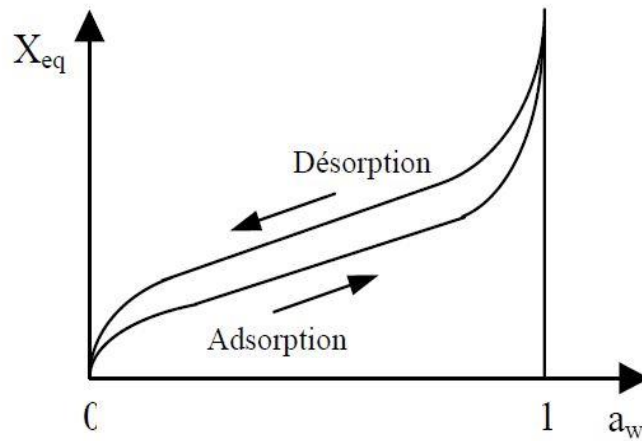
(Source : Cheftel et Cheftel 1997)

Les bactéries pathogènes ne peuvent pas croître au-dessous d'une activité de 0,85, tandis que les levures et les moisissures sont plus tolérantes à l'activité plus réduite, mais le plus souvent aucune croissance n'a lieu pour une activité inférieure à 0,6.

Les risques d'oxydation des lipides sont importants si les valeurs de l'activité sont inférieures à 0,2.

Les réactions de **Maillard** favorisent entre 0,35 à 0,7 de l'activité de l'eau.

**Définition :**



**Figure 5 : Allure d'isotherme de désorption**

(Source : [15])

L'isotherme de sorption c'est la courbe représentant de la teneur en eau d'un produit en fonction des la valeur de l'activité d l'eau  $A_w$  ou l'humidité relative de l'air en équilibre  $H_r$ .

- ❖ Si l'isotherme est déterminée en partant d'un produit sec, c'est une isotherme d'adsorption.
- ❖ Si l'isotherme est déterminée en partant du produit saturé en eau, c'est une isotherme de désorption.

**Détermination expérimental des isothermes de sorption :**

L'isotherme de sorption est généralement obtenue expérimentalement, par ailleurs, il existe plusieurs modèles empiriques ou théoriques, qui ont été proposé pour représenter la courbe d'équilibre.

**Tableau 3 : Différents types de modèle empirique de l'isotherme de sorption : [16]**

Auteurs	Modèle	Paramètres
Langmuir	$X = X_{I2} \frac{C HR}{1 + C HR} \quad (3)$	$C$ $X_{I2}$
Brunauer Emmet Teller (BET)	$X = X_{I2} \frac{C HR}{1 - HR} \frac{1 - (n + 1) HR^n + n HR^{n+1}}{1 + (C - 1)HR - C HR^{n+1}} \quad (4)$	$C$ $X_{I2}$ $n$ nombre de couches
	$\frac{HR}{(1 - HR) X} = \frac{1}{C X_{I2}} + \frac{C - 1}{C X_{I2}} HR \quad (5)$	$C$ $X_{I2}$ $n=1$ , $HR^2$ négligé
Guggenheim Anderson Boer (GAB)	$X = \frac{X_{I2} HR C K}{(1 - HR K)(1 + HR C K - HR K)} \quad (6)$	$C = C_0 \exp\left(\frac{H_1 - H_m}{RT}\right)$ $K = K_0 \exp\left(\frac{H_1 - H_q}{RT}\right)$ $X_{I2}$
Harkings	$HR = \exp\left(k - \frac{n}{X^2}\right) \quad (7)$	$k$ $n$
Smith	$HR = 1 - \exp\left(-\frac{k - X}{n}\right) \quad (8)$	$k$ $n$
Henderson	$HR = 1 - \exp[-A(T + B)X^C] \quad (9)$	$A, B, C$
Oswin	$HR = \left[1 + \left(\frac{A + BT}{X}\right)^C\right]^{-1} \quad (10)$	$A$ $B$ $C$
Chung	$HR = \exp\left[\left(\frac{k}{RT}\right) \exp(-nX)\right] \quad (11)$	$k$ $n$

Le modèle de GAB et le modèle de BET sont les plus utilisées de chercheur.

### L'intérêt de l'isotherme de sorption :

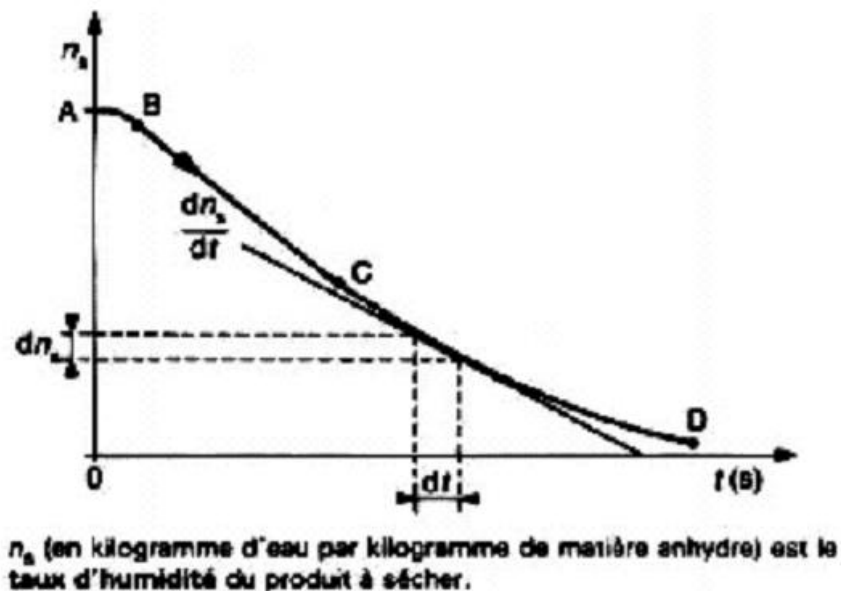
La détermination des isothermes de sorption est une étape indispensable dans l'étude du séchage. L'isotherme de sorption permet de déterminer la répartition et l'intensité de liaison de l'eau.

Dans chaque opération du séchage, il y a un équilibre d'humidité air-produits, cette équilibre est déterminé par les isothermes de sorption du produit.

### **III.4. Cinétique de séchage : [23,24,25]**

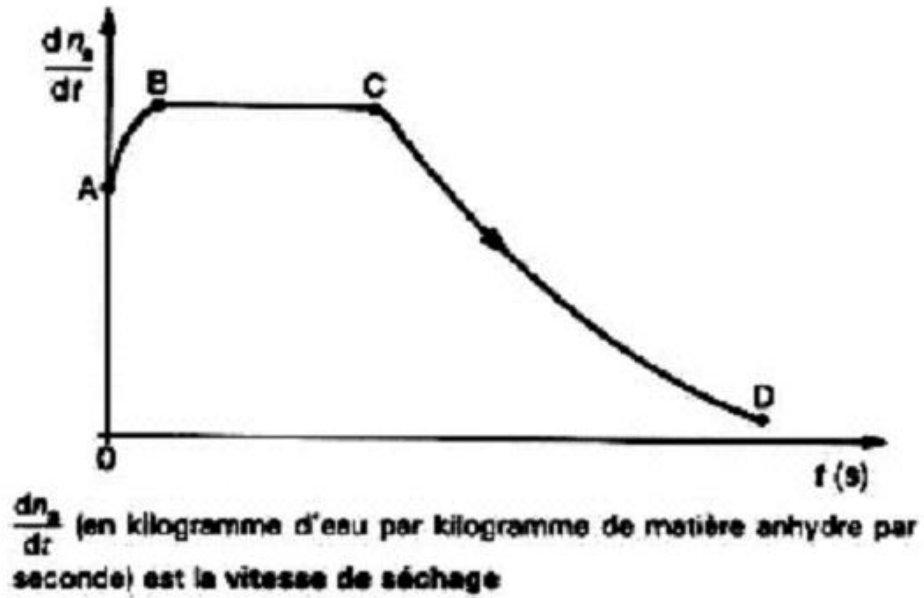
La cinétique de séchage est généralement étudiée les exprimant :

- La teneur en humidité en fonction du temps
- La vitesse du séchage en fonction du temps
- La vitesse du séchage en fonction de la teneur en humidité

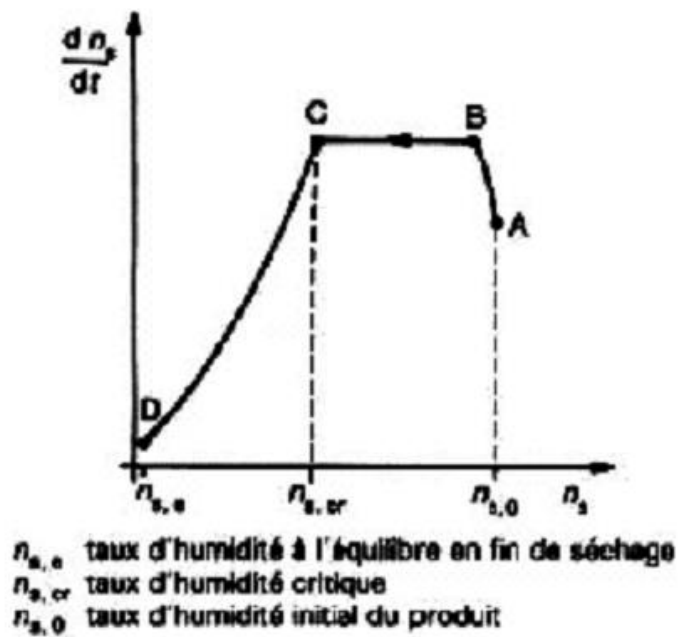


a) Courbe de séchage  $n_s=f(t)$





b) Courbe de séchage  $dn_s/dt=g(t)$



c) Courbe de séchage

**Figure 6 : Courbe caractéristique de séchage**

(Source : CHARREAU ET CAVALLE)

### Phase 1 : Mise en température du produit

C'est la première phase du séchage généralement de courte durée au regard la durée totale de l'opération. La teneur en eau diminue peu et la vitesse du séchage augmente.

### Phase 2 : Séchage à vitesse constante

Cette période correspond à l'évaporation superficielle de l'eau libre. L'humidité se déplace vers la surface à l'état liquide sous l'effet de forces capillaires. L'activité de l'eau à la surface du produit est alors égale à 1. La surface du produit est donc saturée en eau. L'air est aussi saturé en eau. La température du solide reste constante et égale à la température humide du fluide de séchage (air). Cette période s'achève lorsque la teneur en eau du produit atteint à une valeur dite teneur critique.

Pour les corps non hygroscopiques, le séchage s'achève à cette phase. Mais pour les corps hygroscopiques, on distingue une phase supplémentaire. L'eau restant est essentiellement liée. L'extraction de cette eau devient difficile.

### Phase 3 : Séchage à vitesse décroissante :

Dans cette période, il n'y a plus d'eau libre dans le produit et l'eau se déplace du centre vers la surface sous forme de vapeur. Le déplacement de cette vapeur est beaucoup plus lent.

#### *Influence de l'air lors du séchage :*

##### ✓ Influence de la température de l'air :

Effet de la température de l'air asséchant sur la vitesse de séchage est très important. Cette influence est due à l'apport de chaleur au produit qui accroissement avec la température de l'air. Elle est aussi due à la température du produit qui est d'autant plus importante que la température de l'air élevée. Par conséquent, les conductivités de l'eau dans le produit sont importantes.

✓ Influence de la vitesse de l'air :

La vitesse de l'air due effectivement sur la cinétique de séchage surtout au début de l'opération. Néanmoins, pour des produits dont la cinétique de séchage est contrôlée par le transport interne de l'eau, influence de la vitesse de l'air de séchage devient très faible.

✓ Influence de l'humidité de l'air :

Une teneur en eau trop faible va conférer à l'air un pouvoir évaporatoire trop important. La surface du produit va se sécher en surface trop rapidement, cette surface va devenir en frein à l'échange et parfois sera étanche à la vapeur d'eau.

### **III.5. Mode de séchage : [20,21]**

Deux mécanismes peuvent être mis en œuvre pour éliminer l'eau d'un produit : l'ébullition ou l'entraînement. L'idée la plus simple consiste à porter le produit à la température d'ébullition de l'eau, qui alors se vaporise. Mais pour obtenir une élimination poussée de l'eau sans altération excessive de la qualité des produits, on préfère bien souvent opérer à température plus basse en utilisant l'air comme gaz d'entraînement. Quel que soit le mode de séchage, c'est la pression de vapeur d'eau dans le produit qui détermine les échanges entre l'air et le produit.

Séchage par ébullition :

Le séchage par ébullition a lieu lorsque le flux thermique transféré au produit est très intense à cause d'un écart de température très élevé entre la source chaude et le produit. Dans tous ces conditions la température du produit atteint un niveau tel que la pression de vapeur d'eau de ce produit est égale ou dépasse à la pression totale ambiante.

L'ébullition proprement dite s'observe difficilement dans les solide ou les corps pâteux qui dans les liquide.

Séchage par entraînement :

Lorsqu'un produit humide est placé dans un courant de gaz (air le plus souvent) suffisamment chaud et sec, il s'établit un écart de température et de pression partielle d'eau tel que :

- le gaz apporte au produit une partie au moins de l'énergie nécessaire à l'élimination de l'eau ;
- l'eau est évaporée sans ébullition. La vapeur d'eau est transférée par diffusion et convection du produit dans le milieu ambiant et est ensuite entraînée par le gaz. La température de surface du produit reste toujours inférieure ou égale à celle de l'air et donc nettement inférieure à la température d'ébullition de l'eau.

Ces deux mécanismes peuvent se succéder au cours d'une opération de séchage ou coexiste dans un produit à un moment donné.

### **III.6. Mode de transfert : [22,23]**

Le séchage fait appel aux 3 modes de transfert de chaleur par conduction, par convection et par rayonnement, ainsi que le transfert de matière. Ceux-ci sont utilisé seul ou combiné entre eux.

Transfert de chaleur :

**Par conduction :**

L'énergie thermique nécessaire au séchage est apportée non pas un gaz en mouvement autour du produit à sécher, mais par contact direct entre le produit et une paroi chauffée.

### **Par convection :**

En séchage industriel, il s'agit probablement du monde de séchage le plus courant. Il consiste à mettre en contact, un gaz (air) s'écoulant en régime généralement turbulent, autour du corps à sécher, qui peut se présenter sous forme de particules, de gouttelettes, de fibres ou de plaques, pour un séchage par convection, les échanges de chaleur et de masse entre le produit à sécher et l'air de séchage sont déterminés par les coefficients de transfert à la surface, qui dépendent des caractéristiques de l'air

La convection est un mode de transfert rapide.

- Si le mouvement de fluide est renforcé par un travail mécanique « artificiel » (ventilation, agitation, pompage d'un fluide), on parle de « convection forcée ».
- Si au contraire, le mouvement du fluide, n'est dû qu'à des courants thermiques ou des mouvements ascensionnels d'ébullition, la convection est dite « naturelle ».

### **Par rayonnement :**

Ce mode est destiné aux produits en plaque (carton, viande), ou en fibre (tissu, papier), mais aussi aux produits granulaires de faibles épaisseurs (cigarettes). L'énergie est apportée aux produits à sécher par des ondes électromagnétiques (rayonnement), soit par élévation de la température d'un émetteur infrarouge.

### **Transfert de matière :**

Le transfert de masse joue un rôle très important dans les opérations unitaires de base, telles que le séchage. Dans ces opérations physiques, la résistance au transfert de masse constitue le facteur limitant, quoique le transfert de chaleur et le flux du fluide soient impliqués dans le conditionnement et la conservation où le transfert d'humidité, vapeurs, gaz et composés aromatique, influent sur la qualité de l'aliment. Les difficultés d'application des théories de transfert de masse, dans les processus de transformation des aliments, résultent des structures physiques complexes et de la composition chimique des denrées alimentaires qui varient pour une même denrée et change pendant la transformation. Il est

à noter que la migration de l'eau (liquide ou vapeur) peut également s'effectuer par « filtration » à travers le produit poreux sous l'action d'une différence de pression entre l'intérieur et la surface.

#### Transfert d'eau :

Le séchage peut être décrit comme un transfert d'eau couplé à un transfert de chaleur dans un matériau poreux non saturé. Dans les produits biologiques le transfert interne d'eau est souvent le phénomène limitant. La taille des pores et la distribution des rayons des pores dans le matériau influent sur le caractère hygroscopique du produit (plus les pores sont petits, plus le caractère hygroscopique est marqué). La vaporisation de l'eau nécessite un apport énergétique de source extérieure au produit à sécher. Simultanément se produit la migration de l'eau vers le milieu ambiant. La vitesse de ce transfert de matière varie au cours du temps. Elle dépend des conditions ambiantes (température, humidité relative, vitesse des gaz en contact avec le produit), mais aussi de la nature même du solide et de l'eau. Les difficultés sont plus complexes dans les aliments solides plus que dans les liquides.

### **III.7. Prétraitement avant le séchage : [15,23]**

Le séchage des fruits et légumes est normalement souvent accompagné par des changements de couleur, de texture et de goût. Des prétraitements appropriés peuvent améliorer le processus de séchage réduire le temps de séchage, améliorer la qualité du produit fini et réaliser des économies d'énergie.

Les méthodes du prétraitement comprennent le trempage par acide citrique ou par sulfite et le sulfurage des fruits, le blanchiment des légumes.

#### Prétraitement fruits :

Le sulfurage est une vieille méthode de prétraitement des fruits. Le soufre sublimé est enflammé et brûlé au voisinage des fruits. Les fumées de soufre pénètrent les fruits et

agissent comme un prétraitement permettant de retarder la détérioration et le noircissement des fruits.

Le sulfitage ou procédé de trempage à l'aide de sulfite est un prétraitement comparable au sulfurage tout en étant plus rapide, plus facile et permettant d'aboutir au même effet en termes d'effet anti-obscurcissant. Les composés utilisés sont le métabisulfite, le bisulfite ou le sulfite de sodium, de qualité alimentaire ou en tant que réactif pure. Le trempage dans une solution d'acides citrique ou ascorbique (vitamine C) est un moyen aussi sûr contre le brunissement des fruits. Il n'est cependant, pas à protection aussi prolongée que le sulfurage ou le sulfitage. D'autres procédés traditionnels de trempage sont largement utilisés tels que l'immersion dans l'oléate d'éthyle et de trempage dans  $\text{NaHCO}_3$ .

#### Prétraitement des légumes :

Le blanchiment est un traitement thermique qui consiste à porter rapidement les légumes (quelques minutes) à 95-100°C puis à les refroidir rapidement pour éviter une cuisson trop importante. Le rôle du blanchiment qui constitue un prétraitement avant, séchage, est multiple

- Destruction des enzymes susceptibles d'altérer les légumes est la fonction principale du blanchiment. Il est nécessaire de bloquer l'activité enzymatique pour éviter la dégradation des légumes au cours de la fabrication (brunissement, dénaturation de la flaveur ou de la texture).
- Désaération du légume : Le légume contient de l'air ou du gaz occlus dans les tissus. Les gaz (azote, oxygène) sont libérés lors du traitement thermique ; ils peuvent entraîner des oxydations plus ou moins importantes occasionnant des colorations anormales ; en cours de cuisson du produit.
- Modification de la structure : Le blanchiment permet d'assouplir les légumes, faciliter les opérations et manipulations ultérieures et l'élimination des faux goûts.

### **III.8. Qualité du produit séché : [23,24]**

#### Modification biochimique :

L'exposition pendant une certaine durée d'un produit biologique à une température de séchage élevée peut provoquer des modifications dans sa composition chimique. Ces modifications, généralement considérées comme indésirables sont nombreuses. Mais les plus importantes sont les suivantes :

- réaction de MILLARD : brunissement non enzymatique résultant de combinaisons entre protéines et glucides ;
- rancissement : oxydations des matières grasses,
- destruction de vitamines : notamment destruction de l' $\alpha$  et du  $\beta$ - carotènes
- dénaturation des protéines, diminuant leur aptitude à se réhydrater lors de l'utilisation du produit et altérant leur pouvoir liant ou moussant ;
- réaction enzymatique au cas où les enzymes n'ont pas été inactivées par un traitement préalable : oxydation des polyphénols qui entraîne par exemple un brunissement des produits séchés
- Pertes d'arôme

Le séchage est un procédé de séparation basé sur la volatilité. Par conséquent, l'eau contenue dans le produit à sécher ne sera pas éliminée toute seule, mais avec tout autre produit volatil existant également dans le produit. Dans la plupart des cas il s'agit des arômes contenus dans les produits biologiques destinés à l'alimentation. Par exemple pour un produit comme la menthe, ont montré que lors du séchage à température constante inférieure ou égale à 55°C, les pertes en essences (arômes) sont de l'ordre de 5%.

- Pertes de la couleur du produit



L'étude de noircissement des feuilles de certaines plantes pendant le séchage a révélé que la couleur verte de ces feuilles est maintenue à condition que le séchage s'effectue à une température inférieure ou égale à 55°C.

#### Modifications physiques et mécaniques des produits séchés

Le séchage provoque chez la plupart des plantes des altérations physiques et mécaniques caractérisées par :

- la migration des solutés vers la surface conduisant à une accumulation des sucres et d'autres solutés au niveau de la surface du produit. Cette accumulation est pernicieuse à la qualité du produit qui doit être en général être consommé réhydraté ;
- la fusion et migration des matières grasses ;
- la modification de la forme : en règle générale, le départ de l'eau du produit entraîne un effondrement du produit sur lui-même. Toutefois, dans certaines situations, un départ d'eau très rapide et l'existence d'une matrice solide permet d'obtenir un produit de même volume mais d'une structure poreuse.

## CHAPITRE IV.Type des séchoirs

Les séchoirs solaires sont classés généralement selon le mode de chauffage ou le mode de leur fonctionnement en plusieurs catégories :

- Les séchoirs solaires directs.
- Les séchoirs solaires indirects.
- Les séchoirs solaires hybrides.
- Les séchoirs solaires mixtes

### IV.1. Séchoirs solaires directs : [25]

Les séchoirs solaires directs sont des dispositifs simples à utiliser et à construire. Ils offrent de large possibilités de conception : du séchoir coffre à plateau et adapté au petite production, au séchoir cabane qui permet de traiter de grandes quantités.

#### Principe de fonctionnement

Les rayons solaires frappent directement les produits. Le séchoir solaire direct se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois de chambre de séchage et de collecteur solaire. Le fond de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter la capacité d'absorption de chaleur, une feuille de plastique ou polyéthylène transparent sert généralement de toit mais on peut également utiliser d'autres matériaux plus chers comme le verre ou les plastiques spéciaux (polyéthylènes agricoles)

#### Avantages

- Meilleure protection contre les poussières, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel.
- Pas besoin de main-d'œuvre qualifié.
- Grandes possibilités de conception.

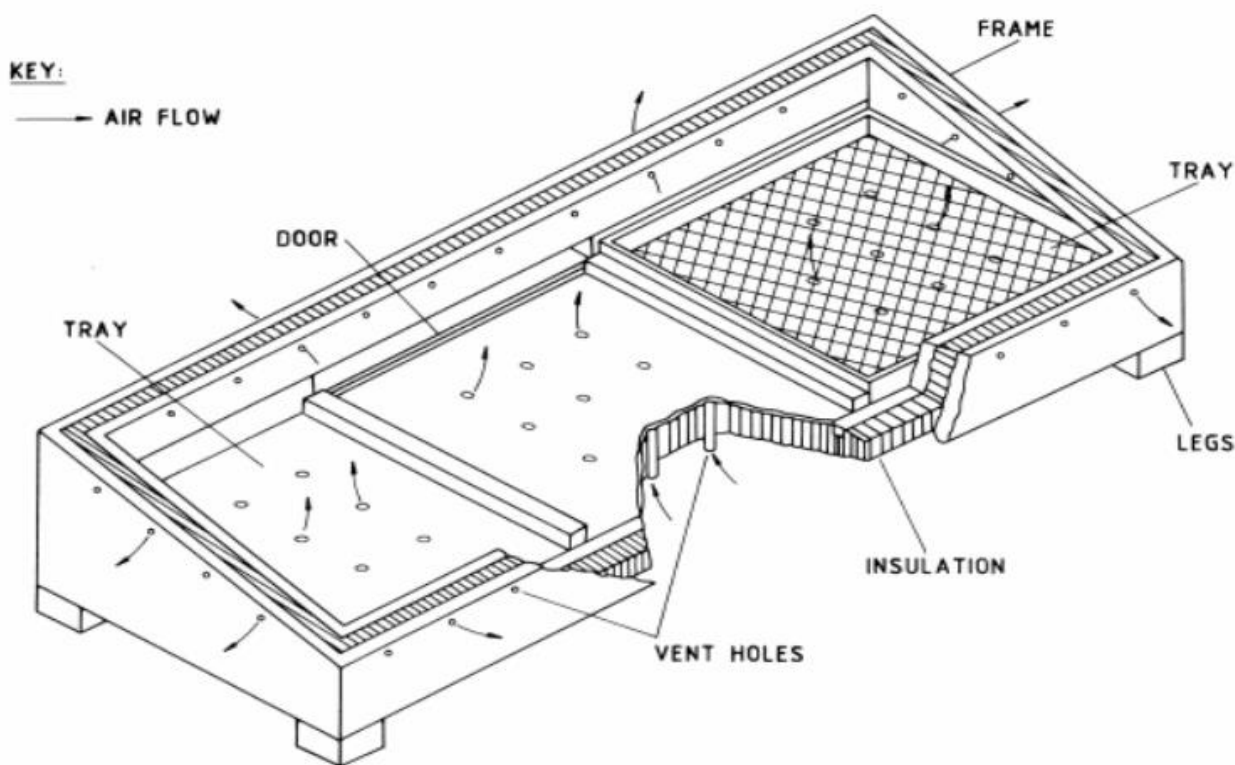
### Inconvénients

- Dégradation de la qualité par exposition direct au soleil, destruction de la vitamine A et C, flétrissement, décoloration.
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.
- Température relativement élevée dans le séchoir qui contribue avec l'exposition au soleil à la destruction des nutriments.
- Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risques de moisissure.

### Type de séchoirs directs

#### ❖ La boîte de séchage ou séchoir coffre

Le séchoir à coffre est un simple séchoir facile à construire par les artisans, en utilisant des matériaux disponibles localement, il est destiné généralement pour la préservation des fruits, légumes, poissons et de la viande. Dans le séchoir coffre, l'air pénètre par les orifices percés par le fond du caisson, et s'échappe par des trous situés dans la partie haute de chaque côté. Le fond de la boîte ainsi que les parois sont peints en noir pour mieux capter le rayonnement solaire. Une feuille de plastique ou une plaque de verre sert de toit, une porte dans le panneau arrière permet de régler la température.

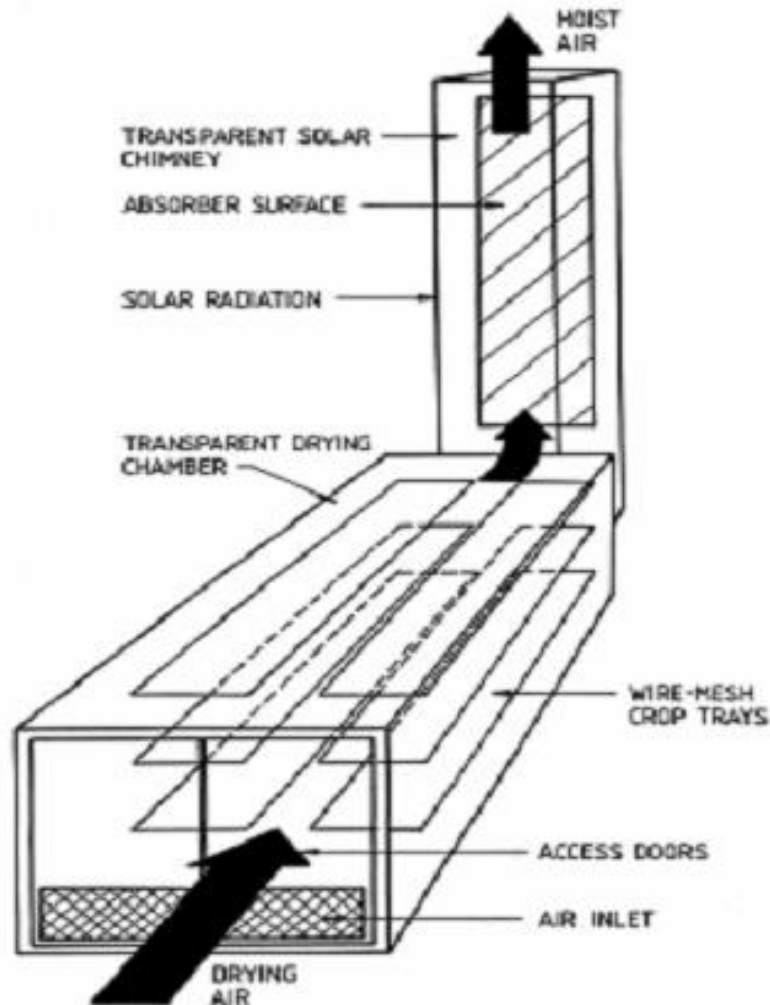


**Figure 7 : La boîte de séchage ou séchoir coffre**

❖ **Le séchoir intégral à convection naturelle**

Le séchoir intégral est un séchoir direct dont le produit est placé dans une chambre de séchage avec des parois transparentes, le rayonnement solaire empiète directement sur le produit. L'exposition directe au rayonnement solaire augmente la maturation appropriée de couleur des fruits verdâtres, et permettant la décomposition de la chlorophylle dans le tissu. Pour certaines variétés de raisins et de dattes, l'exposition au rayonnement est considérée essentielle pour le développement de couleur requise dans le produit sec.

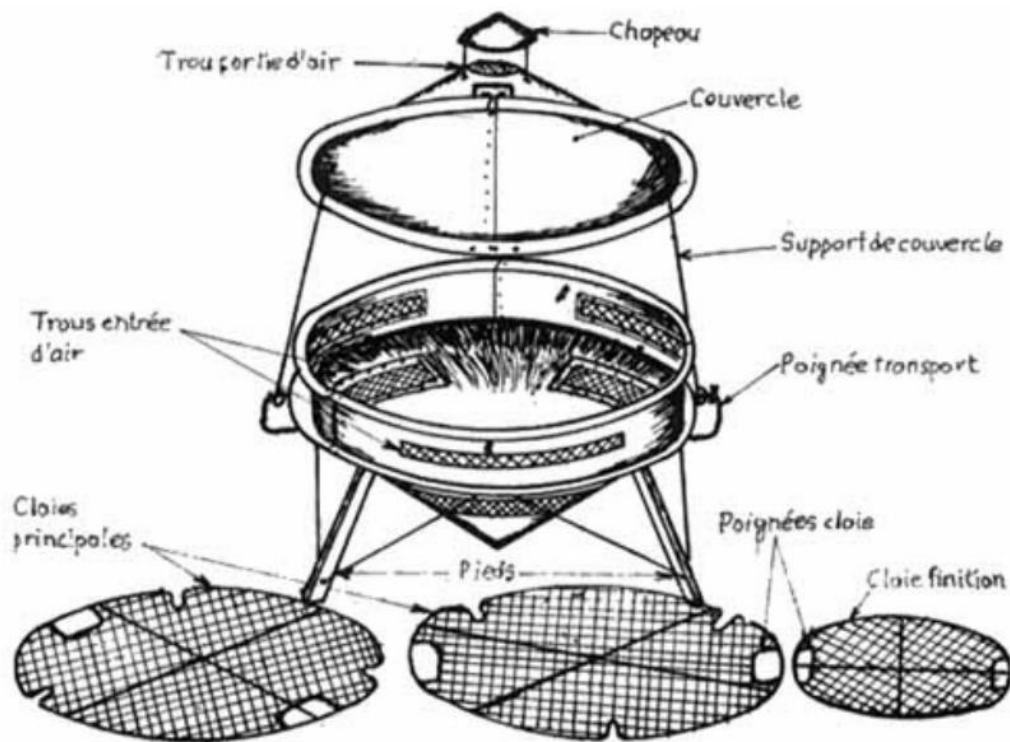
Le séchoir est équipé par une cheminée solaire qui peut être utilisée pour augmenter la force de flottabilité imposée au courant d'air et donc fournir un flux important d'air et une vitesse de séchage plus grande.



**Figure 8 : séchoir solaire intégral**

#### ❖ **Le séchoir solaire "coquillage"**

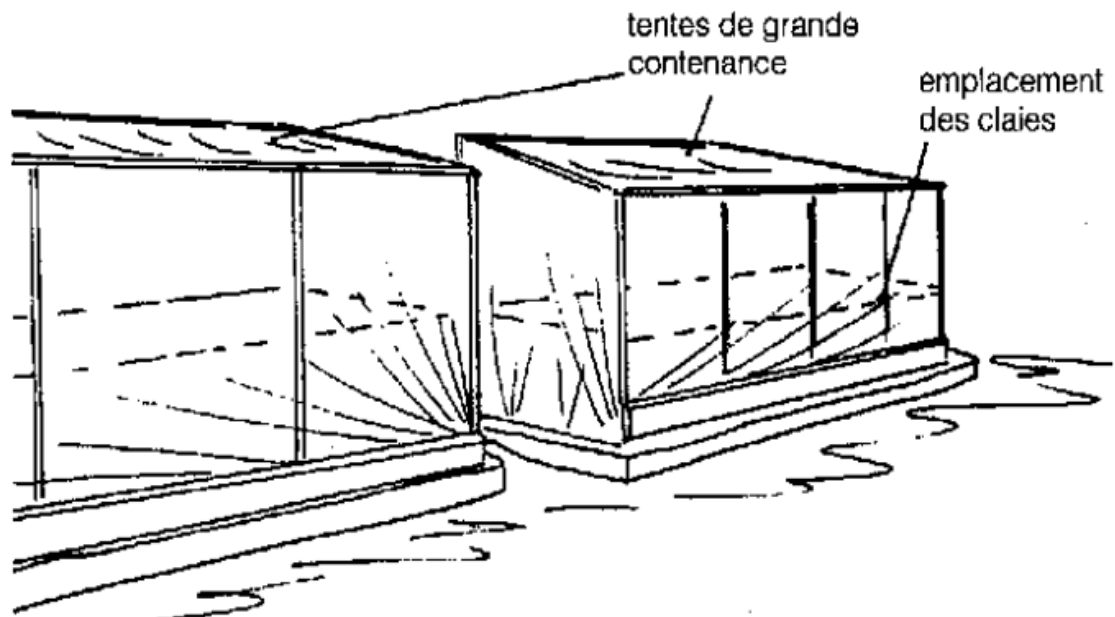
Le séchoir coquillage est un séchoir solaire direct à convection naturelle, destinée à l'auto consommation et à la vente locale. Il est essentiellement utilisé par les familles, les coopérations et les groupes de femmes. Ce type de séchoir est composé de deux cônes métalliques reliés par une charnière, la tôle peinte en noir assure une bonne captation du rayonnement solaire, des trous perforés dans la tôle inférieure et supérieure permettant la circulation de l'air. L'efficacité du séchoir dépend des conditions climatiques.



**Figure 9 : Sechoir solaire coquillage**

### ❖ **Le séchoir cabane**

Le séchoir cabane est caractérisé par une capacité de 35 kg de produit frais pour une surface de 7 m<sup>2</sup>. Les produits sont placés dans le séchoir sur des claies surélevées du sol. La toile de plastique permet de capter l'énergie solaire, une porte permet d'entrer dans la tente et de garnir les claies, une sortie d'air est aménagée dans la partie supérieure. Ce type de séchoir est caractérisé par une meilleure protection contre les insectes, équipement démontable à la saison des pluies et une simple construction et fonctionnement, parmi les inconvénients de ce séchoir : le coût est assez important, la nécessité d'une grande surface de polyéthylène et la prise au vent qui rend ces modèles fragiles si l'emplacement est mal choisi.



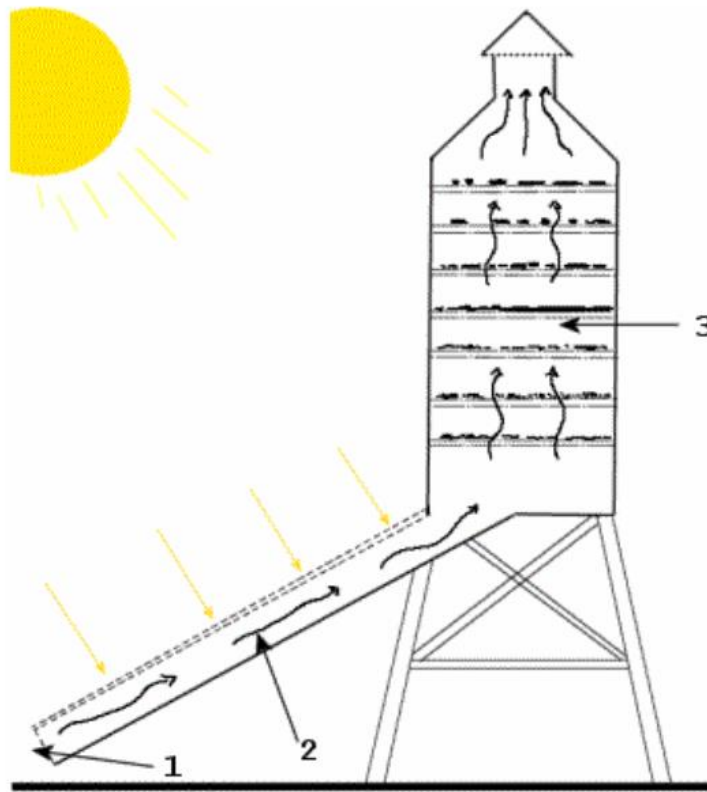
**Figure 10 : Le séchoir cabane**

#### **IV.2. Les séchoirs solaires indirects : [3,30]**

Ces systèmes sont plus performants que les séchoirs directs, ils présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : sa couleur, son aspect, sa valeur nutritive. Ils sont donc particulièrement adaptés au séchage des produits alimentaires

##### **Principe de fonctionnement :**

Le séchoir solaire indirect se compose de parties : un collecteur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur, une chambre de séchage qui contient le produit et une cheminée. L'air pénètre dans le collecteur ; il est chauffé, sa température augmente. L'air chaud monte par convection naturelle jusqu'à la chambre de séchage. La durée de séchage est très variable selon les conditions climatiques.



**Figure 11 : Sechoir solaire indirect**

#### Avantages

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

#### Inconvénients

- Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir.
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.



Type du séchoir indirect :

❖ Le séchoir armoire

Le collecteur capte l'énergie solaire. L'air chaud s'élève jusqu'à la chambre de séchage où les produits sont disposés sur des claies superposées. Le séchoir armoire est composé d'un collecteur solaire dont l'intérieur a été noirci et d'une chambre de séchage contenant des claies superposées. Le collecteur est recouvert de feuille de plastique translucide et assure la production de l'air chaud. La chambre de séchage protège les produits du soleil préservant aussi leur qualité.

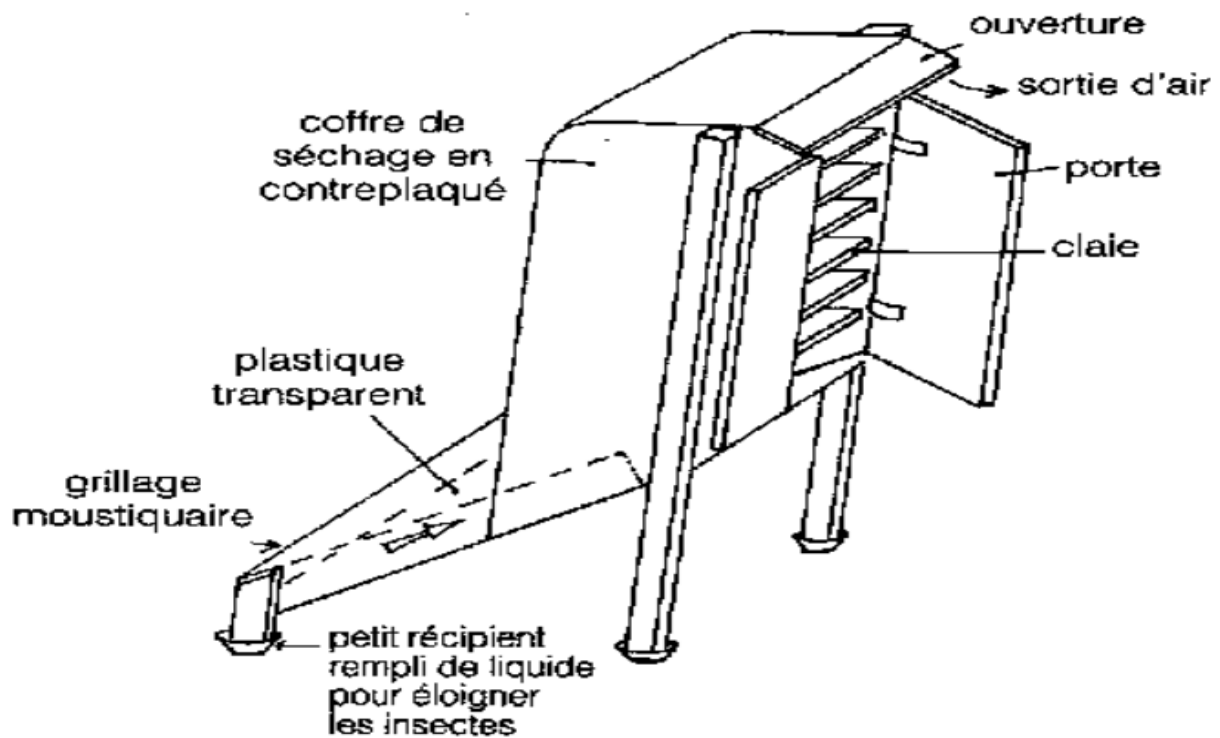


Figure 12 : Sechoir solaire armoire

### IV.3. Les séchoirs hybrides

Les recherches se sont orientées vers les séchoirs hybrides utilisant une énergie d'appoint : fuel, électricité, bois, gaz ... l'apport d'énergie supplémentaire peut se situer à deux endroits différents du séchoir

- Maintenir la température constante dans le séchoir par un brûleur à gaz, une résistance électrique, un feu du bois. Dans ce cas l'énergie solaire devient secondaire, elle permet simplement de préchauffer l'air.
- Augmentation de la circulation de l'air par des ventilateurs électriques, ici l'énergie solaire reste la source de chaleur mais le séchoir a une capacité d'évaporation plus importante grâce à une meilleure ventilation.

#### Avantages

- Affranchissement par rapport aux conditions climatiques.
- Meilleur contrôle du séchage
- Forte augmentation de la production par rapport aux autre type des séchoirs solaires, car le dispositif peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin.

#### Inconvénients

- Coût de production et d'investissement élevé.
- Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, pièce de rechange.
- Personnel qualifié pour la maintenance

#### Types des séchoirs hybrides

##### ❖ Séchoir hybride à convection forcée

#### Principe de fonctionnement :

Le toit du bâtiment sert de capteur, un ventilateur assure une circulation importante de l'air permettant de sécher très rapidement les produits.

### Description technique :

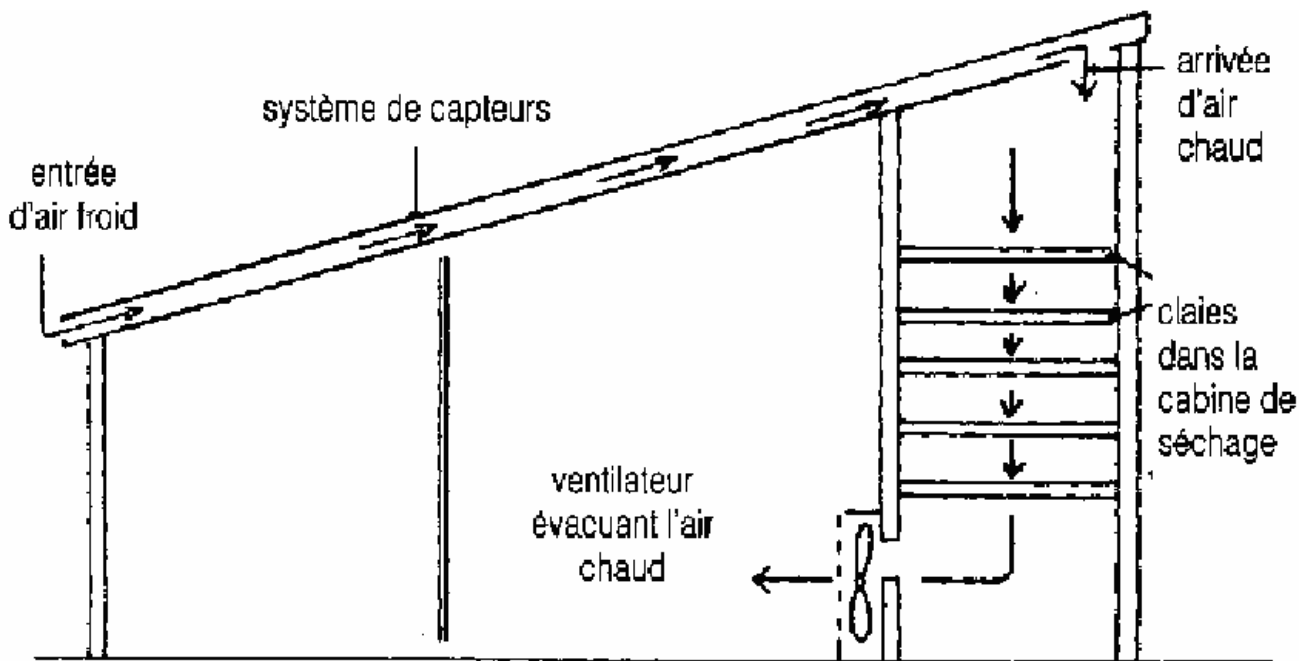
L'air est aspiré de l'intérieur du bâtiment par un ventilateur et passe dans un capteur solaire dans le toit du bâtiment. L'air réchauffé arrive dans la chambre de séchage où les fruits sont disposés sur des claies superposées.

### Avantages

- Séchoir très performant.
- Facilement aménageable dans un bâtiment

### Inconvénients

- Nécessité de grandes quantités de fruits régulièrement sur l'année pour être rentable



**Figure 13 : Séchoir solaire hybride à convection forcée**

### ❖ Séchoir hybride solaire – gaz :

#### Principe de fonctionnement :

Le collecteur solaire permet de préchauffer l'air. Si la température est insuffisante, un brûleur à gaz se déclenche pour obtenir la température désirée. Les produits peuvent donc sécher quelles soient les conditions climatiques.

#### Description technique :

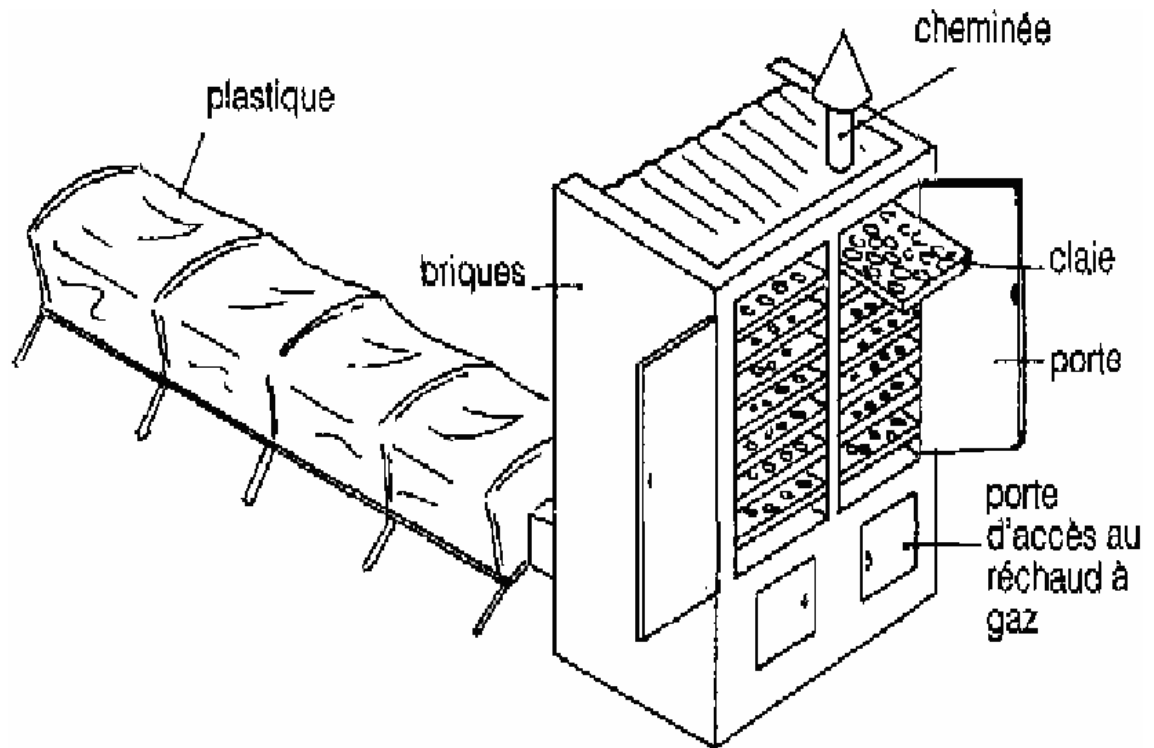
La circulation de l'air se fait par convection naturelle du collecteur solaire à l'armoire. Le brûleur à gaz permet d'obtenir la température nécessaire pour sécher correctement les produits quelles soient les conditions climatiques.

#### Avantages :

- Séchage rapide et d'excellente qualité.
- Contrôle de température.
- Très grande productivité.

#### Inconvénients :

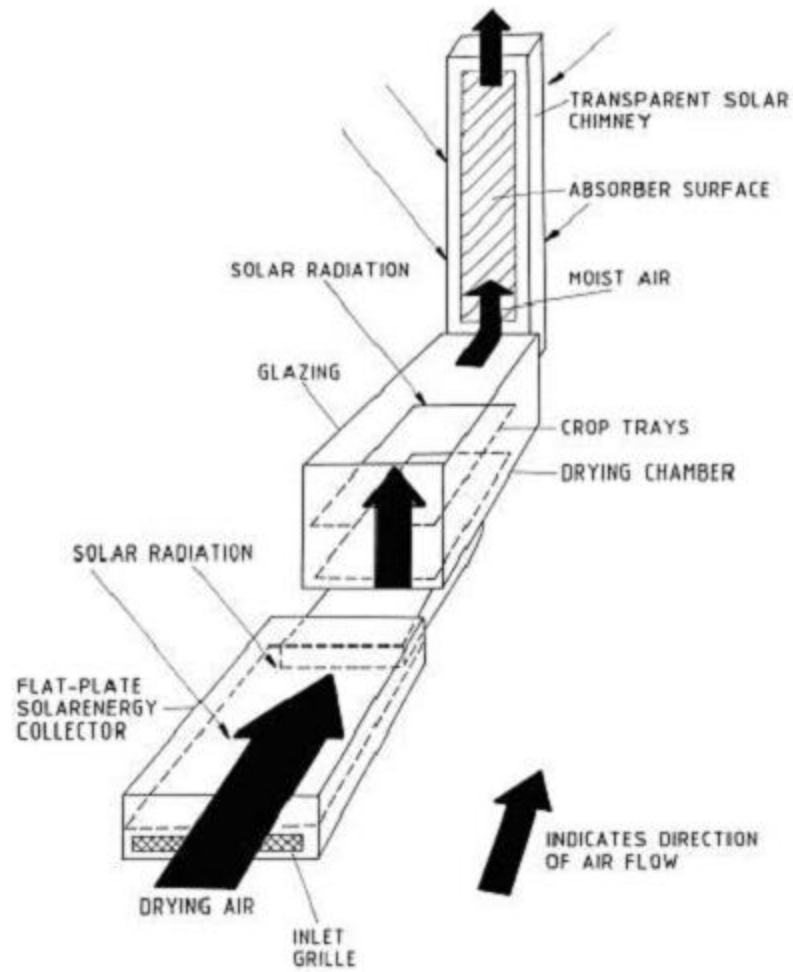
- Coût très élevé de l'investissement
- Nécessité d'avoir un marché important pour pouvoir écouler les produits.



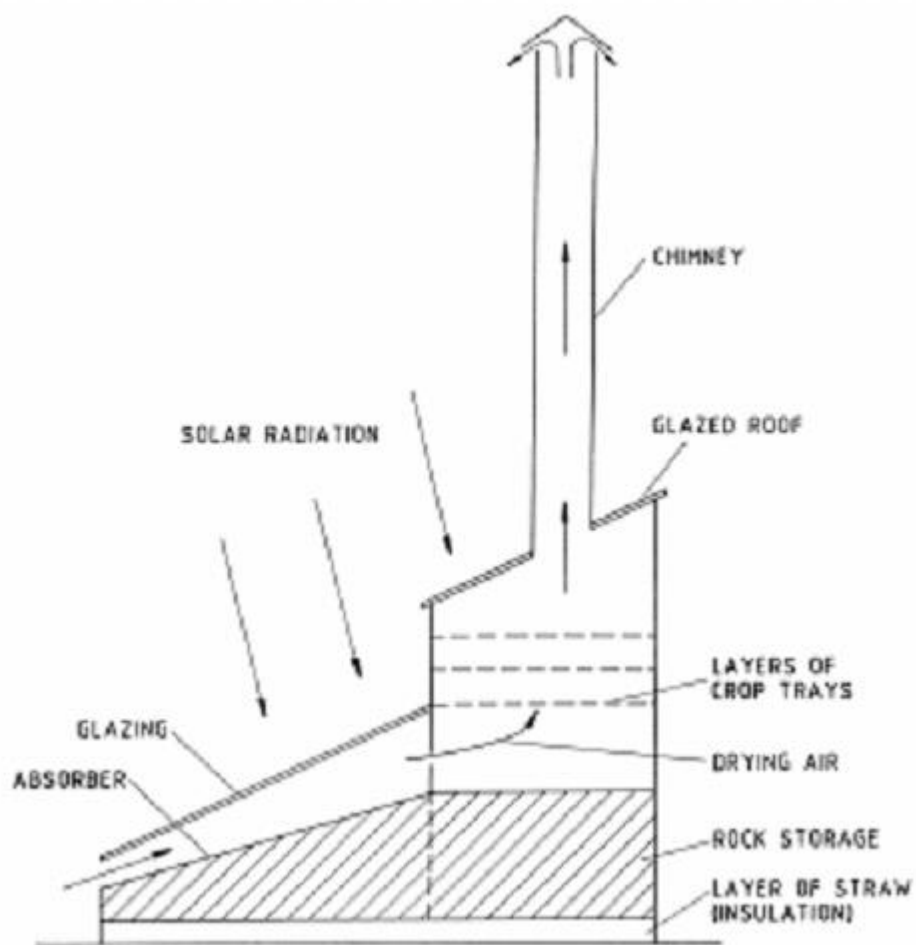
**Figure 14 : Séchoir solaire hybride solaire-gaz**

#### **IV.4. Séchoirs mixtes :**

Ces séchoirs combinent les dispositifs des séchoirs directs et indirects. Dans ce type de séchoirs, l'action combinée du rayonnement solaire direct sur le produit à sécher et le capteur solaire est de fournir la chaleur nécessaire pour le processus de séchage. Un séchoir mixte à circulation naturelle aurait les mêmes dispositifs structurant qu'un séchoir indirect (capteur solaire, chambre de séchage, et une cheminée) mais les parois sont équipées par des plaques de verre de sorte que le rayonnement solaire empiète directement sur le produit comme le séchoir intégral.



**Figure 15 : Séchoir mixte Type1**



**Figure 16 : Séchoir mixte Type 2**

# CONCLUSION GENERALE

---

Ce travail nous a permis de connaître l'importance des éléments nutritionnels dans les fruits et légumes sur la santé. Ces qualités nutritionnelles sont diminuées après récolte. Le séchage est un moyen rentable pour la valorisation des produits agro-alimentaires, il permet de sauvegarder les éléments nutritionnels du produit.

Durant l'opération de séchage, il faut savoir la courbe d'équilibre déterminé à partir de l'isotherme de sorption afin de définir la durée du séchage ou période de séchage. Cette courbe d'équilibre dépend de l'état de l'eau et l'activité de l'eau du produit. La connaissance de l'isotherme de sorption est très importante durant la l'opération du séchage.

Avant l'opération du séchage, le produit frais suffit un prétraitement pour sauvegarde les éléments nutritionnels après le séchage.

Actuellement, nous constatons la progression de la technologie dans le monde. La pratique du séchage aussi s'évolue toujours. Il y a plusieurs différents types des séchoirs qui facilitent la pratique du séchage et améliorent la qualité de produit séché. Le séchoir utilisé dépend de la propriété du produit initial.

La pratique du séchage dans notre pays est très avantageuse car Madagascar est un pays riche en production des fruits et légumes.



# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

[1] Angélique Afontana

Fruits

[2] Nersen Albitar 8 Nov 2008

Etude comparative des procédés de séchage couplé à la texturation par Détente Instantanée Contrôlée en terme cinétique et de qualité nutritionnelle. Application à la valorisation des déchets agro-alimentaire

[3] BECKA Abdelhakim, 19/04/2009, INATAA

Prévention des altérations et des contaminations microbiennes des aliments

[4] HARISOAMAHEFA Hanitriniony, 31/07/2013

Étude de modalités de séchage de fruits et légumes au moyen du séchoir solaire BOARA ; qualité nutritionnelle et microbiologique des produits obtenu

[5] MAEP UPDR-VALY, Juillet 2004

Filière fruit et légumes

[6] Philippe Dudez

Séchoir solaire à petit échelle

[7] Leonard Angélique,

Séchage

[8] Généralité sur le séchage

[9] Programme de radio rural

Le séchage de produit agricole

[10] Wardz Belachi, 15/02/2009

Application du séchage solaire pour la conservation des produits alimentaires

[11] Séchage des solides

[12] HOUHOU HATEM

Étude théorique et expérimental du séchage solaire de certain produit agro-alimentaire

[13] Angélique Fontana

Déshydratation et séchage : abaissement de l'activité des aliments

[14] EL MOKRETAR SOFIANE, 20/10/2009

Contribution théorique et expérimental à l'étude du bilan d'énergie et de masse d'un séchoir solaire de type serre. Application a la détermination de la cinétique de séchage des prunes

[15] Nersen Albitar, 8 Nov 2010

Étude comparative des procédés de séchage couplé à la texturation par Détente Instantané Contrôlée, en terme cinétique et de qualité nutritionnelle. Application à la valorisation des déchets agro-alimentaire.

[16] A.Belghit,M.Kouchila

Approche expérimental de la cinétique de séchage de la verveine

[17] Yves Jannot, 2008

Isotherme de sorption : modèle et détermination

[18] Michel Daguenet

Séchoir solaire théorie et pratique

[19] Mouafki Achoura, 28/09/2004

Modélisation-simulation du procédé de séchage solaire des feuilles de menthe

[20] Boussalia Amar, 27 Juin 2010

Contribution à l'étude de séchage solaire de produit agricole

[21] Dalila Djeroud, 07/07/10

Modélisation Markovienne du séchage continue par contact avec agitation

[22] Kisselmina Koné, 13/12/2011

Amélioration de la qualité de tomate séchée par micro-ondes assisté par air chaud avec pilotage de la puissance spécifique

[23] Medjoudj Hacene

Étude de comportement au séchage de six légumes : carotte, courgettes, pomme de terre, ail, oignon

[24] Boumediene TOUATI, Nov 2008

Étude théorique et expérimental du séchage solaire des feuilles des menthes vertes

[25] André CHARREAU et Rolland CAVAILLÉ

Séchage théorie et calcul

# TABLE DES MATIERES

---

REMERCIEMENTS.....	I
SOMMAIRE.....	II
GLOSSAIRE.....	IV
LISTES DES FIGURES.....	IV
LISTES DES TABLEAUX.....	V
NOTATION.....	V
INTRODUCTION.....	1
RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES.....	2
CHAPITRE I. Généralités sur les aliments.....	3
I.1. Intérêts nutritionnels de fruits et légumes sur la santé : .....	3
I.2. Facteurs de l'altération des fruits et légumes : .....	4
I.2.1. Facteur biologique : .....	5
I.2.2. Facteur physique : .....	5
I.2.3. Facteur enzymatique : .....	5
I.3. Fruit et légumes à Madagascar : .....	6
CHAPITRE II. Notions de séchage .....	8
II.1. Historique de séchage : .....	8
II.2. Définition et objectif : .....	8
II.3. Les enjeux du séchage : .....	9
II.3.1. Technique de séchage traditionnel : .....	9
II.3.2. Technique de séchage moderne: .....	9
CHAPITRE III. Séchage de produit agricole .....	10

III.1.	Caractéristiques de solide humide :	10
III.1.1.	Description de solide humide :	10
III.1.2.	Humidité absolue :	11
III.1.3.	Humidité relative :	11
III.1.4.	Hygroscopicité:	11
III.2.	Caractéristiques de l'air de séchage :	12
III.2.1.	Humidité absolue.....	12
III.2.2.	Humidité relative:	12
III.2.3.	Degré de saturation :	12
III.2.4.	Température de rosée :	12
III.3.	L'eau et les aliments :	13
III.3.1.	État de l'eau :	13
III.3.2.	Activité de l'eau:	14
a.	Définition :	14
b.	Importance de mesure de l'activité de l'eau:	15
c.	L'activité de l'eau et la détérioration des aliments :	16
III.3.3.	Isotherme de sorption :	17
a.	Définition:	17
b.	Détermination expérimental des isotherme de sorption :	17
c.	L'intérêt de l'isotherme de sorption :	19
III.4.	Cinétique de séchage :	19
III.4.1.	Influence de l'air lors du séchage :	21
III.5.	Mode de séchage :	22
III.5.1.	Séchage par ébullition :	22
III.5.2.	Séchage par entraînement :	23

III.6.	Mode de transfert :	23
III.6.1.	Transfert de chaleur :	23
a.	Par conduction :	23
b.	Par convection :	24
c.	Par rayonnement :	24
III.6.2.	Transfert de matière :	24
III.6.3.	Transfert d'eau:	25
III.7.	Prétraitement avant le séchage :	25
III.7.1.	Prétraitement fruits :	25
III.7.2.	Prétraitement des légumes :	26
III.8.	Qualité du produit séché :	27
III.8.1.	Modification biochimique:	27
III.8.2.	Modifications physiques et mécaniques des produits séchés	28
CHAPITRE IV.	Type des séchoirs.....	29
IV.1.	Séchoirs solaires directs :	29
IV.1.1.	Principe de fonctionnement .....	29
IV.1.2.	Avantages .....	29
IV.1.3.	Inconvénients .....	30
IV.1.4.	Type de séchoirs directs.....	30
a.	La boîte de séchage ou séchoir coffre .....	30
b.	Le séchoir intégral à convection naturelle.....	31
c.	Le séchoir solaire "coquillage" .....	32
d.	Le séchoir cabane .....	33
IV.2.	Les séchoirs solaires indirects :	34
IV.2.1.	Principe de fonctionnement:	34

IV.2.2.	Avantages .....	35
IV.2.3.	Inconvénients .....	35
IV.2.4.	Type du séchoir indirect: .....	36
a.	Le séchoir armoire .....	36
IV.3.	Les séchoirs hybrides .....	37
IV.3.1.	Avantages .....	37
IV.3.2.	Inconvénients .....	37
IV.3.3.	Types des séchoirs hybrides .....	37
a.	Séchoir hybride à convection forcée .....	37
b.	Séchoir hybride solaire - gaz: .....	39
IV.4.	Séchoirs mixtes: .....	40
CONCLUSION GENERALE .....		43
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....		I
TABLE DES MATIERES .....		IV

**AUTEUR** : RASOLOMANANA Niry Antsa  
**TITRE DU MEMOIRE** : « Séchage des produits agricoles »  
**NOMBRE DE PAGES** : 43  
**NOMBRE DE TABLEAUX** : 3  
**NOMBRE DE FIGURES** : 16



**RESUME :**

Dans ce travail, nous nous intéressons au séchage des fruits et légumes. Ces produits subissent des modifications de texture, de couleur, et de goût pouvant les rendre impropre à la consommation. Ce qui nous emmène au but du présent mémoire qui est de stocker et de valoriser les fruits et légumes. Pour y remédier, des prétraitements sont adéquats afin de maintenir ses qualités nutritionnelles, puis des opérations de séchage à l'aide des différents séchoirs qui dépendent des produits à sécher.

**MOTS-CLES** : Fruit, Légume, Séchage, Séchoir

**ABSTRACT:**

In this work, we are interested about drying fruits and vegetables. These products undergo modifications of texture, color, and taste which can make them unsuitable to consumption. It makes us along to the goal of the present memory which is to store and to develop fruits and vegetables. To cure it, pretreatments are adequate to maintain its nutritional qualities, and then drying's operations of using the various driers which depend on the products to dry.

**KEYS WORDS:** Fruit, Vegetable, Drying, Drier

**Contact de l'auteur: 0330214554 / email: antsarasolomanana1**